



برآورد پاسخ لرزه‌های قاب‌های خمشی فولادی در سطح آستانه فروریزش با استفاده از یک روش تحلیل پوش‌اور مودال پیشنهادی

ساسان عشقی^{*}، محمدمهدی مداح، علیرضا گرکانی نژاد

پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۳۰

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۴

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۵

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۲/۱۱

کلمات کلیدی:

تحلیل پوش‌اور مودال

روش‌های ترکیب پاسخ‌های مودال

الگوریتم‌های بهینه‌سازی

ارزیابی فروریزش لرزه‌ای

قاب خمشی فولادی میان‌مرتبه

خلاصه: برآورد پارامترهای تقاضای مهندسی مبتنی بر جابه‌جایی در فرآیند ارزیابی فروریزش لرزه‌های سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، یک روش پوش‌اور مودال به منظور برآورد این پارامترها توسعه داده می‌شود. در روش پیشنهادی، ابتدا یک معیار فروریزش برای تعیین سطح آستانه فروریزش در تحلیل‌های پوش‌اور پیشنهاد می‌گردد. این معیار براساس منحنی ظرفیت طبقات ارائه شده و تنها به مشخصات سازه وابسته است. سپس به منظور تعیین پارامترهای پاسخ مبتنی بر جابه‌جایی در سطح آستانه فروریزش سازه، یک روش ترکیب پاسخ‌های مودال ارائه می‌شود. در این روش، پاسخ‌های حاصل از تحلیل پوش‌اور مودال با ضرایب حاصل از بهینه‌سازی به صورت جبری ترکیب می‌گردند. دو روش بهینه‌سازی برخورد اجسام و بهینه‌سازی ازدحام ذرات به منظور استخراج این ضرایب مورد استفاده قرار می‌گیرند. بهینه‌سازی بر اساس نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی سه قاب خمشی فولادی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه انجام شده است. دو قاب ۹ و ۱۲ طبقه نیز به منظور ارزیابی روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج تحلیل‌های صورت گرفته نشان می‌دهد روش پوش‌اور پیشنهادی پروفیل دررفت و جابه‌جایی طبقات در آستانه فروریزش سازه را با دقت بسیار خوبی تخمین می‌زند. این روش بسیار کاربردی بوده و برای عموم مهندسين قابل استفاده می‌باشد.

۱- مقدمه

EDP متداول در ارزیابی‌های لرزه‌ای است و کنترل آن در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای نیز مد نظر قرار دارد [۳] لذا در این مطالعه، هدف اصلی برآورد پروفیل دررفت طبقات در آستانه فروریزش می‌باشد. دقیق‌ترین و جامع‌ترین روش برآورد مقادیر EDP سازه، استفاده از روش‌های دینامیکی غیرخطی تحت گروه شتاب‌نگاشت‌های زلزله است. این روش‌ها با وجود دقت بالا، زمان‌بر بوده و مستلزم هزینه بالای محاسباتی هستند و تفسیر نتایج حاصل از آن پیچیده است. استفاده از روش‌های استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور) به عنوان روش‌های جایگزین، رواج بالایی دارد [۴] و کاربرد آنها در دستورالعمل‌های بهسازی از قبیل ASCE 41 نیز مورد تأیید قرار گرفته است [۵] در تحلیل پوش‌اور کلاسیک، سازه به صورت غیرخطی مدل‌سازی و سپس با یک الگوی بار مطابق شکل مود اول تا رسیدن به جابه‌جایی هدف مشخص، به صورت مونوتونیک بارگذاری می‌شود. کراوینگر و

بیشترین خسارات در زمین‌لرزه‌ها بر اثر ایجاد آسیب‌های شدید سازه‌ای، از دست رفتن پایداری سازه‌ها و فروریزش ساختمان‌های موجود به وجود می‌آید [۱] لذا ارزیابی فروریزش لرزه‌ای ساختمان‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این فرآیند برآورد دقیق مقادیر تقاضای مهندسی (EDP^1) بسیار حائز اهمیت است. تحقیقات نشان داده است که نسبت دررفت طبقات نسبت مستقیمی با میزان خرابی‌ها در سازه دارد [۲] پروفیل دررفت طبقات در زمان فروریزش، مکانیزم کلی فروریزش را نشان می‌دهد و طبقات دارای تمرکز خرابی را ارائه می‌نماید. مقدار حداکثر نسبت دررفت طبقات^۱ (IDR_{max}) نیز یک

1 Engineering Demand Parameter

2 Inter-story Drift Ratio

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: s.esghhi@iees.ac.ir



شکل‌پذیری تقاضا، کاهش می‌یابد، زیرا روش ترکیب مودال مورد استفاده در آن در محدوده غیر خطی نادرست بوده و از دقت کافی برخوردار نیست. یکی از جدیدترین روش‌های چندبار تکرار توسط گوان و همکاران پیشنهاد شده است [۱۳] که در آن نتایج حاصل از تحلیل پوش‌اور با سه الگوی بارگذاری شکل مد اول، یکنواخت و متمرکز در بام با ضرایبی پیشنهادی ترکیب می‌گردند.

در تحقیق پیش‌رو، یک روش جدید برای ترکیب پاسخ‌های پوش‌اور مودال در سطح عملکرد آستانه فروریزش که سازه کاملاً وارد محدوده غیرخطی شده و دقت روش ترکیب SRSS کاهش پیدا می‌کند، پیشنهاد می‌گردد. در این روش پاسخ‌های حاصل از تحلیل پوش‌اور مودال، با استفاده از ضرایب ثابت پیشنهادی به صورت جبری با یکدیگر جمع می‌شود. این ضرایب، با استفاده از دو روش متداول بهینه‌سازی به گونه‌ای تعیین شدند که میزان خطا در مقایسه با نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی حاصل از ۴۴ رکورد دور از گسل FEMA P۶۹۵ حداقل گردد. روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات و بهینه‌سازی برخورد اجسام روش‌هایی هستند که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در روش پوش‌اور پیشنهادی، یک روش جدید نیز به منظور تعیین جابه‌جایی هدف متناظر با سطح عملکرد آستانه فروریزش سازه ارائه می‌گردد. در ادبیات فنی در این زمینه روش‌های مختلفی ارائه شده است که در آنها از اصلاح جابه‌جایی سازه یک درجه آزاد معادل، جابه‌جایی هدف سازه اصلی حاصل می‌شود. در روش N۲ جابه‌جایی هدف سازه یک درجه آزاد از تقاطع منحنی ظرفیت سازه یک درجه آزاد معادل با طیف‌های غیرالاستیک تقاضا به دست می‌آید [۱۵] در روش ضرایب که در دستورالعمل‌های بهسازی نیز ارائه شده است، جابه‌جایی سازه یک درجه آزاد معادل از طیف‌های طراحی و یا طیف رکوردهای زمین لرزه حاصل می‌شود [۵] در روش پوش‌اور مودال نیز سازه یک درجه آزاد معادل تحت تحلیل تاریخچه زمانی قرار می‌گیرد [۹] جابه‌جایی هدف در این روش‌ها به جابه‌جایی سازه یک درجه آزاد معادل و به طیف یا رکورد زلزله وابسته است. در روش پیشنهادی این پژوهش، جابه‌جایی سطح آستانه فروریزش به گونه‌ای تعریف می‌شود که به رکورد یا طیف زلزله وابسته نبوده و تنها به سازه و الگوی بارگذاری وابسته است. در این روش، ترکیبی از دریافت طبقات و برش طبقات در قالب منحنی ظرفیت طبقه برای تعریف معیار آستانه فروریزش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

سنویراتنا نشان دادند که این روش برای سازه‌های کم ارتفاع همراه با خصوصیات یکسان غیرخطی در ارتفاع، نتایج قابل قبولی ارائه می‌کند؛ ولی در سازه‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه یا ساختمان‌های نامنظم که موده‌های بالا در آنها اهمیت دارند دارای ضعف است [۶] در ادبیات فنی روش‌های نوینی برای بهبود نتایج روش پوش‌اور کلاسیک بر مبنای تغییر پارامترهای مهم تحلیل پوش‌اور شامل ثابت یا بهنگام‌شونده بودن الگوی بار، شکل الگوی بار جانبی و جابه‌جایی هدف سازه ارائه شده است. روش‌های با الگوی بار بهنگام‌شونده با وجود اینکه پاسخ‌های سازه را بهبود می‌دهند، کاربرد پیچیده و هزینه محاسباتی بالایی دارند و نیازمند استفاده از نرم افزارهای خاص یا کدنویسی‌های مجزا هستند [۲، ۷، ۸] لذا در میان مهندسين زلزله رواج زیادی پیدا نکرده و وارد دستورالعمل‌های ارزیابی نشده‌اند.

بار جانبی وارده در روش‌های نوین پوش‌اور، عموماً ترکیبی از شکل موده‌های اصلی سازه بوده و به صورت یک‌بار تکرار یا چندبار تکرار به سازه اعمال می‌گردد. در روش‌های یکبار تکرار، شکل بارگذاری از ترکیب اشکال مودی با ضرایب ثابت یا وابسته به پارامترهای سازه حاصل می‌شود [۷، ۹-۱۱] در روش‌های چند بار تکرار، چند الگوی بارگذاری از ترکیب اشکال مودی حاصل شده و به سازه اعمال می‌گردد که پاسخ نهایی سازه ترکیبی از نتایج این تحلیل‌ها یا پوش آنها است [۲، ۱۲ و ۱۳]

یکی از روش‌های نوین چندبار تکرار که از یک طرف اثرات موده‌های بالاتر را در نظر گرفته و دقت مناسبی در برآورد پاسخ انواع سازه‌ها دارد و از طرفی کاربرد آن از پیچیدگی زیادی برخوردار نیست، روش پوش‌اور مودال (MPA)^۱ است. در این روش که توسط چوپرا و گل [۹] توسعه یافته است، بارگذاری به صورت ثابت و بر مبنای شکل مود اول تا سوم سازه تا جابه‌جایی هدف متناظر هر مود صورت می‌گیرد. پاسخ نهایی سازه از ترکیب SRSS^۲ و یا CQC^۳ نتایج پوش‌اور مودی تعیین می‌شود. چینتتاپاک و چوپرا دقت این روش را برای سازه‌های یک دهانه ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۸ طبقه با ۵ سطح مختلف شکل پذیری مورد ارزیابی قرار دادند [۱۴] نتایج نشان داد این روش در تخمین تقاضای لرزه‌های سازه‌ها برای ارتفاع‌های متفاوت و سطوح شکل پذیری مختلف دقت مناسبی ارائه می‌کند. با این وجود، دقت این روش با افزایش

1 Modal Pushover Analysis
2 Square Root of the Sum of the Squares
3 Complete Quadratic Combination

در این مطالعه، سه قاب خمشی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه طراحی شده با روش حالات حدی براساس استاندارد زلزله ۲۸۰۰ به عنوان ساختمان‌های مرجع در نظر گرفته شده‌اند و روش پیشنهادی براساس نتایج این ساختمان‌ها به دست آمده است. به عنوان ساختمان‌های نمونه یک ساختمان ۹ طبقه SAC و یک ساختمان ۱۲ طبقه طراحی شده مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج آن ارائه گردیده است.

