

ارزیابی توزیع تغییر مکان نسبی طبقات در قاب‌های خمشی فولادی طراحی شده به روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد با احتساب آثار اندرکنش خاک و سازه

بهنود گنجوی^۱، ابوالفضل غلامرضا تبار^۲، غلامرضا قدرتی امیری^{۳*}

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه مازندران، بابلسر

۲- دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

*ghodrati@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۱۲/۰۹]

تاریخ دریافت: [۹۶/۰۵/۲۲]

چکیده

در این پژوهش توزیع تغییر مکان نسبی طبقات در قاب‌های خمشی فولادی طراحی شده بر اساس روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد، تحت رکوردهای قوی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد بر دو اصل جابه‌جایی نسبی هدف و سازوکار تسلیم از پیش تعیین شده استوار است. روش طراحی مذکور بر اساس تئوری طراحی پلاستیک شکل گرفته و مقدار برش پایه طراحی با استفاده از اصل بقای انرژی استخراج می‌شود. همچنین ابعاد اعضا بر اساس روش طراحی پلاستیک مبتنی بر یک الگوی تسلیم از پیش تعیین شده مشخص می‌شوند. در این راستا قاب‌های خمشی فولادی ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ طبقه طراحی شده به روش پلاستیک به کمک نرم افزار OpenSees مدل‌سازی شده و در حالات بدون اثر اندرکنش خاک- سازه و با احتساب اثر اندرکنش تحت رکورد زلزله قرار گرفته‌اند. بر اساس تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی در حالت شکل پذیری ثابت، مقادیر تغییر مکان نسبی طبقات تعیین و مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین پارامترهای موثر بر توزیع خسارات و نیز کارآمدی الگوهای بارگذاری جانبی مختلف مورد ارزیابی گرفتند. در این مطالعه آثار اندرکنش خاک- سازه بر توزیع تغییر مکان نسبی و تاثیر آن بر توزیع خسارات، به صورت پارامتریک بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است که آثار اندرکنش خاک- سازه بطور عمده بر پاسخ غیر ارتجاعی سازه موثر بوده و به شدت اندرکنش وابسته است. نتایج همچنین بیانگر آن است که پارامترهایی مانند پیوند اصلی سازه (T)، شکل پذیری (μ) نیز سبب تغییر توزیع تغییر مکان نسبی قاب‌ها می‌شود.

کلمات کلیدی: تغییر مکان نسبی طبقات، طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد، اندرکنش خاک و سازه، سازوکار تسلیم

۱. مقدمه

لرزه‌ای عملکردی ارائه یک فرآیند منطقی و ساده مبتنی بر طراحی مفهومی است. بنابراین تغییر بنیادین در روش طراحی بر اساس نیرو و با اصلاح روش‌هایی آیین نامه‌ای و تغییر رویکرد طراحی لرزه‌ای مبتنی بر نیاز تغییر مکانی، شکل پذیری

الگوی بارگذاری لرزه‌ای مبتنی بر ضوابط آیین نامه‌ای الزاما منجر به تخمین مناسبی از نیاز لرزه‌ای و پیش بینی معیارهای عملکرد لرزه‌ای نمی‌شود [1, 2]. یکی از مولفه‌های طراحی

و انرژی ایجاد شد. روش طراحی ارتقا یافته باید قابلیت آن را داشته باشد تا نیازهای لرزه‌ای را با درستی و دقت بیشتری ارزیابی نماید. همچنین باید قادر باشد تا چگونگی سازوکار شدن سازه را حین رفتارهای غیرخطی تحت جنبش‌های شدید پیش بینی و کنترل نماید. لیلاتاویوات [3] یک روش طراحی لرزه‌ای جدیدی را بر اساس تحلیل پلاستیک مبتنی بر کنترل تغییرمکان برای قاب‌های خمشی ارائه نمودند. این روش طراحی پیشنهادی که بر اساس معیار طراحی حدی عملکردی است بر دو پارامتر تغییر مکان نسبی هدف و سازوکار تسلیم از پیش تعیین شده بنیان گذاری شده است. لی و گوئل [4] روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد¹ را پیشنهاد دادند. ایشان تلاش کردند تا با بکارگیری روش طراحی پلاستیک، از سازوکار فروریزش پیش بینی نشده ممانعت شود و به تغییرمکان نهایی از پیش تعیین شده تحت سازوکار گسیختگی کنترل شده دست یابند. چائو و گوئل [5] [6] با بهره‌گیری از اصل بقاء انرژی و بکارگیری از روش طراحی پلاستیک پیشنهادی اقدام به طراحی قاب‌های مهاربندی شده و نیز قاب‌های خمشی با سیستم خرپایی ویژه نمودند. چائو و همکاران [7] تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی را روی تعدادی قاب طراحی شده به روش طراحی پلاستیک انجام داده و نیاز نیرویی و تغییرشکلی را تحت زلزله‌های قوی پیش‌بینی نمودند. گوئل و همکاران [8] روش پیشنهادی حاضر را برای تحلیل انواع قاب‌های بتن مسلح بکار بردند. ایشان به کمک نتایج تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی و دینامیکی نشان دادند قاب‌هایی که ضابطه تیر ضعیف- ستون قوی در آنها رعایت شده است، دریافت طبقات و نیاز شکل پذیری آنها در محدوده تغییرمکان‌های نهایی هدف باقی می‌ماند. پارک و مدینا [9] روش طراحی مفهومی را برای طراحی قاب‌های خمشی مبتنی بر معیار کنترل خسارات و توزیع یکنواخت آن در راستای ارتفاع توسعه دادند. ایشان نشان دادند سازه‌های طرح شده بر این اساس، دارای توزیع یکنواخت‌تری از دریافت و شکل پذیری در مقایسه با قاب‌های طرح شده آیین‌نامه‌ای است. شایانفر و همکاران [10]

روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد را برای طراحی قاب‌های دارای مهاربند با لینک خمشی قائم در برابر بارهای لرزه‌ای بکار گرفتند. بنی هاشمی و همکاران [11] عملکرد لرزه‌ای قاب‌های نمونه را که بر اساس روش [12] AISC طراحی شدند ارزیابی و سپس آنها را بر اساس روش پلاستیک طراحی مجدد نمودند. ایشان نشان دادند که قاب‌های طراحی شده با این روش، تمامی معیارهای عملکردی را تامین می‌نماید، این در حالی است که قاب‌های طراحی شده آیین‌نامه‌ای پاسخ سازه‌ای مناسبی را در برابر بارهای لرزه‌ای نشان ندادند. به منظور توسعه طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد مطالعات دیگری به تازگی انجام شده است تا اثر سیستم‌های سازه‌ای مختلف مانند دیوار برشی فولادی، قاب بتن مسلح با مهاربندهای کماتش تاب و سیستم‌های مهاربندی شده با آلیاژهای حافظه‌دار در حالت پای ثابت بررسی نماید [13-15]. در این مطالعات روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد متناسب با نوع سیستم سازه‌ای بکار گرفته شده اصلاح شد و تلاش بر این بود تا نتایج با روش پیشنهادی طراحی بر اساس AISC مقایسه شود. لازم به ذکر است که تمام مطالعاتی که تاکنون در رابطه با ارزیابی و توسعه روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد انجام شده است با فرض صلب بودن خاک زیر سازه انجام شده است و اثر انعطاف پذیری خاک بر پاسخ لرزه‌ای این سازه‌ها در محدوده غیرارتجاعی مورد بررسی قرار نگرفته است.

از سوی دیگر پژوهشگرانی به مطالعه عملکرد سازه‌های یک درجه آزاد [16, 17] و چند درجه آزاد [18-20] روی بستر انعطاف پذیر پرداختند و اثر اندرکنش خاک و سازه را روی پاسخ دینامیکی آنها ارزیابی نمودند. اغلب مطالعات انجام شده در این زمینه متمرکز بر بررسی رابطه توزیع مقاومت و شکل پذیری در سازه‌های برشی شد. عابدی نیک و خشنودیان اثر انعطاف پذیری را روی پاسخ غیر ارتجاعی سیستم‌های چند درجه آزادی مورد مطالعه قرار دادند [21]. گنجوی و هائو [22] توزیع شکل‌پذیری (خسارات) را در ارتفاع سازه‌های برشی چند درجه آزاد تحت آثار اندرکنش خاک و سازه بررسی نمودند. لو و همکاران [23] عملکرد لرزه‌ای قاب‌های برشی چند درجه آزاد را تحت آثار انعطاف پذیری پی واقع بر

- مدل مخروطی^۲: مدل مخروط ناقص نیمه بینهایت^۳ برای مولفه‌های حرکت انتقالی و دورانی^۴ که بر مبنای تئوری تغییر مکان یک بعدی می باشد.
 - مدل المان گسسته^۵: مدل‌های فنر- میراگر- جرم^۶ که بیانگر خاک نامحدود می باشند. ضرایب در این مدل مستقل از فرکانس می باند.
- ضرایب فنرها و میراگرهای تغییرمکانی و دورانی که بیانگر حرکت‌های جانبی و چرخشی سیستم خاک- سازه می باشند به صورت زیر تعیین می گردد:

$$k_h = \frac{8\rho V_s^2 r}{2-\nu}, \quad c_h = \rho V_s A_f \quad (1)$$

$$k_\phi = \frac{8\rho V_s^2 r^3}{3(1-\nu)}, \quad c_\phi = \rho V_p I_f \quad (2)$$

در این روابط k_h ، k_ϕ ، c_h و c_ϕ به ترتیب ضرایب سختی جانبی، سختی دورانی، میرایی جانبی و میرایی دورانی هستند. همچنین ρ ، ν ، V_p و V_s به ترتیب چگالی، ضریب پواسون، سرعت موج طولی و سرعت موج برشی خاک هستند. همچنین r شعاع پی معادل دایره‌ای است. همچنین به منظور لحاظ نمودن جنبش‌های عمودی و دورانی در حالت خاک تراکم ناپذیر، یک جرم محبوس به صورت ممان اینرسی جرمی دورانی اضافه می‌شود که برابر است با $\Delta M_\phi = 0.3\pi(\nu - 1/3)\rho r^5$. این جرم به پی متصل بوده و به صورت صلب و هم‌فاز با پی حرکت می‌کند. با توجه به اینکه کلیه ضرایب سختی خاک مستقل از فرکانس است، پس یک درجه آزادی داخلی ϕ با جرم m_ϕ تعریف می‌شود تا سختی دینامیکی خاک به فرکانس تحریک در تحلیل دینامیکی در نظر گرفته شود. پژوهش‌ها نشان می‌دهد پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها به سختی نسبی سیستم سازه و خاک زیر آن وابسته است، پس یک پارامتر بی‌بعد بنام فرکانس بی‌بعد (a_0) برای لحاظ نمودن آثار اندرکنش خاک و سازه تعریف می‌شود.

