ISAV2024
چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۱و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران

بررسی اثرات انتشار امواج لرزه‌ای در سازه‌های قاب خمشی دسته شده و هگزاگرید دارای پارامتر سختی یکسان

نیما لطفی[آ]، صفورا مرشد شکرچی[ب]، افشین مشکوه الدینی[پ*]، پیمان هممی[ت]

[آ] ایران، تهران، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشجوی کارشناسی ارشد
[ب] ایران، تهران، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشجوی دکتری
[پ] ایران، تهران، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، عضو هیأت علمی
[ت] ایران، تهران، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، عضو هیأت علمی

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: meshkat@khu.ac.ir

چکیده

در این مقاله به بررسی اثرات مشخصه انتشار امواج لرزه‌ای در دو سازه مطالعاتی ۱۰ طبقه با اسکلت‌های مقاوم خمشی دسته شده و نیز قاب پیوسته هگزاگرید، بر اساس استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی پرداخته شده است. بدین منظور، ستون‌ها و اعضای مورب سازه‌های مطالعاتی با کاربرد بخش‌های متشکل از ساختارهای یک المانی تا پنج المانی، شبیه‌سازی شده و در محیط نرم‌افزار SAP2000 برپا گردیده‌اند. پارامتر سختی جانبی یکسان برای هر دو سازه مطالعاتی لحاظ گردیده است. مجموعه رکوردهای سه مولفه‌ای انتخابی شامل ۶ جنبش نیرومند حوزه نزدیک حاوی اثرات نیرومند جهت‌داری پیشرونده است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های جنبش‌های نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل، پدیدار شدن ساختارهای پالس‌گونه در تاریخچه زمانی مربوطه است. وجود اسپایک‌های پردامنه و پالس‌های بزرگ پریود بلند در تاریخچه زمانی رکوردهای حوزه نزدیک، پارامترهای پاسخ لرزه‌ای سازه را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین، نتایج وابسته این مقوله نیز نشان دهنده تغییرات اندک در مشخصات آنالیز مودال، همراه با افزایش تعداد المان محدود برای شبیه‌سازی عضوهای سازه است. سازه قاب خمشی دسته شده، دارای ویژگی رفتاری همانند یک ساختار یکپارچه طره‌ای است و سختی جانبی بسیار بالایی دارد. همچنین، سیستم سازه‌ای هگزاگرید نیز از کارایی و زیبایی هندسی در پیکربندی اسکلت مقاوم برخوردار است. مهم‌ترین ویژگی برجسته این ساختار سازه‌ای، کاربرد در آرایش‌های هندسی گوناگون و همچنین کاهش موثر وزن و مصرف مصالح در اسکلت مقاوم می‌باشد. در این تحقیق، سازه‌های مطالعاتی شامل ساختارهای ۱۰ طبقه است که در پلان و ارتفاع منظم می‌باشند. طراحی اسکلت مقاوم بر اساس الزامات موجود در ویرایش چهارم آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) و نیز مباحث ششم و دهم مقررات ملی ساختمان ایران انجام شده است. استفاده از شبکه‌های مختلف المان محدود (با طول متفاوت) برای شبیه‌سازی ستون‌های سازه، دربرگیرنده تأثیرات وابسته به فرکانس‌های بالاتر موجود در محتوای بسامدی رکوردهای زلزله می‌باشد. این دیدگاه نیز با دامنه تغییرات برآیندهای نیرویی و پارامترهای پاسخ سازه تحت رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک در ارتباط است.

کلمات کلیدی: انتشار امواج لرزه‌ای؛ زلزله حوزه نزدیک؛ قاب خمشی دسته شده؛ هگزاگرید.

۱- مقدمه

با توجه به اهمیت روزافزون ابداع دیدگاه‌های هر چه کامل‌تر در طراحی ساختارهای مقاوم در برابر زلزله، تحلیل دقیق رفتار لرزه‌ای سازه‌ها به یکی از موضوعات مهم در مهندسی عمران تبدیل شده است. امروزه با توجه به پیچیدگی‌های ناشی از رفتار غیرخطی مصالح و سازه‌ها تحت اثر بارهای لرزه‌ای، استفاده از روش‌های تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به منظور دستیابی به نتایجی دقیق‌تر و واقع‌گرایانه‌تر، به شدت مورد توجه قرار گرفته است. تحلیل و ارزیابی انتشار امواج لرزه‌ای ناشی از بارهای خارجی و رخدادهای ارتعاشی در اسکلت‌های مقاوم، یکی از مباحث مهم در دینامیک سازه‌ها محسوب می‌شود. همچنین در همین موضوع نیز می‌توان به دیدگاه‌های تحلیلی در زمینه پایداری دینامیکی سازه‌ها اشاره نمود. سازه‌های مطالعاتی انتخابی در این تحقیق، شامل قاب خمشی دسته شده و نیز قاب پیوسته هگزاگرید است. یک نکته مهم آن است که دامنه اثرات لنگی برش که در رفتار اسکلت قاب محیطی با ساختار منفرد مشاهده می‌شود، در مشخصات پاسخ سازه مقاوم با پیکربندی دسته شده تا حد زیادی کاهش یافته است. سازه قاب خمشی دسته شده شامل تعدادی صفحات قاب پیوسته صلب است که در دو جهت عمود بر هم قرار می‌گیرند. این پیکربندی سازه‌ای، افزون بر چهار قاب خمشی پیرامونی (اسکلت مقاوم) دارای قاب‌های صلب داخلی نیز می‌باشد. سازه دیگر مورد مطالعه در این پژوهش، قاب پیوسته هگزاگرید است. ویژگی‌های خاص این سیستم مقاوم نیز کاهش مصالح مصرفی و افزایش نسبی کارکردهای معماری، همراه با برپا نگه‌داشتن کارایی‌های مقاومتی و حفظ پایداری سازه است.