۲- ساختمان‌های مورد مطالعه

تحقیقات آزمایشگاهی متعددی نشان می‌دهد که در ارزیابی فروریزش لرزه‌ای قاب‌های خمشی منظم در پلان و ارتفاع، پاسخ‌های مدل دوبعدی تفاوت قابل توجهی با مدل سه بعدی ندارد [۱۶ و ۱۷] از این رو در این گروه از ساختمان‌ها استفاده از مدل‌های دو بعدی

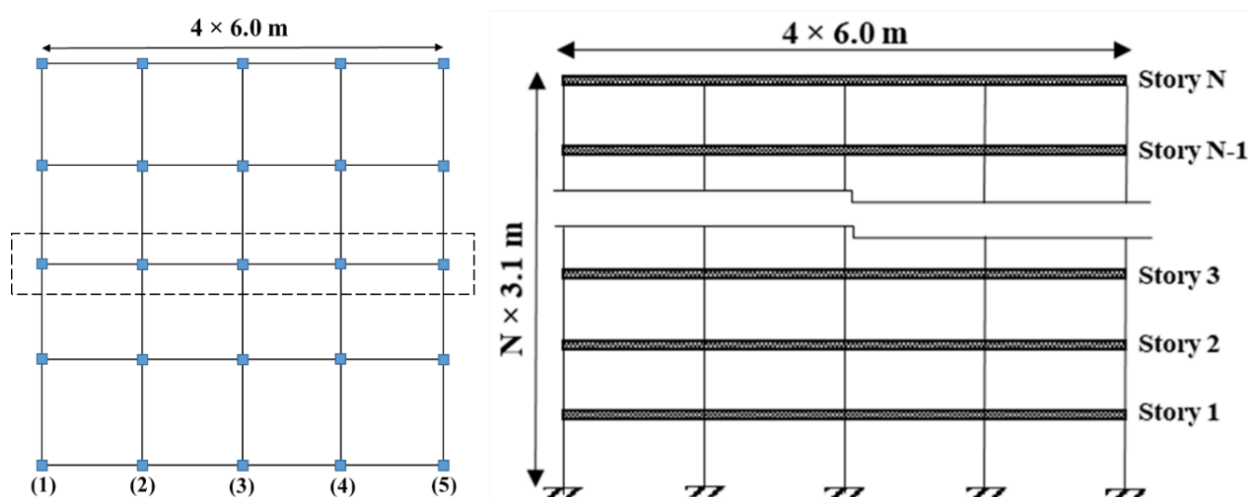
در عین حال که از حجم محاسبات خصوصاً در روش‌های دینامیکی تاریخچه زمانی می‌کاهد، پاسخ‌های مناسبی نیز ارائه می‌نماید [۱۸ و ۱۹] همچنین در دستورالعمل‌های مرتبط با ارزیابی فروریزش لرزه‌ای مانند FEMA P695 مدل‌سازی دوبعدی ساختمان‌های منظم مورد تایید قرار گرفته است [۲۰] لذا در این تحقیق، یک قاب دوبعدی از هر ساختمان انتخاب شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بخش قابل توجهی از ساختمان‌های فولادی میان‌مرتبه متداول در ایران حداقل در یک جهت از سیستم قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط استفاده می‌کنند. در این تحقیق، سه ساختمان ۵، ۸ و ۱۱ طبقه منظم در پلان و ارتفاع با کف‌های عرشه فولادی (کامپوزیت) طبق استاندارد ۲۸۰۰ [۲۱] و روش حالات حدی مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۲۲] طراحی شده و به عنوان ساختمان‌های مرجع

جدول ۱. جزئیات بارگذاری ثقلی ساختمان‌های مورد مطالعه

Table 1. The gravity loading details of the under-study IMRFs

نوع	بار مرده (Dead Load)	بار زنده (Live Load)
کف مسکونی	500 Kg/m ²	200 Kg/m ²
کف بام	500 Kg/m ²	150 Kg/m ²
دیوار پیرامونی	600 Kg/m	-



شکل ۱. نمای قاب‌های خمشی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه مورد مطالعه

Fig. 1. The elevation view of the under-study 5, 8 and 11-story IMRFs

جدول ۲. مشخصات مقاطع قاب‌های خمشی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه مورد مطالعه

Table 2. The section details of the under-study 5, 8 and 11-story IMRFs

		St 1	St 2	St 3	St 4	St 5	St 6	St 7	St 8	St 9	St 10	St 11	
5st	Beam	Bays 1, 4	7	7	8	8	9						
		Bays 2, 3	8	8	8	8	9						
	Column	Axis 1, 5	4	4	4	5	5						
		Axis 2, 4	4	4	5	5	5						
		Axis 3	4	4	5	5	5						
8st	Beam	Bays 1, 4	6	6	7	7	7	8	8	9			
		Bays 2, 3	8	8	8	8	8	8	8	8	9		
	Column	Axis 1, 5	3	3	3	4	4	5	5	5			
		Axis 2, 4	3	3	4	4	4	5	5	5			
		Axis 3	3	3	4	4	4	5	5	5			
11st	Beam	Bays 1, 4	6	6	6	6	6	6	8	8	8	8	10
		Bays 2, 3	6	6	7	7	8	8	8	8	8	8	10
	Column	Axis 1, 5	1	1	1	3	3	3	3	4	4	4	4
		Axis 2, 4	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4
		Axis 3	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4

جدول ۳. مشخصات مقاطع المانهای قاب‌های خمشی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه مورد مطالعه

Table 3. The member details of the under-study 5, 8 and 11-story IMRFs

Tag	ستون‌ها با مقطع HSS		Tag	تیرها با مقطع I			
	D(cm)	t (cm)		d (cm)	b _f (cm)	t _f (cm)	t _w (cm)
1	32.00	2.00	6	50.00	22.00	2.00	1.10
2	30.00	2.00	7	44.00	20.00	1.50	1.00
3	25.00	2.00	8	40.00	20.00	1.50	1.00
4	22.00	2.00	9	36.00	18.00	1.20	1.00
5	20.00	2.00	10	32.00	16.00	1.20	1.00

مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بارگذاری ثقلی این ساختمان‌ها طبق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۲۳] طبق جدول ۱ انجام شده، جرم مؤثر لرزه‌ای از ترکیب $1.05 \text{ Dead} + 1.25 \text{ Live}$ و وزن مؤثر از ترکیب $\text{Dead} + \text{Live}$ تعیین گردیده است [۲۰] در این ساختمان‌ها مدول الاستیسیته فولاد برابر 200 GPa ، تنش تسلیم فولاد تیرها برابر

مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بارگذاری ثقلی این ساختمان‌ها طبق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۲۳] طبق جدول ۱ انجام شده، جرم مؤثر لرزه‌ای از ترکیب $1.05 \text{ Dead} + 1.25 \text{ Live}$ و وزن مؤثر از ترکیب $\text{Dead} + \text{Live}$ تعیین گردیده است [۲۰] در این ساختمان‌ها مدول الاستیسیته فولاد برابر 200 GPa ، تنش تسلیم فولاد تیرها برابر

جدول ۴. دوره تناوب و درصد جرم مودی سه مود اول قاب‌های مورد مطالعه
Table 4. Three periods and modal mass ratios of the under-study IMRFs

Model	Mode 1		Mode 2		Mode 3	
	T ₁ (s)	Mass%	T ₂ (s)	Mass%	T ₃ (s)	Mass%
5st	1.27	85%	0.44	12%	0.25	3%
8st	1.85	82%	0.66	13%	0.39	5%
11st	2.16	80%	0.80	14%	0.46	6%

نهایی (θ_p) تعریف می‌گردد. همچنین سه مود زوال چرخه‌ای مقاومت پایه، مقاومت پسا-بیشینه و زوال سختی بارگذاری-باربرداری برای المان تعریف می‌شود. یکی از مهم‌ترین مزایای این روش مدل‌سازی ارائه پارامتری به منظور در نظر گرفتن اثرات زوال چرخه‌ای در تحلیل‌های تاریخچه زمانی براساس انرژی جذب شده توسط اجزای سازه‌ای است. تحقیقات نشان داده است که در سازه‌های با سیستم قاب خمشی تأثیرات زوال اجزاء، فروریزش جانبی را تسریع می‌کنند. منحنی‌های آماری حاصل از قاب‌هایی که اجزای آن زوال سختی و مقاومت را در نظر نمی‌گیرند، نشان می‌دهد که در این شرایط سازه حتی در تغییرشکل‌های نسبی بزرگ نیز پایداری خود را حفظ می‌کند. در حالی که در قاب‌هایی که زوال سختی و مقاومت در مدل‌سازی آن‌ها دیده شده است، حتی در زمانی که تنها اجزای خمشی در نظر گرفته شده و از شکست‌های برشی و محوری صرف‌نظر شده باشد، فروریزش ناشی از دریافت زیاد یک طبقه بدون مرز گسترش پیدا کرده و فروریزش جانبی رخ می‌دهد [۱۶]

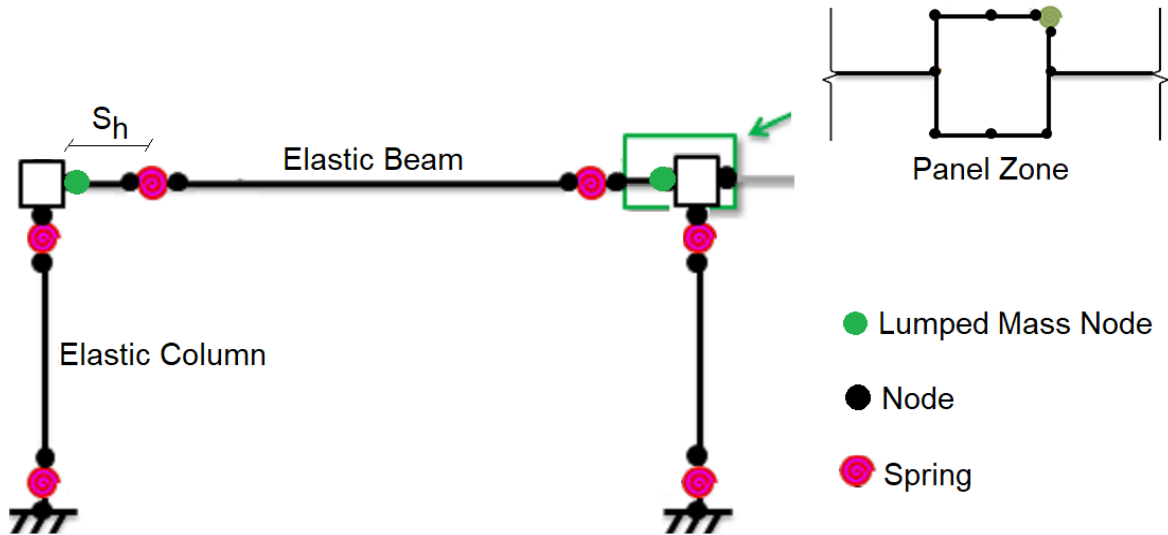
در این تحقیق با توجه به اینکه هدف، مدل‌سازی هر چه دقیق‌تر قاب‌های خمشی است، رفتار چشمه اتصال نیز در مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود. تحقیقات متعدد نشان داده است این المان تأثیر بسزایی بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی دارند [۳۰ و ۳۱] با این وجود، در برخی تحقیقات در شرایطی که ابعاد مقاطع تیر و ستون ضوابط دستورالعمل‌های ارزیابی را ارضاء کنند با هدف ساده‌سازی مدل‌ها و افزایش سرعت تحلیل از آن صرف‌نظر می‌شود [۳۲] به منظور مدل‌سازی چشمه اتصال از روش پیشنهادی گوپتا و کراوینکلر در سال ۲۰۰۰ استفاده می‌شود [۳۳] در این روش، چشمه اتصال شامل هشت المان الاستیک صلب می‌شود که با یک فنر پیچشی در یک گوشه و سه مفصل در گوشه‌های دیگر به یکدیگر متصل

در جدول ۴ دوره تناوب و درصد جرم مودی سه مود اول قاب‌های مورد مطالعه ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در هر سه قاب، درصد جرم مؤثر مود اول و دوم ساختمان بالای ۹۰٪ است، لذا پیش‌بینی می‌شود که بتوان از تأثیر مود سوم در پاسخ‌های سازه می‌توان صرف نظر نمود.