خاک‌های مختلف بررسی نمودند. ایشان ضرایبی را به منظور اعمال روش طراحی عملکردی پیشنهاد نمودند تا آثار بستر انعطاف پذیر در طراحی عملکردی لحاظ شود. غلامرضابار و همکاران تاثیر مدهای ارتعاشی بالاتر را بر پاسخ تغییرمکانی سیستم‌های چند درجه آزاد با احتساب اثر اندرکنش خاک و سازه بررسی نمودند. ایشان روابطی را برای تخمین پاسخ سیستم چند درجه آزاد اندرکنشی بر اساس سیستم یک درجه آزاد معادل ارائه نمودند [24]. هرچند که در سال‌های اخیر پژوهشگران مطالعات قابل توجه‌ای روی اثر اندرکنش خاک- سازه بر پاسخ سیستم‌های چند درجه آزاد انجام شده است، اما نوعاً این مطالعات محدود به قاب‌های برشی بوده که بر اساس فلسفه تیر قوی- ستون ضعیف و یا بنا نهاده شدند. این درحالی است که آثار اندرکنش خاک و سازه بر عملکرد لرزه- ای قاب‌های خمشی طراحی شده بر اساس فلسفه ستون قوی- تیر ضعیف و به ویژه روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد پرداخته نشده است. در این پژوهش برای اولین بار عملکرد لرزه‌ای قاب‌های طراحی شده بر اساس روش طراحی پلاستیک تحت اثر اندرکنش خاک و سازه ارزیابی و توزیع تغییرمکان نسبی آنها تحت بارهای لرزه‌ای قوی به صورت پارامتریک بررسی خواهد شد. همچنین آثار الگوی بارگذاری طراحی لرزه‌ای و پارامترهای کلیدی اندرکنشی بر نحوه توزیع خسارات مورد مطالعه قرار گرفته و عملکرد قاب‌ها با پیوندهای مختلف بررسی شده است.

۲. مدلسازی غیرخطی سیستم خاک- سازه

۱-۲ معرفی مدل خاک به عنوان زیر سازه و تعریف پارامترهای کلیدی اندرکنشی

یک مدل فیزیکی برای مدلسازی پی سطحی و محیط نیمه بینهایت همگن توسط ولف [25] ارائه شد که در شکل (۱) نشان داده شده است. این مدل بر مبنای الگوی تغییرمکان و انتشار یک بعدی امواج سطحی روی سطح آزاد توسعه یافته است. ولف مدل فیزیکی خود را به شرح زیر ارائه کرد:

- 2 Cone models
- 3 Truncated semi-infinite cones
- 4 translational and rotational components
- 5 Discrete element models
- 6 Spring-dashpot-mass models

۲-۲ معرفی مدل قاب خمشی فولادی به عنوان رو سازه

روش طراحی پلاستیک مبتنی بر دو فاکتور کلیدی تغییرمکان یا دررفت هدف و سازوکار تسلیم از پیش تعیین شده است [4]. این دو عامل مستقیماً درجه و چگونگی توزیع خسارات را در سازه کنترل می‌کنند. روش پیشنهادی مذکور دارای سه مولفه برش پایه، توزیع آن در ارتفاع سازه و نهایتاً طراحی پلاستیک اعضا است. برش پایه طراحی در روش مذکور از تساوی کار مورد نیاز برای پوش سازه تا تغییرمکان هدف به صورت یکنواخت با انرژی مورد نیاز برای رساندن سازه یک درجه آزاد معادل به همان تغییرمکان هدف بدست می‌آید [4]. همچنین توزیع نیروی جانبی در ارتفاع سازه بر اساس برش نسبی طبقه تعیین می‌شود به گونه‌ای که تا حد امکان با نتایج تحلیل‌های دینامیکی هماهنگی داشته باشد [7]. در نهایت طراحی پلاستیک بر اساس سازوکار تسلیم از پیش تعیین شده انجام می‌شود.

۲-۲-۱ برش پایه طراحی

همان‌گونه که اشاره شد، برش پایه یکی از فاکتورهای کلیدی در طراحی به روش پلاستیک است که مقدار آن بر اساس تساوی کار مورد نیاز برای پوش سازه تا تغییرمکان هدف به صورت یکنواخت با انرژی مورد نیاز برای رساندن سازه یک درجه آزاد معادل به همان تغییرمکان هدف بدست می‌آید. برای رفتار ایده‌آل الاستیک-پلاستیک کامل و با استفاده از روابط شبه سرعت و شبه شتاب، انرژی کل برابر خواهد بود با [3]:

$$E_e + E_p = \gamma E = \gamma \left(1 / 2 M S_v^2 \right) = \frac{1}{2} \gamma M \left(\frac{T}{2\pi} S_a \cdot g \right)^2 \quad (4)$$

که در آن M وزن کل سیستم، E_e و E_p مولفه‌های انرژی الاستیک و پلاستیک مورد نیاز برای رساندن (پوش) سازه به دررفت هدف است. همچنین S_v طیف شبه سرعت و γ فاکتور اصلاح انرژی^v است که وابسته به فاکتور شکل پذیری (μ_s) و فاکتور کاهش ضریب رفتار شکل پذیری

مقادیر این پارامتر برای ساختمان‌های متعارف از صفر (پای ثابت) که بیانگر حالت بدون اندرکنش است تا ۳ که معرف حالت اندرکنشی شدید، متغیر است. این پارامتر بی بعد از رابطه $a_0 = \omega_{fix} \bar{H} / v_s$ تعیین می‌شود که در آن ω_{fix} معرف فرکانس سازه در حالت پای ثابت و $\bar{H}$ موثر سازه است که برای سازه با درجات آزادی بیشتر از یک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{H} = \sum_{j=1}^n \left[m_j \varphi_{j1} \left(\sum_{i=1}^j h_i \right) \right] / \sum_{j=1}^n m_j \varphi_{j1} \quad (3)$$

در این رابطه m_j جرم در تراز طبقه j ام، h_i ارتفاع از پای سازه تا تراز طبقه j ام، φ_{j1} ضرایب شکل مود در مود اول است. پژوهش‌ها [26] نشان می‌دهد که پارامتر فرکانس بی‌بعد موثرترین پارامتر در احتساب اثر اندرکنش خاک-سازه است. دیگر پارامترهای موثر بر اندرکنش خاک و سازه شامل لاغری یا نسبت ارتفاع موثر به شعاع پی معادل دایره‌ای است که به صورت $\bar{H}/r$ محاسبه و نشان داده می‌شود [27]. پارامتر موثر دیگر اندرکنشی که بیانگر نسبت جرم خاک به سازه است پارامتر $\bar{m} = m_{tot} / \rho r^2 H$ است که در آن m_{tot} جرم کل سازه و H ارتفاع کل سازه است. در این پژوهش مقادیر پارامتر نسبت جرم پی به سازه برابر ۰/۵، فرض شد و نسبت وزن فنداسیون ۱/۱ وزن کل سازه لحاظ شده است. همچنین ضریب پواسون (ν) برابر ۰/۴ برای خاک‌های آبرفتی و میرایی مصالح خاک و (ξ_0) سازه ۵ درصد میرایی بحرانی در نظر گرفته شده است.

شکل ۱. مدل سیستم خاک و سازه قاب خمشی فولادی

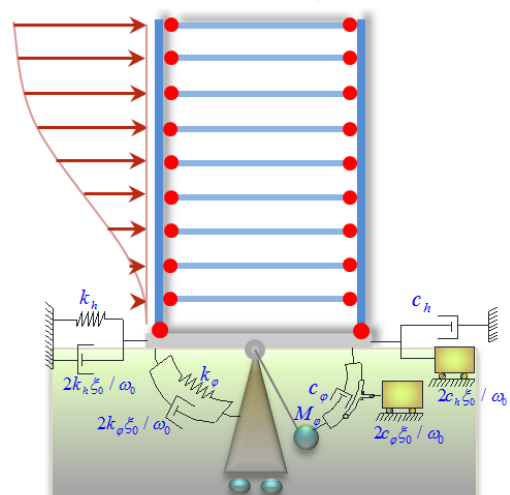


Fig. 1. A typical Soil-SMRF models

اساس مقدار نیرو در تراز طبقه i یعنی F_i به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_i = (\beta_i - \beta_{i+1}) V_n \quad (10)$$

۳-۲-۲ روش طراحی پلاستیک

هدف اولیه طراحی پلاستیک این است که اعضا طوری طراحی شوند که مقاومت کافی را همراه با اطمینان از شکل-گیری مفصل پلاستیک در دو انتهای عضو داشته باشند. برای قاب‌های خمشی به عنوان نمونه، حالت مطلوب، تشکیل مفصل پلاستیک در دو انتهای تیر و ستونهای تراز پایه است (شکل ۲) [3, 4].

