



http://journalissss.ir

ارزیابی عملکرد لرزه‌های ساختمان‌های فولادی پیچشی نرم و سخت با سیستم دوگانه تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک گسل

محمدرضا وفیدسارکاری*

کارشناس ارشد، مهندسی عمران-سازه، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
*تبریز، صندوق پستی ۱۹۹۶-۵۱۳۳۵، m_vafidsarkari@sut.ac.ir

چکیده

زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک گسل شامل ویژگی‌های جهت‌داری و پرتابه‌ای می‌توانند انرژی لرزه‌ای بالایی به ساختمان وارد کنند. در این مقاله، عملکرد لرزه‌های ساختمان‌های فولادی متقارن ۵، ۱۰ و ۲۰ طبقه، دارای سیستم باربر جانبی دوگانه، در دو حالت پیچشی سخت و نرم مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، ساختمان‌ها با به‌کارگیری هم‌زمان دو مؤلفه افقی سه دسته رکورد زلزله حوزه دور (FF) و نزدیک گسل پالس‌دار (FD) و بدون پالس (NP) تحت تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی قرار می‌گیرند. نتایج به‌صورت جابه‌جایی طبقات، جابه‌جایی نسبی طبقات، برش طبقات و همچنین نیاز شکل‌پذیری مهاربندها، تیرها و ستون‌ها برای سه دسته رکورد زلزله ارائه شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که در ساختمان‌های پیچشی نرم و سخت ۵ و ۱۰ طبقه برای دسته رکورد زلزله FD، حداکثر نیاز در طبقات پایین بوده و مود اول غالب است. برای ساختمان پیچشی سخت ۲۰ طبقه، حداکثر نیاز برای دسته رکورد زلزله FD در طبقات پایین است؛ حداکثر اختلاف بین دسته رکورد زلزله‌های FD با NP و FF، برای جابه‌جایی نسبی طبقات به‌ترتیب برابر ۱۱۵ و ۷۹ درصد و برای نیاز شکل‌پذیری ستون‌ها به‌ترتیب ۸۹۴ و ۷۹۸ درصد هستند. همچنین مشارکت مودهای بالاتر برای دسته رکورد زلزله FF برای ساختمان‌های ۲۰ طبقه بیش‌تر از دسته رکورد زلزله‌های FD و NP است؛ از این‌رو، حداکثر نیاز در طبقات بالاتر تحت دسته رکورد زلزله‌های FF رخ می‌دهد.

واژگان کلیدی

حوزه نزدیک گسل، جهت‌داری پیشرو، ساختمان متقارن، ساختمان پیچشی سخت، ساختمان پیچشی نرم

Evaluation of seismic performance of torsionally-stiff and torsionally-flexible steel buildings under far-field and near-field ground motions

M.R. Vafidsarkari

Abstract

Near field ground motions with forward directivity and fling step effects, can impose high seismic energy to the building. In this paper, the seismic performance of symmetrical steel of 5-, 10- and 20-story buildings with dual lateral load resisting system, in both torsionally-stiff (TS) and torsionally-flexible (TF) archetype buildings has been investigated. For this purpose, the buildings are subjected to nonlinear time history analysis, which are performed with applying two horizontal components of three sets of far field (FF), non-pulse (NP) and with forward directivity pulse (FD) records. The results are presented in the form of peak floor displacement, inter story drift ratio, story shear as well as ductility demands of braces, beams and columns for three categories of earthquake records. The results show that in torsionally-stiff and torsionally-flexible buildings of 5- and 10-story under the FD records, the maximum occurs in the lower stories and the first mode is predominant. Also, for the 20-story torsionally-stiff building, the maximum demands occurs under the FD records in the lower stories, which the maximum difference between FD with NP and FF earthquake records, for the story drift ratios are 115% and 79%, respectively, and for the ductility of the columns, they are 894% and 798%, respectively. Also, contribution of higher modes of FF records for 20-storey buildings are greater than the FD and NP records; therefore, the maximum demands in the upper stories occurs under the FF records.

Keywords

Near Field, Forward Directivity, Symmetric Building, Torsionally-Stiff Building, Torsionally-Flexible Building



تعریف کلی نیست [۴، ۱۳، ۱۹-۲۱]. همچنین زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک گسل می‌توانند باعث جابه‌جایی‌های ماندگار زمین شوند [۲۲]؛ بنابراین، می‌توانند به‌طور محسوسی تحت تأثیر عوامل فرایند شکست گسل و جهت لغزش گسل نسبت به محل و جابه‌جایی ماندگار زمین^{۱۶} (PDE) در محل ناشی از حرکت زمین‌ساختی قرار گیرند. دو عامل اول موجب اثر جهت‌داری^{۱۷} (RDE) و عامل سوم باعث اثر پرتابه‌ای^{۱۸} (FS) می‌شوند که از برجسته‌ترین ویژگی‌های زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک گسل هستند. اثرات جهت‌داری بسته به موقعیت نسبی بین جهت لغزش گسل نسبت به محل می‌تواند به‌صورت جهت‌داری پیشرو^{۱۹}، پس‌رو^{۲۰} و ختشی^{۲۱} دسته‌بندی گردد. جهت‌داری پیشرو (FD) زمانی رخ می‌دهد که انتشار پیش‌روی شکست با سرعتی نزدیک به سرعت موج برشی به سمت یک محل باشد و جهت لغزش گسل در امتداد با همان محل انجام شود؛ چنانچه زاویه محل با گسل کم باشد (زمانی برای میرایی فرکانس‌های بالا نباشد) همچنین از مرکز زلزله به اندازه کافی دور باشد (تا اثر برهم‌نهی موج‌ها شکل گیرد)، موجب می‌شود که انرژی لرزه‌ای حاصل از شکست در یک موج حرکتی بزرگ (فرکانس بالا) در ابتدای شتاب‌نگاشت به محل مورد نظر برسد (جابه‌جایی دینامیکی). جهت‌داری پیشرو موجب زمین‌لرزه‌هایی می‌شود که در پریودهای بلند دارای شتاب طیفی با دامنه بلند و زمان دوام کوتاه هستند و با یک پالس دوطرفه سرعت شناخته می‌شود. همچنین جهت‌داری ختشی زمانی اتفاق می‌افتد که محل مورد نظر عمود بر راستای گسل است. جهت‌داری پس‌رو، هنگامی رخ می‌دهد که انتشار شکست از محل مورد نظر دور شود و منجر به اثرات متضاد می‌گردد؛ یعنی زمین‌لرزه‌هایی ایجاد می‌کنند که در پریودهای بلند دارای دامنه کم و زمان دوام بلند می‌باشند و به‌طور معمول حرکات پالسی شکل ندارند [۴، ۱۲، ۲۳]. همچنین جهت‌داری پیشرو در هر دو گسل

گزارش خسارت‌های غیرعادی از زلزله ۱۸ مارس ۱۹۵۷ پورت هیونیوم^۱ در مقایسه با بزرگی ۴/۷، سبب شناسایی پتانسیل خرابی زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک گسل گردید. به این ترتیب **هاوزنر**^۲ و **هیودسن**^۳ در سال ۱۹۵۸ با ادعای ثبت اولین زمین‌لرزه پالس‌دار به‌عنوان علت خرابی‌ها، به اهمیت مطالعه زلزله‌های پالس‌دار اشاره کردند [۱]. سپس **هاوزنر** و **تریفوناک**^۴ با مطالعه زمین‌لرزه پارکفیلد^۵ در سال ۱۹۶۷ اشاره به زمین‌لرزه حاوی پالس دارای پتانسیل تخریب متفاوت از زمین‌لرزه‌های معمولی کردند [۲]. **مهن** و **همکاران** در سال ۱۹۷۶ با مطالعه علت صدمات ساختمان اصلی بیمارستان اولیو ویو^۶ و **بولت**^۷ و **همکاران** در سال ۱۹۷۱ با مطالعه علت خرابی‌های سازه‌ها تحت زمین‌لرزه ۱۹۷۱ سن فرناندو^۸ بیان کردند که زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل می‌توانند موجب نیاز شکل‌پذیری جابه‌جایی بزرگ شوند [۳]. به غیر از زلزله‌های ذکرشده، چندین رویداد زلزله بزرگ، اهمیت مطالعه روی مسائل نزدیک گسل را افزایش داد. از جمله این زلزله‌ها، زلزله ۱۹۷۸ طبس، ۱۹۷۹ امپریال ولی^۹، ۱۹۸۹ لوما پریتا^{۱۰}، ۱۹۹۲ لندرز^{۱۱}، ۱۹۹۴ نورثریج^{۱۲}، ۱۹۹۵ کوبه^{۱۳}، ۱۹۹۹ ازमित^{۱۴}، ۱۹۹۹ چی‌چی^{۱۵} و ۲۰۰۳ بم می‌باشند. پس از رویدادهای مذکور، مطالعه در خصوص ویژگی‌های زلزله‌های نزدیک گسل و روش‌های طراحی لرزه‌ای به‌عنوان موضوع مهمی در مهندسی زلزله مطرح گردید.

زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک گسل، به‌طور معمول در محدوده فاصله ۱۵ الی ۲۰ کیلومتری از گسل فرض می‌گردد [۴-۱۱]؛ درحالی‌که مطالعات نشان دادند که اثرات زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک گسل با افزایش فاصله به سرعت کاهش می‌یابد [۲] و همچنین به بزرگی، فرایند شکست گسل، جهت لغزش گسل، سرعت گسیختگی و جهت انتشار گسیختگی نسبت به محل بستگی دارد [۱۲-۱۸]؛ بنابراین، این فاصله به‌عنوان یک

¹⁶ Permanent Displacement Effect
¹⁷ Rupture Directivity Effect
¹⁸ Fling Step
¹⁹ Forward Directivity
²⁰ Backward Directivity
²¹ Neutral Directivity

¹ Port Hueneme
² Housner
³ Hudson
⁴ Trifunac
⁵ Parkfield
⁶ Olive View
⁷ Boulton
⁸ San Fernando
⁹ Imperial Valley
¹⁰ Loma Prieta
¹¹ Landers
¹² Northridge
¹³ Kobe
¹⁴ Izmit
¹⁵ Chi-Chi

شیب‌لغز معکوس و نرمال نیز اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب که اگر فرایند شکست به سمت مرکز زلزله باشد و جهت شکست و لغزش صفحه گسل شیب‌لغز هم‌راستا باشند، نقاط قرارگرفته در فرادیواره، جهت‌داری پیشرو را تجربه می‌نمایند. اثرات جهت‌داری پیشرو در گسل امتدادلغز در فاصله‌ای دور از مرکز زلزله و در گسلش شیب‌لغز در سطح زمین و رومرکز زلزله بیش‌تر نمایان است. همچنین اثر پرتابه‌ای (FS) ناشی از جابه‌جایی‌های ماندگار زمین در محل (PGD)، همراه با پالس‌های سرعت یک‌طرفه می‌باشند [۲۳، ۴]. در گسل امتدادلغز، پالس جهت‌داری پیشرو در جهت عمود بر امتداد و پالس جابه‌جایی استاتیکی زمین (اثر پرتابه‌ای) موازی با امتداد گسل رخ می‌دهد؛ درحالی‌که در گسل شیب‌لغز، پالس جهت‌داری عمود بر شیب گسل است و مؤلفه‌هایی در هر دو جهت قائم و عمود بر امتداد افقی دارد. همچنین جابه‌جایی استاتیکی زمین در امتداد موازی با شیب گسل است و مؤلفه‌هایی در هر دو جهت قائم و عمود بر امتداد افقی دارد؛ بنابراین، جابه‌جایی‌های دینامیکی و استاتیکی روی مؤلفه عمود بر امتداد گسل رخ می‌دهند. از این‌رو لازم است تا به‌عنوان بارهای هم‌زمان که پتانسیل خرابی زمین‌لرزه‌ها را افزایش می‌دهد، در نظر گرفته شوند [۲۴].

تحقیقات نشان دادند که زلزله‌های حوزه نزدیک گسل شامل پالس می‌توانند نیازهای بالاتری را نسبت به زلزله‌های معمول و دور از گسل و طیف‌های طراحی آیین‌نامه‌ای در ساختمان ایجاد نمایند [۲۵-۴۳]. همچنین مطالعات نشان دادند که اختلاف در توزیع حداکثر نیاز شکل‌پذیری طبقات در ارتفاع سازه به ویژگی‌های زلزله‌های حوزه نزدیک گسل و ویژگی‌های ارتعاشی سازه بستگی دارد [۱۷، ۲۶، ۲۸، ۳۱-۳۴، ۴۱، ۴۲، ۴۴-۴۷]. برخی از مطالعات نشان دادند که در حوزه نزدیک گسل مود اول ارتعاش سازه‌ها غالب بوده و طبقات پایینی بحرانی هستند، درحالی‌که مشارکت مودهای بالاتر در پاسخ‌های لرزه‌ای در زمین‌لرزه‌های حوزه دور از گسل حاکم می‌باشند [۱۷، ۳۰، ۳۴، ۴۱، ۴۲، ۴۷] و بعضی حاکی از آن است که در پالس‌های FD مودهای بالاتر مشارکت دارند ولی برای پالس‌های FS مود اول حاکم است [۲۸، ۳۱، ۴۶]. تحلیل استفاده از پالس‌های معادل نشان داد زمانی که نسبت پریرود پالس به پریرود اولیه سازه بیش‌تر از یک است، حداکثر نیاز در طبقات پایین

سازه است که نشان‌دهنده حاکمیت مود اول است؛ ولی وقتی نسبت پریرود پالس به پریرود اولیه سازه کم‌تر از یک است، حداکثر نیاز به طبقات بالاتر منتقل می‌شود که نمایانگر مشارکت مودهای بالاتر در پاسخ‌های لرزه‌ای است [۲۸، ۳۲، ۴۴، ۴۵]. **هال**^۱ و **همکاران** در سال ۱۹۹۵ ملاحظه کردند در صورتی‌که پریرود پالس زمین‌لرزه شامل پالس FD با پریرود اولیه سازه برابر باشد، می‌تواند در خرابی بسیار مؤثر باشد [۲۶]. **یانگ**^۲ و **همکاران** در سال ۲۰۱۰ نشان دادند که با افزایش نسبت سختی جانبی، حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات از نیمه بالایی به نیمه پایینی منتقل می‌شود [۳۱]. بررسی خرابی ساختمان‌ها تحت اثرات FD توسط **چمپیون**^۳ و **لیل**^۴ در سال ۲۰۱۲ حاکی از آن بود که پالس‌های شامل پریرود بزرگ‌تر از پریرود مود اول الاستیک ساختمان، تأثیر بیش‌تری در خرابی دارند [۳۳]. نتایج مطالعات **کریشان**^۵ در سال ۲۰۰۷ حاکی از نیاز جابه‌جایی نسبی طبقه ۵ درصد و نیاز دوران پلاستیک اتصالات تیر به ستون و چشمه‌های اتصال ۴ الی ۵ درصد رادبان برای ساختمان‌های نامنظم در پلان بودند [۲۹]. نتایج مطالعه **منیری** در سال ۲۰۱۷ نشان داد که اهمیت رفتار غیرخطی در ساختمان‌های بلندتر، بیش‌تر است [۳۷]. **منصوری** و **همکاران** در سال ۲۰۱۹ ملاحظه کردند که نسبت جابه‌جایی نسبی طبقه و نسبت برش طبقات (NF/FF) با افزایش ارتفاع سازه افزایش می‌یابد [۴۰]. **مشایخی** و **همکاران** در سال ۲۰۱۹ نشان دادند که اختلاف بین جابه‌جایی طبقات با افزایش پریرود ساختمان‌ها افزایش می‌یابد [۴۱].