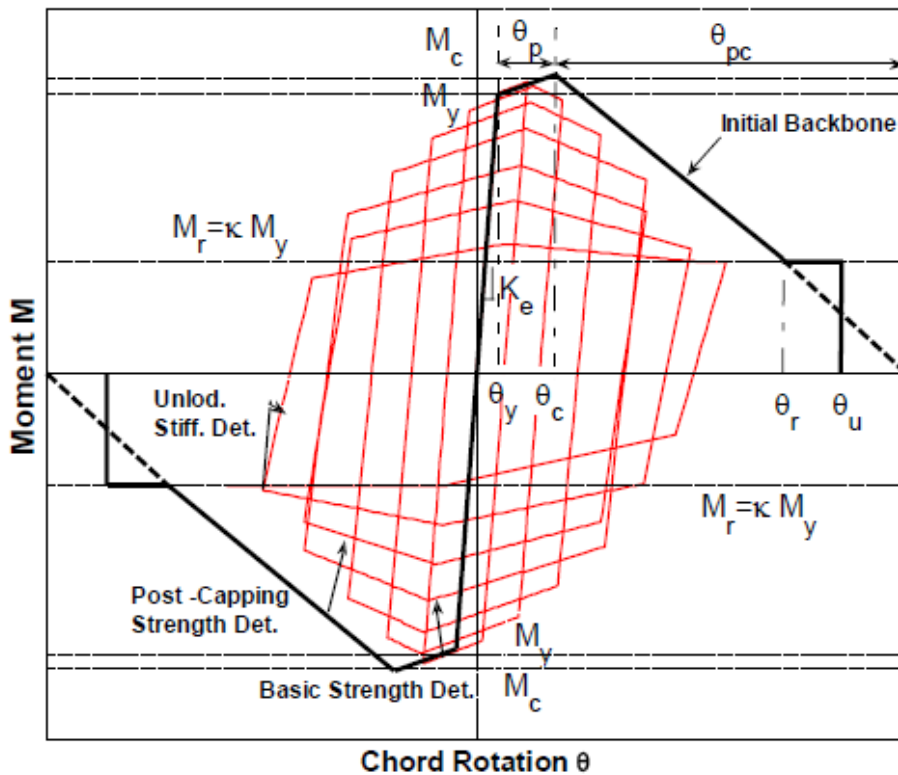
۱-۲- مدل‌سازی نرم‌افزاری

در این مطالعه، از نرم‌افزار OpenSEES^۱ به منظور مدل‌سازی سازه‌های مورد مطالعه استفاده می‌شود. ارزیابی فروریزش لرزه‌ای سازه‌ها مستلزم بکارگیری مدل‌های نرم‌افزاری است که رفتار غیرخطی سازه‌ها و مودهای خرابی مؤثر در فروریزش سازه را در نظر بگیرد. در این مطالعه اجزای اصلی قاب‌های خمشی شامل تیر، ستون و چشمه اتصال طبق شکل ۲ پیکربندی می‌شوند. تیرها و ستون‌ها به صورت الاستیک با مفاصل پلاستیک متمرکز با مصالح IMK^۲ اصلاح شده در دو انتها مدل می‌شوند و اثرات مرتبه دوم پی-دلتا در تعریف ستون‌های قاب اعمال می‌گردند. مدل IMK اصلاح شده در تحقیقاتی که توسط لیگنوس و کراوینکلر در انجام شده است [۲۴-۲۶] بر مبنای مدل بک-بون^۳ مفاصل پلاستیک و مدل زوال چرخه‌ای مبتنی بر انرژی ارائه شده توسط ایبارا، مودینا و کراوینکلر [۲۷ و ۲۸] ارائه گردیده است (شکل ۳). منحنی بک-بون توسط سه پارامتر مقاومتی لنگر تسلیم مؤثر (M_y)، لنگر تسلیم بیشینه (M_c) و لنگر پسماند (M_r) و چهار پارامتر تغییر شکلی دوران تسلیم (θ_y)، دوران پلاستیک پیشا-بیشینه^۴ (θ_p)، دوران پلاستیک پسا-بیشینه^۵ (θ_{pc}) و ظرفیت دورانی

1 Open System for Earthquake Engineering Simulation
 2 Ibarra-Medina-Krawinkler
 3 Backbone
 4 Pre-Capping
 5 Post-Capping



شکل ۲. پیکربندی کلی قاب خمشی شامل تیر و ستون الاستیک، فنرهای دورانی مربوطه و چشمه اتصال [۲۹]
 Fig. 2. The configuration of the IMRFs including beam, column, rotational springs and panel zone



شکل ۳. پارامترهای منحنی بک-بون و انواع زوال چرخه‌ای در مدل *IMK* اصلاح شده [۲۴]
 Fig. 3. The back-bone curve parameters and the cyclic deteriorations in the modified *IMK* model

می‌گردند. همچنین در این مدل‌سازی، جرم و وزن طبقات به نسبت سطح بارگیر بین گره‌ها تقسیم شده و به صورت متمرکز بر روی گره‌های متصل به دو سمت چشمه اتصال وارد می‌شود. روش مدل‌سازی استفاده شده در این تحقیق، توسط لیگنوس و ادز برای یک قاب خمشی فولادی دو طبقه در راهنمای برنامه OpenSEES ارائه شده و صحت‌سنجی گردیده است [۲۹ و ۳۴] همچنین لیگنوس با استفاده از این رهیافت، نتایج آزمایش میز لرزه E-Defense بر روی یک قاب چهار طبقه را صحت‌سنجی کرده است [۳۵]

۳- معیار فروریزش پیشنهادی

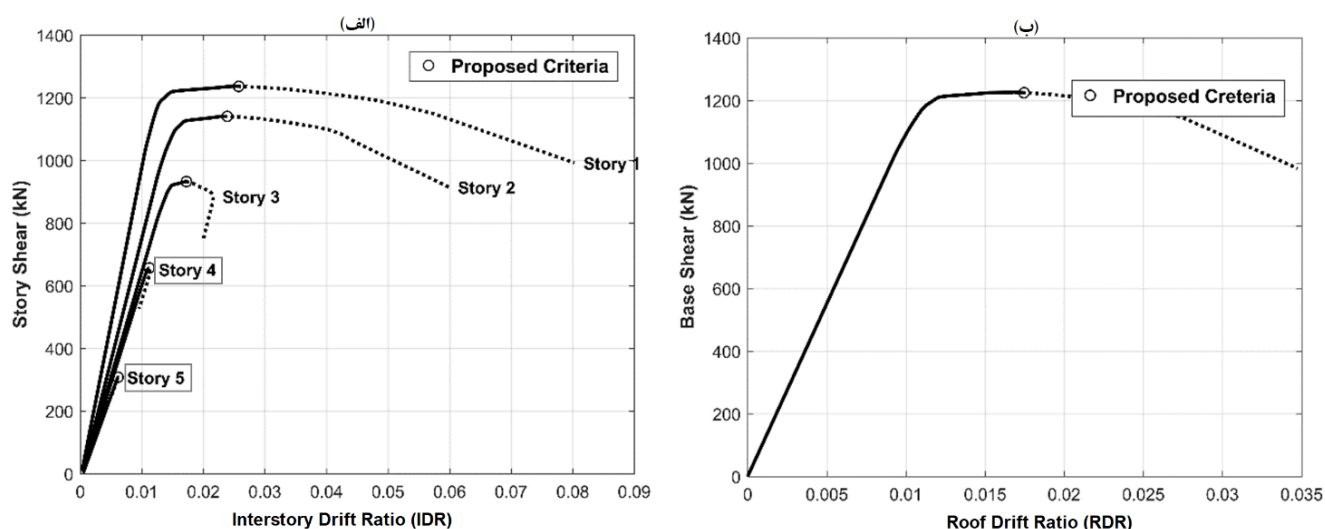
تحقیقات نشان داده است پارامترهای نسبت دریافت بین طبقه‌ای (IDR_{st}) و برش طبقات (V_{st}) نسبت مستقیمی با میزان خرابی‌های ایجاد شده در سازه دارند [۳۶] در این تحقیق با ترکیب این دو شاخص و استخراج منحنی ظرفیت طبقات، یک معیار جدید برای تعریف سطح آستانه فروریزش (CP^1) پیشنهاد می‌شود که تنها به سازه و الگوی بارگذاری وابسته است و از نظر مفهومی با شروع فرآیند خرابی

گسترده در سازه متناسب است. در طول تحلیل پوش‌آور، منحنی ظرفیت تعدادی از طبقات در مختصات $IDR_{st}-V_{st}$ شکل بازگشتی پیدا می‌کند. این پدیده متناظر با شروع تمرکز خرابی در یک یا چند طبقه از ساختمان است که باعث ایجاد شکل بازگشتی در منحنی ظرفیت سایر طبقات می‌شود. در این پژوهش، گام متناظر با اولین بازگشت منحنی ظرفیت طبقات سازه به عنوان شروع فرآیند خرابی عمده و متناظر با سطح عملکرد CP در نظر گرفته می‌شود. این روش به صورت گام به گام شامل مراحل زیر است:

(۱) تحلیل پوش‌آور سازه انجام می‌شود.
(۲) منحنی ظرفیت طبقات در مختصات $IDR_{st}-V_{st}$ برای کلیه طبقات استخراج می‌گردد.

(۳) گام متناظر با اولین بازگشت در منحنی ظرفیت طبقات به عنوان آستانه فروریزش CP سازه تعیین می‌شود.
در شکل ۴ برای نمونه روند تعیین سطح آستانه فروریزش یک قاب ۵ طبقه تحت بارگذاری مطابق شکل مود اول سازه ارائه گردیده است. جابه‌جایی بام متناظر با این سطح نیز نشان داده شده است. گام مشخص شده با علامت 'o' در منحنی ظرفیت طبقات، گامی است که منحنی ظرفیت آن طبقه شکل بازگشتی پیدا می‌کند. گامی که منحنی ظرفیت در اولین طبقه از سازه شکل بازگشتی پیدا کند،

1 Collapse Prevention



شکل ۴. الف) استخراج گام متناظر با آستانه فروریزش با روش پیشنهادی، ب) جابه‌جایی نسبی بام متناظر با سطح آستانه فروریزش
Fig. 4. a) Extracting the CP level step by the proposed criterion, b) the roof drift ratio corresponding to the CP level

معادل آستانه فروریزش CP سازه است.

در این قاب اولین بازگشت منحنی ظرفیت در طبقات چهارم و پنجم مشاهده می‌شود. در این گام از این طبقات باربرداری شده و خرابی در طبقات اول تا سوم متمرکز می‌گردد. با ادامه بارگذاری، از طبقه سوم نیز باربرداری شده و خرابی در طبقات اول و دوم ادامه می‌یابد تا اینکه این طبقات دچار فروریزش می‌گردند.

۴- روش پوش اور پیشنهادی

از دو دهه گذشته که روش پوش اور کلاسیک مبتنی بر شکل مود اول سازه به عنوان راه‌یافتی جایگزین برای تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی معرفی شد، روش‌های پوش اور مختلفی با هدف بهبود دقت و عملکرد این روش‌ها ارائه گردیده‌اند که در مقدمه به آنها اشاره گردید. در این روش‌ها یک مدل غیرخطی از سازه تحت بارگذاری با الگوی بار جانبی افزایشی ثابت یا بهنگام شونده قرار می‌گیرد تا زمانی که تغییرمکان نقطه کنترل از جابه‌جایی هدف فراتر رود یا سازه فرو بریزد. جابه‌جایی هدف T حداکثر جابه‌جایی محتمل سازه است که براساس سطح عملکرد متناسب با هدف ارزیابی به دست می‌آید.

در این مطالعه، هدف ارائه یک روش پوش اور به منظور برآورد پاسخ‌های مبتنی بر جابه‌جایی سازه در سطح آستانه فروریزش سازه است به گونه‌ای که فاقد پیچیدگی‌های روش‌های نوین پوش اور بوده و برای عموم مهندسين قابل فهم و استفاده باشد. در این روش، بارگذاری به صورت ثابت و طبق شکل مود اول تا سوم سازه صورت می‌گیرد که در نرم‌افزارهای تجاری روشی متداول است. جابه‌جایی هدف در سطح آستانه فروریزش نیز همان‌گونه که در بخش ۳ ارائه شد، به گونه‌ای تعیین می‌شود که تنها به سازه و الگوی بارگذاری وابسته است و از خروجی‌های نرم‌افزاری به راحتی قابل استخراج می‌باشد. پاسخ نهایی سازه در این روش، از جمع پاسخ‌های مودال سازه بر اساس رابطه (۱) حاصل می‌گردد:

$$EDP_{OMPA} = \sum_{i=1}^m \alpha_i EDP_i \quad (1)$$

در این معادله m تعداد مودهای در نظر گرفته شده، α_i ضریب ترکیب مودی مود i ام و EDP_i و EDP_{OMPA} به ترتیب پارامتر تقاضای مهندسی^۱ مبتنی بر جابه‌جایی در سطح آستانه فروریزش حاصل از

1 Engineering Demand Parameter

تحلیل‌های پوش اور مودی مود i ام و روش پیشنهادی هستند که پوش اور مودال بهینه شده (OMPA^۲) نام‌گذاری می‌شود. ضرایب α_i استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و براساس پاسخ‌های سه قاب خمشی منظم با شکل‌پذیری متوسط ۵، ۸ و ۱۱ طبقه در آستانه فروریزش تعیین و پیشنهاد شده‌اند. در ساختمان‌های میان‌مرتبه منظم، صرف‌نظر کردن از تأثیر مود سوم در پاسخ‌های محلی سازه تأثیر قابل ملاحظه‌ای در میزان خطا ندارد [۲] با توجه به اینکه یکی از اهداف این تحقیق توسعه روشی ساده و مهندسی است، ضرایب ترکیب مودی با در نظر گرفتن دو و سه مود اول به دست می‌آید و دقت نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه این بخش، فرآیند بهینه‌سازی مورد استفاده به منظور استخراج این ضرایب ارائه می‌شوند.