شکل ۲. قاب یک دهانه با سازوکار جاری شدن و مفصل پلاستیک تیرها

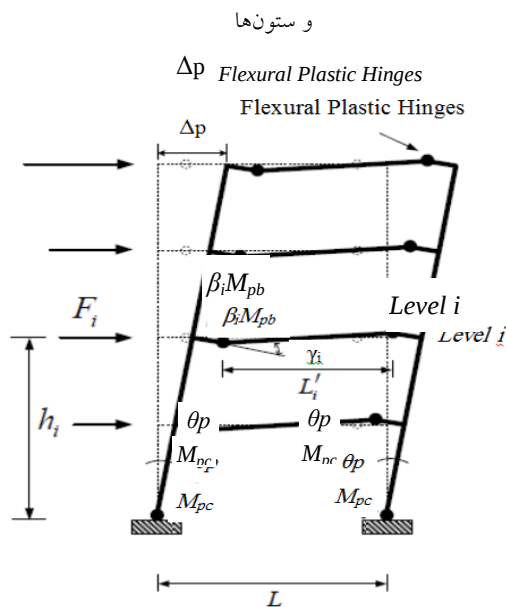


Fig. 2. One-Bay Frame with Selected Mechanism and Plastic hinges of beams and columns

چنانچه سازوکار جاری شدن مطابق شکل (۲) در نظر گرفته شود و برای قاب خمشی تیرها به عنوان اعضای جاری شونده لحاظ شوند، از تساوی کار نیروی داخلی و خارجی می‌توان نوشت:

$$\sum_{i=1}^n 2\beta_i M_{pbr} + 2M_{pc} = \sum_{i=1}^n F_i h_i \quad (11)$$

در رابطه فوق M_{pbr} لنگر مقاوم مورد نیاز در تراز بالایی و تراز i ام است و M_{pc} لنگر پلاستیک ستون است که بصورت زیر مطابق شکل (۳) قابل محاسبه است:

R_μ می‌باشد. با استفاده از روابط هندسی و با مساوی قرار دادن مقدار مساحت‌های کار و انرژی می‌توان نوشت:

$$\gamma = \frac{2\mu_s - 1}{R_\mu^2} \quad (5)$$

مطابق طیف پیشنهادی نیومارک و هال [28] و روابط کار-انرژی می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left(\frac{W}{g} \right) \times \left(\frac{T}{2\pi} \times \frac{V_y}{W} g \right)^2 + V_y \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i h_i \right) \theta_p \\ = \frac{1}{2} \gamma \left(\frac{W}{g} \right) \times \left(\frac{T}{2\pi} S_a g \right)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

با حل و ساده‌سازی معادلات قبل بر حسب برش، معادله برش پایه به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{V_y}{W} = \frac{-\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\gamma S_a^2}}{2} \quad (7)$$

که در آن α پارامتر بدون بعد بوده و به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\alpha = \left(h^* \times \frac{\theta_p 8\pi^2}{T^2 g} \right) \quad (8)$$

در رابطه بالا θ_p بیانگر دوران پلاستیک در دریافت هدف می‌باشد و h^* نیز به صورت $\sum_{i=1}^n \lambda_i h_i$ می‌باشد.

۳-۲-۲ الگوی توزیع بار جانبی

الگوی توزیع بار متناسب با پاسخ غیرخطی سازه بر اساس تحلیل‌های دینامیکی برای قاب‌های طرح شده بر اساس روش طراحی پلاستیک به صورت زیر پیشنهاد شده است [7]:

$$\beta_i = \left(\frac{V_i}{V_n} \right)^\alpha = \left[\frac{\sum_{j=i}^n w_j h_j}{w_n h_n} \right]^\alpha V_y \quad (9)$$

در رابطه فوق V_i و V_n به ترتیب برش طبقات در تراز طبقه i و تراز طبقه آخر است. β_i فاکتور تناسب برش در تراز طبقه i بوده و W وزن و h ارتفاع در بالای تراز است. همچنین V_y بیانگر برش پایه طراحی و α توان تابع فاکتور برش بوده که مقدار آن ۱/۰، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ برای الگوهای مختلف بارگذاری به ترتیب از LP1 تا LP4 است. بر این

اسمی^۹ تیر (M_{PB}) در یک ضریب اضافه مقاومت متناسب^{۱۰} (۵) که حاوی اثرات سخت شدگی و اضافه مقاومت است بدست می‌آورد. برای سیستم قاب خمشی با نوشتن تعادل مجموع نیروهای جانبی مقدار F_L وارد بر ستون‌های داخلی را می‌توان از دیاگرام آزاد ستون‌ها بدست آورد:

$$F_L = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{Pr})_i + \sum (V_{sw}) \cdot \left(w_s + \frac{d_c}{2} \right) + M_{PC}}{\sum \alpha_i h_i} \quad (13)$$

که در آن α_i برابر است با :

$$\alpha_i = \frac{(\beta_i - \beta_{i+1})}{\sum_{i=1}^n \beta_i - \beta_{i+1}}, \quad i = n, \quad \beta_{1+n} = 0 \quad (14)$$

بر این اساس مقادیر لنگر ستون‌ها با نوشتن معادله تعادل استاتیکی برای هر یک از ستون‌های میانی و کناری برای طراحی محاسبه می‌شود. نکته قابل ذکر آنست که روش مدلسازی عددی به عنوان یک استراتژی کارآمد مبتنی بر روش پلاستیسیته متمرکز برای مدلسازی رفتار غیرخطی و محاسبه پاسخ غیرخطی سازه مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین میرایی رایلی برای لحاظ کردن آثار میرایی اعمال شد. در تعریف مدل هیستریسیس رابطه لنگر-انحنا و نیز اثر متقابل نیرو- لنگر نیز در نظر گرفته شد. مقدار درصد سخت شوندگی ۲ درصد و دیافراگم صلب فرض شد. مقاطع تیرها و ستون‌ها با استفاده از ضوابط [11] AISC-LRFD طراحی شد که نمونه‌ای از قاب‌های طراحی شده بر اساس روش طراحی پلاستیک در شکل (۴) نشان داده شده است.

۳. تحلیل دینامیکی غیرخطی و رکوردهای انتخاب شده

به منظور دستیابی به اهداف پژوهش، مدل قاب‌های خمشی ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ طبقه با روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد طراحی شده که نمونه‌ای از آنها در شکل (۵) نشان داده شده است. تمامی مدل‌ها تحت رکوردهای زلزله و به روش گام به گام به صورت تاریخچه زمانی به کمک نرم‌افزار

$$M_{PC} = \frac{1.1V h_1}{4} \quad (12)$$

در رابطه فوق V برش کل h_1 ارتفاع طبقه اول و فاکتور ۱/۱ ضریب اضافه بار نیروی طراحی است.

شکل ۳. قاب یک دهانه با سازوکار گسیختگی

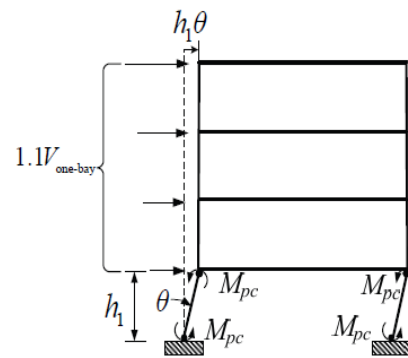


Fig. 3. One-Bay Frame with Frame with Soft-Story Mechanism

طراحی اعضایی که باید الاستیک باقی بمانند، مانند ستون-ها در سیستم قاب خمشی یا ستون‌ها و مهارها در سیستم مهاربندی بر اساس روش ظرفیت طراحی می‌شوند. این اعضا باید طوری طراحی شوند که علاوه بر تحمل لنگر ناشی از بار مرده ضریب دار، بتوانند در ترکیب با حداکثر مقاومت اعضای جاری شوند با احتساب اضافه مقاومت و اثر سخت شوندگی را نیز تحمل نمایند. بدین منظور یک روش طراحی آن است که تعادل اعضا یا بخش مورد نظر برای طراحی را در حالت حدی نهایی نوشت. در قاب‌های ساختمانی این بخش جدا شده یا برش خورده جسم آزاد را می‌توان بصورت "درخت ستون"، تحت بارگذاری حداکثر در حالت حدی نهایی رسم و محاسبه کرد. به منظور شکل‌گیری سازوکار ستون قوی-تیر ضعیف، باید ستون‌ها را تحت بارهای ثقلی شامل تیرها و ستون‌ها و با لحاظ کردن مقداری منطقی از کرنش-سخت شوندگی و اضافه مقاومت مصالح در تیرهایی که مفصل می-شوند بارگذاری و طرح نمود. این ستون‌ها در تراز پایه باید به حداکثر ظرفیت^۸ خود (M_{PC}) برسند. مقدار لنگر تیرهای مفصل شده را می‌توان از ضرب کردن مقدار لنگر پلاستیک

9 nominal plastic moment

10 appropriate over strength factor

8 maximum capacity

تمامی رکوردها دارای بزرگا در محدوده ۶/۵ تا ۷/۶ و با فاصله بیشتر از ۱۰ کیلومتر از محل گسل و بدون ویژگی زلزله‌های نزدیک گسل مانند پالس و جهت‌پذیری است.

