



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۴۱۹ تا ۴۲۷  
Vol. 48, No. 4, Winter 2016, pp. 419-427



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

Amirkabir Journal of Science and Research  
Civil and Environmental Engineering  
(AJSR-CEE)

## تخمین منحنی متوسط در تحلیل دینامیکی افزایشی با استفاده از رتبه‌بندی زمین‌لرزه‌ها در منطقه

آزاد یزدانی<sup>۱\*</sup>، حسام بهارمست<sup>۲</sup>، ساناز رزمیان<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

۳- استادیار، گروه ریاضی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی

(دریافت: ۱۳۹۲/۵/۱۰، پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۷)

### چکیده

تحلیل دینامیکی افزایشی، یک تحلیل لرزه‌ای مؤلفه‌ای دقیق، اما با حجم زیاد به منظور تعیین عملکرد سازه‌ها در اثر زمین‌لرزه‌های مختلف با شدت‌های متفاوت است. به منظور تعیین منحنی حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی، لازم است تا سازه تحت اثر تعداد زیادی از زمین‌لرزه‌های مختلف قرار گیرد. در این مطالعه به منظور کاهش حجم محاسبات، تعداد محدودی از زمین‌لرزه‌ها در مجموعه زمین‌لرزه‌ها با استفاده از مدل‌های مختلف تحلیل پوششی داده‌ها به صورتی انتخاب می‌گردد که میانگین منحنی حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی به ازای این تعداد محدود برابر با میانگین منحنی حاصل از تحلیل به ازای مجموعه کل زمین‌لرزه‌ها باشد. برای این منظور، مجموعه زمین‌لرزه‌های سناریو بر اساس نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی بر روی سازه یک درجه آزادی معادل سازه چند درجه آزادی تعیین کارایی شده و سپس رتبه‌بندی می‌گردند. بر این اساس، تعداد محدودی از بین مجموعه زمین‌لرزه‌ها در تحلیل دینامیکی افزایشی در سازه چند درجه آزادی بکار می‌رود. روش ارائه‌شده در این مطالعه، به عنوان نمونه برای دو سازه فولادی چهار و هشت طبقه و یک مجموعه زمین‌لرزه بیست رکوردی بررسی شده است و تفاوت منحنی متوسط حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی به ازای مجموعه کل زمین‌لرزه‌ها و زمین‌لرزه‌های انتخابی کمتر از پنج درصد است.

کلمات کلیدی:

تحلیل دینامیکی افزایشی، تحلیل پوششی داده‌ها، رتبه‌بندی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

Yazdani, A., Baharmast, H. and Razmyan, S., 2016. "Estimation of Median Incremental Dynamic Analysis Curve Using Ranking of Strong Motion Records". *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(4), pp. 419-427.

DOI: 10.22060/ceej.2015.504

URL: [http://ceej.aut.ac.ir/article\\_504.html](http://ceej.aut.ac.ir/article_504.html)

E-mail: [m.mohammadigh@iiees.ac.ir](mailto:m.mohammadigh@iiees.ac.ir); نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات:



## ۱- مقدمه

تحلیل دینامیکی افزایشی<sup>۱</sup> مهمترین ابزار در تخمین تقاضا و ظرفیت لرزه‌ای سازه‌ها است [۱]. در این روش تحلیل، یک مجموعه از زمین‌لرزه‌ها (که زمین‌لرزه‌های سناریو در منطقه نامیده می‌شوند)، انتخاب و به سازه اعمال می‌گردند. این تحلیل در واقع یک تحلیل مؤلفه‌ای به شمار می‌آید که در آن، ظرفیت و تقاضای سازه برای شدت‌های مختلف زمین‌لرزه بیان می‌شود. مهمترین مزیت این نوع تحلیل، بیان در چارچوب احتمال‌ها است که می‌توان از آن در تفکر مهندسی زلزله بر اساس عملکرد<sup>۲</sup> استفاده کرد [۱]. تحلیل دینامیکی افزایشی دارای قدرت زیادی در بیان رفتار سازه از حالت الاستیک تا مرحله جاری شدن و ناپایداری دینامیکی سازه بوده؛ اما مستلزم صرف وقت و انرژی فراوان است [۲]. در سازه‌های چند درجه آزادی با تعداد درجات آزادی زیاد و سازه‌های بلندمرتبه، این اشکال بیشتر خود را نشان می‌دهد و استفاده از این روش را مورد تردید قرار می‌دهد. همواره محققین در راستای کاهش حجم عملیات در تحلیل دینامیکی افزایشی تلاش کرده‌اند و تعداد زیادی از این مطالعات بر مبنای تخمین پاسخ سازه چند درجه آزادی بر اساس پاسخ سازه یک درجه آزادی معادل سازه چند درجه آزادی هستند [۳-۵]. تقریب بر مبنای سازه یک درجه آزادی، دقت روش تحلیل دینامیکی افزایشی در سازه چند درجه آزادی را محدود می‌کند. از طرفی دیگر، انتخاب مناسب ثبت‌ها تأثیر زیادی را در پراکندگی پاسخ حاصل از تحلیل دینامیکی دارد و با انتخاب معیار شدت مناسب و نیز مجموعه مناسبی از ثبت‌ها می‌توان پراکندگی پاسخ را کاهش داد [۶،۷]. همچنین به کمک روش‌های بهینه‌سازی می‌توان رکوردهای بهینه در مجموعه زمین‌لرزه‌های سناریو را طوری انتخاب نمود که حجم محاسبات طولانی در تحلیل دینامیکی افزایشی کاسته شود [۸،۹]. در این مطالعه، با استفاده از مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها<sup>۳</sup> [۱۰] روشی پیشنهاد می‌شود که بر اساس آن، زمین‌لرزه‌های سناریو به منظور تخمین متوسط منحنی حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی در سازه چند درجه آزادی رتبه‌بندی شده و تعداد محدودی از این زمین‌لرزه‌ها برای انجام تحلیل دینامیکی افزایشی در سازه چند درجه آزادی انتخاب می‌گردند. به این معنی که متوسط منحنی حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی به ازای تعداد محدود زمین‌لرزه‌ها برابر با متوسط منحنی حاصل از تحلیل به ازای مجموعه کل زمین‌لرزه‌ها باشد. در روند بکار گرفته‌شده در این مطالعه و با توجه به این که حجم و زمان محاسبات در تحلیل دینامیکی افزایشی بر روی سازه‌های یک درجه بسیار کمتر از سازه‌های چند درجه آزادی است، بنابراین زمین‌لرزه‌ها بر اساس پاسخ سازه یک درجه آزادی معادل سازه چند درجه آزادی رتبه‌بندی می‌شوند. قابل ذکر است که فقط رتبه‌بندی بر اساس سازه یک درجه آزادی معادل انجام می‌گیرد و منحنی حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی که در بررسی عملکرد سازه‌ها بکار برده می‌شود، بر اساس سازه چند درجه آزادی؛ اما با تعداد محدودی زمین‌لرزه