۱-۴- استخراج ضرایب ترکیب مودی با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی

هدف از بهینه‌سازی یافتن بهترین جواب قابل قبول، با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مسأله است. به منظور مقایسه جواب‌های مختلف یک مسأله و انتخاب جواب بهینه، تابعی به نام تابع هدف تعریف می‌شود که به طبیعت مسأله وابسته است. همچنین هر مسأله بهینه‌سازی دارای تعدادی متغیر مستقل است که آنها را متغیرهای طراحی می‌نامند. هدف از بهینه‌سازی تعیین متغیرهای طراحی است، به گونه‌ای که تابع هدف کمینه یا بیشینه شود که این امر با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی انجام می‌شود. تحقیقات نشان داده است که الگوریتم‌های ابتکاری که با الهام از طبیعت، فیزیک و انسان طراحی شده‌اند در حل مسائل مشکل ترکیبی نتایج بسیار خوبی داشته است. کاربرد این روش‌ها در مهندسی سازه نیز در شاخه‌های مختلفی توسعه پیدا کرده است. در این مطالعه، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO^۳) [۳۷] و الگوریتم بهینه‌سازی برخورد اجسام (CBO^۴) [۳۸] به منظور استخراج ضرایب ترکیب مودی مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور تعیین این ضرایب، ابتدا سازه‌های مورد مطالعه تحت تحلیل پوش اور مودال با الگوی بار مطابق اشکال مودهای اول تا سوم قرار گرفته و منحنی‌های ظرفیت آنها و گام معادل آستانه فروریزش آنها با معیار پیشنهادی در این پژوهش به دست آمد که در

2 Optimized Modal Pushover Analysis

3 Particle Swarm Optimization

4 Colliding Bodies Optimization

$$\|e\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n e_j^2} \quad (3)$$

در این معادلات n تعداد طبقات سازه، IDR_{j-IDA} زانندیس طبقه، دررفت طبقه j ام حاصل از تحلیل IDA ، دررفت طبقه j ام حاصل از تحلیل پوش اور پیشنهادی، e_j بردار خطای هر طبقه و $\|e\|$ تابع هدف می باشد. در جدول ۵ ضرایب مودی حاصل از فرآیندهای بهینه سازی در دو حالت با در نظر گرفتن دو و سه مود ارائه شده اند. این ضرایب با هر دو روش PSO و CBO کاملاً یکسان به دست آمده اند که نشان می دهد روش بهینه سازی تأثیری بر ضرایب بدست آمده ندارد. با این وجود با استفاده از روش PSO ضرایب با سرعت بالاتری نسبت به روش CBO حاصل شدند.

بررسی ضرایب پیشنهادی روش OMPA نشان می دهد که مطابق شکل ۶ میان افزایش تعداد طبقات و ضرایب ترکیب مودی مودهای اول تا سوم روابطی خطی طبق رابطه (۴) قابل برآزش است که در آن i شماره مود است. بدین صورت که با افزایش تعداد طبقات، ضریب مشارکت مود اول کاهش و ضرایب مود دوم و سوم افزایش پیدا می کنند. در جدول ۶ ضرایب مربوط به رابطه (۴) (ضرایب a_i و b_i) برای دو حالت در نظر گرفتن دو مود و سه مود ارائه شده است.

$$\dot{a}_i = a_i N + b_i \quad (4)$$

با استفاده از رابطه (۴) و مقادیر جدول ۶ می توان ضرایب ترکیب مودی را برای قابهای خمشی فولادی میان مرتبه (۴ تا ۱۲ طبقه) محاسبه و پاسخهای مبتنی بر جابه جایی آنها را در سطح آستانه فروریزش استخراج نمود.

شکل ۵ ارائه شده است. سپس پروفیل دررفت طبقات این سازه ها در سطح آستانه فروریزش برای هر مود استخراج گردید.

در گام بعد، سازه های مورد مطالعه با روش IDA به عنوان روش مرجع و با استفاده از ۲۲ جفت رکورد دوزاز گسل FEMA P695 تحلیل شدند. در این تحلیل ها، شتاب طیفی متناظر با پریود مود اول سازه $Sa(T_1)$ به عنوان پارامتر شدت لرزه ای و حداکثر نسبت دررفت طبقات (IDR_{max}) به عنوان پارامتر تقاضای مهندسی در نظر گرفته شده اند [۲۰] در این تحلیل، سطح آستانه فروریزش در تحلیل IDA زمانی در نظر گرفته می شود که شیب منحنی IDA در مختصات ($Sa(T_1 - IDR_{max})$) از ۲۰٪ شیب اولیه منحنی در حالت الاستیک کمتر شود و سازه ۸۰ درصد سختی اولیه خود را از دست بدهد [۳۹] در شکل ۵ منحنی های IDA قاب های مورد مطالعه به همراه میانه شتاب فروریزش متناظر با سطح آستانه فروریزش آنها ارائه شده است.

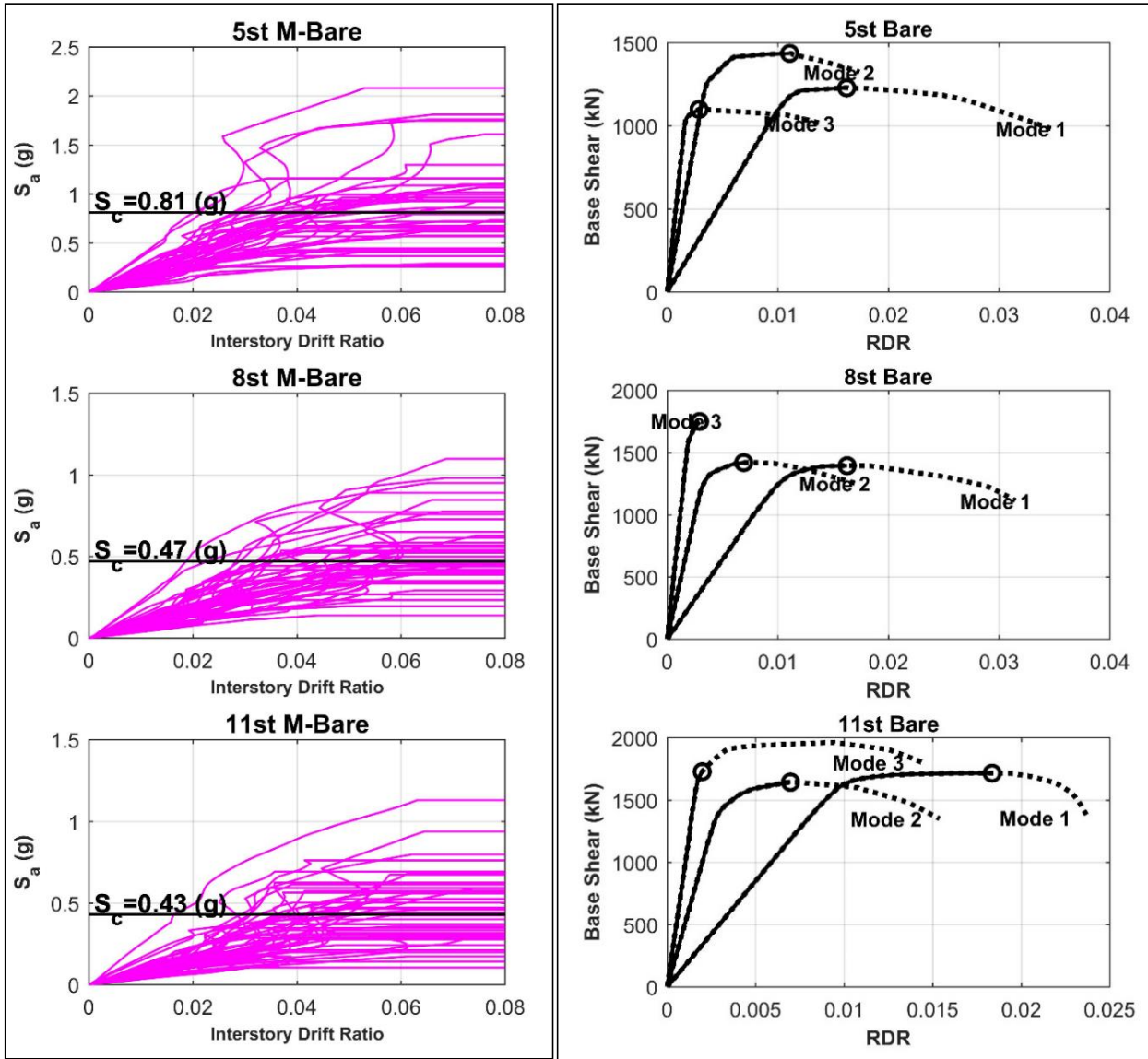
در تحلیل های IDA مقدار دررفت هر طبقه برابر میانه مقادیر دررفت آن طبقه تحت شتاب نگاشت های مورد بررسی است. از این رو در گام بعد، میانه دررفت کلیه طبقات در آستانه فروریزش به دست آمده و پروفیل دررفت طبقات حاصل از تحلیل های IDA برای هر مدل تعیین گردید. سپس طبق رابطه (۲)، بردار اختلاف پروفیل دررفت طبقات حاصل از تحلیل های IDA و دررفت حاصل از روش پیشنهادی OMPA بدست آمد. نرم این بردار طبق رابطه (۳)، به عنوان تابع هدف تعریف شده و ضرایب ترکیب مودی بهینه شده یا α_i با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی به گونه ای تعیین گردیدند که تابع هدف کمینه شود:

$$e_j = IDR_{j-IDA} - IDR_{j-OMPA} \quad (2)$$

جدول ۵. ضرایب ترکیب مودی حاصل از بهینه سازی برای قاب های خمشی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه مورد مطالعه

Table 5. The modal combination coefficients resulted from the optimization process of the under-study 5, 8 and 11-story IMRFs

Story	3 Mode			2 Mode	
	Coeff 1	Coeff 2	Coeff 3	Coeff 1	Coeff 2
Bare	5	1.56	0.13	0.07	0.15
	8	1.21	0.44	0.19	0.57
	11	0.82	0.64	0.29	0.79



شکل ۵. منحنی‌های IDA و ظرفیت حاصل از تحلیل پوش‌اور مودال مود اول تا سوم قاب‌های خمشی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه مورد مطالعه

Fig. 5. The IDA curves and the capacity curves resulted from the first to the third-mode modal pushover of the under-study 5, 8 and 11-story IMRFs

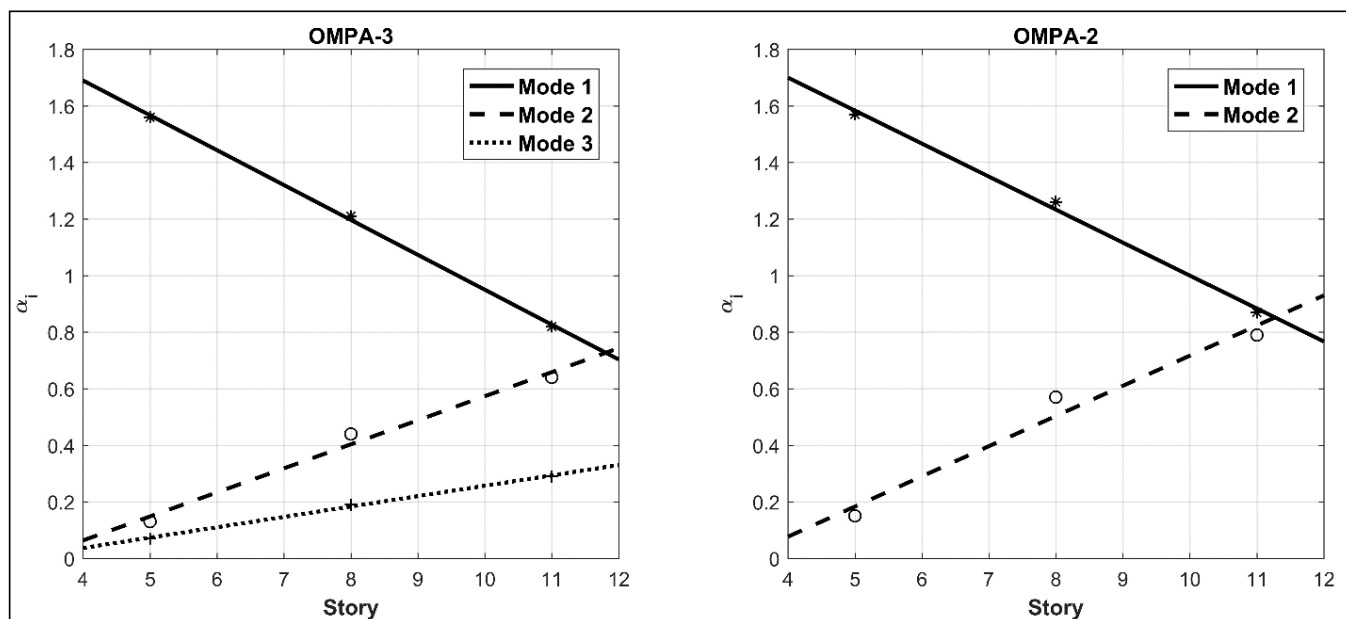
- ۴- استخراج پاسخ‌های مبنی بر جابه‌جایی سازه در سطح آستانه فروریزش در تحلیل‌های پوش‌اور
- ۵- استخراج ضرایب ترکیب مودی با استفاده از رابطه (۴) و جدول ۶
- ۶- تعیین پاسخ‌های سازه با استفاده از رابطه (۱) و ضرایب ترکیب مودی به دست آمده

