

اثر برکنش بر رفتار سازه‌های فولادی و ارائه ضرایب اصلاح پاسخ لرزه‌ای

فرهاد بهنام فر^{۱*}، فرید پویان^۲، مرتضی امید^۳، حسن زیباسخن^۱

^۱ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
^۲ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
^۳ شرکت ملی نفت ایران، ایلام، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۵ دی ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۷ اسفند ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۸ اسفند ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۴ فروردین ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

برکنش
سازه‌های فولادی
تحلیل استاتیکی غیرخطی
تحلیل دینامیکی غیرخطی
واکنش لرزه‌ای

چکیده: در این تحقیق در بررسی پدیده برکنش ابتدا، مزایا و معایب این پدیده و نتایج بدست آمده در تحقیقات گذشته در مورد اثرات آن بر سازه‌ها بیان شده و سپس روش‌های مدل‌سازی و تحلیل پدیده برکنش بررسی گردیده‌اند. آنگاه چند قاب فولادی با تعداد طبقات و دهانه‌های مختلف در دو حالت با و بدون برکنش توسط دو روش استاتیکی و دینامیکی غیرخطی تحلیل و مقایسه شده‌اند. بر اساس این تحقیق، پدیده برکنش در حالت کلی نقش مهمی در تغییر رفتار لرزه‌ای سازه و کاهش پاسخ آن دارد، ولی همزمان خود می‌تواند باعث بعضی آسیب‌های موضعی و در حالت نادر آسیب‌های کلی شود. نتایج تحقیق نشان دادند که برکنش باعث افزایش زمان تناوب موثر سازه، افزایش انرژی جذب شده توسط سازه با درصد میرایی متعارف و کاهش تغییر مکان‌های نسبی بیشتر اعضای سازه‌ای و در نتیجه کاهش نیروهای داخلی این اعضا می‌شود. افزایش زمان تناوب برای سازه‌های مهاربندی شده این تحقیق بیشتر بوده و به بیش از ۲۵ درصد نیز می‌رسد. در مورد تغییر مکان، نسبت افزایش از حالت بدون برکنش به با برکنش برای سازه‌های با زمان تناوب کوچکتر از ۱/۵ ثانیه برابر ۱/۸ و پس از آن ۱/۵ می‌باشد. همچنین نسبت شتاب حداکثر در حالت بدون برکنش به با برکنش برای همه زمان تناوب‌ها در حدود ۱/۳ است.

۱- مقدمه

برکنش معادل واژه لاتین «UPLIFT» بوده و به معنی جدایی شالوده از زمین در اثر بروز نیروی کششی در ستون‌های سازه متصل به شالوده در اثر نیروهای جانبی می‌باشد. اگر شالوده متصل به این ستون‌ها به صورت گیردار با زمین در ارتباط نباشد، شالوده از زمین جدا شده و پدیده برکنش اتفاق می‌افتد. برکنش موقتی سازه از زمین می‌تواند مانند یک مکانیزم جداسازی پایه عمل کرده و پاسخ لرزه‌ای سازه را کاهش دهد. البته این موضوع در مورد رفتار کلی سازه هنگام زلزله صادق است و برکنش ممکن است در نقاطی از سازه گسیختگی‌های موضعی به‌علت نیاز به شکل‌پذیری بالا بوجود آورد.

در یکی از تحقیقات اولیه که توسط Huckelbrieger & Clough انجام‌گرفت، مدل یک به سه سازه فلزی قاب خمشی نه طبقه و سه دهانه ساخته شد و توسط میز لرزان مورد آزمایش قرار گرفت [۱]. نتایج آزمایش نشان داد که نیروهای محوری ستون‌ها در حالتی که برکنش بوجود آید کمتر از حالتی است که پایه‌های سازه‌گیردار باشند، ولی ضربات شدیدی هنگام برخورد پایه ستون به زمین مشاهده گردید.

موضوع دیگری که مورد توجه محققان بوده است، اثر فرکانس طبیعی سازه و فرکانس غالب زلزله بر شدت برکنش می‌باشد. در تحقیق مرتبطی برکنش سازه با تحریکات نوسانی آزمایش گردید [۲]. این تحقیق نشان داد هنگامی که دوره تناوب سازه و دوره تناوب تحریک دینامیکی به یکدیگر نزدیک می‌شوند، اثرات مفید برکنش مهمتر می‌شوند؛ بدین معنی که تغییر مکان‌های نسبی و نیروهای وارده به سازه کوچکتر از مقادیر متناظر از سازه با پایه‌گیردار می‌باشند. در مطالعه دیگر، تحقیق جامع و دقیقی توسط اسمیت^۱ انجام گرفت و نتایج سودمندی از آن حاصل شد [۳]. در این تحقیق تأثیر نوع تحریک، خصوصیات خاک، سختی و دوره تناوب سازه بر برکنش سازه بررسی گردید. علاوه بر آن تأثیر برکنش بر خود سازه نیز در نظر گرفته شد. میرایی المان‌های سازه و خاک جداگانه تعریف گردیدند. میرایی سازه دو درصد فرض گردید و میرایی خاک بین صفر تا صد درصد، تغییر داده شد. تغییرات میرایی خاک بر برکنش سازه و نیز رفتار سازه مؤثر بود. در واقع میرایی خاک اثر کاهنده بر برکنش داشت. همچنین افزایش میرایی در خاک‌های سخت اثر کاهنده بیشتری نسبت به خاک‌های نرم نشان داد. نکته دیگر، بار ضربه‌ای قابل توجه در ستون‌ها پس از برکنش و هنگام تماس مجدد سازه با پی بود که در خاک سخت خیلی شدیدتر از خاک نرم به وقوع

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: farhad@cc.iut.ac.ir

محققین: ۱) برکنش سازه‌های الاستیک بر بستر صلب پاسخ‌های سازه‌ای را کاهش می‌دهد. ۲) برکنش سازه مانع از توسعه مفاصل پلاستیک در ستون‌ها می‌شود. ۳) تغییر شکل‌های پلاستیک تکیه‌گاه انعطاف پذیر (ماسه‌ای) دامنه و فرکانس‌های ناشی از برکنش را کاهش می‌دهد. ۴) برکنش در سازه‌های با بستر صلب و انعطاف پذیر لنگرهای خمشی و حداکثر شتاب افقی را کاهش داده و در مقابل باعث افزایش جابجایی افقی آن می‌شود.

دارمیان^۲ و همکارانش [۷] رفتار سازه‌های فولادی بادنبار واقع بر انواع مختلف خاک با سختی‌های متفاوت و با در نظر گرفتن اثر برکنش فنداسیون مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات این محققین نشان داد: ۱) با افزایش ارتفاع سازه مقدار برکنش پی نیز افزایش می‌یابد. ۲) برکنش پی باعث افزایش پریود سازه می‌شود. ۳) در سازه‌های با امکان برکنش پی با کاهش صلبیت، برش پایه سازه نیز کاهش می‌یابد. ۴) برکنش پی باعث افزایش جابجایی نسبی طبقات و ایجاد بیشترین تغییرات در پاسخ لرزه‌ای سازه واقع بر خاک نرم می‌شود.

خوشنودیان^۳ و همکارانش [۸] تأثیرات P-delta را بر روی پاسخ لرزه‌ای سازه‌هایی با برکنش پی مورد بررسی قرار دادند. براساس گزارش این محققین: ۱) جابجایی‌های خمشی سازه مجاز به برکنش کمتر از سازه با پایه ثابت است و اثرات P-delta در هر دو مورد جابجایی‌های خمشی را افزایش می‌دهد. ۲) برکنش پی سختی جانبی، برش طبقه و برش پایه را کاهش می‌دهد. اثرات P-delta در هر دو سیستم پایه ثابت و مجاز به برکنش برش طبقه و برش پایه را کاهش می‌دهد. ۳) با افزایش نسبت لاغری سازه برکنش پی افزایش یافته و میزان کاهش برش پایه ناشی از برکنش به مراتب افزایش می‌یابد. ۴) در سیستم پایه ثابت اختلاف برش پایه بین مدل مصالح با دو رفتار خطی و غیر خطی نسبت به سیستم مجاز به برکنش بیشتر است.

