

# ارزیابی نیازهای غیر ارتجاعی تغییر شکل در قاب‌های منظم فولادی به کمک مقایسه نتایج از روش بار افزون با تحلیل تاریخیچه زمانی غیر خطی در اثر زلزله نزدیک گسل پالس گونه

نوید سیاه‌پلو\*<sup>۱</sup>، محسن گرامی<sup>۲</sup>، رضا وهدانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی جهاددانشگاهی خوزستان

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

(دریافت: ۹۳/۱۱/۴، پذیرش: ۹۸/۶/۱۷، نشر آنلاین: ۹۸/۶/۱۷)

## چکیده

در این پژوهش توانمندی الگوهای الاستیک بار جانبی اعم از الگوهای پیشنهادی در کدهای لرزه‌ای و الگوهای نوین مانند روش ترکیب مودال (MMC) و روش کرانه بالا (UPBA) در تخمین نیازهای غیرخطی قاب‌های فولادی با اتصالات صلب به کمک روش بار افزون ارزیابی و نتایج با خروجی‌های تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی (NTHA) متأثر از زلزله‌های نزدیک گسل پالس گونه مقایسه می‌گردد. بنابراین ضمن طراحی لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی ویژه ۴، ۷، ۱۵ و ۲۰ طبقه و سه دهانه، با تعریف ۵ الگوی بار، نیازهای غیرخطی برای ۴ تراز شکل‌پذیری بین طبقه‌ای هدف ( $\mu_t$ ) به کمک نرم‌افزار OpenSEES محاسبه و با نتایج NTHA مقایسه شده‌اند. در این میان روش پیشنهادی مقیاس‌سازی براساس  $\mu_t$  نوآوری تحقیق است. نتایج در حوزه مدل‌های این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش  $\mu_t$ ، تمایل سازه به نوسان در مود اول افزایش یافته و کلیه الگوهای بار توانسته‌اند مستقل از تعداد طبقات، تغییر مکان طبقات را در ۲۵٪ تحتانی سازه به‌خوبی محاسبه نمایند. این در حالی است که دریافت بین طبقه‌ای به‌دست‌آمده از روش MMC دارای مناسب‌ترین دقت است. البته با افزایش  $\mu_t$  از دقت این روش کم می‌شود. به‌نحوی که با افزایش ارتفاع سازه، IDR در برخی طبقات کم‌تر و در برخی بیشتر از مقادیر حاصل از NTHA است. همچنین با افزایش  $\mu_t$  بر دقت کلیه الگوهای بار در تعیین موقعیت طبقه بحرانی متناظر با شکل‌پذیری بین طبقه‌ای افزوده شده به‌نحوی که روش MMC بهترین انطباق را با توزیع شکل‌پذیری بین طبقه‌ای در ارتفاع دارد.

**کلیدواژه‌ها:** روش بار افزون، الگوی بار، شکل‌پذیری هدف، نیاز غیرخطی، زلزله نزدیک گسل.

## ۱- مقدمه

روش ساده‌شده‌ای از تحلیل غیرخطی ارائه نموده‌اند که پوش نیازهای غیرخطی سازه را به کمک شبیه‌سازی رفتار سازه در برابر یک بارگذاری مونوتونیک فزاینده<sup>۲</sup> محاسبه می‌نماید. این روش به تحلیل بار افزون معروف است و در آیین‌نامه‌های مختلف من از جمله ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران وارد شده است (Standard 2800-V4، ۲۰۱۴). در بحث طراحی بر اساس عملکرد نیز این روش تحلیل بسیار پرکاربرد است. به‌همین دلیل مطالعات سال‌های اخیر بر توسعه و ترویج روش‌های بار افزون (سنتی و تطبیقی) تمرکز داشته‌اند. روش‌های بار افزون سنتی (CPA)<sup>۳</sup> امروزی در بسیاری از کدهای لرزه‌ای مانند فیما<sup>۴</sup> و دستورالعمل

استفاده از تحلیل الاستیک به‌دلیل سادگی در فرضیات مدل‌سازی و تحلیل در بسیاری از آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای مدنظر قرار دارد. اما تجربه زلزله‌های پیشین مؤید ورود رفتار سازه به ناحیه غیرخطی است. بنابراین تحلیل خطی نمی‌تواند تصویر درستی از نیازهای غیرخطی سازه را ارائه نماید. اگرچه روش تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی (NTHA)<sup>۱</sup> می‌تواند برآورد دقیقی را از بازتاب‌های سازه ارائه نماید، اما پیچیدگی‌های مدل‌سازی و تأثیرپذیری نتایج از فرضیات اولیه و محتوای زلزله می‌تواند بشدت بر نتایج این روش تأثیرگذار باشد. بدین منظور محققین مختلف

3. Conventional Pushover Analysis

4. FEMA

1. Non-Linear Time History Analysis

2. Incremental Monotonic

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۶۱-۳۳۳۸۳۷۳۶

آدرس ایمیل: n\_siahpolo@yahoo.com (ن. سیاه‌پلو)، mgerami@semnan.ac.ir (م. گرامی)، reza.vahdani2001@gmail.com (ر. وهدانی).

می‌بایست متناظر با این تغییرات باشند. در این خصوص الگوهای بار تطبیقی (بهنگام شونده) پیشنهاد شده‌اند (Kunnath و Gupta, ۲۰۰۰؛ Aydinglu, ۲۰۰۳؛ Kalkan و Kunnath, ۲۰۰۶) تمامی روش‌های تطبیقی به جز روشی که توسط Aydinglu (۲۰۰۳) پیشنهاد گردید، نمی‌توانند به خوبی اندرکنش بین پاسخ مودهای مختلف را که به اثرات مودهای بالاتر (HME) مشهور است، به خوبی در نظر بگیرند (Aydinglu, ۲۰۰۳). از آنجاکه روش‌های تطبیقی دشوار بوده و ممکن است توسط مهندسیین برای مقاصد حرفه‌ای به سادگی قابل استفاده نباشد، برخی از محققین به دنبال اصلاح و پیشنهاد الگوهای بارگذاری جدیدی هستند که بدون نیاز به استفاده از تغییرات ماتریس سختی، بتواند تخمین خوبی از نیازهای کلی و محلی سازه ارائه نماید. پیشنهاد الگوی بار غیر تطبیقی که بتواند اثر مودهای بالاتر را در برگیرد یکی دیگر از محورهای مطالعاتی است. استفاده از الگوی بار متناظر با تغییر مکان مودال طبقات (با در نظر گرفتن ۱، ۲ و ۳ مود ارتعاشی) می‌تواند تخمین مناسبی از نیاز تغییر مکان طبقات فوقانی در ساختمان‌های بلند ارائه نماید (Poursa و Amini, ۲۰۱۶).

مطالعه بازتاب‌های غیرخطی سازه فولادی خمشی دوعدی در برابر انواع الگوهای بار سنتی (غیر تطبیقی یا غیر بهنگام) در کنار الگوی بار تطبیقی بر اساس جابه‌جایی (DAP) و اثر اندرکنش مودی مدنظر قرار گرفته شده است. نتیجه مقایسه تحلیل بار افزون در برابر تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی نشان می‌دهد الگوی بار تطبیقی بر اساس جابه‌جایی برآورد مناسبی از نیاز دررفت<sup>۵</sup> طبقه با اثر مودهای بالاتر را به همراه دارد (Gerami و همکاران, ۲۰۱۷). مقایسه انواع روش‌های بار افزون بر اساس الگوهای بار غیر تطبیقی مانند الگوی بار استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش ۴، یکنواخت، طیفی (SPEC)<sup>۶</sup> و روش ترکیب مودی (MMC)<sup>۷</sup> پیشنهاد شده توسط Kalkan و Kunnath (۲۰۰۴) برای قاب فولادی ۳ تا ۱۴ طبقه و دقت آن‌ها در برابر تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در اثر زلزله‌های نزدیک گسل پالس گونه انجام گرفته است. نتایج نشان داد در سازه‌های کم ارتفاع همگی الگوهای بار مناسب بوده اما با افزایش ارتفاع الگوی بار MMC کم‌ترین خطا را نسبت به سایر موارد دارد. ضمناً علاوه بر شکل مود، محتوای زلزله نیز بر دقت روش MMC تأثیرگذار است (Breihl و همکاران, ۲۰۱۷).

مقایسه بازتاب الگوی بار DAP با الگوی بار SPEC برای قاب‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه در مقابل میانگین بازتاب غیرخطی حاصل از تحلیل تاریخچه یکی دیگر از محورهای مطالعات قبل است. نتایج همچنان مؤید توانمندی الگوی بار DAP در تخمین بازتاب‌های غیرخطی با کمترین خطاست. به‌ویژه با افزایش تعداد

بهسازی ساختمان‌های موجود ایران (نشریه ۳۶۰) وارد شده‌اند (FEMA-356, ۲۰۰۰؛ Instruction No.360, ۲۰۱۴). در فرم سنتی، ابتدا یک الگوی بار جانبی انتخاب می‌شود. این الگوی بار در آیین‌نامه‌های مختلف معمولاً براساس رابطه توزیع بار استاتیکی معادل در ارتفاع، توزیع یکنواخت و توزیع مودال تعریف می‌گردد. سازه در اثر این الگوی بارگذاری به صورت مونوتیک تا رسیدن به تغییر مکان هدف (نقطه توقف تحلیل) هل داده می‌شود. در نقطه توقف، نیازهای غیر ارتعاشی سازه محاسبه و با معیارهای عملکردی مقایسه می‌گردد. مهم‌ترین نقص روش‌های سنتی که در اکثر کدهای لرزه‌ای نیز ارائه شده‌اند این است که الگوی بارگذاری در خلال پلاستیک شدن اعضا ثابت می‌ماند. به عبارتی تغییرات مؤلفه‌های مود ارتعاشی بر تخمین الگوی بار بهنگام نمی‌گردد. برای رفع این اشکال تلاش‌های مختلفی صورت گرفته است که حاصل آن‌ها روش بار افزون مودال چندمرحله‌ای، تک‌مرحله‌ای و بهنگام شونده (تطبیقی) می‌باشند. در روش بار افزون بهنگام شونده، در هر مرحله تحلیل (هر گام بارگذاری)، ماتریس سختی براساس مشخصات الاستیک و غیرالاستیک المان‌ها محاسبه و با حل مسئله مقدار ویژه، الگوی بار متناظر با شکل مود ارتعاشی همان گام تولید می‌شود. البته انجام روش‌های بار افزون تطبیقی نیازمند به محاسبات ویژه‌ای است.

بدیهی است که در کلیه روش‌های بار افزون، الگوی بار جانبی از ملزومات تحلیل بار افزون است. در بسیاری از موارد فرض می‌شود که الگوی توزیع بار بر مبنای بازتاب مود اول محاسبه می‌گردد. این موضوع می‌تواند در سازه‌های متأثر از مشارکت مودهای بالاتر به نتایج غیردقیقی بیانجامد. این روش‌ها در دودسته طبقه‌بندی می‌شوند. در روش‌های سنتی، الگوهای توزیع بار به نحوی تعریف می‌شوند که در خلال رفتار غیرخطی سازه از نظر آرایش و توزیع در ارتفاع، ثابت باشند. در دسته دوم الگوهای بار بهنگام شونده تعریف می‌شوند. برای بهبود روش‌های بار افزون مطالعات مختلفی انجام گرفته است. در این بین روش بار افزون چند مودی پیشنهاد گردید (Tso و Moghadam, ۲۰۰۲؛ Goel و Chopra, ۲۰۰۲) یکی از روش‌های رایج چند مودی، روش بار افزون مودال یا MPA است که در آن سازه در برابر الگوهای بارگذاری متناظر با هر مود تحلیل شده و سپس نتایج تحلیل به روش‌های رایج ترکیب مودی، ترکیب می‌شوند. لازم به ذکر است که روش MPA در حقیقت نوعی روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی است که بر سازه تک درجه آزادی معادل انجام می‌پذیرد. در این روش نیز شکل مود ارتعاشی به صورت الاستیک در نظر گرفته می‌شود (Chopra و Goel, ۲۰۰۳؛ Chopra و همکاران, ۲۰۰۴). از آنجاکه با ورود به حوزه غیرخطی، ماتریس سختی تغییر می‌کند، الگوهای بار نیز

بار LP1، LP2 و LP3 برگرفته از FEMA356 می‌باشند (FEMA-356، ۲۰۰۰). در الگوی اول، از روش توزیع یکنواخت نیرو متناظر با جرم سازه استفاده شده است. برای الگوی دوم ابتدا کلیه مدل‌ها بر روش طیفی (به کمک طیف میانگین الاستیک شتاب حاصل از ۷ زلزله نزدیک گسل) تحلیل شده‌اند. سپس نیروی توزیع یافته مودهای نوسانی که مجموع جرم مؤثر مودی آن‌ها بیشتر از ۹۰٪ جرم کل سازه باشد، به روش SRSS<sup>۸</sup> در هر طبقه ترکیب شده‌اند. در الگوی بار سوم، LP3، از بار توزیع یافته در ارتفاع مطابق رابطه (۱) که در ویرایش ۴ استاندارد ۲۸۰۰ ایران نیز پیشنهاد شده است، استفاده شده است.

$$F_x = V \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^N w_i h_i^k} \quad (1)$$