انجام می‌شود.

## ۲- بیان روش

هدف از این مطالعه، انتخاب تعداد محدودی از زمین‌لرزه‌ها برای انجام تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی در تحلیل دینامیکی افزایشی است تا از حجم زیاد عملیات این تحلیل کاسته شود. برای دستیابی به این هدف، در ابتدا یک سازه یک درجه آزادی معادل که تا حد امکان مشخصات دینامیکی و رفتار خطی و غیرخطی یکسانی را با سازه چند درجه آزادی داشته باشد، تعیین می‌گردد. منحنی‌های مختلف حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی در سازه یک درجه آزادی معادل به ازای زمین‌لرزه‌های مختلف محاسبه می‌شود و مقدار کارایی این زمین‌لرزه‌ها با استفاده از مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها معلوم می‌گردد. پس از انجام عملیات رتبه‌بندی، تعداد محدودی از زمین‌لرزه‌ها به صورتی انتخاب می‌شوند که متوسط آن‌ها با متوسط کل رکوردها تا حد امکان یکسان باشد. گام‌های اساسی این روش در شکل (۱) نشان داده شده است و مراحل آن، به صورت زیر بیان می‌گردد:

- مدلسازی سازه چند درجه آزادی و تعیین زمین‌لرزه‌های سناریو

در منطقه

- تخمین مناسب سازه یک درجه آزادی معادل به کمک مشخصات

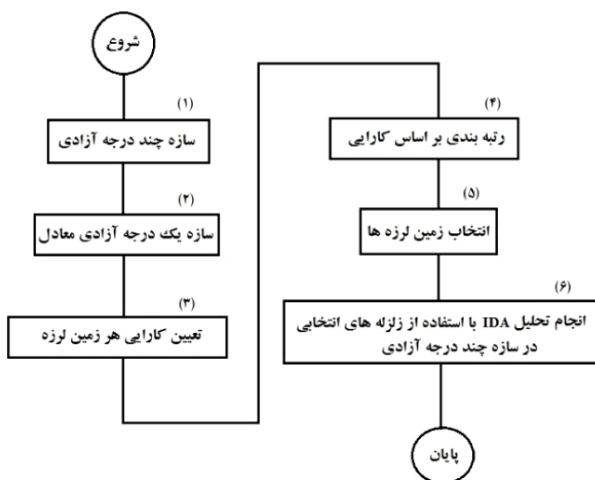
خطی و غیرخطی سازه چند درجه آزادی که به منظور اجتناب از انجام تحلیل دینامیکی افزایشی بر روی سازه چند درجه آزادی و نیز برای افزایش سرعت محاسبات انجام می‌گیرد. قابل ذکر است که تقریب سازه چند درجه آزادی به یک درجه آزادی فقط در رتبه‌بندی رکوردهای زمین‌لرزه بکار گرفته می‌شود.

- محاسبه منحنی‌های حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی در سازه

معادل (یک درجه آزادی) به ازای زمین‌لرزه‌های مختلف و نیز تخمین

مقدار کارایی منحنی‌های مختلف به کمک تحلیل پوششی داده‌ها

- رتبه‌بندی زمین‌لرزه‌ها بر اساس کارایی بدست آمده. برای این

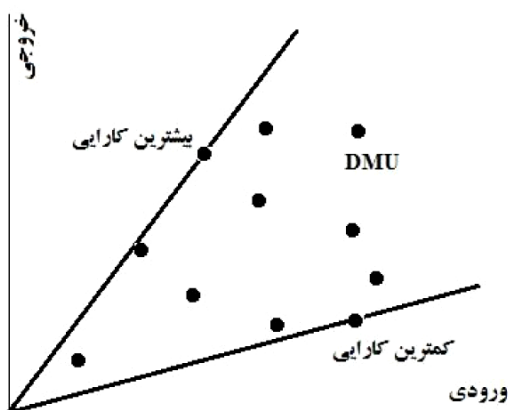


شکل (۱): مراحل روش پیشنهادی

<sup>1</sup> Incremental Dynamic Analysis

<sup>2</sup> Performance Based Earthquake Engineering

<sup>3</sup> Data Envelopment Analysis



شکل (۲): تعیین مرزهای بالا و پایین کارایی برای واحدهای تصمیم‌گیرنده با ضرایب کارایی متفاوت