با توجه به این که در مطالعات انجام‌شده تأثیر پارامتر نسبت فرکانسی سیستم Ω که متمایزکننده ساختمان‌های پیچشی سخت و نرم است تحت زلزله‌های حوزه نزدیک گسل بررسی نشده است و اکثر مطالعات به‌صورت قاب‌های دوبعدی [۲۷، ۳۰-۳۳، ۳۹-۴۳، ۴۶، ۴۸] و بدون دخالت پریرود پیچشی به‌عنوان پریرود غالب سازه هستند، بنابراین در این مقاله تأثیر پارامتر نسبت فرکانسی سیستم Ω در پاسخ ساختمان‌ها تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک گسل شامل پالس و بدون پالس مورد بررسی قرار می‌گیرد. شایان‌ذکر است که نسبت پریرود Ω به‌صورت نسبت پریرود انتقالی غیردرگیر به پریرود پیچشی غیردرگیر تعریف می‌شود. سازه‌ها با $\Omega < 1$ به‌عنوان پیچشی سخت و با $\Omega > 1$ به‌عنوان پیچشی نرم نامیده می‌شوند [۴۹]. در

¹ Hall

² Yang

³ Champion

⁴ Liel

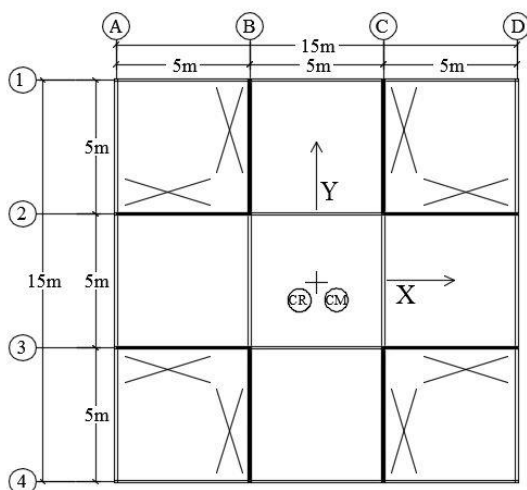
⁵ Krishnan



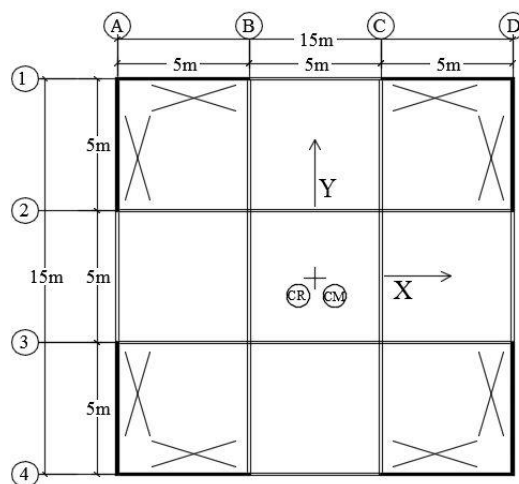
۲- روش تحقیق

در مطالعه حاضر، ساختمان‌های فولادی ۵، ۱۰ و ۲۰ طبقه با پلان یکسان و برش طبقات به ترتیب مطابق شکل‌های (۱) و (۲) مورد بررسی قرار گرفتند که ساختمان‌ها دارای سیستم باربر جانبی دوگانه قاب خمشی متوسط با مهارندهای همگرای ویژه با تکیه‌گاه‌های گیردار بودند. ارتفاع کلیه طبقات برابر ۳/۲ متر است.

ساختمان‌های پیچشی سخت، شکل مودی اول، انتقالی و شکل مودی دوم، پیچشی می‌باشد ولی برای ساختمان‌های پیچشی نرم، شکل مودی اول، پیچشی و شکل مودی دوم انتقالی است [۵۰].

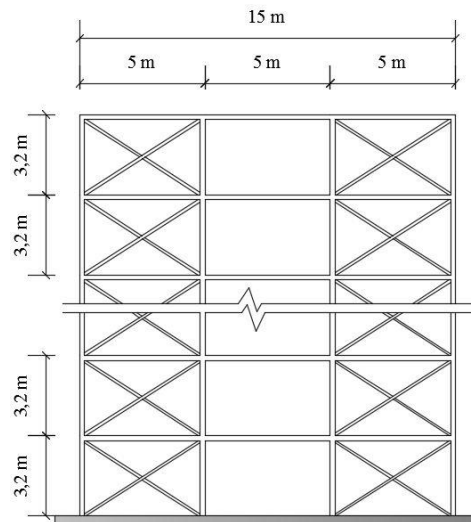
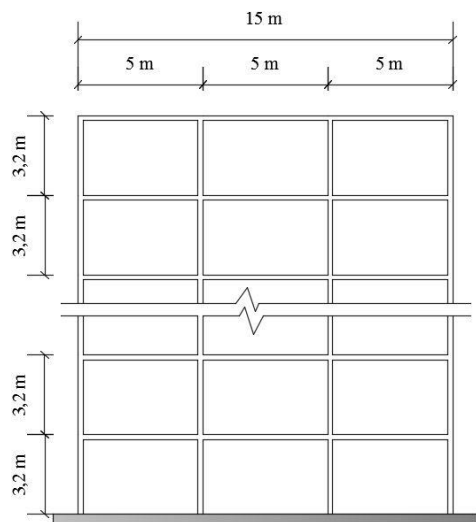


(ب)



(الف)

شکل ۱- پلان یکسان طبقات: الف) ساختمان‌های پیچشی سخت، ب) ساختمان‌های پیچشی نرم



شکل ۲- برش طبقات ساختمان؛ شکل سمت راست: قاب‌های با مهاربند، شکل سمت چپ: قاب‌های بدون مهاربند

لرزه‌ای به صورت متمرکز در تراز طبقات انجام شد. برای ساختمان‌های پیش‌سخت مودهای اول و دوم، انتقالی و مود سوم پیش‌سختی بودند؛ در حالی که برای ساختمان‌های پیش‌سخت نرم، مود اول پیش‌سختی بود. مشخصات زمان تناوبی ساختمان‌ها در جدول (۱) آورده شده است که زمان تناوب پیش‌سختی با رنگ خاکستری متمایز شده است. جزئیات مقاطع مربوط به ساختمان‌های پیش‌سخت و نرم ۱۰ طبقه به عنوان نمونه در جدول‌های (۲) الی (۵) ارائه شده است. همچنین شکل‌های مودی ساختمان‌های پیش‌سخت نرم و سخت به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) آمده است.

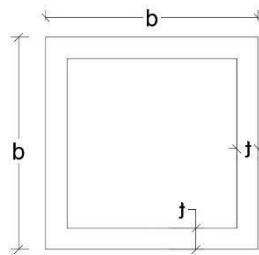
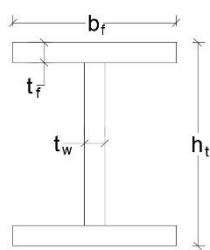
بارهای مرده و زنده برای تمام طبقات به ترتیب برابر ۶۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و مصالح فولادی از نوع ST37 با تنش تسلیم $F_y=240 \text{ MPa}$ ، تنش گسیختگی نهایی $F_u=370 \text{ MPa}$ ، مدول الاستیسیته $E=2 \times 10^5 \text{ MPa}$ و ضریب پواسون $\nu=0.3$ می‌باشد. ساختمان‌ها در دو گروه پیش‌سختی نرم^۱ (TF) و سخت^۲ (TS)، با جابه‌جایی مهاربندها به سمت قاب‌های درونی و بیرونی حاصل شدند. ساختمان‌ها دارای اهمیت متوسط بوده و زمین منطقه نوع II و میزان خطر لرزه‌خیزی منطقه مطابق استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران [۵۱]، بسیار زیاد می‌باشد. همچنین برای طراحی سازه‌های فولادی از آیین‌نامه AISC 360-16 [۵۲] استفاده گردید. طراحی و تحلیل مدل‌ها به صورت سه‌بعدی و با در نظرگیری جرم‌های

جدول ۱- مشخصات زمان تناوب و برش پایه طراحی ساختمان‌های پیش‌سختی سخت و نرم

سیستم ساختمانی	تعداد طبقات	ارتفاع کل ساختمان (متر)	زمان تناوب (ثانیه)			Ω	برش پایه طراحی (کیلوگرم-نیرو)
			T ₁	T ₂	T ₃		
پیش‌سختی سخت (TS)	5	16	0.506	0.506	0.276	1.83	90454
	10	32	1.040	1.040	0.550	1.89	98255
	20	64	1.968	1.968	0.963	2.04	126834
پیش‌سختی نرم (TF)	5	16	0.686	0.489	0.489	0.71	93696
	10	32	1.275	0.926	0.921	0.73	112159
	20	64	2.213	1.595	1.595	0.72	145472

جدول ۲- مشخصات مقاطع تیرها، ستون‌ها و مهاربندها

مشخصات مقاطع تیرها					مشخصات مقاطع مهاربندها			مشخصات مقاطع ستون‌ها		
Section	h_t (cm)	t_w (cm)	b_f (cm)	t_f (cm)	Section	d (cm)	t (cm)	Section	b (cm)	t (cm)
SG1	23	0.8	17.5	1.0	SB1	8	0.6	SC1	25	1.0
SG2	30	0.8	20	2.5	SB2	10	0.6	SC2	25	1.5
SG3	30	0.8	25	2.5	SB3	12	0.6	SC3	25	2.0
								SC4	25	2.5
								SC5	30	2.0
								SC6	30	2.5
								SC7	30	3.0
								SC8	35	3.0



¹ Torsionally-Flexible

² Torsionally-Stiff

جدول ۳- مقاطع ستون‌ها در ساختمان‌های پیچشی سخت و نرم

مقاطع ستون‌ها در ساختمان متقارن پیچشی نرم			مقاطع ستون‌ها در ساختمان متقارن پیچشی سخت		
Position	story	Section	Position	Story	Section
A1, D1, A4, D4	1-10	SC1	A1, D1, A4, D4	1-3	SC6
	1, 2	SC8		4-10	SC4
A2, D2, A3, D3	3, 4	SC7	A2, D2, A3, D3	1, 2	SC6
	5-10	SC5		3, 4	SC3
B(1-4), C(1-4)	1	SC8	B1, C1, B4, C4	5-10	SC2
	2-4	SC7		1, 2	SC6
	5-10	SC5		3, 4	SC4
				5-10	SC2
			1, 2	SC6	
			B2, C2, B3, C3	3-5	SC2
				6-10	SC1

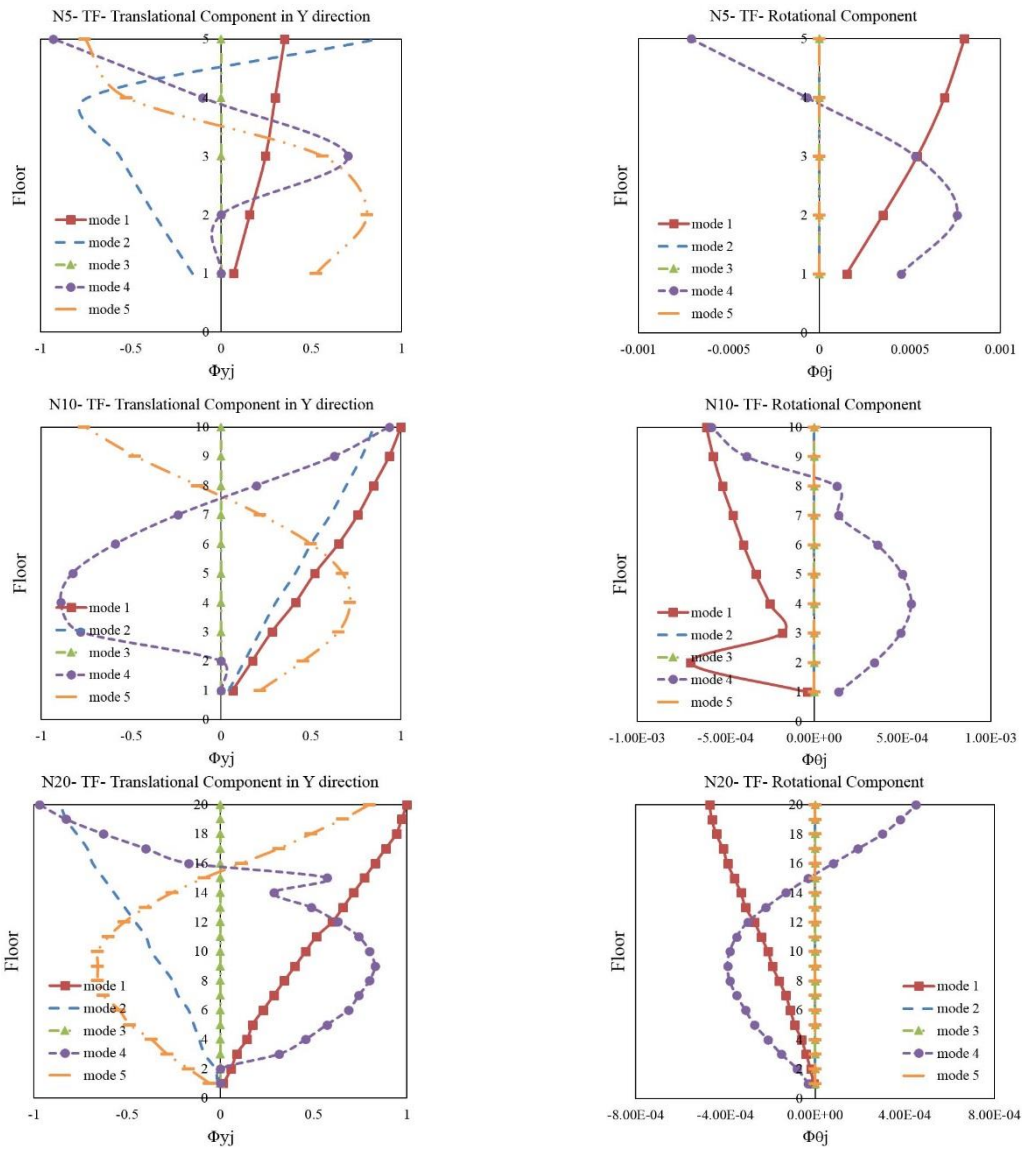
جدول ۴- مقاطع مهاربندها در ساختمان‌های پیچشی سخت و نرم

مقاطع مهاربندها در ساختمان متقارن پیچشی نرم			مقاطع مهاربندها در ساختمان متقارن پیچشی سخت		
Axis	story	Section	Axis	story	Section
2, 3, B, C	1-7	SB3	1, 4, A, D	1-7	SB2
	8, 9	SB2		8-10	SB1
	10	SB1			

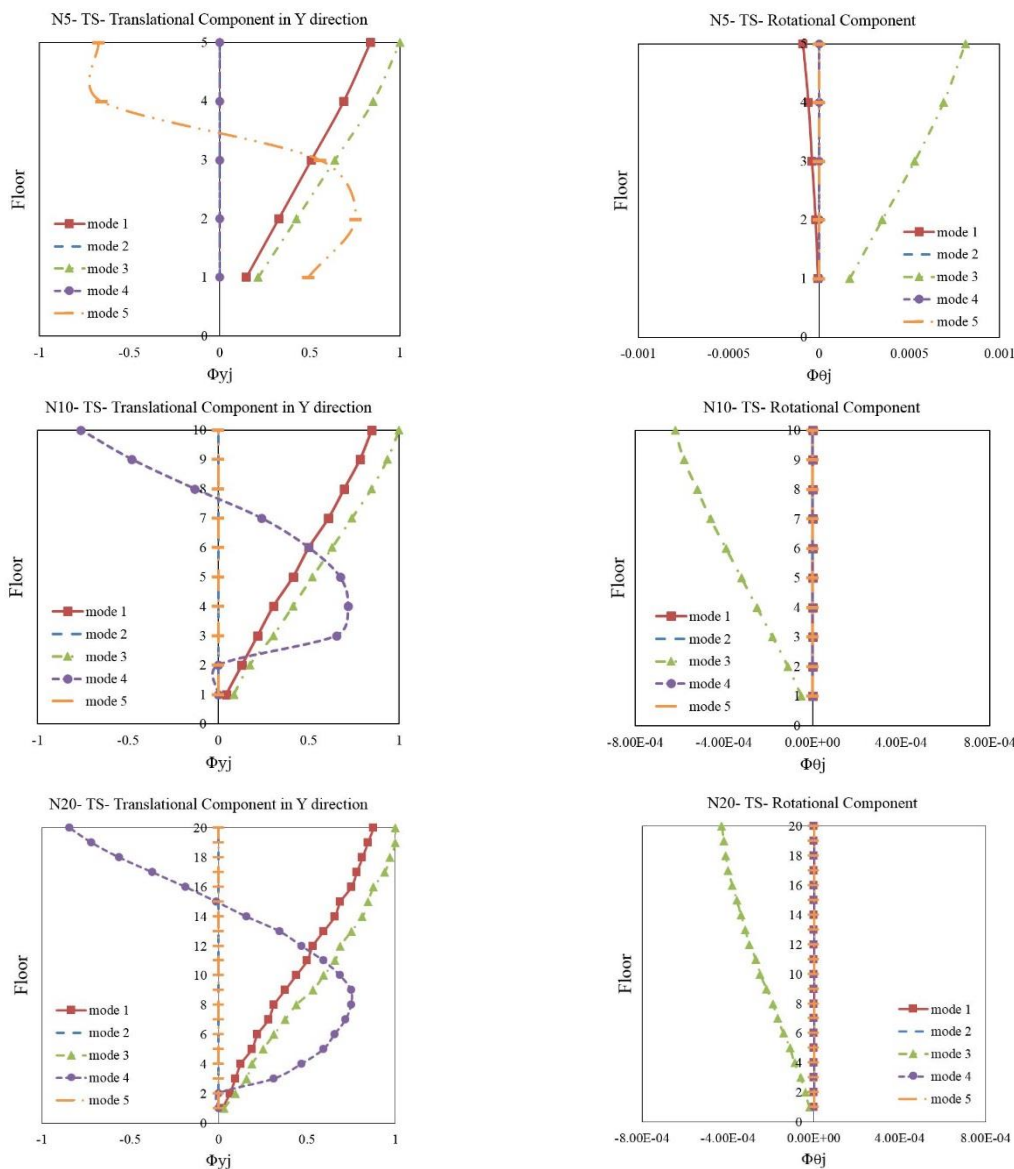
جدول ۵- مقاطع تیرها در ساختمان‌های پیچشی سخت و نرم

مقاطع تیرها در ساختمان متقارن پیچشی نرم			مقاطع تیرها در ساختمان متقارن پیچشی سخت		
Axis	story	Section	Axis	story	Section
1, 4, A, D	1-10	SG1	1, 4, A, D	1-10	SG2
2, 3, B, C	1-10	SG3	2, 3, B, C	1-10	SG1





شکل ۳- شکل‌های مودی الاستیک ساختمان‌های پیش‌تنی نرم ۵، ۱۰ و ۲۰ طبقه به ترتیب شکل‌های سمت چپ: مؤلفه انتقالی در جهت Y و شکل‌های سمت راست: مؤلفه دورانی



شکل ۴- شکل های مودی الاستیک ساختمان های پیچشی سخت ۵، ۱۰ و ۲۰ طبقه به ترتیب شکل های سمت چپ: مؤلفه انتقالی در جهت Y و شکل های سمت راست: مؤلفه دورانی

۲۰ کیلومتر انتخاب شده اند. مشخصات شتابنگاشت ها در جدول های (۶) الی (۸) و طیف های مربوطه در شکل (۵) ارائه شده اند. هر گروه از زلزله ها مطابق استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران [۵۱] برای سطح زلزله طرح مقیاس شدند و هر جفت زمین لرزه به صورت (X,Y) بر مدل سازه ای اعمال شدند؛ بدین ترتیب که برای زلزله های نزدیک گسل، مؤلفه شامل پالس جهت داری پیشرو و برای زلزله های دور از گسل و نزدیک گسل بدون پالس، مؤلفه با PGA حداکثر در جهت Y اعمال گردید. طیف میانگین دسته رکورد زلزله های FF, FD, NP برای ساختمان های مورد

تحلیل های تاریخچه زمانی توسط نرم افزار SAP2000 [۵۳] برای سه گروه ۱۵ تایی زمین لرزه های حوزه دور^۱ (FF) و نزدیک گسل بدون پالس^۲ (NP) و شامل پالس جهت داری پیشرو با در نظر گیری دو مؤلفه افقی رکوردها انجام شدند. همه رکوردها از پایگاه اطلاعاتی PEER [۵۴] مطابق با خاک نوع II آیین نامه ۲۸۰۰ ایران انتخاب شده اند. برای تشخیص رکوردهای حوزه نزدیک گسل شامل پالس از مرجع [۵۵] استفاده شده است که در آن مرجع روش تجزیه موجک [۵۶] به کار رفته است. رکوردهای حوزه نزدیک گسل از رکوردهای با فاصله کم تر از

¹ Far Field
² Non Pulse



در ابتدا و انتهای اعضا و در مهاربندها با توجه به این که نیروی کمانش خارج از صفحه کم‌تر از نیروی کمانش داخل صفحه بود، در یک‌دهم طول مهاربند و بر اساس نیروی محوری اختصاص داده شدند.