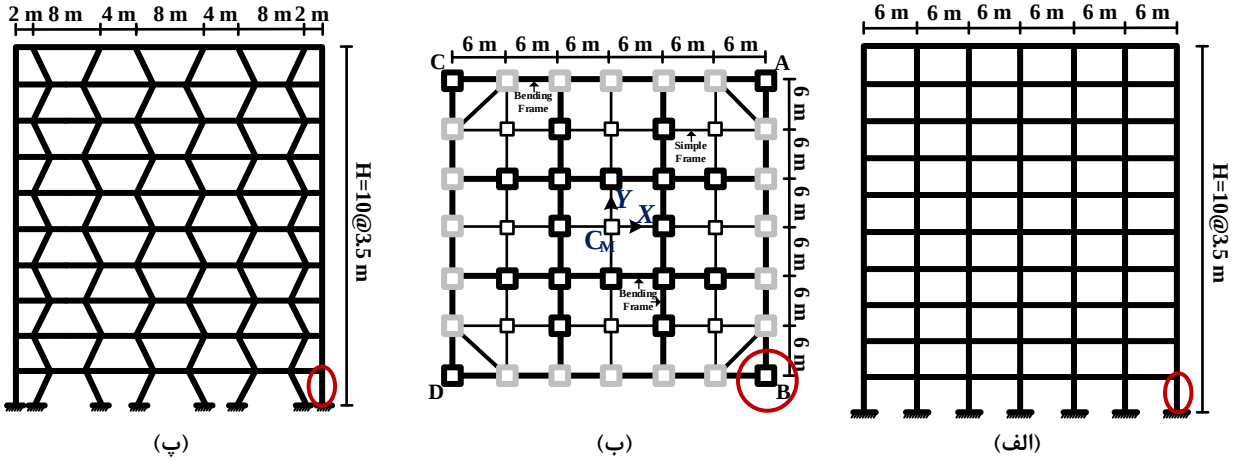
در مطالعات گذشته، تأثیر امواج لرزه‌ای بر رفتار سازه‌ها به‌ویژه در سازه‌های قاب خمشی دسته شده و هگزاگرید به صورت محدودی بررسی شده است. Sugiyama و همکاران در سال ۱۹۹۵ به بررسی اثرات انتشار امواج لرزه‌ای بر پاسخ سازه‌های بلند پرداختند. در این تحقیق، هر دو دسته امواج حجمی و نیز سطحی مورد توجه قرار گرفته و دامنه ارتعاشات در نقاط مختلف ساختمان هدف، ارزیابی شد. هدف این مطالعه درک چگونگی تأثیر این امواج لرزه‌ای بر پاسخ سازه، به‌ویژه از نظر مشخصات جنبش نیرومند زمین و اثرات موضعی در بخش‌های خاص ساختمان مطالعاتی بود[۱]. Fehr و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک بررسی جامع بر روی روند تأثیر سازندهای زمین‌شناسی بر چگونگی انتشار امواج لرزه‌ای و اثرات ساختگاه انجام دادند. همچنین در سازمان علمی پژوهش مذکور با استفاده از شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی امواج لرزه‌ای، به اندازه‌گیری میزان افزایش و کاهش مشخصات فیزیکی ارتعاشات حاصله ناشی از تاثیرات و ویژگی‌های زمین‌شناسی مختلف پرداخته شده است[۲]. Hao و همکاران در سال ۲۰۲۴ به بهینه‌سازی لرزه‌ای سازه قاب‌های خمشی محیطی دسته شده فولادی دارای دو الگوی عقب نشینی حلزونی و متقارن تحت زلزله‌های نیرومند با دو دیدگاه بهبود سختی اعضای ضعیف و یا افزودن میراگر به قسمت‌های ضعیف سازه‌ها را مورد بررسی قرار دادند[۳]. Zheng و همکاران در سال ۲۰۲۴ عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی چند طبقه با مهاربندهای ضربدری و قاب‌های فولادی چند طبقه با مهاربندهای ضربدری بهبودیافته تحت شرایط مختلف را با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس بررسی کردند[۴].

در این مقاله همراه با در نظر گرفتن نتایج مطالعات گذشته و استفاده از دو سازه مقاوم پرکاربرد در اسکلت ساختمان‌های طبقاتی، به بررسی تحلیلی انتشار امواج لرزه‌ای و تأثیرات وابسته به شبیه‌سازی شبکه المان محدود (مفروض) برای اعضای اصلی سازه پرداخته شده است. رویکرد یاد شده، بر اساس تعریف پنج آرایش مختلف برای شبکه المان محدود سازنده پیکره تحلیلی اعضای مورب و نیز ستون‌های سازه‌های مطالعاتی ۱۰ طبقه، با ساختارهای قاب خمشی دسته شده و قاب پیوسته هگزاگرید مورد بررسی قرار گرفته است. پیرو این روند نیز تحلیل پارامترهای اصلی رفتار دینامیکی غیرخطی سازه‌های مطالعاتی صورت گرفته و آورده‌های حاصل از پردازش عددی نتایج محاسباتی بیان گردیده است.