۴. اثر الگوی بارگذاری جانبی بر توزیع تغییرمکان نسبی طبقات در راستای ارتفاع سازه با پای ثابت

در این بخش اثر الگوهای بارگذاری جانبی مختلف (LP1, LP2, LP3, LP4) بر توزیع تغییرمکان نسبی طبقات در راستای ارتفاع قاب‌های خمشی فولادی طراحی شده بر اساس روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد مورد بحث قرار می‌گیرد. مطابق شکل، ابتدا قاب‌های ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ طبقه بر اساس روش طراحی پلاستیک عملکردی برای الگوهای مختلف بارگذاری، طراحی شده و سپس تحت رکوردهای حرکت قوی قرار گرفتند. مطالعه پارامتریک بر اساس تحلیل‌های گسترده بر روی مدل‌های پیشنهادی، حاکی از آن است که در قاب ۴ طبقه با پریود کوتاه‌تر بیشترین نیاز تغییرمکان نسبی در طبقه اول و کمترین نیاز تغییرمکان نسبی در طبقه آخر برای تمام الگوهای بارگذاری روی می‌دهد (شکل ۵). همچنین نتایج نشان می‌دهد که با کاهش توان α تغییرمکان نسبی نیاز در تمام طبقات بطور یکنواخت کاهش می‌یابد. با افزایش پریود سازه روند توزیع تغییرمکان نسبی طبقات معکوس شده به گونه‌ای که تغییرمکان نسبی نیاز طبقات بالا افزایش می‌یابد. این پدیده در الگوی بارگذاری اول بیش از سایر الگوهای بارگذاری لرزه‌ای دیده می‌شود. چنانچه ملاحظه می‌شود، در روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد، سازه‌های با پریود متوسط ($0.8 \leq T_{fix} \leq 1.5$) مانند قاب ۸ طبقه دارای توزیع نسبتاً یکنواخت در راستای ارتفاع قاب برای شکل‌پذیری‌های مختلف است. نکته حائز اهمیت آن است که در قاب‌های با پریود متوسط و بلند، با کاهش توان α تغییرمکان نسبی نیاز طبقات پایین افزایش یافته اما بالعکس نیاز تغییرمکان نسبی طبقات بالاتر کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به کاهش قابل ملاحظه برش طراحی در طبقات پایین تر در سازه‌ها با پریود متوسط و بلند نسبت داد.

[29] OpenSees تحلیل دینامیکی شده‌اند و پاسخ سازه برای بررسی توسط برنامه نوشته شده با متلب [30] پردازش شده و میانگین نتایج در قالب نمودارهای مفهومی ارائه شدند. همچنین به منظور تعیین برخی مشخصه‌های دینامیکی سیستم مانند سختی و مقاومت برشی طبقات، آنالیز پوش‌اور [31] برای هر قاب بصورت جداگانه به کمک نرم افزار مذکور انجام گرفته است. از آنجایی که این پژوهش بر اساس شکل‌پذیری ثابت است پس لازم است کلیه پارامترها مانند تغییرمکان‌ها، تغییرمکان‌های نسبی طبقات برای قاب‌هایی با شکل‌پذیری مختلف مشخص ارزیابی شود ($\mu = 2, 4, 6$). از این رو از شیوه مقیاس نمودن رکورد زلزله بهره گرفته شده است تا شکل‌پذیری سیستم به شکل‌پذیری هدف برسد [32]. برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی از یک دسته رکورد ۲۰ تایی با خصوصیات مختلف [33] که روی خاک آبرفتی D بر اساس آیین‌نامه NEHRP [34] ثبت شده است، بهره گرفته شده است.

شکل ۴. قاب ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ طبقه فولادی با عرض دهانه ۷ متر و ارتفاع ۴ متر، طراحی شده به روش پلاستیک با پارامترهای طراحی $\beta_i=0.75$ ، $\mu=2$ و $\theta_y = 0.01$

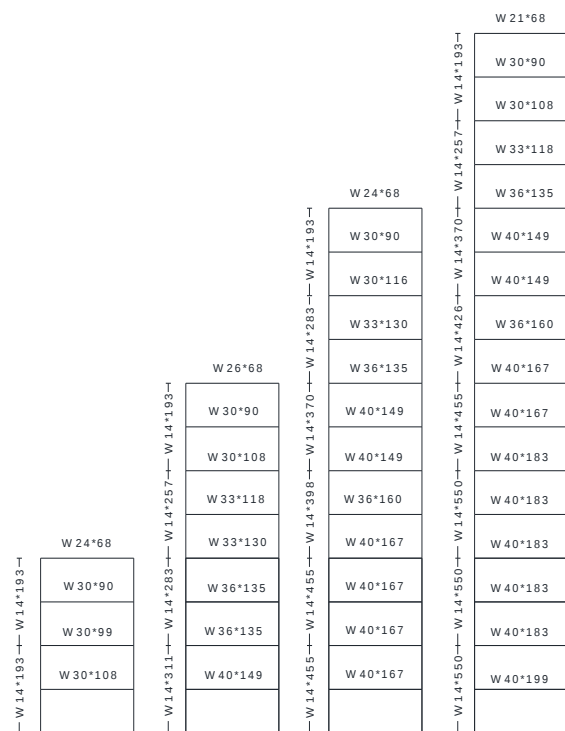


Fig. 4. Sample of 4-, 8-, 12- and 16-Story frames with bay width of 9.0m and story height of 4.0m, designed based on PBPD approach calibrated for $\beta_i=0.75$ and $\mu=2$, $\theta_y = 0.01$

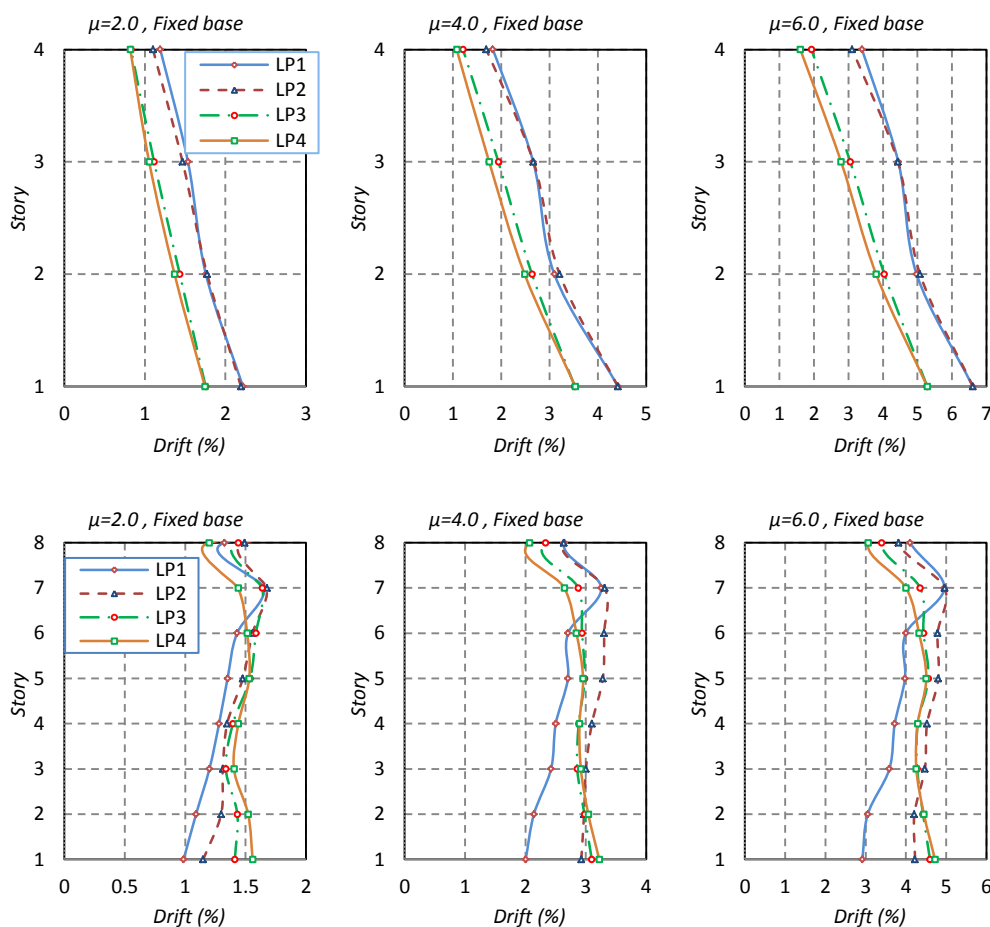
۵. اثر اندرکنش خاک و سازه بر توزیع

تغییرمکان نسبی طبقات

اول کاهش می‌یابد. این پدیده در حالات اندرکنشی متوسط و شدید ($a_0 = 2, 3$) بسیار مشهود است و ممکن است سازوکار تسلیم از پیش تعیین شده را دست خوش تغییرات نماید. این پدیده را می‌توان ناشی از افزایش پریود سازه‌های اندرکنشی و وارد شدن اثر موده‌های بالاتر نسبت به حالت پای ثابت دانست. اما اثر اندرکنش خاک و سازه در قاب‌های با پریود بلندتر کاملاً متفاوت خواهد بود به گونه‌ای که در قاب‌های ۸ و ۱۲ طبقه و در محدوده پریودهای متوسط اثر اندرکنش سبب افزایش نیاز تغییرمکان نسبی طبقات پایین (بجز طبقه اول) و کاهش قابل ملاحظه تغییرمکان نسبی طبقات بالاتر در شکل پذیری‌های مختلف می‌شود.

در این بخش اثر اندرکنش خاک-سازه بر توزیع تغییرمکان نسبی طبقات در ارتفاع برای قاب‌های طراحی شده مذکور مورد مطالعه قرار می‌گیرد. میانگین نتایج حاصل از ۲۰ زلزله در شکل (۶) نشان داده شده است. نتایج بیانگر این است که اثر اندرکنش به میزان قابل ملاحظه‌ای پاسخ سازه را تحت تاثیر قرار داده و قادر است توزیع خسارات در ارتفاع را در حالات مختلف اندرکنشی ضعیف تا شدید ($a_0 = 1, 2, 3$) تغییر دهد. با توجه به نتایج بدست آمده در قاب ۴ طبقه با پریود کوتاه‌تر با افزایش آثار اندرکنش نیاز تغییر مکان نسبی طبقات بالاتر افزایش یافته و در عوض تغییرمکان نسبی طبقه

شکل ۵. اثر الگوی بارگذاری بر توزیع تغییرمکان نسبی طبقات در راستای ارتفاع قاب‌ها با پای ثابت