چن^۴ و همکاران [۹] اثرات مودهای بالاتر را بر واکنش لرزه‌ای یک سازه ۶ طبقه همراه با برکنش بررسی کردند. ایشان مدل‌های یک درجه آزاد معادلی را نیز با و بدون برکنش توسعه داده و روی میز لرزان تحت زلزله کوبه آزمایش نمودند. در نتیجه، کاهش واکنش در مود اول و افزایش ۳۰ درصدی آن در مود دوم ناشی از برکنش مشاهده گردید. همچنین دیده شد که از هنگام وقوع برکنش، میزان مشارکت مودهای بالاتر در واکنش کل افزایش می‌یابد. ژو^۵ و همکاران [۱۰] یک مدل غیرخطی همراه با برکنش و اندرکنش سازه و خاک را توسعه دادند که دارای شش فنر و شش میراگر در امتداد درجات آزادی مختلف بود. ایشان اثرات متقابل دو پدیده مزبور را بررسی نمودند.

اغلب مطالعات انجام شده توسط محققین، بر روی سازه‌هایی با درجات آزادی محدود و به صورت کیفی بوده‌اند و تنها افقی را برای مطالعات آینده

پیوست. همچنین مشاهده شد که بعضی از شتاب‌نگاشت‌های زلزله بیشتر از بقیه تمایل به ایجاد برکنش در سازه داشتند. میزان جدایی از خاک به مقدار زیادی به ارتباط بین محتوای فرکانسی شتاب‌نگاشت و زمان تناوب طبیعی سازه بستگی داشت.

اگر زمان تناوب سازه به مقدار زیادی کمتر از زمان تناوب غالب باشد، برکنش اتفاق افتاده کوچک خواهد بود. حداکثر برکنش زمانی اتفاق می‌افتد که زمان تناوب سازه با پایه ثابت کمی کمتر از زمان تناوب غالب زلزله مربوطه باشد و علت آن است که برکنش بطور قابل توجهی زمان تناوب سازه را افزایش می‌دهد. سازه‌های با زمان تناوب طولانی‌تر از زمان تناوب غالب زلزله نیز برکنش کمی را تحمل کردند.

نتیجه دیگری که از مطالعه مذکور بدست آمد، کاهش نیروهای لرزه‌ای در بعضی موارد بر اثر برکنش بود. تحلیل‌ها نشان دادند که برش پایه و نیروهای محوری ستون‌ها در زمانی که دوره تناوب سازه بلندتر از زمان‌های تناوب نظیر محتوای فرکانسی زلزله باشد، نسبت به سازه با پایه ثابت کمتر می‌شوند. تغییر مکان‌های حداکثر در هر دو سازه پایه ثابت و برکنش یافته تقریباً برابر بودند. همچنین برش پایه و نیروی محوری ستون‌ها در سازه با زمان تناوب کوتاه‌تر از زمان تناوب غالب زلزله، بیشتر از سازه با پایه ثابت بودند.

میدوریکاوا^۱ و همکارانش [۴]، از آزمایشات میز لرزش و آنالیز عددی برای ارزیابی و مقایسه پاسخ لرزه‌ای -سیستم‌های دارای ستون‌های مجاز به برکنش با سیستم‌های با پایه ثابت استفاده کردند. در این مطالعه از یک ساختمان سه طبقه فولادی مهاربندی شده با مقیاس یک دوم استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که برش پایه ستون‌ها در قاب با ستون‌های مجاز به برکنش به میزان ۵۲ درصد کمتر از قاب با پایه ثابت بود. در عوض حداکثر جابجایی‌های بام در هر دو دسته قاب تقریباً به یک اندازه بودند. همچنین نتایج آزمایش نشان داد که در سازه مجاز به برکنش، تأثیر ضربه ستون‌ها بر بیس پلیت ناچیز بود.

میدوریکاوا و همکارانش [۵] پاسخ لرزه‌ای سه بعدی سیستم‌های ارتعاشی با ستون‌های مجاز به برکنش را مورد ارزیابی قرار دادند و با استفاده از آنالیز عددی المان محدود رفتار این سیستم‌ها را با سیستم پایه ثابت مقایسه کردند. در این مطالعه از قاب‌های فولادی ده طبقه که دارای یک تا سه دهانه می‌باشند استفاده شده است. نتایج مهم این مطالعه عبارتند از: ۱- برش پایه مدل برکنش یافته ۶۸ تا ۸۲ درصد مدل پایه ثابت با تحریکات افقی یک بعدی و ۵۹ تا ۷۶ درصد مدل پایه ثابتی است که در معرض تحریکات دو و سه بعدی قرار گرفته است. ۲- جابجایی افقی بام مدل برکنش یافته اندکی بیشتر از مدل پایه ثابت می‌باشد. ۳- تعداد مفاصل خمیری در مدل مجاز به برکنش بسیار کمتر از مدل با پایه ثابت است.

Chou و Qin [۶] با استفاده از آزمایش‌های میز لرزش اثر برکنش را بر روی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها بررسی کردند. بر اساس گزارشات این

۳- سازه‌های مورد مطالعه و روش مدل‌سازی آن‌ها

سازه‌های مورد مطالعه در این تحقیق، شامل قاب‌های ساختمانی دو بعدی با تعداد طبقات و دهانه‌های مختلف هستند. با توجه به اینکه بررسی پدیده برکنش در سازه‌های فولادی و با دو سیستم باربر جانبی قاب خمشی و قاب مهاربندی شده همگرا در این تحقیق در نظر است و همچنین برای ایجاد امکان مقایسه با نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی معادل، سازه‌های مورد مطالعه از نوع فولادی و با نسبت شکل‌های مختلف انتخاب می‌شوند. بر این اساس از یک طرف ارتفاع سازه تغییر داده شده و تعداد طبقات پنج، ده و پانزده (هر طبقه به ارتفاع سه متر) در نظر گرفته می‌شوند و از طرف دیگر تعداد دهانه‌های این سازه‌ها طوری انتخاب می‌گردند که برای هرکدام از تعداد طبقات مذکور در بالا نسبت شکل‌های ۰/۶۶، ۰/۸۳، ۰/۱۱، ۱/۶۷ و ۳/۳۳ بدست آید. لازم به ذکر است که مهاربندهای همگرای به کار گرفته شده در سازه‌های مورد مطالعه از نوع ضربدری (X شکل) می‌باشند. مشخصات سازه‌های انتخاب شده در جدول ۱، ذکر شده است.

جدول ۱: مشخصات سازه‌های انتخاب شده

Table 1. Properties of studied structures

ردیف	تعداد طبقات	تعداد دهانه	سیستم باربر جانبی و شناسه سازه	
			قاب خمشی	قاب خمشی+مهاربندی
۱	۵	۲	m5x2	b5x2
۲	۵	۳	m5x3	b5x3
۳	۵	۴	m5x4	b5x4
۴	۵	۵	m5x5	b5x5
۵	۱۰	۲	m10x2	b10x2
۶	۱۰	۴	m10x4	b10x4
۷	۱۰	۶	m10x6	b10x6
۸	۱۰	۸	m10x8	b10x8
۹	۱۰	۱۰	m10x10	b10x10
۱۰	۱۵	۳	m15x3	b15x3
۱۱	۱۵	۶	m15x6	b15x6
۱۲	۱۵	۹	m15x9	b15x9
۱۳	۱۵	۱۲	m15x12	b15x12

بازکرده‌اند که ممکن است به علت محدودیت در سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای در دسترس آن‌ها بوده باشد. در تحقیق حاضر چند قاب فولادی با تعداد و طبقات و دهانه‌های مختلف در دو حالت با و بدون برکنش مورد تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی قرار می‌گیرند. زمان تناوب، پاسخ لرزه‌ای، میزان انرژی جذب شده و مقدار تغییرمکان‌های نسبی محاسبه و مقایسه می‌گردند که وسعت این بررسی از وجوه متمایزه این تحقیق است. همچنین برای اولین بار طیف‌های پاسخی ارائه شده که با استفاده از آن‌ها می‌توان بدون مدل‌سازی صریح برکنش، پاسخ سازه با پای گیردار را با استفاده از آن‌ها در اثر برکنش اصلاح نمود.

