



# بررسی رفتار دینامیکی سازه‌های فولادی واقع در حوزه نزدیک با درصد نامنظمی‌های مختلف در پلان با استفاده از آنالیزهای IDA و MIDA

نادر فنائی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا مهدی پناه<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
۲- کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
\* تهران، صندوق پستی ۴۴۱۶-۱۵۸۷۵، fanaie@kntu.ac.ir  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۲۵)

## چکیده

تحلیل دینامیکی غیر خطی افزایشی مودال در حقیقت شیوه‌ای سریع برای به دست آوردن منحنی‌های IDA می‌باشد. در این مقاله برای اولین بار به بررسی این روش برای سازه‌های سه بعدی و تأثیر پارامترهایی چون نامنظمی هندسی سازه و همچنین اثر رکوردهای حوزه نزدیک بر این روش پرداخته است. بدین منظور ۱۲ عدد سازه‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ طبقه با درصد نامنظمی‌های مختلف تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک قرار گرفت و نتایج تحلیل آنها با روش IDA مقایسه گردید. مطالعه این پارامترها نشان داد که سرعت انجام آنالیز و استخراج منحنی‌های تقاضای لرزه‌ای در سازه‌های سه بعدی به طرز شگفت‌انگیزی بالاتر از روش دقیق IDA می‌باشد. البته این روش در سازه‌های کوتاه مرتبه و متوسط مرتبه در زلزله‌های حوزه نزدیک نمی‌تواند منحنی‌های IDA را استخراج کند. در نهایت از این مطالعه نتیجه می‌شود که در سازه‌های نامنظم بهتر است که معیار جابجایی نسبی در این روش با معیار دیگری جایگزین گردد.

## واژگان کلیدی

تحلیل دینامیکی افزایشی مودال، نامنظمی هندسی سازه در پلان، زلزله‌های حوزه نزدیک، تحلیل دینامیکی افزایشی

## Studying of Dynamic Behavior of Steel Structures Built in Near-Field with Different Percentages of Irregularity in Plan Using IDA and MIDA Methods

N. Fanaie, H.R. Mehdipanah

### Abstract

In fact, modal incremental nonlinear dynamic analysis is the fast method to obtain Incremental Dynamic Analysis (IDA) curves. In this article, 3D models are employed to study the effects of geometrical irregularity and near field records on this method. In this regard, twelve structures with different percent of geometrical irregularity are subjected to the near field records and the MIDA obtained results are compared with those of IDA method. The studying of these parameters reveals that the speed of analysis as well as extracting the seismic demand curves are dramatically faster than IDA method although this method cannot extract IDA curves properly in low-rise and moderate-rise buildings subjected to near field records. Finally, it is concluded that in irregular structures, it is better to replace drift with another criterion as damage index.

### Keywords

Modal incremental dynamic analysis (MIDA), Geometrical irregularity in plan, Near field earthquakes, Incremental dynamic analysis (IDA)



می‌شود [۱]؛ اگر جواب، مثبت است، از منحنی ظرفیت سه خطی ارائه شده در مقاله Mofid و همکارانش ۲۰۱۱ استفاده می‌شود [۴].

۶-  $m$  امین سطح مقیاس شده زلزله، به سازه یک درجه آزادی اعمال می‌شود و بیشینه جابجایی استخراج می‌شود.

۷- طبق فرمولی که در مقاله Mofid و همکارانش ۲۰۰۵ ارائه شده است که به شرح فرمول زیر است [۱] این جابجایی را می‌توان به جابجایی بیشینه برای سازه چند درجه آزادی تبدیل کرد.

$$(D_{yi})_{MDF} = (D_{yi})_{SDF} \times \left[ \frac{L}{M} \right] \phi_{ri} \quad (۱)$$

۸- سازه سه بعدی تا جابجایی محاسبه شده قسمت قبل پوش می‌شود.

۹- آیا سازه ناپایدار شده است؟ اگر جواب منفی است یک سطح به سطح مقیاس شده زلزله (سطح  $m$ ) افزوده می‌شود. اگر جواب مثبت است، آیا مدهای دیگری هم می‌توان مورد مطالعه قرار داد؟ اگر جواب مثبت است یک مد دیگر در نظر گرفته شود، اگر جواب منفی است باید به مرحله بعد رفت.

۱۰- جواب‌ها از روش SRSS ترکیب می‌شود.

۱۱- آیا رکورد دیگری موجود است؟ اگر جواب مثبت است مراحل ۱ تا ۱۰ تکرار می‌شود، اگر جواب منفی است، باید به مرحله ۱۲ رفت.

۱۲- منحنی MIDA تولید می‌شود.

### ۳- مدل کردن و فرضیات مدل

آیین نامه ASCE7-10 بیان می‌دارد که هرگاه فرو رفتگی در یکی از گوشه‌های سازه حداقل ۱۵٪ بُعد سازه در آن جهت و به طور همزمان در هر دو جهت اتفاق افتد، آن سازه از لحاظ هندسی نامنظم می‌باشد [۵]. با توجه به شکل (۱) اگر  $Y/L' > 0.15$  و  $X/L > 0.15$  آنگاه آن سازه نامنظم حساب می‌شود.

در این مطالعه ۱۰٪ فرو رفتگی در هر دو جهت به طور همزمان به عنوان سازه منظم و ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ فرو رفتگی در هر دو جهت به طور همزمان به عنوان نامنظمی هندسی در سازه انتخاب شده است. در هر جهت اصلی در پلان سازه، سه دهانه ۵ متری در نظر گرفته شده، همچنین برای سازه‌ها سه تیپ ارتفاعی در نظر گرفته شده که به ترتیب ۶، ۱۲ و ۱۸ طبقه بوده و ارتفاع هر طبقه ۳ متر می‌باشد. فرض شده است که سازه‌ها در منطقه کالیفرنیا آمریکا با لرزه خیزی بالا واقع شده‌اند و نوع خاک نیز C فرض شده است. سازه‌ها نهایتاً بر اساس آیین نامه

روش تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) یکی از دقیق‌ترین راه حل‌ها برای برآورد رفتار دینامیکی سازه می‌باشد. در مقابل، مهمترین ایراد این روش، زمان بر بودن آن می‌باشد. بعد از سال ۲۰۰۰ نیاز به روش جدیدی احساس می‌شد که بتواند این ایراد مهم روش تحلیل دینامیکی افزایشی را مرتفع کند. در سال ۲۰۰۵ یک روش تقریبی که قادر بود رفتار دینامیکی سازه‌ها را در زمانی کمتر برآورد کند، تحت عنوان تحلیل دینامیکی افزایشی غیر خطی مودال توسط Mofid و همکارانش در سال ۲۰۰۵ [۱] ابداع گشت. Han و Chopra در سال ۲۰۰۶ [۲] روشی تحت عنوان آنالیز بار افزون مودال بر اساس تحلیل دینامیکی افزایشی ارائه کردند. در سال ۲۰۰۸ این روش برای بر اساس مفاهیم انرژی بهبود یافت [۳]. با توجه به اینکه سازه‌های واقعی، سه بعدی هستند، نیاز مبرمی احساس می‌شد که این روش برای سازه‌های سه بعدی با تمامی خواص خود به خصوص نامنظمی هندسی، مورد مطالعه قرار گیرند. می‌دانیم که رکوردهای حوزه نزدیک، رفتاری پالس گونه دارند و محتوای فرکانسی آنها می‌تواند بر روی نتایج تحلیل‌ها، تأثیر قابل توجهی بگذارند که این تأثیر تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است.