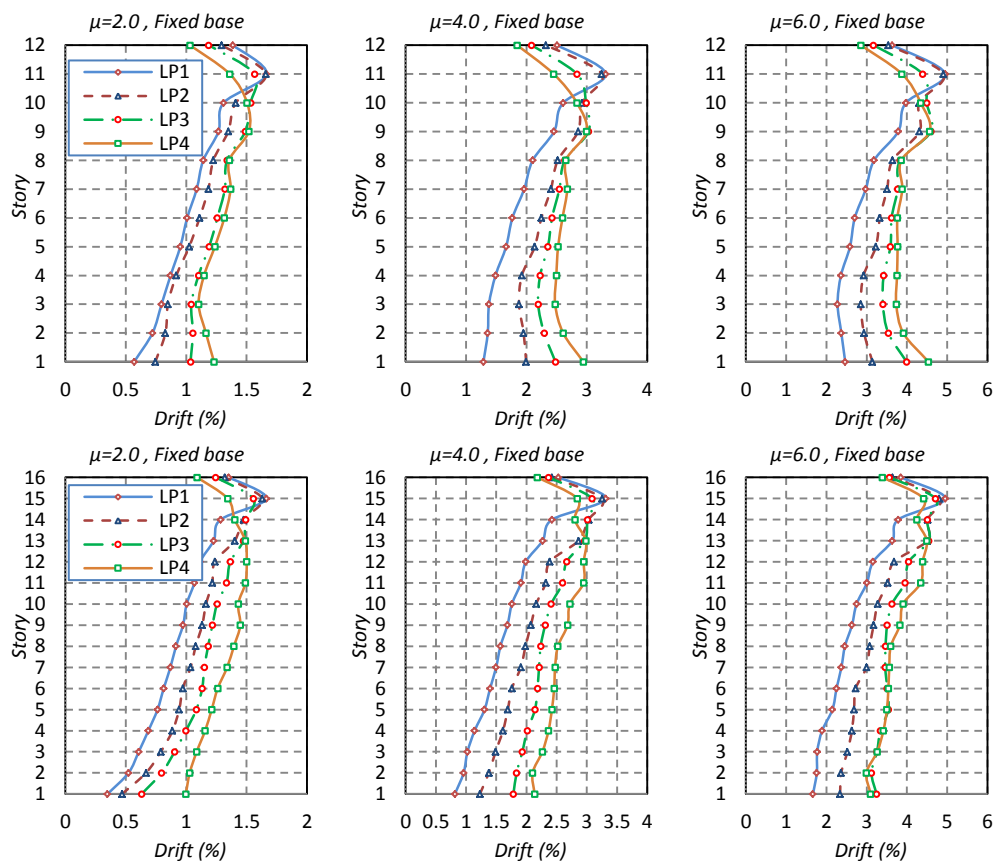
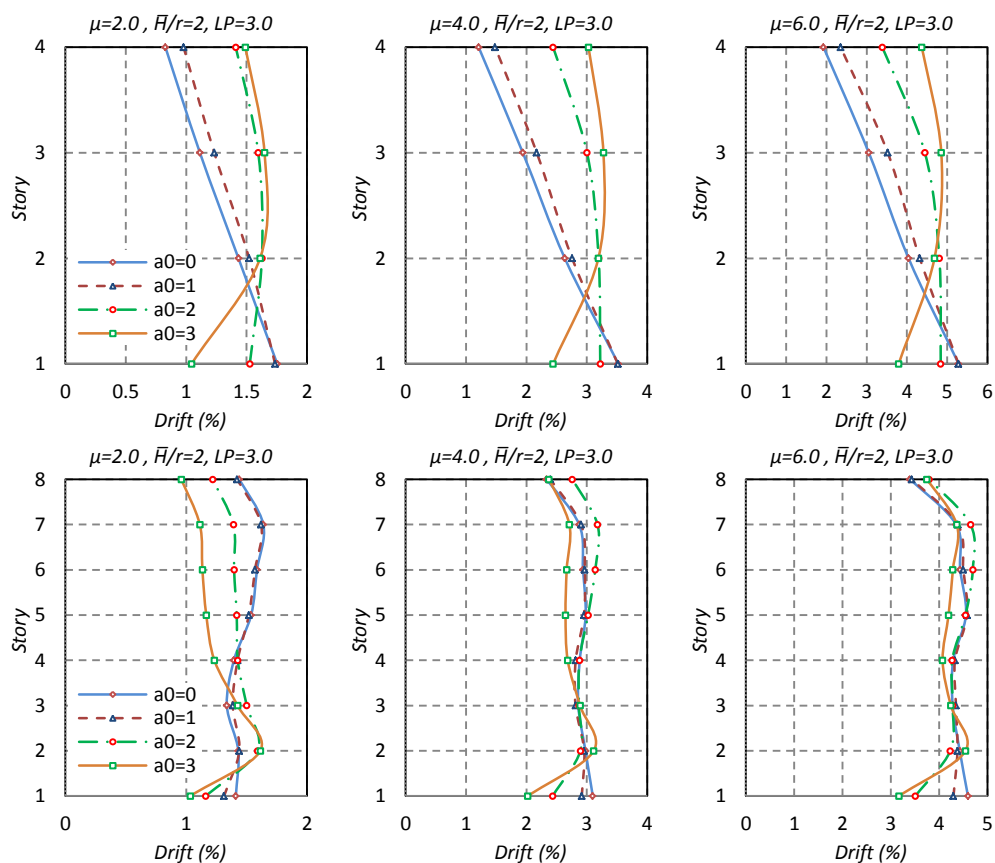


Fig. 5. Effect of various load patterns on height-wise drift demand distribution of fixed-base frames

شکل ۶. اثر اندرکنش بر توزیع تغییرمکان نسبی طبقات در راستای ارتفاع قاب‌ها در حالات پای ثابت و اندرکنشی



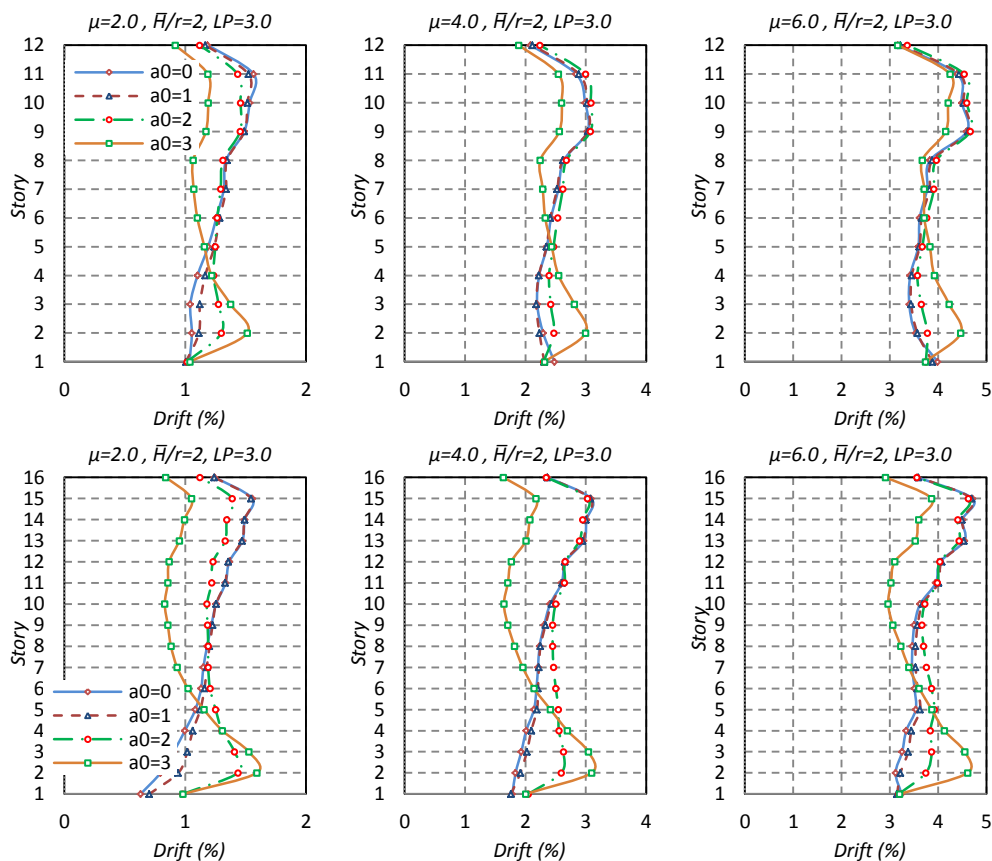


Fig. 6. Effect of Soil Structure Interaction (SSI) on height-wise drift demand distribution of selected frames

شکل ۷. اثر الگوی بارگذاری بر توزیع تغییرمکان نسبی طبقات در راستای ارتفاع قاب‌ها در حالات اندرکنشی

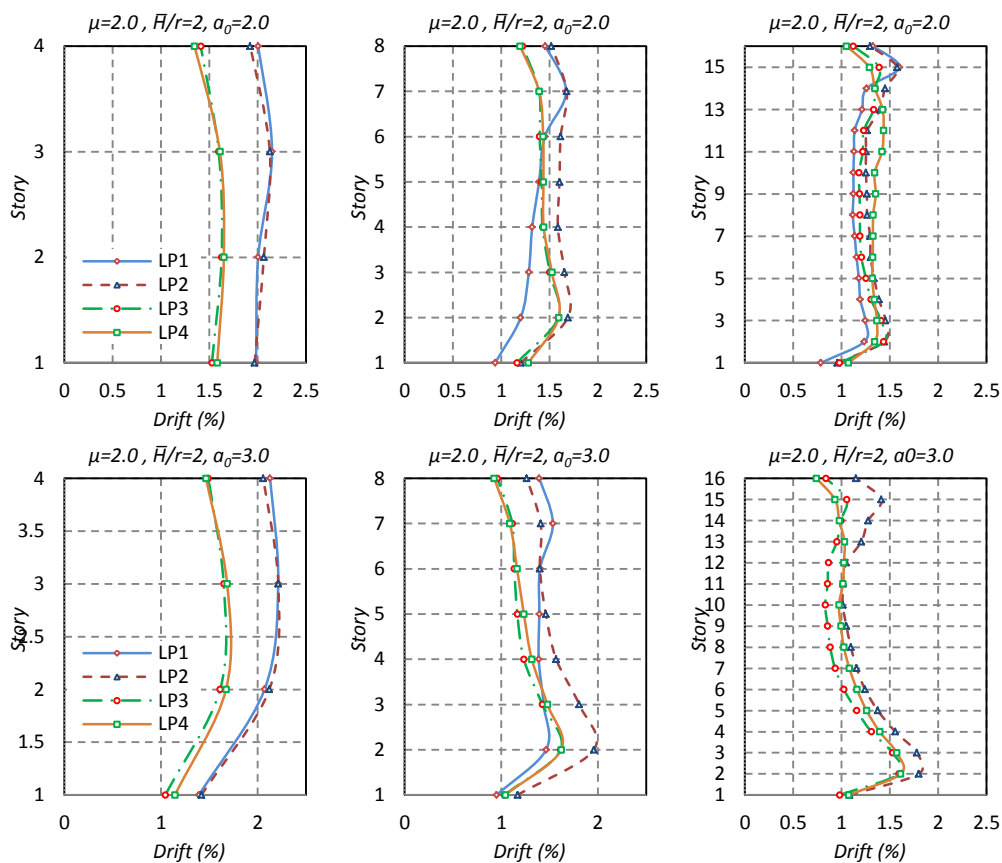


Fig. 7. Effect of various load patterns on height-wise drift demand distribution of frames including SSI effects

راستای ارتفاع می‌شود. این روند در قاب‌های تحت اثر اندرکنش شدید نیز کاملاً مشهود می‌باشد.