بالا و پایین را نشان می‌دهند. هر کدام از آن‌ها با توجه به الگوهای مختلف تحلیل پوششی داده‌ها، کاربردهای متفاوتی را خواهند داشت. در مدل‌های ساده معمولاً کارایی بر اساس نسبت خروجی‌های وزن‌دار به ورودی‌های وزن‌دار شده تعریف می‌گردد که مقدار هدف بهینه این نسبت، کارایی واحد تصمیم‌گیرنده نامیده می‌شود [۱۲]. در این مدل‌ها می‌توان مازاد ورودی ( $S^-$ ) و کمبود خروجی ( $S^+$ ) را به عنوان متغیرهای کمکی مشخص نمود. در این مطالعه، از مدل متغیر کمکی تعدیل‌یافته استفاده می‌شود که در تعیین کارایی هر واحد تصمیم‌گیرنده به صورت همزمان تمامی مازاد ورودی و کمبود خروجی‌ها را در نظر می‌گیرد [۱۴].

در این مدل، اگر  $n$  واحد تصمیم‌گیرنده وجود داشته باشد، ماتریس ورودی و خروجی آن‌ها به ترتیب برابر با  $X=(x_{ij}) \in R^{m \times n}$  و  $Y=(y_{ij}) \in R^{s \times n}$  است. بر اساس تعریف بیان‌شده در تحلیل پوششی داده‌ها [۱۲]، تمامی واحدهای تصمیم‌گیرنده باید در شرایطی صدق کنند که این شرایط، مجموعه امکان تولید را تشکیل می‌دهد (مجموعه  $P$ ) و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P = \{(x, y) | x \geq X \lambda, y \leq Y \lambda, \lambda \geq 0\} \quad (1)$$

که در آن،  $\lambda$  برداری نامنفی در  $R^n$  است. در مدل متغیر کمکی تعدیل‌یافته مقدار کارایی (ضریب  $\rho$ ) برای هر واحد تصمیم‌گیرنده به وسیله مدل زیر تعیین می‌گردد:

$$\text{Min } \rho = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^- / x_{io}}{1 - \frac{1}{s} \sum_{r=1}^s S_r^+ / y_{ro}} \quad (2)$$

در این مدل، واحد تصمیم‌گیرنده مورد ارزیابی به صورت  $(x_o, y_o)$  در نظر گرفته می‌شود و با توجه به این که باید در شرط ارائه‌شده در رابطه (۱) صدق کند، بنابراین  $x_o = X\lambda + S^+$  و  $y_o = Y\lambda + S^-$  خواهد بود که ضرایب  $S^+$  و  $S^-$  مثبت هستند.

منظور، زمین‌لرزه‌ها بر حسب کارایی از بالا به پایین (و یا برعکس) لیست می‌شوند.

- انتخاب زمین‌لرزه‌هایی که دارای رتبه‌های متوسط هستند. زیرا هدف از این مطالعه، انتخاب تعداد محدودی از زمین‌لرزه‌ها است که منحنی متوسط حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی به ازای آن‌ها با منحنی متوسط به ازای کل مجموعه زمین‌لرزه‌ها برابر است.

- تحلیل دینامیکی افزایشی بر روی سازه چند درجه آزادی با استفاده از زلزله‌های انتخاب‌شده و انتخاب متوسط رکوردهای انتخابی به عنوان متوسط کل منحنی‌ها در تحلیل دینامیکی افزایشی به ازای کل رکوردها

### ۳- تخمین سازه یک درجه آزادی معادل

همان‌طور که در بند قبلی توضیح داده شد، به منظور کاهش حجم محاسبات مجموعه کل زمین‌لرزه‌ها به کمک نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی در سازه یک درجه آزادی معادل رتبه‌بندی می‌شوند. مطالعات زیادی برای تخمین سازه چند درجه آزادی به یک درجه آزادی معادل انجام شده است [۲،۴،۱۱]. با توجه به این که تقریب سازه چند درجه آزادی به یک درجه آزادی به صورت مستقیم در پاسخ حاصل از تحلیل سازه چند درجه آزادی در این مطالعه بکار گرفته نمی‌شود و فقط در انتخاب رکوردها استفاده می‌گردد، بنابراین از روش پیشنهاد شده توسط فجفر<sup>۱</sup> [۱۱] برای تخمین سازه یک درجه آزادی معادل و انجام تحلیل دینامیکی افزایشی بر روی آن استفاده می‌گردد. در این روش، رفتار سازه یک درجه آزادی بر اساس تحلیل بار افزون سازه چند درجه آزادی تحت الگوی حالت اول سازه بدست می‌آید و سپس جرم معادل سازه یک درجه آزادی تعیین می‌شود. ضریب انتقال که ضریب مشارکت مودی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود، برای اصلاح رابطه تغییر شکل-نیروی بدست آمده از سازه چند درجه آزادی و انتقال آن به سازه یک درجه آزادی معادل نیز محاسبه می‌گردد.