بررسی در شکل (۶) ارائه شده است و رفتار غیرخطی تیرها، ستون‌ها و مهاربندها با مفاصل پلاستیک اتوماتیک مطابق با آیین‌نامه ASCE/SEI 41-13 [۵۷] مدل‌سازی شدند. مفاصل پلاستیک در تیرها بر مبنای لنگر حول محور قوی، در ستون‌ها بر مبنای اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی حول دو محور

جدول ۶- مشخصات رکوردهای نزدیک گسل شامل پالس با ویژگی اثر جهت‌داری پیشرو (FD)

No.	Event	Year	Station	Magnitude (M _w)	Mechanism	Dist (km)	PGA1 (g)	PGA2 (g)	T _p (s)
1	Northridge	1994	J.F.Plant	6.69	R. Oblique	5.43	0.99	0.57	3.5
2	Northridge	1994	LA Dam	6.69	R. Oblique	5.92	0.43	0.32	1.6
3	Northridge	1994	Sylmar	6.69	R. Oblique	5.30	0.60	0.84	2.4
4	Cape Mendocino	1992	Petrolia	7.01	R. Oblique	8.18	0.59	0.66	3.0
5	Chi-Chi	1999	TCU049	7.62	R. Oblique	3.76	0.19	0.22	10.
6	Chi-Chi	1999	TCU052	7.62	R. Oblique	0.66	0.36	0.45	11.9
7	Chi-Chi	1999	TCU053	7.62	R. Oblique	5.95	0.18	0.13	13.1
8	Chi-Chi	1999	TCU068	7.62	R. Oblique	0.32	0.51	0.32	12.2
9	Chi-Chi	1999	TCU075	7.62	R. Oblique	0.89	0.23	0.26	4.9
10	Chi-Chi	1999	TCU087	7.62	R. Oblique	6.98	0.12	0.11	10.3
11	Chi-Chi	1999	TCU101	7.62	R. Oblique	2.11	0.21	0.26	10.3
12	Chi-Chi	1999	TCU103	7.62	R. Oblique	6.08	0.13	0.14	8.6
13	Chi-Chi	1999	TCU128	7.62	R. Oblique	13.13	0.14	0.17	9.023
14	Parkfield	2004	Eades	6.00	Strike slip	2.85	0.32	0.39	1.218
15	Bam	2003	Bam	6.6	Strike slip	1.70	0.81	0.63	2.023

جدول ۷- مشخصات رکوردهای نزدیک گسل بدون پالس (NP)

No.	Event	Year	Station	Magnitude (M _w)	Mechanism	Dist (km)	PGA2 (g)	PGA1 (g)
1	Chi-Chi	1999	CHY028	7.62	R. Oblique	3.12	0.64	0.76
2	Chi-Chi	1999	CHY029	7.62	R. Oblique	10.96	0.29	0.24
3	Chi-Chi	1999	CHY080	7.62	R. Oblique	2.7	0.81	0.86
4	Chi-Chi	1999	TCU070	7.62	R. Oblique	19.0	0.25	0.16
5	Chi-Chi	1999	TCU071	7.62	R. Oblique	5.8	0.53	0.65
6	Chi-Chi	1999	TCU072	7.62	R. Oblique	7.8	0.48	0.38
7	Chi-Chi	1999	TCU089	7.62	R. Oblique	9.0	0.35	0.23
8	Loma Prieta	1989	UCSC	6.93	R. Oblique	18.51	0.31	0.41
9	Loma Prieta	1989	Bran	6.93	R. Oblique	10.72	0.46	0.50
10	Loma Prieta	1989	Corralitos	6.93	R. Oblique	3.85	0.64	0.48
11	Loma Prieta	1989	WAHO	6.93	R. Oblique	17.47	0.37	0.65
12	Cape Mendocino	1992	Cape Menocino	7.01	R. Oblique	6.96	0.50	1.02
13	Northridge	1994	B.H.Rd.	6.69	R. Oblique	16.88	0.11	0.16
14	Northridge-01	1994	Sunland	6.69	R. Oblique	13.35	0.13	0.16
15	Northridge-01	1994	S.Ground	6.69	R. Oblique	16.74	0.23	0.29

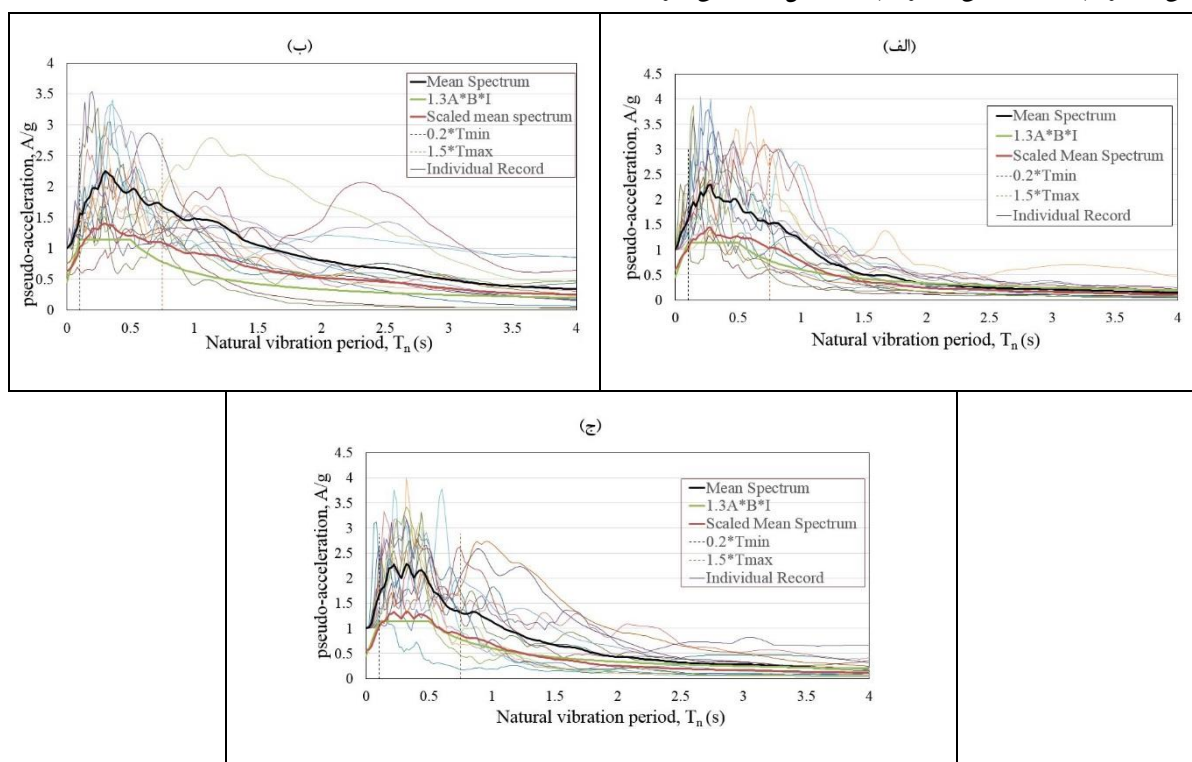


جدول ۸- مشخصات رکوردهای حوزه دور از گسل (FF).

No.	Event	Year	Station	Magnitude (M _w)	Mechanism	Dist (km)	PGA2 (g)	PGA1 (g)
1	Kobe	1995	MZH	6.9	Strike slip	69.04	0.07	0.05
2	Kobe	1995	OKA	6.9	Strike slip	86.93	0.08	0.06
3	Northridge-01	1994	Old Ridge	6.69	R. Oblique	20.11	0.57	0.51
4	Northridge-01	1994	Gabriel	6.69	R. Oblique	38.86	0.14	0.26
5	Chi-Chi, Taiwan	1999	TAP103	7.62	R. Oblique	114.28	0.12	0.18
6	Chi-Chi	1999	TCU095	7.62	R. Oblique	45.15	0.37	0.70
7	Hector Mine	1999	Amboy	7.13	Strike slip	41.81	0.18	0.15
8	Bam	2003	Abaragh	6.6	Strike slip	47.16	0.17	0.11
9	San Fernando	1971	Lake Hughes #9	6.61	R. Oblique	22.57	0.17	0.14
10	Landers	1992	Amboy	7.28	R. Oblique	69.21	0.12	0.15
11	Loma Prieta	1989	Golden Gate	6.93	R. Oblique	79.71	0.23	0.12
12	Loma Prieta	1989	SAGO	6.93	R. Oblique	29.54	0.04	0.06
13	Loma Prieta	1989	SLAC Lab	6.93	R. Oblique	24.82	0.19	0.28
14	Loma Prieta	1989	Downstream	6.93	R. Oblique	20.26	0.25	0.24
15	Loma Prieta	1989	Presidio	6.93	R. Oblique	77.34	0.10	0.20

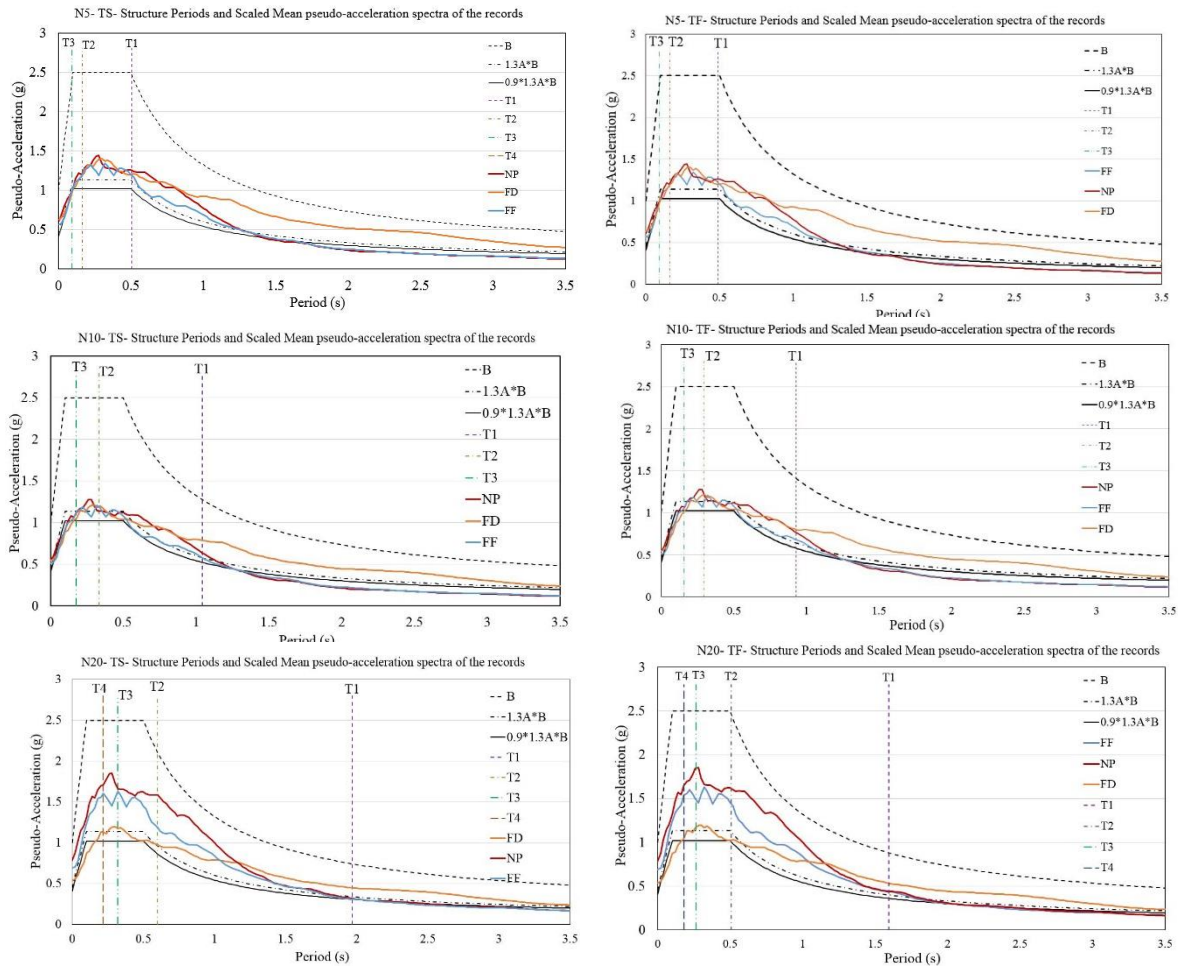
و برای بارهای مرده و زنده به ترتیب برابر $1/2$ و 1 اعمال شده است. همچنین در تحلیل‌های تاریخیچه زمانی از روش انتگرال نیومارک با پارامترهای γ و β به ترتیب برابر 0.5 و 0.25 استفاده شده است.