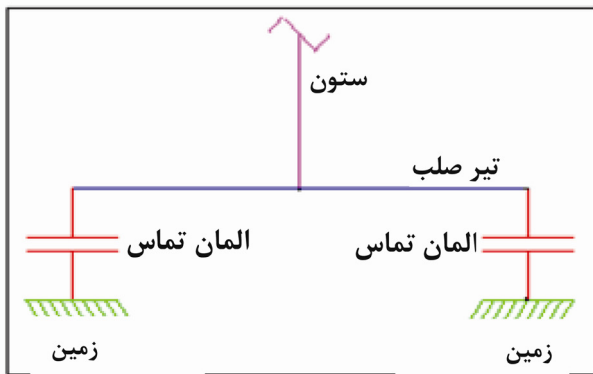
۲- بررسی تمهیدات آیین‌نامه‌های زلزله برای کنترل برکنش

در مراجع اصلی مهندسی زلزله مانند FEMA356، NEHRP و IBC [۱۱-۱۳] به طور مستقیم به برکنش سازه اشاره‌ای نشده است. تنها اشاره‌ای که می‌توان از آن‌ها استنباط کرد، توجه به بعضی نکات طراحی مثلاً طراحی ستون‌ها یا میل مهارهای سازه در برابر کشش است. همچنین شاید بتوان طراحی شمع‌ها و پی‌های عمیق در برابر کشش را به این مقوله افزود ولی در هیچ کدام ضوابطی مشخص برای کنترل برکنش سازه ارائه نشده است. تنها موضوع مطرح در بیشتر آیین‌نامه‌ها که یکی از اثرات برکنش می‌باشد، مسئله واژگونی سازه است. واژگونی سازه، اگر چه نتیجه نهایی برکنش است و کنترل و جلوگیری از آن لازم بنظر می‌رسد، ولی تنها بازگویی رفتار نهایی سازه است. اهم نقائص تمهیدات آیین‌نامه‌ها در برخورد با پدیده برکنش را می‌توان به شرح زیر ذکر نمود:

- این تمهیدات به واژگونی سازه که یک رفتار حدی است مربوط می‌شوند در حالیکه پدیده برکنش ممکن است خیلی زودتر از واژگونی سازه اتفاق بیفتد.
 - برکنش سازه در صورتی که کنترل شده باشد، منجر به واژگونی آن نخواهد شد و زبان‌های ناشی از واژگونی سازه را بدنبال ندارد؛ بنابراین نباید با آن سخت‌گیرانه برخورد کرد.
 - اثر تعداد دهانه‌های مهاربندی‌شده در سازه و ترکیبات مختلف آن‌ها در تحلیل واژگونی دیده نمی‌شود، در حالی که این موضوع اثر غیرقابل چشم‌پوشی بر رفتار سازه در برابر پدیده برکنش دارد.
 - اثر ابعاد مقاطع المان‌های باربر سازه نیز در تحلیل حدی پایداری سازه در نظر گرفته نمی‌شود. ابعاد مقاطع و در واقع سختی جانبی قاب‌های خمشی و مهار بندی شده نقش بسزایی در زمان وقوع برکنش دارند.
- با توجه به مطالعات بالا و عدم برخورد واقع بینانه آیین‌نامه‌ها با پدیده برکنش، بررسی بیشتر اثر برکنش سازه‌ها اهمیت زیادی دارد که در این تحقیق سعی شده به این موضوع بیشتر پرداخته شود.

سازه لغزش کند.

با توجه به تابع شکل المان تیر مورد استفاده برای اعضای قاب سازه، این تابع نسبت به فاصله از وسط المان از درجه سه می‌باشد. این بدین معنی است که این المان، تغییر شکل‌های عمود بر محور خود و از درجه سه را مدل‌سازی می‌کند. بنابراین در صورتی که در منحنی تغییر شکل حاصل از بارگذاری عضو سازه‌ای مورد نظر یک نقطه عطف وجود داشته باشد، برای مدل‌سازی آن یک المان کافی است و در صورت بیشتر بودن نقاط عطف، به تعداد این نقاط از المان مذکور برای مدل‌سازی عضو مورد نظر، نیاز می‌باشد. با توجه به رفتار تیر و ستون‌های قاب‌ها و با توجه به بارگذاری تیرها در طول آن (بارگذاری گسترده)، در ستون‌ها حداکثر یک و در تیرها حداکثر دو نقطه عطف به وجود می‌آید. بنابراین برای مدل‌سازی ستون‌ها از یک المان و برای مدل‌سازی تیرها از دو المان استفاده می‌گردد.



شکل ۱: نحوه اتصال ستون‌ها به زمین در سازه با امکان برکنش

Fig. 1. Details of connection between columns and ground in the structures with uplift possibility

۴- تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه‌های مورد مطالعه

در تحلیل استاتیکی غیر خطی، یک بار استاتیکی در طول چند مرحله به سازه وارد می‌شود و رفتار سازه، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اگر چه مراحل بارگذاری همه استاتیکی و مستقل از زمان می‌باشند، ولی به کمک این تحلیل می‌توان برخی از خصوصیات دینامیکی سازه را نیز کنترل کرد.

۴-۱- نمودارهای برش پایه-تغییر مکان حداکثر

در این قسمت نمودارهای برش پایه برحسب تغییر مکان حداکثر سازه برای سازه‌های مختلف با تعداد طبقات و دهانه‌های متفاوت در دو حالت با برکنش و بدون برکنش مقایسه می‌شوند. دو نمونه از این نمودارها که مربوط به سازه‌های $m \times x_2$ و $b \times x_2$ می‌باشند در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. حرف «U» نشان دهنده آن است که امکان برکنش ستون‌های سازه از زمین موجود است. در مقابل حرف «W/U» نشان می‌دهد که نمودار حاصل مربوط به سازه‌ای است که تکیه‌گاه ستون‌های آن به صورت کاملاً گیردار

۳-۱- بارگذاری ثقلی و جانبی سازه‌ها

بارگذاری ثقلی سازه‌ها شامل بار یکنواخت ۲۲ کیلو نیوتن بر متر می‌باشد که بر تیرهای سازه وارد می‌شود. بارگذاری جانبی سازه‌ها در تحلیل استاتیکی غیرخطی، به صورت متناسب با مد اول سازه (مثلی) انجام می‌شود و افزایش بار جانبی هر سازه تا آنجا انجام می‌گردد که سازه به تغییر مکان حداکثر تعیین شده در ASCE41-13 [۱۴] برای دو سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP) برسد. این سطوح عملکرد برای سازه‌های فولادی با سیستم باربر جانبی خمشی معادل با برتیب حدود ۲/۵ و ۵ درصد ارتفاع سازه و برای سازه‌های فولادی با سیستم باربر جانبی مهاربندی، معادل با حدود ۱/۵ و ۲ درصد ارتفاع سازه می‌باشند. علت انتخاب تغییر مکان‌های جانبی براساس ارتفاع سازه، داشتن معیار یکسانی برای مقایسه برش پایه سازه در دو حالت با برکنش و بدون برکنش می‌باشد. بارگذاری جانبی سازه‌ها در تحلیل دینامیکی غیرخطی نیز با استفاده از مؤلفه افقی شتاب‌نگاشت زلزله‌های اعمالی انجام می‌گیرد. با توجه به اینکه هر شتاب‌نگاشت زلزله دو مؤلفه افقی دارد، از مؤلفه دارای شتاب حداکثر بزرگتر استفاده شد. مقیاس کردن زلزله‌ها به روش معمول و از طریق مقایسه طیف پاسخ زلزله‌ها با طیف طرح انجام شده است [۱۱، ۱۴].

۳-۲- مدل‌سازی سازه‌های مورد مطالعه

برای تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی و بررسی اثر برکنش، سازه‌های فوق در دو حالت در نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی می‌شوند. در حالت اول، پای ستون به صورت گیردار به پی متصل می‌شود، یعنی قابلیت انتقال نیروهای کششی، فشاری، برشی و نیز لنگرها به تکیه‌گاه در این اتصال وجود دارد. این حالت همان فرض جلوگیری از برکنش است که در تحلیل و طراحی متداول سازه‌ها در نظر گرفته می‌شود. در حالت دوم، اتصال پای ستون به پی وابسته به جهت و بزرگای نیروی محوری و لنگر خمشی اعمالی تغییر می‌کند. در واقع در حالت دوم، هدف، مدل‌سازی منطقی بلند شدن یک ستون و شالوده آن از زمین درحین زلزله می‌باشد. شکل ۱ نحوه مدل‌سازی اتصال ستون به زمین را در حالت دوم نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، این ترکیب المان‌ها شامل دو المان تماسی است که به فاصله مشخص از یکدیگر قرار گرفته‌اند و توسط المان تیر صلب به پای ستون متصل هستند. گره پایینی این المان‌های تماسی به تکیه‌گاه صلب متصل شده و در واقع تکیه‌گاه سازه صلب و بدون اندرکنش فرض شده است. سختی عمود بر سطح و به موازات سطح المان‌های تماسی اعداد بزرگی انتخاب شده‌اند که هدف از آن عدم نشست یا تغییر شکل جانبی المان‌های تماسی و در نتیجه پای ستون‌ها بوده است. از طرف دیگر با انتخاب ضریب اصطکاک واحد در سطح تماس از هرگونه لغزش ستون‌ها در برابر بار جانبی جلوگیری می‌شود. علت این امر آن است که معمولاً در ساختمان‌ها علاوه بر اصطکاک زیر سطح‌پی، گوه‌های فعال و غیرفعال حاصل از خاک اطراف دیواره‌پی نیز در برابر لغزش آن مقاومت می‌کنند و بندرت دیده شده که پی

با توجه به نتایج تحلیل در مورد این منحنی‌ها به نکات زیر می‌توان اشاره کرد:

۱. منحنی مربوط به حالت U برای همه سازه‌ها در زیر منحنی W/U قرار می‌گیرد. این بدین معنی است که اگر تغییرمکان یکسانی در سازه در دو حالت فوق در اثر زلزله بوجود آید، نیروی زلزله وارد به سازه برکنش یافته کمتر از سازه برکنش نیافته است. بنابراین نیروی وارده به سازه همواره در حالت U همواره کمتر از حالت W/U می‌باشد. در حالت U سازه مانند سیستم جداسازی پایه عمل می‌کند و بخشی از انرژی زلزله صرف انجام تغییرشکل‌های جسم صلب (برکنش) می‌گردد.