### ۴- تحلیل پوششی داده‌ها

تحلیل پوششی داده‌ها، یک روش ریاضی برای تعیین مقدار کارایی بوده و کارایی یک معیار بسیار ساده و مؤثر برای ارزیابی واحدهای تصمیم‌گیرنده<sup>۳</sup> است. در واقع، واحدهای تصمیم‌گیرنده مانند توابع ریاضی عمل می‌کنند و خروجی‌های خاصی را به ازای ورودی تولید می‌کنند. البته لازم به ذکر است که بر خلاف توابع، در تعریف واحدهای تصمیم‌گیرنده هیچ محدودیتی در نظر گرفته نمی‌شود. کارایی به صورت ساده از تقسیم ورودی بر خروجی و به وسیله یک اسکالر در بازه صفر و یک تعریف می‌گردد. این اسکالر با استفاده از مدل‌های ریاضی مختلفی که طراحی شده‌اند، تعیین می‌گردد [۱۴-۱۲]. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده، واحدهای تصمیم‌گیرنده با مقادیر کارایی برابر با یک و صفر مرزهای

<sup>1</sup> P. Fajfar

<sup>2</sup> Modal Participation Factor

<sup>3</sup> Decision Making Units

## ۵- محاسبه خطا

دوره ارتعاش اصلی این دو سازه به ترتیب ۰/۷۷ و ۱/۲۲ ثانیه است. مقاومت جاری شدن ستون‌ها ۳۴۵ مگاپاسکال و تیرها ۲۴۸ مگاپاسکال است. اعضای سازه با رفتار غیرخطی دو خطی با شیب ۳ درصد [۱۴] و اثرات غیرخطی هندسی با در نظر گرفتن اثرات  $P-\Delta$  منظور شده است. در شکل (۴) مدل سازه‌ها و اعضای آن و نیز مقدار جرم هر طبقه نشان داده شده است. زلزله‌های سناریوی منطقه [۱۷] با بزرگای ۶/۵ تا ۶/۹ برای نوع خاک سفت به منظور انجام تحلیل دینامیکی افزایشی در نظر گرفته می‌شود که در جدول (۱) نشان داده شده است. لازم به توضیح است که نزدیکترین فاصله سایت تا صفحه گسیختگی گسل در زلزله‌ها بیشتر از ۱۵ کیلومتر در نظر گرفته شده است تا اثرات حوزه نزدیک در آن وارد نشود [۱۸].

در گام دوم الگوی پیشنهادی، سازه یک درجه آزادی معادل با سازه چند درجه آزادی تخمین زده می‌شود. ابتدا رابطه نیرو-تغییر شکل برای سازه یک درجه آزادی معادل با استفاده از تحلیل بار افزون سازه چند درجه آزادی بدست می‌آید که این رابطه با یک سه‌خطی ایده‌آل تقریب زده می‌شود. این الگوی نیرو-تغییر شکل بیان‌کننده رفتار خطی و غیرخطی سازه یک درجه آزادی معادل سازه چند درجه آزادی است. برای این منظور دو سازه چهار و هشت طبقه مدلسازی شده [۱۹] و منحنی‌های بار افزون و سه‌خطی ایده‌آل برای آن‌ها تعیین می‌گردد که در شکل (۵) نشان داده شده است. دوره تناوب ارتعاش اصلی سازه معادل یک درجه آزادی در سازه‌های معادل چهار و هشت طبقه به ترتیب ۰/۷۶ و ۱/۱۸ ثانیه و ضریب انتقال آن‌ها ( $\Gamma$ ) برابر با ۱/۳۱ و ۱/۳۲ تعیین می‌شود. پس از تعیین مشخصات سازه‌های یک درجه آزادی معادل و تعیین روابط نیرو-تغییر شکل در آن‌ها، تحلیل دینامیکی افزایشی بر روی آن‌ها انجام می‌شود. همان‌طور که در بند دوم اشاره شد، به منظور رتبه‌بندی زمین‌لرزه‌ها در سازه‌های یک درجه آزادی معادل منحنی‌های حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی تحت اثر کل مجموعه زمین‌لرزه‌ها محاسبه می‌گردد. شکل (۶) منحنی‌های حاصل از تحلیل بر روی سازه‌های معادل یک درجه آزادی به ازای مجموعه کل زمین‌لرزه‌ها را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که حجم محاسبات در سازه یک درجه آزادی بسیار کمتر از محاسبات در سازه‌های چند درجه آزادی است. به منظور تحلیل برای تعیین کارایی هر منحنی حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی در سازه یک درجه آزادی معادل، لازم است تا ماتریس ورودی و خروجی تشکیل شود.

