ارزیابی «نیاز زاویه‌ی درز انقطاع» قاب‌های خمشی فولادی مجاور تحت زلزله‌های حوزه‌های دور و نزدیک گسل

مصطفی خاتمی (دانشجوی دکتری)

محسن گرامی* (دانشیار)

علی خیرالدین (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۸
دوری ۲ - ۳۵، شماره ۴/۱، ص. ۶۱-۵۳

ایجاد ساختمان‌های مرتفع و نزدیک به هم سبب می‌شود که در هنگام زلزله به سبب اختلاف در ارتفاع و سیستم‌های مقاوم لرزه‌یی، رفتار متفاوتی از ساختمان‌های مجاور بروز کند و جابه‌جایی جانبی آن‌ها منجر به برخورد (ضربه) می‌شود. لذا با هدف جلوگیری از برخورد آن‌ها، نوشتار حاضر به تخمین «نیاز زاویه‌ی درز انقطاع» در بالاترین تراز برخورد از ترکیب‌های هم‌جواری دوتایی قاب‌های خمشی فولادی ۲ تا ۲۰ طبقه، تحت رکوردهای زلزله‌های حوزه‌ی دور و نزدیک گسل پرداخته و مقادیر به‌دست آمده از تحلیل دینامیکی تاریخی‌چهی زمانی غیرخطی با ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در برخی حالت‌های هم‌جواری، ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ منجر به تخمین دست پایین زاویه‌ی درز انقطاع می‌شود. همچنین میانگین افزایش نیاز اشاره شده در حالت‌های مورد بررسی تحت مؤلفه‌ی عمود بر گسل زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، به ترتیب ۱/۴۸ و ۱/۳۵ برابر مقادیر حاصل از زلزله‌های حوزه‌ی دور از گسل و مؤلفه‌ی موازی گسل زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک است.

واژگان کلیدی: زاویه‌ی درز انقطاع، ساختمان‌های مجاور، تراز برخورد، مؤلفه‌ی عمود و موازی گسل، تحلیل تاریخی‌چهی زمانی.

m.khatami@semnan.ac.ir
mgerami@semnan.ac.ir
akhayroddin@semnan.ac.ir

۱. مقدمه

پدیده‌ی برخورد از جمله آثار دینامیکی است که به‌طور محسوس در کلیه‌ی زلزله‌های شدید در شهرهای بزرگ که عموماً توسعه‌ی ارتفاعی ساختمان‌ها به‌دلیل گران بودن زمین در آن‌ها رخ داده است، مشاهده می‌شود. بنابراین در هنگام زلزله، دو ساختمان با توجه به خصوصیات دینامیکی، دچار تغییر مکان‌های جانبی خواهند شد. به علت تفاوت خصوصیات دینامیکی دو سازه، بسیاری از تغییر مکان‌های ذکر شده به‌صورت ناهم‌فاز بین آن‌ها صورت می‌گیرد و منجر به برخورد ساختمان‌ها می‌شود. پدیده‌ی برخورد، بسته به شدت زلزله باعث ایجاد تخریب‌های موضعی یا کلی در ساختمان‌ها می‌شود. در واقع به هنگام وقوع برخورد، نیروی بزرگی در زمان کوتاه به سازه تحمیل می‌شود که در طراحی‌های رایج در نظر گرفته نشده است.^[۱-۴]

پدیده‌ی برخورد در بیشتر زلزله‌های بزرگ دنیا مشاهده شده است. به عنوان نمونه، خسارت‌های ناشی از برخورد ساختمان‌های مجاور در زلزله‌ی آکویلا (۲۰۰۹) ایتالیا و زلزله‌ی کریس چرچ (۲۰۱۱) نیوزلند در شکل ۱ مشاهده می‌شود. در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۸/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱۲/۵، پذیرش ۱۳۹۶/۱۲/۱۳.