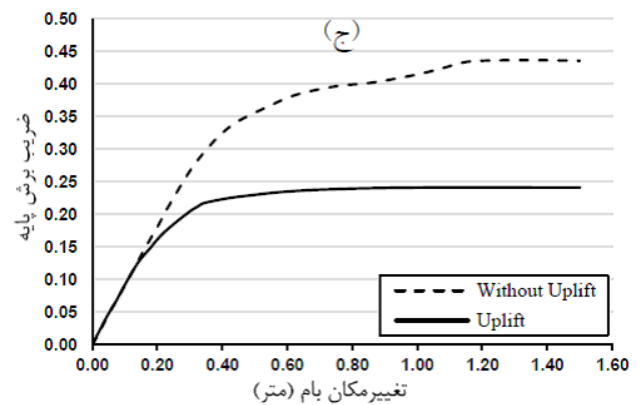
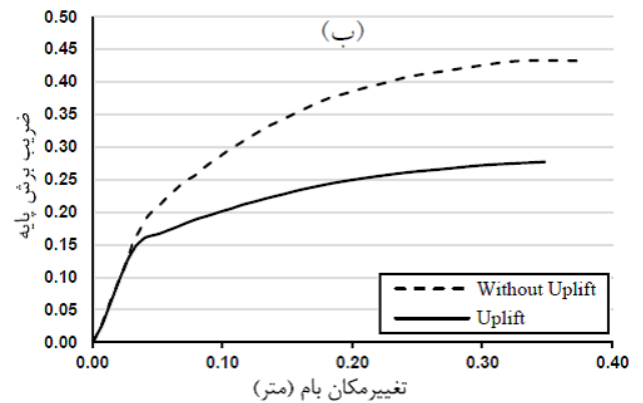
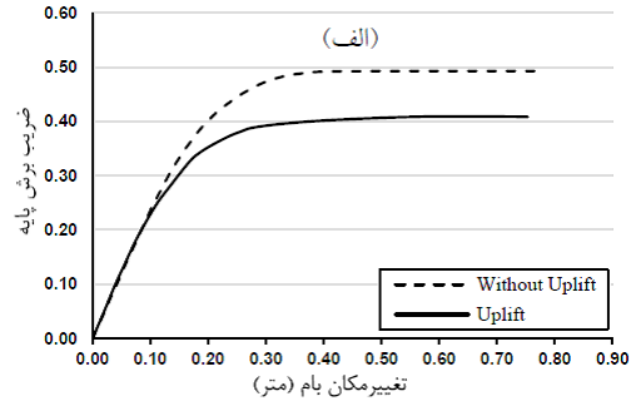
۲. تقریباً در همه سازه‌ها رفتار غیرخطی هندسی ناشی از برکنش قبل از رفتار غیرخطی مادی شروع می‌شود. در اثر این رفتار در قسمت خطی منحنی برش پایه برحسب تغییرمکان بام یک شکستگی دیده می‌شود که شیب منحنی را به ناگهان تغییر می‌دهد و کم می‌ند. پس از آن شیب تا نقطه شروع تغییرشکل‌های پلاستیک باز هم به صورت ثابت می‌ماند. این موضوع در سازه‌های با سیستم دوگانه (شکل ۲ب) محسوس‌تر است و باعث می‌شود که برکنش بر رفتار این نوع سازه‌ها اثر بیشتری نسبت به سازه‌های با سیستم باربر جانبی خمشی داشته باشد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد دهانه‌ها و در نتیجه با کاهش نسبت شکل سازه-رفتار سازه در حالت‌های U و W/U به یکدیگر نزدیک می‌شوند و اثر پدیده برکنش کاهش می‌یابد.

۳. با تعداد دهانه برابر، هرچه تعداد طبقات و ارتفاع سازه بیشتر شود، اثر برکنش افزایش می‌یابد و فاصله منحنی‌های برش پایه برحسب تغییرمکان حداکثر در دو حالت U و W/U بیشتر می‌گردد. از آنجایی که پیش بینی می‌شود سازه برکنش یافته تغییرمکان جانبی بیشتری نسبت به سازه بدون برکنش داشته باشد، بحث بالا در حالتی تکمیل خواهد شد که تغییرمکان سازه دارای برکنش در زلزله به نحوی محاسبه شده و با سازه بدون برکنش مقایسه گردد. این کار در بخش‌های بعدی انجام خواهد گردید.

۴-۲- نمودارهای انرژی-تغییرمکان حداکثر

در این قسمت نمودارهای انرژی مستهلک شده برحسب تغییرمکان بام برای سازه‌های مورد مطالعه مقایسه شده‌اند. این نمودارها مقدار انرژی جذب شده در رفتار غیرخطی در مفاصل را نشان می‌دهند. در واقع نمودارهای مذکور بیانگر آن هستند که سازه‌ها با تغییرمکان حداکثر برابر در دو حالت U و W/U به چه اندازه ظرفیت جذب انرژی دارند.

می‌باشد و امکان برکنش ستون‌ها وجود ندارد. نمودارها تا تغییرمکان هدف رسم شده‌اند. از نظر شکلی، رفتار بقیه سیستم‌های مورد مطالعه نیز مشابه شکل ۲ می‌باشد.



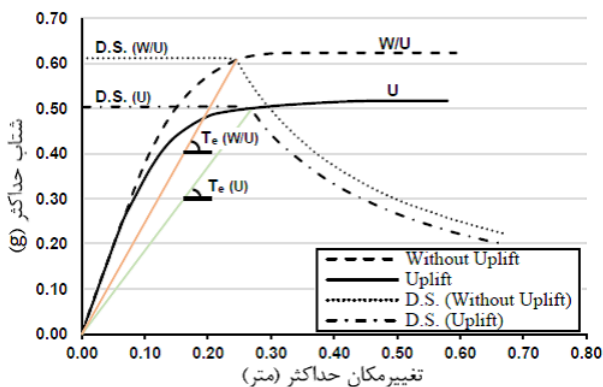
شکل ۲: نمودار برش پایه برحسب تغییر مکان بام برای الف) قاب خمشی m5x2، ب) سیستم دوگانه b5x2، ج) قاب خمشی U m10x2؛ با برکنش، W/U بدون برکنش)

Fig. 2. Base shear-roof displacement curve; a) Moment frame m5x2, b) Dual system frame b5x2, c) Moment frame m10x2; (U considering uplift, W/U without uplift)