در این مقاله سعی شده است که جواب‌های آنالیز MIDA با آنالیز IDA بر روی سازه‌های فولادی سه بعدی دارای نامنظمی هندسی در پلان، با لحاظ کردن اثر حوزه نزدیک، مورد بررسی قرار گیرد تا بتوان به چشم انداز صحیحی از میزان خطای روش MIDA با در نظر گرفتن نامنظمی هندسی و همچنین اثر حوزه نزدیک دست یافت.

### ۲- مروری بر روش MIDA برای قاب‌های معمول دو

#### بعدی

بر اساس روش ابداع شده توسط Mofid و همکارانش در سال ۲۰۰۵، گام‌های انجام آنالیز دینامیکی افزایشی مودال، به شرح زیر است [۱]:

۱- مدل کردن سازه

۲- محاسبه زمان تناوب و فاکتور مشارکت مد نام

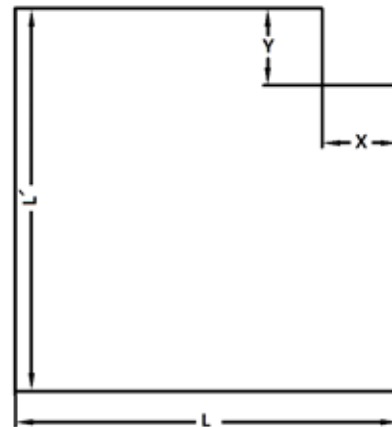
۳- ایجاد یک نوسان کننده یک درجه آزادی معادل

۴- پوش کردن سازه چند درجه آزادی، تحت اثر بارگذاری جانبی مرتبط با مد نام

۵- آیا منحنی بار افزون دارای سخت شدگی منفی می‌باشد؟ اگر جواب، منفی است، از منحنی ظرفیت ایده‌آل‌سازی دو خطی ارائه شده در مقاله Mofid و همکارانش ۲۰۰۵ استفاده



AISC360-10 بر اساس بارهای مرده و زنده و باد و زلزله طراحی و کنترل گردیده‌اند.



شکل ۱- پلان کلی سازه‌ها

برای انجام تحلیل IDA می‌بایست سازه‌هایی که در نرم افزار Etabs مدل شده بودند، دقیقاً در نرم افزار OpenSees مدل شوند و برای این منظور، از دو نوع صحت سنجی استفاده گردید.

#### ۴- صحت سنجی

در این تحقیق برای اینکه سازه‌ها به درستی مدل شوند، دو نوع صحت سنجی انجام گردید. از علل انتخاب دو نوع صحت سنجی می‌توان به این اشاره داشت که ممکن است سختی یک طبقه کم مدل شده باشد و همزمان سختی طبقه دیگری در همان سازه بیشتر مدل شده باشد و این اشتباه در مدل‌سازی سازه منجر به این شود که برحسب اتفاق، پیوند سازه در این دو نرم افزار یکی شود، در حالی که این دو سازه از لحاظ ماهیت یکی نیستند. پس با چک کردن شکل مدلی که در حقیقت برگرفته از ماهیت سختی هر طبقه می‌باشد، می‌توان اطمینان حاصل کرد که دو سازه یکسان هستند و سختی و جرم طبقات سازه درست مدل‌سازی شده‌اند. در نتیجه اگر ناهمخوانی در مدل‌سازی سختی و جرم در هر طبقه وجود داشته باشد به راحتی قابل ردیابی بوده و برطرف کردن آن به آسانی امکان‌پذیر است. این دو نوع صحت سنجی به قرار زیر می‌باشد:

۴-۱- صحت سنجی بر اساس پیوند محاسبه شده توسط نرم‌افزارهای OpenSees و Etabs  
به دلیل کثرت جداول، نمونه‌ای از صحت سنجی بر اساس پیوند سازه‌ها در جدول (۱) و (۲) ارائه می‌شود.

جدول ۱- صحت سنجی پیوند در سازه‌های ۱۲ طبقه، درصد نامنظمی‌های ۱۰٪ و ۲۰٪

۱۰٪				درصد نامنظمی
نسبت (%)	تفاوت	Period (OpenSees)	Period (Etabs)	مد
۵/۹۴	۰/۰۸۷	۱/۳۸۳	۱/۴۷۰	۱
۷/۹۹	۰/۱۱۶	۱/۳۳۹	۱/۴۵۵	۲
۳/۸۶	۰/۰۲۱	۰/۵۲۸	۰/۵۴۹	۴
۵/۵۱	۰/۰۳۰	۰/۵۱۵	۰/۵۴۵	۵
۱/۷۹	۰/۰۰۶	۰/۳۰۹	۰/۳۱۵	۷
۵/۶۱	۰/۰۱۷	۰/۲۹۲	۰/۳۰۹	۸
۲۰٪				درصد نامنظمی
نسبت (%)	تفاوت	Period (OpenSees)	Period (Etabs)	مد
۱/۰۴	۰/۰۱۳	۱/۲۷۸	۱/۲۹۲	۱
۱/۸۸	۰/۰۲۴	۱/۲۳۰	۱/۲۵۴	۲
۱/۳۸	۰/۰۰۷	۰/۴۹۵	۰/۴۸۹	۴
۲/۴۲	۰/۰۱۱	۰/۴۶۲	۰/۴۷۴	۵
۴/۳۳	۰/۰۱۲	۰/۲۸۸	۰/۲۷۶	۷
۱/۱۴	۰/۰۰۳	۰/۲۶۴	۰/۲۶۷	۸

جدول ۲- صحت سنجی پیوند در سازه‌های ۱۲ طبقه، درصد نامنظمی‌های ۳۰٪ و ۴۰٪

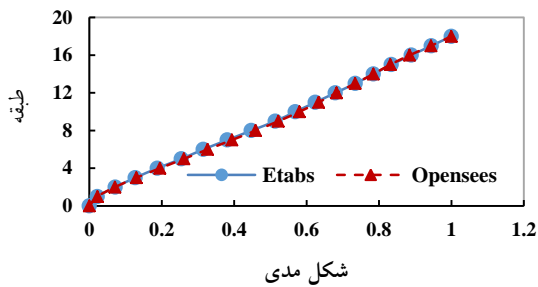
۳۰٪				درصد نامنظمی
نسبت (%)	تفاوت	Period (OpenSees)	Period (Etabs)	مد
۲/۱۵	۰/۰۲۷	۱/۲۴۹	۱/۲۷۷	۱
۲/۱۸	۰/۰۲۸	۱/۲۴۱	۱/۲۶۹	۲
۰/۹۴	۰/۰۰۵	۰/۴۹۲	۰/۴۸۷	۴
۰/۱۰	۰/۰۰۰	۰/۴۸۳	۰/۴۸۳	۵
۲/۶۶	۰/۰۰۷	۰/۲۸۷	۰/۲۷۹	۷
۱/۱۲	۰/۰۰۳	۰/۲۸۱	۰/۲۷۸	۸
۴۰٪				درصد نامنظمی
نسبت (%)	تفاوت	Period (OpenSees)	Period (Etabs)	مد
۲/۴۴	۰/۰۲۸	۱/۱۲۷	۱/۱۵۵	۱
۱/۳۵	۰/۰۱۵	۱/۱۱۱	۱/۱۲۷	۲
۰/۰۵	۰/۰۰۰	۰/۴۴۰	۰/۴۴۰	۴
۱/۱۹	۰/۰۰۵	۰/۴۲۸	۰/۴۳۴	۵
۲/۲۰	۰/۰۰۶	۰/۲۶۵	۰/۲۵۹	۷
۱/۲۹	۰/۰۰۳	۰/۲۵۳	۰/۲۵۷	۸

#### ۴-۲- صحت سنجی شکل مدی

با چک کردن شکل مدی که در حقیقت برگرفته از ماهیت سختی هر طبقه می‌باشد، می‌توان اطمینان حاصل کرد که دو سازه یکسان هستند و سختی و جرم طبقات سازه درست مدل‌سازی شده‌اند. در نتیجه اگر ناهمخوانی در مدل‌سازی سختی و جرم در هر طبقه هر سازه وجود داشته باشد به راحتی با این نوع از صحت سنجی قابل ردیابی بوده و برطرف کردن آن به آسانی امکان‌پذیر است.