۵- نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا به منظور بررسی معیار آستانه فروریزش

۴-۲- خلاصه گام‌های روش پوش‌اور OMPA

- گام‌های پوش‌اور پیشنهادی OMPA به طور خلاصه به شرح ذیل می‌باشد:
- ۱- تحلیل مودال سازه و استخراج اشکال مودهای اول تا سوم سازه
 - ۲- انجام تحلیل‌های پوش‌اور مودال طبق اشکال مودهای اول تا سوم سازه
 - ۳- تعیین گام متناظر با سطح آستانه فروریزش طبق روش پیشنهادی بخش ۳



شکل ۶. منحنی میزان ضرایب مودهای اول تا سوم در روش OMPA نسبت به تعداد طبقات
Fig. 6. The modal combination coefficients versus the story number in the proposed OMPA method

جدول ۶. مقادیر ضرایب a و b به منظور تعیین ضرایب ترکیب مودی مودهای اول تا سوم در روش پیشنهادی OMPA

Table 6. The values of a and b coefficients to determine the first to third modal combination coefficients in the proposed OMPA method

	OMPA-3			OMPA-2	
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1	Mode 2
a	-0.123	0.085	0.037	-0.117	0.107
b	2.183	-0.277	-0.110	2.167	-0.350

آن به واقعیت نزدیک تر است.

در ادامه نتایج حاصل از تحلیل پوش اور پیشنهادی OMPA در تخمین پارامترهای تقاضای مهندسی مبتنی بر جابه‌جایی در سطح آستانه فروریزش قاب‌های ۵، ۸ و ۱۱ طبقه در مقایسه با نتایج تحلیل IDA ارائه می‌شوند. در این تحقیق، به منظور محاسبه خطای روش‌های پوش اور از رابطه (۵) استفاده شده است [۳۶] که در آن n_{st} تعداد طبقات ساختمان است.

$$Error\% = \frac{100}{n_{st}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{st}} \left(\frac{EDP_{i-IDA} - EDP_{i-Push}}{EDP_{i-IDA}} \right)^2} \quad (5)$$

در شکل ۷ تا شکل ۹ پروفیل دریافت طبقات حاصل از روش

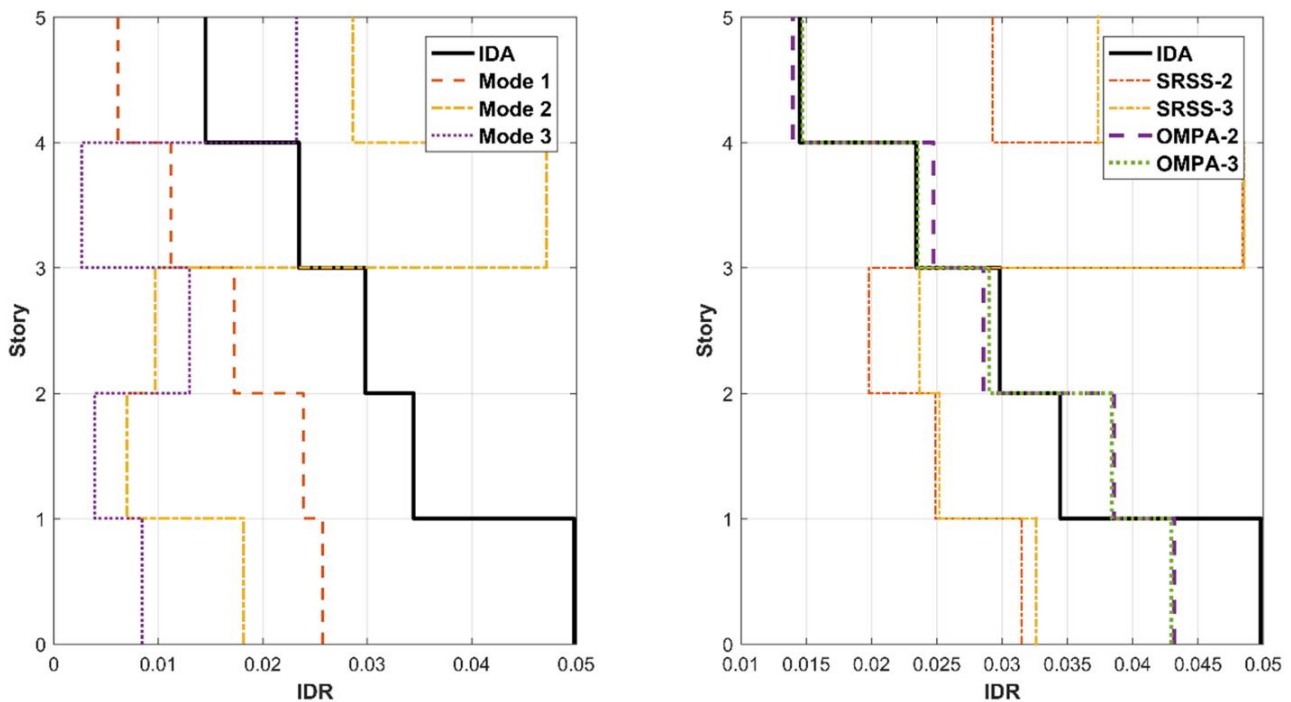
پیشنهادی، جابه‌جایی بام حاصل از روش پیشنهادی در مقایسه با جابه‌جایی هدف حاصل از روش ضرایب تحت تحلیل پوش اور مد اول مقایسه و بررسی می‌گردد. این نتایج در جدول ۷ ارائه شده است:

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، جابه‌جایی بام حاصل از این دو روش در یک محدوده قرار دارند. در روش ضرایب، جابه‌جایی بام با اصلاح مقدار جابه‌جایی سازه یک درجه آزاد حاصل از طیف طراحی و پیرو مد اول سازه به دست می‌آید. در حالی که در روش پیشنهادی، جابه‌جایی بام مستقل از طیف طرح بوده و تنها براساس الگوی بارگذاری و مشخصات سازه به دست می‌آید و مستقیماً به پاسخ‌های سازه اصلی وابسته است. لذا روش پیشنهادی از دقت بالاتری در تعیین سطح آستانه فروریزش برخوردار بوده و پاسخ‌های

جدول ۷. مقایسه جابه‌جایی بام در سطح عملکرد آستانه فروریزش حاصل از روش پیشنهادی با روش ضرایب

Table 7. The comparison of the roof displacement at the CP level resulted from the proposed and the coefficient methods d OMPA method

	Proposed Criteria	Coefficient Method
5 Story	0.27 m	0.30 m
8 Story	0.44 m	0.50 m
11 Story	0.62 m	0.63 m



شکل ۷. پروفیل دررفت طبقات قاب‌های خمشی ۵ طبقه مورد مطالعه حاصل از روش‌های پوش‌اور در مقایسه با روش IDA

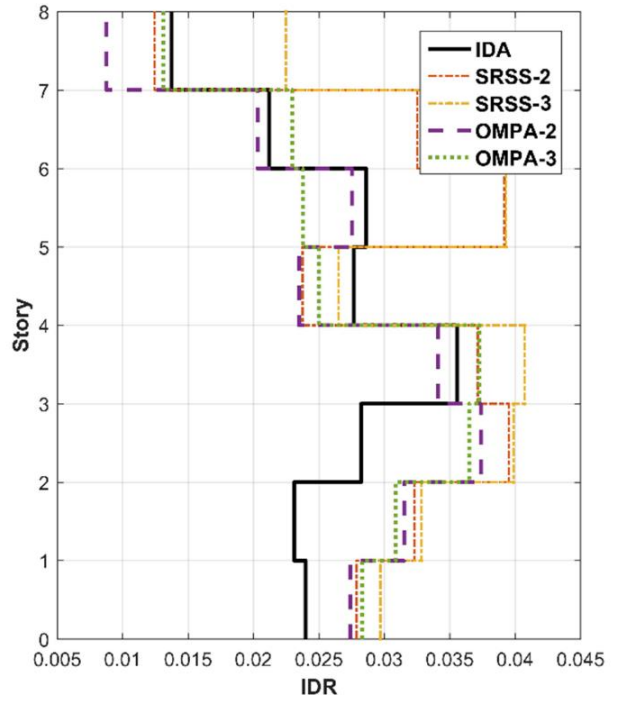
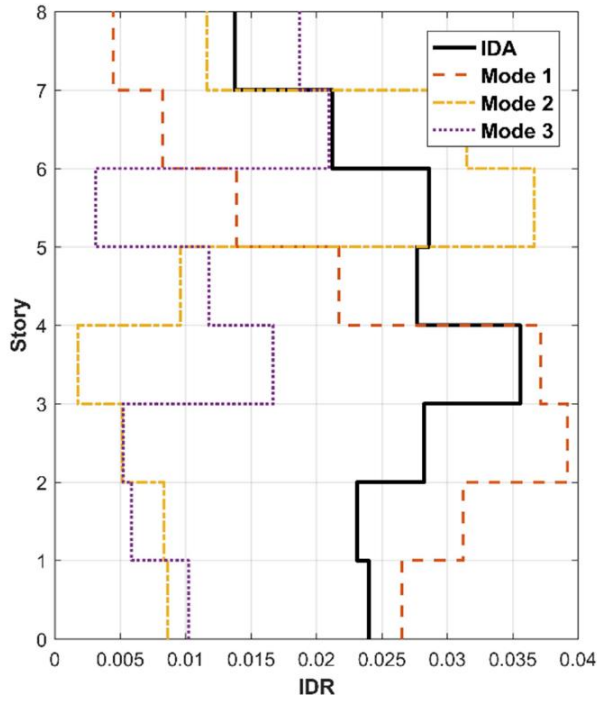
Fig. 7. The inter-story drift profile of the 5-story IMRF resulted from the pushover methods in comparison with the IDA results

از اثر مود سوم صرف‌نظر نمود. در قاب‌های ۸ و ۱۱ طبقه، در نظر گرفتن اثر مودهای دوم و سوم با روش SRSS نیز میزان خطا را نسبت به تحلیل پوش‌اور مود اول کاهش می‌دهد؛ ولی دقت نتایج حاصل از روش OMPA بسیار بالاتر است. این نتایج نشان می‌دهد که در این قاب‌ها نیز روش OMPA با در نظر گرفتن دو مود پاسخ‌های مناسبی ارائه می‌کند و می‌توان به منظور کاهش حجم محاسبات از اثر مود سوم صرف‌نظر نمود.