۷. اثر الگوی بارگذاری بر یکنواختی توزیع تغییرمکان نسبی در حالت پای ثابت و انعطاف پذیر

به منظور درک بهتر کارآمدی الگوی بارگذاری بر پراکندگی خسارات توزیع شده در ارتفاع سازه، تاثیر پارامتر کلیدی بارگذاری α برای قاب‌های با پریود کوتاه‌تر تا پریود بلند در حالت پای ثابت و انعطاف پذیر مورد مطالعه قرار گرفته است.

۶. اثر الگوی بارگذاری جانبی بر توزیع تغییر مکان نسبی طبقات در ارتفاع سازه در حالت اندرکنشی

در این بخش اثر الگوهای مختلف بارگذاری بر توزیع تغییرمکان نسبی طبقات در حالات مختلف اندرکنشی متوسط و شدید برای قاب‌های ساختمانی مختلف ۴، ۸ و ۱۶ طبقه ارائه و میانگین نتایج در شکل (۷) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، توزیع تغییرمکان نسبی طبقات به الگوی بارگذاری وابسته است. در قاب‌های با پریود کوتاه‌تر با افزایش α تغییرمکان نسبی طبقات افزایش می‌یابد اما برای قاب‌های با پریود بلند (۱۶ طبقه) افزایش α سبب کاهش تغییرمکان نسبی طبقات در حالت اندرکنشی متوسط در

شکل ۸. اثر الگوی بارگذاری بر پراکندگی توزیع تغییرمکان نسبی طبقات حالات پای ثابت و اندرکنشی متوسط

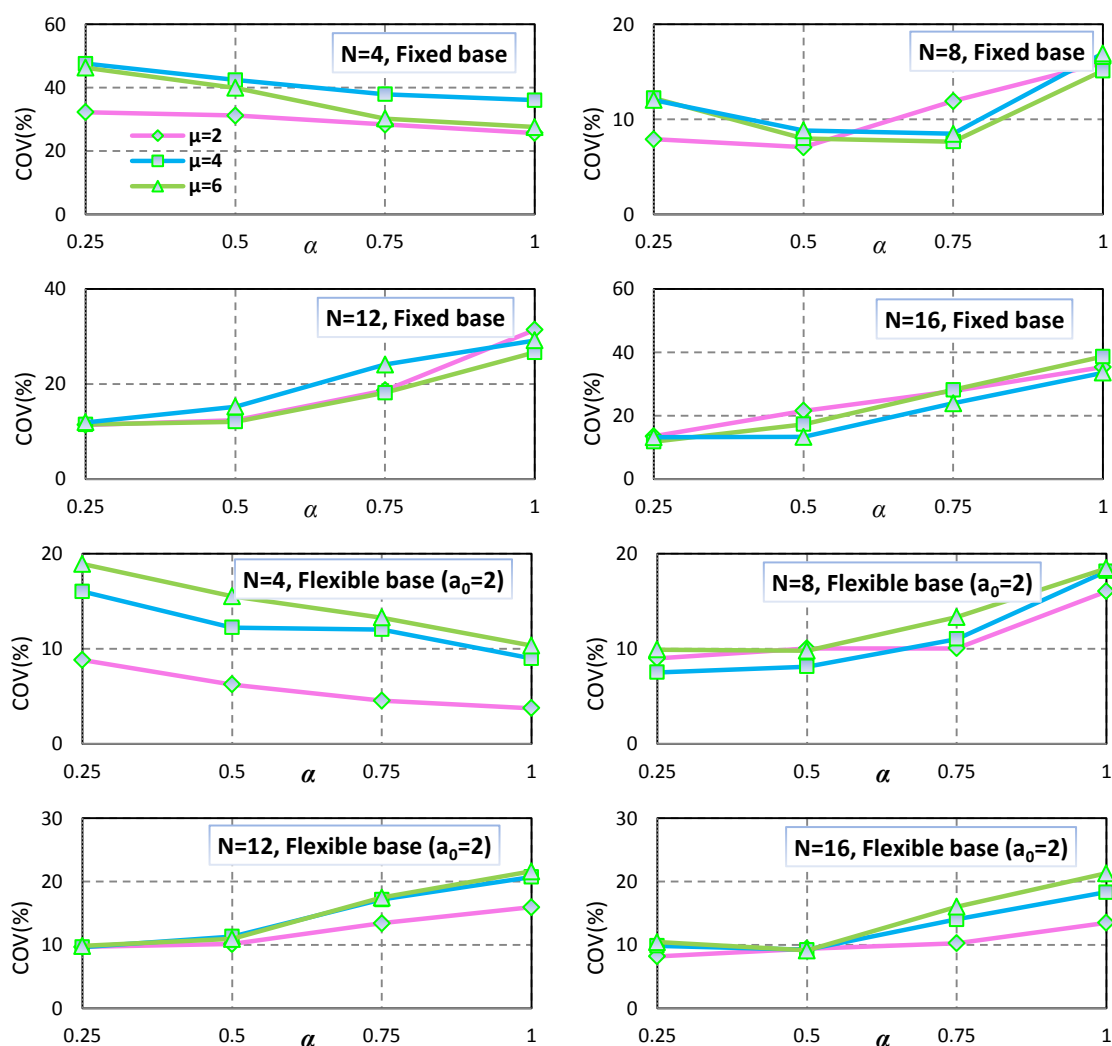


Fig. 8. Effect of load patterns on COV of drift demand distribution of fixed- and flexible base frames

شکل ۹. اثر شدت اندرکنش بر پراکندگی توزیع تغییرمکان نسبی

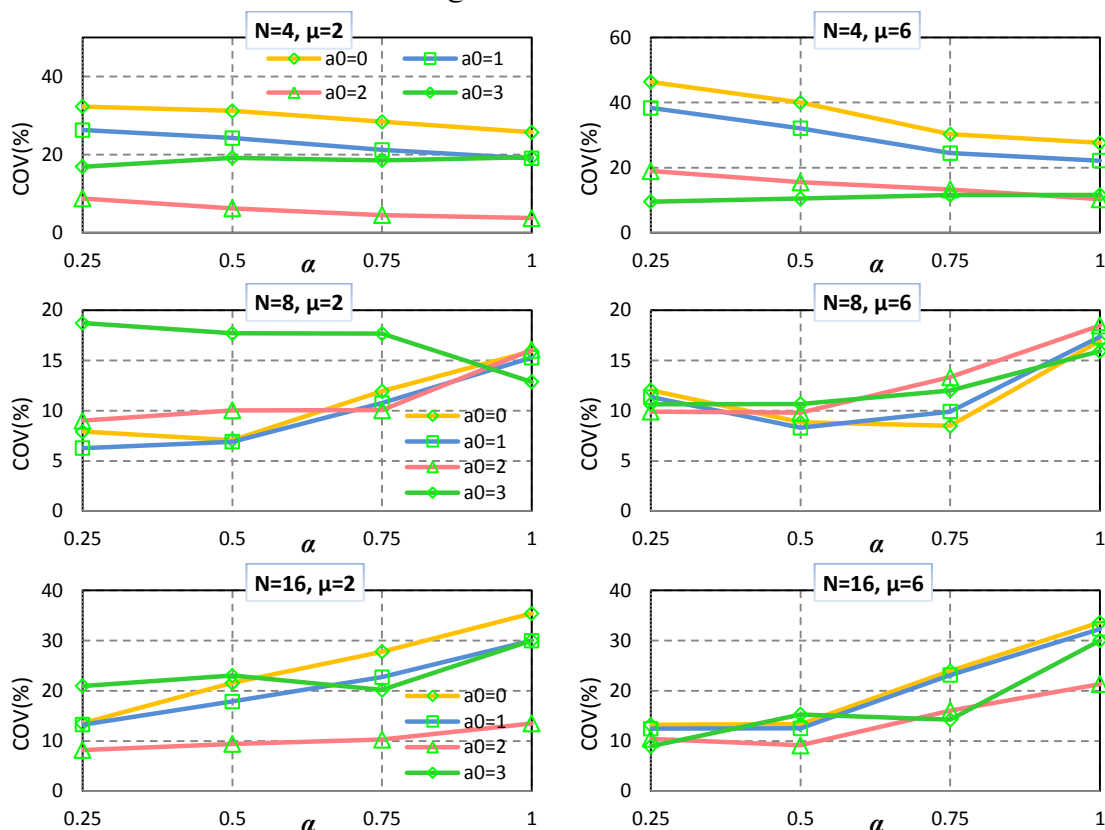


Fig. 9. Effect SSI intensity on COV of drift demand distribution of Soil-Structure frames