تحلیل‌های تاریخیچه زمانی ماتریس میرایی با در نظرگیری میرایی رایلی به دست آمده است که بدین منظور نسبت میرایی برای مود اول و دوم انتقالی برابر 5 درصد مطابق استاندارد 2800 زلزله ایران لحاظ گردیده است. اثر P-Delta در کلیه تحلیل‌های تاریخیچه زمانی با ضرایب بارهای ثقلی در ترکیب بار شامل بار جانبی زلزله



شکل ۵- طیف شبه‌شتاب و طیف میانگین رکوردها، طیف استاندارد 2800 زلزله $1/3$ برابر) و طیف میانگین مقیاس شده برای الف) دسته رکوردهای حوزه نزدیک گسل پالس‌دار، ب) دسته رکوردهای حوزه نزدیک گسل پالس، ج) دسته رکوردهای حوزه دور





شکل ۶- طیف شبه‌شتاب میانگین رکوردهای مقیاس شده برای هر ساختمان؛ به ترتیب شکل‌های سمت چپ: ساختمان‌های پیش‌سخت و شکل‌های سمت راست: ساختمان‌های پیش‌سخت نرم

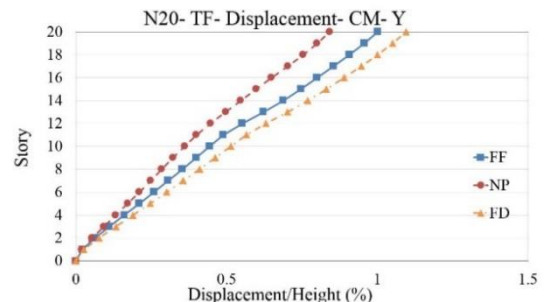
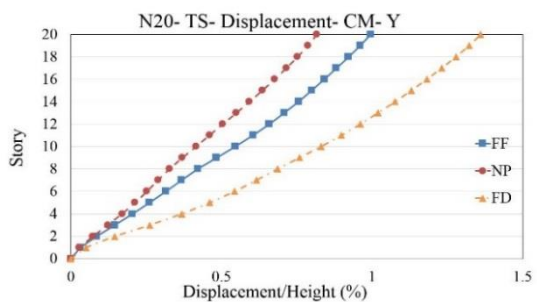
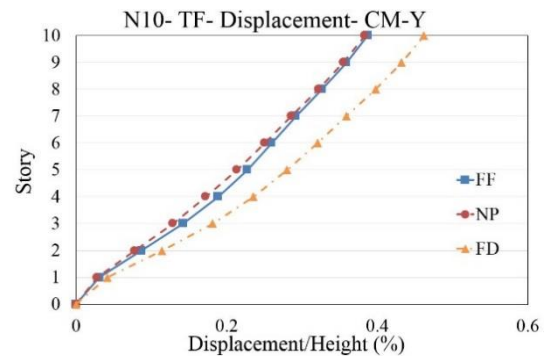
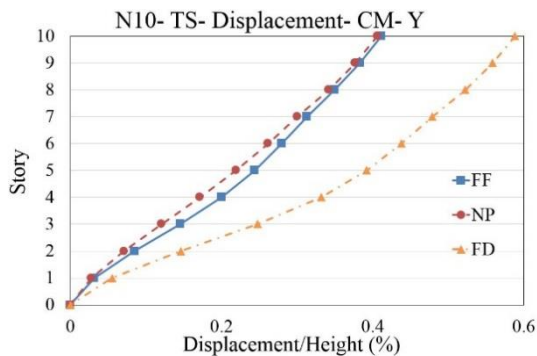
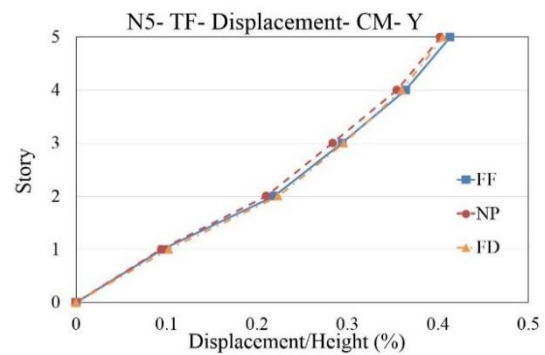
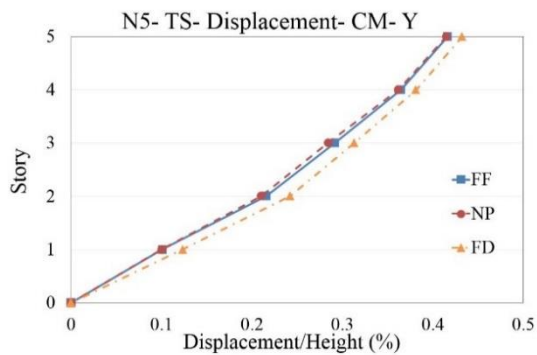
NP و FF برای ساختمان ۵ طبقه، هر دو برابر ۲۳ درصد و در طبقه یک است. این اختلافات برای ساختمان ۱۰ طبقه به ترتیب حدود ۱۰۶ درصد در طبقه دوم و ۷۳ درصد برای طبقه اول هستند. همچنین اختلافات مذکور برای ساختمان ۲۰ طبقه به ترتیب برابر ۱۱۵ درصد در طبقات چهارم و پنجم و ۷۹ درصد مربوط به طبقات سوم و چهارم است. برای ساختمان‌های پیش‌سخت نرم ۱۰ و ۲۰ طبقه جابه‌جایی طبقات برای دسته رکورد زلزله‌های FD بیش‌تر از دو دسته رکورد زلزله NP و FF است؛ درحالی‌که برای ساختمان پیش‌سخت نرم ۵ طبقه جابه‌جایی کف طبقات برای هر سه دسته رکورد زلزله مشابه هستند. ملاحظه می‌شود برای ساختمان‌های پیش‌سخت نرم، بیش‌ترین اختلاف مابین جابه‌جایی طبقات مربوط به دسته رکورد زلزله FD با NP و FF برای ساختمان ۲۰ طبقه هر دو در حدود ۴۴ درصد مربوط به طبقه هشتم بوده و این اختلافات برای ساختمان ۱۰ طبقه به ترتیب برابر ۴۹ و ۳۵ درصد در طبقه اول است.

۳- بحث و بررسی نتایج

در این مقاله، نتایج به صورت میانگین هر گروه ۱۵ تایی زلزله برای جابه‌جایی کف طبقات، جابه‌جایی نسبی طبقات و نیاز شکل‌پذیری مهاربندها، تیرها و ستون‌ها در امتداد محور Y ساختمان‌ها ارائه می‌شوند و از ارائه سایر نتایج به دلیل اختصار اجتناب شده است.

۳-۱- جابه‌جایی کف طبقات

شکل (۷) درصد نسبت جابه‌جایی کف طبقات به ارتفاع ساختمان در جهت Y را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که برای ساختمان‌های پیش‌سخت، دسته رکورد زلزله FD برای هر سه ساختمان، جابه‌جایی طبقات بیش‌تری را نشان می‌دهد؛ ولی این اختلاف جابه‌جایی برای ساختمان ۵ طبقه کم‌تر است. برای ساختمان‌های پیش‌سخت سفت، بیش‌ترین اختلاف مابین جابه‌جایی طبقات مربوط به دسته رکورد زلزله‌های FD با



شکل ۷- نسبت جابه‌جایی طبقات به ارتفاع ساختمان برای مرکز جرم طبقات در جهت Y به ترتیب شکل‌های سمت چپ: ساختمان‌های پیچشی سخت و شکل‌های سمت راست: ساختمان‌های پیچشی نرم

دسته رکورد زلزله‌های FD هستند. نمودارهای جابه‌جایی طبقات ساختمان‌های پیچشی سخت و نرم ۵ و ۱۰ حاکی از حاکمیت مود اول برای هر سه دسته رکورد زلزله است. در ساختمان ۲۰ طبقه پیچشی سخت برای دسته رکورد زلزله‌های FD مود اول حاکم است ولی برای دسته رکورد زلزله‌های FF و NP با توجه به اختلاف جابه‌جایی طبقات متوالی و زاویه شکستگی در نمودار جابه‌جایی مشارکت مودهای بالاتر بیشتر است و این امر در ساختمان پیچشی نرم ۲۰ طبقه نشان از اثرات بیشتر مودهای بالاتر در هر سه دسته رکورد زلزله را دارد. همچنین دیده می‌شود که اختلاف جابه‌جایی بین دسته رکورد زلزله‌های FF و NP با افزایش ارتفاع ساختمان، افزایش می‌یابد و این اختلاف برای

به‌طور کلی می‌توان گفت که جابه‌جایی طبقات برای دسته رکورد زلزله‌های FD، با افزایش ارتفاع ساختمان و پربود ساختمان‌ها و با توجه به بیش‌تر بودن شتاب طیفی در پربودهای بلندتر نسبت به دسته زلزله‌های FF و NP، برای هر دو نوع ساختمان پیچشی نرم و سخت، افزایش می‌یابد و در حقیقت، انرژی واردشده به ساختمان‌ها طی دسته رکورد زلزله‌های FD بیش‌تر از دسته رکورد زلزله‌های FF و NP است. در ضمن مشاهده می‌شود که جابه‌جایی طبقات برای دسته رکورد زلزله‌های FD برای ساختمان‌های پیچشی سخت بیش‌تر از ساختمان‌های پیچشی نرم است که این امر با افزایش ارتفاع ساختمان، افزایش می‌یابد؛ بنابراین، ساختمان‌های پیچشی سخت بیش‌تر تحت تأثیر

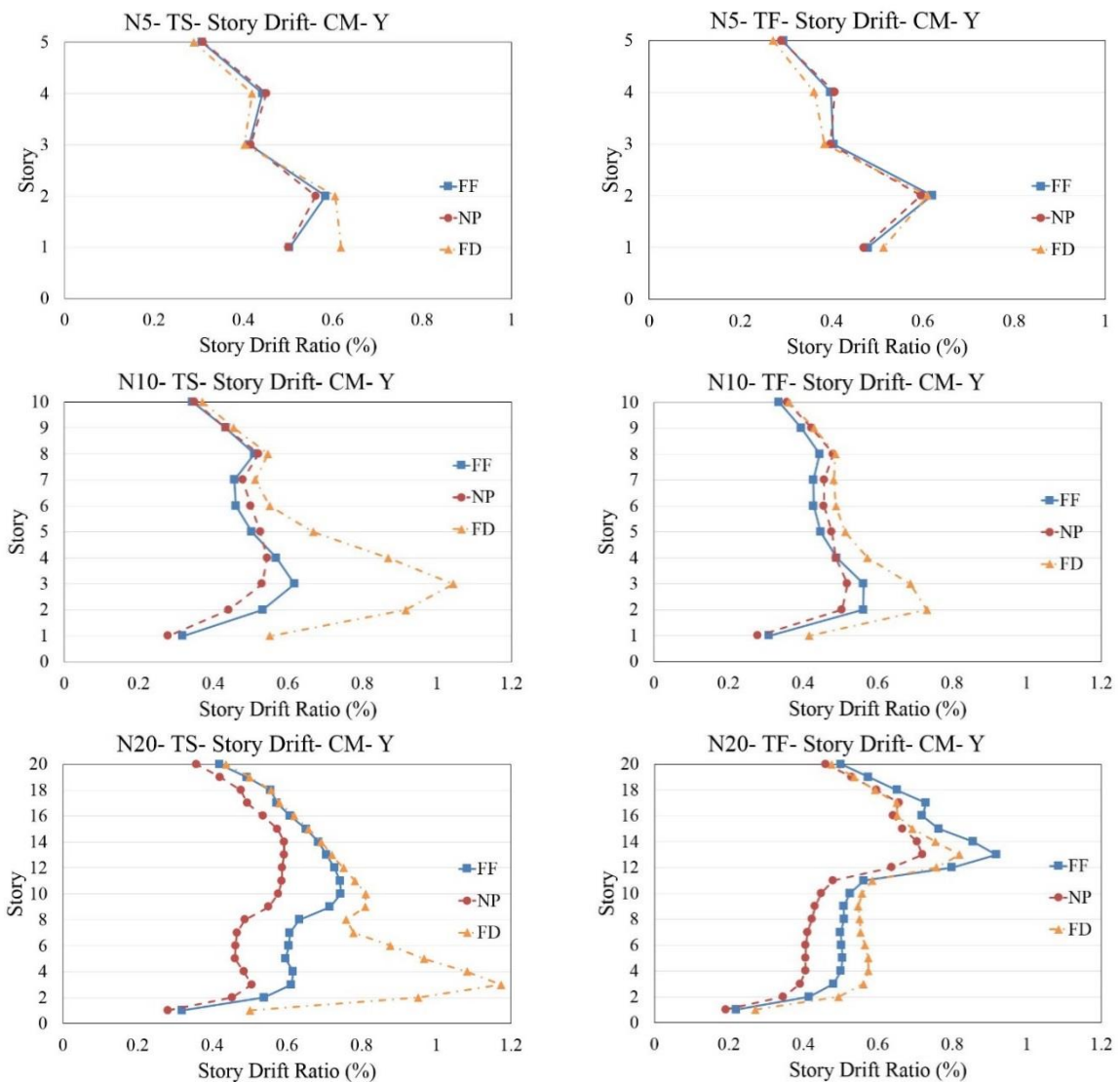


ساختمان‌های ۲۰ طبقه پیچشی نرم و سخت، بیش‌تر از ساختمان‌های ۵ و ۱۰ طبقه است و حاکی از تحریک بیش‌تر مودهای بالاتر در دسته رکورد زلزله‌های FF نسبت به دسته رکورد زلزله‌های NP است.

۲-۳- جابه‌جایی نسبی طبقات

در شکل (۸) درصد نسبت جابه‌جایی نسبی طبقات به ارتفاع برای ساختمان‌های پیچشی نرم و سخت در جهت Y مشاهده می‌شود. در ساختمان‌های پیچشی سخت، حداکثر نیاز جابه‌جایی نسبی طبقات مربوط به دسته رکورد زلزله FD در پایین سازه رخ می‌دهد که با افزایش ارتفاع ساختمان، حداکثر نیاز نیز افزایش می‌یابد. برای ساختمان‌های پیچشی سخت حداکثر اختلاف جابه‌جایی نسبی طبقات مابین دسته رکورد زلزله‌های FD با NP و FF برای ساختمان ۵ طبقه برابر ۲۳ درصد و مربوط به طبقه اول است و برای ساختمان ۱۰ طبقه به‌ترتیب حدود ۱۰۷ درصد برای طبقه دوم و ۷۳ درصد در طبقه اول هستند. همچنین اختلافات مذکور برای ساختمان ۲۰ طبقه به‌ترتیب در حدود ۱۳۲ و ۹۲ درصد مربوط به طبقه سوم هستند. بدین ترتیب، برای ساختمان‌های پیچشی سخت که شکل مودی اصلی سازه انتقالی است، حداکثر نیاز جابه‌جایی نسبی طبقه تحت دسته رکورد زلزله‌های FD بیش‌تر از دو دسته رکورد زلزله‌های FF و NP و در پایین سازه واقع می‌شود و با نتایج مطالعات [۱۷، ۳۴، ۴۷] مطابقت دارد. برای ساختمان‌های پیچشی نرم، جابه‌جایی نسبی طبقه برای ساختمان ۵ طبقه برای هر سه دسته رکورد زلزله مشابه است ولی برای ساختمان ۱۰ طبقه، حداکثر نیاز در طبقات پایین اتفاق می‌افتد؛ از این‌رو حداکثر اختلاف جابه‌جایی نسبی طبقات بین دسته رکورد زلزله‌های FD با NP و FF به‌ترتیب حدود ۴۹ و ۳۵ درصد مربوط به طبقه اول هستند. همچنین برای ساختمان پیچشی نرم ۲۰ طبقه،

حداکثر نیاز توسط دسته رکورد زلزله‌های FD در طبقات پایین واقع شده است و حداکثر اختلاف جابه‌جایی نسبی طبقات بین دسته رکورد زلزله‌های FD با NP و FF به‌ترتیب حدود ۴۴ درصد در طبقه سوم و ۲۳ درصد برای طبقه اول هستند؛ ولی حداکثر نیاز سازه برای دسته رکورد زلزله FF در طبقات بالا بوده و حاکی از تحریک بیش‌تر مودهای بالاتر در این ساختمان در مقایسه با ساختمان ۲۰ طبقه پیچشی سخت است و حداکثر اختلاف مابین دسته رکورد زلزله FF با FD برابر ۱۲ درصد و مربوط به طبقه ۱۴ است. برای ساختمان ۲۰ طبقه پیچشی نرم تحریک مودهای بالاتر در هر سه دسته رکورد زلزله مشهود است و همچنین در ساختمان پیچشی سخت ۲۰ طبقه، مشارکت مودهای بالاتر برای دو دسته رکورد زلزله‌های FF و NP نمایان است ولی برای دسته رکورد زلزله FD حداکثر نیاز در طبقه پایین بوده و دلالت بر حاکمیت مود اول است. بدین ترتیب، برای ساختمان‌های پیچشی نرم و سخت ۵ و ۱۰ طبقه (با پرپود کوتاه)، صرف‌نظر از مقاومت برش پایه سازه، حداکثر نیاز شکل‌پذیری تحت دسته رکورد زلزله‌های FD، نزدیک پایه واقع می‌شود و در ساختمان‌های با پرپود بلند، برای ساختمان پیچشی نرم ۲۰ طبقه که دارای برش پایه بزرگ‌تر نسبت به ساختمان پیچشی سخت است حداکثر نیاز شکل‌پذیری طبقه در قسمت بالایی سازه رخ می‌دهد؛ درحالی‌که کاهش در مقاومت سازه‌ای موجب می‌شود حداکثر نیازها به پایه منتقل گردد که با نتیجه مطالعه [۴۵] مطابقت دارد. همچنین لازم به ذکر است که در ساختمان‌های ۲۰ طبقه، با عنایت به این که جابه‌جایی طبقات بالایی بیش‌تر از طبقات پایینی است، مشارکت مودهای بالاتر، برای دسته رکورد زلزله FF بیش‌تر از دسته رکورد زلزله‌های نزدیک گسل NP و FD است که این نتیجه با نتایج مطالعات [۴۱، ۴۷] مطابقت دارد.

