# توسعه تحلیل پوش‌اور مدال بهینه شده به منظور برآورد پاسخ لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی در محدوده فروریزش

**محمدمهدی مداح**
*دانشجوی دکتری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران*
**mm.maddah@iiees.ac.ir**

**ساسان عشقی**
*دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران*
**s.eshghi@iiees.ac.ir**

**علیرضا گرکانی نژاد**
*دانش‌آموخته دکتری مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران*
**a.garakani@iiees.ac.ir**

**واژگان کلیدی:** تحلیل پوش‌اور مدال، روش‌های بهینه‌سازی، ترکیب پاسخ‌های مدال، آستانه فروریزش، قاب خمشی فولادی میان‌مرتبه

## چکیده

در این پژوهش، یک روش پوش‌اور مدال به منظور برآورد پارامترهای تقاضای مهندسی مبتنی بر جابجایی توسعه داده می‌شود. در این روش ابتدا بر اساس منحنی ظرفیت طبقات یک معیار برای تعیین سطح آستانه فروریزش در تحلیل‌های پوش‌اور پیشنهاد می‌گردد. سپس یک روش ترکیب نتایج به منظور تعیین پارامترهای پاسخ سازه در این سطح عملکرد ارائه می‌شود. در روش پوش‌اور پیشنهادی، پاسخ‌های حاصل از تحلیل پوش‌اور مدال در آستانه فروریزش با ضرایب حاصل از بهینه‌سازی به‌صورت جبری ترکیب می‌گردند. این ضرایب بر اساس نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) سه قاب خمشی فولادی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه و به‌کارگیری دو روش بهینه‌سازی برخورد اجسام (CBO) و ازدحام ذرات (PSO) به دست می‌آیند. یک قاب ۹ طبقه به منظور ارزیابی روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد روش پوش‌اور پیشنهادی پروفیل دریفت و جابجایی طبقات در آستانه فروریزش سازه را با دقت بسیار خوبی تخمین می‌زند.

## مقدمه

بیشترین خسارات در زمین‌لرزه‌ها براثر ایجاد آسیب‌های شدید سازه‌ای، از دست رفتن پایداری سازه‌ها و فروریزش ساختمان‌های موجود به وجود می‌آید. فروریزش، علاوه بر اینکه بیشترین تلفات جانی و خسارات مالی را در زمین‌لرزه‌ها به وجود می‌آورد، با ایجاد اختلال در روند امدادرسانی سبب افزایش میزان مرگ‌ومیر پس از وقوع زلزله خواهد شد که این امر در کلان‌شهرها با توجه به تراکم بالای جمعیت از نمود بیشتری برخوردار خواهد بود. به همین دلیل مهم‌ترین دغدغه مراکز تصمیم‌گیری و مدیریتی در موضوع پیامدهای زلزله، تلفات جانی و خسارات مالی ناشی از فروریزش ساختمان‌های موجود و تبعات اجتماعی و اقتصادی آن برای شهر و کشور است. از طرفی با توجه به مزایای اجرای اسکلت فولادی در ساختمان‌ها استفاده از این نوع سازه در ایران رواج زیادی پیدا کرده است و بخش مهمی از ساختمان‌های موجود در شهرهای ایران ساختمان‌های میان‌مرتبه با اسکلت فولادی‌اند. این ساختمان‌ها در زمین‌لرزه‌های گذشته ایران دچار آسیب‌های سازه‌ای جدی و فروریزش شده‌اند. در زلزله بم به بزرگای ۶/۷ ریشتر در سال ۱۳۸۲ تعدادی از ساختمان‌های فولادی میان‌مرتبه موجود دچار فروریزش و آسیب‌های شدید شدند (شکل ۱-الف). در زلزله اخیر سرپل ذهاب نیز تعدادی زیادی از این گروه از ساختمان‌ها دچار آسیب سازه‌ای و فروریزش گردیدند (شکل ۱-ب). در نتیجه بررسی پتانسیل فروریزش این گروه از سازه‌ها در زلزله‌های محتمل با استفاده از روش‌های سریع و با دقت مناسب، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این فرایند برآورد دقیق مقادیر تقاضای مهندسی (EDP) بسیار حائز اهمیت است.