شکل ۱۰. اثر پریود اصلی سازه بر پراکندگی توزیع تغییرمکان نسبی در حالت اندرکنشی

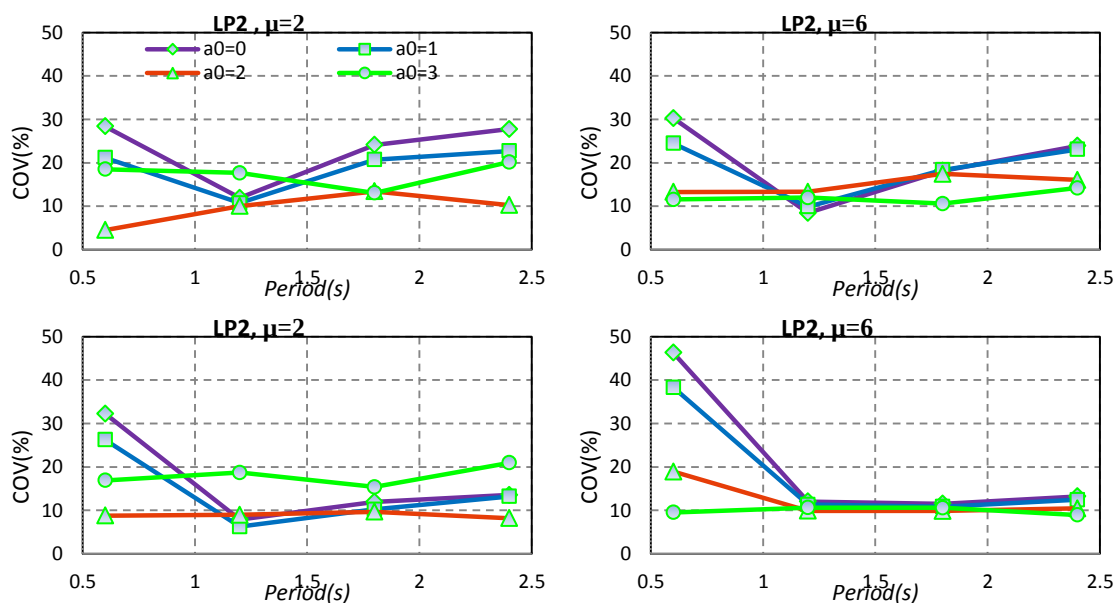


Fig. 10. Effect of fundamental period on COV of drift demand distribution in soil-structure frames

کلیدی اندرکنش از صفر (حالت پای ثابت) به ۲ (حالت اندرکنشی زیاد) توزیع تغییرمکان نسبی طبقات غیریکنواخت تر می‌شود. علت این امر را می‌توان ناشی اثر انعطاف پذیری خاک زیر فنداسیون که منجر به افزایش پیوند اصلی و تاثیر بیشتر مودهای بالاتر دانست.

۹. اثر پیوند سازه بر پراکندگی توزیع تغییرمکان نسبی در حالت پای ثابت و اندرکنشی

به منظور درک بهتر تاثیر پیوند بر توزیع تغییر مکان نسبی طبقات در روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد با احتساب آثار اندرکنش، طیف پراکندگی خسارات سازه برای حالت پای ثابت و حالات اندرکنشی ضعیف تا شدید برای دو شکل پذیری کم و زیاد ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد شکل (۱۰) در حالات پای ثابت و اندرکنشی ضعیف، قاب-های با پیوند کوتاه و بلند که به روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد طراحی شده‌اند، نسبت به سازه‌های با پیوند متوسط دارای پراکندگی بیشتری در توزیع خسارات هستند. در واقع روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد در حالت بدون اندرکنش و یا اندرکنشی کم کفایت بیشتری در توزیع یکنواخت خسارات در ارتفاع سازه‌های با پیوند میانی ($1.0 \leq T_{fix} \leq 1.8$) دارد. هرچند که در حالات اندرکنشی متوسط و شدید، برای همه انواع بارگذاری‌ها، یکنواختی توزیع خسارات در ارتفاع سازه، برای همه رنج پیوندی اعم از کوتاه، متوسط و بلند تقریباً یکسان خواهد بود.

۱۰. نتایج

در این پژوهش عملکرد لرزه‌ای قاب‌های طراحی شده بر اساس روش پلاستیک مبتنی بر عملکرد، تحت اثر اندرکنش خاک و سازه ارزیابی و توزیع تغییرمکان نسبی آنها تحت ۲۰ رکورد حرکت قوی زمین به صورت پارامتریک مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین آثار الگوی بارگذاری طراحی لرزه-ای و پارامترهای کلیدی اندرکنشی بر چگونگی توزیع خسارات مورد مطالعه قرار گرفته است و سپس عملکرد لرزه-

بر این اساس، توسط پارامتر ضریب تغییرات ($COV^{(1)}$)، میزان پراکندگی نتایج در زلزله‌های مختلف بررسی شده است. مقادیر COV توزیع تغییرمکان نسبی طبقات در قاب-های مختلف برای شکل پذیری‌های کم تا زیاد در برابر α بصورت طیف میانگین در شکل (۸) ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که در قاب‌ها با پیوند کوتاه‌تر، با افزایش α پراکندگی توزیع خسارات در کلیه شکل پذیری‌ها کاهش می‌یابد. علت این امر توزیع یکنواخت تر برش طراحی طبقات در قاب‌ها با پیوند کوتاه‌تر و با توان تابع برش بزرگتر (α) است. اما با افزایش پیوند قاب، این روند معکوس شده بطوری که هر چه مقدار α افزایش می‌یابد، پراکندگی توزیع خسارات بیشتر می‌شود. بدین معنی که با افزایش α یکنواختی توزیع خسارات برای شکل‌پذیری‌های مختلف کاهش می‌یابد. روند مذکور با افزایش پیوند (۱۲ و ۱۶ طبقه) کاملاً مشهود است. نتایج تحلی‌های گسترده پارامتریک برای حالت اندرکنشی و برای شکل پذیری‌های مختلف نیز استخراج و نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود نتایج تشریح شده در این بخش برای حالت اندرکنشی نیز کاملاً صدق می‌کند. بر این اساس در حالات اندرکنشی نیز افزایش برش نسبی طراحی در قاب با پیوند کوتاه تر سبب افزایش یکنواختی توزیع خسارات در ارتفاع سازه می‌شود. اما با افزایش تعداد طبقات این روند برعکس شده و افزایش برش نسبی طراحی سبب غیر یکنواخت شدن توزیع تغییرمکان نسبی طبقات (خسارت) می‌شود.

۸. آثار پارامتر فرکانس بی بعد بر پراکندگی توزیع تغییرمکان در سیستم اندرکنشی خاک-سازه

در این بخش اثر شدت اندرکنش ($a_0 = ۱,۲,۳$) بر پراکندگی توزیع خسارات (تغییرمکان نسبی طبقات) در ارتفاع قاب‌های طراحی شده مبتنی بر عملکرد مورد بررسی قرار گرفته و میانگین نتایج در شکل (۹) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در اغلب موارد با افزایش پارامتر

راستای ارتفاع افزایش می‌یابد. بنابراین وارد کردن اثر اندرکنش در روش طراحی پلاستیک ضروری به نظر می‌رسد. ۵. نتایج بیانگر آن است که روش طراحی پلاستیک عملکردی در محدوده پریودهای بین ۱ ثانیه تا کمتر از ۲ ثانیه بیشترین کارآمدی را در توزیع یکنواخت تر خسارات برای الگوها مختلف بارگذاری دارد. این روند برای شکل پذیرهای کم، متوسط و زیاد مشاهده شده است. هر چند که در حالات اندرکنشی متوسط و شدید برای همه انواع بارگذاری‌ها، توزیع خسارات نسبتاً یکنواختی را در ارتفاع سازه برای همه ی رنج پریودی اعم از کوتاه، متوسط و بلند نشان می‌دهد. ۶. نتایج کلی این مطالعه بیانگر این است که با توجه به تفاوت‌های رفتاری سیستم‌های پای ثابت و اندرکنشی، ضرورت توسعه روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد با لحاظ نمودن پارامترهای موثر اندرکنشی مانند نسبت سختی سازه به خاک و نسبت لاغری سازه در روند طراحی احساس می‌شود.

References

۱.۱ مراجع

- [1] Gilmore T.A., Bertero VV. 1993 Seismic performance of a 30-story building located on soft soil and designed according to UBC 1991 Berkeley, Earthquake Eng. Res. Cent., Uni. of Calif., UCB/EERC-93/04.
- [2] Anderson J.C., Miranda E., Bertero VV. 1991 Evaluation of the seismic performance of a thirty-story RC building Berkeley: Earthquake Eng. Res. Cent., Uni. of Calif., UCB/EERC-91/16.
- [3] Leelataviwat S., Goel S.C., Stojadinovic B., 1999 Toward performance-based seismic design of structures, Earthquake Spectra, 15(3): 435–61.
- [4] Lee S.S., Goel S.C. 2001 Performance-based design of steel moment frames using target drift and yield mechanism. Depart. of Civil and Environ. Eng., Univ. of Michigan.
- [5] Chao, S.-H., and Goel, S. C., 2006a Performance-Based Plastic Design of Seismic Resistant Special Truss Moment Frames, Department of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Report No. UMCEE06-03.
- [6] Chao, S.-H., and Goel, S. C., 2005 Performance-Based Seismic Design of EBF Using Target Drift and Yield Mechanism as Performance Criteria, Report No. UMCEE 05-05, Depart. of Civ. and Environ. Eng., Univ. of Michigan, Ann Arbor.
- [7] Chao, Shih-Ho, Subhash C. Goel, and Soon-Sik Lee. 2007 A seismic design lateral force distribution

ای قاب‌های با پریودهای مختلف بررسی شده است. نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر قابل بیان است:

۱. مطالعه پارامتریک بر اساس تحلیل‌های گسترده روی مدل‌های پیشنهادی نشان می‌دهد که در قاب با پریود کوتاه‌تر (۴ طبقه) بیشترین نیاز تغییرمکان نسبی در طبقه اول و کمترین نیاز تغییرمکان نسبی در طبقه آخر برای تمام الگوهای بارگذاری است. با افزایش پریود سازه روند توزیع تغییرمکان معکوس شده، به نحوی که نیاز تغییرمکان نسبی طبقات بالا افزایش می‌یابد.