۳-۴- نمودارهای طیف ظرفیت-نیاز سازه‌ها

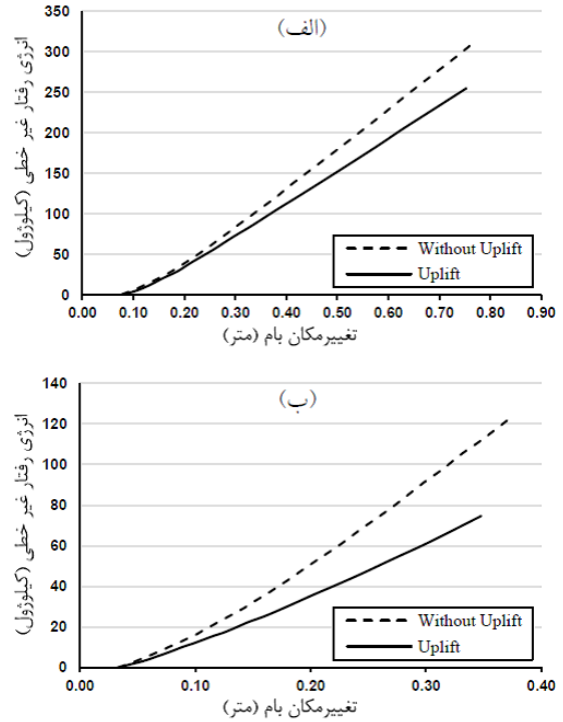
یک راه برای تعیین رفتار سازه استفاده از منحنی‌های طیف ظرفیت می‌باشد. به کمک این طیف رفتار سازه در هنگام اعمال نیروهای جانبی بر آن با یک سازه یک درجه آزادی معادل‌سازی می‌شود. بدیهی است که مطالعه رفتار سازه با یک درجه آزادی به مراتب راحتتر از سازه اصلی می‌باشد. در این تحقیق برای تهیه طیف ظرفیت سازه و طیف نیاز، از روش A ارائه شده در آیین‌نامه ATC-40 استفاده شده است. در این روش ابتدا با توجه به نوع خاک و شتاب مبنای طرح و میرایی مورد نظر طیف پاسخ خطی سازه تهیه می‌شود. سپس منحنی ظرفیت سازه که همان نمودار ضریب برش پایه بر حسب تغییرمکان حداکثر است، ترسیم می‌گردد. آنگاه مؤلفه‌های نیرو و تغییرمکان منحنی ظرفیت در دو ضریب که تابع جرم طبقات و شکل مود اول سازه هستند، ضرب شده و طیف ظرفیت سازه بدست می‌آید. طیف ظرفیت و نیاز در یک نمودار رسم می‌گردند. یک نقطه روی منحنی طیف ظرفیت انتخاب می‌شود و سپس نمودار طیف ظرفیت توسط یک نمودار دو خطی طوری جایگزین می‌گردد که سطوح بین نمودار مذکور و منحنی طیف ظرفیت تا نقطه منتخب، برابر شوند. حال منحنی طیف نیاز توسط ضریب کاهنده‌ای که تابع زمان تناوب سازه است، کاهش داده می‌شود. اگر محل برخورد منحنی حاصل با نمودار دو خطی طیف ظرفیت، با انحراف قابل قبول از نقطه منتخب قبلی بگذرد، نتیجه حاصل شده است و در غیر اینصورت باید نقطه منتخب تغییر داده شده و مراحل بعد از آن تکرار شوند.

با مقایسه منحنی‌های طیف ظرفیت سازه در دو حالت U و W/U شکل ۴ که شبیه به منحنی‌های برش پایه-تغییرمکان حداکثر می‌باشند، می‌توان ملاحظه کرد که شتاب طیفی سازه در حالت دوم همواره بیش از حالت U می‌باشد. از طرف دیگر نقطه برخورد دو طیف ظرفیت و نیاز برای سازه در حالت U دارای شتاب طیفی کمتر و تغییرمکان طیفی بیشتر از حالت W/U می‌باشد. این بدان معنی است که در حالت U در اثر زلزله طرح همزمان هم تغییرمکان سازه افزایش یافته و هم نیروی وارده به آن کاهش می‌یابد.



شکل ۴: نمودار طیف ظرفیت-نیاز قاب $m5x2$

Fig. 4. Capacity-demand spectra of moment frame $m5x2$



شکل ۳: انرژی جذب شده در رفتار غیرخطی برحسب تغییر مکان بام (برای الف) قاب خمشی $m5x2$ ، (ب) سیستم دوگانه $b5x2$

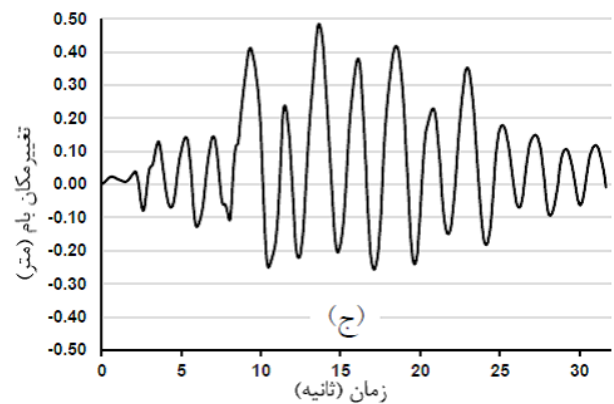
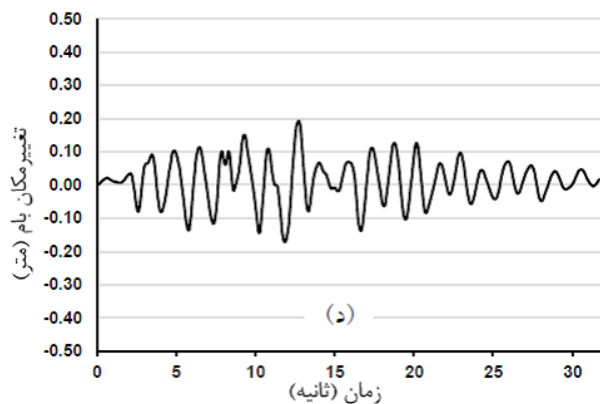
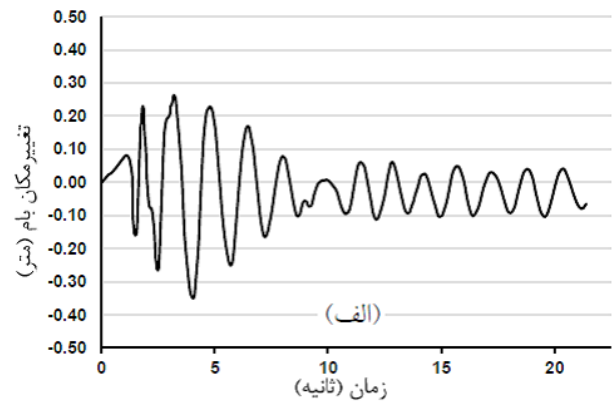
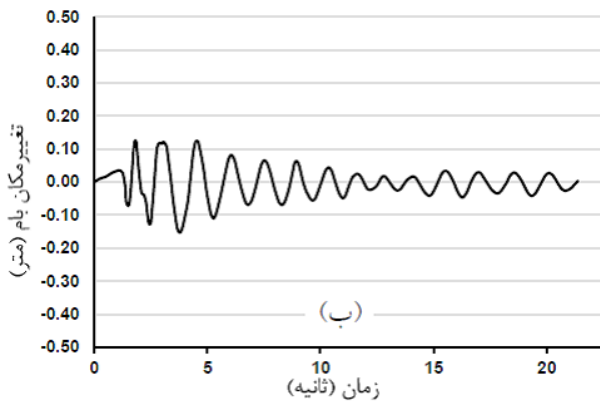
Fig. 3. Absorbed energy-roof displacement curve for nonlinear behavior; a) Moment frame $m5x2$, b) Dual system frame $b5x2$

دو نمونه از این نمودارها که مربوط به سازه‌های $m5x2$ و $b5x2$ می‌باشند در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، در حالت U منحنی‌های مذکور در تغییرمکان‌های کوچکتری نسبت به حالت W/U شروع شده‌اند که علت آن همان برکنش یافتن سازه قبل از ایجاد مفاصل پلاستیک در حالت U است. چون از لحظه شروع برکنش رفتار غیرخطی می‌شود، انرژی رفتار غیرخطی سازه در حالت U از آن لحظه محاسبه می‌گردد. ولی در سازه بدون برکنش فقط انرژی تغییرشکل پلاستیک از لحظه شروع اولین مفصل پلاستیک محاسبه می‌شود که اندکی پس از به کشش افتادن ستون‌ها می‌باشد. از طرف دیگر شیب منحنی در حالت W/U بیشتر از حالت U است و باعث می‌شود دو منحنی یکدیگر را در نقطه‌ای که معمولاً در نزدیکی نقطه شروع منحنی‌ها می‌باشد قطع کنند و از آن نقطه به بعد منحنی حالت W/U بالاتر قرار گیرد. این بدان معنی است که در تغییرمکان یکسان انرژی مستهلک شده در سازه در حالت W/U بیش از حالت دیگر می‌باشد که به نوبه خود به معنی آن است که در حالت U اتلاف انرژی در اثر تغییرشکل‌های خمیری کمتر از W/U می‌باشد.

۵- تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه‌های مورد مطالعه

دقیقترین روش بررسی رفتار یک سازه در برابر زلزله، تحلیل دینامیکی غیرخطی آن سازه می‌باشد. مشخصات سازه‌ها در حالات تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی یکسان است، فقط در حالت تحلیل دینامیکی در گره‌های اتصال تیر به ستون، جرم متمرکز معادل با جرم سهمیه آن گره تعریف می‌گردد. بارگذاری جانبی توسط شتاب‌نگاشت زلزله‌های طیس، ناغان و منجیل صورت می‌گیرد، زیرا زلزله‌های مذکور دامنه وسیعی از فرکانس‌ها را پوشش می‌دهند. در ادامه نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه‌های مورد مطالعه ارائه شده‌اند.