(ب) (الف)

شکل ۱: فروریزش ساختمان‌های فولادی در زلزله‌های گذشته ایران، الف) زلزله ۱۳۸۲ بم، ب) زلزله سرپل ذهاب ۱۳۹۶

نسبت دریفت طبقات نسبت مستقیمی با میزان خرابی‌ها در سازه دارد. پروفیل دریفت طبقات در زمان فروریزش، طبقاتی که تمرکز خرابی در آنها رخ می‌دهد را ارائه نموده و مکانیسم کلی فروریزش را نشان می‌دهد. در این مطالعه، هدف اصلی برآورد پروفیل دریفت 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. استفاده از روش‌های استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور) به‌عنوان روش‌های جایگزین، رواج بالایی پیدا کرده است (ASCE 41, 2017). یکی از روش‌های نوین چندبار تکرار که از یک طرف اثرات مدهای 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 [1] (MPA) است (Chopra & Goel, 2001). در این روش که توسط چوپرا و گل توسعه یافته است، بارگذاری به‌صورت ثابت و بر مبنای شکل مود اول تا سوم سازه تا جابجایی هدف متناظر هر مود صورت می‌گیرد. پاسخ نهایی سازه از ترکیب SRSS[2] و یا CQC[3] نتایج پوش‌اور مودی تعیین می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد دقت این روش با افزایش شکل‌پذیری تقاضا، کاهش می‌یابد زیرا روش ترکیب مودال مورد استفاده در آن در محدوده غیرخطی نادرست بوده و از دقت کافی برخوردار نیست (Amini & Poursha, 2018; Antoniou & Pinho, 2004).

در این تحقیق، یک روش جایگزین برای ترکیب پاسخ‌های پوش‌اور مودال در سطح عملکرد آستانه فروریزش که سازه کاملاً وارد محدوده غیرخطی شده و دقت روش MPA کاهش می‌یابد، پیشنهاد می‌گردد. در این روش پاسخ‌های حاصل از تحلیل پوش‌اور مودال، با استفاده از ضرایب ثابت پیشنهادی به‌صورت جبری با یکدیگر جمع می‌شود. این ضرایب، با استفاده از دو روش متداول بهینه‌سازی به گونه تعیین شدند که میزان خطا در مقایسه با نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی حاصل از ۴۴ رکورد دور از گسل P695 FEMA حداقل گردد (FEMA, 2009). روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات و بهینه‌سازی برخورد اجسام روش‌هایی هستند که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سه قاب خمشی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه طراحی شده با روش LRFD و استاندارد ۲۸۰۰ به‌عنوان ساختمان‌های مرجع در نظر گرفته شده‌اند و ضرایب بر اساس نتایج این ساختمان‌ها به دست آمده است. روش پیشنهادی بر روی ساختمان ۹ طبقه SAC به‌عنوان ساختمان نمونه آزمایش شده و نتایج آن ارائه شده‌اند.

با توجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش تخمین پروفیل دریفت طبقات در آستانه فروریزش سازه است، لازم است جابجایی هدف متناظر این سطح عملکرد تعیین گردد. در این پژوهش یک جابجایی هدف برای سطح آستانه فروریزش تعریف می‌شود که به رکورد یا طیف زلزله وابسته نبوده و تنها به سازه و الگوی بارگذاری وابسته است. در این روش، ترکیبی از دریفت طبقات و برش طبقات در قالب منحنی ظرفیت طبقه برای تعریف معیار آستانه فروریزش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