پروفیل جابه‌جایی طبقات یکی دیگر از پارامترهای EDP است که می‌تواند به عنوان یک شاخص خرابی کلی در آستانه فروریزش

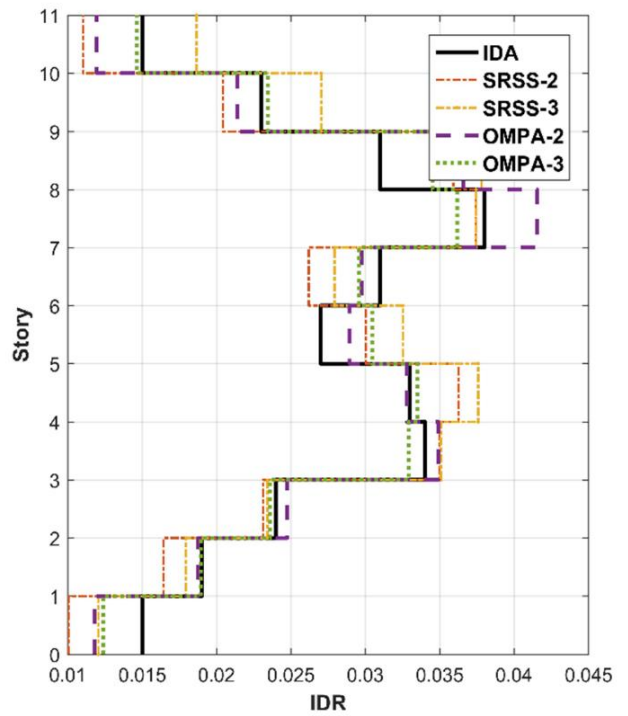
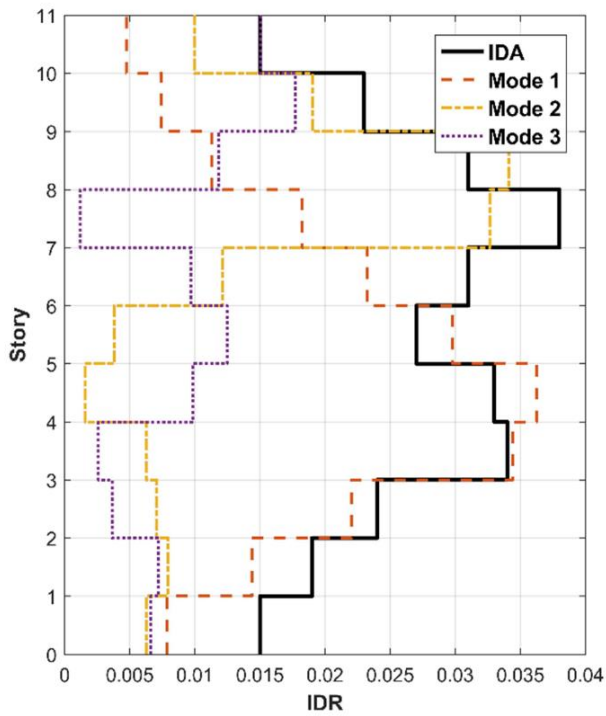
پیشنهادی OMPA، روش ترکیب SRSS و پوش‌اور مود اول در مقایسه با نتایج تحلیل IDA نشان داده شده‌اند. در جدول ۷ نیز مقادیر خطای این روش‌ها ارائه گردیده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در قاب ۵ طبقه در نظر گرفتن اثر مودهای دوم و سوم با روش SRSS میزان خطا را نسبت به تحلیل پوش‌اور مود اول افزایش می‌دهد، ولی با استفاده از ضرایب پیشنهادی روش OMPA، مقادیر خطا به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا می‌کنند. همچنین در نظر گرفتن دو مود نیز مقادیر خطا افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا نمی‌کند و می‌توان برای افزایش سرعت محاسبات،



شکل ۸. پروفیل دریفت طبقات قاب‌های خمشی ۸ طبقه مورد مطالعه حاصل از روش‌های پوش‌اور در مقایسه با روش IDA

Fig. 8. The inter-story drift profile of the 8-story IMRF resulted from the pushover methods in comparison with the IDA results



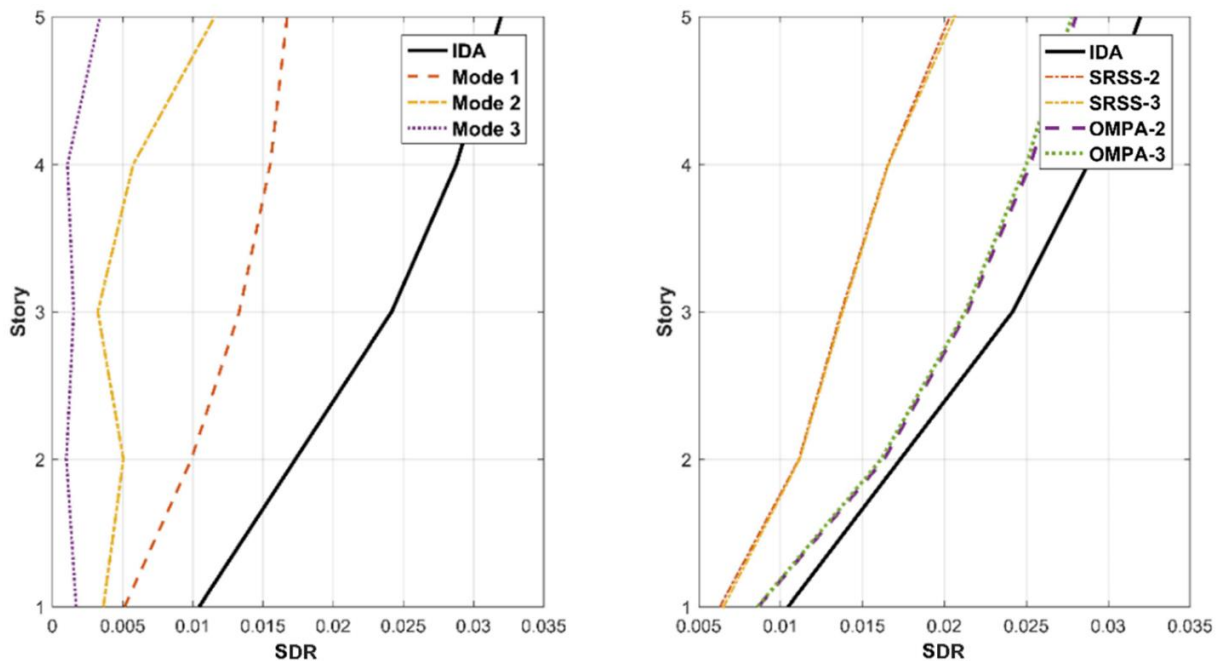
شکل ۹. پروفیل دریفت طبقات قاب‌های خمشی ۱۱ طبقه مورد مطالعه حاصل از روش‌های پوش‌اور در مقایسه با روش IDA

Fig. 9. The inter-story drift profile of the 11-story IMRF resulted from the pushover methods in comparison with the IDA results

جدول ۸. مقادیر خطای روش‌های پوش‌اور در برآورد پروفیل دریفت طبقات در آستانه فروریزش در مقایسه با تحلیل IDA

Table 8. The error values of the pushover methods in evaluation of the inter-story drift profile at the CP level in comparison with the IDA results

	Mode 1	SRSS-2	SRSS-3	OMPA-2	OMPA-3
5st	21.1%	31.6%	39.3%	3.9%	3.6%
8st	17.6%	9.4%	12.5%	5.3%	4.6%
11st	12.8%	4.8%	4.6%	3.4%	2.3%
Error%	17.2%	15.3%	18.8%	4.2%	3.5%

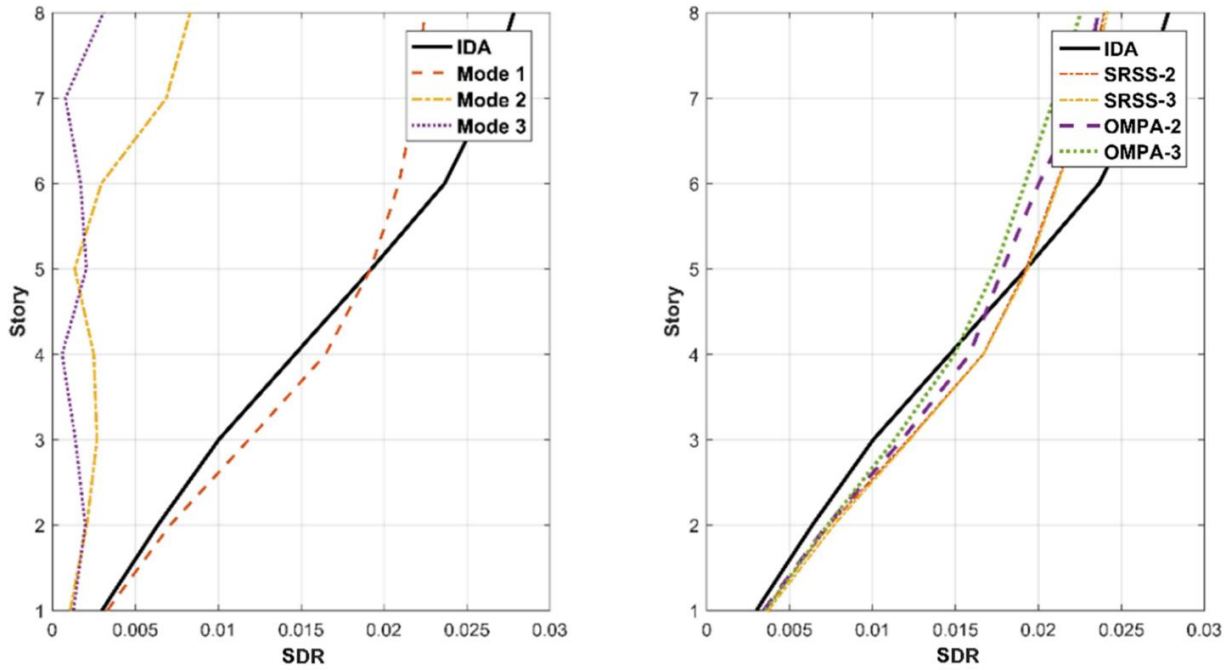


شکل ۱۰. پروفیل جابه‌جایی طبقات قاب خمشی ۵ طبقه مورد مطالعه حاصل از روش‌های پوش‌اور در مقایسه با روش IDA

Fig. 10. The story displacement profile of the 5-story IMRF resulted from the pushover methods in comparison with the IDA results

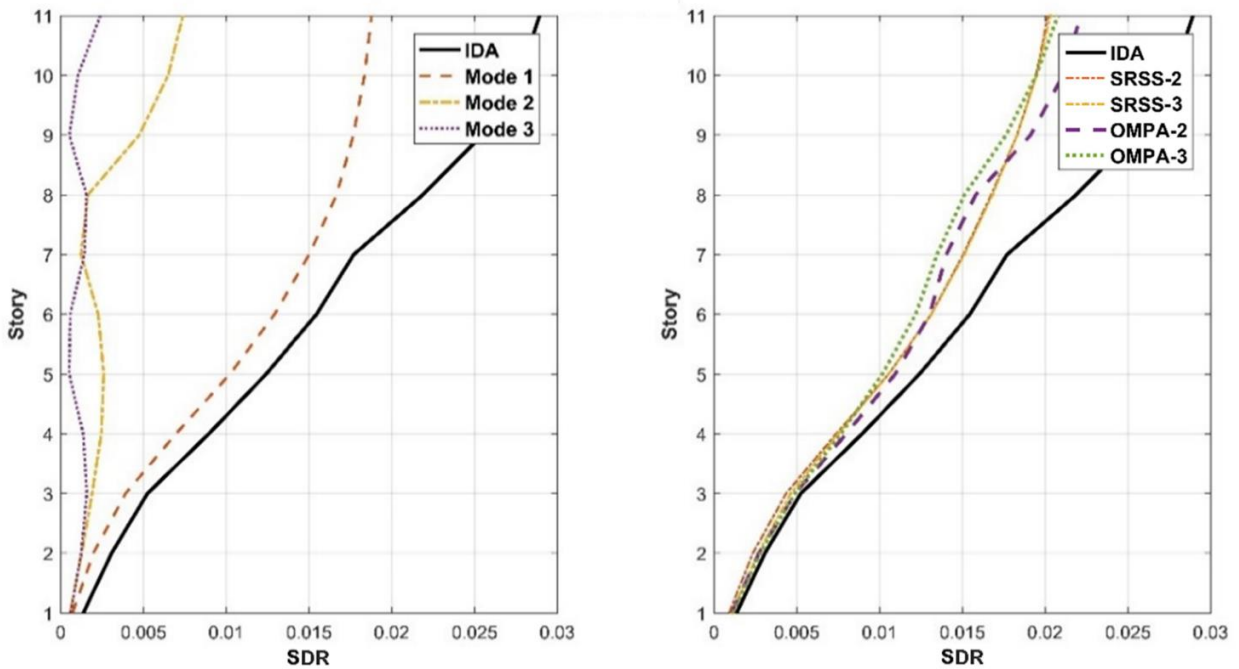
۱۰ تا ۱۲ و خطای متناظر آنها در جدول ۸ ارائه شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی OMPA در برآورد پروفیل جابه‌جایی طبقات نیز دقت مناسبی ارائه می‌کند و مقادیر خطای روش‌های پوش‌اور مود اول و ترکیب SRSS را تا حد بسیار خوبی بهبود می‌دهد.