در این‌جا هر زلزله به عنوان یک واحد تصمیم‌گیرنده در نظر گرفته می‌شود و دوران‌های مختلف به عنوان ورودی و پاسخ‌های شتاب در هر واحد تصمیم‌گیرنده متناظر با هر دوران به عنوان خروجی لحاظ می‌شود. حال با استفاده از مدلی که از متغیر کمکی استفاده می‌کند، کارایی هر واحد تصمیم‌گیرنده تعیین شده و سپس عملیات رتبه‌بندی انجام می‌گیرد. به منظور رتبه‌بندی، کافی است تا واحدهای تصمیم‌گیرنده را با توجه به مقدار کارایی از بالا به پایین و یا برعکس مرتب نمود. با در نظر داشتن این که واحدهای تصمیم‌گیرنده با کارایی بالا مرزهای بالایی و واحدهای

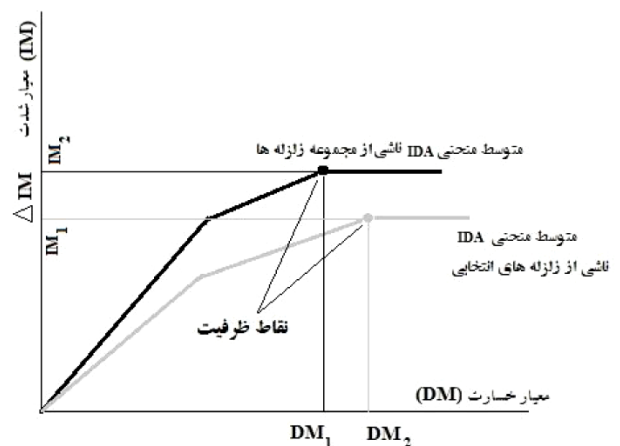
در حالت کلی، در تعیین منحنی متوسط حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی لازم است تا به ازای مجموعه کل زمین‌لرزه‌ها که زلزله‌های سناریو نامیده می‌شوند، تحلیل دینامیکی افزایشی انجام گیرد [۴]. به کمک روش مطرح‌شده در این مطالعه، تعداد محدودی زمین‌لرزه از زلزله‌های سناریو به صورتی انتخاب می‌شوند که منحنی متوسط حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی به ازای آن‌ها با متوسط حاصل از مجموعه کل رکوردها با تقریب خوبی برابر باشد. از این رو، یک معیار ساده برای تعیین تفاوت خطای ناشی از متوسط منحنی‌های حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی به ازای مجموعه کل زمین‌لرزه‌ها و زمین‌لرزه‌های محدود انتخابی بیان می‌گردد. این معیار در واقع تفاوت سطح زیر منحنی متوسط ناشی از مجموعه کل زمین‌لرزه‌های سناریو در منطقه و منحنی متوسط ناشی از زمین‌لرزه‌های انتخابی است. این معیار خطا به صورت ریاضی و به کمک رابطه (۳) بیان می‌گردد و در شکل (۳) نیز مؤلفه‌های این رابطه نشان داده شده است:

$$error = 100 \times \frac{\int_0^{DM_1} IM_2 dDM - \int_0^{DM_2} IM_1 dDM}{\int_0^{DM_2} IM_2 dDM} \quad (3)$$

که در این رابطه،  $DM$  مؤلفه‌ای است که معیار خسارت را بیان می‌کند و  $(DM_1, IM_1)$  و  $(DM_2, IM_2)$  به ترتیب مختصات نقطه ظرفیت در حالتی است که از کل مجموعه و یا تعداد محدودی از زمین‌لرزه‌های سناریو استفاده می‌گردد.

## ۶- مثال عددی

برای بررسی روش پیشنهادی، دو سازه قاب خمشی فولادی چهار و هشت طبقه با شکل‌پذیری ویژه در نظر گرفته می‌شود. پلان دو ساختمان مشابه هم بوده و ستون‌ها به فاصله مرکز به مرکز ۵/۵ متر از یکدیگر قرار دارند. ارتفاع طبقه اول در هر دو سازه ۵ متر و در دیگر طبقات ۳ متر است. این سازه‌ها در منطقه کالیفرنیا و در شهر لوس‌آنجلس در نظر گرفته شده و برای خاک نوع  $D$  بارگذاری لرزه‌ای شده است [۱۵].



شکل (۳): معرفی مؤلفه‌ها در محاسبه خطا [۶]