DOI:10.24200/J30.2018.5316.2232

شکل ۱ الف، برخورد میان سقف ساختمان ۲ طبقه و ستون ساختمان ۴ طبقه‌ی مجاور رخ داده است؛ در حالی که طبقات بالاتر ساختمان ۴ طبقه، دچار خسارت قابل ملاحظه‌یی نشده‌اند.^[۴] در شکل ۱ ب، الگوی خسارت نشان می‌دهد که گسیختگی برشی و خسارت پیش‌رونده از نقطه‌ی برخورد دو ساختمان به اطراف کاهش یافته است.^[۵]

برای جلوگیری از برخورد ساختمان‌های مجاور راه‌های متفاوتی وجود دارد، به عنوان نمونه یکی از راهکارهایی که آیین‌نامه‌های امروزی پیشنهاد می‌دهند، ایجاد فاصله‌ی ایمن بین دو سازه است که یک راهکار پیشگیری در مقابله با اثر ذکر شده است. مطالعات مختلفی در خصوص محاسبه‌ی درز انقطاع لازم جهت جلوگیری از برخورد قاب‌های مجاور ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات بیبین شریستا (۲۰۱۳) اشاره کرد که نتایج آن نشان داده است روش جمع قدرمطلق تغییر مکان‌ها^۱ و جذر مجموع مربعات تغییر مکان‌ها^۲، مقدار فاصله‌ی جداسازی مورد نیاز را در سازه‌های خطی و غیرخطی دست بالا تخمین می‌زند، به ویژه زمانی که دو سازه، زمان تناوب مشابه (خصوصیات دینامیکی مشابه) یکدیگر دارند. مقادیر روش تفاضل طیفی^۳، به ویژه در حوزه‌ی سازه‌های با زمان تناوب برابر، انطباق خوبی

الف) زلزله ی آکویلا ۲۰۰۹؛ ب) زلزله ی کریس چرچ نیوزلند ۲۰۱۱.

شکل ۱. خسارت‌های ضربه‌ی مشاهده شده بین ساختمان‌های مجاور [۵۴].

با نتایج تحلیل دارد. [۶] عبودس، رفتار دینامیکی ساختمان‌های میان مرتبه و بلندمرتبه را در پدیده‌ی برخورد با رویکرد سطوح عملکرد ارزیابی کرده و نتیجه گرفته است که فاصله‌ی ایمن برای درز انقطاع به ویژگی‌های دینامیکی دو سازه‌ی مجاور (زمان تناوب، جرم، سختی و ...)، همچنین به ارتفاع، میزان هم‌ترازی در محل برخورد و نوع سیستم سازه‌ی وابسته است. ضمناً فاصله‌ی ایمن بین دو سازه در سطح عملکرد قابلیت استفاده‌ی بی‌وقفه نسبت به سطح عملکرد ایمنی جانی به میزان ۳۴/۷٪ کاهش یافته است. [۷]