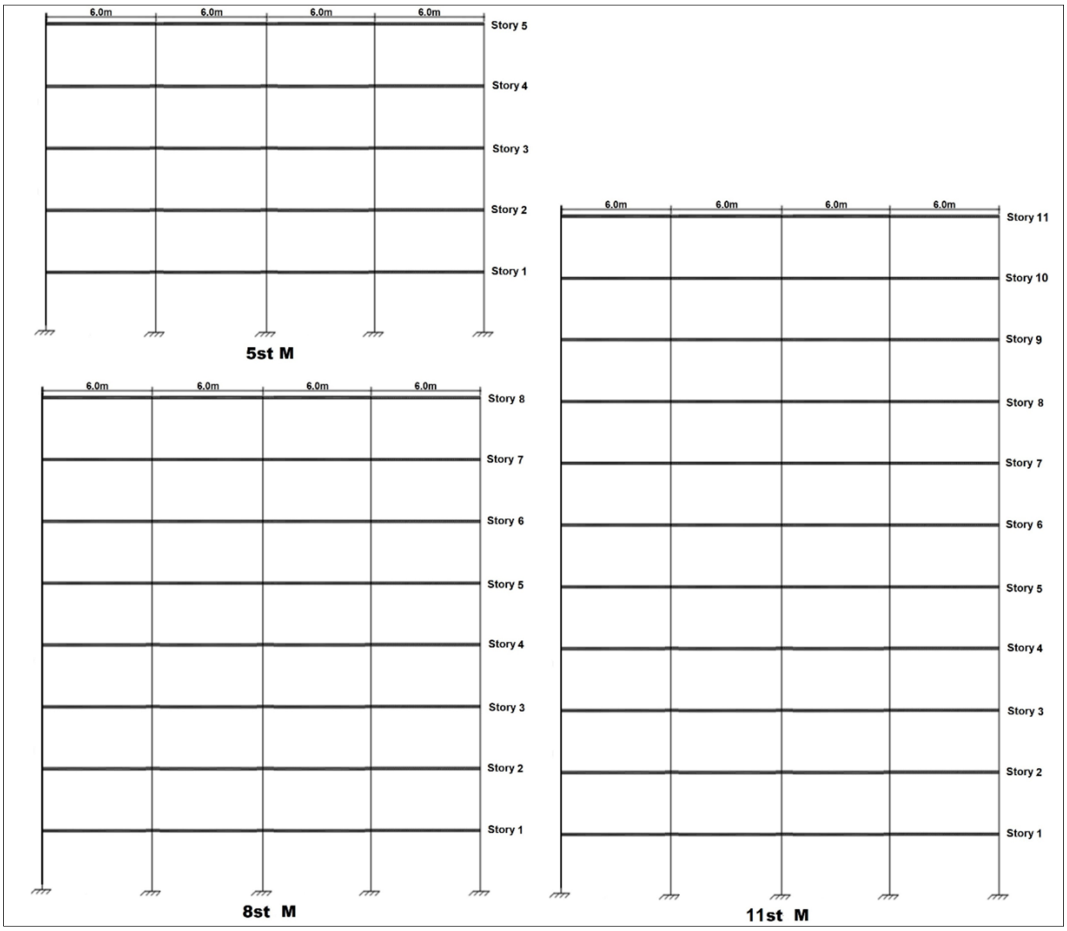
## ساختمان‌های مورد مطالعه

در این پژوهش، سه قاب دو بعدی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه طبق استاندارد ۲۸۰۰ (BHRC, 2014) بارگذاری لرزه‌ای و با روش حالات حدی مبحث دهم مقررات ملی

---

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

ساختمان طراحی و مورد مطالعه قرار گرفته است. این ساختمان‌ها در ساختگاه با خاک نوع ۲ (خاک سخت) با خطر نسبی خیلی زیاد و دور از گسل واقع شده‌اند. نمای این قاب‌ها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. مشخصات مقاطع اجزای این قاب‌ها نیز در جدول و جدول ارائه گردیده است. در این ساختمان‌ها ارتفاع کلیه طبقات برابر ۳/۱ متر و عرض دهانه‌ها ۶ متر است. در این ساختمان‌ها مدول الاستیسیته فولاد برابر 200GPa، تنش تسلیم فولاد تیرها برابر 235MPa و فولاد ستون‌ها برابر 350MPa فرض شده است. در این مطالعه، از نرم‌افزار OpenSees[4] (Mazzoni, McKenna, Scott, & Fenves, 2006) به منظور مدل‌سازی سازه‌های مورد مطالعه استفاده می‌شود و سازه‌های به‌صورت قاب‌های دوبعدی متشکل از تیرها و ستون‌های الاستیک با مفاصل پلاستیک متمرکز با مصالح IMK[5] اصلاح شده در دو انتها و نیز با مدل‌سازی چشمه اتصال مدل می‌شوند. همچنین اثرات مرتبه دوم پی-دلتا در ستون‌های قاب اعمال می‌گردند (Eads, Ribeiro, & Barbosa, 2013; Gupta & Krawinkler, 1999; Lignos & Krawinkler, 2011).