جدول (۱): زمین‌لرزه‌های انتخابی برای تحلیل دینامیکی غیرخطی

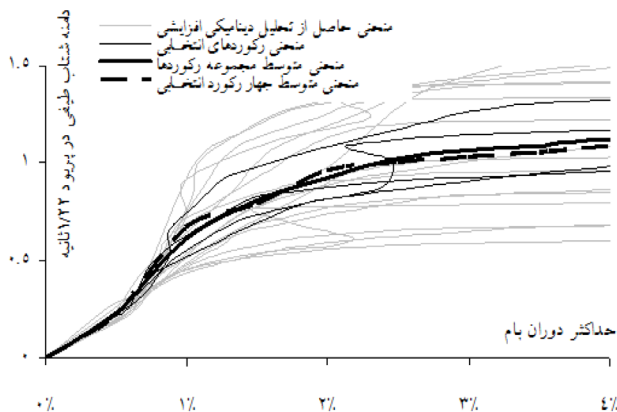
| شماره رکورد | رویداد              | ایستگاه                | راستای رکورد (درجه) | بزرگی ( $M_w$ ) | نزدیکترین فاصله سایت تا صفحه گسل (کیلومتر) | بیشینه شتاب زمین (g) |
|-------------|---------------------|------------------------|---------------------|-----------------|--|----------------------|
| ۱           | لوماپریتا، ۱۸۹۸     | Agnews State Hospital  | ۹۰                  | ۶/۹             | ۲۸   | ۰/۱۵۹                |
| ۲           | امپریال، ۱۹۷۹       | Plaster City           | ۱۳۵                 | ۶/۵             | ۳۱/۷                                       | ۰/۰۵۷                |
| ۳           | لوماپریتا، ۱۸۹۸     | Hollister Diff. Array  | ۲۵۵                 | ۶/۹             | ۲۵/۸                                       | ۰/۲۷۹                |
| ۴           | لوماپریتا، ۱۸۹۸     | And. Dam Downstream    | ۲۷۰                 | ۶/۹             | ۲۱/۴                                       | ۰/۲۴۴                |
| ۵           | لوماپریتا، ۱۸۹۸     | Coyote Lake Dam        | ۲۸۵                 | ۶/۹             | ۲۲/۳                                       | ۰/۱۷۹                |
| ۶           | امپریال، ۱۹۷۹       | Cucapah                | ۸۵                  | ۶/۵             | ۲۳/۶                                       | ۰/۳۰۹                |
| ۷           | لوماپریتا، ۱۸۹۸     | Sunnyvale Colton Ave.  | ۲۷۰                 | ۶/۹             | ۲۸/۸                                       | ۰/۲۰۷                |
| ۸           | امپریال، ۱۹۷۹       | El Centro Array #13    | ۱۴۰                 | ۶/۵             | ۲۱/۹                                       | ۰/۱۱۷                |
| ۹           | لوماپریتا، ۱۸۹۸     | Westmoreland Fire Sta. | ۹۰                  | ۶/۹             | ۱۵/۱                                       | ۰/۰۷۴                |
| ۱۰          | لوماپریتا، ۱۸۹۸     | Hollister South & Pine | صفر                 | ۶/۹             | ۲۸/۸                                       | ۰/۳۷۱                |
| ۱۱          | لوماپریتا، ۱۸۹۸     | Sunnyvale Colton Ave.  | ۳۶۰                 | ۶/۹             | ۲۸/۸                                       | ۰/۲۰۹                |
| ۱۲          | سوپرستیشن هیل، ۱۹۸۷ | Wildlife Liquefaction  | ۹۰                  | ۶/۷             | ۲۴/۴                                       | ۰/۱۸۰                |
| ۱۳          | امپریال، ۱۹۷۹       | Chihuahua              | ۲۸۲                 | ۶/۵             | ۲۸/۷                                       | ۰/۲۵۴                |
| ۱۴          | امپریال، ۱۹۷۹       | El Centro Array #13    | ۲۳۰                 | ۶/۵             | ۲۱/۹                                       | ۰/۱۳۹                |
| ۱۵          | امپریال، ۱۹۷۹       | Westmoreland Fire Sta. | ۱۸۰                 | ۶/۵             | ۱۵/۱                                       | ۰/۱۱۰                |
| ۱۶          | لوماپریتا، ۱۸۹۸     | WAHO                   | صفر                 | ۶/۹             | ۱۶/۹                                       | ۰/۳۷۰                |
| ۱۷          | سوپرستیشن هیل، ۱۹۸۷ | Wildlife Liquefaction  | ۳۶۰                 | ۶/۷             | ۲۴/۴                                       | ۰/۲۰۰                |
| ۱۸          | امپریال، ۱۹۷۹       | Plaster City           | ۴۵                  | ۶/۵             | ۳۱/۷                                       | ۰/۰۴۲                |
| ۱۹          | لوماپریتا، ۱۸۹۸     | Hollister Diff. Array  | ۱۶۵                 | ۶/۹             | ۲۵/۸                                       | ۰/۲۶۹                |
| ۲۰          | لوماپریتا، ۱۸۹۸     | WAHO                   | ۹۰                  | ۶/۹             | ۱۶/۹                                       | ۰/۶۳۸                |

طبقه و بام به عنوان معیار خسارت در نظر گرفته شود، محاسبه می‌گردد. در شکل (۷) منحنی‌های مختلف حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی با خط کم‌رنگ و منحنی متوسط در قاب‌های چهار و هشت طبقه به ازای مجموعه زمین‌لرزه‌ها به صورت خط پررنگ نشان داده شده است. در این شکل همچنین متوسط منحنی‌های مانند زمین‌لرزه‌های انتخابی (چهار رکورد) در سازه چند درجه آزادی به صورت نقطه‌چین توپر نیز ترسیم شده است. این دو منحنی متوسط (که معرف منحنی متوسط حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی هستند) با دقت خوبی بر هم منطبق هستند. قابل ذکر است که حجم محاسبات لازم برای منحنی متوسط با روند ارائه‌شده در این مطالعه (چهار ثبت)، به مراتب کمتر از استفاده از کل مجموعه ثبت‌ها است. به کمک مباحث آورده‌شده در بند پنجم، مقدار درصد خطای منحنی‌های متوسط مانند زمین‌لرزه‌های انتخابی و مجموعه کل زمین‌لرزه‌ها در قاب‌های چهار و هشت طبقه برابر با ۵/۱ و ۳/۶ درصد