۲. اثر اندرکنش به میزان قابل ملاحظه‌ای پاسخ سازه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در قاب‌های با پریود کوتاه‌تر، با افزایش آثار اندرکنش نیاز تغییرمکان نسبی طبقات بالاتر افزایش یافته و نیاز تغییرمکان نسبی طبقه اول کاهش می‌یابد. این پدیده را می‌توان ناشی از اثر مودهای بالاتر ناشی از افزایش پریود سیستم خاک-سازه به علت انعطاف پذیری خاک دانست. اما اثر اندرکنش خاک و سازه در قاب‌های با پریود بلندتر سبب افزایش نیاز شکل پذیری طبقات پایین (بجز طبقه اول) و کاهش قابل ملاحظه تغییرمکان نسبی طبقات بالاتر در شکل پذیری‌های مختلف می‌شود.

۳. در قاب‌های با پریود کوتاه‌تر با افزایش α پراکندگی توزیع خسارات برای کلیه شکل پذیرها کاهش می‌یابد. اما با افزایش پریود، روند معکوس خواهد شد بطوری که هر چه مقدار α افزایش می‌یابد پراکندگی توزیع خسارات بیشتر می‌شود. در حالات اندرکنشی نیز افزایش برش نسبی طراحی در قاب‌های با پریود کوتاه تر سبب توزیع یکنواخت تر توزیع خسارات در ارتفاع سازه می‌شود. اما با افزایش تعداد طبقات این روند عکس شده و افزایش برش نسبی طراحی سبب غیر یکنواخت‌تر شدن توزیع تغییرمکان نسبی طبقات (خسارت) می‌شود.

۴. در اغلب موارد، با افزایش پارامتر کلیدی اندرکنشی فرکانس بی بعد α_0 از صفر (حالت پای ثابت) به ۲ (حالت اندرکنشی نسبتاً شدید) یکنواختی تغییرمکان نسبی طبقات افزایش می‌یابد. اما افزایش بیشتر این پارامتر تا ۳ (حالت اندرکنشی شدید) پراکندگی توزیع تغییرمکان نسبی طبقات در

- [21] Abedi-Nik, F., Khoshnoudian, F. 2015 Deflection modification factors of multistory buildings considering soil-structure interaction. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **14**(3), 561-570.
- [22] Ganjavi, Behnoud, Hong Hao. Optimum lateral load pattern for seismic design of elastic shear-buildings incorporating soil-structure interaction effects. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **42**, (6), 913-933.
- [23] Lu, Y., Hajirasouliha, I., Marshall, A. M. 2016 Performance-based seismic design of flexible-base multi-story buildings considering soil-structure interaction, *Eng. Structures*, 108, 90-103.
- [24] Gholamrezatabar, A., Ghodrati Amiri, G., Shayanfar, M. A., Ganjavi, B. 2017 Estimation of inelastic displacement factor of soil-shallow-foundation MDOF systems incorporating higher modes effect. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*.
- [25] Wolf J.P., 1994 Foundation vibration analysis using simple physical models. Engle- wood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- [26] Stewart JP, Seed RB, Fenves GL. 1999 Seismic soil-structure interaction in buildings II: empirical findings, *J. Geo. Tech. Geo. Environ. Eng. ASCE*, **125**(1), 38-48.
- [27] Wolf J.P., Deeks A.J. 2004 Foundation vibration analysis: a strength-of-materials approach. Burlington, MA: Elsevier.
- [28] Newmark, N. M., and Hall, W. J., 1982 *Earthquake Spectra and Design*, *Earthq. Eng. Res. Inst.*, El Cerrito, Calif.
- [29] OPENSEES, 2016 OpenSees command language manual. Open system for earthquake engineering simulation. <http://opensees.berekeley.edu>
- [30] MATLAB. 2014 The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- [31] FEMA 440, 2005 Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, Technical Report-440, Federal Emergency Management Agency.
- [32] Ruiz-García, Jorge, and Erick J. González., 2014 Implementation of Displacement Coefficient method for seismic assessment of buildings built on soft soil sites, *Eng. Structures.*, 59, 1-12.
- [33] Gholamrezatabar, A., 2017 Ph.D. thesis, Iran University of Science and Technology (IUST). (In Persian)
- [34] FEMA-450. 2003 NEHRP recommended provisions for new buildings and other structures, Federal Emergency Management Agency.
- based on inelastic state of structures, *Earthq. Spectra*, **23**(3), 547-569.
- [8] Goel, S.C., Liao W.-C., Bayat, M. R., Chao, S.-H. 2010 Performance-based plastic design (PBD) method for earthquake-resistant structures: an overview. *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, **19**(1-2) 115-137.
- [9] Park, K., Medina R.A. Conceptual seismic design of regular frames based on the concept of uniform damage. *J. of Struct. Eng.*, **133**(7), 945-955, 2007.
- [10] Shayanfar, M.A., Rezaeian, A.R., Zanganeh, A. 2014 Seismic performance of eccentrically braced frame with vertical link using PBD method, *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, **23**(1), 1-21.
- [11] Banihashemi, M. R., Mirzagoltabar, A. R., Tavakoli, H.R. Performance-based plastic design method for steel concentric braced frames. *Inter. J. of Adv. Struc. Eng. (IJASE)*, **7**(3), 281-293, 2015.
- [12] AISC-341-10, 2010 Seismic Design Provisions for Steel Structures, American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, IL.
- [13] Kharmale, S. B., & Ghosh, S. 2013 Performance-based plastic design of steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 90, 85-97.
- [14] Bai, J., Ou, J. 2016 Earthquake-resistant design of buckling-restrained braced RC moment frames using performance-based plastic design method. *Engineering Structures*, 107, 66-79.
- [15] Qiu, C., Li, H., Ji, K., Hou, H., Tian, L. 2017 Performance-based plastic design approach for multi-story self-centering concentrically braced frames using SMA braces. *Engineering Structures*, 153, 628-638.
- [16] Ciampoli M, Pinto PE. 1995 Effects of soil-structure interaction on inelastic seismic response of bridge piers. *J. Struct. Eng.* **5**(806), 806-14.
- [17] Elnashai A.S., McClure D.C. 1996 Effect of modelling assumptions and input motion characteristics on seismic design parameters of RC bridge piers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 25:435-63.
- [18] Raychowdhury P. 2011 Seismic response of low-rise steel moment-resisting frame (SMRF) buildings incorporating nonlinear soil-structure interaction (SSI). *Engineering Structures*, 33:958-67.
- [19] Aydemir ME, Ekiz I. 2013 Soil-structure interaction effects on seismic behavior of multi-story structures, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* ,17:635-53.
- [20] Ganjavi B., Hao H. 2014 Strength reduction factor for MDOF soil-structure systems. *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, 23:161-80.

Evaluation of Drift Distribution in Steel Moment Frames Designed Based on Performance-Based Plastic Approach Considering Soil-Structure Interaction Effects

¹B. Ganjavi, ²A. Gholamrezatabar, ³G. Ghodrati Amiri

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

2- PhD , School of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

3- Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

*ghodrati@iust.ac.ir

Abstract:

It is well known that structures designed by current codes experience large inelastic deformations during major earthquakes. However, current seismic design practice in almost all seismic design provisions such as Iranian Seismic Code is based on elastic structural behavior and accounts for inelastic behavior only in an indirect manner through certain modification factors such as strength reduction factor. Under moderate to severe earthquakes, inelastic activity, including severe yielding and buckling of structural members can be unevenly distributed in the structure, which may result in global collapse or costly repair work. Recently, a new design method has been developed and referred to as Performance-Based Plastic Design (PBD). This method directly accounts for inelastic behavior by using pre-selected target drift and yield mechanism as key performance limit states. In this paper, for the first time, the effect of soil-structure interaction (SSI) on drift demands distribution along the height of the steel moment frame (SMF) structures designed with performance-based-plastic design (PBD) approach under strong ground motions are parametrically investigated. The soil beneath the structure is considered as a homogeneous elastic half space and is modelled using the concept of Cone Models. For the steel moment frame structures, the design base shears are calculated by using the modified energy balance equation and new lateral force distribution based on inelastic analyses. The new distribution of the lateral forces for performance-based plastic design was used from shear proportioning factors that were derived from the relative distribution of maximum story shears obtained from nonlinear dynamic analyses. Then, plastic design method is employed to design the beams and columns with the calculated design base shear and to satisfy the requirements for strong column-weak beam mechanism, which results in the pre-selected yield mechanism. The plastic design procedure proposed herein can be one of the simplified approaches without requiring sophisticated computer nonlinear analyses, by using the preselected yield mechanisms and target drifts. The energy dissipation capacity of the structure designed by these procedures can be less than that required to prevent collapse under severe ground motions. The purpose of this design procedure is to avoid collapse mechanisms characterized by poor energy dissipation capacity, such as soft-story mechanisms. To this end, the plastic hinges should be developed only in beams and at the column bases of the structure during severe earthquakes. The system is then subjected to 20 different earthquake ground motions and the analyses are performed directly in time domain using direct step-by-step integration method. Effect of various parameters including fundamental period, inelastic behavior, SSI key parameters on strength reduction factor and structural damage distribution are examined. The adequacy of different lateral loading patterns is also parametrically investigated. Results indicate that only mid-rise SMFs designed based on current PBD approach could have the best performance in SSI systems. It is also demonstrated that under slight and moderate SSI effects, SMFs designed according to various load patterns tend to more uniform distribution as compared to the fixed-base counterparts. However, all of them lose their efficiency when the SSI effects and inelastic response are pronounced. Moreover, the influence of SSI key parameters, fundamental period and ductility ratio on dispersion of the drift results are evaluated and discussed.

Keywords Drift Distribution, Performance-Based-Plastic Design, Soil-Structure Interaction, Yield Mechanism