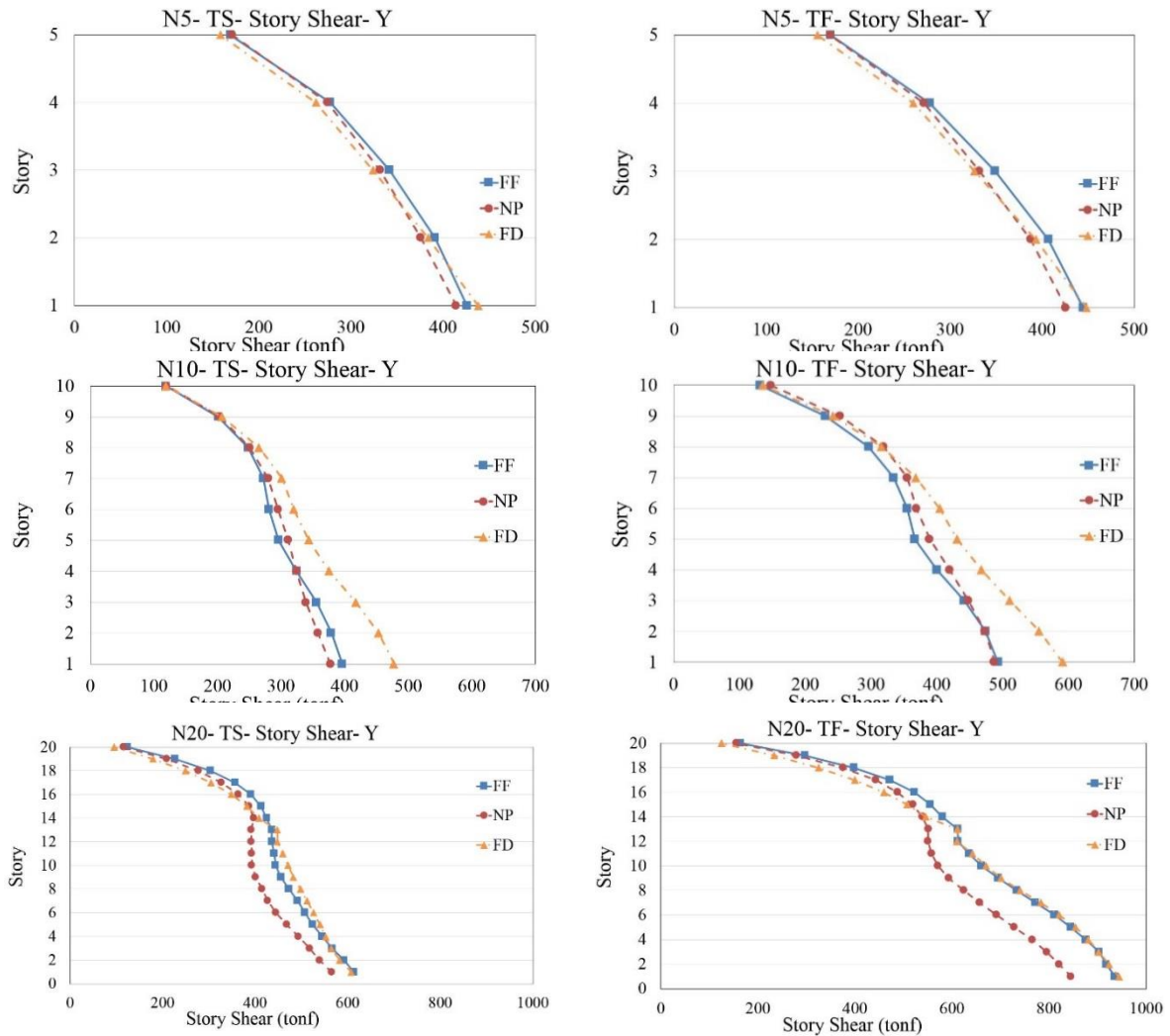


شکل ۸- جابه‌جایی نسبی طبقات برای مرکز جرم طبقات در جهت Y به ترتیب شکل‌های سمت چپ: ساختمان‌های پیچشی سخت و شکل‌های سمت راست: ساختمان‌های پیچشی نرم

FF بیش‌تر از نتایج حاصل از دسته رکورد زلزله‌های نزدیک گسل است که بیش‌ترین اختلاف مابین دسته رکورد زلزله‌های FF با FD برای ساختمان ۲۰ طبقه پیچشی نرم و سخت به ترتیب به میزان ۲۳ و ۲۴ درصد و هر دو مربوط به طبقه ۲۰ است. همچنین برای ساختمان پیچشی سخت ۲۰ طبقه، نیروی برشی طبقات در طبقات پایین و میانی ساختمان برای دسته رکورد زلزله‌های FD بیش‌تر از FF است؛ بنابراین، برای ساختمان‌های ۲۰ طبقه با مشارکت موده‌های بالاتر در دسته رکورد زلزله‌های FF، اختلاف برش پایه بین دو دسته رکورد زلزله‌های FF و FD کم می‌شود. همچنین، در ساختمان‌های مورد بررسی توزیع نیروی برش طبقات، حاکی از غالب بودن مود اول برای دسته رکورد زلزله‌های FD است.

۳-۳- برش طبقات

شکل (۹) برش طبقات را برای ساختمان‌های پیچشی نرم و سخت ۵، ۱۰ و ۲۰ طبقه نشان می‌دهد. نمودارها حاکی از آن است که در ساختمان‌های پیچشی نرم و سخت ۵ طبقه، برش طبقات برای هر سه دسته رکورد زلزله تقریباً مشابه است ولی برای ساختمان‌های ۱۰ طبقه نتایج نشان از افزایش نیروی برش طبقات برای دسته رکورد زلزله FD دارد؛ چنانچه حداکثر اختلاف مابین دسته رکورد زلزله FD با FF برای ساختمان‌های پیچشی نرم و سخت به میزان ۲۰ درصد و در طبقه اول است. برای ساختمان‌های ۲۰ طبقه با توجه به مشارکت موده‌های بالاتر در دسته رکورد زلزله‌های FF، نیروی برشی طبقات در طبقات بالاتر برای دسته رکورد زلزله‌های



شکل ۹- برش طبقات در جهت Y به ترتیب شکل‌های سمت چپ: ساختمان‌های پیش‌سخت و شکل‌های سمت راست: ساختمان‌های پیش‌سخت نرم

۳-۴- نیاز شکل‌پذیری مهاربندها

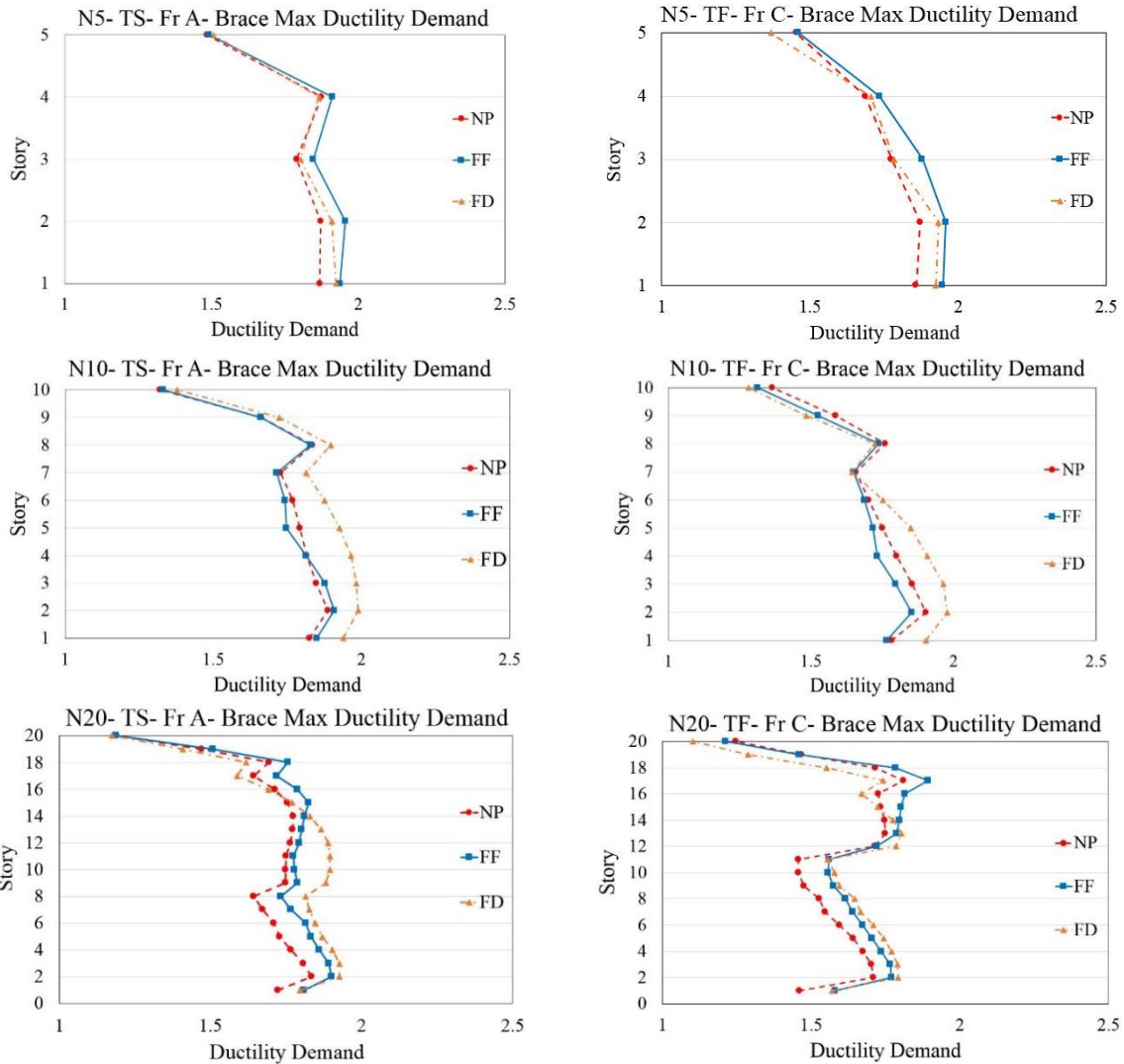
اعضای مهاربندی در کشش تسلیم می‌شوند و در فشار کماتس می‌یابند. نیاز شکل‌پذیری مهاربندها برای تغییر طول پلاستیک متناظر با حداکثر نیروی کششی به‌عنوان نیاز شکل‌پذیری حداکثر و برای نیروی فشاری حداکثر به‌عنوان نیاز شکل‌پذیری حداقل محاسبه شده است و به‌دلیل مشابه بودن جواب‌ها برای چهار مهاربند، فقط برای یک مهاربند در هر قاب ارائه شده است و از ارائه نمودارها برای سایر مهاربندها صرف‌نظر شده است. برای اعضای مهاربندی، نیاز شکل‌پذیری به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\text{Braces: } \mu_{ii} = 1 + (u_p / u_y) \quad (1)$$

که (u_p) حداکثر تغییر شکل پلاستیک عضو و (u_y) تغییر شکل در ابتدای تسلیم می‌باشد.

شکل (۱۰)، نیاز شکل‌پذیری حداکثر مهاربندها برای قاب A در ساختمان‌های پیش‌سخت و قاب C برای ساختمان‌های پیش‌سخت نرم را نمایش می‌دهد. نمودارها حاکی از تسلیم مهاربندها برای همه طبقات در هر سه دسته رکورد زلزله برای همه ساختمان‌های مورد مطالعه می‌باشند. نمودارها برای ساختمان‌های پیش‌سخت نرم و سخت ۵ طبقه نشان می‌دهند که نتایج برای هر سه دسته رکورد زلزله تا حدودی یکسان هستند. همچنین برای ساختمان‌های ۱۰ طبقه نمودارها حاکی از افزایش اندک مقادیر برای دسته رکورد زلزله‌های FD در طبقات پایین و میانی سازه و غالب بودن مود اول در این دسته رکورد زلزله‌ها است. بیش‌ترین نیاز در دسته رکورد زلزله FD برای ساختمان‌های پیش‌سخت نرم و سخت ۱۰ طبقه به‌ترتیب برابر ۱/۹۸ و ۱/۹۹ در طبقه دوم هستند

و حداکثر اختلاف مابین دسته رکورد زلزله‌های FD با FF برای هر دو ساختمان حدود ۱۰ درصد است.



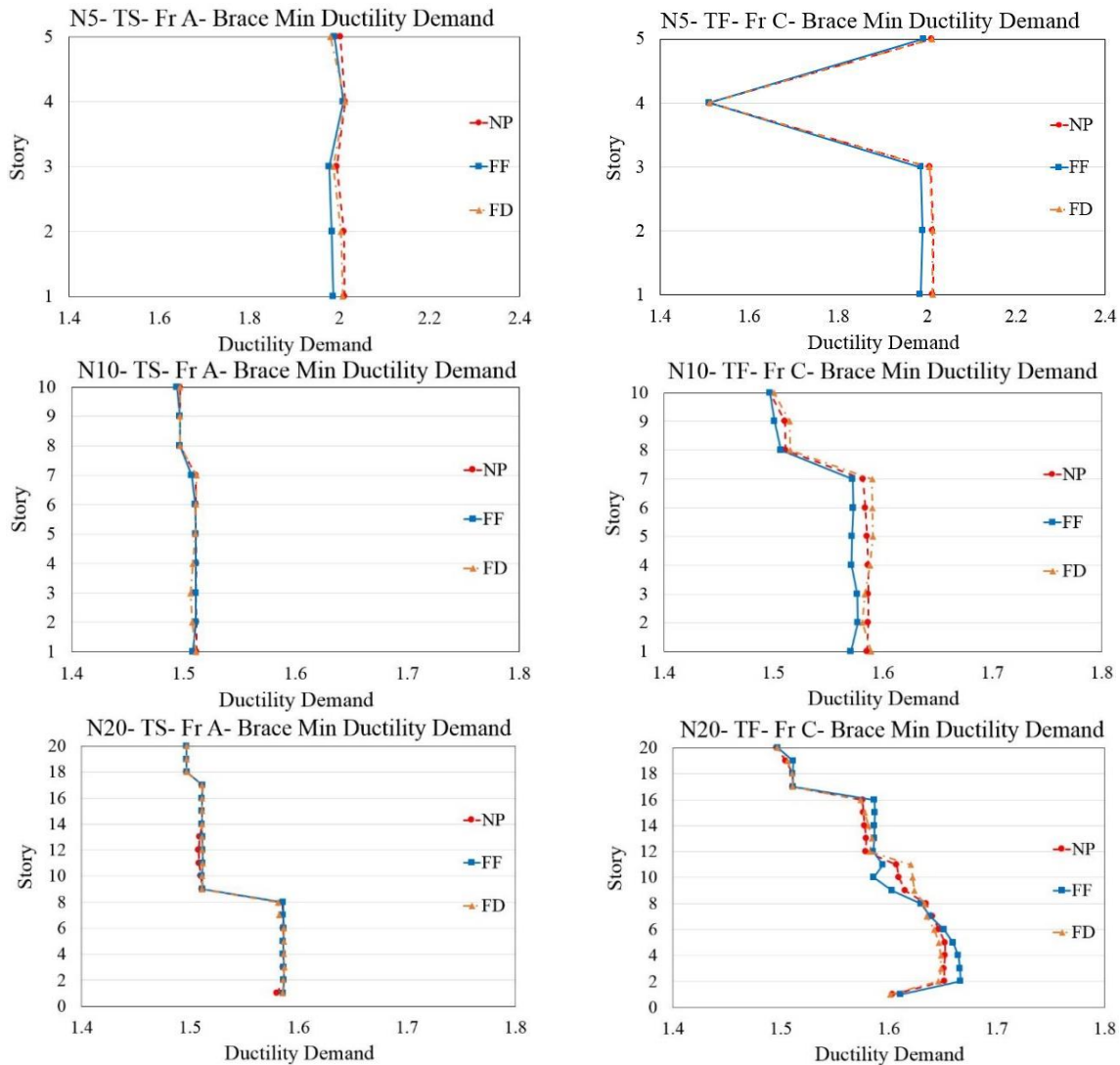
شکل ۱۰- نیاز شکل‌پذیری حداکثر مهاربندها در قاب‌های A و C به ترتیب شکل‌های سمت چپ: ساختمان‌های پیچشی سخت و شکل‌های سمت راست: ساختمان‌های پیچشی نرم

طبقات دوم و سوم نیز مشاهده می‌شود. بدین ترتیب، ملاحظه می‌شود اثرات FD برای همه ساختمان‌ها در طبقات پایین سازه موجب افزایش نیاز سازه می‌شود؛ درحالی‌که، برای ساختمان ۲۰ طبقه پیچشی نرم مشارکت موده‌های بالاتر بیش‌تر است. در شکل (۱۱) نمودارهای نیاز شکل‌پذیری حداقل مهاربندهای قاب A و قاب C به ترتیب برای ساختمان‌های پیچشی سخت و نرم حاکی از این است که نتایج برای هر سه دسته رکورد زلزله‌های FF، NP و FD مشابه هستند. همچنین ملاحظه می‌شود که نیاز شکل‌پذیری کم‌تر در ساختمان پیچشی نرم ۵ طبقه مربوط به مهاربند طبقه چهارم و برای ساختمان ۱۰ طبقه نیز برای طبقات بالاتر است؛ درحالی‌که برای ساختمان‌های پیچشی سخت ۵ و ۱۰

برای ساختمان ۲۰ طبقه پیچشی سخت، علیرغم مشارکت موده‌های بالاتر، حداکثر نیاز برای هر سه دسته رکورد زلزله در طبقات پایین سازه رخ داده است و بیش‌ترین مقادیر برای سه دسته رکورد زلزله‌های NP، FF و FD به ترتیب ۱/۹۰، ۱/۸۳ هر دو برای طبقه دوم و ۱/۹۳ در طبقات دوم و سوم هستند. همچنین برای ساختمان ۲۰ طبقه پیچشی نرم، مشارکت موده‌های بالاتر به‌ویژه برای دسته رکورد زلزله‌های FF محسوس است؛ بنابراین، حداکثر نیاز در طبقات بالا تحت دسته رکورد زلزله FF مشاهده می‌شود و بیش‌ترین مقادیر نیاز برای دسته رکورد زلزله‌های NP، FF و FD به ترتیب ۱/۸۹، ۱/۸۱ هر دو در طبقه ۱۷ و ۱/۸۰ در طبقه ۱۳ هستند ولی برای دسته رکورد زلزله‌های FD مقادیر نیاز ۱/۷۹ در



طبقه نمودارها در ارتفاع ساختمان یکنواخت‌تر می‌باشند. برای ساختمان‌های پیش‌سختی نرم و سخت ۲۰ طبقه، نیاز شکل‌پذیری در طبقات پایین‌تر بیش‌تر از طبقات میانی و بالاتر است.