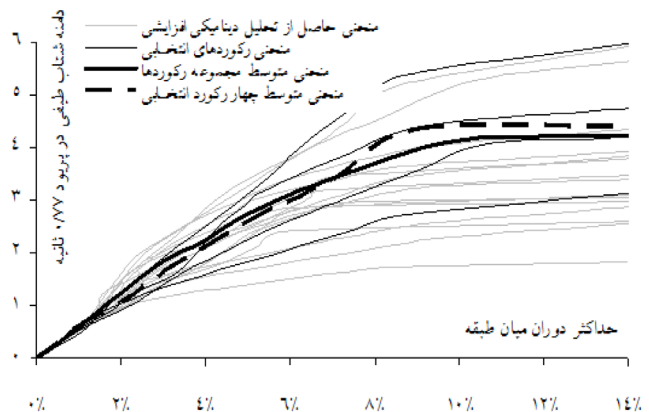
تصمیم‌گیرنده با کارایی پایین مرزهای پایینی را تشکیل می‌دهند و نیز با توجه به این که هدف، در واقع تعیین زمین‌لرزه‌های محدود برای تخمین منحنی متوسط حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی است، بنابراین زمین‌لرزه‌های میانی این نیاز را تأمین می‌کنند. در جدول (۲) مقدار کارایی و رتبه زمین‌لرزه‌های مختلف برای سازه‌های یک درجه آزادی معادل چهار و هشت طبقه نشان داده شده است. با توجه به این که هدف در این مطالعه تعیین منحنی متوسط حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی است، بنابراین زمین‌لرزه‌هایی که در این جدول دارای رتبه‌های میانی هستند نشان داده شده است که این زمین‌لرزه‌ها می‌توانند برای تعیین منحنی متوسط حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی بکار گرفته شوند. به منظور بررسی درستی روش پیشنهاد شده در سازه‌های چند درجه آزادی چهار و هشت طبقه به ازای زمین‌لرزه‌های مختلف، منحنی‌های حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی به ترتیب در حالتی که بیشینه دوران میان

جدول (۲): رتبه‌بندی و تعیین زلزله‌های انتخابی

| سازه معادل هشت طبقه         |        | سازه معادل چهار طبقه        |        | شماره ثبت |
|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------|
| رتبه‌بندی ثبت بر حسب کارایی | کارایی | رتبه‌بندی ثبت بر حسب کارایی | کارایی |           |
| ۱                           | ۱/۰    | ۲                           | ۰/۷۰۷  | ۱         |
| ۵                           | ۰/۴۷۳  | ۱۲                          | ۱/۰    | ۲         |
| ۹                           | ۰/۷۲۹  | ۱۸                          | ۰/۷۴۶  | ۳         |
| ۱۱                          | ۰/۷۲۷  | ۸                           | ۰/۸۱۸  | ۴         |
| ۱۳                          | ۱/۰    | ۱۴                          | ۰/۷۲۶  | ۵         |
| ۱۴                          | ۰/۵۴۳  | ۹                           | ۰/۷۸۶  | ۶         |
| ۱۵                          | ۰/۷۷۲  | ۱۱                          | ۰/۶۵۵  | ۷         |
| ۷                           | ۰/۷۲۰  | ۴                           | ۰/۹۰۷  | ۸         |
| ۳<br>↓                      | ۱/۰    | ۲۰<br>↓                     | ۰/۸۵۵  | ۹         |
| ۴<br>↓                      | ۰/۵۳۰  | ۱۰<br>↓                     | ۰/۸۰۷  | ۱۰        |
| ۸<br>↑                      | ۱/۰    | ۶<br>↑                      | ۰/۸۲۳  | ۱۱        |
| ۱۷<br>↑                     | ۰/۶۳۵  | ۳<br>↑                      | ۱/۰    | ۱۲        |
| ۱۲                          | ۱/۰    | ۵                           | ۰/۶۹۶  | ۱۳        |
| ۱۸                          | ۱/۰    | ۱                           | ۰/۸۸۶  | ۱۴        |
| ۲۰                          | ۰/۸۰۵  | ۱۵                          | ۰/۶۹۸  | ۱۵        |
| ۶                           | ۰/۵۲۳  | ۱۳                          | ۰/۵۰۴  | ۱۶        |
| ۱۹                          | ۰/۶۷۷  | ۱۹                          | ۰/۶۷۱  | ۱۷        |
| ۱۰                          | ۰/۶۳   | ۱۷                          | ۱/۰    | ۱۸        |
| ۱۶                          | ۰/۵۳۰  | ۷                           | ۰/۶۷۵  | ۱۹        |
| ۲                           | ۰/۵۴۶  | ۱۶                          | ۰/۸۱۱  | ۲۰        |



(ب)



(الف)

شکل (۷): مقایسه متوسط منحنی‌ها بر اساس مجموعه زمین‌لرزه‌ها و زمین‌لرزه‌های انتخابی؛ الف) در قاب چهار طبقه و ب) در قاب هشت طبقه

است.

Incremental Dynamic Analysis Using Modal Push-over Analysis Procedure,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, No. 15, pp. 1853–1873, 2006.

- [3] Dolsek, M. and Fajfar, P.; “Simplified Non-linear Seismic Analysis of Infilled Reinforced Concrete Frame,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, Vol. 34, No. 1, pp. 49–66, 2007.
- [4] Vamvatsikos, D. and Cornell, C. A.; “Direct Estimation of the Seismic Demand and Capacity of MDOF Systems through Incremental Dynamic Analysis of an SDOF Approximation,” *Journal of Structure Engineering*, Vol. 131, No. 4, pp. 589–599, 2005.
- [5] Vamvatsikos, D. and Cornell, C. A.; “Direct Estimation of the Seismic Demand and Capacity of Oscillators with Multi-linear Static Push-overs through IDA,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, No. 9, pp. 1097–1117, 2006.
- [6] Iervolino, I. and Cornell, C. A.; “Record Selection for Non-linear Seismic Analysis of Structures,” *Earthquake Spectra*, Vol. 21, No. 3, pp. 685–713, 2005.
- [7] Luco, N. and Bazzurro, P.; “Does Amplitude Scaling of Ground Motion Records Result in Biased Non-linear Structural Drift Responses?,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 36, No. 13, pp. 1813–1835, 2006.
- [8] Azarbakht, A. and Dolsek, M.; “Prediction Median IDA Curve by Employing Limited of Ground Motion Records,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, Vol. 31, No. 15, pp. 2401–2421, 2007.
- [9] Azarbakht, A. and Dolsek, M.; “Progressive Incremental Dynamic Analysis for First-mode Dominated Structures,” *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 137, No. 3, pp. 445–455, 2010.
- [10] Cooper, W. W.; Seiford, L. M. and Tone, K.; “Data Envelopment Analysis—A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA—Solver Software,” *Kluwer Academic Publishers*, 2002.