شکل ۲: نمای قاب‌های خمشی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه مورد مطالعه

جدول ۱: مشخصات مقاطع قاب‌های خمشی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه

| تیرها با مقطع I | | | | | ستون‌ها با مقطع HSS | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $t_w$ (cm) | $t_f$ (cm) | $b_f$ (cm) | d (cm) | Tag | t (cm) | D (cm) | Tag |
| 1.10 | 2.00 | 22.00 | 50.00 | 5 | 2.00 | 32.00 | 15 |
| 1.00 | 1.50 | 20.00 | 44.00 | 6 | 2.00 | 30.00 | 16 |
| 1.00 | 1.50 | 20.00 | 40.00 | 7 | 2.00 | 25.00 | 17 |
| 1.00 | 1.20 | 18.00 | 36.00 | 8 | 2.00 | 22.00 | 18 |
| 1.00 | 1.20 | 16.00 | 32.00 | 9 | 2.00 | 20.00 | 19 |

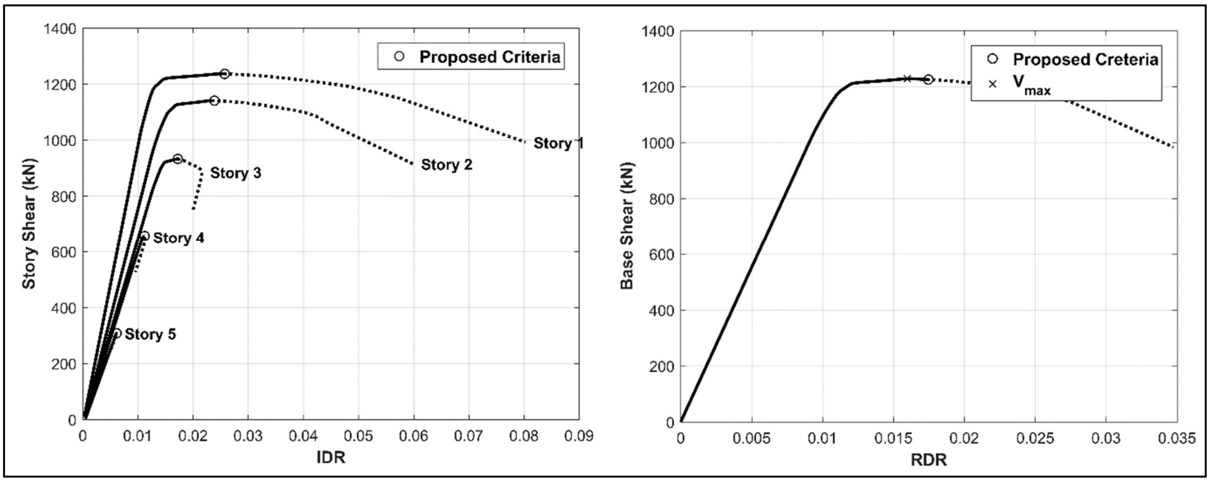
4 Open System for Earthquake Engineering Simulation
5 Ibarra-Medina-Krawinkler

جدول ۲: مشخصات مقاطع المان‌های قاب‌های خمشی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه

| | | | St 1 | St 2 | St 3 | St 4 | St 5 | St 6 | St 7 | St 8 | St 9 | St 10 | St 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11th | Beam | Bays 1, 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 7 | 7 | 9 |
| | | Bays 2, 3 | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 9 |
| | Column | Axis 1, 5 | 15 | 15 | 15 | 17 | 17 | 17 | 17 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| | | Axis 2, 4 | 16 | 16 | 16 | 17 | 17 | 17 | 17 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| | | Axis 3 | 16 | 16 | 16 | 17 | 17 | 17 | 17 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| 8th | Beam | Bays 1, 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 8 | | | |
| | | Bays 2, 3 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 8 | | | |
| | Column | Axis 1, 5 | 17 | 17 | 17 | 18 | 18 | 19 | 19 | 19 | | | |
| | | Axis 2, 4 | 17 | 17 | 18 | 18 | 18 | 19 | 19 | 19 | | | |
| | | Axis 3 | 17 | 17 | 18 | 18 | 18 | 19 | 19 | 19 | | | |
| 5th | Beam | Bays 1, 4 | 6 | 6 | 7 | 7 | 8 | | | | | | |
| | | Bays 2, 3 | 7 | 7 | 7 | 7 | 8 | | | | | | |
| | Column | Axis 1, 5 | 18 | 18 | 18 | 19 | 19 | | | | | | |
| | | Axis 2, 4 | 18 | 18 | 19 | 19 | 19 | | | | | | |
| | | Axis 3 | 18 | 18 | 19 | 19 | 19 | | | | | | |