هنگ هائو (۲۰۱۵)، نیز آثار اختلاف فاصله در اعمال زلزله به تکیه‌گاه‌های ساختمان به دلیل انتشار امواج از درون خاک و وابستگی آن به نوع خاک و مقایسه‌ی آن با اعمال زلزله را به صورت یکنواخت بررسی و با مطالعه‌ی اثر نوع خاک در ارزیابی نتایج، نتیجه‌گیری کرد که بیشترین اثر اختلاف فاصله در اعمال نیروی زلزله زمانی است که دو سازه‌ی مجاور، بسامدهای ارتعاشی مشابه دارند و در خارج از محدوده‌ی مذکور، اثر اختلاف فاصله در اعمال نیروی لرزه‌ی ناچیز است. بنابراین نادیده گرفتن آثار اختلاف فاصله‌ی تکیه‌گاه‌ها در اعمال نیروی لرزه‌ی منجر به تخمین دست‌پایین نیاز فاصله‌ی جداسازی دو سازه در محدوده‌ی بسامدهای ارتعاش برابر می‌شود. همچنین با افزایش درجه‌ی نرمی خاک، فاصله‌ی جداسازی مورد نیاز دو سازه به علت تغییر مکان‌های بزرگ‌تر زمین افزایش می‌یابد. [۸] نادرپور و همکاران (۲۰۱۷) نیز به کمک شبکه‌ی عصبی مصنوعی، رابطه‌ی جدیدی را برای درز انقطاع پیشنهاد کردند که بر مبنای پیشینه‌ی تغییر مکان‌های جانبی و زمان تناوب دو سازه است و درز انقطاع بین سازه‌ها را با زمان‌های تناوب مختلف با دقت بالا تخمین می‌زند. [۹] هدف از نوشتار حاضر، تخمین نیاز زوایی درز انقطاع ترکیب‌های همجواری دوتایی قاب‌های خمشی فولادی است و بدین منظور با بررسی تأثیر راستای مؤلفه‌ها (عمود یا موازی گسل) در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل با آثار جهت‌پذیری پیش‌رونده، ضمن تخمین نیاز زوایی درز انقطاع در ترکیب‌های همجواری ذکر شده، نتایج به‌دست آمده با مقادیر حاصل از رکوردهای زلزله‌های دور از گسل مقایسه شده است.

۲. معرفی مدل‌های مورد بررسی

مدل‌های مورد استفاده از نظر تنوع طبقاتی به شکل قاب‌های خمشی فولادی دوتایی با شکل‌پذیری زیاد از ساختمان‌های ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ طبقه با ۳ دهانه در نظر گرفته شده‌اند. در قاب‌های مورد مطالعه، ارتفاع کلیه طبقات ثابت و برابر ۳/۵ متر و طول دهانه‌ها ثابت و برابر ۵/۵ متر

انتخاب شده است. قاب‌های مورد نظر، مطابق میحث ۶ مقررات ملی ساختمان بارگذاری ثقی، [۱۰] و براساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) بارگذاری لرزه‌ی شده‌اند. [۱۱] در بارگذاری ثقی، بار مرده و زنده طبقات به ترتیب ۶۵۰ و ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمربع با عرض بارگیر ۵ متر بوده و جرم کلیه طبقات یکسان فرض شده است. در بارگذاری لرزه‌ی در محاسبه‌ی جرم طبقات از بار مرده به‌علاوه‌ی ۲۰٪ بار زنده استفاده شده است. خاک محل احداث از نوع خاک III در منطقه با خطرپذیری بسیار زیاد و نوع کاربری مسکونی با درجه‌ی اهمیت متوسط مدنظر بوده است.

کلیه‌ی قاب‌ها با استفاده از نرم‌افزار ETABS ۲۰۱۵ تحلیل استاتیکی معادل (در برخی مدل‌های منظم تحلیل دینامیکی طیفی و همسان‌سازی برش پایه‌ی طراحی)، [۱۲] و به روش ضریب بار و مقاومت بر مبنای میحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان با رعایت کلیه جزئیات طرح لرزه‌ی طراحی شده‌اند. [۱۳] در طراحی ضمن صرف‌نظر از مدل‌سازی چشمه‌ی اتصال، اندرکنش خاک و سازه، و آثار میان‌قاب، سقف به صورت صلب فرض شده و آثار $P - \Delta$ در نظر گرفته شده است. علاوه بر طراحی براساس معیار مقاومت، توزیع سختی قاب‌ها در ارتفاع به گونه‌ی تنظیم شده است تا پیشینه‌ی زاویه‌ی جابه‌جایی جانبی نسبی طبقات به مقادیر مجاز مندرج در استاندارد ۲۸۰۰ محدود شود. ۶ تیپ تیر از مقطع تیورق شامل: TW۳۰۰F۱۵۰T۱۵ الی W۵۵۰F۲۵۰T۲۵ (ارتفاع جان، F عرض بال و T ضخامت بال و جان بر حسب mm) و ۷ تیپ ستون از مقطع جعبه‌ی مربعی شامل: BOX۲۰۰X۱۵ الی BOX۵۰۰X۴۰ (ابعاد بر حسب mm) استفاده شده است. در کلیه مقاطع ضوابط فشرده‌ی لرزه‌ی مدنظر بوده است. در طراحی قاب‌ها تلاش شده است مقاطع به‌نحوی انتخاب شوند تا نسبت تنش کمینه در ۵٪ ارتفاع تحتانی سازه بین ۷/۰ تا ۹/۰ باشد. در قاب‌های بلند برای تأمین معیار جابه‌جایی جانبی نسبی طبقات، نسبت مذکور بعضاً به ۵/۰ کاهش یافته است. قاب‌های طراحی شده در ۱۰۰ حالت از ترکیب‌های دوتایی در مجاورت یکدیگر قرار گرفتند و به منظور رعایت اختصار در معرفی مجاورت‌های اشاره شده، منظور از عبارت z و i مجاورت قاب i طبقه در کنار قاب j طبقه است.