نکته قابل تأمل دیگر آنکه اگر از مرکز مختصات یک خط به نقطه برخورد دو منحنی طیف ظرفیت و نیاز رسم شود، شیب این خط زمان تناوب مؤثر سازه را نشان می‌دهد. با مقایسه شیب خطوط مربوط به حالات U و W/U ، مشاهده می‌شود که زمان تناوب مؤثر سازه در حالت U بیشتر از حالت دیگر است که نشان دهنده آن است که بر کنش سازه باعث افزایش زمان تناوب شده است. این افزایش برای سازه‌های مهاربندی شده این تحقیق بیشتر بوده و به بیش از ۲۵ درصد نیز می‌رسد. با افزایش زمان تناوب، عموماً شتاب طیفی و برش پایه سازه کاهش می‌یابد. این نتیجه هماهنگ با بحث بالا در مورد کاهش نیروی وارده به سازه در حالت U می‌باشد.



شکل ۵: نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان بام سیستم دوگانه $m15 \times 3$ با زلزله ناغان الف) در حالت U و ب) در حالت W/U ، و با زلزله طیس ج) در حالت U و د) در حالت W/U

Fig. 5. Roof displacement time history curve of dual system frame $m15 \times 3$; a) Naghan earthquake considering uplift (U), b) Naghan earthquake without uplift (W/U), c) Tabas earthquake considering uplift (U), b) Tabas earthquake without uplift consideration (W/U)

۱- در سازه‌ی فوق و نیز سایر سازه‌ها تغییر مکان حداکثر در حالت U بیشتر از حالت W/U است. با توجه به نمودارهای انرژی غیرخطی که در بخش قبل ارائه گردیدند، ملاحظه می‌شود که در همه سازه‌ها در حالت U ، برکنش زودتر از رفتار غیرخطی مصالح

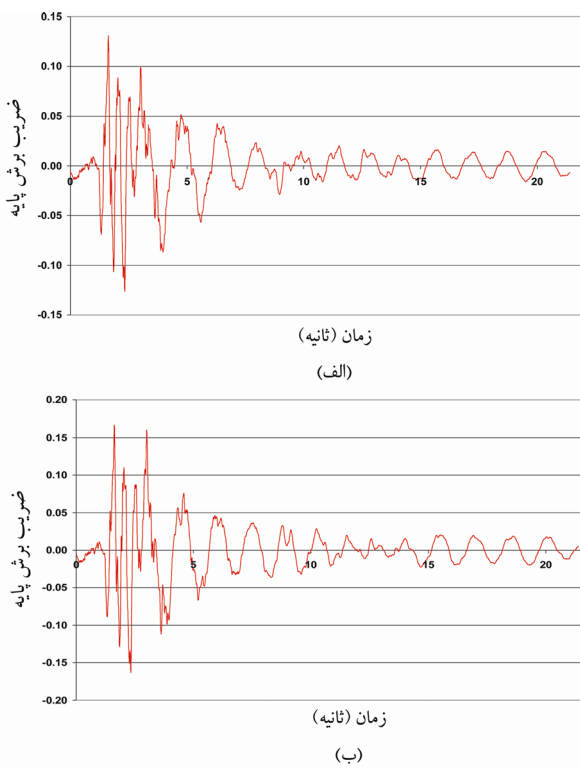
۵-۱- نمودارهای تاریخچه زمانی تغییر مکان بام شکل ۵، نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان بام را برای سازه $b15 \times 3$ به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای مذکور نکات زیر قابل ذکر هستند:

بنابراین، این نتیجه مهم حاصل می‌گردد که برکنش باعث کاهش تغییرمکان‌های نسبی می‌شود ولی تغییرمکان‌های کلی به علت دوران سازه اندکی بیشتر می‌گردد.

۲. روند مشاهده شده در مقایسه تغییرمکان‌های سازه‌ها با تعداد دهانه و طبقات مختلف و بطور کلی با نسبت شکل‌های مختلف که در بخش قبل بیان شد، در مورد ضریب برش پایه نیز صدق می‌کند. بطور کلی با بالا رفتن نسبت شکل سازه‌ها، اختلاف بین ضریب برش پایه در دو حالت U و W/U افزایش می‌یابد.

۳. مانند آنچه در بخش قبل ذکر شد، در سازه‌های با سیستم باربر جانبی خمشی نسبت به سازه‌های مهاربندی شده، اختلاف ضرایب برش پایه در دو حالت کمتر است.

بند بعد برآیند رفتار غیرخطی سازه با بررسی نمودار برش پایه (به عنوان برآیند نیروهای جانبی) در مقابل تغییرمکان بام (به عنوان برآیند تغییرمکان‌های جانبی) بررسی خواهد شد.



شکل ۶: نمودار ضریب برش پایه بر حسب زمان برای سیستم دوگانه $b15x3$ با زلزله ناغان (الف) در حالت U و (ب) در حالت W/U

Fig. 6. Base shear coefficient-time history curve of dual system frame $b15x3$ for Naghan earthquake; a) considering uplift (U), b) without uplift (W/U)

(تشکیل مفاصل پلاستیک) رخ می‌دهد. بنابراین روشن است که در سازه‌های مذکور برکنش حتماً اتفاق افتاده است و تغییر مکان بزرگتر سازه‌های فوق نسبت به سازه‌ها در حالت W/U قابل پیش‌بینی است.

۲. تغییر مکان سازه‌ها با تعداد دهانه بیشتر- یا نسبت شکل کوچکتر- در دو حالت U و W/U به یکدیگر نزدیکتر هستند و اختلاف کمتری مشاهده می‌شود. این موضوع در مورد ارتفاع هم به صورت عکس اتفاق افتاده است، بدین معنی که سازه‌های با ارتفاع کمتر- یا نسبت شکل کوچکتر- در دو حالت U و W/U تغییرمکان‌های مشابهی دارند.

۳. در سازه‌های با سیستم باربر جانبی خمشی، نسبت به سازه‌های مهاربندی شده، اختلاف تغییرمکان‌ها در دو حالت U و W/U کمتر است، یعنی در قاب خمشی برکنش کمتر از قاب مهاربندی شده روی می‌دهد.

۴. زمان تناوب مؤثر سازه در حالت U بیش از حالت W/U است. این تفاوت نیز در سازه‌های دوگانه واضحتر از سازه‌های خمشی است. این موضوع با توجه به فشرده‌تر بودن منحنی تاریخچه زمانی در شکل ۵-ب واضح است. نمودارهای رفتاری برای زلزله‌های دیگر نیز روند مشابهی را نشان می‌دهد.

بنابراین نتایج به دست آمده از بررسی رفتار سازه‌های مورد مطالعه با هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی کاملاً مشابه یکدیگر می‌باشد. آنچه که علاوه بر نتایج قبلی در تحلیل دینامیکی غیرخطی مشاهده و تثبیت گردید، بزرگتر بودن تغییرمکان‌های جانبی در حالت با برکنش نسبت به بدون برکنش علیرغم کوچکتر بودن نیروی جانبی در حالت اول است. برآورد نسبت نیروهای جانبی و نسبت تغییرمکان‌های جانبی در این دو حالت در بخش‌های بعدی ارائه خواهد شد.

۵-۲- نمودارهای تاریخچه زمانی برش پایه

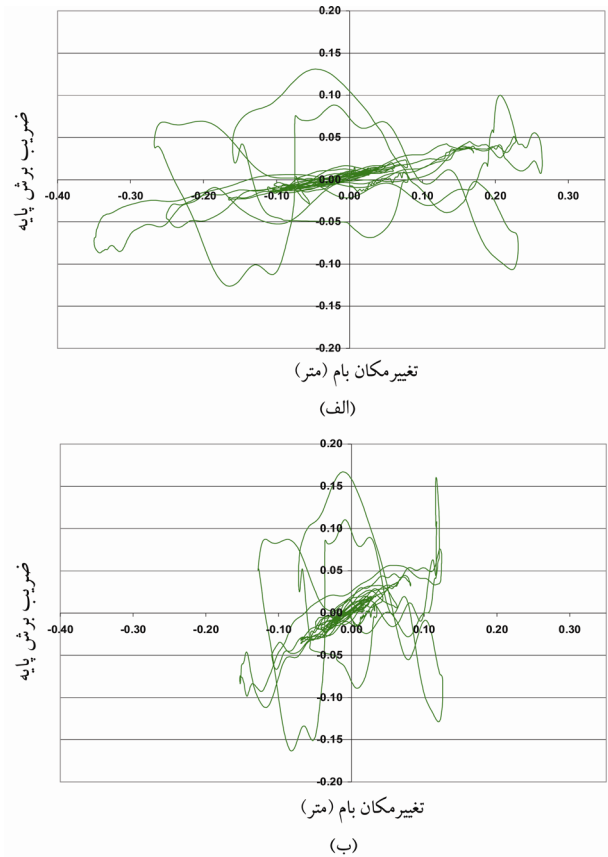
دسته دوم نمودارهای تاریخچه زمانی مورد بررسی، نمودارهای برش پایه می‌باشد. این نمودارها بصورت نرمال شده به وزن سازه محاسبه شده و در واقع، ضریب برش پایه (ضریب زلزله) را نشان می‌دهند. در شکل ۶ نمودار ضریب برش پایه بر حسب زمان برای سازه $b15x3$ ، به‌عنوان نمونه نشان داده شده است.