## معیار فروریزش پیشنهادی

در این تحقیق با ترکیب پارامترهای نسبت دریفت بین طبقه‌ای (IDRst) و برش طبقات (Vst) و استخراج منحنی ظرفیت طبقات، یک معیار جدید برای تعریف سطح آستانه فروریزش در تحلیل‌های پوش‌اور پیشنهاد می‌شود. این معیار تنها به سازه و الگوریتم بارگذاری وابسته است و از نظر مفهومی با شروع فرایند خرابی گسترده در سازه متناسب است. در تحلیل پوش‌اور، منحنی ظرفیت برخی از طبقات در مختصات IDRst-Vst شکل بازگشتی پیدا می‌کند که متناظر با شروع تمرکز خرابی در یک یا چند طبقه از ساختمان است. گام متناظر با اولین بازگشت منحنی ظرفیت طبقات سازه را می‌توان به‌عنوان شروع فرایند خرابی عمده و متناظر با سطح عملکرد CP در نظر گرفت. در شکل  روند تعیین معیار فروریزش یک قاب ۵ طبقه تحت بارگذاری مطابق شکل مد اول سازه برای نمونه ارائه شده است. گام متناظر CP در هر طبقه با علامت 'o' مشخص شده است که معادل گامی است که منحنی ظرفیت اولین طبقه شکل بازگشتی پیدا می‌کند.




شکل ۳: استخراج گام متناظر با آستانه فروریزش سازه‌ای بر اساس منحنی ظرفیت طبقه

## روش پوش‌اور پیشنهادی

در روش پوش‌اور پیشنهادی، بارگذاری به‌صورت ثابت و طبق شکل مد اول تا سوم سازه صورت می‌گیرد. پاسخ نهایی سازه نیز از جمع پاسخ‌های مودال سازه بر اساس معادله (۱) حاصل می‌گردد:

$$IDR_{OMPA}=\sum_{i=1}^{m}\alpha_i IDR_i \tag{1}$$

در این معادله m تعداد مودهای در نظر گرفته شده، $\alpha_i$ ضریب ترکیب مودی مود iام و $IDR_i$ و $IDR_{OMPA}$ به‌ترتیب پروفیل دریفت طبقات در آستانه فروریزش حاصل از تحلیل‌های پوش‌اور مودی مود iام و روش پیشنهادی است که پوش‌اور مدال بهینه شده (OMPA)[۶] نام‌گذاری می‌شود.

ضرایب $\alpha_i$ با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)[۷] (Eberhart & Kennedy, 2002) و بهینه‌سازی برخورد اجسام (BCO)[۸] (Karaboga & Basturk, 2007) و بر اساس پاسخ‌های سه قاب خمشی منظم ۵، ۸ و ۱۱ طبقه در آستانه فروریزش تعیین و پیشنهاد شده‌اند. به منظور استخراج این ضرایب، ابتدا سازه‌ها با روش IDA و با استفاده از ۲۲ جفت رکورد دور از گسل FEMA P695 تحلیل شده‌اند. سپس، میانه دریفت کلیه طبقات آنها در آستانه فروریزش به دست آمده و پروفیل دریفت طبقات حاصل از تحلیل IDA برای هر مدل تعیین گردیده است. در گام بعد، تحلیل‌های پوش‌اور مودی با الگوی توزیع بار مطابق شکل مد اول تا سوم سازه انجام‌شده و پروفیل دریفت طبقات برای هر مود در آستانه فروریزش حاصل شده است. سپس طبق رابطه (۳)، کمینه شدن نرم بردار اختلاف دریفت طبقات حاصل از تحلیل IDA و دریفت حاصل از ترکیب نتایج پوش‌اور مودال به‌عنوان تابع هدف تعریف شده و ضرایب ترکیب مودی بهینه شده (αi) با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تعیین گردیده‌اند که در جدول ۳ نشان داده شده‌اند:

$$e_j = IDR_{j-IDA} - IDR_{j-OMPA} \tag{2}$$

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

در این معادلات n تعداد طبقات سازه، j اندیس طبقه، $IDR_{j\text{-}IDA}$ دریفت طبقه jام حاصل از تحلیل IDA، دریفت طبقه jام حاصل از تحلیل پوش‌اور پیشنهادی، $e_j$ بردار خطای هر طبقه و $\|e\|$ تابع هدف می‌باشد.