در رابطه فوق،  $F_x$ ، نیروی تراز طبقه  $x$ ،  $h$ ، ارتفاع طبقه نسبت به تراز پایه و  $V$  نیروی برش پایه است. به علاوه،  $W$  معرف وزن طبقه بوده و ضریب  $k$  نیز به دوره تناوب سازه وابسته است. برای سازه با دوره تناوب کم‌تر از ۰/۵ ثانیه این ضریب برابر یک و برای دوره تناوب بزرگ‌تر از ۲/۵ ثانیه برابر با ۲ اختیار می‌گردد. برای مقادیر بین دو عدد از درون‌یابی خطی استفاده می‌شود. برای اعمال اثرات مودهای بالاتر و به منظور بهبود الگوی توزیع بار الاستیک در روش بار افزون، الگوی چهارم بارگذاری جانبی بر روش ترکیب مودی (MMC) پیشنهاد شده توسط Kalkan و Kunnath (۲۰۰۴) استفاده گردید. در این روش توزیع نیروی جانبی در ارتفاع به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$F_j = \sum \alpha_n \Gamma_n m \phi_n S_a(\xi_n, T_n) \quad (2)$$

در رابطه فوق  $\alpha_n$  ضریب اصلاحی است که می‌تواند مثبت یا منفی باشد. همچنین از آنجایی که در رابطه فوق،  $S_a(\xi_n, T_n)$  شتاب طیفی حاصل از طیف پاسخ شتاب الاستیک زلزله‌های نزدیک گسل است، بنابراین اثرات شدت زلزله با این پارامتر در روش MMC وارد می‌شوند. به طور نمونه اگر تنها دو مود اول در نظر گرفته شود، رابطه (۲) برابر است با:

$$F_j = \alpha_1 \Gamma_1 m \phi_1 S_a(\xi_1, T_1) \pm \alpha_2 \Gamma_2 m \phi_2 S_a(\xi_2, T_2) \quad (3)$$

بنابراین روش MMC نیازمند انجام دو روش بار افزون مجزاست که در آن یکی از دو ترکیب بارگذاری فوق استفاده می‌شود. سپس بازتاب نهایی سازه، پوش دو بازتاب به دست آمده از دو الگوی بارگذاری فوق‌الذکر است. به عنوان الگوی بارگذاری پنجم، LP5، از روش تحلیل بار افزون حد بالا یا UBPA که توسط Jan و همکاران پیشنهاد شده است، استفاده می‌گردد (Jan و

طبقات و درگیر شدن اثر مودهای بالاتر این قابلیت بیش‌ازپیش نمود پیدا می‌کند (Gerami و همکاران، ۲۰۱۵).

به نظر می‌رسد به دلیل رفتار پیچیده سازه در اثر زلزله نزدیک، تعمیم الگوهای مختلف روش بار افزون که بر اساس مطالعات زلزله‌های دور پایه‌ریزی شده‌اند، برای زلزله‌های نزدیک ضروری است. حال سؤال اساسی این است که تا چه اندازه الگوهای مختلف بارگذاری (اعم از پیشنهاد شده در کدهای لرزه‌ای یا الگوهای جدید) می‌توانند پارامترهای نیاز سازه اعم از برش پایه، تغییر مکان طبقه، رانش (دریفت)، شکل‌پذیری کلی، طبقه‌ای و موضعی را به درستی محاسبه نمایند. به همین دلیل در این تحقیق تلاش شده است تا ضمن بررسی توانمندی الگوهای بار قابل استفاده در روش‌های بار افزون، نیازهای غیر ارتجاعی مختلفی همچون تغییر مکان مطلق طبقه (RD)، رانش نسبی طبقه (IDR)، شکل‌پذیری کلی ( $\mu_g$ ) و طبقه‌ای ( $\mu_s$ ) حاصل از روش‌های بار افزون با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مقایسه شده و مقادیر خطای هر الگوی بار گزارش گردد. برای مقایسه، میانگین بازتاب موردنظر حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی سازه‌ها در برابر ۷ رکورد زلزله نزدیک گسل پالس گونه (دارای اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده و مؤلفه عمود بر گسل) که جزئیات آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است، مدنظر قرار گرفته است. مهم‌ترین نوع آوری این پژوهش، مطالعه تحلیلی توانمندی الگوهای مختلف روش‌های بار افزون در برابر مقادیر حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی (متأثر از زلزله‌های نزدیک گسل) در محاسبه پارامترهای نیاز تغییر شکل کلی و بین طبقه‌ای (که در مطالعات پیشین کم‌تر بدان‌ها توجه شده است) با اعمال اثر مودهای بالاتر می‌باشند. به علاوه روش پیشنهادی مقیاس‌سازی برای زلزله‌های نزدیک گسل بر پایه تنظیم شکل‌پذیری نیاز بین طبقه‌ای برابر با شکل‌پذیری هدف از پیش تعیین شده، معرفی شده است. از همین ایده برای محاسبه تغییر مکان هدف الگوهای مختلف بار جانبی نیز استفاده شده است. بدین ترتیب می‌توان نتایج بار افزون را با میانگین نتایج NTHA مقایسه نمود. مطالعات پیشین تأیید می‌کند که اثر مودهای بالاتر در زلزله‌های نزدیک گسل بیش‌ازپیش بر پاسخ‌های کلی، بین طبقه‌ای و محلی سازه (اعم از ارتجاعی و غیرارتجاعی) تأثیرگذار است.

## ۲- درآمدی بر انواع روش بار افزون

از آنجاکه نتایج روش بار افزون بشدت وابسته به الگوی بار توزیع یافته در ارتفاع است، بنابراین ضروری است تعداد مختلفی الگوی بار که از فرضیات مختلفی به دست آمده‌اند، استفاده گردد. در این مقاله از پنج الگوی توزیع بار استفاده می‌شود. سه الگوی

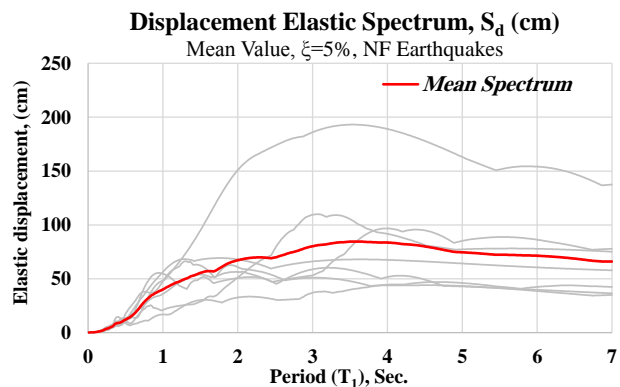
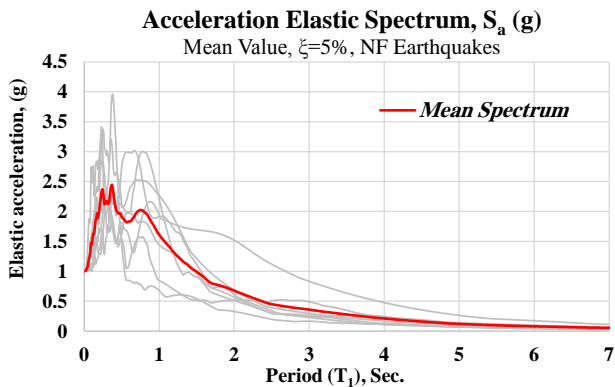
$$|q_2/q_1| = |\Gamma_2 D_2 / \Gamma_1 D_1| \quad (\Delta)$$

در رابطه (۵)،  $F_1$  و  $F_2$  به ترتیب ضریب مشارکت مودهای اول و دوم و  $D_1$  و  $D_2$  به ترتیب تغییر مکان طیفی مود اول و دوم حاصل از طیف الاستیک زلزله‌های موردنظر در تحلیل است.

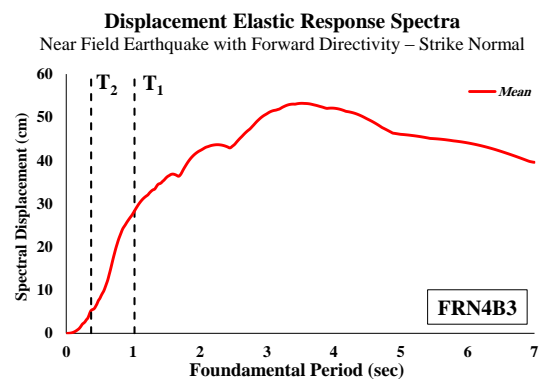
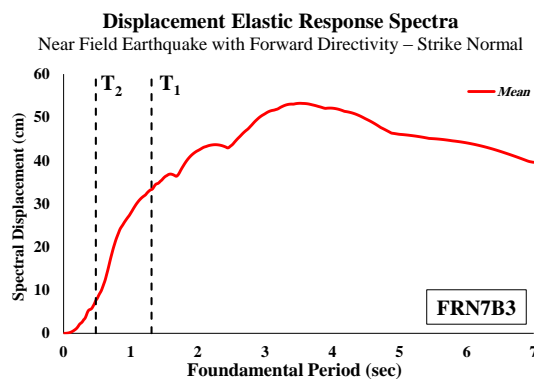
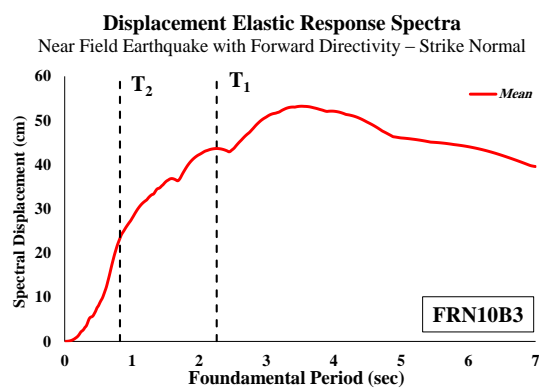
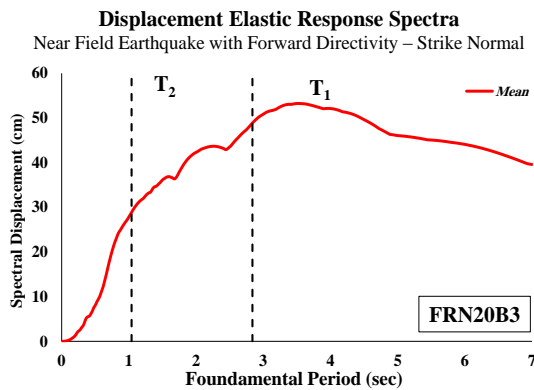
همکاران، (۲۰۰۴) در این روش با استفاده از رابطه (۴) الگوی بارگذاری ترکیبی حاصل از مود اول و دوم ارتعاشی به صورت یک الگوی بار واحد محاسبه می‌گردد:

$$F_j = \omega_1 m \phi_1 + \omega_2 m \phi_2 (q_2/q_1) \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، عبارت  $q_2/q_1$  برابر است با:



شکل ۱- نمودار طیف الاستیک شتاب و تغییر مکان زلزله‌های حوزه نزدیک (هر رکورد و میانگین آن‌ها)



شکل ۲- تغییر مکان طیفی مود اول و دوم هر یک از مدل‌های مورد استفاده در تحقیق (میانگین رکوردها)

در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند. ضمناً متناظر با دوره تناوب مود اول و دوم هر یک از مدل‌های تحقیق در شکل (۲) مقادیر تغییر مکان طیفی علامت‌گذاری شده‌اند.

در این مقاله از طیف میانگین حاصل از هفت زلزله مندرج در بند (۳) استفاده شده است. نمودار طیف الاستیک شتاب و تغییر مکان زلزله‌های حوزه نزدیک مورد استفاده در این تحقیق

Section ID	Name	$h_f$	$t_f$	$h_w$	$t_w$
C1	BOX 200X15	200	15	200	15
C2	BOX 250X15	250	15	250	15
C3	BOX 300X25	300	25	300	25
C4	BOX 350X30	350	30	350	30
C6	BOX 450X30	450	30	450	30
C7	BOX 500X40	500	40	500	40
C8	BOX 550X40	550	40	550	40
B1	TW300F150TH15	15	15	300	15
B2	TW350F150TH15	15	15	350	15
B3	TW400F200TH15	200	15	400	15
B4	TW450F200TH15	200	15	450	15
B5	TW500F250TH15	250	20	500	20
B6	TW550F250TH20	250	20	550	20



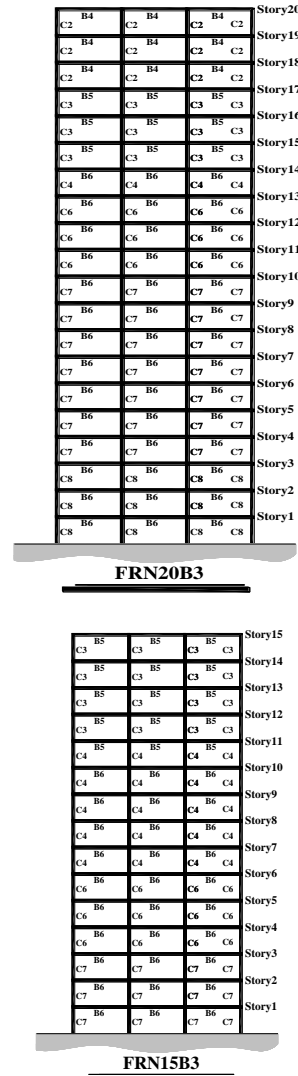
شکل ۳- جزئیات مدل‌های سازه‌ای مورد استفاده در فرآیند تحلیل بار افزون و NTHA

در بارگذاری ثقلی، بار مرده طبقات، بار معادل تیغه‌بندی و بار متوسط زنده طبقات به ترتیب مقادیر ۵۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمربع و عرض بارگیر قاب در هر طبقه ۵ متر در نظر گرفته شد. در بارگذاری لرزه‌ای جرم طبقات برابر با مجموع بار مرده و ۲۰ درصد بار زنده منظور گردید. خاک محل احداث، نوع III، منطقه با خطرپذیری بسیار زیاد و نوع کاربری مسکونی با درجه اهمیت متوسط در نظر گرفته شده است.