در شکل (۲)، مد اول در جهت x سازه ۶ طبقه در دو نرم افزار Etabs و OpenSees همپوشانی دارند، در شکل (۳)، مد اول در جهت x سازه ۱۲ طبقه در دو نرم افزار همپوشانی دارند و نهایتاً در شکل (۴)، مد اول در جهت y سازه ۱۸ طبقه در دو نرم افزار همپوشانی دارند.

همانطور که از جدول (۱) و (۲) مشاهده می‌شود اختلاف نسبی پیرو سازه‌ها کمتر از ۸٪ می‌باشد که نشان از معادل بودن این دو سازه از لحاظ پیرویی است. همانطور که در شکل‌های (۲) تا (۴) مشاهده می‌شود، سازه‌ها از لحاظ شکل مدی بر یکدیگر انطباق دارند که نشان می‌دهد در تک تک سازه‌ها سختی طبقه که ناشی از سختی المان‌های طبقه می‌باشد به درستی مدل شده است و همچنین جرم‌های طبقات سازه به درستی محاسبه و اعمال گردیده است.



شکل ۲- صحت سنجی شکل مدی سازه ۶ طبقه با درصد نامنظمی ۳۰٪ در جهت y

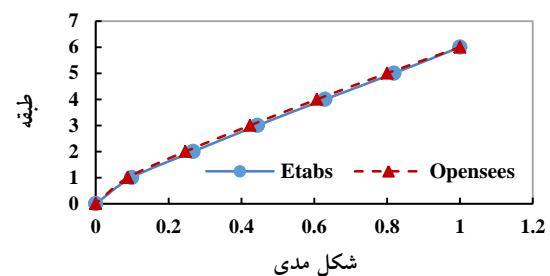
#### ۵- نحوه انتخاب رکوردهای حوزه نزدیک

برای انتخاب رکوردهای حوزه نزدیک می‌بایست الزاماتی که در ادامه آورده شده است، لحاظ گردد [۶]. در ابتدا، نوع خاک باید با نوع خاکی که سازه‌ها روی آن طراحی شده است، مطابقت داشته باشد. همچنین نوع سازوکار کانونی گسل‌های منطقه‌ای که سازه‌ها در آن ساخته شده‌اند باید با نوع سازوکار کانونی منطقه‌ای که رکوردها در آن ثبت شده‌اند، یکسان باشد. همچنین بزرگای زلزله می‌بایست حدوداً بزرگتر از ۶ ریشتر باشد تا از انتخاب اشتباه رکورد پس لرزه به جای رکورد اصلی، جلوگیری شود. همچنین بیشینه شتاب زمین می‌بایست بزرگ‌تر از  $0.7g$  باشد و پارامترهای فاصله جویور بور ( $R_{jb}$ ) و فاصله گسیختگی ( $R_{rup}$ ) می‌بایست کوچکتر از ۱۰ کیلومتر باشد تا رکورد بتواند جزء رکوردهای حوزه نزدیک دسته بندی شود. نهایتاً در نمودار سرعت برحسب زمان، می‌بایست رفتار پالس گونه مشاهده شود. در این مطالعه ساز و کار کانونی گسل‌های مسبب رکوردها، به صورت امتداد لغز انتخاب گردید و همچنین خاک نوع C فرض شد. با توجه به الزامات فوق و همچنین الزامات دستورالعمل FEMA\_P695 در زمینه انتخاب رکوردهای حوزه نزدیک [۶]، و پس از جستجو در سایت معتبر PEER، رکوردها بر اساس جدول (۳) انتخاب گردید.

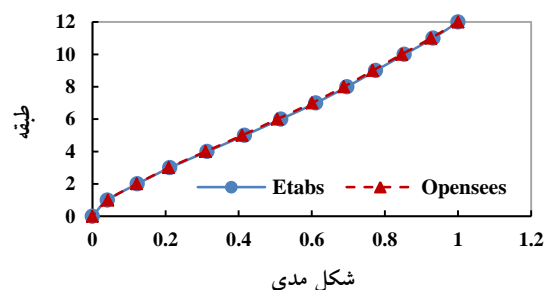
رکوردهای ۱، ۴، ۵ و ۷ از مقاله Dimakopoulou و همکارانش انتخاب شد [۷] و رکورد ۳ نیز از مقاله Davoodi و همکارانش انتخاب گردید [۸]. بقیه رکوردها نیز بر اساس پارامترهای تعیین شده در FEMA P695 انتخاب شدند [۶].

#### ۶- انجام تحلیل و نمودارهای حاصله

در این مقاله، در ابتدا برای به دست آوردن منحنی دوخطی ذکر شده در قسمت ۲، می‌بایست به اعضای سازه ای، مفصل پلاستیک صحیح برای انجام آنالیز بار افزون بر اساس



شکل ۳- صحت سنجی شکل مدی سازه ۱۲ طبقه با درصد نامنظمی ۱۰٪ در جهت x



شکل ۴- صحت سنجی شکل مدی سازه ۱۸ طبقه با درصد نامنظمی ۱۰٪ در جهت x



جدول ۳- لیست رکوردهای حوزه نزدیک منتخب

شماره	نام زلزله	سال	نام ایستگاه	بزرگا	مکانیزم	$R_{fb}$ (km)	$R_{rup}$ (km)	$V_s 30$ (m/s)
۱	Morgan Hill	۱۹۸۴	Coyote Lake Dam, Southwest Abutment	۶/۱۹	امتداد لغز	۰/۱۸	۰/۵۳	۵۶۱/۴۳
۲	Bam, Iran	۲۰۰۳	Bam	۶/۶	امتداد لغز	۰/۰۵	۱/۷	۴۸۷/۴
۳	Parkfield	۱۹۶۶	Temblor pre-1969	۶/۱۹	امتداد لغز	۱۵/۹۶	۱۵/۹۶	۵۲۷/۹۲
۴	San Salvador	۱۹۸۶	Geotech Investig Center	۵/۸	امتداد لغز	۲/۱۴	۶/۳	۴۸۹/۳۴
۵	Mammoth Lakes-06	۱۹۸۰	Long Valley Dam (Upr L Abut)	۵/۹۴	امتداد لغز	۹/۶۵	۱۶/۰۳	۵۳۷/۱۶
۶	Chi-Chi, Taiwan-04	۱۹۹۹	CHY074	۶/۲	امتداد لغز	۶/۰۲	۶/۲	۵۵۳/۴۳
۷	Coyote Lake	۱۹۷۹	Gilroy Array #6	۵/۷	امتداد لغز	۰/۴۲	۳/۱۱	۶۶۳/۳۱
۸	Parkfield-02-CA	۲۰۰۴	Parkfield, Cholame 3E	۶	امتداد لغز	۴/۹۵	۵/۵۵	۳۹۷/۳۶
۹	Kocaeli, Turkey	۱۹۹۹	Arcelik	۷/۵۱	امتداد لغز	۱۰/۵۶	۱۳/۴۹	۵۲۳/۰
۱۰	Darfield, New Zealand	۲۰۱۰	LPCC	۷	امتداد لغز	۲۵/۲۱	۲۵/۶۷	۶۴۹/۶۷