## ۷- نتیجه‌گیری

تحلیل دینامیکی افزایشی، یک تحلیل مؤلفه‌ای مؤثر لرزه‌ای به منظور بررسی عملکرد سازه‌ها است. این تحلیل یکی از پایه‌های اصلی در شیوه طراحی بر مبنای عملکرد در مهندسی زلزله است. در واقع تحلیل دینامیکی افزایشی یک مجموعه از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی بوده که به ازای زمین‌لرزه‌های مختلف در ترازهای شدت متفاوت حاصل می‌شود. اگرچه تحلیل دینامیکی افزایشی در بیان رفتار سازه قدرتمند است، اما مستلزم صرف وقت و انرژی فراوان بوده و این ایراد وقتی تعداد ثبت‌های مجموعه زمین‌لرزه‌ها بالا می‌رود و یا سازه دارای اعضای زیادی است، بیشتر مطرح می‌شود. در این مقاله، سعی شده تا با استفاده از مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها و نیز تعیین کارایی برای هر زمین‌لرزه در مجموعه زلزله‌های سناریو در منطقه، منحنی متوسط حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی سازه را با تعداد محدودی زمین‌لرزه بدست آورد. برای این منظور، تمامی زمین‌لرزه‌های مجموعه سناریو بر اساس نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی بر روی سازه یک درجه آزادی معادل سازه چند درجه آزادی تعیین کارایی شده و سپس رتبه‌بندی می‌شوند. بر این اساس، از بین مجموعه زمین‌لرزه‌ها، تعداد محدودی از آن‌ها برای تخمین منحنی متوسط حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی در سازه چند درجه آزادی بکار می‌رود. در نتیجه برای محاسبه منحنی متوسط حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی، تعداد تحلیل غیرخطی دینامیکی کمتری لازم است. در سازه یک درجه آزادی معادل رابطه نیرو-تغییر شکل با استفاده از تحلیل بار افزون بر روی سازه چند درجه آزادی تعیین می‌شود که این رابطه، با یک سه‌خطی ایده‌آل تقریب زده می‌شود. قابل ذکر است که از سازه یک درجه آزادی فقط در رتبه‌بندی رکوردها استفاده می‌شود و منحنی متوسط حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی (که در بررسی عملکرد سازه کاربرد دارد)، بر اساس سازه اصلی چند درجه آزادی تعیین می‌شود. مهمترین مزیت این روش، سادگی و خطای کم در مقایسه با نتیجه واقعی است که در نمونه‌های آورده‌شده در این مطالعه، مقدار خطا قابل قبول و کمتر از پنج درصد است. لازم به ذکر است که درصد خطا بستگی به تعداد ثبت‌های انتخاب‌شده بر اساس این مطالعه دارد. کاربرد روند ارائه‌شده در این مطالعه محدود به سازه‌هایی است که حالت اول در آن‌ها غالب بوده و در مورد سازه‌هایی که در حالت‌های بالاتر نقش زیادی را دارند، در حال بررسی و مطالعه است.

## ۸- مراجع

- [1] Vamvatsikos, D. and Cornell, C. A.; “Incremental Dynamic Analysis,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 3, pp. 491–514, 2001.
- [2] Han, S. W. and Chopra, A. K.; “Approximate



- [15] International Building Code (IBC), International Code Council Inc., Falls Church, VA, 2006.
- [16] Luco, N. and Cornell, C. A.; "Effects of Connection Fractures on SMRF Seismic Drift Demands," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 1, pp. 127–136, 2000.
- [17] PEER; "Strong Motion Database," Available from: <http://peer.Berkeley.edu/NGA>
- [18] Vamvatsikos, D. and Cornell, C. A.; "Applied Incremental Dynamic Analysis," *Earthquake Spectra*, Vol. 20, No. 2, pp. 523–553, 2004.
- [19] PEER; "Open System for Earthquake Engineering Simulation, OpenSees," *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, University of California, Berkeley, 1999. Available from: <http://opensees.berkeley.edu/>
- [11] Fajfar, P.; "Capacity Spectrum Method Based on Inelastic Demand Spectra," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, No. 9, pp. 979–999, 1999.
- [12] Charnes, A.; Cooper, W. W. and Rhodes, E.; "Measuring the Efficiency of Decision Making Unit," *European Journal of Operational Research*, Vol. 2, No. 6, pp. 429–444, 1978.
- [13] Banker, R.; Charnes, A. and Cooper, W. W.; "Some Model for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis," *Management Science*, Vol. 30, No. 9, pp. 1072–1098, 1984.
- [14] Tone, K.; "A Slacks-based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis," *Research Report, Graduate School of Policy Science*, Saitama University, Urawa, Saitam, Japan, 1997.