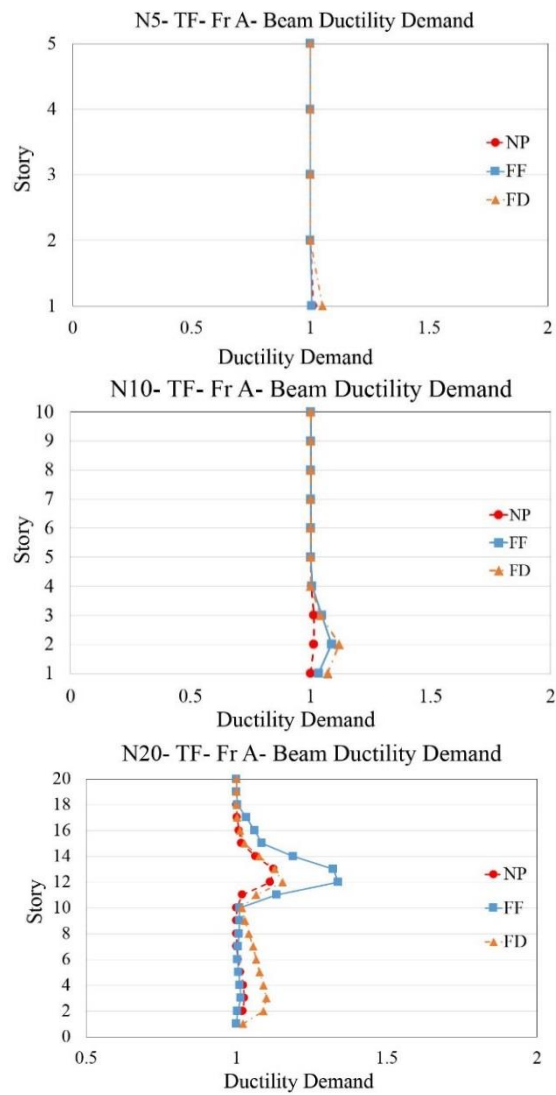
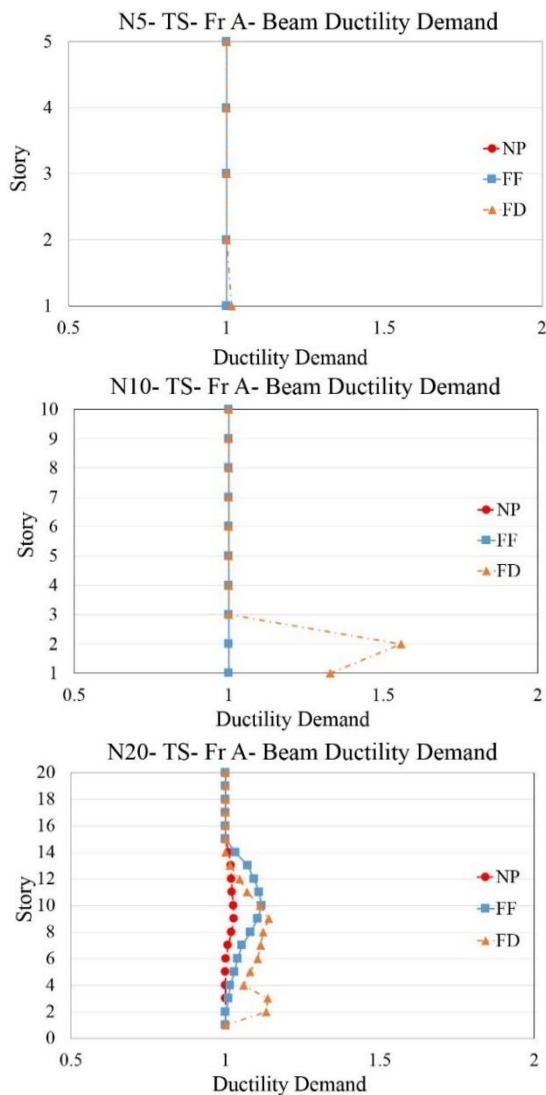


شکل ۱۱- نیاز شکل‌پذیری حداقل مهاربندها در قاب‌های A و C به ترتیب شکل‌های سمت چپ: ساختمان‌های پیش‌سخت و شکل‌های سمت راست: ساختمان‌های پیش‌سختی نرم

بنابراین برای ساختمان‌های پیش‌سختی نرم و سخت ۵ طبقه تسلیم تیر برای طبقه اول به صورت جزئی و تحت دسته رکورد زلزله FD است.

۳-۵- نیاز شکل‌پذیری تیرها

نیاز شکل‌پذیری تیرهای وسط قاب A برای ساختمان‌های پیش‌سختی نرم و سخت ۵، ۱۰ و ۲۰ طبقه در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود. با توجه به این که اولویت تسلیم تیرها بعد از تسلیم مهاربندها است،



شکل ۱۲- نیاز شکل پذیری تیرهای قاب A به ترتیب شکل های سمت چپ: ساختمان های پیچشی سخت و شکل های سمت راست: ساختمان های پیچشی نرم

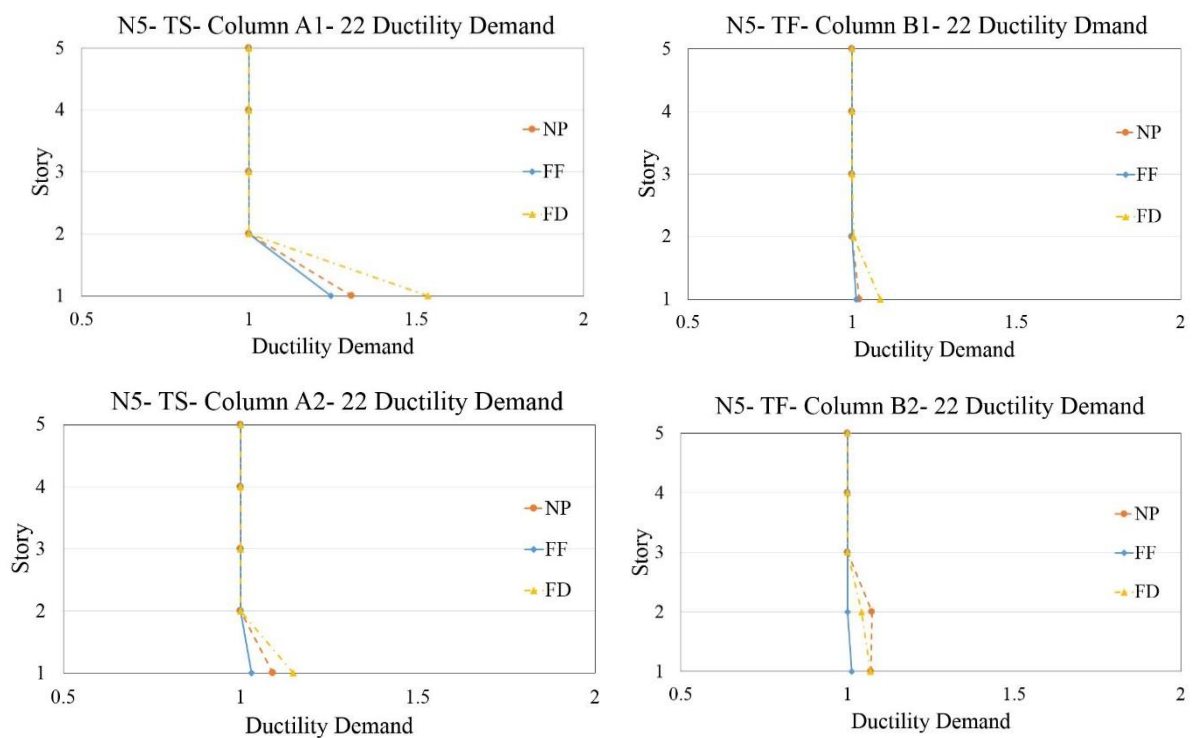
زلزله حوزه نزدیک گسل FD در طبقات پایین موجب افزایش نیاز شده است ولی بیشترین نیازها تحت دسته رکورد زلزله FF و FD در ساختمان پیچشی نرم به ترتیب $1/34$ و $1/15$ و هر دو مربوط به طبقه ۱۲ هستند و برای ساختمان پیچشی سخت به ترتیب $1/14$ در طبقات ۳ و ۹ و $1/12$ مربوط به طبقه ۱۰ است. بدین ترتیب، بیشترین نیاز برای ساختمان ۲۰ طبقه پیچشی سخت تحت دسته رکورد زلزله های FD ولی برای ساختمان پیچشی نرم تحت دسته رکورد زلزله های FF مشاهده می شود. همچنین قابل ذکر است که اثرات FD برای همه ساختمان ها در طبقات پایین موجب افزایش نیاز شده است ولی برای سازه های ۲۰ طبقه، اثرات مودهای بالاتر بیش تر بوده و مودهای بالاتر غالب هستند.

برای ساختمان های ۱۰ طبقه تسلیم تیرها در طبقات پایین بوده و نشان از غالب بودن مود اول در این ساختمان ها دارد. همچنین ملاحظه می شود برای ساختمان های ۱۰ طبقه نیاز شکل پذیری برای دسته رکورد زلزله FD بیش تر از دو دسته رکورد زلزله دیگر NP و FF است که برای ساختمان پیچشی سخت این اختلاف محسوس بوده و حداکثر مقدار نیاز تحت دسته رکورد زلزله FD مربوط به طبقه دوم برای ساختمان پیچشی سخت برابر با مقدار $1/56$ ، بیش تر از ساختمان پیچشی نرم با مقدار $1/12$ است. برای ساختمان های ۲۰ طبقه پیچشی نرم و سخت، تسلیم تیرها گسترده تر از ساختمان های ۵ و ۱۰ طبقه هستند و مشارکت مودهای بالاتر برای هر سه دسته رکورد زلزله قابل مشاهده است. برای هر دو ساختمان ۲۰ طبقه پیچشی نرم و سخت، دسته رکورد

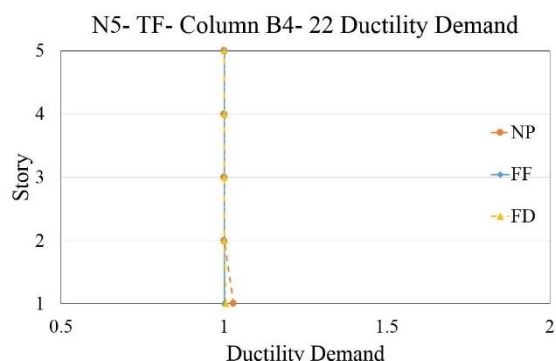
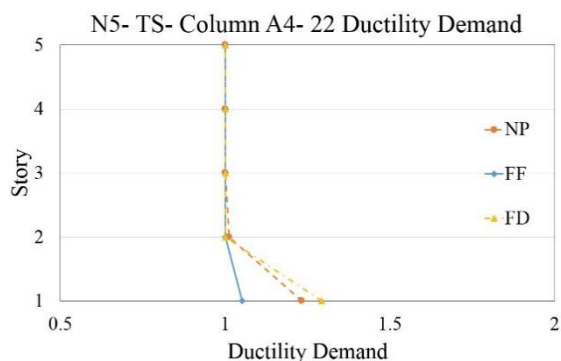
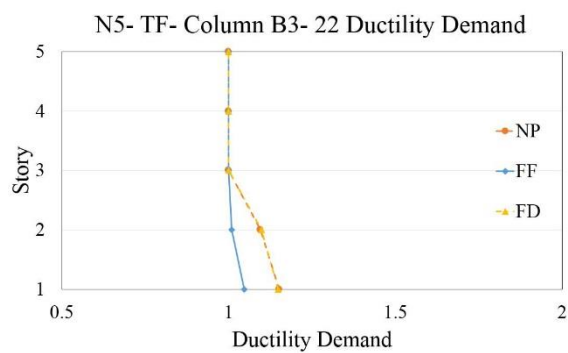
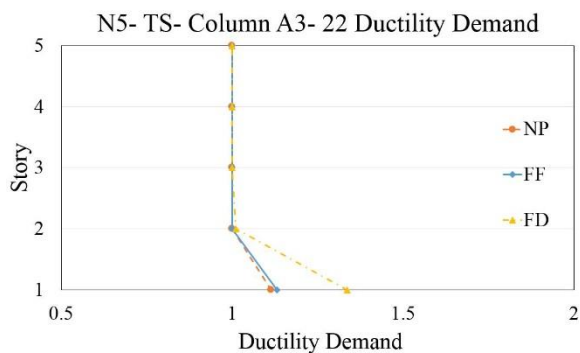
۳-۶- نیاز شکل پذیری ستون‌ها

شکل‌های (۱۳) الی (۱۵)، نیاز شکل‌پذیری ستون‌ها را برای ساختمان‌های پیچشی نرم و سخت نشان می‌دهند. با مقایسه ساختمان‌های پیچشی نرم و سخت ملاحظه می‌شود که با توجه به محل قرارگیری قاب‌های مهاربندی شده برای ساختمان‌های پیچشی سخت، ستون‌های محور A و برای ساختمان‌های پیچشی نرم ستون‌های محور B بحرانی است. از این رو، با توجه به بحرانی بودن و رعایت اختصار، فقط نتایج ستون‌های قاب‌های A و B به ترتیب برای ساختمان‌های پیچشی سخت و نرم ارائه شده‌اند.

شکل (۱۳)، نیاز شکل‌پذیری ستون‌ها در قاب‌های A و B را به ترتیب برای ساختمان‌های پیچشی سخت و نرم ۵ طبقه نشان می‌دهد. برای ساختمان پیچشی سخت ۵ طبقه، ملاحظه می‌شود که تحت هر سه دسته رکورد زلزله ستون‌های طبقه اول تسلیم شده‌اند و مقادیر نیاز برای دسته رکورد زلزله FD بیش‌تر از دو دسته رکورد زلزله دیگر است و بیش‌ترین نیاز مربوط به دسته رکورد زلزله FD در ستون A1 و برابر $1/53$ است. همچنین حداکثر اختلاف نیاز مابین دسته رکورد زلزله FD با FF و NP به ترتیب مربوط به ستون‌های A1 و A4 حدود ۲۳ درصد و A3 برابر ۲۰ درصد هستند.