کلیه قاب‌های مذکور با استفاده از نرم‌افزار Etabs2013 (Computers and Structures, Inc., ۲۰۱۳) تحلیل استاتیکی معادل (در برخی مدل‌ها تحلیل شبه دینامیکی و همسان‌سازی برش پایه طراحی) و بروش ضرایب بار و مقاومت، طراحی شده‌اند (شکل ۳) را ببینید (ANSI/AISC 360-10، ۲۰۱۰). برای تیرها از مقطع تیوروق و برای ستون‌ها از مقطع جعبه‌ای استفاده گردید. کلیه مقاطع فشرده لرزه‌ای در نظر گرفته شده‌اند. برای مود اول و کلیه مدهایی که ضریب مشارکت جرمی تجمعی آن‌ها بیشتر از ۹۵٪ است، میرایی رایلی<sup>۹</sup> معادل ۵٪ تعریف گردید. رفتار چرخه‌ای تنش- کرنش فولاد دوخطی با سخت شدگی کرنش ۳٪ مدل‌سازی گردید. جهت تعیین پاسخ دینامیکی غیر ارتجاعی سازه‌ها از زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل دارای اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده و مؤلفه عمود بر گسل استفاده شد. مشخصات این زمین‌لرزه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

### ۳- معرفی مدل‌ها و سناریوی زلزله‌های مورد استفاده

در قاب‌های مورد مطالعه، ارتفاع کلیه طبقات ثابت و برابر ۴ متر و طول دهانه‌ها برابر ۵ متر در نظر گرفته شده است. برای قاب‌های خمشی فولادی دوبعدی مورد استفاده در این مطالعه شکل‌پذیری از نوع ویژه انتخاب گردید. به منظور سهولت در معرفی قاب‌ها، هر قاب با نام FRNiBj معرفی گردیده است که نماینده، قاب  $i$  طبقه و  $j$  دهانه است. تعداد دهانه،  $B$  برای کلیه قاب‌ها ثابت و برابر ۳ در نظر گرفته شده است. مقادیر  $N$  نیز عبارت است از ۲۰ و ۱۵ و ۷ و ۴. قاب‌ها مطابق مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان ایران بارگذاری ثقلی و لرزه‌ای شده‌اند (ONRBC، ۲۰۱۴).



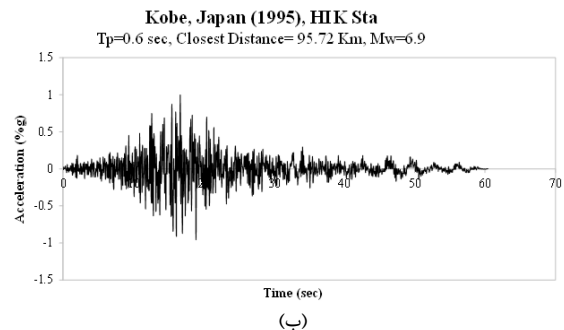
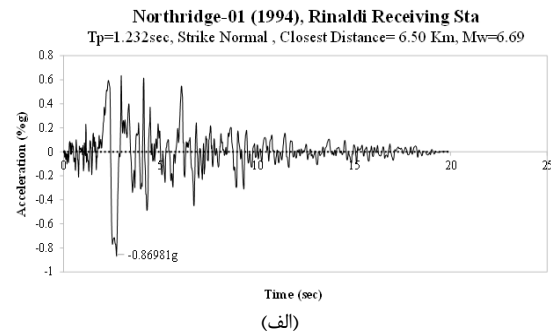
جدول ۱- نوع، اندازه و وضعیت فونت‌ها در قسمت‌های مختلف متن فارسی مقاله

مؤلفه زلزله	شماره رکورد	شماره رکورد	نام زلزله	سال	نام ایستگاه	PGV (cm/s)	بزرگی	نزدیک‌ترین فاصله	پرپود پالس	سرعت موج برشی Vs30 (m/s)
۱	۷۶۳	۷۶۳	لوماپریتا <sup>۱۰</sup>	۱۹۸۹	Gilroy - Gavilan Coll.	۱۴/۹۶	۶/۹۳	۹/۹۶	۱/۷۹۹	۷۲۹/۷
۲	۱۰۴۴	۱۰۴۴	نورثریج <sup>۱۱</sup> - ۰۱	۱۹۹۴	Newhall - Fire Sta	۱۲۰/۲۶	۶/۶۹	۵/۹۲	۱/۰۳۶	۲۶۹/۱
۳	۱۰۴۵	۱۰۴۵	نورثریج - ۰۱	۱۹۹۴	Newhall - W Pico Canyon Rd.	۸۲/۸۸	۶/۶۹	۵/۴۸	۲/۴۰۸	۲۸۵/۹
۴	۱۰۶۳	۱۰۶۳	نورثریج - ۰۱	۱۹۹۴	Rinaldi Receiving Sta	۱۶۷/۲	۶/۶۹	۶/۵	۱/۲۳۲	۲۸۲/۳
۵	۱۰۸۵	۱۰۸۵	نورثریج - ۰۱	۱۹۹۴	Sylmar - Converter Sta East	۱۱۳/۵۷	۶/۶۹	۵/۱۹	۳/۵۲۸	۳۷۰/۵
۶	۱۱۰۶	۱۱۰۶	کوبه <sup>۱۲</sup>	۱۹۹۵	KJMA	۸۹/۱	۶/۹	۰/۹۶	۰/۹۵۲	۳۱۲
۷	۱۱۱۹	۱۱۱۹	کوبه	۱۹۹۵	Takarazuka	۷۲/۶۴	۶/۹	۰/۲۷	۱/۴۲۸	۳۱۲

تعیین نقطه توقف بارگذاری افزایشی در تحلیل بار افزون همان نقطه عملکرد است که تغییر مکان متناظر با آن اصطلاحاً به تغییر مکان هدف معروف است. این نقطه برای تعیین بیشینه ظرفیت تغییر مکانی بام سازه و نقطه عمومی تسلیم سازه دارای اهمیت زیادی است. برای تعریف تغییر مکان هدف روش‌های مختلفی وجود دارند که در ادامه به‌طور فهرست‌وار به آن‌ها اشاره می‌شود:

- بیشینه نیاز تغییر مکان حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی.
- تحلیل بار افزون و محدود نمودن شکل‌پذیری‌های موضعی.
- بیشینه نیاز تغییر مکان حاصل از تحلیل دینامیکی ارتجاعی با اعمال اثر ضریب رفتار.
- روش طیف ظرفیت مندرج در ATC40.
- روش ضرایب جابه‌جایی مندرج در FEMA356 و نشریه ۳۶۰ ایران.
- استفاده از طیف پاسخ یا طرح غیر ارتجاعی و تحلیل دینامیکی طیفی ارتجاعی.

از آنجاکه هدف اصلی این مقاله، مقایسه توانمندی الگوهای رایج روش بار افزون در تخمین نیازهای غیر ارتجاعی قاب‌های فولادی و مقایسه آن‌ها با روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی است، لازم است هر دو روش در یک فاکتور مشترک باشند. در این مقاله، یکسان‌سازی سطوح غیرخطی شدن به کمک تعریف ضریب شکل‌پذیری بین طبقه‌ای انجام گرفته است. این موضوع به کمک تغییر در ضریب مقیاس زلزله در خلال تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی و تغییر مکان کنترلی بام در روش استاتیکی غیرخطی انجام پذیرفته است. روش انجام کار در شکل (۵) نمایش داده شده است.



شکل ۴- تاریخچه زمانی رکورد زلزله نزدیک گسل مؤلفه SN: (الف) زلزله نورثریج، (ب) کوبه

کلیه شتاب‌نگاشت‌ها براساس طبقه‌بندی ارائه‌شده توسط Baker و همکاران (۲۰۰۷) در طبقه‌بندی زلزله‌های پالس گونه قرار دارند (Baker, ۲۰۰۷). در این پژوهش برای انجام تحلیل‌های استاتیکی و تاریخچه زمانی غیرخطی، از نرم‌افزار OpenSEES استفاده شده است (Fenves و McKenna, ۲۰۰۰).

#### ۴- معیار عملکرد و نقطه توقف تحلیل

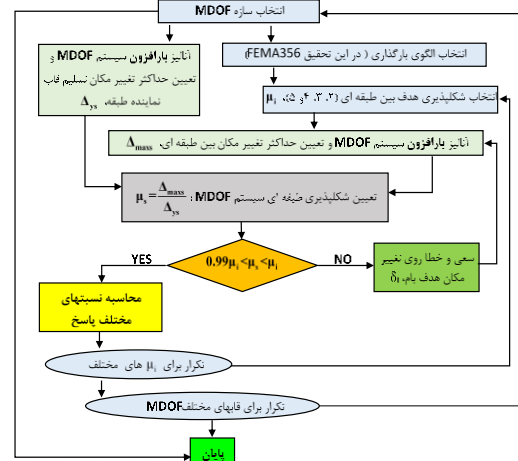
به دو دلیل لازم است معیار عملکرد تعریف شوند. دلیل اول

شکل‌پذیری هدف پرهیز شده است.

### ۵-۱- تغییر مکان مطلق طبقه

یکی از پارامترهایی که به‌عنوان شاخص خسارت در تخمین عملکرد سازه از آن استفاده می‌شود، تغییر مکان مطلق طبقات یا RD بخصوص در طبقه بام است. البته این پارامتر بیشتر برای کنترل معیار رفاه و ایمنی ساکنین و همچنین جلوگیری از برخورد دو ساختمان و به‌تبع آن پرهیز از ایجاد نیروی تنه‌ای است. به همین دلیل در ساختمان‌های بلند، تغییر مکان مطلق طبقه‌ای نیز در طراحی لرزه‌ای مدنظر قرار می‌گیرد. در این بخش از تحقیق، گراف‌هایی ارائه شده‌اند که در آن‌ها، محور افقی حداکثر تغییر مکان مطلق طبقه و محور قائم شماره طبقه است. در مجموع برای هر سازه چهار گراف تهیه شد. هر یک از گراف‌ها متناظر با یکی از سطوح شکل‌پذیری هدف انتخابی ترسیم شده‌اند. در این گراف‌ها، مقادیر تغییر مکان مطلق طبقه به روش‌های مختلف بار افزون (الگوهای مختلف توزیع بار) با حداکثر میانگین پاسخ NTHA مقایسه شده است. این نتایج در شکل (۶) نمایش داده شده‌اند. بررسی نتایج شکل (۶) نشان می‌دهد که برای ساختمان کوتاه (تا ۷ طبقه در این تحقیق) روش‌های مختلف بار افزون تخمین مناسبی از تغییرات تغییر مکان طبقات، RD، در ارتفاع ارائه می‌کنند. با افزایش تعداد طبقات، از دقت روش‌های بار افزون برای سطوح پایین تقاضای شکل‌پذیری کم می‌شود. به عبارتی، با افزایش شکل‌پذیری هدف بین طبقه‌ای، الگوی بار LP1 و LP2 توانسته‌اند با دقت مناسبی RD را محاسبه نمایند.