انجام گرفته و قاعده برابری مساحت زیر منحنی بار جانبی-تغییر مکان رعایت شده است. بنابراین این منحنی‌های دو خطی ایده‌آل سازی شده را می‌توان با بکارگیری مشخصات لازم برای هر سازه تک درجه آزادی معادل هر مد، به منحنی رفتاری مصالح برای آن سازه‌های تک درجه آزادی تبدیل نمود. در ادامه، این منحنی‌های ایده‌آل سازی شده بر اساس آنچه در قسمت ۲ ذکر شده بود، برای سازه‌های یک درجه آزادی معادل سازی گردید. برای تمامی ۱۲ سازه در هر مد، یک سازه تک درجه آزادی مستقل می‌بایست ساخته می‌شد که تحت تأثیر رکوردهای حوزه نزدیک قرار گیرد. شایان ذکر است که سازه‌های تک درجه آزادی در نرم افزار OpenSees مدل گشت. در المان‌های سازه تک درجه آزادی، یک جرم و یک فنر بی وزن که دارای رفتار مصالح دو خطی است، مدل شدند. سپس، ماکزیمم جابجایی بدست آمده از تحلیل افزایشی این سازه‌های تک درجه آزادی طبق رابطه‌ی (۱) [۱]، به ماکزیمم جابجایی برای تحلیل بار افزون سازه سه بعدی تبدیل گشت.

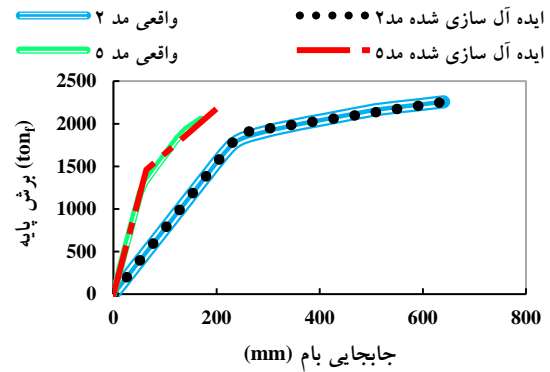
سپس سازه‌ها پوش گردیدند و اگر در سازه‌ها، مفاصل پلاستیک در پای ستون‌ها تشکیل می‌شد، تحلیل متوقف می‌گردید چون کل سازه ناپایدار می‌شد و اگر هم مفاصل پلاستیک در پای ستون‌ها تشکیل نمی‌شد، تحلیل می‌بایست ادامه پیدا می‌کرد و در نهایت جواب‌های بدست آمده از تک تک رکوردها با یکدیگر برای هر سازه به روش SRSS ترکیب می‌شد. شایان ذکر است که در انجام این تحلیل‌ها برای سازه‌های ۶ و ۱۲ طبقه به دلیل حجم بالای محاسبات از دو مد اول در راستای اصلی سازه‌ها و در سازه‌های ۱۸ طبقه به دلیل آنکه

دستورالعمل FEMA356 به صورت دستی اعمال می‌گشت [۹]. سپس سازه تا جایی باید پوش می‌شد که مفاصل پلاستیک ابتدا در دو سر تیرها و در نهایت در پای ستون‌ها تشکیل می‌شد که به ناپایداری کلی سازه منجر گردد. منحنی‌های دوخطی می‌بایست بر اساس قاعده برابری سطوح زیر منحنی بار جانبی-تغییر مکان، به صورت دوخطی ایده‌آل سازی شود. این کار توسط برنامه نویسی در اکسل و اعمال شرایط مرزی صحیح و محاسبه سطوح از طریق سطوح کوچک‌تر دوزنقه‌ای انجام شد.

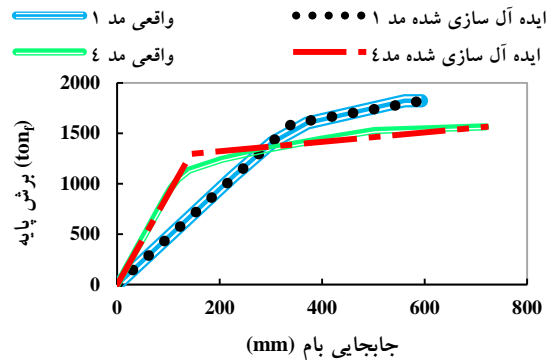
در سازه‌های سه بعدی، مدهای اول و دوم هر یک در راستای عمود بر هم قرار می‌گیرند که معمولاً نزدیک به راستاهای اصلی سازه هستند و مد سوم در این نوع از سازه‌ها، پیچشی می‌باشد. بنابراین در این مقاله، مد اول، چهارم، هفتم و .... نشانگر یک جهت اصلی و مدهای دوم، پنجم، هشتم و .... نمایانگر جهت دیگر اصلی سازه می‌باشند. از آنجا که تعداد سازه‌ها و به تبع آن، تعداد نمودارهای صحت سنجی زیاد است، برای حفظ تنوع صحت سنجی در بعضی از سازه‌ها، یک جهت اصلی و در بعضی دیگر، جهت اصلی دیگر مد نظر قرار گرفته است. نمودار صحت سنجی سازه‌های منتخب در شکل‌های (۵) تا (۷) آورده شده است. برای مثال همان گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، مدهای اول و چهارم آورده شده است که نمایانگر یک جهت اصلی می‌باشد. همانگونه که در شکل‌های (۵) تا (۷) مشاهده می‌شود منحنی بار افزون به دست آمده از نرم افزار Etabs با منحنی ایده‌آل سازی شده دو خطی تطابق خوبی دارد که نشان می‌دهد تمامی مراحل مدل‌سازی به درستی



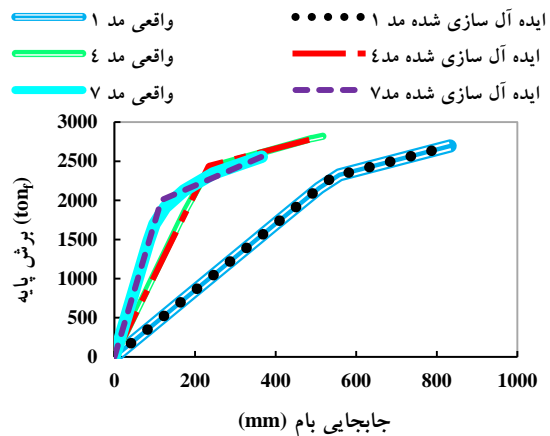
مدهای بالاتر اثر خود را بیشتر نمایان می‌کنند از سه مد اصلی در جهت اصلی سازه‌ها استفاده شده است.



شکل ۵- تطابق منحنی بار افزون دو خطی ایده‌آل سازی شده با منحنی بار افزون واقعی سازه ۶ طبقه با ۳۰ درصد نامنظمی



شکل ۶- تطابق منحنی بار افزون دو خطی ایده‌آل سازی شده با منحنی بار افزون واقعی سازه ۱۲ طبقه با ۲۰ درصد نامنظمی



شکل ۷- تطابق منحنی بار افزون دو خطی ایده‌آل سازی شده با منحنی بار افزون واقعی سازه ۱۸ طبقه با ۴۰ درصد نامنظمی

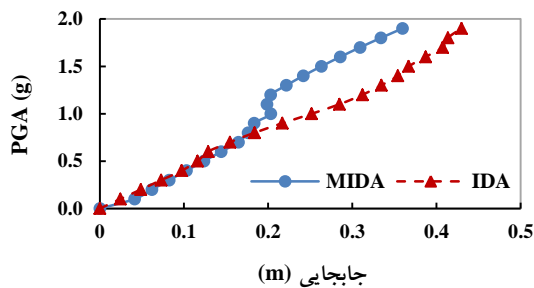
بعد از انجام صحت سنجی و مطابقت دادن منحنی‌های بار

افزون با منحنی‌های دو خطی ایده‌آل سازی شده، این اطمینان حاصل می‌شود که روند صحیح MIDA انجام شده است. ۱۲ سازه تحت اثر ۱۰ رکورد حوزه نزدیک در یک جهت اصلی پلان سازه، تحلیل‌های IDA و MIDA را تجربه کردند. همانند تحقیقات قبلی، معیارهای جابجایی و جابجایی نسبی طبقه بام به عنوان معیارهای خرابی برای تمامی سازه‌ها در نظر گرفته شد [۱، ۳ و ۴]. معیار اندازه شدت در همه سازه‌ها PGA بود که مشابه تحقیقات Mofid و همکارانش [۱، ۳ و ۴] انتخاب گردید. بر اساس آنچه گفته شد ۱۲۰ نمودار مقایسه‌ای به دست آمد. به دلیل کثرت نمودارها، فقط تعدادی از آنها در این مقاله ارائه شده است.