شکل ۱۳- نیاز شکل‌پذیری ستون‌ها به ترتیب شکل‌های سمت چپ: ساختمان‌های پیچشی سخت و شکل‌های سمت راست: ساختمان‌های پیچشی نرم

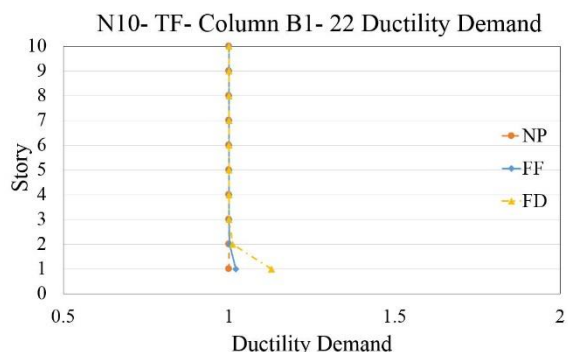
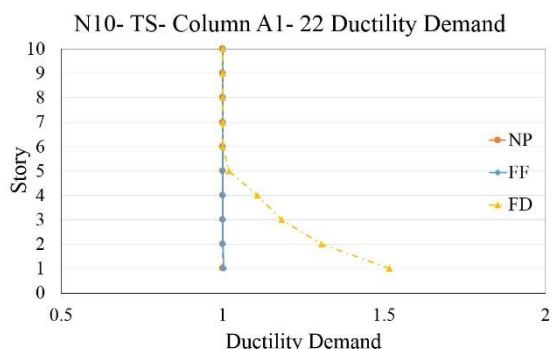


ادامه شکل ۱۳- نیاز شکل پذیری ستون‌ها به ترتیب شکل‌های سمت چپ: ساختمان‌های پیچشی سخت و شکل‌های سمت راست: ساختمان‌های پیچشی نرم

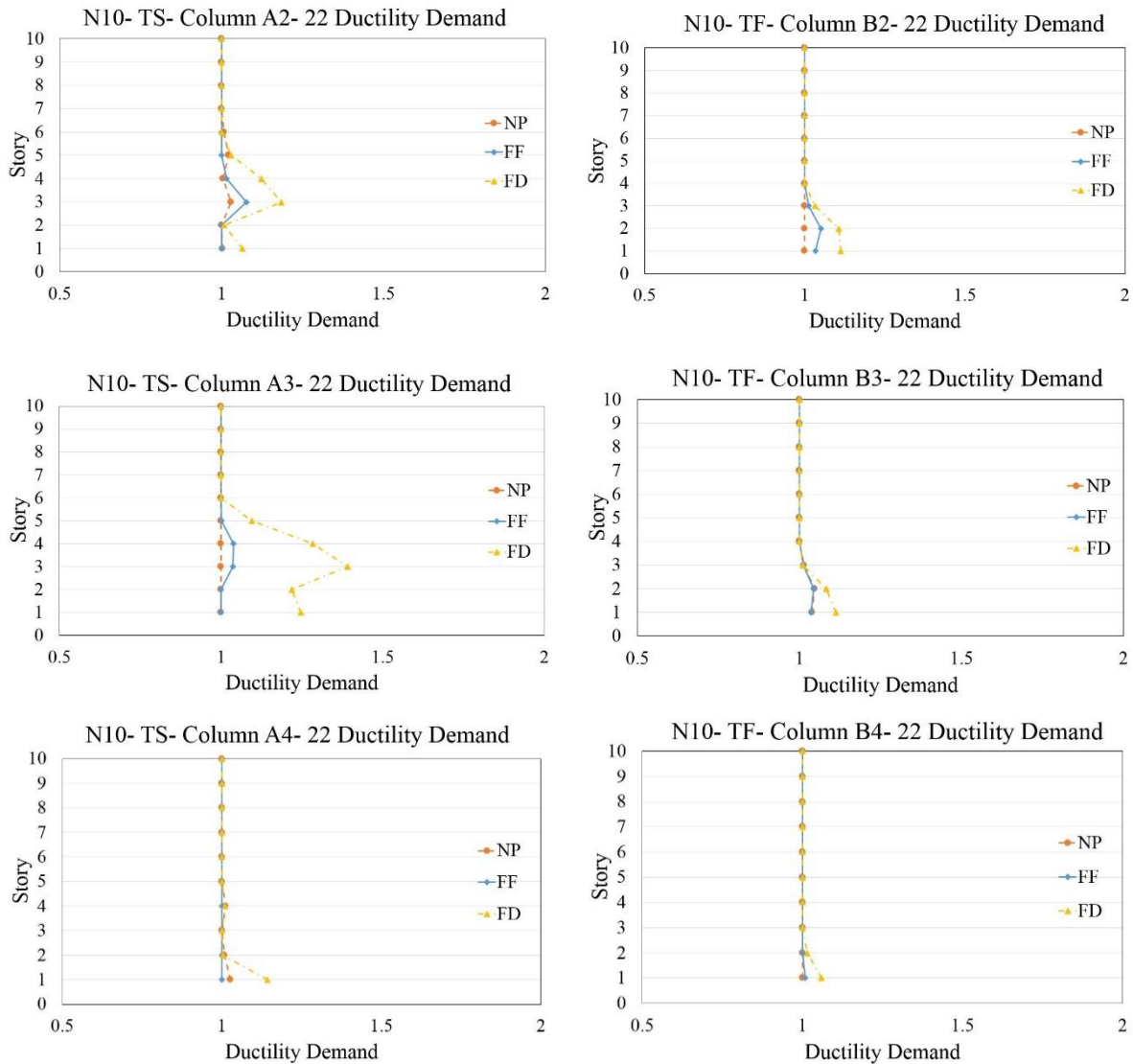
نیاز شکل‌پذیری ستون‌های واقع در قاب‌های A و B به ترتیب برای ساختمان‌های پیچشی سخت و نرم ۱۰ طبقه در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود.

نمودارها برای ستون‌ها در ساختمان‌های ۱۰ طبقه در مقایسه با ساختمان ۵ طبقه پیچشی سخت، تسلیم گسترده‌تری را نشان می‌دهند. برای همه ستون‌ها، دسته رکورد زلزله‌های FD نیازهای بیش‌تری نسبت به دو دسته زلزله‌های دیگر NP و FF به سازه تحمیل می‌کنند و این نیازها در طبقات پایین سازه بوده و حاکی از حاکمیت مود اول در این سازه است.

برای ساختمان پیچشی نرم ۵ طبقه، با توجه به این که ستون‌های B2 و B3 در محل تقاطع قاب‌های مهاربندی در دو جهت X و Y می‌باشند، تسلیم ستون‌ها در دو طبقه پایینی رخ داده است و نیاز بیش‌تری را نشان می‌دهند که این مقادیر برای دسته رکورد زلزله‌های حوزه نزدیک گسل NP و FD بیش‌تر از حوزه دور از گسل FF است. حداکثر مقدار نیازها برای ستون B3 تحت دسته رکورد زلزله‌های NP و FD برابر ۱/۱۵ در طبقه اول هستند و اختلاف آن با دسته رکورد زلزله‌های FF حدود ۱۰ درصد است.



شکل ۱۴- نیاز شکل‌پذیری ستون‌ها به ترتیب شکل‌های سمت چپ: ساختمان‌های پیچشی سخت و شکل‌های سمت راست: ساختمان‌های پیچشی نرم



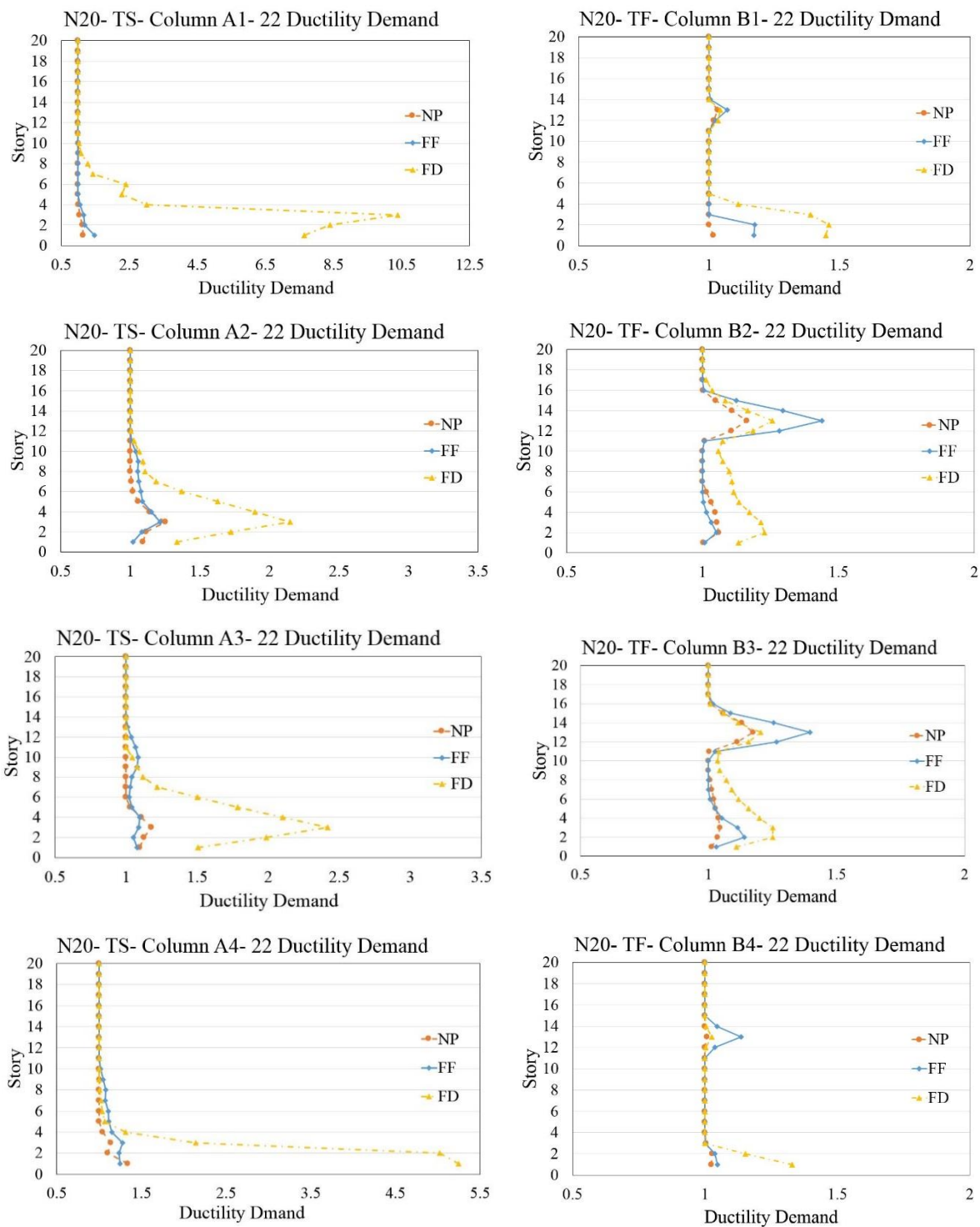
ادامه شکل ۱۴- نیاز شکل‌پذیری ستون‌ها به ترتیب شکل‌های سمت چپ: ساختمان‌های پیش‌سختی سخت و شکل‌های سمت راست: ساختمان‌های پیش‌سختی نرم

B2, B3 و B4 تحت دسته رکورد زلزله‌های FD به ترتیب ۱/۱۳، ۱/۱۱، ۱/۱۱ و ۱/۰۶ در طبقه اول هستند و حداکثر اختلاف نیاز ستون‌ها بین دسته رکورد زلزله‌های FD با FF و NP به ترتیب حدود ۱۰ درصد و مربوط به ستون A3 و ۱۱ درصد در ستون B2 است.

شکل (۱۵)، نیاز شکل‌پذیری ستون‌های قاب A و B را به ترتیب برای ساختمان پیش‌سختی سخت و نرم ۲۰ طبقه نشان می‌دهد. برای ساختمان ۲۰ طبقه پیش‌سختی سخت، نیازها تحت دسته رکورد زلزله‌های FD به‌طور محسوسی بیش‌تر از دو دسته رکورد زلزله‌های FF و NP است که در طبقات پایین سازه رخ

ملاحظه می‌شود، بیش‌ترین نیازها برای ستون‌های A1، A2، A3 و A4 به ترتیب برابر ۱/۵۲ در طبقه اول، ۱/۱۸، ۱/۳۹ مربوط به طبقه سوم و ۱/۱۴ برای طبقه اول هستند. حداکثر اختلاف مابین دسته رکورد زلزله‌های FD با NP و FF حدود ۵۱ درصد و مربوط به ستون A1 است. برای ساختمان ۱۰ طبقه پیش‌سختی نرم، همه ستون‌ها در طبقه اول تحت دسته رکورد زلزله‌های FD تسلیم‌شده‌اند و نیاز واردشده به سازه برای FD بیش‌تر از دو دسته رکورد زلزله دیگر NP و FF است. همچنین برای ستون‌های B2 و B3 به دلیل واقع‌شدن در محل تقاطع قاب‌های مهاربندی دو راستا تسلیم بیش‌تر از سایر ستون‌ها و در طبقات اول تا سوم می‌باشد. حداکثر نیازها برای ستون‌های B1،

داده است و در بعضی از ستون‌ها تسلیم به سمت طبقات میانی پیش رفته است.



شکل ۱۵- نیاز شکل‌پذیری ستون‌ها به ترتیب شکل‌های سمت چپ: ساختمان‌های پیچشی سخت و شکل‌های سمت راست: ساختمان‌های پیچشی نرم

و A3 برای دسته رکورد زلزله‌های FF مشارکت مودهای بالاتر مشاهده می‌شود ولی حداکثر مقادیر نیاز در طبقات پایین واقع شده است و برای دسته رکورد زلزله‌های NP نیز حداکثر مقادیر

حداکثر مقادیر نیاز تحت دسته رکورد زلزله‌های FD برای ستون‌های A1، A2، A3 و A4 به ترتیب برابر ۱۰/۳۸، ۲/۱۵، ۲/۴۲ مربوط به طبقه سوم و ۵/۲۵ در طبقه اول است. در ستون‌های A2



نیاز در طبقات پایین تر اتفاق افتاده است. حداکثر مقادیر نیاز تحت دسته رکورد زلزله‌های FF و NP به ترتیب برابر $1/48$ در ستون A1 و $1/34$ برای ستون A4 هستند. حداکثر اختلاف بین دسته رکوردهای زلزله FD با NP و FF به ترتیب 894 و 798 درصد برای طبقه سوم و مربوط به ستون A1 است. بدین ترتیب، در ساختمان ۲۰ طبقه پیچشی سخت برای هر سه دسته رکورد زلزله پیرو مود اول غالب است. برای ساختمان ۲۰ طبقه پیچشی نرم، علاوه بر تسلیم ستون‌ها در طبقات پایین ساختمان، در برخی از ستون‌ها با مشارکت مودهای بالاتر برای هر سه دسته رکورد زلزله تسلیم در طبقات میانی و بالاتر مشاهده می‌شود. حداکثر مقادیر نیاز برای ستون‌های B1, B2, B3 و B4 تحت دسته رکورد زلزله‌های FD به ترتیب برابر $1/46$ برای طبقه دوم، $1/26$ در طبقه ۱۳، $1/25$ در طبقات دوم و سوم و همچنین $1/33$ برای طبقه اول است و مقادیر مذکور در اثر دسته رکورد زلزله‌های FF به ترتیب برابر $1/17$ در طبقه دوم، $1/44$ برای طبقه ۱۳، $1/40$ در طبقه ۱۳ و $1/14$ برای طبقه ۱۳ هستند. همچنین بیشترین مقدار نیاز تحت دسته رکورد زلزله NP حدود $1/17$ برای طبقه ۱۳ و مربوط به ستون‌های B2 و B3 است. حداکثر اختلاف نیاز بین دسته رکورد زلزله‌های FD با FF و NP به ترتیب برابر 39 درصد در طبقه سوم و 46 درصد برای طبقه دوم و مربوط به ستون B1 هستند. از این رو، برای دسته رکورد زلزله‌های FF مشارکت مودهای بالاتر بیش‌تر از دسته رکوردهای NP و FD است.

با مرور نتایج ستون‌ها مشاهده می‌شود که برای ساختمان‌های پیچشی سخت، حداکثر نیازها تحت دسته رکورد زلزله‌های FD و مربوط به ستون‌های A1 واقع در طبقات پایین ساختمان هستند. بدین ترتیب، در این ساختمان‌ها، مود اول غالب است. همچنین برای ساختمان‌های پیچشی نرم، ستون‌های B2 و B3 در ارتفاع ساختمان بیش‌تر تسلیم شده‌اند. مشاهده می‌شود که برای ساختمان‌های ۲۰ طبقه، مشارکت مودهای بالاتر برای ساختمان پیچشی سخت کم‌تر بوده و مود اول غالب است؛ در حالی که برای ساختمان پیچشی نرم، دسته رکورد زلزله‌های FD، بیش‌ترین نیاز را برای ستون‌های کناری در طبقات پایین و برای ستون‌های میانی در طبقات پایین و میانی تحمیل می‌کند. بدین ترتیب، تحت دسته رکورد زلزله‌های FD توجه ویژه‌ای باید به طراحی اعضای طبقات پایین ساختمان‌ها داشت که با نتیجه مطالعه [۳۰] مطابقت دارد. همچنین ملاحظه می‌شود که تحریک مودهای بالاتر تحت دسته

رکورد زلزله‌های FF برای ساختمان‌های ۲۰ طبقه برای ساختمان پیچشی نرم خیلی محسوس است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثرات زلزله‌های حوزه نزدیک گسل بدون پالس و شامل پالس روی ساختمان‌های متقارن پیچشی نرم و سخت ۵، ۱۰ و ۲۰ طبقه بررسی شد و با نتایج زلزله‌های حوزه دور مقایسه گردید. تحلیل‌های تاریخیچه زمانی جهت بررسی اثر سه دسته رکورد زلزله به‌طور جداگانه برای جفت‌های X و Y انجام شد. نتایج به‌صورت میانگین حداکثر مقادیر نیازهای لرزه‌ای جابه‌جایی طبقات، جابه‌جایی نسبی طبقات، برش طبقات و همچنین نیاز شکل‌پذیری مهاربندها، تیرها و ستون‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج زیر برای ساختمان‌های مورد مطالعه قابل بیان هستند:

- جابه‌جایی طبقات برای ساختمان‌های پیچشی سخت تحت دسته رکورد زلزله‌های FD بیش‌تر از نتایج به‌دست‌آمده از دسته رکورد زلزله‌های NP و FF هستند؛ چنانچه این اختلاف با افزایش ارتفاع ساختمان و پیرو سازه، افزایش می‌یابد و این اختلاف بین آن‌ها برای ساختمان ۲۰ طبقه به ترتیب برابر 115 و 79 درصد است. جابه‌جایی طبقات برای ساختمان‌های پیچشی نرم برای ساختمان ۵ طبقه و هر سه دسته رکورد زلزله مشابه است ولی برای ساختمان ۱۰ و ۲۰ طبقه نتایج برای دسته رکورد زلزله FD بیش‌تر از دو دسته رکورد زلزله دیگر است. به‌طور کلی جابه‌جایی طبقات برای دسته رکورد زلزله‌های FD، با افزایش ارتفاع ساختمان و پیرو ساختمان‌ها و با توجه به بیش‌تر بودن شتاب طیفی دسته رکورد زلزله‌های FD در پیروهای بلندتر نسبت به دسته زلزله‌های FF و NP، برای هر دو نوع ساختمان پیچشی نرم و سخت افزایش می‌یابد. همچنین جابه‌جایی طبقات برای دسته رکورد زلزله‌های FD برای ساختمان‌های پیچشی سخت بیش‌تر از ساختمان‌های پیچشی نرم است که این امر با افزایش ارتفاع ساختمان، افزایش می‌یابد؛ بنابراین، ساختمان‌های پیچشی سخت بیش‌تر تحت تأثیر دسته رکورد زلزله‌های FD هستند.