سازه مورد مطالعه قرار گیرد. با توجه به یکسان بودن ماهیت این پاسخ با پروفیل دریفت طبقات، می‌توان از ضرایب به دست آمده از بهینه‌سازی برای برآورد این شاخص نیز استفاده نمود. بدین منظور، پروفیل جابه‌جایی طبقات حاصل از تحلیل‌های پوش‌اور مود اول تا سوم با ضرایب ترکیب مودی پیشنهادی ترکیب شده و با نتایج تحلیل IDA مقایسه شده‌اند. این نتایج در شکل‌های



شکل ۱۱. پروفیل جابه‌جایی طبقات قاب خمشی ۸ طبقه مورد مطالعه حاصل از روش‌های پوش‌اور در مقایسه با روش IDA

Fig. 11. The story displacement profile of the 8-story IMRF resulted from the pushover methods in comparison with the IDA results



شکل ۱۲. پروفیل جابه‌جایی طبقات قاب خمشی ۱۱ طبقه مورد مطالعه حاصل از روش‌های پوش‌اور در مقایسه با روش IDA

Fig. 12. The story displacement profile of the 11-story IMRF resulted from the pushover methods in comparison with the IDA results

۶- مطالعه موردی

به منظور ارزیابی دقت روش پوش اور پیشنهادی، کاربرد این روش بر روی دو قاب خمشی ۹ و ۱۲ طبقه مورد بررسی قرار می‌گیرد. قاب خمشی ۹ طبقه مورد بررسی، مدل SAC ۲-Pre-Northridge M است که یک مدل مرجع در قاب‌های خمشی فولادی است و جزئیات تفصیلی اجزا و المان‌های آن در دستورالعمل FEMA ۳۵۵c ارائه گردیده است [۳۰]. نمای کلی مدل ۱۲ طبقه نیز طبق شکل ۱ است و جزئیات المان‌های آن در جدول ۱۰ ارائه گردیده است. با استفاده از گام‌های روش OMPA، ضرایب ترکیب مودی این دو قاب برای دو حالت در نظر گرفتن دو مود و سه مود در جدول ۱۱ ارائه شده است. پروفیل دررفت و پروفیل جابه‌جایی طبقات این سازه‌ها حاصل از روش‌های پوش اور در مقایسه با تحلیل IDA نیز در

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ و مقادیر خطای این روش‌ها در جدول ۱۲ ارائه گردیده‌اند.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، روش پوش اور پیشنهادی OMPA در این دو مدل نیز دقت بسیار مناسبی در تخمین هر دو پروفیل دررفت و جابه‌جایی طبقات ارائه می‌کنند؛ به گونه‌ای که نسبت به نتایج تحلیل پوش اور مود اول و روش ترکیب SRSS دقت بسیار بهتری دارند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که برای این سازه نیز در نظر گرفتن دو مود اول برای استخراج نتایج کفایت می‌کند و از دقت کافی برخوردار می‌باشد.

این نتایج مجموعاً نشان می‌دهد که روش پیشنهادی OMPA می‌تواند با دقت مناسب و سرعت بسیار بالاتر از تحلیل IDA

جدول ۹. مقادیر خطای روش‌های پوش اور در برآورد پروفیل جابه‌جایی طبقات در آستانه فروریزش در مقایسه با تحلیل IDA

Table 9. The error values of the pushover methods in evaluation of the story displacement profile at the CP level in comparison with the IDA results

	Mode 1	SRSS-2	SRSS-3	OMPA-2	OMPA-3
5st	20.8%	17.7%	17.4%	5.6%	5.8%
8st	15.8%	14.2%	13.1%	7.2%	7.9%
11st	8.8%	7.1%	6.3%	5.8%	6.8%
Error%	15.1%	13.0%	12.2%	6.2%	6.8%

جدول ۱۰. مشخصات مقاطع قاب خمشی ۱۲ طبقه مورد بررسی

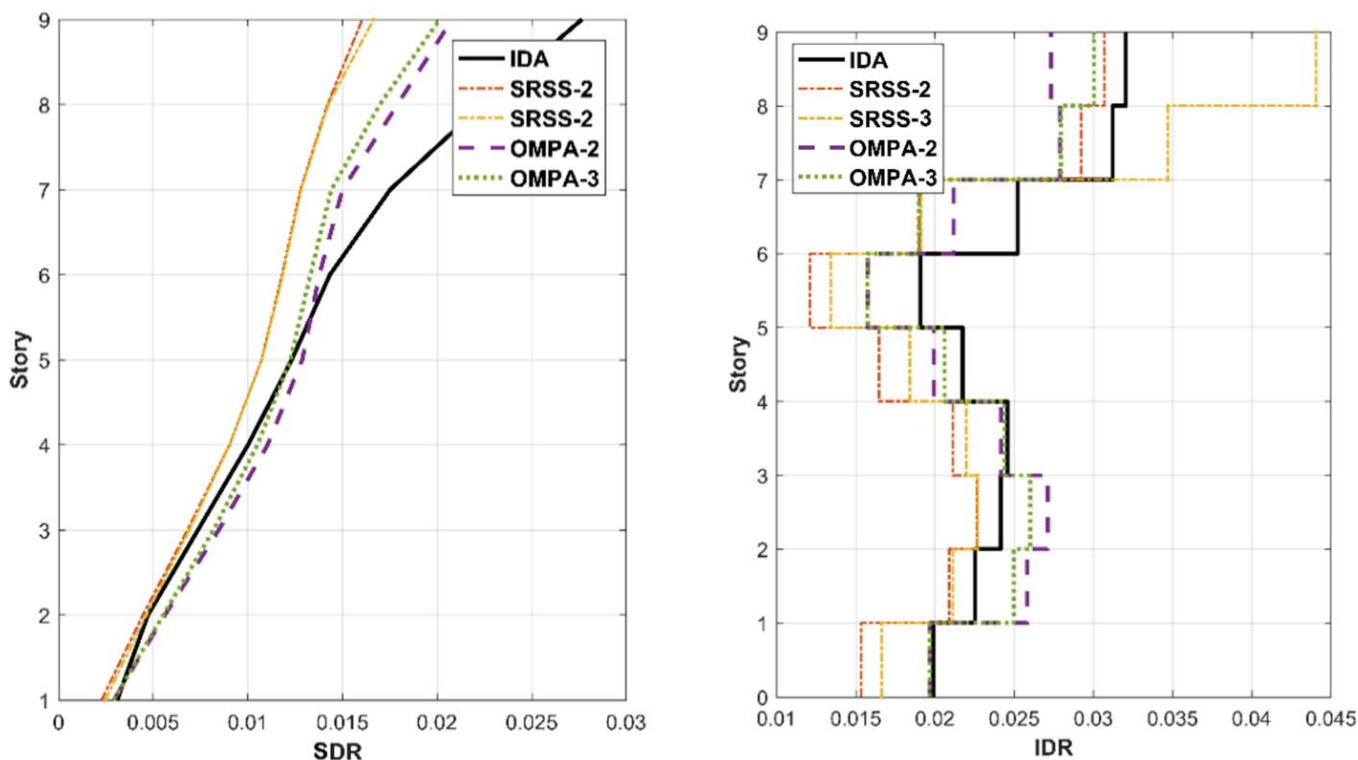
Table 10. The section details of the under-study 12-story IMRF

		St 1	St 2	St 3	St 4	St 5	St 6	St 7	St 8	St 9	St 10	St 11	St 12
Beam	Bays 1, 4	6	6	6	7	7	8	8	9	9	9	10	10
	Bays 2, 3	6	7	7	7	8	8	8	8	9	9	10	10
12st Column	Axis 1, 5	1	1	1	1	2	2	3	3	3	3	5	5
	Axis 2, 4	1	1	2	2	3	3	3	3	4	4	5	5
	Axis 3	1	1	2	2	3	3	3	3	4	4	5	5

جدول ۱۱. ضرایب ترکیب مودی حاصل از روش پیشنهادی OMPA برای قاب‌های ۹ و ۱۲ طبقه مورد بررسی

Table 11. The modal combination coefficients resulted from the proposed OMPA method for the under-study 9 and 12-story IMRFs

	OMPA-3			OMPA-2	
	Coeff 1	Coeff 2	Coeff 3	Coeff 1	Coeff 2
9 Story	1.07	0.49	0.22	1.12	0.61
12 Story	0.93	0.77	0.33	0.74	0.70



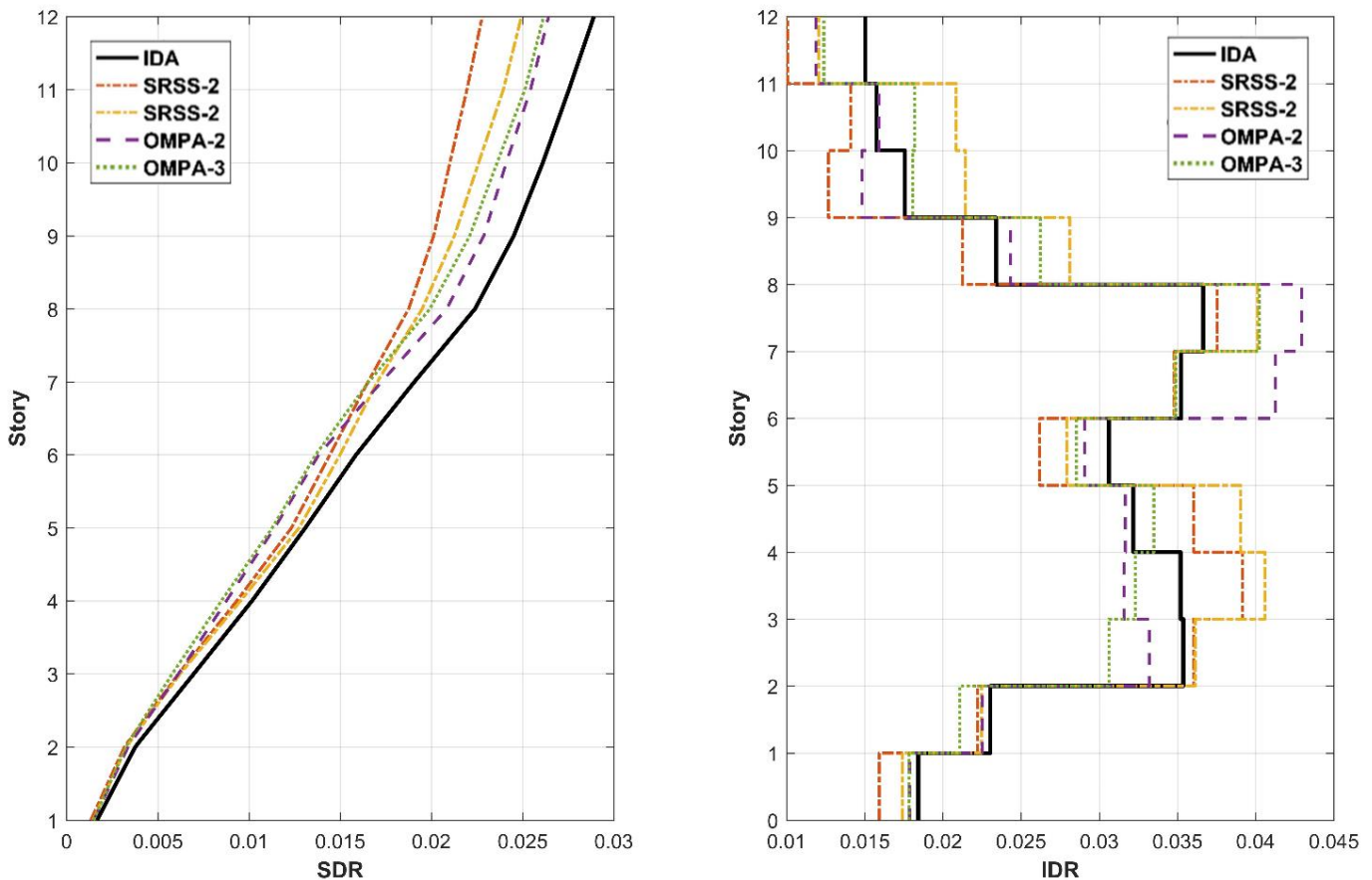
شکل ۱۳. پروفیل دررفت و جابه‌جایی طبقات قاب خمشی ۹ طبقه حاصل از روش‌های پوش‌اور در مقایسه با روش IDA

Fig. 13. The inter-story drift and the story displacement profiles of the 9-story IMRF resulted from the pushover methods in comparison with the IDA results