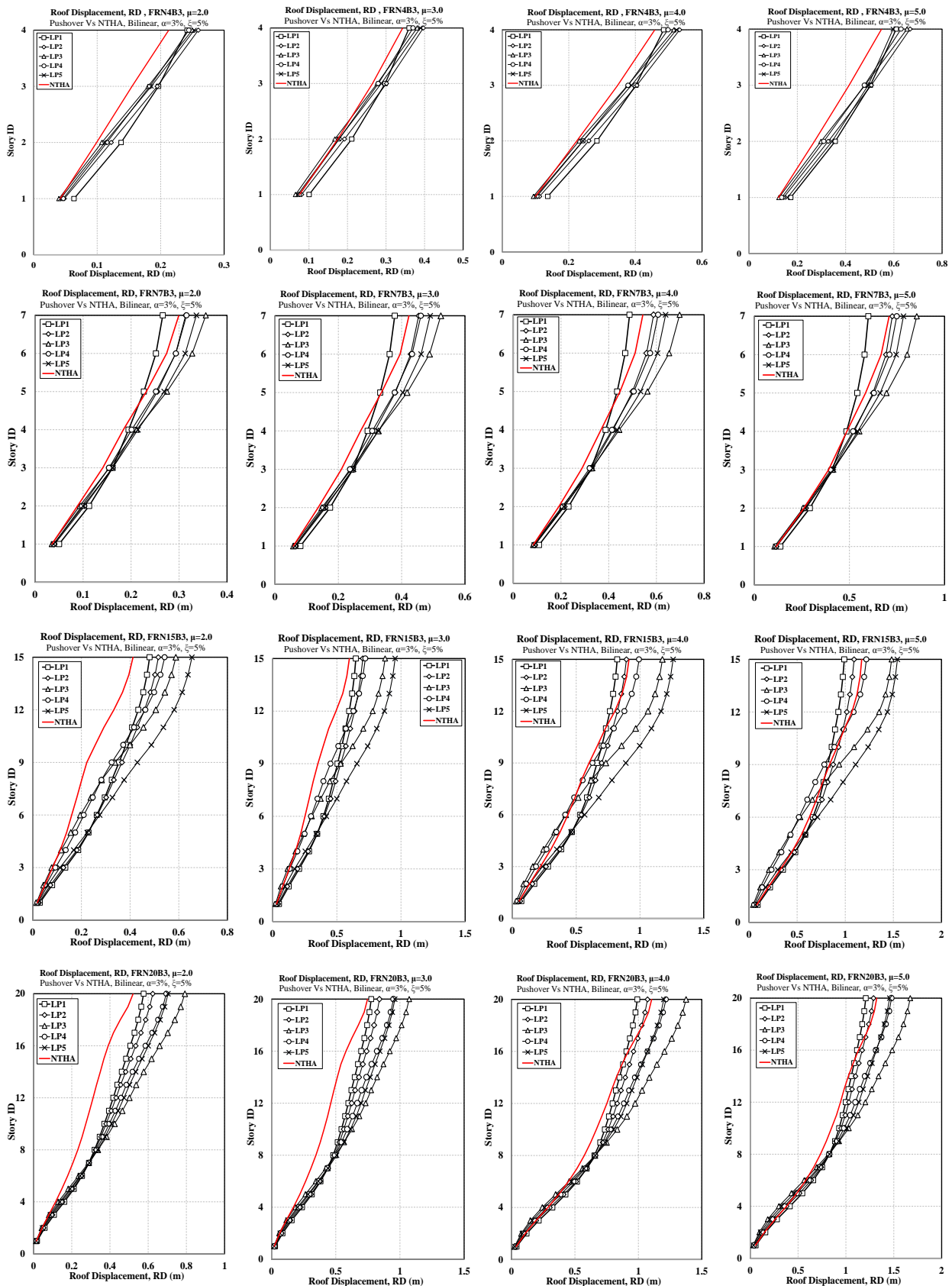
این موضوع در قاب ۲۰ طبقه مشهود است. این در حالی است که برای شکل‌پذیری ۲ و ۳، کلیه الگوهای بار، RD را بیشتر از NTHA تخمین زده‌اند. در واقع با افزایش تراز شکل‌پذیری، در اثر زلزله نزدیک گسل، پاسخ سازه به مود اول متمایل می‌گردد. از طرفی در چنین سازه‌ای، همه الگوهای بار به‌خوبی RD را در طبقات تحتانی سازه محاسبه نموده‌اند (مثلاً ۸ طبقه پایینی سازه ۲۰ طبقه متناظر با  $\mu_t=5$ ) زیرا در ۲۵٪ تراز تحتانی سازه، اثر مود اول بر بیشینه پاسخ سازه محسوس‌تر است. همچنین با افزایش تعداد طبقات، الگوی بار LP3 (الگوی توزیع بار FEMA356) نسبت به NTHA مقادیر بزرگ‌تری را ارائه می‌نماید. این نتیجه مستقل از تراز شکل‌پذیری است. همچنین برای سازه‌های بلند، نتایج دو الگوی بار LP4 (روش MMC) و LP5 (روش UBPA) مستقل از تراز شکل‌پذیری و مشابه یکدیگر می‌باشند. در نهایت ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع، تغییر مکان بام حاصل از الگوی بار مختلف از هم فاصله می‌گیرند و این مقادیر عموماً بزرگ‌تر از نتایج NTHA بوده و استفاده از آن‌ها می‌تواند محافظه‌کارانه و در جهت اطمینان باشد.



شکل ۵- فلوجارت اصلاح تغییر مکان هدف متناظر با شکل‌پذیری بین طبقه‌ای از پیش تعریف شده

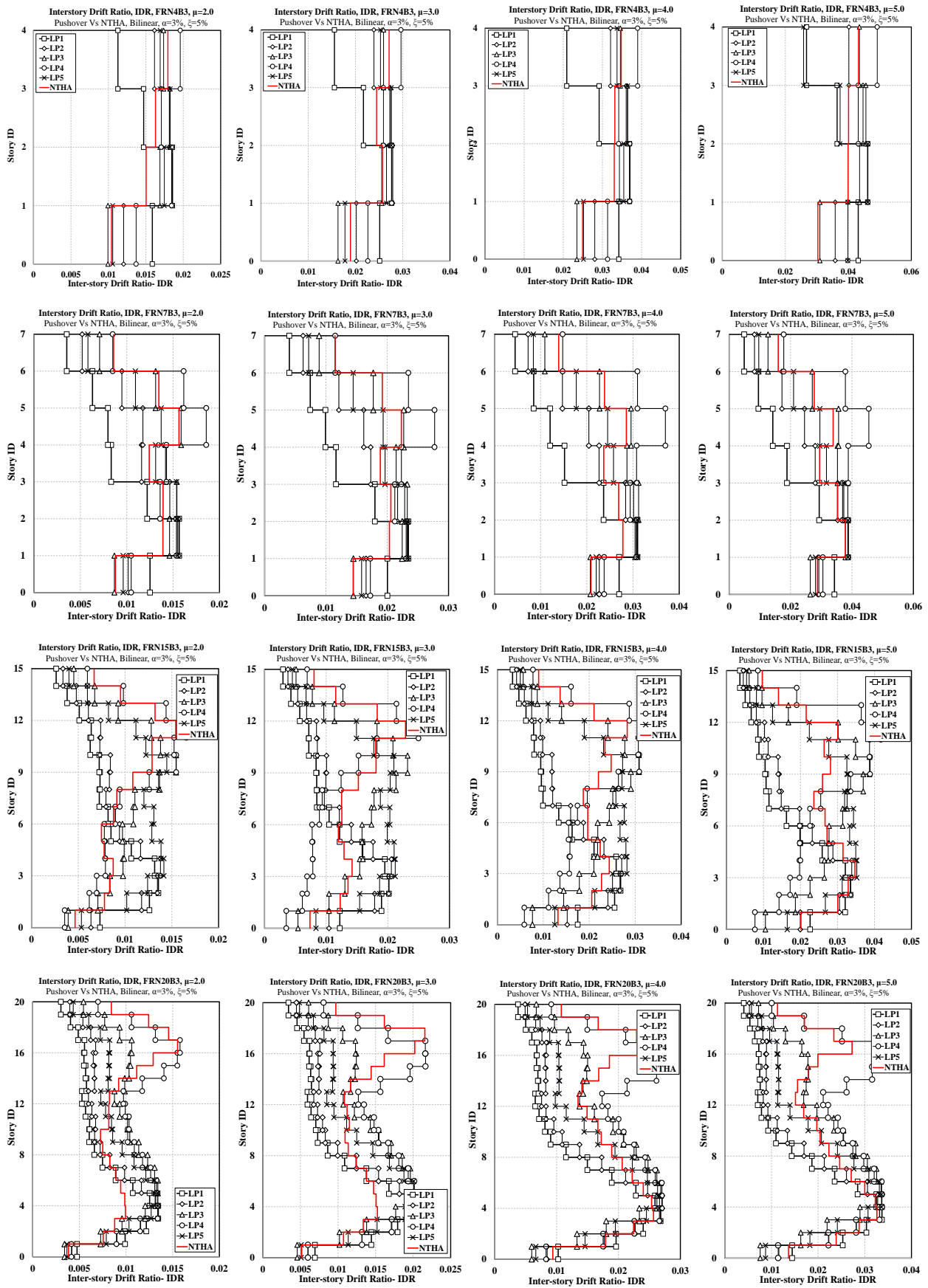
### ۵- نتایج و بحث

در فرآیند ارزیابی، مقایسه نیازهای محاسبه‌شده به روش‌های مختلف الگوی توزیع بار الاستیک (حاصل از تحلیل بار افزون) با نتایج حاصل از میانگین تحلیل تاریخچه زمانی سازه‌های مدر نظر قرار گرفته است. از آنجاکه مقایسه دو روش بار افزون و تاریخچه زمانی هنگامی میسر می‌گردد که هر دو روش دارای یک جه اشتراک باشند. در این مقاله برای هر دوره، از تنظیم شکل‌پذیری بین طبقه‌ای معادل شکل‌پذیری هدف از پیش تعریف شده استفاده شده است به‌نحوی که برای هر دو روش شکل‌پذیری بین طبقه‌ای به ترتیب ۲، ۳، ۴ و ۵ در نظر گرفته شده است. لازم به‌ذکر است که این روند از طریق سعی خطا بر ضریب مقیاس زلزله و تغییر در تغییر مکان هدف سازه‌ها میسر شده است. در ادامه مجموعه‌ای از نیازهای کلی، بین طبقه‌ای و محلی (اعم از تغییر شکل و دوران) محاسبه و مقایسه شده‌اند. از آنجاکه تعداد مدل‌ها و رکوردهای زلزله و سطوح شکل‌پذیری هدف قابل توجه می‌باشند، لذا از ارائه ضریب مقیاس زلزله‌ها و تغییر مکان هدف سازه‌ها متناظر با

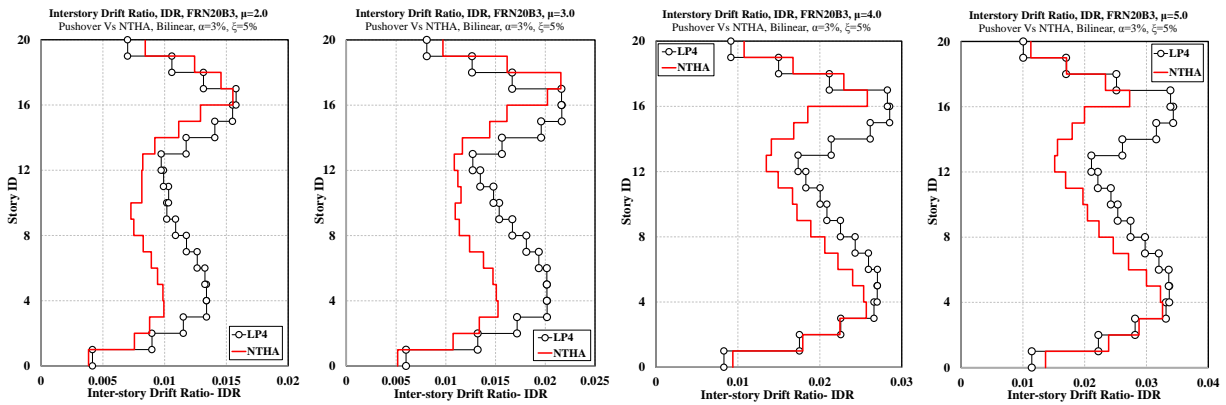


شکل ۶- توزیع تغییر مکان طبقه در ارتفاع برای الگوهای بار مختلف به همراه میانگین NTHA- تقاضای شکل پذیری ۲، ۳، ۴ و ۵