۲- اسکلت مقاوم سازه‌های مطالعاتی

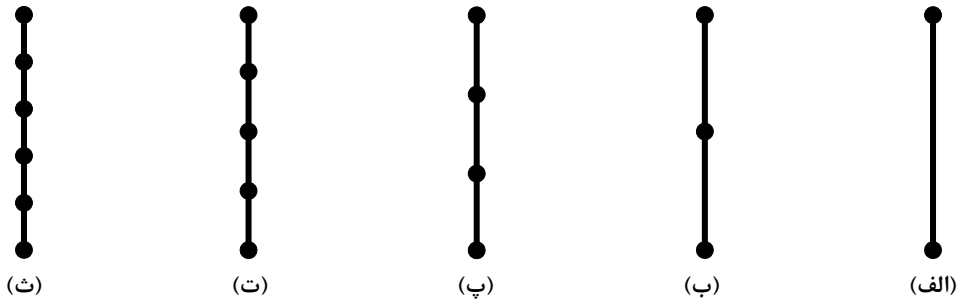
در این پژوهش، به منظور بررسی اثرات انتشار امواج لرزه‌ای ناشی از زلزله در سازه‌های فولادی، ویژگی‌ها و مشخصات پاسخ دینامیکی غیرخطی دو ساختار مقاوم از نوع قاب خمشی دسته شده و نیز قاب پیوسته هگزاگرید (با پیکربندی پیوسته پیرامونی) دارای پلان متقارن (شکل ۱) تحت چندین جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل بررسی شده است. سازه‌های مطالعاتی بر روی خاک

نوع II و در منطقه خطر نسبی خیلی زیاد لرزه‌ای قرار گرفته‌اند. همچنین برای همگی طبقات، بارهای مرده و زنده با توجه به مبحث ششم مقررات ملی ساختمان برای کاربری مسکونی به ترتیب برابر ۰/۵ t/m^2 و ۰/۲ t/m^2 تعیین شده‌اند[۵]. توصیفات بارگذاری لرزه‌ای و ترکیبات مربوطه نیز مطابق با ویرایش چهارم آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) صورت گرفته است[۶]. ضریب رفتار سازه قاب خمشی دسته شده و نیز سازه قاب پیوسته هگزاگرید، به ترتیب برابر با ۵ و ۴ در نظر گرفته شده است[۷]. طراحی سازه‌های مطالعاتی بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۸) و رعایت اصل ستون قوی-تیر ضعیف انجام گردید[۸] و پردازش‌های عددی بر اساس نرم افزار SAP2000 صورت گرفته است[۹]. پلان سازه‌های مطالعاتی در شکل ۱ نشان داده شده است. موقعیت و آرایش قرارگیری ستون‌ها و اعضای مورب در سازه هگزاگرید (به صورت مقاطع با نمایش کم رنگ بوده و متفاوت از چیدمان (شامل همگی مقاطع) مربوط به سازه قاب خمشی دسته شده می‌باشد. همچنین، ستون انتخابی جهت بررسی پارامترهای رفتاری نیز با دایره قرمز رنگ مشخص شده است[۱۰]. مشخصات مقاطع طراحی شده برای سازه‌های مطالعاتی در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.



شکل ۱- نما و پلان سازه‌های مطالعاتی همراه با تعیین موقعیت ستون انتخابی؛ (الف) نمای سازه قاب خمشی دسته شده، (ب) چیدمان ستون‌های سازه قاب خمشی دسته شده (شامل همگی مقاطع در پلان) و اعضای مورب سازه قاب پیوسته هگزاگرید (شامل گروه مقاطع کم رنگ و مقاطع گوشه‌ای در پلان)، (پ) نمای سازه قاب پیوسته هگزاگرید

جهت ارزیابی اثرات انتشار امواج لرزه‌ای و بررسی پاسخ غیرخطی سازه‌های مطالعاتی تحت جنبش‌های نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل، از پنج حالت مختلف آرایش تحلیلی و تقسیم‌بندی شبکه المان‌های محدود خمشی در شبیه‌سازی اعضای ستون استفاده شده است. شبیه‌سازی پایه (شکل ۲-الف) برای تمامی ستون‌ها به صورت تک المان محدود در نظر گرفته شده است. همچنین برای چهار مدل دیگر (شبیه‌سازی‌های شکل ۲-ب تا ث) نیز ستون‌ها و همچنین المان‌های مورب در سازه هگزاگرید به ترتیب به ۲، ۳، ۴ و ۵ قسمت تقسیم شده‌اند. شکل ۲ نشان‌دهنده شبکه المان‌های محدود در نظر گرفته شده برای اعضای یاد شده است.