- برای ساختمان‌های پیچشی سخت، حداکثر نیاز جابه‌جایی نسبی طبقات تحت دسته رکورد زلزله‌های FD در طبقات پایین ساختمان است و با افزایش پیرو ساختمان، حداکثر نیازها تحت دسته رکورد زلزله‌های FD و اختلاف آن‌ها با دسته رکورد



زلزله‌های NP و FF افزایش می‌یابد؛ چنانچه اختلاف بین آن‌ها برای ساختمان ۲۰ طبقه به ترتیب برابر ۱۳۲ و ۹۲ درصد می‌رسد. برای ساختمان‌های پیچشی نرم، در ساختمان ۵ طبقه نتایج برای هر سه دسته رکورد زلزله مشابه است ولی برای ساختمان ۱۰ طبقه مشابه ساختمان پیچشی سخت حداکثر نیاز در طبقات پایین سازه و تحت دسته رکورد زلزله‌های FD رخ می‌دهد؛ اگرچه در مقایسه با ساختمان پیچشی سخت اختلاف نتایج با دسته رکورد زلزله‌های NP و FF کم‌تر است. برای ساختمان پیچشی نرم ۲۰ طبقه با مشارکت مودهای بالاتر، حداکثر نیاز جابه‌جایی نسبی طبقات برای هر سه دسته رکورد زلزله در طبقات بالاتر رخ می‌دهد.

- برش طبقات برای ساختمان‌های پیچشی نرم و سخت ۵ طبقه تقریباً مشابه بوده ولی برای ساختمان‌های ۱۰ طبقه نتایج نیروی برش طبقات برای دسته رکورد زلزله FD بیش‌تر است. برای ساختمان‌های ۲۰ طبقه با توجه به مشارکت مودهای بالاتر در دسته رکورد زلزله‌های FF، نیروی برشی طبقات در طبقات بالاتر برای دسته رکورد زلزله‌های FF بیش‌تر از نتایج حاصل از دسته رکورد زلزله‌های نزدیک گسل است. همچنین، در ساختمان‌های مورد بررسی توزیع نیروی برش طبقات، حاکی از غالب بودن مود اول برای دسته رکورد زلزله‌های FD است.

- نیاز شکل‌پذیری حداکثر مهاربندها برای ساختمان‌های ۵ طبقه پیچشی نرم و سخت برای هر سه دسته رکورد زلزله مشابه می‌باشند ولی برای ساختمان‌های پیچشی نرم و سخت ۱۰ طبقه و ساختمان پیچشی سخت ۲۰ طبقه، حداکثر نیاز تحت دسته رکورد زلزله FD و در طبقات پایین است. برای ساختمان پیچشی نرم ۲۰ طبقه، با مشارکت مودهای بالاتر، حداکثر نیاز برای هر سه دسته رکورد زلزله در طبقات بالای سازه واقع می‌شوند. شکل‌پذیری حداقل مهاربندها برای هر سه دسته رکورد زلزله برای ساختمان‌های مورد بررسی مشابه هستند.

- در ساختمان‌های ۵ طبقه، نیاز شکل‌پذیری تیرها تحت دسته رکورد زلزله‌های FD، اندک است. همچنین برای ساختمان‌های ۱۰ طبقه، حداکثر شکل‌پذیری نیاز تیرها در طبقات پایین مشاهده می‌شود و نیاز شکل‌پذیری تیرها برای ساختمان پیچشی سخت نسبت به ساختمان پیچشی نرم، بیش‌تر است. برای ساختمان‌های

۲۰ طبقه، تسلیم تیرها با افزایش تعداد طبقات به سمت طبقات بالاتر گسترش می‌یابد و مشارکت مودهای بالاتر قابل‌مشاهده است. حداکثر نیاز شکل‌پذیری تحت دسته رکورد زلزله‌های FD برای ساختمان پیچشی سخت ۲۰ طبقه، علیرغم مشارکت مودهای بالاتر، حداکثر نیاز در طبقات پایین‌تر ولی برای ساختمان پیچشی نرم علیرغم تحریک مود اول در طبقات پایین، در طبقات بالا رخ داده است.

- تحت دسته رکورد زلزله‌های FD، نیاز شکل‌پذیری ستون‌ها برای ساختمان‌های پیچشی نرم و سخت در طبقات پایین سازه به‌ویژه برای ساختمان‌های پیچشی سخت بسیار محسوس است؛ چنانچه حداکثر نیاز برای ساختمان ۲۰ طبقه پیچشی سخت برابر ۱۰/۳۸ است و حداکثر اختلاف بین دسته رکورد زلزله‌های FD با NP و FF به ترتیب ۸۹۴ و ۷۹۸ درصد هستند. همچنین برای ساختمان ۲۰ طبقه پیچشی نرم، در ستون‌های میانی علاوه بر افزایش نیاز شکل‌پذیری ستون‌های طبقات پایین سازه با حاکمیت مود اول، طبقات بالاتر نیز با مشارکت مودهای بالاتر بحرانی می‌باشند.

- در ساختمان‌های پیچشی نرم و سخت ۵ و ۱۰ طبقه (ساختمان‌های با پیوند کم‌تر) تحت دسته رکورد زلزله FD، حداکثر نیاز در طبقات پایین بوده و مود اول غالب است. همچنین برای ساختمان پیچشی سخت ۲۰ طبقه با برش پایه کم‌تر نسبت به ساختمان پیچشی نرم، حداکثر نیاز برای دسته رکورد زلزله FD در طبقات پایین است ولی برای ساختمان پیچشی نرم، با افزایش برش پایه نسبت به ساختمان پیچشی سخت، حداکثر نیاز در طبقات بالاتر رخ می‌دهد.

- مشارکت مودهای بالاتر برای دسته رکورد زلزله FF برای ساختمان‌های ۲۰ طبقه بیش‌تر از دسته رکورد زلزله‌های FD و NP است؛ از این رو حداکثر نیاز در طبقات بالاتر تحت دسته رکورد زلزله‌های FF رخ می‌دهد.

- با افزایش ارتفاع ساختمان‌ها، اعضای بیش‌تری در ارتفاع ساختمان تسلیم می‌شوند و در ناحیه غیرخطی قرار می‌گیرند؛ بنابراین با افزایش ارتفاع ساختمان‌ها، اهمیت بررسی رفتار غیرخطی ساختمان‌ها، افزایش می‌یابد.

- [15] Papageorgiou, A.S., and Aki, K. (1982), "Aspects of the mechanics of earthquake rupture related to the generation of high frequency waves and the prediction of strong ground motion", *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 1, no. 2, pp. 67-74.
- [16] Archuleta, R.J. (1984), "A faulting model for the 1979 Imperial Valley earthquake", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 89, no. B6, pp. 4559-4585.
- [17] Anderson, J.C., and Bertero, V.V. (1987), "Uncertainties in establishing design earthquakes", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 113, no. 8, pp. 1709-1724.
- [18] Wald, D.J., Helmberger, D.V., and Heaton, T.H. (1991), "Rupture model of the 1989 Loma Prieta earthquake from the inversion of strong-motion and broadband teleseismic data", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 81, no. 5, pp. 1540-1572.
- [19] Stewart, J.P., Chiou, S.J., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G. and Abrahamson, N.A. (2002), "Ground motion evaluation procedures for performance-based design", *Soil dynamics and earthquake engineering*, Vol. 22, no. 9-12, pp. 765-772.
- [20] Li, S., and Xie, L.L. (2007), "Progress and trend on near-field problems in civil engineering", *Acta Seismologica Sinica*, Vol. 20, no. 1, pp. 105-114.
- [21] Lu, C. (2012), "Research on near-fault problems in earthquake engineering", *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 10, no. 5, pp. 1033-1039.
- [22] Bolt, B.A. (1971), "The san fernando valley, california, earthquake of february 9 1971: Data on seismic hazards", *Bulletin of the seismological society of America*, Vol. 61, no. 2, pp. 501-510.
- [23] Somerville, P., and Graves, R. (1993), "Conditions that give rise to unusually large long period ground motions", *The structural design of tall buildings*, Vol. 2, no. 3, pp. 211-232.
- [24] Somerville, P.G. (2002), "Characterizing near fault ground motion for the design and evaluation of bridges", In Proceedings of the 3rd national seismic conference and workshop on bridges and highways (Vol. 28, pp. 137-148).
- [25] Bertero, V.V., Mahin, S.A., and Herrera, R.A. (1978), "Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records", *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 6, no. 1, pp. 31-42.
- [26] Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W., and Wald, D.J. (1995), "Near-source ground motion and its effects on flexible buildings", *Earthquake spectra*, Vol. 11, no. 4, pp. 569-605.
- [1] Housner, G., and Hudson, D.E. (1958), "The port hueneme earthquake of march 18, 1957", *Bulletin of the seismological society of America*, Vol. 48, no. 2, pp. 163-168.
- [2] Housner, G., and Trifunac, M. (1967), "Analysis of accelerograms—Parkfield earthquake", *Bulletin of the seismological society of America*, Vol. 57, no. 6, pp. 1193-1220.
- [3] Mahin, S.A., Bertero, V., Chopra, A., and Collins, R. (1976), "Response of the Olive View Hospital main building during the San Fernando earthquake", *Report No. EERC*, Vol. 76, pp. 22.
- [4] Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W., and Abrahamson, N.A. (1997), "Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity", *Seismological research letters*, Vol. 68, no. 1, pp. 199-222.
- [5] Mavroeidis, G.P., and Papageorgiou, A.S. (2003), "A mathematical representation of near-fault ground motions", *Bulletin of the seismological society of America*, Vol. 93, no. 3, pp. 1099-1131.
- [6] Bray, J.D., and Rodriguez-Marek, A. (2004), "Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region", *Soil dynamics and earthquake engineering*, Vol. 24, no. 11, pp. 815-828.
- [7] CEN, E., *8-Design provisions for earthquake resistant structures*, EN-1998-1: 2004, 2004.
- [8] NZS, N.Z.S., New Zealand Standard, Standards Council of New Zealand Wellington, New ..., 2004, "Structural Design Actions Part 5: Earthquake Actions-New Zealand."
- [9] Gioncu, V., and Mazzolani, F., *Earthquake engineering for structural design*: CRC Press, 2010.
- [10] Lioussatou, E., and Fardis, M.N. (2016), "Near-fault effects on residual displacements of RC structures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 45, no. 9, pp. 1391-1409.
- [11] *Iranian National Building Code, Part 7. Geotechnics and foundation engineering*, 2022.
- [12] Archuleta, R.J. and Hartzell, S.H. (1981), "Effects of fault finiteness on near-source ground motion", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, no. 4, pp. 939-957.
- [13] Campbell, K.W. (1981), "Near-source attenuation of peak horizontal acceleration", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, no. 6, pp. 2039-2070.
- [14] Heaton, T. H. (1982), "The 1971 San Fernando earthquake: A double event?", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 72, no. 6A, pp. 2037-2062.



- under pulse-like near-fault earthquakes”, *Engineering structures*, Vol. 177, pp. 579-597.
- [39] Shahbazi, S., Khatibinia, M., Mansouri, I., and Hu, J. (2018), “Seismic evaluation of special steel moment frames undergoing near-field earthquakes with forward directivity by considering soil-structure interaction effects”, *Sci. Iran*.
- [40] Mansouri, I., Shahbazi, S., Hu, J.W., and Moghaddam, S. A. (2019), “Effects of pulse-like nature of forward directivity ground motions on the seismic behavior of steel moment frames”, *Earthquake. Structures*, Vol. 17, no. 1, pp. 1-15.
- [41] Mashayekhi, A., Gerami, M., and Siahpolo, N. (2019), “Assessment of higher modes effects on steel moment resisting structures under near-fault earthquakes with forward directivity effect along strike-parallel and strike-normal components”, *International Journal of Steel Structures*, Vol. 19, no. 5, pp. 1543-1559.
- [42] Du, K., Cheng, F., Bai, J., and Jin, S. (2020), “Seismic performance quantification of buckling-restrained braced RC frame structures under near-fault ground motions”, *Engineering Structures*, Vol. 211, pp. 110447.
- [43] Hu, Y., Jiang, L., Ye, J., Zhang, X., and Jiang, L. (2021), “Seismic responses and damage assessment of a mid-rise cold-formed steel building under far-fault and near-fault ground motions”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 163, pp. 107690.
- [44] Alavi, B., and Krawinkler, H. (2004), “Strengthening of moment-resisting frame structures against near-fault ground motion effects”, *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 33, no. 6, pp. 707-722.
- [45] Alavi, B., and Krawinkler, H. (2004), “Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions”, *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 33, no. 6, pp. 687-706.
- [46] Soleimani Amiri, F., Ghodrati Amiri, G., and Razeghi, H. (2013), “Estimation of seismic demands of steel frames subjected to near-fault earthquakes having forward directivity and comparing with pushover analysis results”, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 22, no. 13, pp. 975-988.
- [47] Gerami, M., and Abdollahzadeh, D. (2015), “Vulnerability of steel moment-resisting frames under effects of forward directivity”, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 24, no. 2, pp. 97-122.
- [48] Dimakopoulou, V., Fragiadakis, M., and Spyarakos, C. (2013), “Influence of modeling parameters on the response of degrading systems to near-field ground motions”, *Engineering Structures*, Vol. 53, pp. 10-24.
- [49] Fajfar, P., Marušić, D., and Peruš, I. (2005), “Torsional effects in the pushover-based
- [27] Liao, W.I., Loh, C.H., and Wan, S. (2001), “Earthquake responses of RC moment frames subjected to near-fault ground motions”, *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 10, no. 3, pp. 219-229.
- [28] Kalkan, E., and Kunnath, S.K. (2006), “Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings”, *Earthquake spectra*, Vol. 22, no. 2, pp. 367-390.
- [29] Krishnan, S. (2007), “Case studies of damage to 19-storey irregular steel moment-frame buildings under near-source ground motion”, *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 36, no. 7, pp. 861-885.
- [30] Mazza, F., and Vulcano, A. (2010), “Nonlinear dynamic response of rc framed structures subjected to near-fault ground motions”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 8, no. 6, pp. 1331-1350.
- [31] Yang, D., Pan, J., and Li, G. (2010), “Interstory drift ratio of building structures subjected to near-fault ground motions based on generalized drift spectral analysis”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 30, no. 11, pp. 1182-1197.
- [32] Sehhati, R., Rodriguez-Marek, A., ElGawady, M., and Cofer, W.F. (2011), “Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on multi-story structures”, *Engineering Structures*, Vol. 33, no. 3, pp. 767-779.
- [33] Champion, C., and Liel, A. (2012), “The effect of near-fault directivity on building seismic collapse risk”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 41, no. 10, pp. 1391-1409.
- [34] Vafaei, D., and Eskandari, R. (2015), “Seismic response of mega buckling-restrained braces subjected to fling-step and forward-directivity near-fault ground motions”, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 24, no. 9, pp. 672-686.
- [35] Beiraghi, H., Kheyroddin, A., and Kafi, M.A. (2016), “Forward directivity near-fault and far-fault ground motion effects on the behavior of reinforced concrete wall tall buildings with one and more plastic hinges”, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 25, no. 11, pp. 519-539.
- [36] Eskandari, R., Vafaei, D., Vafaei, J., and Shemshadian, M.E. (2017), “Nonlinear static and dynamic behavior of reinforced concrete steel-braced frames”, *Earthquakes and Structures*, Vol. 12, no. 2, pp. 191-200.
- [37] Moniri, H. (2017), “Evaluation of seismic performance of reinforced concrete (RC) buildings under near-field earthquakes”, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, Vol. 9, no. 1, pp. 13-25.
- [38] Fang, C., Zhong, Q., Wang, W., Hu, S., and Qiu, C. (2018), “Peak and residual responses of steel moment-resisting and braced frames



seismic analysis of buildings", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 9, no. 06, pp. 831-854.

- [50] Chopra, A.K., and Goel, R.K. (2004), "A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings", *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 33, no. 8, pp. 903-927.

[۵۱] آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله - استاندارد ۲۸۰۰، (۱۳۹۶)، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، وزارت مسکن و شهرسازی.

- [52] Committee, A. (2016), "Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-16)", *American Institute of Steel Construction, Chicago-Illinois*.

- [53] SAP, C. (2016), "Computers and structures Inc", *Berkeley, CA, USA*.

- [54] (2017), "Peer ground motion database", *Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA*, <http://ngawest2.berkeley.edu>.

- [55] "Baker Research Group. https://web.stanford.edu/~bakerjw/pulse-classification_old.html."

- [56] Baker, J.W., (2008), "Identification of near-fault velocity pulses and prediction of resulting response spectra," *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, pp. 1-10.

- [57] ASCE. (2013), "Seismic evaluation and retrofit of existing buildings".