به‌منظور انجام کلیه تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. مهم‌ترین توانمندی نرم‌افزار OpenSees کد باز بودن و در دسترس بودن آن است که همواره در حال توسعه است و می‌توان مصالح، المان‌ها و ابزارهای تحلیل جدید ساخت و به کتابخانه‌ی آن اضافه کرد. [۱۴] برای مدل‌سازی آثار غیرخطی از خاصیت فیبرگسترده استفاده و مدل رفتاری مورد استفاده از نوع دوخطی با شیب ناحیه‌ی سخت‌شدگی ۳/۰۰ انتخاب شده است. همچنین ضمن نادیده گرفتن زوال چرخه‌ی، ضریب میرایی بحرانی ۵٪ لحاظ شده است. در کلیه تحلیل‌های غیرخطی، برای تمامی رکوردهای انتخابی از گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه استفاده شده است.

۳. رکوردهای زلزله‌ی مورد استفاده

به‌منظور انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، از ۱۰ مؤلفه‌ی عمود بر گسل با جهت‌پذیری پیش‌رونده رکوردهای زلزله‌ی نزدیک گسل پالس‌گونه‌ی ۴ پیشنهادی توسط بیکر [۱۵] و همچنین در راستای مقایسه‌ی نتایج، از ۱۰ مؤلفه‌ی موازی گسل متناظر با همان رکوردهای نزدیک گسل ۵ و ۱۰ مؤلفه‌ی عمود بر گسل رکوردهای زلزله‌ی دور از گسل ۶ استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات ۱۰ رکورد زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل با آثار جهت‌پذیری پیش‌رونده (مؤلفه‌ی عمود و موازی گسل).

شماره‌ی رکورد	نام زلزله	سال	نام ایستگاه	PGA(g)	R(km)	Tp(s)
۱	Imperial Valley-۰۶	۱۹۷۹	El-Centro Array#۴	۰٫۶۱	۷٫۰۵	۴٫۶۱
۲	Imperial Valley-۰۶	۱۹۷۹	El-Centro Array#۶	۰٫۶۵	۱٫۳۵	۳٫۸۳
۳	Imperial Valley-۰۶	۱۹۷۹	EC Country Center FF	۰٫۳۲	۷٫۳۱	۴٫۵۱
۴	Kobe, Japan	۱۹۹۵	Takarazuka	۰٫۹۴	۰٫۲۷	۱٫۴۲
۵	Landers	۱۹۹۲	Yermo Fire Station	۰٫۱۰	۲۳٫۶۲	۷٫۵۰
۶	Morgan Hill	۱۹۸۴	Coyote Lake Dam(SW Abut)	۰٫۲۳	۰٫۵۳	۰٫۹۵
۷	Loma Prieta	۱۹۸۹	LGPC	۰٫۸۴	۳٫۸۸	۴٫۳۹
۸	Northridge-۰۱	۱۹۹۴	Sylmar-Converter Sta	۰٫۶۵	۵٫۳۵	۳٫۴۷
۹	Northridge-۰۱	۱۹۹۴	Sylmar-Olive View Med FF	۰٫۴۵	۵٫۳۰	۳٫۱۰
۱۰	Kocaeli,Turkey	۱۹۹۹	Gebze	۰٫۳۰	۱۰٫۹۲	۵٫۷۸