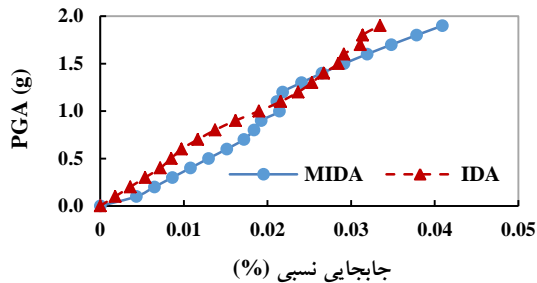
#### ۶-۱- مقایسه جابجایی و جابجایی نسبی بام برحسب PGA تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک

#### ۶-۱-۱- مقایسه جابجایی و جابجایی نسبی بام برحسب PGA در رکورد زلزله Morgan Hill برای سازه ۶ طبقه

به دلیل کثرت نمودارها، مقایسه جابجایی و جابجایی نسبی بام برحسب PGA در رکورد زلزله Morgan Hill برای سازه‌های ۶ طبقه در درصد نامنظمی‌های هندسی ۱۰٪ تا ۴۰٪ در شکل‌های (۸) تا (۱۵) ارائه شده است.

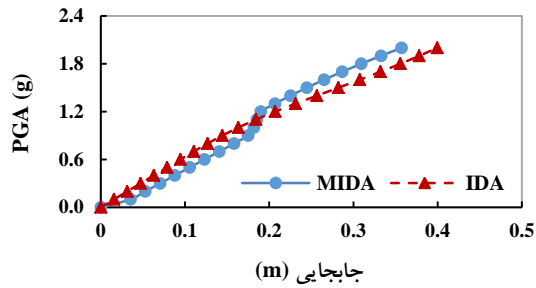


شکل ۸- مقایسه جابجایی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۶ طبقه-۱۰٪ نامنظمی

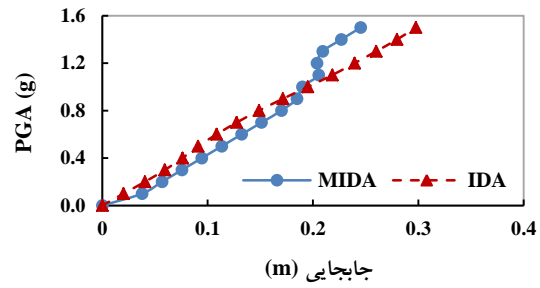


شکل ۹- مقایسه جابجایی نسبی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۶ طبقه-۱۰٪ نامنظمی

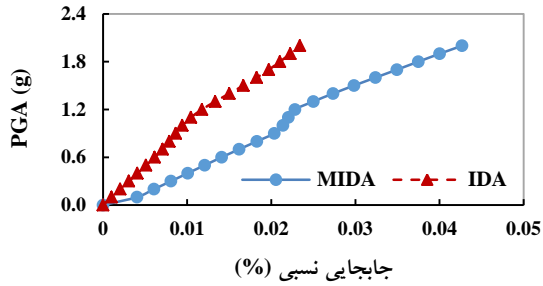




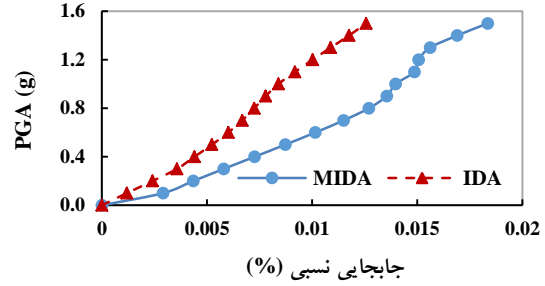
شکل ۱۴- مقایسه جابجایی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۶ طبقه-۴۰٪ نامنظمی



شکل ۱۰- مقایسه جابجایی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۶ طبقه-۲۰٪ نامنظمی

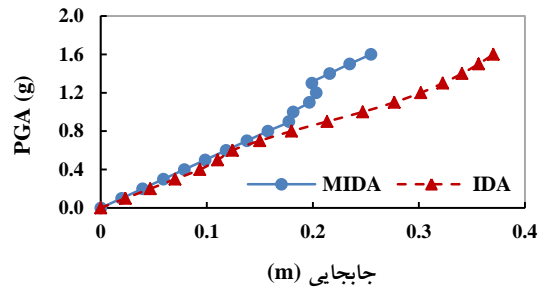


شکل ۱۵- مقایسه جابجایی نسبی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۶ طبقه-۴۰٪ نامنظمی



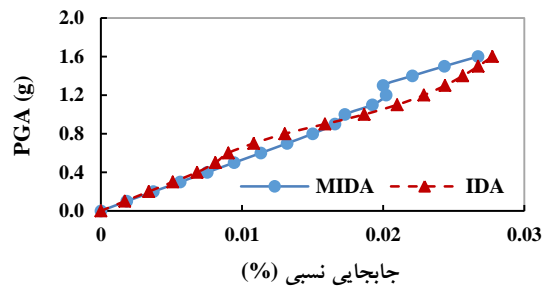
شکل ۱۱- مقایسه جابجایی نسبی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۶ طبقه-۲۰٪ نامنظمی

از مقایسه جابجایی بام و همچنین جابجایی نسبی بام در هر دو روش IDA و MIDA مشاهده شد که روش تقریبی تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی مودال در سازه‌های ۶ طبقه در بازسازی نمودارهای حوزه نزدیک، به اندازه کافی دقیق عمل نکرده و جواب‌های قابل قبولی ارائه نمی‌کند.



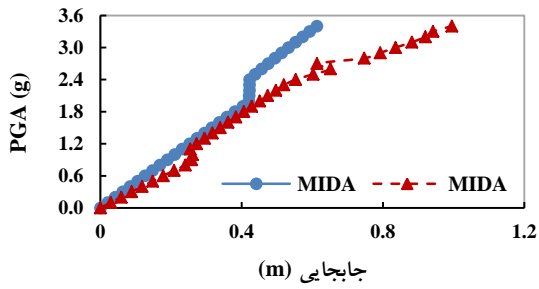
شکل ۱۲- مقایسه جابجایی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۶ طبقه-۳۰٪ نامنظمی

۶-۱-۲- مقایسه جابجایی و جابجایی نسبی بام برحسب PGA در رکورد زلزله Morgan Hill برای سازه‌های ۱۲ طبقه مقایسه جابجایی بام و جابجایی نسبی بام برحسب PGA در رکورد زلزله Morgan Hill برای سازه‌های ۱۲ درصد نامنظمی‌های هندسی ۱۰٪ تا ۴۰٪ در شکل‌های (۱۶) تا (۲۳) ارائه شده است.