*جدول ۳: ضرایب ترکیب مدی حاصل از بهینه‌سازی برای قاب‌های خمشی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه مورد مطالعه*

| | | 3 Mode | | | 2 Modes | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Story** | **Coeff 1** | **Coeff 2** | **Coeff 3** | **Coeff 1** | **Coeff 2** |
| **Bare** | 5 | 1.56 | 0.13 | 0.07 | 1.57 | 0.15 |
| | 8 | 1.21 | 0.44 | 0.19 | 1.26 | 0.57 |
| | 11 | 0.82 | 0.64 | 0.29 | 0.87 | 0.79 |

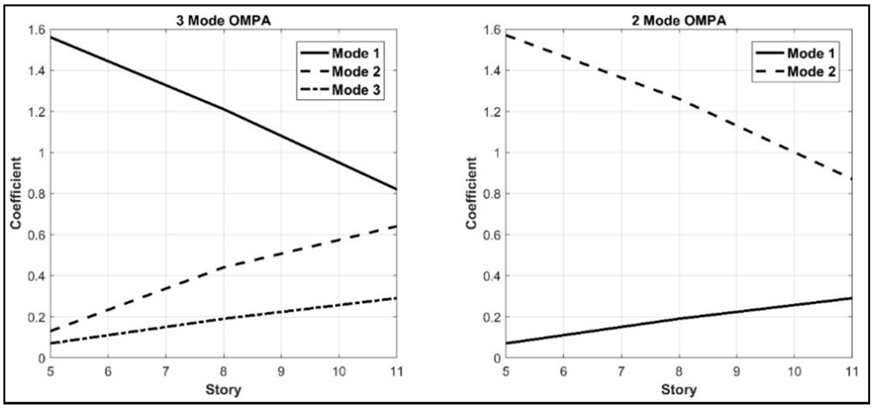
بررسی ضرایب به دست آمده طبق شکل ۴ نشان می‌دهد که میان افزایش تعداد طبقات و ضرایب ترکیب مودی مدهای اول تا سوم روابطی خطی طبق رابطه (۴) قابل برازش است. بدین‌صورت که با افزایش تعداد طبقات، ضریب مشارکت مد اول کاهش و ضرایب مد دوم و سوم افزایش پیدا می‌کنند. در جدول ۴ ضرایب مربوط به رابطه (۴) برای دو حالت در نظر گرفتن دو مود و سه مود ارائه شده است.

$$\alpha = aN + b \tag{4}$$

*جدول ۴: مقادیر ضرایب a و b به منظور تعیین ضرایب ترکیب مودی مودهای اول تا سوم در روش پیشنهادی OMPA*

| | 3 Mode Coefficient | | | 2 Mode Coefficient | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **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 |

[6] Omtimized Modal Pushover Analysis
[7] Particle Swarm Optimization
[8] Artificial Bee Colony