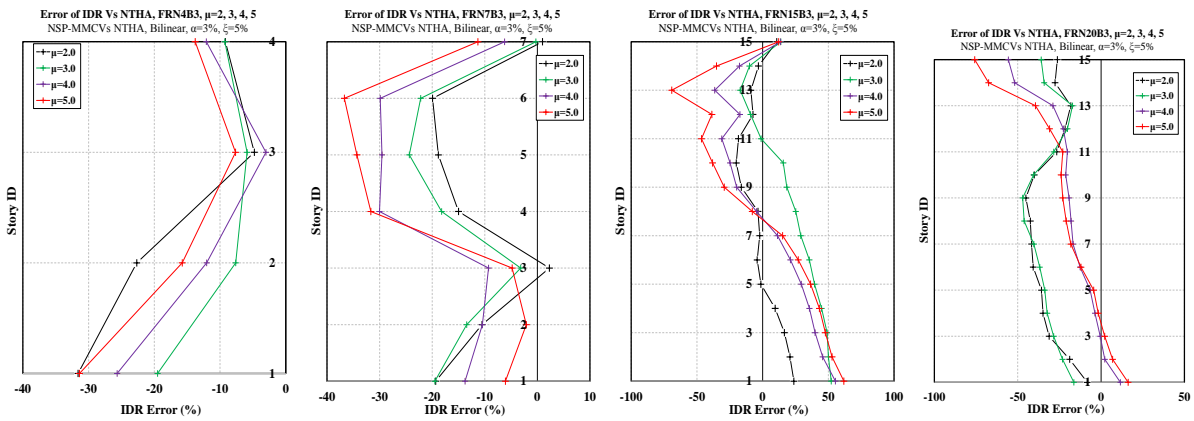




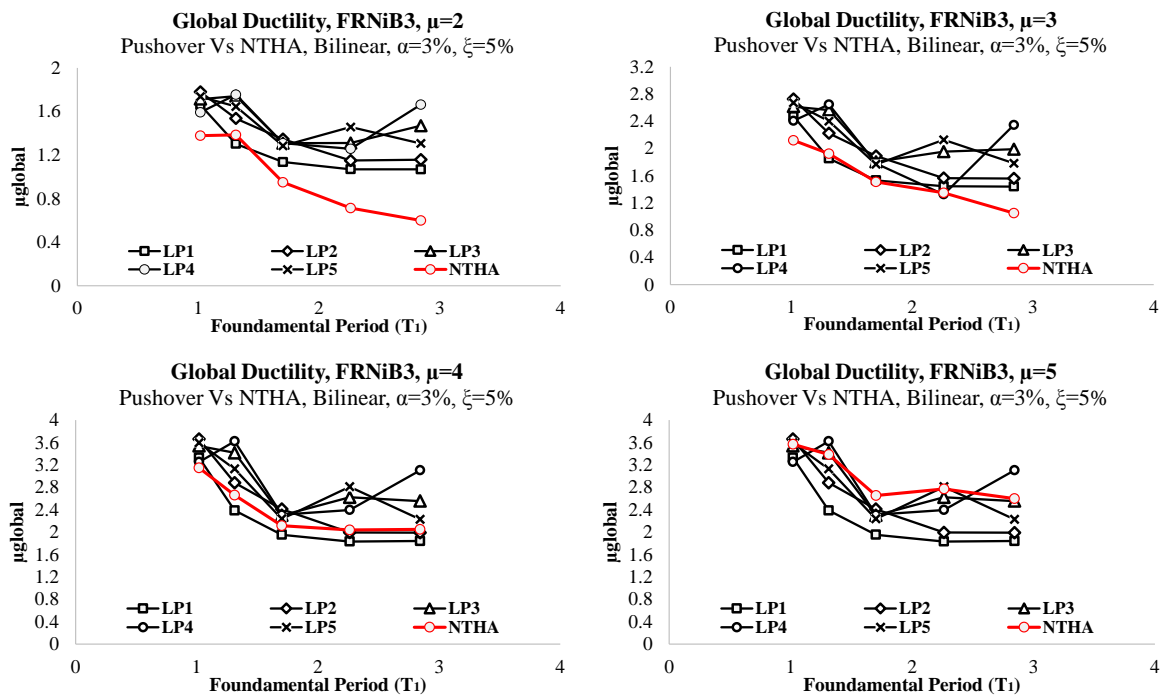
شکل ۷- توزیع دررفت بین طبقه‌ای در ارتفاع برای الگوهای بار مختلف به همراه میانگین NTHA- تقاضای شکل پذیری ۲، ۳، ۴ و ۵



شکل ۸- توزیع دریفیت بین طبقه‌های در ارتفاع برای الگوی بار LP4 به همراه میانگین NTHA در قاب ۲۰ طبقه تقاضای شکل پذیری ۵، ۴، ۳، ۲



شکل ۹- خطای محاسبه تغییرمکان نسبی بین طبقه‌های (IDR) به روش NSP-MMC و NTHA-mean برای سطوح مختلف شکل پذیری بین طبقه‌ای



شکل ۱۰- تغییرات شکل پذیری کلی برای الگوهای مختلف بار در مقایسه با میانگین NTHA به تفکیک شکل پذیری

### ۵-۲- زاویه دررفت بین طبقه‌ای

در بسیاری از کدهای لرزه‌ای، معیار کنترل زاویه رانش طبقه (زاویه دررفت طبقه)، IDR، برای محدود نمودن خرابی‌های زلزله، تعریف شده است. این خسارت‌ها در دودسته سازه‌ای و غیر سازه‌ای طبقه‌بندی می‌شوند. بنابراین برای بررسی توانمندی الگوهای مختلف توزیع بار در پیش‌بینی زاویه دررفت بین طبقه‌ای، نتایج مربوط به قاب‌ها در این بخش در شکل (۷) نمایش داده شده است.

بررسی کیفی و کمی شکل (۷) نشان می‌دهد که برای ساختمان‌های کم ارتفاع (۴ طبقه در این تحقیق)، در تمامی الگوهای بار به جز LP1، نیاز دررفت را بزرگ‌تر از NTHA برآورد شده است. تنها در الگوی LP1 و در تراز فوقانی، IDR به دست آمده کوچک‌تر از روش NTHA است. در چنین سازه‌ای با افزایش تراز شکل‌پذیری (شکل‌پذیری ۵)، دو الگوی بار LP1 و LP5 در طبقات فوقانی به یکدیگر همگرا شده‌اند. با افزایش تعداد طبقات، برخی الگوهای بار در تراز تحتانی مقادیر بزرگ‌تری را نتیجه داده‌اند که البته این تأثیرات با افزایش سطح شکل‌پذیری بین طبقه‌ای کاهش می‌یابد. برای شکل‌پذیری کم (۲ در این تحقیق)، بهترین تخمین IDR مربوط به الگوی بار LP4 است. با افزایش شکل‌پذیری از دقت این الگو در طبقات تحتانی کم می‌شود. از طرفی در طبقات پایین سازه و سطوح شکل‌پذیری کم، عمدتاً نتایج IDR الگو بارهای مختلف بیشتر از NTHA است. این در حالی است که در طبقات فوقانی نتیجه برعکس می‌گردد.

در ساختمان‌های بلند (۲۰ طبقه در این تحقیق)، IDR محاسبه شده با الگوی بار LP4 (MMC) بسیار به مقادیر NTHA نزدیک است (از نظر اندازه و روند تغییرات در ارتفاع). به علاوه با افزایش تقاضای شکل‌پذیری بر دقت این الگوی بار افزوده می‌شود. این موضوع در شکل (۸) نیز نمایش داده شده است.

برای درک بهتر از قابلیت روش MMC در تخمین زاویه دررفت بین طبقه‌ای نسبت به نتایج NTHA، در شکل (۹) برای سطوح مختلف شکل‌پذیری (مترادف با سطوح مختلف غیرخطی شدن)، توزیع خطا در ارتفاع به کمک رابطه زیر محاسبه شده است:

$$Error(\%) = \left| \frac{IDR_{NTHA} - IDR_{MMC}}{IDR_{NTHA}} \right| \times 100 \quad (6)$$

### ۵-۳- شکل‌پذیری کلی

با توسعه روش‌های بار افزون و تمایل کدهای لرزه‌ای به استفاده از سازه‌های شکل‌پذیر، موضوع شکل‌پذیری (تقاضا و ظرفیت) در سطوح مختلف عملکردی و در سه رده شکل‌پذیری کلی (طبقه بام)، بین طبقه‌ای و المانی تعریف می‌گردد. از آنجاکه در روش بار افزون، یکی از خروجی‌های تحلیل، نقطه تسلیم

عمومی سازه است، بنابراین می‌توان شکل‌پذیری کلی سازه را به کمک الگوهای مختلف بار افزون محاسبه نمود. شکل‌پذیری کلی عبارت است از نسبت بیشینه تغییر مکان سازه متناظر با نقطه توقف تحلیل در روش بار افزون یا حداکثر تغییر مکان بام حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به تغییر مکان عمومی تسلیم سازه. معمولاً شکل‌پذیری کلی متأثر از سطوح عملکردی را شکل‌پذیری ظرفیت گویند. شکل‌پذیری که از تحلیل سازه در برابر زلزله محاسبه گردد را تقاضای شکل‌پذیری<sup>۱۳</sup> گویند. بنابراین رابطه زیر را می‌توان برای محاسبه ضریب شکل‌پذیری کلی استفاده نمود:

$$\mu_g = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (7)$$

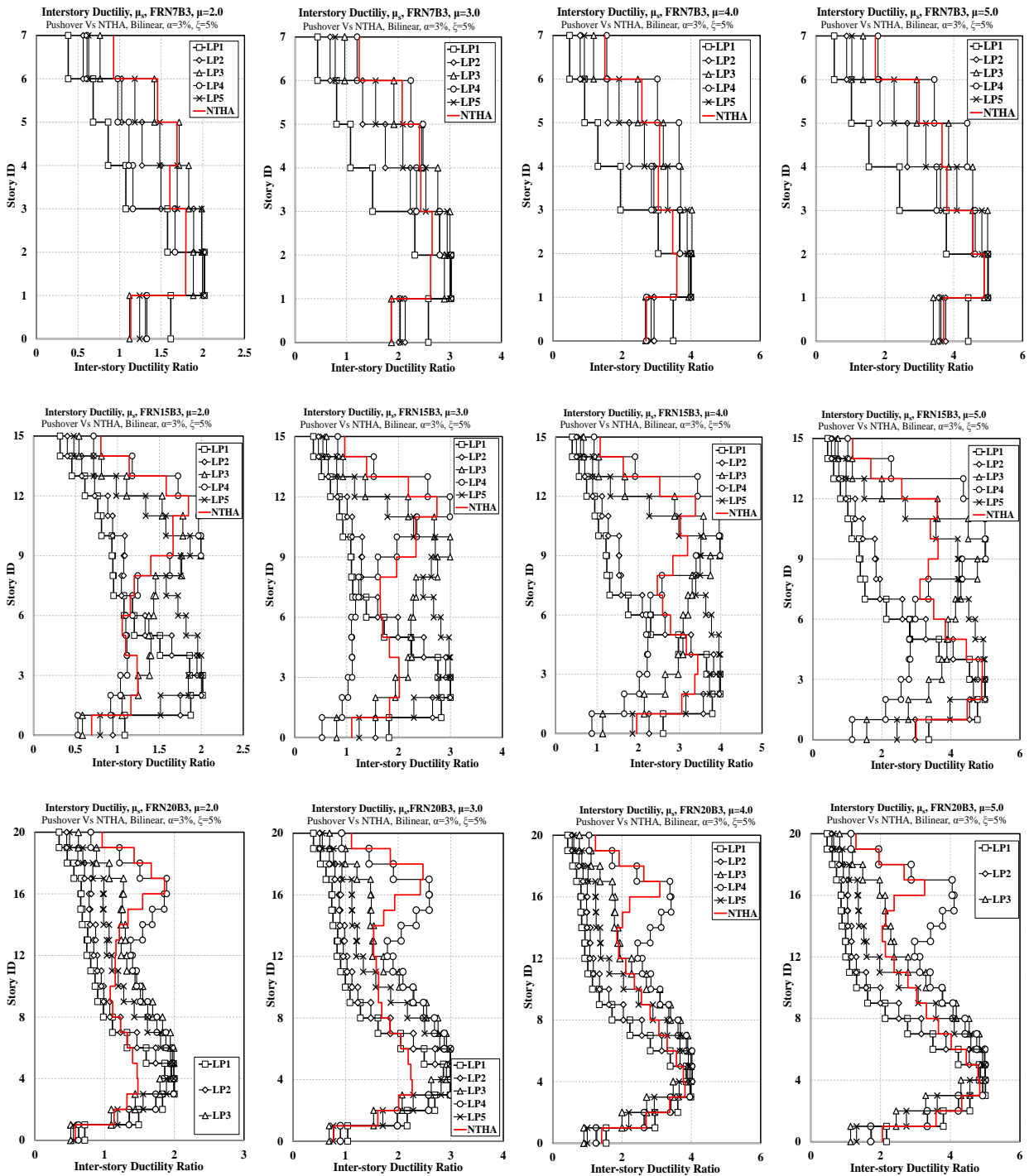
در رابطه (۷)،  $\mu_g$ ، ضریب شکل‌پذیری کلی است. برای مدل‌های این تحقیق ضریب مذکور متناظر با مقادیر مختلف شکل‌پذیری بین طبقه‌ای محاسبه و در شکل (۱۰) نمایش داده شده‌اند. در این نمودار، خط قرمز رنگ شکل‌پذیری کلی است که به کمک تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به دست آمده است.

بررسی شکل (۱۰) نشان می‌دهد که شکل‌پذیری هدف بین طبقه همواره بزرگ‌تر از شکل‌پذیری کلی است با افزایش ضریب شکل‌پذیری بین طبقه‌ای و دوره تناوب سازه، این اختلاف محسوس‌تر است. همچنین با افزایش شکل‌پذیری بین طبقه‌ای، شکل‌پذیری کلی نیز افزایش یافته و سپس ثابت می‌ماند. به عبارتی برای مقادیر تقاضای شکل‌پذیری بین طبقه‌ای ۴ و ۵، تغییر شکل‌پذیری کلی وابسته به شکل‌پذیری بین طبقه‌ای نیست. همچنین با افزایش دوره تناوب، شکل‌پذیری کلی کاهش می‌یابد. نرخ تغییرات به نحوی است که با افزایش دوره تناوب، شکل‌پذیری کلی کاهش یافته و سپس ثابت می‌ماند. به عبارتی برای سازه با دوره تناوب بزرگ، شکل‌پذیری کلی متأثر از تغییرات دوره تناوب نیست. این موضوع در سازه‌های نرم بدیهی است. از طرفی برای شکل‌پذیری بین طبقه‌ای برابر ۲، شکل‌پذیری کلی حاصل از NTHA در دوره تناوب‌های بزرگ، کم‌تر از یک محاسبه شده است. مقایسه شکل‌پذیری کلی الگوهای مختلف بار با مقادیر حاصل از تحلیل NTHA نشان می‌دهد که برای شکل‌پذیری بین طبقه‌ای ۲ و ۳، شکل‌پذیری کلی روش بار افزون بزرگ‌تر از NTHA است. این در حالی است که برای  $\mu_t=5$ ، شکل‌پذیری کلی روش NTHA بزرگ‌تر از الگوهای مختلف بار به دست آمده است. در این حالت الگوی بار LP5 (روش UBPA) می‌تواند مقادیر قابل قبولی را برای شکل‌پذیری کلی محاسبه نماید. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که کم‌ترین مقدار  $\mu_{tg}$  مربوط به الگوی بار LP1 (توزیع بار یکنواخت) است.