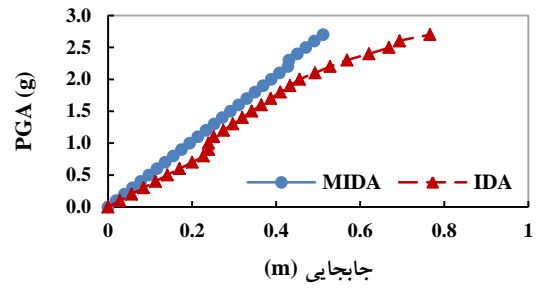


شکل ۱۳- مقایسه جابجایی نسبی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۶ طبقه-۳۰٪ نامنظمی

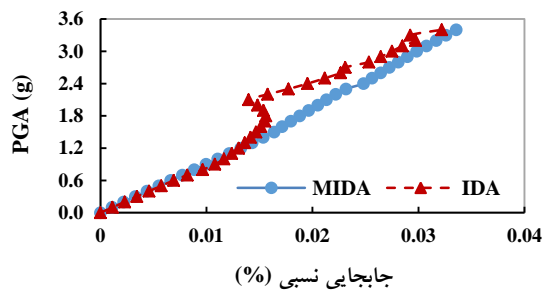
از مقایسه جابجایی بام و همچنین جابجایی نسبی بام در هر دو روش IDA و MIDA مشاهده می‌شود که روش تقریبی تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی مودال در بازسازی نمودارهای حوزه نزدیک برای سازه‌های ۱۲ طبقه، دقیق عمل نمی‌کند و جواب‌های مناسبی نمی‌دهد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش ارتفاع سازه، وضعیت به مراتب بدتر شده است.



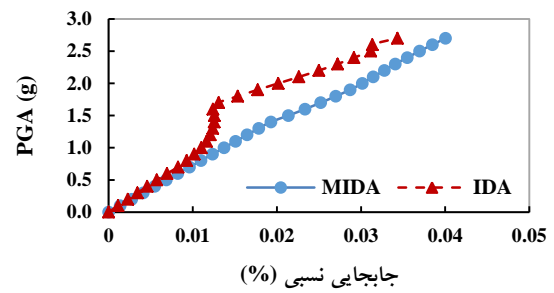
شکل ۲۰- مقایسه جابجایی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۱۲ طبقه-۳۰٪ نامنظمی



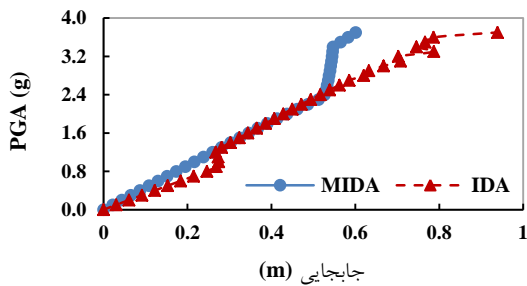
شکل ۱۶- مقایسه جابجایی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۱۲ طبقه-۱۰٪ نامنظمی



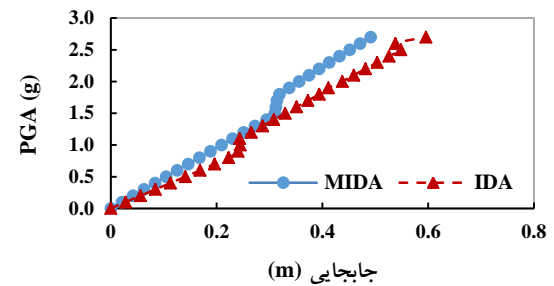
شکل ۲۱- مقایسه جابجایی نسبی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۱۲ طبقه-۳۰٪ نامنظمی



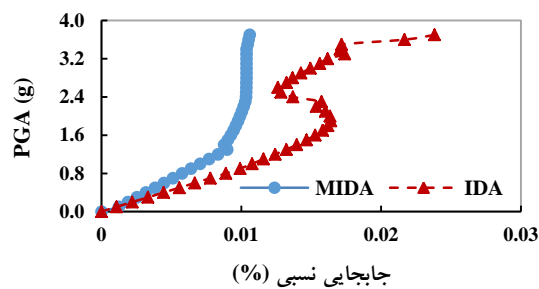
شکل ۱۷- مقایسه جابجایی نسبی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۱۲ طبقه-۱۰٪ نامنظمی



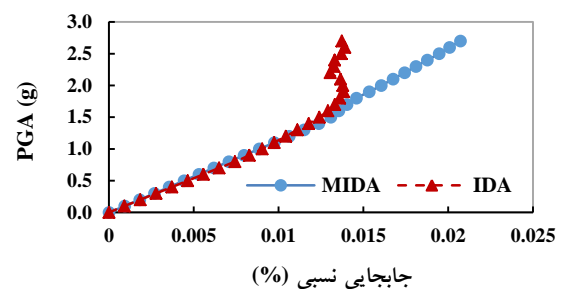
شکل ۲۲- مقایسه جابجایی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۱۲ طبقه-۴۰٪ نامنظمی



شکل ۱۸- مقایسه جابجایی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۱۲ طبقه-۲۰٪ نامنظمی



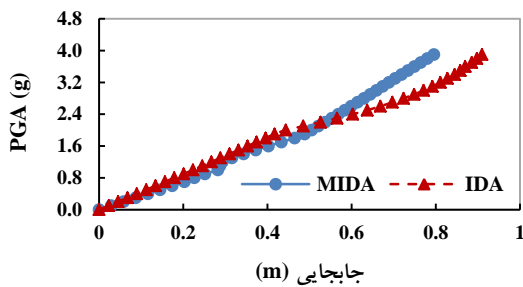
شکل ۲۳- مقایسه جابجایی نسبی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۱۲ طبقه-۴۰٪ نامنظمی



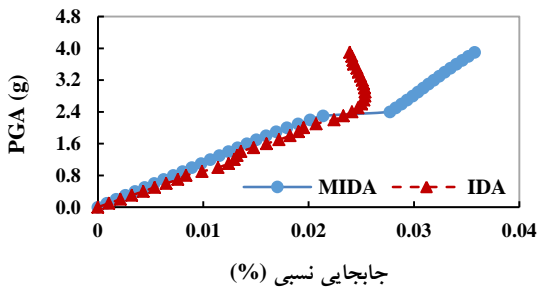
شکل ۱۹- مقایسه جابجایی نسبی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۱۲ طبقه-۲۰٪ نامنظمی



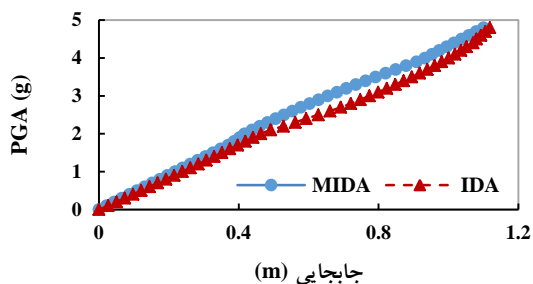
۶-۱-۳- مقایسه جابجایی و جابجایی نسبی بام برحسب PGA در رکورد زلزله Morgan Hill برای سازه‌های ۱۸ طبقه مقایسه جابجایی بام و جابجایی نسبی بام برحسب PGA در رکورد زلزله Morgan Hill برای سازه‌های ۱۸ در صد نامنظمی‌های هندسی ۱۰٪ تا ۴۰٪ در شکل‌های (۲۴) تا (۳۱) ارائه شده است.