در مورد این نمودارها و نمودارهای مشابهی که نشان داده نشده‌اند می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱. در همه سازه‌ها ضریب برش پایه در حالت U کمتر از حالت W/U است. این موضوع نشان‌دهنده آن است که نیروهای داخلی سازه در حالت U همواره کمتر از حالت دیگر است و در واقع اعضای سازه در این حالت تغییر مکان‌های نسبی کمتری داشته‌اند، اگرچه تغییرمکان کلی سازه در این حالت بیشتر است.

۵-۳- نمودارهای برش پایه بر حسب تغییر مکان بام

نمودارهای برش پایه بر حسب تغییر مکان بام به شکل حلقه‌های نامنظم بیضوی هستند که غالباً در اطراف مرکز مختصات قرار می‌گیرند. منحنی‌های مذکور معیار مناسبی برای ارزیابی رفتار غیرخطی سازه در هنگام تحلیل دینامیکی غیرخطی هستند. اگر سازه مانند یک سیستم یک درجه آزادی فرض شود، تغییر مکان طبقه آخر پارامتر مناسبی برای اندازه‌گیری جابجایی و برش پایه نیز معیار مناسبی از نیروی کل وارده به آن می‌باشد. این نمودار مشابه منحنی‌های هیستریزیس در بارگذاری استاتیکی غیرخطی می‌باشد. سطح داخلی منحنی‌ها معیاری از انرژی جذب شده توسط سیستم بوده و شیب خط واصل دو قطب بیضی بیانگر سختی کلی سازه است. در شکل ۷، نمودار برش پایه بر حسب تغییر مکان بام برای سازه b15x3، بعنوان نمونه نشان داده شده است.



شکل ۷: نمودار ضریب برش پایه بر حسب تغییر مکان بام سیستم دوگانه b15x3 با زلزله ناغان (الف) در حالت U و (ب) در حالت W/U

Fig. 7. Base shear coefficient-roof displacement curve of dual system frame b15x3 for Naghan earthquake; a) considering uplift (U), b) without uplift (W/U)

در رابطه با این نمودارها نکات زیر قابل ذکر است:

۱. نمودارهای مربوط به سازه در حالت U کشیده‌تر و پراکنده‌تر از حالت دیگر هستند. این امر در اثر تغییر مکان‌های بزرگتر و تغییر

مکرر آرایش تکیه‌گاه‌های سازه در این حالت است.

۲. نمودارهای مربوط به حالت U به طور کلی خوب‌تر از حالت W/U هستند که نشان می‌دهد سختی جانبی سازه در حالت U کمتر از حالت دیگر است.

۵-۴- نمودارهای انرژی جذب شده سازه

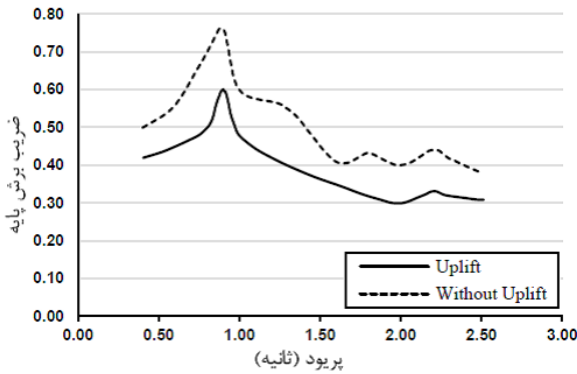
این نمودارها که در واقع انتگرال سطح زیر منحنی برش پایه بر حسب تغییر مکان بام می‌باشند، معیاری جهت ارزیابی انرژی جذب شده توسط سازه تلقی می‌گردند. برای محاسبه نمودارهای مذکور، در هر لحظه سطح زیر نمودارهای برش پایه بر حسب تغییر مکان بام، بدون توجه به علامت برش پایه محاسبه و با مقادیر قبلی جمع می‌شود. برای انتگرال‌گیری از روش دوزنقه‌ای استفاده شده است. همانطور که انتظار می‌رود، منحنی‌های حاصل به صورت تجمعی بوده و روند صعودی دارند و نوسانات مشاهده شده، ناشی از اختلاف لحظه‌ای علامت نیرو و تغییر مکان (اختلاف فاز) می‌باشد. در شکل ۸ نمونه‌ای از منحنی‌های مذکور مشاهده می‌شود.

طبق آنچه در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود، منحنی‌های مربوط به حالت U همواره بالاتر از یا هم‌سطح با منحنی‌های مربوط به حالت دیگر قرار می‌گیرد. روند مشاهده شده به این صورت است که تا قبل از ایجاد برکنش منحنی‌های هر دو حالت بر روی یکدیگر قرار می‌گیرند. با افزایش زمان و ایجاد برکنش در سازه در حالت U، فاصله دو منحنی افزایش می‌یابد. این روند در زلزله‌های طیس و منجیل که حرکات شدید آن در بازه زمانی بزرگتری پخش شده‌اند، محسوس‌تر است. این موضوع نشان می‌دهد که در اثر بروز برکنش در سازه، جذب انرژی نیز افزایش می‌یابد. رفتار مذکور مانند رفتار سیستم جداسازی پایه در حالتی است که جداکننده دارای میرایی بالایی باشد.

تمامی تحلیل‌های فوق به نحو چشمگیری تایید کننده یکدیگر بوده و بیانگر افزایش واکنش تغییر مکان و کاهش واکنش نیروی سازه‌های مورد بررسی در اثر برکنش می‌باشد. در بند بعدی ابزار ساده‌ای برای تخمین میزان این تغییرات ارائه می‌گردد.

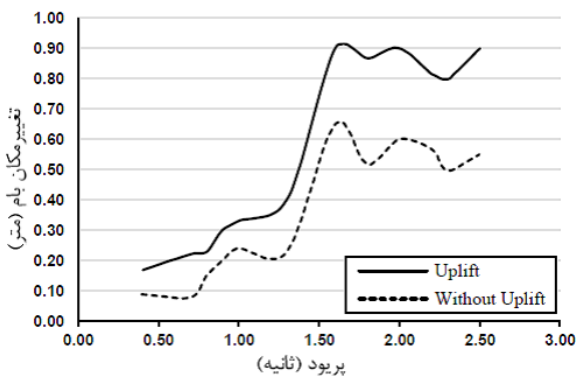
۵-۵- طیف واکنش سازه در حالت برکنش

پس از تحلیل دینامیکی همه مدل‌ها و تعیین تغییر مکان‌ها و ضرایب برش پایه حداکثر با سه شتاب‌نگاشت ناغان، طیس و منجیل، به ازای هر سازه و هر زمان تناوب اصلی، حداکثر پاسخ سازه در برابر همه شتاب‌نگاشت‌ها محاسبه و نقاط مختلف طیف مشخص می‌شوند. سپس این نقاط توسط منحنی به هم متصل می‌گردند. این عمل یک بار برای سازه در حالت U و بار دیگر در حالت W/U انجام و هر دو منحنی در یک نمودار ترسیم می‌گردد. شکل ۹ طیف شتاب (ضریب برش پایه نرمال شده به g) و شکل ۱۰ طیف تغییر مکان حاصله را نشان می‌دهد. طیف تغییر مکان حالت U همه جا بالاتر از حالت W/U و برعکس آن، طیف شتاب حالت U همه جا



شکل ۹: طیف شتاب سازه در دو حالت با و بدون برکنش

Fig. 9. Acceleration spectra of studied structures (considering uplift and without uplift)



شکل ۱۰: طیف تغییر مکان سازه در دو حالت با و بدون برکنش

Fig. 10. Displacement spectra of studied structures (considering uplift and without uplift)