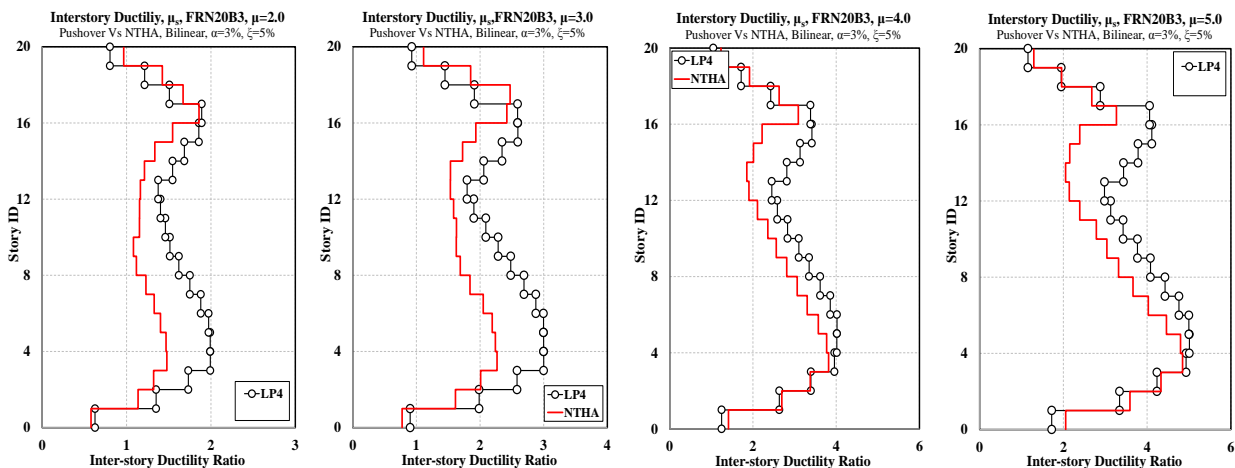
۵-۴- شکل پذیری بین‌طبقه‌ای

در سازه سه سطح شکل‌پذیری تعریف می‌گردد که به ترتیب عبارت‌اند از شکل‌پذیری کلی، شکل‌پذیری بین طبقه‌ای و شکل‌پذیری المانی. ارتباط بین شکل‌پذیری کلی و طبقه‌ای کم‌تر

در تحقیقات پیشین مورد توجه قرار گرفته است. بررسی مطالعات پیش نشان می‌دهد که شکل‌پذیری طبقه‌ای می‌تواند به‌عنوان یک شاخص خسارت، به‌خوبی رفتار غیر ارتجاعی سازه را رصد نماید. برای محاسبه نیاز شکل‌پذیری طبقه‌ای لازم است بیشینه زاویه دررفت طبقه به‌کمک NTHA محاسبه شود.



شکل ۱۱- توزیع شکل‌پذیری بین طبقه‌ای در ارتفاع برای الگوهای بار مختلف به‌همراه میانگین NTHA- تقاضای شکل‌پذیری



شکل ۱۲- توزیع شکل‌پذیری بین طبقه‌های در ارتفاع برای الگوی بار LP4 به‌همراه میانگین NTHA در قاب ۲۰ طبقه تقاضای شکل‌پذیری ۵ و ۴، ۳، ۲

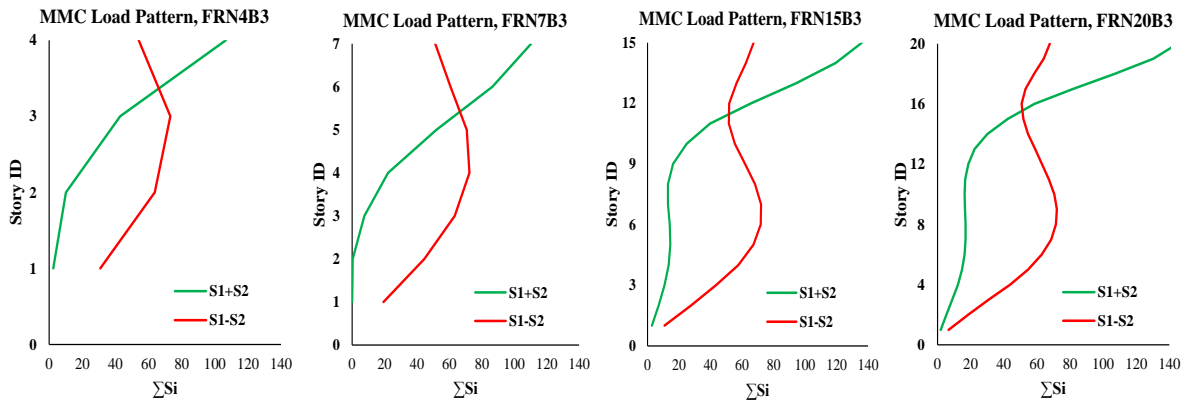
در این ساختمان‌ها استفاده از الگوی بار LP3 (الگوی FEMA356) بهترین تخمین را از تغییرات شکل‌پذیری بین طبقه‌های در ارتفاع نتیجه می‌دهند. این موضوع وابسته به تقاضای شکل‌پذیری نیست (به نتایج ساختمان ۷ طبقه مراجعه نمایید).

با افزایش ارتفاع ساختمان، به جهت آن‌که در طبقات بالای سازه، تأثیر مودهای بالاتر نیز در پاسخ نهایی سازه مشارکت می‌یابند، بنابراین الگوهای بارگذاری که متناظر با اثرات مودهای بالاتر نمی‌باشند، شکل‌پذیری بین طبقات را به‌مراتب کم‌تر از NTHA تخمین می‌زنند. به‌طور نمونه در ساختمان ۱۵ طبقه، الگوهای بارگذاری LP1 و LP2 نتوانسته‌اند تخمین درستی از شکل‌پذیری بین طبقه در طبقات بالای سازه ارائه نمایند. در طبقات پایین سازه، چنانچه تقاضای شکل‌پذیری اندک باشد (۲ و ۳)، به‌جز الگوی بارگذاری LP3 LP4، سایر الگوهای بار مقادیر بزرگ‌تری را نسبت به NTHA نتیجه داده‌اند. این در حالی است که در طبقات فوقانی، نتایج به‌دست‌آمده از الگوهای بار مختلف به‌جز LP4 (الگوی بار روش MMC) عموماً کم‌تر از NTHA است. با افزایش تقاضای شکل‌پذیری در سازه ۱۵ طبقه، به‌نظر می‌رسد که از تأثیر مودهای بالاتر کم‌تر شده و به‌دلیل تمایل پاسخ سازه به ارتعاش در مود اول الگوهای بار منطبق بر مود اول پاسخ بهتری را گزارش می‌کنند. در این بین الگوی بار LP1، LP2 و LP5 بهترین تخمین را از نظر بزرگی و موقعیت طبقه بحرانی ارائه نموده‌اند. کلیه نتایج به‌دست‌آمده برای قاب ۱۵ طبقه را می‌توان به قاب ۲۰ طبقه نیز تعمیم داد. از آنجاکه به‌نظر می‌رسد الگوی بار LP4 بتواند تخمین مناسبی از نیاز شکل‌پذیری بین طبقه‌های در قاب‌های بلندمرتبه ارائه نماید، در شکل (۱۲) برای سطوح مختلف شکل‌پذیری هدف، نتایج این الگوی بار با مقادیر حاصل از NTHA مقایسه شده‌اند.

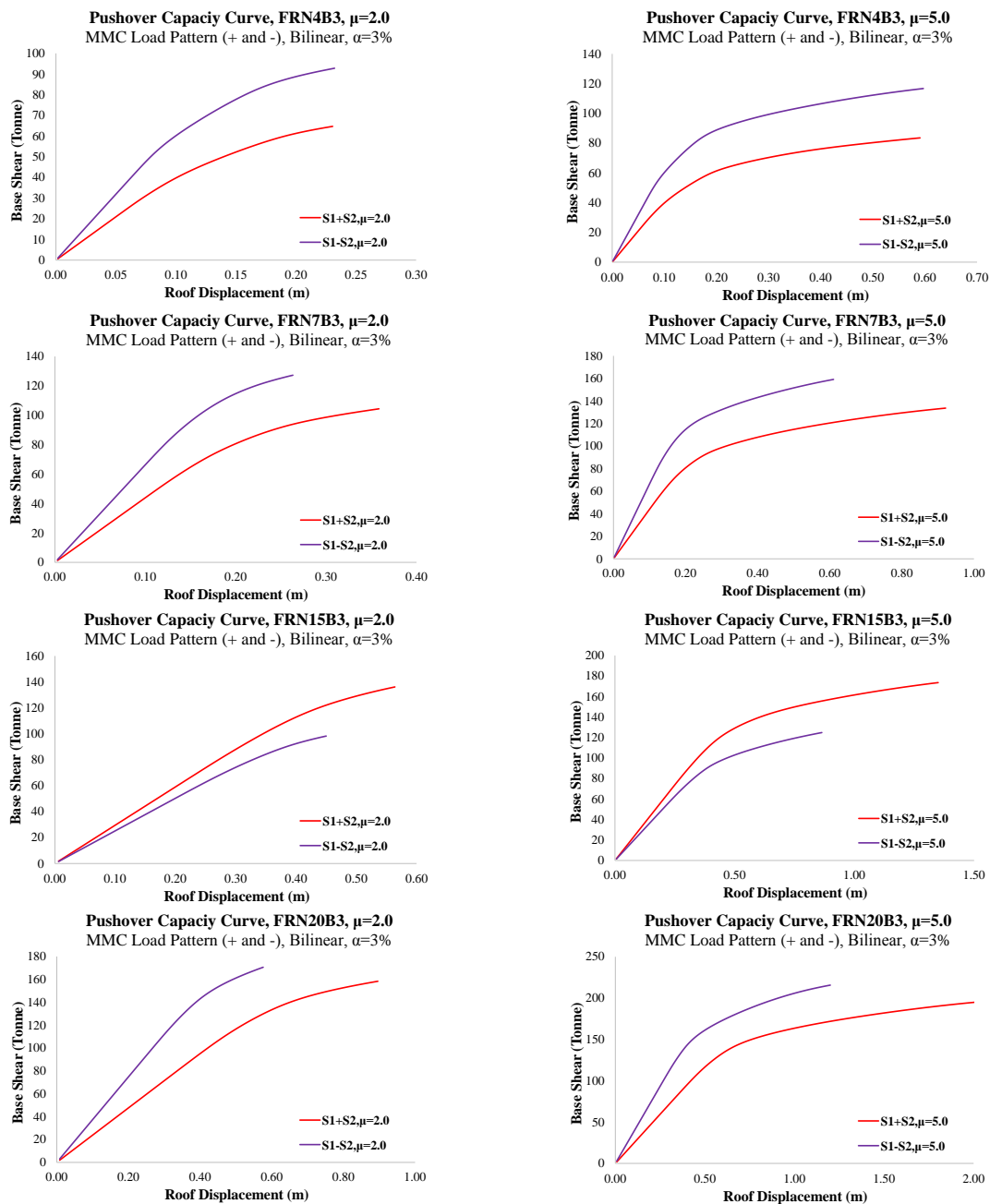
در مقابل زاویه دریافت تسلیم طبقه نیز از تحلیل بار افزون طبقه محاسبه می‌شود. بدین جهت کلیه طبقات به‌جز طبقه‌ای که تغییر مکان تسلیم آن موردنظر است، در برابر حرکت جانبی مقید می‌شوند. سپس بار افزایشی مونوتنیک بر تراز طبقه موردنظر وارد می‌شود. با ترسیم منحنی ظرفیت طبقه و ترسیم نمودار دوخطی معادل، نقطه تسلیم عمومی طبقه به‌دست می‌آید. در این تحقیق نیز از این روش استفاده شده است. در نهایت ضریب شکل‌پذیری طبقه‌ای برابر است با:

$$\mu_{IDR} = \frac{IDR_u}{IDR_y} \quad (8)$$

در رابطه فوق  $IDR_u$  و  $IDR_y$  به‌ترتیب عبارت‌اند از زاویه دریافت نهایی و تسلیم طبقه. لازم به یادآوری است که در تحقیق حاضر، شک‌پذیری بین طبقه‌ای مطابق دستورالعمل ارائه شده در بند (۴)، به مقادیر هدف ۲، ۳، ۴ و ۵ محدود شده است. بنابراین هدف از ارائه این بخش این است که ارزیابی شود الگوهای مختلف بار افزون تا چه اندازه می‌توانند موقعیت قرارگیری طبقه بحرانی (طبقه دارای شکل‌پذیری مساوی با شکل‌پذیری هدف) را در مقایسه با روش NTHA به‌درستی تخمین بزنند. در شکل (۱۱)، نتایج متناظر با ۴ تراز شکل‌پذیری هدف بین طبقه‌ای به تفکیک برای قاب‌های ۴، ۷، ۱۵ و ۲۰ نمایش داده شده‌اند. بررسی نتایج به‌دست‌آمده از شکل (۱۱) نشان می‌دهد که در ساختمان کوتاه، الگوهای مختلف بار نتوانسته‌اند موقعیت طبقه بحرانی متناظر با شکل‌پذیری هدف را به‌خوبی تعیین نمایند. هراندازه تراز شکل‌پذیری هدف بیشتر شود، از آنجاکه پاسخ سازه به سمت مود اول نوسان، متمایل می‌گردد، الگوهای بار مختلف می‌توانند با دقت بیشتری تراز طبقه بحرانی را محاسبه نمایند. در این دسته از ساختمان‌ها در طبقات بالایی، از دقت الگوی بار LP1 در محاسبه شکل‌پذیری بین طبقه‌ای کم می‌شود. به‌نظر می‌رسد که



شکل ۱۳- دو الگوی ترکیب‌شده خطی مودال در روش NSP-MMC



شکل ۱۴- نمودار ظرفیت سازه برای دو الگوی مختلف روش NSP-MMC - شکل‌پذیری بین طبقه‌های ۲ و ۵

توانمندی الگوهای بار جانبی الاستیک (عموماً بر پایه مود اول ارتعاش) در تخمین دقیق‌تر نیازهای غیرخطی ارزیابی شوند. بعلاوه توانمندی این الگوهای بار برای تعیین موقعیت و اندازه نیازهای غیر ارتجاعی بحرانی سازه در اثر زلزله نزدیک گسل با ماهیت پالس گونه موضوعی است که کم‌تر بدان توجه شده است. همچنین توسعه و بهبود الگوی باری که در عین سادگی بتواند روند توزیع نیازهای غیرالاستیک سازه در ارتفاع (اعم از دریافت کلی، بین طبقه‌ای و دوران‌ها) را به درستی تخمین بزند، می‌تواند پراهمیت باشد. برای پاسخ به چنین ابهاماتی در مقاله حاضر، ضمن به‌کارگیری پنج الگوی بار جانبی (۳ الگوی متداول به همراه دو الگوی جدید با نام‌های روش ترکیب مودال، MMC و بار افزون کران بالا، UBPA)، نیازهای غیرخطی قاب‌های منظم دویعدی محاسبه و با مقادیر حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی (NTHA) مقایسه شده‌اند.