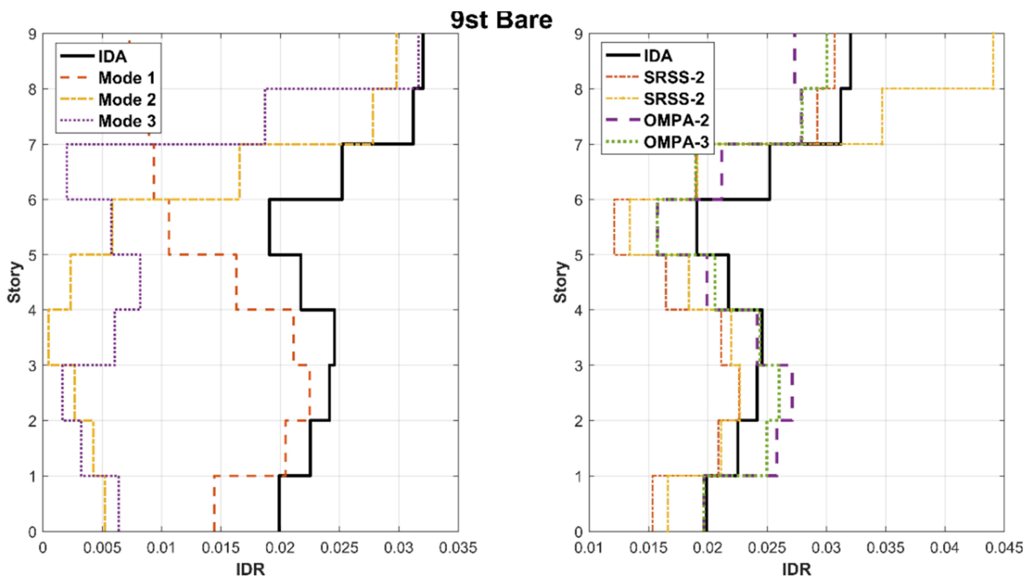

شکل ۴: منحنی روند تغییر ضرایب مدهای اول تا سوم در روش *OMPA* نسبت به تعداد طبقات

## مطالعه موردی

به منظور ارزیابی دقت روش پوش‌اور پیشنهادی OMPA، کاربرد این روش بر روی قاب خمشی ۹ طبقه SAC مدل Pre-Northridge M-2 که یک مدل مرجع در قاب‌های خمشی فولادی است، استفاده می‌شود. جزئیات تفصیلی اجزا و المان‌های این مدل در دستورالعمل FEMA 355c ارائه گردیده است (FEMA, 2000). با استفاده از روش OMPA، ضرایب ترکیب مودی این سازه برای دو حالت در نظر گرفتن دو مود و سه مود در جدول ۵ ارائه شده است. پروفیل دریفت طبقات و پروفیل جابجایی مطلق طبقات این سازه حاصل از روش‌های پوش‌اور در مقایسه با تحلیل IDA در شکل ۵ و شکل ۶ مقادیر خطای این روش‌ها نیز در جدول ۶ ارائه گردیده است.

جدول ۵: ضرایب ترکیب مدی حاصل از روش پیشنهادی *OMPA* برای قاب ۹ طبقه *SAC*

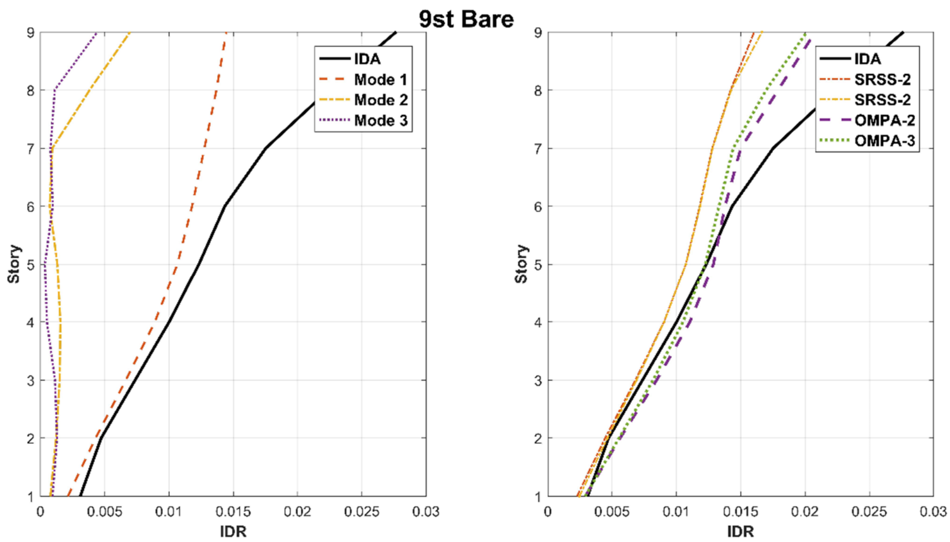
| | Coeff 1 | Coeff 2 | Coeff 3 |
|---|---|---|---|
| 9 Story SAC | 1.12 | 0.61 | |
| | 1.07 | 0.49 | 0.22 |




شکل ۵: پروفیل دریفت طبقات قاب خمشی ۹ طبقه حاصل از روش‌های پوش‌اور در مقایسه با روش *IDA*

جدول ۶: مقادیر خطای روش‌های پوش‌اور در برآورد پاسخ‌های مدل ۹ طبقه *SAC* در آستانه فروریزش در مقایسه با تحلیل *IDA*

| | Mode 1 | SRSS-2 | SRSS-3 | OMPA-2 | OMPA-3 |
|---|---|---|---|---|---|
| Drift | 15.2% | 6.5% | 6.7% | 4.1% | 4.0% |
| Displacement | 8.8% | 8.0% | 7.6% | 5.0% | 5.2% |




*شکل ۶: پروفیل جابجایی طبقات قاب خمشی ۹ طبقه SAC حاصل از روش‌های پوش‌اور در مقایسه با روش IDA*

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، روش پوش‌اور پیشنهادی OMPA دقت بسیار مناسبی در تخمین هر دو پروفیل دریفت و جابجایی طبقات ارائه می‌کنند به‌گونه‌ای که نسبت به نتایج تحلیل پوش‌اور مد اول و روش ترکیب SRSS دقت بسیار بهتری دارند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که برای این سازه نیز در نظر گرفتن دو مد 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 شاخص‌های خرابی جابجایی پایه سازه در آستانه فروریزش شامل پروفیل دریفت طبقات و پروفیل جابجایی طبقات قاب‌های خمشی فولادی را تخمین بزند.