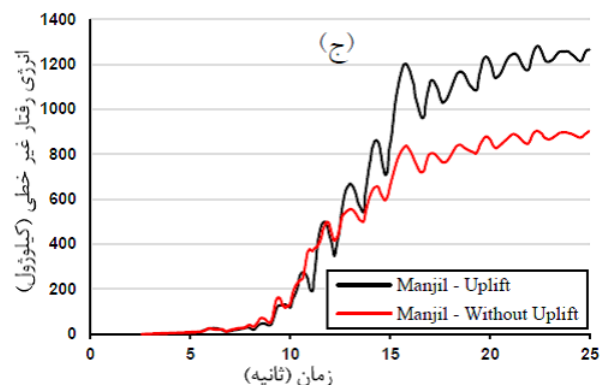
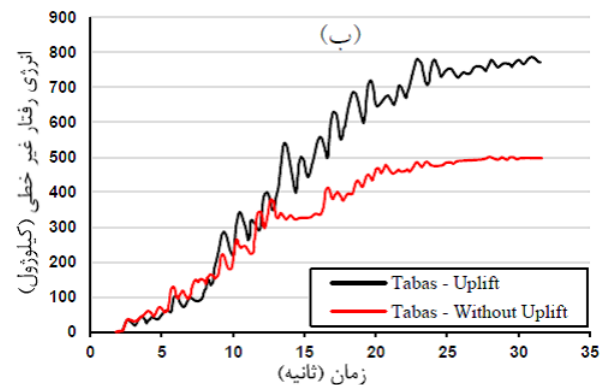
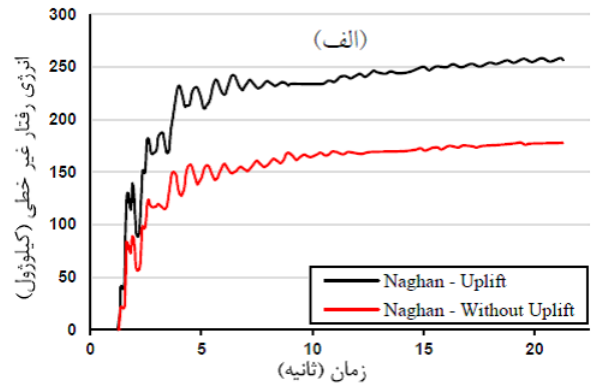
با استفاده از شکل‌های بالا می‌توان در طراحی سازه برای سادگی پای آن را گیردار فرض کرد ولی با ضرایب اصلاح گفته شده، تغییر مکان و نیروهای جانبی آن را اصلاح نمود.

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه اثر برکنش روی رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی ۵ تا ۱۵ طبقه مورد مطالعه قرار گرفت. به طور کلی می‌توان اهم نتایج حاصل شده در این تحقیق را به شرح زیر تقسیم‌بندی نمود:

۱. برکنش زمان تناوب مؤثر سازه‌های مورد بررسی را افزایش می‌دهد و در نتیجه تاثیر مود اول را در پاسخ سازه بالاتر می‌برد. افزایش زمان تناوب مشاهده شده در پاسخ سازه‌های مورد مطالعه، حدود ۱/۵ برابر زمان تناوب اصلی سازه در حالت عدم امکان برکنش است.
۲. در صورت بروز برکنش، تغییر مکان‌های نسبی بیشتر اعضای سازه‌های این مطالعه کاهش می‌یابد و در نتیجه نیروهای داخلی این اعضا کم می‌شود و آسیب‌های ناشی از تغییر مکان‌های بزرگ

پایین‌تر از حالت W/U قرار دارد. در مورد طیف تغییر مکان نسبت افزایش از W/U به U برای پیوندهای کوچکتر از ۱/۵ ثانیه برابر ۱/۸۱ و پس از آن برابر ۱/۵۴ می‌باشد. اما کاهش در طیف شتاب به صورت نسبت حالت W/U به U برای همه پیوندها در حدود ۱/۲۹ است.



شکل ۸: نمودار انرژی جذب شده برحسب زمان مربوط به سازه $b15x3$ با (الف) زلزله ناغان، (ب) زلزله طبس و (ج) زلزله منجیل

Fig. 8. Absorbed energy-time history curve of dual system frame $b15x3$; a) Naghan earthquake, b) Tabas earthquake, c) Manjil earthquake

- Structural Dynamics, 35(14) (2006) 1767-1785.
- [5] M. Midorikawa, T. Sudo, T. Asari, T. Azuhata, T. Ishihara, Three-dimensional seismic response of ten-story steel frames with yielding base plates allowed to uplift, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 74(637) (2009) 495-502.
- [6] X. Qin, N. Chouw, Experimental investigation of uplift effect on structures in earthquakes, 2010 NZSEE Conference, Auckland, New Zealand, (2010).
- [7] M.E. Boostani Darmian, M. Azhdary Moghaddam, H.R. Naseri, Soil-Structure Interaction In Steel Braced Structures With Foundation Uplift, *IJRRAS*, 7(2) (2011) 185-191.
- [8] F. Khoshnoudian, M. Shahreza, F. Paytam, P-Delta effects on earthquake response of structures with foundation uplift, *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 34(1) (2012) 25-36.
- [9] Y. Chen, X. Qin, N. Chouw, Effect of higher vibration modes on seismic response of a structure with uplift, *Proceeding of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, (2012).
- [10] F. Zhou, M. Mori, N. Fukuwa, A new uplift foundation analysis model to simulate dynamic nonlinear soil-structure-interaction, *Proceeding of the The 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, (2012).
- [11] FEMA356, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., (FEMA Publication No. 356), (2000).
- [12] NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, prepared by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., (2009).
- [13] IBC, International Building Code, International Code Council, Falls Church, Virginia. (2009).
- [14] ASCE/SEI 41-13, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, (2013).
- وجود نخواهد آمد، اگرچه تغییر مکان کلی سازه افزایش می‌یابد. بنابراین دو نکته باید رعایت شود؛ اول اینکه سازه در برابر واژگونی با امکان برکنش کنترل شود و دوم، محدوده اعضایی که در اثر برکنش نیروهای داخلی آنها افزایش یافته است، کنترل شوند. نمونه‌ای از این اعضا ستون‌های کناری برکنش یافته می‌باشد که هنگام برخورد مجدد با زمین ضربات شدیدی را تحمل می‌کنند و یا هنگامی که وجه دیگر سازه برکنش یافته، لنگرهای خمشی و نیروهای فشاری و حتی برشی وارد بر آنها بسیار افزایش می‌یابد. همچنین تیرهای طبقه‌های پایین نیز در هنگام برکنش لنگرهای خمشی بزرگتری نسبت به حالت بدون برکنش تحمل می‌کنند.
۳. اثر برکنش در رفتار سازه‌های با نسبت شکل بالا در این مطالعه بیشتر است.
۴. اثر برکنش در رفتار سازه‌های مهاربندی شده مورد بررسی بیش از سازه‌های قاب خمشی است. علت آن وارد شدن لنگر ناشی از بار جانبی فقط بر دهانه‌های مهاربندی شده است که باعث می‌شود برکنش ستون‌های آن سریعتر صورت گیرد.
۵. انرژی جذب شده توسط سازه‌های این مطالعه در حالت مجاز به برکنش بیش از حالت دیگر است. بخش مهمی از این انرژی ناشی از تغییر مکان‌های جسم صلب سازه در اثر برکنش است به طوری که انرژی هیستریزیس جذب شده کمتر از حالت بدون برکنش بوده و خسارت سازه‌ای به طور کلی کمتر می‌شود.

مراجع

- [1] A.A. Hucklebridge, R.W. Clough, Seismic Response of Uplifting Building Frame, *Journal of the Structural Division*, 104(8) (1978) 1211-1229.
- [2] I.N. Psycharis, Effect of Base Uplift on Dynamic Response of SDOF Structures, *Journal of Structural Engineering*, 117(3) (1991) 733-754.
- [3] S.K. Smith, Parametric Analysis of Dynamically Loaded Concentrically Braced Steel Frames Allowed to Uplift, M.Sc. thesis, University of Washington, USA, (1995).
- [4] M. Midorikawa, T. Azuhata, T. Ishihara, A. Wada, Shaking table tests on seismic response of steel braced frames with column uplift, *Earthquake Engineering and*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

F. Behnamfar, F. Pouyan, M. Omidi, H. Zibasokhan, Effect of Uplift on Behavior of Steel Structures and Response Modification Factors, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(2) (2018) 315-326.

DOI: 10.22060/ceej.2017.11257.4995