شکل ۲- ساختار هندسی و تقسیم بندی تعداد المان در نظر گرفته شده برای عضو ستون گوشه طبقه اول (شکل ۱)؛ (الف) عضو با ۱ المان؛ (ب) عضو با ۲ المان؛ (پ) عضو با ۳ المان؛ (ت) عضو با ۴ المان؛ (ث) عضو با ۵ المان

جدول ۱- مقطع المان‌های سازه مطالعاتی Bundled-Tube (میلی‌متر)

گروه طبقات	ستون‌های داخلی و خارجی (قاب‌های صلب)	ستون‌های داخلی و خارجی (قاب‌های مفصلی)	تیرها (قاب‌های صلب)	تیرها (قاب‌های مفصلی)
۱-۵	BOX 500X25	BOX 400X25	PG 450X350X15X25	PG 350X150X10X20
۶-۱۰	BOX 450X15	BOX 350X10	PG 400X300X10X20	PG 350X150X10X20

جدول ۲- مقطع المان‌های سازه مطالعاتی Hexagrid (میلی‌متر)

گروه طبقات	ستون‌های مورب	ستون‌های داخلی و خارجی (قاب‌های صلب)	ستون‌های داخلی و خارجی (قاب‌های مفصلی)	تیرها (قاب‌های صلب)	تیرها (قاب‌های مفصلی)
۱-۵	BOX 500X20	BOX 500X25	BOX 400X25	PG 450X350X15X25	PG 350X150X10X20
۶-۱۰	BOX 450X10	BOX 450X15	BOX 350X10	PG 400X300X10X20	PG 350X150X10X20

۳- انتخاب رکوردهای زلزله حوزه نزدیک

جنبش‌های نیرومند حوزه نزدیک دارای اثرات جهت‌داری پیشرونده، به دلیل وجود پالس‌های مشخص سرعت هم‌پایه با گام پرش پلکانی در نمودار تجمعی رها شدن انرژی زلزله، خسارات زیادی به سازه‌ها وارد می‌نمایند. از این‌رو، رویکرد اصلی در این پژوهش بررسی اثرات انتشار امواج لرزه‌ای تحت این گروه از رکوردهای زلزله می‌باشد. بدین منظور، شش رکورد نیرومند سه مولفه‌ای از ۴ رخداد لرزه‌ای با بزرگای بیش از ۶.۵ ریشتر و برگرفته از پایگاه تحقیقات مهندسی زلزله PEER انتخاب شده است[۱۱]. انتخاب رکوردها به گونه‌ای بوده است که بتواند تفاوت در ترکیب و ساختار پالس‌های تاریخچه زمانی سرعت را پوشش دهد، (جدول ۳).

پارامترهای بیشینه شتاب زمین (PGA) و نیز بیشینه سرعت زمین (PGV) برای رکوردهای زلزله، بر پایه ارزیابی عددی تاریخچه زمانی مربوط به مؤلفه موازی (با نماد LN)، همچنین مولفه عمود (با نماد TR) نسبت به صفحه گسیختگی گسل و نیز مولفه قائم (با نماد UP) سنجیده و برآورد می‌شوند.

جدول ۳- مشخصات رکوردهای زلزله انتخابی [۱۱]

اثرات جهت‌داری	Magnitude M_w	PGV (cm/s)	PGA (g)	Component	Ground Motion
حوزه نزدیک - پیش‌رونده	۷/۳۵	۹۷/۳۴۵	۰/۸۳۶	LN	Tabas 1978 (Tabas City - TAB)
		۱۲۱/۱۸۳	۰/۸۵۲	TR	
		۴۴/۴۰۹	۰/۶۸۸	UP	
حوزه نزدیک - پیش‌رونده	۶/۶۰	۶۱/۱۲۴	۰/۵۷۰	LN	Bam 2003 (Bam City - BAM)
		۱۰۷/۴۱۸	۰/۷۶۳	TR	
		۳۹/۲۱۷	۰/۹۷۴	UP	
حوزه نزدیک - پیش‌رونده	۶/۷۰	۹۵/۲۰۳	۰/۶۰۰	LN	Northridge 1994 (Jenson Filter Plant - JEN)
		۸۳/۸۳۸	۰/۴۲۹	TR	
		۳۰/۴۸۲	۰/۳۶۷	UP	
حوزه نزدیک - پیش‌رونده	۶/۷۰	۶۷/۸۳۳	۱/۰۲۲	LN	Northridge 1994 (Jenson Filter Plant - JGB)
		۸۷/۷۴۵	۰/۵۴۴	TR	
		۲۷/۸۵۵	۰/۷۷۶	UP	
حوزه نزدیک - پیش‌رونده	۶/۵۰	۶۴/۸۸۱	۰/۴۱۰	LN	Imperial Valley 1979 (El Centro Array 6 - E06)
		۱۰۹/۷۱۵	۰/۴۳۹	TR	
		۵۶/۲۴۸	۱/۶۵۵	UP	
حوزه نزدیک - پیش‌رونده	۶/۵۰	۴۷/۶۱۸	۰/۳۳۸	LN	Imperial Valley 1979 (El Centro Array 7 - E07)
		۱۰۹/۲۳۴	۰/۴۶۳	TR	
		۲۶/۲۸۳	۰/۵۴۴	UP	

٤- ارزیابی نتایج

سازمان علمی این مقاله شامل ارزیابی اثرات اسپایک‌های پردامنه شتاب و پالس پیوسته سرعت موجود در ساختار تحلیلی رکوردهای حوزه نزدیک، بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی از دو دیدگاه تاریخچه زمانی پارامتر نیاز تغییرمکان نسبی طبقات (دریفت) و تغییرات نیروی محوری المان ستون انتخابی (در تراز طبقه اول) است.