PGA: بیشینه‌ی شتاب زمین، Mw: شدت زلزله بر حسب ریشتر، R: نزدیکترین فاصله از سایت ثبت رکورد تا منطقه گسیختگی، TP: زمان تناوب غالب

جدول ۲. مشخصات ۱۰ رکورد زلزله‌ی حوزه‌ی دور از گسل با آثار جهت‌پذیری پیش‌رونده (مؤلفه‌ی عمود بر گسل).

شماره‌ی رکورد	نام زلزله	سال	نام ایستگاه	PGA(g)	R(km)	Tp(s)
۱	Chi-Chi,Taiwan	۱۹۹۹	CHY۰۶۵	۰٫۱	۸۳٫۴۳	۰٫۵۶
۲	Chi-Chi,Taiwan	۱۹۹۹	TAP۰۹۵	۰٫۱۵	۱۰۹٫۰۱	۰٫۹۸
۳	Loma Prieta	۱۹۸۹	CDMG۵۸۲۲۴	۰٫۲۴	۷۲٫۲۰	۰٫۳۲
۴	Loma Prieta	۱۹۸۹	CDMG۵۸۴۲۷	۰٫۲۶	۷۴٫۲۶	۰٫۶۴
۵	Kobe,Japan	۱۹۹۵	HIK	۰٫۱۴	۹۵٫۷۲	۰٫۶۰
۶	Loma Prieta	۱۹۸۹	CDMG۵۸۲۲۳	۰٫۲۳	۵۸٫۶۵	۰٫۳۰
۷	Manjil,Iran	۱۹۹۰	Qazvin	۰٫۱۳	۴۹٫۹۷	۰٫۱۶
۸	Northridge	۱۹۹۴	CDMG۱۳۱۲۲	۰٫۱	۸۲٫۳۲	۰٫۳۸
۹	Tabas,Iran	۱۹۷۸	Ferdows	۰٫۱	۹۱٫۱۴	۰٫۲۴
۱۰	Kocaeli,Turkey	۱۹۹۹	Bursa Tofas	۰٫۱	۶۰٫۴۳	۰٫۶۸

PGA: بیشینه‌ی شتاب زمین، Mw: شدت زلزله بر حسب ریشتر، R: نزدیکترین فاصله از سایت ثبت رکورد تا منطقه گسیختگی، TP: زمان تناوب غالب

نزدیک گسل پالس‌گونه (مؤلفه‌های عمود بر گسل و موازی گسل) و همچنین ۱۰ رکورد زلزله‌ی حوزه‌ی دور از گسل در شکل ۲ (الف الی ج) مشاهده می‌شود. ضرایب مقیاس برای محدوده‌ی زمان تناوب قاب‌های مورد مطالعه تحت مؤلفه‌های عمود بر گسل زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، ۰٫۵۵ تا ۰٫۵۸ و تحت مؤلفه‌های موازی گسل زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، ۰٫۵۳ تا ۰٫۹۱ و در رکوردهای زلزله‌ی حوزه‌ی دور از گسل ۰٫۴۹ تا ۱٫۱ به‌دست آمده است. همچنین از مقایسه‌ی شکل‌های ۲الف و ۲ب مشاهده می‌شود که مقادیر طیف پاسخ مؤلفه‌های عمود بر گسل در محدوده‌ی زمان‌های تناوب متوسط و بلند بیش از مؤلفه‌های موازی است.