## جمع‌بندی

برآورد شاخص‌های خرابی محلی و کلی در آستانه فروریزش سازه یکی از اهدافی است که در فرایند ارزیابی فروریزش لرزه‌ای به آن پرداخته می‌شود. در این پژوهش یک روش پوش‌اور مدال با عنوان پوش‌اور مودال بهینه شده (OMPA) به منظور برآورد شاخص‌های خرابی سازه شامل پروفیل دریفت و جابجایی طبقات در آستانه فروریزش ارائه گردید که از یک معیار جدید برای سطح آستانه فروریزش (CP) و یک روش ترکیب نتایج مدال نوین استفاده می‌نماید. معیار فروریزش پیشنهادی با استفاده از ترکیب دو شاخص خرابی در مقیاس طبقه شامل دریفت طبقه وبرش طبقه پیشنهاد شده است. بدین‌صورت که گام متناظر با وقوع اولین روند بازگشتی در منحنی ظرفیت طبقات ساختمان (در مختصات IDRst-Vst) به‌عنوان فروریزش سازه‌ای یا آستانه فروریزش (CP) فرض می‌گردد. این معیار به سازه و الگوی بارگذاری وابسته بوده و به یک تغییر فیزیکی مشخص در سازه مرتبط می‌شود.

در روش OMPA پاسخ‌های حاصل از مدهای اول و دوم سازه و یا مدهای اول تا سوم سازه با ضرایبی پیشنهادی ترکیب می‌شوند. این ضرایب با استفاده از دو روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و بهینه‌سازی برخورد اجسام (BCO) و بر اساس پروفیل دریفت طبقات نتایج سه قاب خمشی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه به دست آمده‌اند. این ضرایب یک روند خطی را نسبت به تعداد طبقات نشان می‌دهند به‌گونه‌ای که ضریب مد اول با افزایش تعداد طبقات کاهش‌یافته و ضریب مد دوم و سوم افزایش می‌یابد. این مشاهده با افزایش مشارکت مدال مدهای بالاتر با افزایش تعداد طبقات مطابق است. بر این اساس، برازش‌هایی خطی برای ضرایب پیشنهادی بر اساس تعداد طبقات صورت گرفت و در قالب روابطی خطی برای قاب‌های خمشی ارائه شد. با استفاده از این روابط می‌توان پروفیل دریفت و جابجایی مطلق طبقات قاب‌های خمشی فولادی منظم را در آستانه فروریزش سازه‌ای تخمین زد.

## مراجع

Amini, M.A., & Poursha, M. (2018). Adaptive force-based multimode pushover analysis for seismic evaluation of midrise buildings. *Journal of Structural Engineering*, *144*(8), 04018093.

Antoniou, S., & Pinho, R. (2004). Advantages and limitations of adaptive and non-adaptive force-based pushover procedures. *Journal of Earthquake Engineering*, *8*(4), 497–522.

ASCE 41 (2017). *Seismic rehabilitation and retrofit of existing buildings*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers. Retrieved from www.asce.org/pubs

BHRC (2014). *Iranian code of practice for a seismic resistant design of buildings, Standard no.2800* (4th ed.). Tehran, Iran: Permanent Committee for Revising the Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings.

Chopra, A.K., & Goel, R.K. (2001). A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings : theory and preliminary evaluation. *Earthquake*, *PEER Repor*, 561–582.

Eads, L., Ribeiro, F., & Barbosa, A. (2013). Dynamic analysis of 2-Story moment frame. Retrieved March 4, 2019, from http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Dynamic_Analysis_of_2-Story_Moment_Frame.

Eberhart, R. & Kennedy, J. (2002). A new optimizer using particle swarm theory. In *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science* (pp. 39–43). IEEE.

FEMA (2000). *State of the art report on systems performance of steel moment frames subject to earthquake ground shaking, FEMA 355c*. Washington, D.C: SAC Joint Venture.

FEMA (2009). *Quantification of building seismic performance factors, FEMA P695*. Washington, D.C: Federal Emergency Management Agency.

Gupta, A. & Krawinkler, H. (1999). *Seismic demands for the performance evaluation of steel moment resisting frame structures*. Technical Report 132, Stanford University, Blume Earthquake Engineering Research Center, Department of Civil Engineering.

Karaboga, D., & Basturk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artifical bee colony algorithm. *Journal of Global Optimization*, *39*(3), 459–471.

Lignos, D.G., & Krawinkler, H. (2011). Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading. *Journal of Structural Engineering*, *137*(11), 1291–1302.

Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M., & Fenves, G. (2006). The open system for earthquake engineering simulation (OpenSees).