٤-١ مشخصات آرایش مودال سازه‌های مطالعاتی

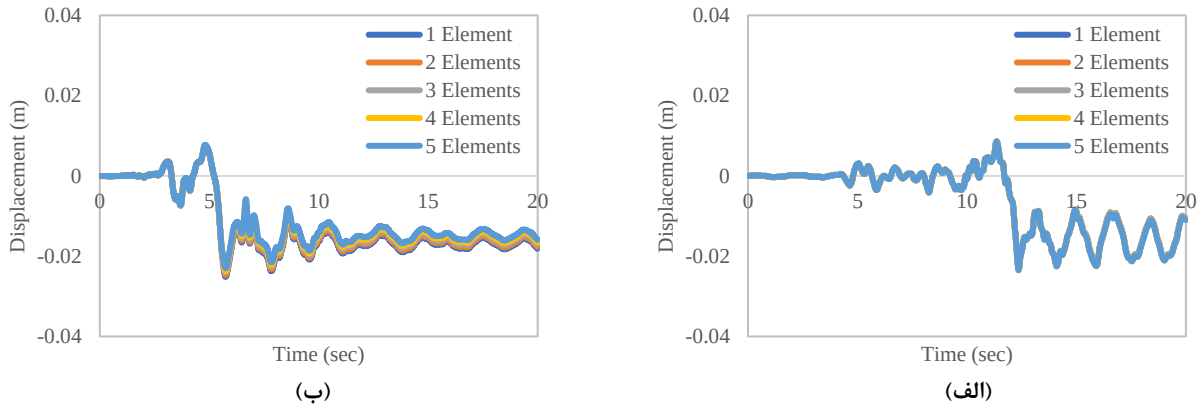
ویژگی‌های طرح لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی، نمایش‌دهنده ساختار تحلیلی مودال با حاکمیت بردارهای مود ارتعاش انتقالی و نمود رفتار پیچشی سخت می‌باشد. با افزایش تعداد تقسیم‌بندی در نظر گرفته شده برای اعضای ستون و نیز تیر-ستون‌های مورب هگزاگرید از یک تا سه جزء محدود، کاهش بسیار اندک در پریود پایه (ارتعاش طبیعی) سازه‌های مطالعاتی دیده می‌شود. همچنین، استفاده از ۴ و ۵ المان محدود در شبیه‌سازی نیز سبب ایجاد تغییرات در اندازه پریود پایه سازه‌های مطالعاتی نمی‌شود. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که فرض کاربرد شبیه‌سازی تک المان برای اعضای ستون در سازه قاب خمشی دسته شده و نیز هر دو دسته اعضای ستون و تیر-ستون‌های مورب در سازه هگزاگرید، دارای دقت کافی در محاسبات آنالیز مودال می‌باشد.

جدول ۴- تغییرات پریود اصلی (ثانیه) سازه بر اساس تعداد المان‌های تشکیل دهنده یک ستون یا یک عضو مورب

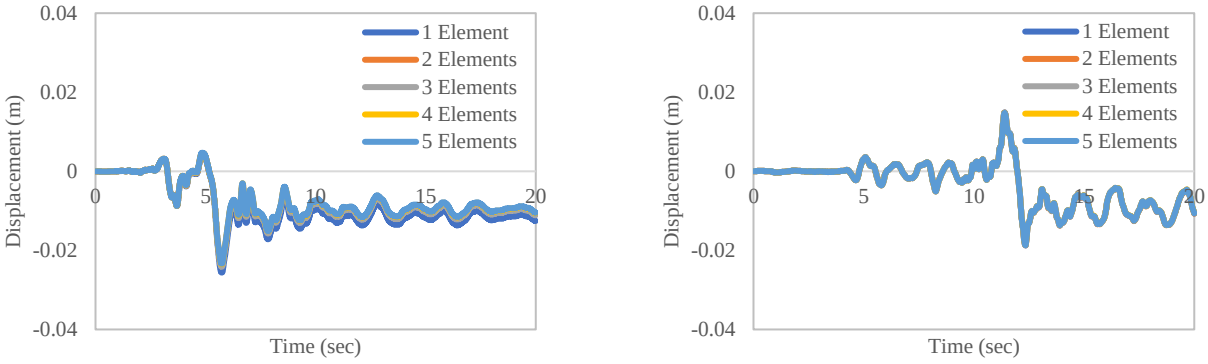
تعداد المان محدود شبیه سازی کننده	۱	۲	۳	۴	۵
سازه قاب خمشی دسته شده	۱.۶۳۹	۱.۶۳۹	۱.۶۳۹	۱.۶۳۹	۱.۶۳۹
سازه هگزاگرید	۱.۴۲۶	۱.۴۲۵	۱.۴۲۵	۱.۴۲۵	۱.۴۲۵