یکی از معیارهای اساسی در انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها، این موضوع است که دوره‌ی تناوب پالس غالب سرعت شتاب‌نگاشت‌ها در محدوده‌ی دوره‌ی تناوب اصلی قاب‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر است. مشخصات رکوردهای زلزله‌ی حوزه‌های دور و نزدیک گسل ذکر شده به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده و شدت کلیه‌ی رکوردهای زلزله‌ی مورد استفاده بیش از ۶٫۵ ریشتر بوده است. مقیاس‌سازی رکوردهای مورد بررسی براساس استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) و فرایند هم‌پایه‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها با نرم‌افزار Seismosignal انجام شده است.^[۱۶] طیف میانگین پاسخ شتاب ارتجاعی با میرایی ۵٪ برای ۱۰ رکورد

شکل ۳. صحت‌سنجی تاریخی‌ی زمانی تغییر مکان قاب ۴ طبقه در تراز بام.

شکل ۴. تاریخی‌ی زمانی تغییر مکان جانبی دو قاب مجاور ۲ و ۴ طبقه.

ing Sta مقایسه شده است که مطابق شکل ۳ انطباق قابل قبولی دارد. به عنوان نمونه در شکل ۴، تاریخی‌ی زمانی تغییر مکان جانبی دو قاب ۲ و ۴ طبقه در بالاترین تراز برخورد تحت رکورد شماره‌ی ۱ (مؤلفه‌ی عمود بر گسل) از جدول ۱ مشاهده می‌شود. بر مبنای مقدار و جهت تغییر مکان جانبی متناظر دو قاب مذکور در زمان تحلیل، تاریخی‌ی زمانی درز انقطاع مطابق شکل ۵ ترسیم شده است که مطابق آن بیشینه‌ی درز انقطاع دو قاب اخیر ۴/۶۶ سانتی‌متر است.

طیف پاسخ شتاب ارتجاعی با میرایی ۵٪ برای مؤلفه عمود بر گسل زلزله‌های حوزه نزدیک گسل

الف) طیف پاسخ شتاب ارتجاعی برای میرایی ۵٪ متناظر با مؤلفه‌ی عمود بر گسل زلزله‌های نزدیک گسل؛

طیف پاسخ شتاب ارتجاعی با میرایی ۵٪ برای مؤلفه موازی گسل زلزله‌های حوزه نزدیک گسل

ب) طیف پاسخ شتاب ارتجاعی برای میرایی ۵٪ متناظر با مؤلفه‌ی موازی گسل زلزله‌های نزدیک گسل؛

طیف پاسخ شتاب ارتجاعی با میرایی ۵٪ برای زلزله‌های حوزه دور از گسل

ج) طیف پاسخ شتاب ارتجاعی برای میرایی ۵٪ متناظر با رکوردهای زلزله‌ی حوزه دور از گسل.

شکل ۲. طیف پاسخ شتاب ارتجاعی رکوردهای زلزله‌ی مورد استفاده.

۴. نتایج تحلیل دینامیکی تاریخی‌ی زمانی غیرخطی

پارامتر بی‌بعد «نیاز زاویه‌ی درز انقطاع» از تقسیم درز انقطاع بر ارتفاع محل برخورد دو قاب در بالاترین تراز برخورد به‌دست آمده و درز انقطاع نیز از بررسی ۶ حالت ممکن برای تاریخی‌ی زمانی تغییر مکان‌های جانبی دینامیکی قاب‌های خمشی مجاور در طول مدت زمان تحلیل استخراج شده است. به منظور بررسی صحت مدل‌سازی، تاریخی‌ی زمانی تغییر مکان جانبی تراز بام قاب خمشی فولادی ۴ طبقه در تحقیقات انجام شده^[۱۷] با مدل تحلیلی در Opensees تحت رکورد زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک نورتریج^۷ (Rinaldi Receiv-