یکسان‌سازی حداکثر شکل‌پذیری نیاز بین طبقه‌ای با شکل‌پذیری هدف بین طبقه از پیش تعریف‌شده، روشی است که برای مقایسه نتایج بار افزون و NTHA پیشنهاد شده است. نتایج نشان داد که در سازه‌های کوتاه، کلیه الگوهای بار توانسته‌اند نیازهای تغییر مکان کلی و بین طبقه‌ای را به خوبی تخمین بزنند. با افزایش تعداد طبقات و درگیر شدن اثر موده‌های بالاتر، بهترین الگوی بار، روش MMC است. به‌علاوه با افزایش نیاز شکل‌پذیری بین طبقه‌ای، رفتار قاب‌های بلند به سمت مود اول ارتعاش متمایل می‌گردد، به‌نحوی که روش MMC در طبقات فوقانی تخمین قابل قبولی را ارائه می‌دهد اما در طبقات تحتانی الگوهای بار متداول ارزیابی بهتری را از نیازهای تغییر شکل ارائه می‌کنند. از طرفی روش MMC به خوبی توانسته است روند توزیع نیازهای غیرخطی در ارتفاع سازه را نسبت به نتایج NTHA دنبال نماید. در شکل‌پذیری‌های کوچک، ضریب شکل‌پذیری کلی محاسبه‌شده توسط پنج الگوی بار جانبی بیشتر از مقدار حاصل از NTHA است، درحالی‌که با افزایش شکل‌پذیری، این روند برعکس می‌شود. همچنین کلیه الگوهای بار، تغییر شکل طبقات در ارتفاع را بزرگ‌تر از NTHA محاسبه نمودند. این اختلاف با افزایش تعداد طبقات و شکل‌پذیری هدف افزایش می‌یابد. در نهایت مطالعه کلیه نتایج نشان داد استفاده از روش MMC می‌تواند در اثر زلزله‌های نزدیک گسل پالس گونه به‌عنوان یک الگوی بار مناسب در محاسبه نیازهای غیرخطی توزیع یافته در ارتفاع سازه به کار گرفته شود. البته دقت این الگوی بار وابسته به تراز شکل‌پذیری بین طبقه‌ای است. نکته مهم این‌که در این روش هر الگوی بار یک منحنی ظرفیت با سختی الاستیک و غیرالاستیک متفاوت را نتیجه می‌دهند، بنابراین به کمک الگوی بار MMC نمی‌توان نمودار ظرفیت نهایی سازه را مشخص نمود که این مهم‌ترین نقطه‌ضعف این روش است.

بررسی شکل مذکور نشان می‌دهد که این الگوی بار برای سطوح مختلف شکل‌پذیری توانسته شکل توزیع شکل‌پذیری بین طبقه‌ای در ارتفاع و موقعیت طبقه بحرانی (طبقه متناظر با بیش‌ترین تراز شکل‌پذیری بین طبقه‌ای) را به خوبی محاسبه نماید. این موضوع برای شکل‌پذیری ۴ و ۵ بیش‌ازپیش تأیید می‌گردد.

## ۵-۵- نمودار ظرفیت سازه

یکی از مهم‌ترین نمودارهای حاصل از روش بار افزون، نمودار ظرفیت سازه است که عموماً تغییر مکان نقطه کنترل (مرکز جرم بام) را برابر نیروی برش پایه در هر گام بارگذاری افزایشی نشان می‌دهد. از این نمودار می‌توان سختی الاستیک سازه، شیب پسا تسلیم سازه، تغییر مکان تسلیم عمومی، شکل‌پذیری کلی، نقطه متناظر با تشکیل اولین مفصل پلاستیک و اضافه مقاومت سازه را محاسبه نمود. این نمودار وابسته به الگوی بارگذاری است. مطالعه نتایج بخش‌های قبل نشان می‌دهد که استفاده از الگوی بار MMC می‌تواند تخمین قابل قبولی از نیازهای غیر ارتجاعی قاب‌های با اتصال صلب را ارائه نماید. از آنجایی‌که در این مقاله برای روش MMC دو الگوی بار در نظر گرفته شده است، بنابراین نمودارهای ظرفیت هر سازه وابسته به یک تراز شکل‌پذیری بین طبقه‌ای مشخص، در شکل (۱۴) ترسیم شده‌اند. لازم به ذکر است که آنچه به‌عنوان نمودار ظرفیت هر سازه ارائه شده است تنها برای دو سطح شکل‌پذیری ۲ و ۵ است. دلیل انتخاب این دو تراز شکل‌پذیری پرهیز از طولانی شدن نتایج این بخش است. برای یادآوری، دو الگوی مختلف روش MMC که توسط رابطه (۱) ارائه شده است، بازنویسی می‌شوند. برای آشنایی بهتر، این دو الگوی بارگذاری با  $S_1+S_2$  و  $S_1-S_2$  مربوط به ساختمان ۱۵ طبقه، در شکل (۱۳) نمایش داده شده است.

$$F_j = \alpha_1 \Gamma_1 m \phi_1 S_a(\xi_1, T_1) + \alpha_2 \Gamma_2 m \phi_2 S_a(\xi_2, T_2) \quad (9)$$

$$F_j = \alpha_1 \Gamma_1 m \phi_1 S_a(\xi_1, T_1) - \alpha_2 \Gamma_2 m \phi_2 S_a(\xi_2, T_2) \quad (10)$$

بررسی شکل (۱۴) نشان می‌دهد که دو الگوی مورد استفاده در MMC باعث شده است تا نمودار ظرفیت‌های متفاوتی را نتیجه دهد. به‌جز ساختمان ۱۵ طبقه، در سایر حالت‌ها، سختی الاستیک الگوی بار حاصل از رابطه (۱۰) بزرگ‌تر از مقدار حاصل از رابطه (۹) است. این در حالی است که با افزایش ارتفاع نقطه متناظر با توقف سازه برای الگوی  $S_1-S_2$  کوچک‌تر از  $S_1+S_2$  است. همچنین افزایش شکل‌پذیری باعث شد تا نقطه توقف بین دو الگوی بار انتخابی از هم فاصله بگیرند.

## ۶- نتیجه‌گیری

با افزایش مقبولیت و کاربرد روش‌های بار افزون، لازم است

## ۷- مراجع

- Instruction-No.360, Office of Deputy for Strategic Supervision, "Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings No.360", Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, Tehran, Iran, 2014.
- Jan TS, Liu MW, Kao YC, "An upper-bound pushover analysis procedure for estimating seismic demands of high-rise buildings", *Engineering Structures*, 2004, 26 (1), 117-28.
- Kalkan E, Kunnath SK, "Adaptive modal combination procedure for nonlinear static analysis of building structures", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2006, 132 (11), 1721-31.
- Kalkan E, Kunnath SK, "Method of modal combinations for pushover analysis of buildings", 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, British Columbia, Canada, August 1-6, 2004.
- McKenna F, Fenves G, "Open System for Earthquake Engineering Simulation", University of California, Berkeley, Berkeley, California, US, 2000.
- Moghadam AS, Tso WK, "A pushover procedure for tall buildings", 12<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, London, United Kingdom, 2002.
- Standard2800-V4, "Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings", 4<sup>th</sup> Edition, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran, 2014.
- American Institute of Steel Construction (ANSI/AISC 360-10), "Specification for Structural Steel Buildings", Chicago, Illinois 60601-180, US, 2010.
- Amini MA, Poursha M, "A non-adaptive displacement-based pushover procedure for the nonlinear static analysis of tall building frames", *Engineering Structures*, 2016, 126, 586-597.
- Aydinglu MN, "An incremental response spectrum analysis procedure based on inelastic spectral displacement for multi-mode seismic performance evaluation", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2003, 1 (1), 3-36.
- Baker J, "Quantitative classification of near-field ground motion using wavelet analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007, 97 (5), 1486-1501.
- Breih Gh, Siahpolo N, Gerami M, "Capability of elastic conventional and modern load patterns to predict seismic demand of high-rise SMRFs against near-fault pulse-type earthquakes", 3<sup>th</sup> International conference on New Research Achievements in Civil Engineering, Architecture and Urban management, Tehran, Iran, 17 September, 2017, (In Persian).
- Chopra AK, Goel RK, "A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002, 31 (3), 561-82.
- Chopra AK, Goel RK, Chinatanapakdee C, "Evaluation of modified MPA procedure assuming higher modes as elastic to estimate demands", *Earthquake Spectra*, 2004, 20 (3), 757-778.
- Chopra AK, Goel RK, "A modal Pushover Procedure to estimate seismic demands for buildings: Summery and evaluation", 5<sup>th</sup> National conference on Earthquake, Istanbul, Turkey, 2003.
- Computers and Structures, Inc. (CSI), "Etabs 2013-extended 3D analysis of building systems, nonlinear", Berkeley, California 94704, US, 2013.
- FEMA356, "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Report FEMA-356, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, US, 2000.
- Gerami M, Mashayekhi AH, Siahpolo N, "Evaluating Displacement Adaptive Pushover (DAP) analysis in predicting seismic demands of SMRFs", 7<sup>th</sup> International conference on Earthquake Engineering an Seismology, International Earthquake Engineering and Seismology Research Center, Tehran, Iran, 18-21 May, 2015. (In Persian).
- Gerami M, Mashayekhi AH, Siahpolo N, "Evaluation of SMRFs seismic demands using different nonlinear static analysis", *Amirkabir Civil Engineering Journal*, 2017, 49 (3), 419-430.
- Gupta B, Kunnath SK, "Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures", *Earthquake Spectra*, 2000, 16 (2), 367-391.
- INBC-Part6, "Iranian National Building Code-Part 6: Applied loads on buildings", Office of National Regulation and Building Control (ONRBC), Tehran, Iran, 2014.



## EXTENDED ABSTRACT

# Evaluation of the Inelastic Deformation Demands in Regular Steel Frames by Comparing the Results of the Pushover Method with the Nonlinear Time Histories Analysis Under the Near-Fault Pulse-type Earthquake

Navid Siahpolo<sup>a,\*</sup>, Mohsen Gerami<sup>b</sup>, Reza Vahdani<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Engineering, ACECR Institute for Higher Education, Khuzestan branch, Iran

<sup>b</sup> Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

**Received:** 25 January 2015; **Accepted:** 09 September 2019

### Keywords:

Pushover method, Load pattern, Target ductility, Inelastic demand, Near-Fault earthquake.

## 1. Introduction

In this research, the capability of elastic load patterns, including suggested patterns in prevalent seismic codes, and modified elastic patterns such as the Method of Modal Combinations (MMC) and the Upper-Bound Analysis (UPBA) in estimating the nonlinear demands of steel moment frame are evaluated by pushover method. Afterward the results of pushover analysis compared with the results of Nonlinear Time History Analysis (NTHA) affected by near-fault pulse-type ground motion. This study, not only tried to investigate the ability of load patterns to be used in pushover methods but also obtained different inelastic demands such as absolute displacement story (RD), Inter-story Drift Ratio (IDR), global ductility ( $\mu_g$ ) and story ductility ( $\mu_s$ ). Eventually, the error values of each load pattern were reported. The most important innovation of this research is the analytical study of the ability of various patterns of pushover methods against the values derived from nonlinear time history analysis (affected by near-fault earthquakes) in computing the parameters of the general and interstory deformation (which has been less consideration in previous studies) by applying the effect of higher modes.