٤-٢ تغییرمکان جانبی

تاریخچه زمانی تغییرمکان جانبی مربوط به گره میانی در ستون گوشه (تراز همکف) از هر دو سازه مطالعاتی قاب خمشی دسته شده و قاب پیوسته هگزاگرید (شکل ۱) تحت رکوردهای TAB و JGB در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. شبکه اجزای محدود شامل حالت‌های تک و چند المان برای عضو مذکور بکار برده شده است. ملاحظه می‌گردد که تغییر تعداد المان محدود در ساختارهای ریاضی سازه، به‌ویژه تحت برخی حرکات قوی زمین مانند رکورد TAB (شکل‌های ۳-الف و ۴-الف)، تفاوت چندانی در دامنه عددی پارامتر مطالعاتی ایجاد نمی‌کند. همچنین از سوی دیگر، تفاوتی اندک در مقادیر تاریخچه زمانی تغییرمکان جانبی سازه‌های مطالعاتی تحت رکورد JGB بویژه پس از پالس سرعت (شکل‌های ۳-ب و ۴-ب) مشاهده می‌شود. اندرکنش میان پالس پیوسته سرعت در تاریخچه زمانی هر دو مؤلفه افقی و نیز اسپایک‌های پردامنه و با فرکانس زیاد در ساختار فیزیکی مؤلفه قائم، سبب کاهش اندک دامنه پاسخ برای مدل‌های مطالعاتی حاوی شبکه المان محدود ریزتر شده است.



شکل ۳. تاریخچه زمانی تغییرمکان جانبی مربوط به گره میانی (تعریف شده) در ستون گوشه پلان سازه قاب خمشی دسته شده تحت رکوردهای حوزه نزدیک: (الف) TAB ، (ب) JGB

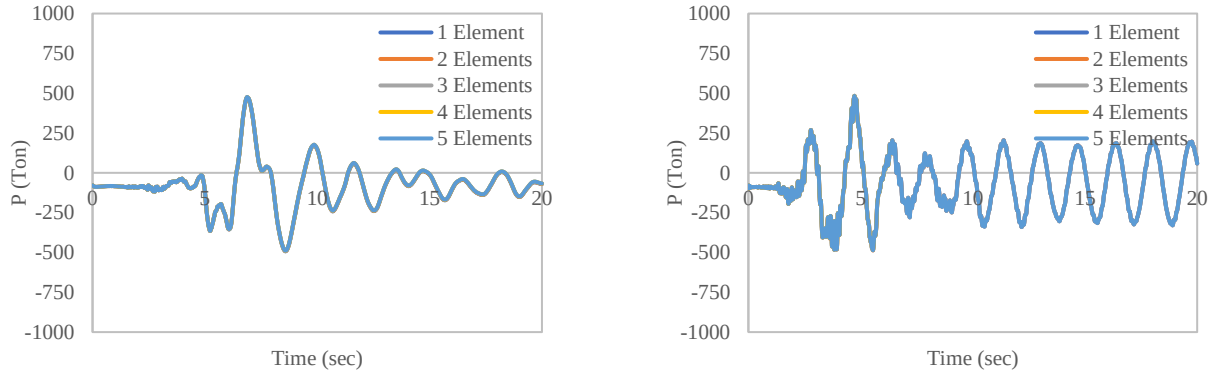


(ب) (الف)

شکل ۴. تاریخچه زمانی تغییرمکان جانبی مربوط به گره میانی (تعریف شده) در ستون گوشه پلان سازه هگزاگرید تحت رکوردهای حوزه نزدیک: (الف) TAB ، (ب) JGB