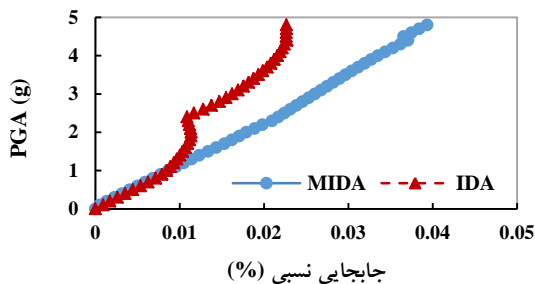
شکل ۲۴- مقایسه جابجایی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۱۸ طبقه-۱۰٪ نامنظمی



شکل ۲۵- مقایسه جابجایی نسبی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۱۸ طبقه-۱۰٪ نامنظمی



شکل ۲۶- مقایسه جابجایی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۱۸ طبقه-۲۰٪ نامنظمی



شکل ۲۷- مقایسه جابجایی نسبی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۱۸ طبقه-۲۰٪ نامنظمی

با توجه به شکل (۲۴) تا (۳۱) از مقایسه جابجایی بام در هر دو روش IDA و MIDA مشاهده می‌شود که روش تقریبی تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی مودال در بازسازی نمودارهای حوزه نزدیک در سازه‌های ۱۸ طبقه، در ناحیه خطی توانایی بازسازی نمودارها را دارد. علت این امر را می‌توان در دو مورد جستجو کرد. ابتدا این که طبق تحقیقی که توسط کراوینکلر و همکارانش در سال ۱۹۹۹ انجام گرفت [۱۰]، آنان دریافتند که طیف پاسخ سیستم‌های یک درجه آزادی نمی‌تواند به اندازه کافی نیازهای لرزه‌ای برای سازه‌های نزدیک گسل را نشان بدهد [۱۰]. علاوه بر این، روش MIDA بر پایه سازه یک درجه آزادی استوار است. در نتیجه نمودارهای جابجایی و جابجایی نسبی در سازه‌های کوتاه مرتبه و متوسط به دلیلی که در بالا ذکر گردید نمی‌تواند توسط روش تقریبی MIDA بازسازی شود. اما به دلیل آنکه سازه‌های ۱۸ طبقه از ارتفاع بالایی برخوردار هستند کمتر تحت تأثیر این ایراد قرار گرفته و به همین دلیل نمودارهای جابجایی توانسته خود را بازسازی کند.

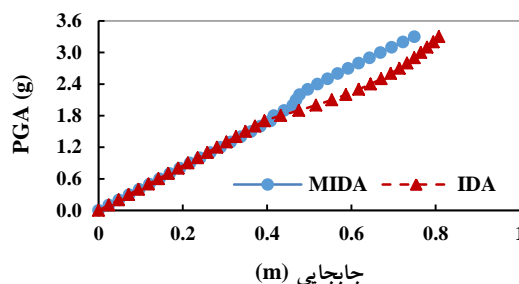
در سازه‌های ۱۸ طبقه از مقایسه جابجایی نسبی بام در هر دو روش IDA و MIDA مشاهده شد که روش تقریبی تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی مودال در بازسازی نمودارهای حوزه نزدیک، در ناحیه الاستیک به خوبی عمل کرده ولی در ناحیه غیرخطی، با عبور مقاطع عناصر سازنده سازه از مرز الاستیک و پلاستیک شدن آنها باعث تغییر سختی آن اعضا شده است و به همین مسأله باعث شد که مقادیر پریود مدها تغییر کند. این خود سبب تداخل مدها شده که باعث می‌گردد روش ترکیب نتایج SRSS از اعتبار ساقط شود و به این دلیل روش MIDA در ناحیه غیر خطی اعتبار خود را به سبب تداخل مدها از دست می‌دهد. در سازه‌هایی که نامنظمی بیشتری دارند به علت پیچش سازه‌ها، خطاهای چشمگیری در ناحیه غیر الاستیک ایجاد شده است.

## ۷- بحث بر روی نتایج مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک

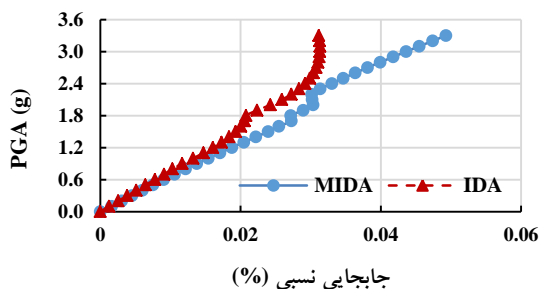
قاب‌های خمشی ویژه می‌بایست از لحاظ کنترل دریافت، معیارهای آئین نامه را ارضا کنند. از طرفی می‌دانیم این کنترل در این گونه قاب‌ها، معمولاً غالب و تعیین کننده ابعاد تیر و ستون می‌باشد. در این نوع از قاب‌ها افزایش سختی سازه به کاهش پریود سازه می‌انجامد. از طرفی به دلیل آنکه این قاب‌ها به منظور استفاده از شکل‌پذیری بالای آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد باز هم در مقایسه با دیگر سیستم‌های باربر جانبی سازه، پریود بالاتری را برای سازه ایجاد می‌کند.

در جنبش‌های نزدیک گسل، هم شتاب رکورد بالا می‌باشد و هم سرعت آن. سرعت ماکزیمم زمین در رکوردهای سرعت بعضاً تا  $100 \text{ cm/s}$  الی  $200 \text{ cm/s}$  می‌رسد. به علاوه این رکوردهای حوزه نزدیک این ویژگی را دارند که به یکباره انرژی زیادی در مدت زمان کم رها می‌شود و ما بدون آنکه شاهد گذار از حالت الاستیک به حالت پلاستیک در سازه‌های کوتاه مرتبه باشیم به صورت دفعی پلاستیک شدن اعضا را مشاهده می‌کنیم. در تحقیق کراوینگر و همکارانش در سال ۱۹۹۹ [۱۰]، آنان اثر پالس‌های خاص با پریود  $T_p$  را بر پاسخ سازه‌های با پریود  $T$  در سطوح عملکرد مختلف مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیق آنان معلوم شد که طیف یک درجه آزادی برای نشان دادن تقاضای شکل‌پذیری سیستم چند درجه آزادی با سختی  $T/T_p < 1/10$  کافی می‌باشد، اما برای نشان دادن تقاضای سازه‌های نرم‌تر با  $T/T_p > 1/10$  طیف یک درجه آزادی خوب عمل نمی‌کند. بنابراین بر اساس این تحقیق، طیف یک درجه آزادی به تنهایی برای نشان دادن تقاضای لرزه‌ای در حوزه نزدیک مناسب نیست. سازه‌های بلند مرتبه در زلزله‌های حوزه نزدیک کمتر تحت تأثیر این نوع از زلزله‌ها قرار می‌گیرند و در نتیجه در روش MIDA که از سازه یک درجه آزادی استفاده می‌کند، جواب‌هایی نزدیک به روش دقیق IDA می‌دهد. می‌توان انتظار داشت با این شرایط مرحله عبور از ناحیه الاستیک به ناحیه پلاستیک را مشاهده کرد. همچنین می‌توان گفت که تعداد المان‌های تلف‌کننده انرژی در سازه افزایش پیدا می‌کند که این خود باعث تقسیم شدن این انرژی بین اعضا خواهد شد.