## 2. Methodology

### 2.1. Experimental study

During the design of 4, 7, 15, 20 story special moment-resisting frames (SMRFs) with 3 spans (Fig.1), with the definition of 5 load patterns, the nonlinear demands are calculated for 4 levels of target interstory ductility ( $\mu_t$ ). In this study, OpenSEES software was used to perform static and nonlinear time history analysis. To determine the inelastic dynamic response of the structures, near-fault earthquakes with forward directivity effect and perpendicular to the fault component were used. All accelerograms are classified as pulse-type earthquakes based on the classification provided by Baker (Baker, 2007). Since the results of the pushover method are highly dependent on the load distribution pattern in height, it is, therefore, necessary to use the different number of load patterns derived from different assumptions. In this paper, five load distribution models are used. The three load patterns LP1, LP2, and LP3 are derived from FEMA356 (FEMA356, 2000). In the first pattern, the uniform mass distribution of the force corresponding to the structural mass is used. For the second pattern, all the models are first analyzed by spectral method (using the elastic mean spectrum obtained from 7 near-fault earthquakes). Then, the distributed force of the

\* Corresponding Author

E-mail addresses: siahpolo@acecr.ac.ir (Navid Siahpolo), mgerami@semnan.ac.ir (Mohsen Gerami), reza.vahdani2001@gmail.com (Reza Vahdani).

oscillating modes with the sum of the effective modal mass greater than 90% of the total mass of the structure was combined using SRSS in each story. In the third load pattern, LP3, the load distributed in height according to equation (1) is also used in the Iranian Code-2800 4<sup>th</sup> edition (Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, 2014).

$$F_x = V \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^N w_i h_i^k} \tag{1}$$

In equation (1) the  $w_x$  and  $h_x$  is the seismic weight of story  $x$  and the height of  $x$ -story from the base level.  $K$  is the value in which depends on the period of structure (between 1 to 2). To apply the effects of higher modes and to improve the elastic load distribution pattern in the pushover method, the fourth model of lateral loading based on the mode combination (MMC) proposed by Kalkan was used (Kalkan and Kunnath, 2004). In this method, the lateral force distribution at height is defined as follows:

$$F_j = \sum \alpha_n \Gamma_n m \phi_n S_a(\xi_n, T_n) \tag{2}$$

The fifth loading pattern, LP5, is used by the UPBA pushover analysis method (Jan et al., 2004). In this method, by using equation (4) the combined loading pattern of the first and second vibrational modes is calculated as a single load pattern:

$$F_j = \omega_1 m \phi_1 + \omega_2 m \phi_2 (q_2/q_1) \tag{3}$$

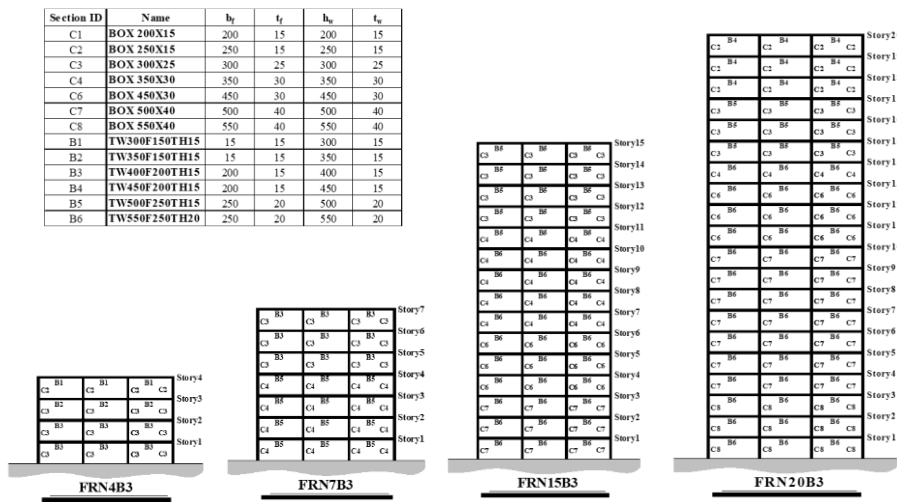


Fig. 1. Details of the structural models used in the pushover & NTHA methods

### 3. Results and discussion

As previously mentioned a set of general interstory and local needs (including deformation and rotation) have been calculated and compared. Some of the results of this research are shown in Fig. 2 to 4.

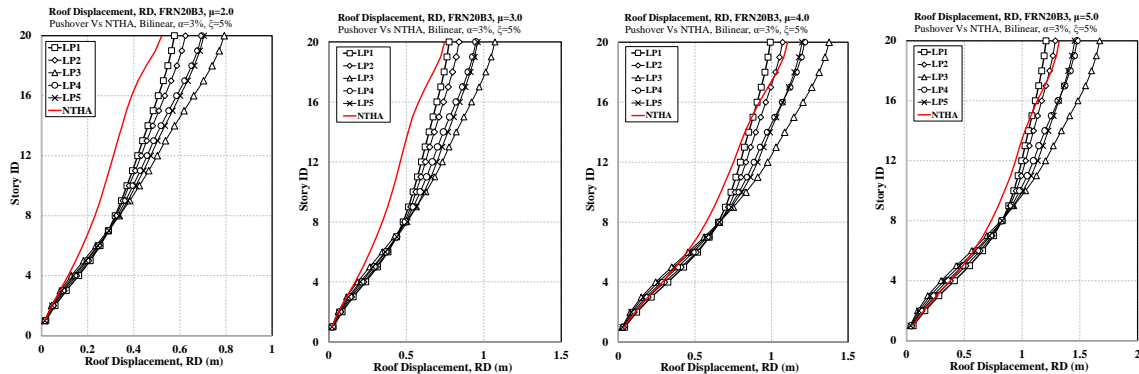


Fig. 2. Floor displacement height-wise distribution for different load patterns vs the mean NTHA in a 20-story frame-ductility demand of 2, 3, 4, and 5

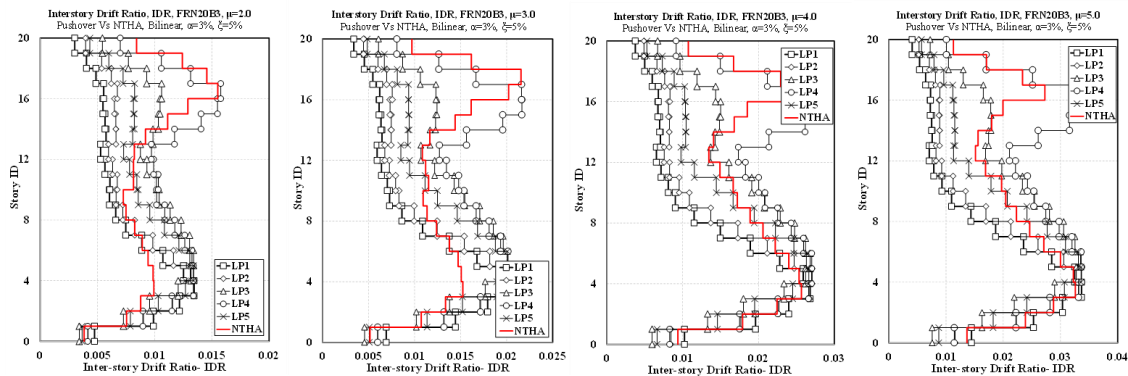


Fig. 3. Interstory drift height-wise distribution for different load patterns vs the mean NTHA in a 20-story frame-ductility demand of 2, 3, 4, and 5

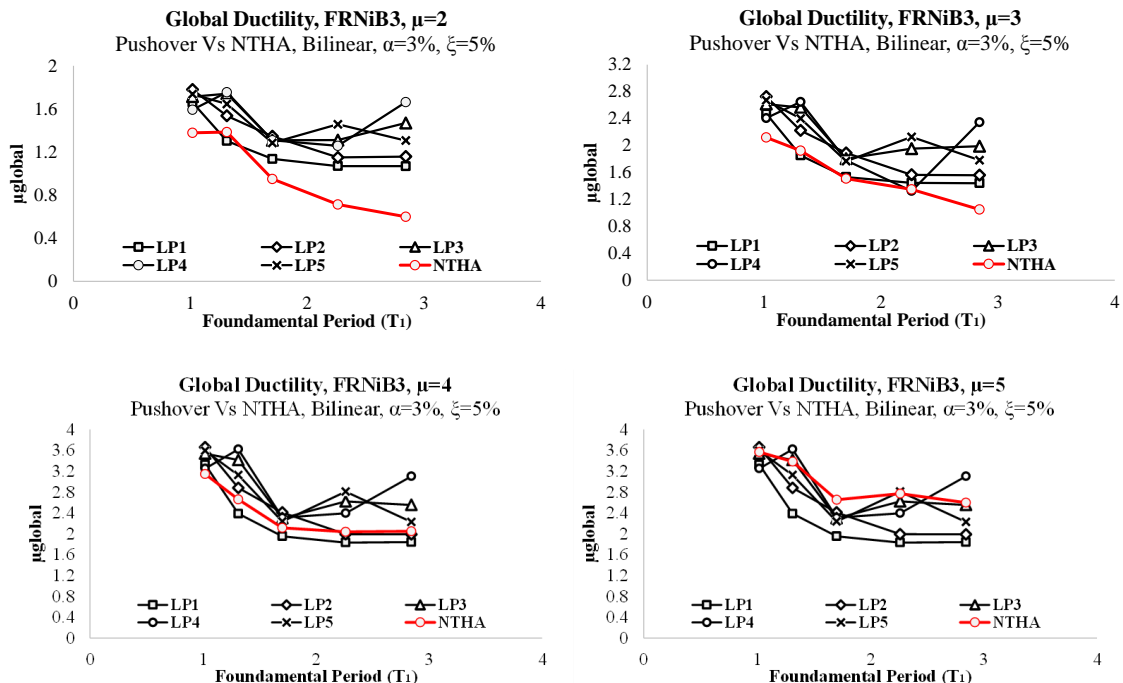


Fig. 4. Global ductility variations for different load patterns compared to the mean NTHA in terms of ductility

To capture the MMC capability in estimating IDR against the value resulting from NTHA, the error distribution over the height of models has been calculated via equation (5) for different ductility values. The results have been depicted in Fig. 5.

$$Error(\%) = \left| \frac{IDR_{NTHA} - IDR_{MMC}}{IDR_{NTHA}} \right| \times 100 \quad (4)$$

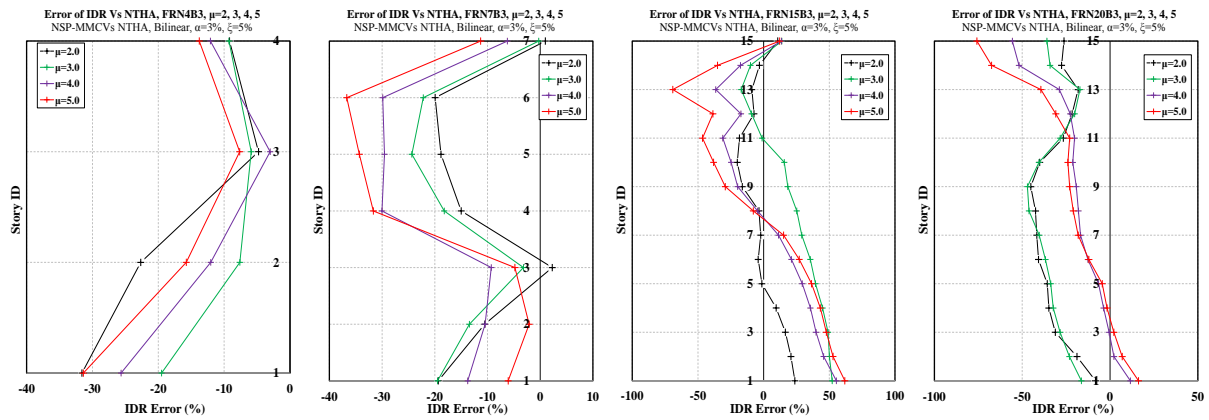


Fig. 5. The error of MMC load pattern to calculate IDR for different interstory ductility against NTHA

#### 4. Conclusions

The results of the models of this study show that with increasing  $\mu_t$ , the tendency of the structure to oscillate in the first mode has increased and all the load patterns can be calculated the story deformation in the bottom 25% of the structure independently of the number of stories. However, the drift interstory derived from the MMC method has the best accuracy. Moreover, with increasing  $\mu_t$ , the accuracy of this method decreases. As with the increasing elevation of the structure, the IDR is lower in some stories, and in some cases, it is higher than the NTHA values. Also, with increasing  $\mu_t$ , the accuracy of all load patterns was increased determining the position of the critical story corresponding to the interstory ductility, so that the MMC method has the best conformity with the distribution of interstory ductility in elevation.

#### 5. References

- Baker J, "Quantitative classification of near-field ground motion using wavelet analysis", Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97 (5), 1486-1501.
- FEMA "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Report FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, U.S.A, 2000.
- Iranian Building Codes and Standards, Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, 4<sup>th</sup> Edition, BHRC-PN S-253, Road, Housing and Urban Development Research Center, Iran, 2014.
- Jan TS, Liu MW, Kao YC, "An upper-bound pushover analysis procedure for estimating seismic demands of high-rise buildings", Engineering Structures, 2004, 26 (1), 117-28.
- Kalkan E, Kunnath SK, "Method of modal combinations for pushover analysis of buildings", 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, British Columbia, Canada, August 1-6, 2004.