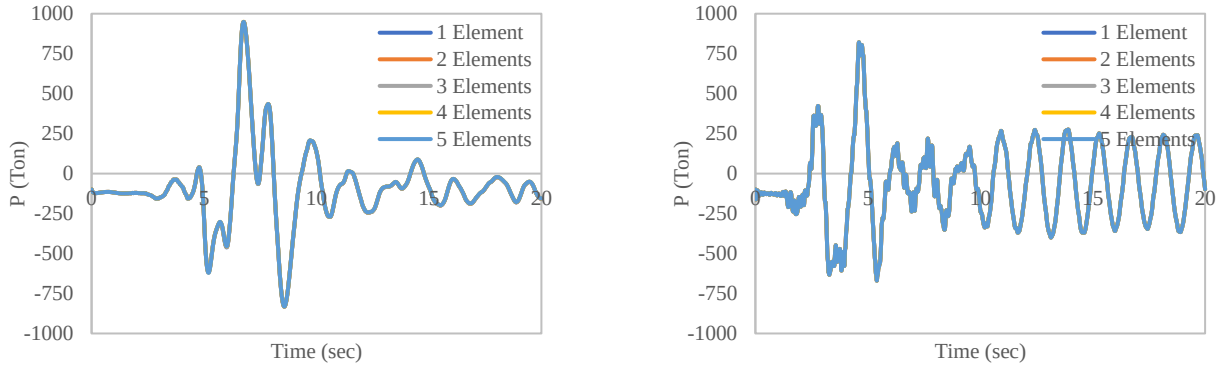
۴-۳ نیروی محوری

شکل‌های ۵ و ۶ نشان دهنده تاریخچه زمانی نیروی محوری ستون گوشه (تراز همکف) برای سازه‌های مطالعاتی (شکل ۱) می‌باشد. بیشینه برآیند نیروی محوری عضو انتخابی فوق در هر دو سازه مطالعاتی تحت رکوردهای حوزه نزدیک با اثرات جهت‌داری پیشرونده، به دلیل حضور پالس پیوسته سرعت، دارای مقادیر بزرگی است. این موضوع نیز سبب تمرکز و تشدید مشخصات رفتار غیرخطی با دامنه بزرگ در اعضای اصلی اسکلت مقاوم می‌گردد. همانطور که مشاهده می‌شود، ریزتر کردن شبکه المان محدود به کار گرفته شده، تفاوت چندان خاصی را برای دامنه تغییرات رفتاری اعضای ستون و نیز اعضای مورب هگزاگرید ایجاد نمی‌کند.



(ب) (الف)

شکل ۵- تاریخچه زمانی نیروی محوری گره میانی در ستون گوشه پلان سازه قاب خمشی دسته شده تحت رکوردهای حوزه نزدیک: (الف) BAM ، (ب) E07

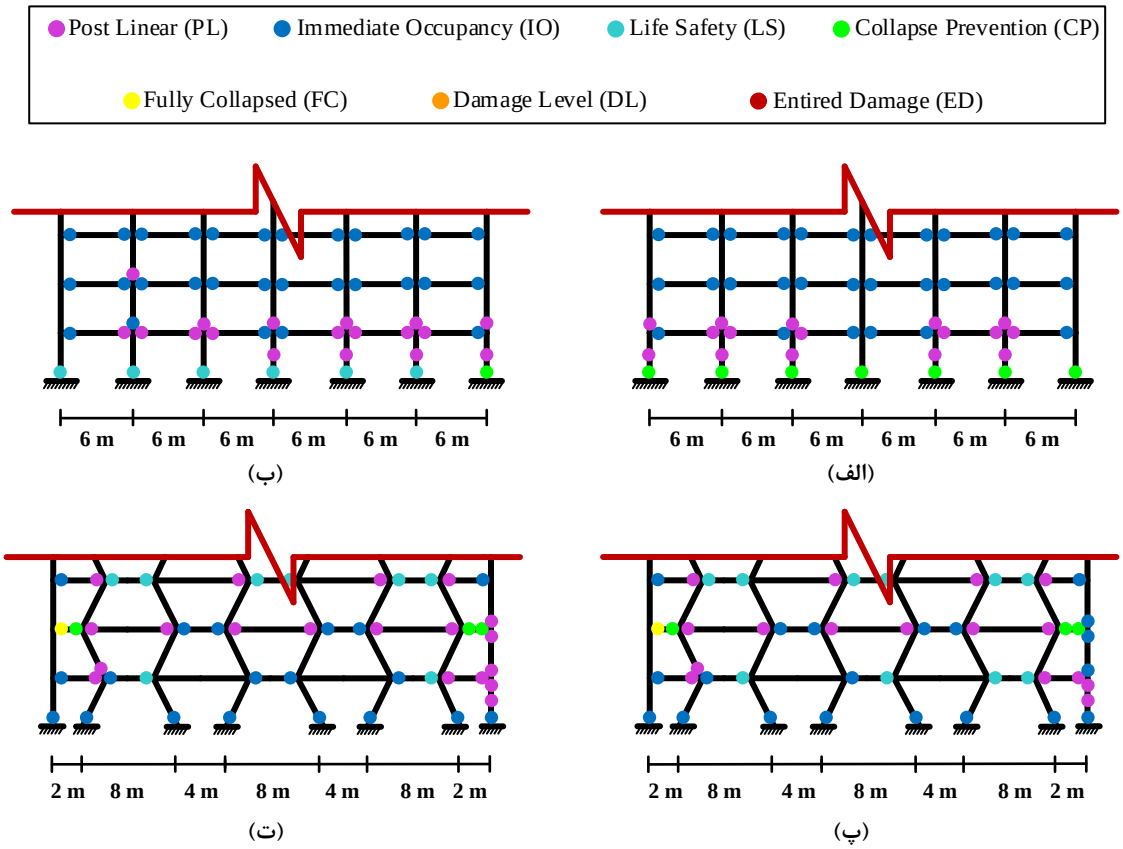


(ب) (الف)

شکل ۶- تاریخچه زمانی نیروی محوری گره میانی در ستون گوشه پلان سازه هگزاگرید تحت رکوردهای حوزه نزدیک: (الف) BAM ، (ب) E07

٤-٤ آرایش مفاصل غیرخطی

مکانیزم تشکیل مفاصل پلاستیک تحت رکورد E06 جهت بررسی اثرات انتشار امواج لرزه‌ای در حالات مختلف تعداد المان محدود شبیه‌سازی کننده ستون‌ها و اعضای مورب در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به دامنه رفتاری مفاصل پلاستیک (و حوزه غیرخطی) در اعضای سازه‌ای یاد شده بویژه در حد فاصل تراز پایه و طبقه اول، ملاحظه می‌گردد که مشخصه هیچ یک از بخش‌های ناکشسان تشکیل شده در اسکلت مقاوم هر دو سازه مطالعاتی به حد ظرفیت و تخریب کامل (ED) نرسیده است. همچنین، افزایش تعداد المان محدود برای شبیه‌سازی ریاضی و ارزیابی رفتار اعضای سازه‌های مطالعاتی نیز تاثیر چندانی در روند شکل‌گیری و آرایش نهایی مفاصل پلاستیک نداشته است.