جدول ۱۲. مقادیر خطای روش‌های پوش‌اور در برآورد پاسخ مدل‌های ۹ و ۱۲ طبقه در آستانه فروریزش در مقایسه با روش IDA

Table 12. The response evaluation errors values of the pushover methods in at the CP level in comparison with the IDA results

		Mode 1	SRSS-2	SRSS-3	OMPA-2	OMPA-3
		9 Story	Drift	15.2%	6.5%	6.7%
	Displacement	8.0%	8.0%	7.6%	5.0%	5.2%
12 Story	Drift	15.2%	6.5%	6.7%	4.1%	4.0%
	Displacement	8.0%	8.0%	7.6%	5.0%	5.2%



شکل ۱۴. پروفیل دررفت و جابه‌جایی طبقات قاب خمشی ۱۲ طبقه حاصل از روش‌های پوش‌اور در مقایسه با روش IDA

Fig. 14. The inter-story drift and the story displacement profiles of the 12-story IMRF resulted from the pushover methods

OMPA) به منظور برآورد شاخص‌های خرابی سازه شامل پروفیل دررفت و جابه‌جایی طبقات در آستانه فروریزش ارائه گردید. در این روش، پاسخ‌های حاصل از مودهای اول و دوم سازه و یا مودهای اول تا سوم سازه در سطح آستانه فروریزش با ضرایبی پیشنهادی روش OMPA ترکیب می‌شوند. در روش پیشنهادی، سطح آستانه فروریزش با یک معیار جدید تعیین می‌گردد. این معیار با ترکیب دو شاخص خرابی در مقیاس طبقه شامل دررفت طبقه و برش طبقه پیشنهاد شده است. در این معیار، گام متناظر با وقوع اولین روند بازگشتی در منحنی ظرفیت طبقات ساختمان (در مختصات $IDR_{st}-V_{st}$) به عنوان آستانه فروریزش (CP) فرض می‌گردد. وقوع یک روند بازگشتی در منحنی ظرفیت طبقات به معنای شروع تمرکز خرابی قابل توجه در یک یا چند طبقه دیگر سازه است به گونه‌ای که از سایر طبقات به مرور باربرداری شده و روند بازگشتی مشاهده می‌شود. مزیت این معیار، وابستگی آن تنها به سازه و الگوی بارگذاری است و اینکه به

شاخص‌های خرابی جابه‌جایی-پایه سازه در آستانه فروریزش شامل پروفیل دررفت و پروفیل جابه‌جایی طبقات قاب‌های خمشی فولادی میان‌مرتبه را تخمین بزند.

۷- نتیجه‌گیری

فروریزش ساختمان‌ها در زمین‌لرزه‌های شدید مهم‌ترین عامل تلفات جانی و خسارات مالی است و لذا ارزیابی فروریزش لرزه‌ای ساختمان‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. برآورد شاخص‌های خرابی در سطح آستانه فروریزش سازه یکی از اهدافی است که در فرآیند ارزیابی فروریزش لرزه‌ای به آن پرداخته می‌شود. روش‌های استاتیکی غیرخطی یا پوش‌اور در دو دهه اخیر در فرآیند تحلیل و ارزیابی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها توسعه زیادی پیدا کرده‌اند و دستورالعمل‌های ارزیابی و بهسازی نیز مورد تأیید قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، با توجه به تأثیر مودهای بالاتر در پاسخ‌های قاب‌های خمشی میان‌مرتبه روشی با عنوان پوش‌اور مودال بهینه شده

- 20(3) (2019) 47-59.
- [2] R. Abbasnia, A. Tajik Davoudi, M.M. Maddah, An improved displacement-based adaptive pushover procedure for the analysis of frame buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, 18(7) (2014) 987-1008.
- [3] ASCE 07. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, in, Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2016.
- [4] S. Eshghi, M.M. Maddah, A study on influencing factors for simplified seismic collapse risk assessment of steel moment-resisting frames with intermediate ductility, *International Journal of Structural Integrity*, (2019).
- [5] R. Pekelnicky, S.D. Engineers, S. Chris Poland, N.D. Engineers, ASCE 41-13: Seismic evaluation and retrofit rehabilitation of existing buildings, *Proceedings of the SEAOC*, (2012).
- [6] H. Krawinkler, G. Seneviratna, Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation, *Engineering structures*, 20(4-6) (1998) 452-464.
- [7] S. Antoniou, R. Pinho, Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure, *Journal of earthquake engineering*, 8(05) (2004) 643-661.
- [8] M.A. Shayanfar, M. Rakhshanimehr, M. Ashoory, Adaptive Load Patterns Versus Non-adaptive Load Patterns for Pushover Analysis of Building, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 43(1) (2019) 23-36.
- [9] A.K. Chopra, R.K. Goel, A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: theory and preliminary evaluation, *PEER* 2001/03, (2001).
- [10] M.A. Amini, M. Poursha, Adaptive Force-Based Multimode Pushover Analysis for Seismic Evaluation of Midrise Buildings, *Journal of Structural Engineering*, 144(8) (2018) 04018093.
- [11] Y. Liu, J. Kuang, Estimating seismic demands of singly symmetric buildings by spectrum-based pushover analysis, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(4) (2019) 2093-2113.
- [12] A. Tajik Davoudi, R. Abbasnia, A. Sarvghad Moghadam, M.M. Maddah, A. Khodam, An alternative

یک تغییر فیزیکی مشخص در سازه مرتبط می‌گردد.

ضرایبی پیشنهادی روش OMPA با استفاده از دو روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و بهینه‌سازی برخورد اجسام (CBO) و براساس پروفیل دریافت طبقات نتایج سه قاب خمشی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه بدست آمده‌اند. این ضرایب یک روند خطی را نسبت به تعداد طبقات نشان می‌دهند به گونه‌ای که ضریب مود اول با افزایش تعداد طبقات کاهش یافته و ضریب مود دوم و سوم افزایش می‌یابد. این مشاهده با افزایش مشارکت مودال مودهای بالاتر با افزایش تعداد طبقات مطابق است. بر این اساس، برازش‌هایی خطی برای ضرایب پیشنهادی براساس تعداد طبقات صورت گرفت و در قالب رابطه‌ای خطی برای قاب‌های خمشی میان مرتبه ارائه شد. با استفاده از این روابط می‌توان پروفیل دریافت و جابه‌جایی مطلق طبقات قاب‌های خمشی فولادی منظم را در آستانه فروریزش تخمین زد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

a	ضریب ثابت به منظور محاسبه ضرایب ترکیب مودی
b	ضریب ثابت به منظور محاسبه ضرایب ترکیب مودی
e_j	بردار خطای برآورد پاسخ سازه در هر طبقه
$\ e\ $	تابع هدف در فرآیند بهینه‌سازی
m	تعداد مودهای در نظر گرفته شده
n	تعداد طبقات سازه
i	اندیس مود
j	اندیس طبقه
EDP	پارامتر تقاضای مهندسی
IDR	نسبت دریافت طبقات
SDR	نسبت جابه‌جایی طبقات
RDR	نسبت جابه‌جایی بام
T_i	پریود مود i ام سازه

علائم یونانی

α_i	ضریب ترکیب مودی مود i ام
Γ_i	ضریب مشارکت مود i ام سازه

مراجع

- [1] M.M. Maddah, S. Eshghi, Evaluation of a Seismic Collapse Assessment Methodology Based on the Collapsed Steel Buildings Data in Sarpol-e Zahab, Iran Earthquake, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*,

- the building. 3rd ed. Tehran, Iran: Ministry of Housing and Urban Development, Office of National Building Regulations; 2013.
- [24] D.G. Lignos, H. Krawinkler, Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading, *Journal of Structural Engineering*, 137(11) (2011) 1291-1302.
- [25] D.G. Lignos, H. Krawinkler, A steel database for component deterioration of tubular hollow square steel columns under varying axial load for collapse assessment of steel structures under earthquakes, in: *Proc. 7th Int. Conf. on Urban Earthquake Engineering (7CUUE)*, Center for Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology Tokyo, 2010.
- [26] D.G. Lignos, H. Krawinkler, A database in support of modeling of component deterioration for collapse prediction of steel frame structures, in: *Structural Engineering Research Frontiers*, 2007, pp. 1-12.
- [27] L.F. Ibarra, R.A. Medina, H. Krawinkler, Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 34(12) (2005) 1489-1511.
- [28] Ibarra LF. Global collapse of frame structures under seismic excitations. PhD Thesis of Stanford University; 2005.
- [29] L. Eads, D. Lignos, Pushover and dynamic analyses of 2-story moment frame with panel zones and RBS, in, Stanford University, CA, available at: http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Pushover_and_Dynamic_Analyses_of_2-Story_Moment_Frame_with_Panel_Zones_and_RBS (accessed March 4, 2019), 2012.
- [30] S.J. Venture, State of the art report on systems performance of steel moment frames subject to earthquake ground shaking, FEMA 355C, (2000).
- [31] Elkady, D.G. Lignos, Modeling of the composite action in fully restrained beam-column connections: implications in the seismic design and collapse capacity of steel special moment frames, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(13) (2014) 1935-1954.
- [32] B. Shafei, F. Zareian, D.G. Lignos, A simplified method modal combination rule for adaptive pushover analysis, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 25(7) (2016) 325-339.
- [13] M. Guan, W. Liu, H. Du, J. Cui, J. Wang, Combination model for conventional pushover analysis considering higher mode vibration effects, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28(12) (2019) e1625.
- [14] C. Chintanapakdee, A.K. Chopra, Evaluation of modal pushover analysis using generic frames, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 32(3) (2003) 417-442.
- [15] P. Fajfar, A nonlinear analysis method for performance-based seismic design, *Earthquake spectra*, 16(3) (573-592), (2000).
- [16] D. L. Sidesway collapse of deteriorating structural systems under seismic excitations, 2013.
- [17] K. Suita, S. Yamada, M. Tada, K. Kasai, Y. Matsuoka, E. Sato, E-Defense tests on full-scale steel buildings: Part 2-Collapse experiments on moment frames, in: *Structural Engineering Research Frontiers*, 2007, pp. 1-12.
- [18] E. Karamanci, D.G. Lignos, Computational approach for collapse assessment of concentrically braced frames in seismic regions, *Journal of Structural Engineering*, 140(8) (2014) (A4014019).
- [19] Maddah MM, Eshghi S. Developing a modified IDA-based methodology for investigation of influencing factors on seismic collapse risk of steel intermediate moment resisting frames. *Earthquakes and Structures* 2020; Accepted.
- [20] A.T. Council, U.S.F.E.M. Agency, Quantification of building seismic performance factors, US Department of Homeland Security, FEMA, 2009.
- [21] I.S. Code, Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, Standard No. 2800, in, Standard: Tehran, Iran, 2007.
- [22] National building regulations of Iran - the 10th issue, Design and execution of steel structures. 4th ed., in, Tehran, Iran: Office of National Building Regulations, 2013.
- [23] Ministry of Housing and Urban Development. National building regulations of Iran - the 6th issue, loads on

- E-Defense full-scale shake table collapse tests, *Journal of Structural Engineering*, 139(1) (2013) 120-132.
- [36] R. Eberhart, J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory. MHS'95: Proceedings of the Sixth International Symposium on. 1995 Oct 4-6; Nagoya, Japan, in, IEEE, 1995.
- [37] D. Karaboga, B. Basturk, A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm, *Journal of global optimization*, 39(3) (2007) 459-471.
- [38] S.-Y. Yun, R.O. Hamburger, C.A. Cornell, D.A. Foutch, Seismic performance evaluation for steel moment frames, *Journal of Structural Engineering*, 128(4) (2002) 534-545.
- for collapse capacity assessment of moment-resisting frame and shear wall structural systems, *Engineering Structures*, 33(4) (2011) 1107-1116.
- [33] Gupta, H. Krawinkler, Seismic demands for the performance evaluation of steel moment resisting frame structures, Stanford University, 1998.
- [34] Eads L, Ribeiro F, Barbosa A. Dynamic analysis of 2-Story moment frame. Stanford University 2013. http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Dynamic_Analysis_of_2-Story_Moment_Frame (accessed March 4, 2019).
- [35] D.G. Lignos, T. Hikino, Y. Matsuoka, M. Nakashima, Collapse assessment of steel moment frames based on

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Eshghi, M. M. Maddah, A. R. Garakaninezhad., (2021). *Seismic Response Evaluation of Steel Moment Resisting Frames for Collapse Prevention Level Using a Proposed Modal Pushover Analysis Method*. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(5): 1981-2002

DOI: [10.22060/ceej.2020.17267.6507](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17267.6507)