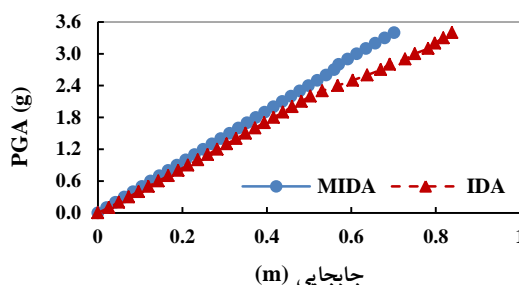
روش MIDA بر روی مدهای مجزا بنا شده است ولی وقتی مفاصل پلاستیک تشکیل می‌گردد باعث کاهش سختی اعضا و به هم ریختن مدهای سازه می‌شود که در نهایت باعث تداخل مدها



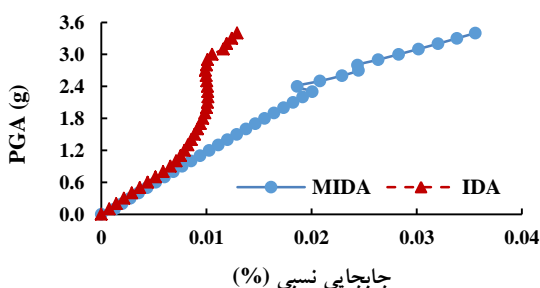
شکل ۲۸- مقایسه جابجایی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۱۸ طبقه-۳۰٪ نامنظمی



شکل ۲۹- مقایسه جابجایی نسبی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۱۸ طبقه-۳۰٪ نامنظمی



شکل ۳۰- مقایسه جابجایی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۱۸ طبقه-۴۰٪ نامنظمی



شکل ۳۱- مقایسه جابجایی نسبی بام تحت اثر رکورد شماره ۱ حوزه نزدیک در سازه ۱۸ طبقه-۴۰٪ نامنظمی



می‌گردد و روش MIDA را در ناحیه پلاستیک به کل از اعتبار خارج می‌کند.

در مورد تأثیر نامنظمی در حوزه نزدیک می‌توان به این موضوع اشاره کرد که هر مقدار سازه نامنظم‌تر شود، در معرض پیچش شدیدتری قرار می‌گیرد و مفاصل پلاستیک بیشتری در سازه به وجود می‌آید که این خود باعث می‌شود نتوان نمودارهای جابجایی نسبی را بازسازی کرد.

## ۸- عوامل ایجاد خطا

عوامل ایجاد خطا در استفاده از روش MIDA عبارتست از:

۱- تقریب برش پایه-تغییر مکان سقف با یک منحنی دو خطی باعث خطا در جابجایی و جابجایی نسبی محاسبه شده می‌گردد.

۲- فرض اینکه مدها در ناحیه غیر الاستیک مستقل از یکدیگر رفتار می‌کنند، فرض نادرستی است که می‌تواند در ناحیه غیرخطی از منابع تولید خطا باشد. زیرا نامنظمی هندسی سازه باعث افزایش مفاصل پلاستیک در ناحیه های نامنظمی هندسی می‌شود که این افزایش مفاصل پلاستیک باعث افزایش خطاها در فاز غیرخطی می‌گردد. بنابراین جمع اثر نتایج مدهای سازه به کمک روش SRSS فقط برای حالتی که سازه در مرحله الاستیک قرار دارد، صحیح می‌باشد در حالی که این ترکیب در حالت غیرخطی باعث خطا در روش می‌شود.

۳- در سازه‌های ۶ و ۱۲ طبقه مورد مطالعه فقط دو مد اول در هر جهت در نظر گرفته شد که با در نظر گرفتن مدهای بیشتر خطاها کمتر می‌شود.

۴- افزایش نامنظمی هندسی در پلان سازه باعث افزایش خطا در نمودارهای جابجایی و جابجایی نسبی برحسب اندیس خرابی، می‌شود.

## ۹- نتیجه گیری

اهم نتایجی که از این تحقیق به دست آمده است، به شرح زیر است:

- سرعت این روش در سازه‌های ۳ بعدی بسیار چشمگیر است و محققان در آینده می‌توانند برای برآورد لرزه‌ای سازه‌های سه بعدی از این روش بهره‌گیرند.
- روش MIDA برای سازه‌های بلند مرتبه واقع در ناحیه حوزه نزدیک تا حدودی می‌تواند مانند روش IDA نمودارهای خوبی را به ما دهد.

■ افزایش تعداد مدهای مورد مطالعه باعث کاهش خطا بین دو روش IDA و MIDA در برآورد جابجایی و جابجایی نسبی می‌شود.

■ روش MIDA به دلیل بهره بردن از سازه یک درجه آزادی برای سازه‌های با ارتفاع کم و متوسط در ناحیه حوزه نزدیک برای اندازه گیری پارامترهای جابجایی و جابجایی نسبی از اعتبار ساقط است.

■ افزایش نامنظمی در سازه باعث افزایش میزان خطای محاسباتی پارامترهای جابجایی و جابجایی نسبی بین دو روش IDA و MIDA می‌گردد.

در مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی مودال به طور کلی می‌توان گفت که:

■ تبدیل سیستم چند درجه آزادی به سازه یک درجه آزادی معادل، به دلیل زمان استفاده کمتر از هسته‌های محاسباتی رایانه‌ها، اثر قابل توجهی بر سرعت تحلیل‌ها می‌گذارد که این اثر در سازه‌های بلند مرتبه ۳ بعدی در تحلیل دینامیکی غیرخطی می‌تواند بسیار مفید باشد.

■ به علت پیاده سازی تحلیل بار افزون و ردگیری تمامی مفاصل پلاستیک در تمامی سطوح مختلف زلزله مقیاس شده، می‌توان رفتار آن مفاصل را بررسی نمود و نقاط ضعف ساختمان را برآورد کرد و در جهت رفع آن برآمد. با توجه به اینکه این کار در مدت زمان کمتری از روش IDA انجام می‌گیرد، برای تحقیقات آینده بسیار مناسب می‌باشد.

■ در مقاله Mofid و همکارانش در سال ۲۰۰۵ [۱] هیچ معیار مشخصی برای محاسبه تعداد مد کافی در انجام تحلیل‌های MIDA ارائه نشده است. بدون انجام تحلیل‌های MIDA و مقایسه نتایج آن با نتایج تحلیل‌های IDA نمی‌توان به تعداد کافی مدهای لازم برای انجام آنالیزهای MIDA پی برد.

## ۱۰- مراجع

- [1] Mofid, M., Zarfam, P. and Raiesi Fard, B. (2005), "On the Modal Incremental Dynamic Analysis", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 14, No. 4, pp. 315-329.
- [2] Han, S.W. and Chopra, A.K. (2006), "Approximate Incremental Dynamic Analysis Using the Modal Pushover Analysis Procedure", *Earthquake Engineering Structure Dynamic*, Vol. 35, No. 15, pp. 1853-1873.
- [3] Zarfam, P. and Mofid, M. (2008), "Evaluation of Modal Incremental Dynamic Analysis, Using Input Energy Intensity and Modified Bilinear Curve", *The Structure Des Tall Special Build*, Vol. 18, No. 5, pp. 573-586.



- [4] Zarfam, P. and Mofid, M. (2011), "On the Modal Incremental Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Structures, Using a Trilinear Idealization Model", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 33, No. 4, pp. 1117-1122.
- [5] ASCE 7-10, (2010), *Minimum Design Loads for Building and Other Structures*.
- [6] FEMA, (2009), *Quantification of Building Seismic Performance Factors*, prepared by the Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Report No. FEMA P-695, Washington, D.C.
- [7] Dimakopoulou, V., Fragiadakis, M. and Spyarakos C. (2013), "Influence of Modeling Parameters on the Response of Degrading Systems to Near-Field Ground Motions", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 53, pp. 10-24.
- [8] Davoodi, M., Jafari, M. and Hadiani, N. (2013), "Seismic Response of Embankment Dams Under Near-Fault and Far-Fault Ground Motion Excitation", *Journal of Engineering Geology*, Vol. 158, pp. 66-76.
- [9] American Society of Civil Engineers (ASCE), (2000), *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA 356. Federal Emergency Management Agency: Washington DC.
- [10] Galal, K. and Ghobarah, A. (2006), "Effect of Near-Fault Earthquakes on North American Nuclear Design Spectra", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 236, No. 18, pp. 1928-1936.