شکل ۷- ساختار مفاصل غیرخطی تشکیل شده در صفحه قاب مقاوم هم‌راستای محور Y پلان سازه مطالعاتی تحت اثر رکورد حوزه نزدیک E06: (الف) سازه قاب خمشی دسته شده و شبیه سازی ۱ المان، (ب) سازه قاب خمشی دسته شده و شبیه سازی ۵ المان، (پ) سازه هگزاگرید و شبیه سازی ۱ المان، (ت) سازه هگزاگرید و شبیه سازی ۵ المان

٥- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مشخصات رفتار لرزه‌ای دو سازه ۱۰ طبقه با اسکلت مقاوم قاب خمشی دسته شده و نیز قاب پیوسته هگزاگرید پیرامونی تحت اثرات انتشار امواج زلزله بررسی گردید. پلان با هندسه متقارن، شرایط بارگذاری و خصوصیات غیرخطی یکسان برای سازه‌های مطالعاتی در نظرگرفته شد. اثرات تعداد المان‌های به کار گرفته شده در شبیه سازی ستون‌ها و اعضای مورب سازه های مطالعاتی با استفاده از آنالیز مودال بررسی گردید. همچنین، جنبه‌های محاسباتی این دیدگاه بر روی پارامترهای پاسخ سازه‌های مطالعاتی نیز بر پایه انجام تحلیل تاریخچه زمانی تحت رکوردهای حوزه نزدیک ارزیابی شدند.

بررسی نتایج این مقاله بیانگر آن است که افزایش تعداد المان شبیه‌سازی کننده رفتار اعضای ستون و نیز اعضای مورب هگزاگرید، تأثیری ناچیز در محاسبات آنالیز مودال و برآیند نیروی محوری دارد. همچنین ملاحظه شد که تحت اثر برخی رکوردهای زلزله، تاریخچه زمانی تغییرمکان جانبی هدف دارای اختلاف نسبی در دامنه عددی است که ناشی از تغییر تعداد المان‌ها در شبیه‌سازی اعضای سازه می‌باشد. توضیح آن که ماهیت تصادفی رکوردهای حوزه نزدیک و نیز برهم‌کنش طیفی میان مؤلفه شتاب قائم و دو مؤلفه شتاب افقی جنبش زمین می‌تواند سبب انتشار امواج لرزه‌ای با دامنه بسامدی بالا در اعضای سازه بشود. همچنین دانسته شد که تعداد المان شبیه‌سازی کننده اعضای ستون و نیز تیر-ستون‌های مورب، تأثیر کوچکی بر چگونگی آرایش و گسترش مکانیزم مفاصل پلاستیک در اسکلت مقاوم سازه تحت حرکات زمین نیرومند دارد. دیدگاه جامع تحلیلی حاصل از این تحقیق نیز به صورت تأیید فرض استفاده از شبیه‌سازی تک المانی و یکپارچه برای اعضای ستون در سازه قاب خمشی دسته شده و نیز اعضای تیر-ستون مورب در قاب پیوسته هگزاگرید مطرح می‌شود. برآوردهای عددی برگرفته از این شبیه‌سازی المان محدود برای اعضای سازه‌ای دارای دقت کافی خواهد بود.

مراجع

1. Sugiyama, T., Ishii, T., & Kaneko, M. "Effects of seismic wave propagation on a long and narrow building: Body wave and surface wave propagation", *Computers and Geotechnics*, 17(4), 547-564 (1995).
2. Fehr, M., Kremers, S., & Fritschen, R. "Characterisation of seismic site effects influenced by near-surface structures using 3D waveform modelling", *Journal of Seismology*, 23, 373-392 (2019).
3. Hao, Y., Chen, F., Han, Y. H., Hao, X. Q., Du, C. H., & Ding, Q. Y. "Study on the seismic optimization scheme of steel bundled-tube structure with vertical setback", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(2), 732-743 (2024).
4. Zheng, L., Dou, S., Tang, S., Ge, H., Wen, W., Zhang, J., ... & Geng, S. "Seismic performance of improved multistorey X-braced steel frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 212, 108306 (2024).
5. The Iranian National Building Code (2019) (Design Loads for Buildings - Issue 6), Tehran, Iran.
6. Standard No. 2800 (2014) Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (4th Ed.).
7. Mashhadiali, N., & Kheyroddin, A. "Quantification of the seismic performance factors of steel hexagrid structures", *Journal of Constructional Steel Research*, 157, 82-92 (2019).
8. The Iranian National Building Code (2023) (Steel Structures - Issue 10), Tehran, Iran.
9. CSI, Analysis Reference Manual for SAP2000, (2010). Berkeley, California, USA.
10. Lotfi, N., Morshed, S., Homami, P. & Hosseini Lavasani, S.H. "An analytical comparison between the seismic response parameters of bundled-tube and hexagrid structures under near-field records", *14th National Congress of Civil Engineering (14NCCE)*, (2024).
11. PEER Ground Motion Database, http://peer.berkeley.edu/