جز در محدوده‌ی زمان‌های تناوب برابر که اختلاف نتایج به بیشترین مقدار خود می‌رسد. علت بیشینه شدن اختلاف ذکر شده، تخمین دست بالای استاندارد ۲۸۰۰ در محدوده‌ی نسبت زمان تناوب‌های برابر است. در نسبت‌های زمان تناوب کم (حدود ۰/۲ تا ۰/۴) با افزایش ارتفاع قاب مینا، اختلاف اشاره شده بیشتر می‌شود. به عنوان نمونه در نسبت زمان تناوب ۰/۳، اختلاف نتایج تحلیلی و آیین‌نامه‌یی در حالتی که قاب مینا ۲۰ طبقه باشد، به حدود ۲ برابر حالتی که قاب مینا ۱۰ طبقه باشد، می‌رسد. در نسبت زمان تناوب ۱ با افزایش ارتفاع قاب مینا، اختلاف ذکر شده روند مشخصی ندارد. برای نسبت‌های زمان تناوب بیش از ۱، اختلاف نتایج برای قاب‌های مینای مختلف تقریباً بر هم منطبق است.

ج) مقایسه‌ی نتایج در ارتفاع محل برخورد: در شکل ۸ الف، تغییرات زاویه‌ی درز انقطاع در ارتفاع محل برخورد قاب‌های ۶ و ۸ طبقه و همچنین قاب‌های ۴ و ۸ طبقه نشان داده شده و با مقادیر بند ۱۴.۱ استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه شده است. نتایج حاصل از میانگین به‌دست آمده از رکوردهای زلزله‌ی مورد بررسی نشان می‌دهد در برخی موارد، مقادیر تحلیلی زاویه‌ی درز انقطاع از مقادیر توصیه شده‌ی آیین‌نامه‌یی تجاوز می‌کند. به عنوان نمونه، بیشینه‌ی زاویه‌ی درز انقطاع در بالاترین تراز برخورد قاب‌های ۴ و ۸ طبقه به حدود ۱/۱۵ برابر مقدار مجاز بند ۱۴.۱ استاندارد ۲۸۰۰ می‌رسد. در شکل ۸ ب، تغییرات زاویه‌ی درز انقطاع در ارتفاع محل برخورد قاب‌های ۱۸ و ۲۰ طبقه بیانگر آن است که مقادیر بند ۶.۵.۳ استاندارد ۲۸۰۰ تخمین دست بالایی از زاویه‌ی درز انقطاع در ارتفاع محل برخورد ارائه می‌دهد، به‌طوری که مقادیر آیین‌نامه‌یی به طور میانگین حدود ۲/۷ برابر مقادیر نظیر به‌دست آمده از تحلیل است.

د) تعیین بیشینه‌ی درز انقطاع و زاویه‌ی درز انقطاع از میان ترکیب‌های مختلف همجواری: از میان ترکیب‌های مختلف همجواری قاب‌ها (صرف‌نظر از تقدم و تأخر در چیدمان)، بیشترین مقدار درز انقطاع طبق شکل ۱۹ الف، متعلق به مجاورت قاب ۲۰ طبقه با سایر قاب‌هاست. در این میان، قاب ۱۰ طبقه در مجاورت قاب ۲۰ طبقه (۲۰ و ۱۰) بیشترین درز انقطاع را نسبت به سایر ترکیب‌ها دارد. به عبارت دیگر، با افزایش تراز برخورد قاب ۲۰ طبقه با قاب‌های مجاور ۲ الی ۱۰ طبقه، مقدار درز انقطاع افزایش می‌یابد، به نحوی که مقدار درز انقطاع در ترکیب قاب‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه به ۶۴ سانتی‌متر می‌رسد و پس از آن با افزایش تراز برخورد قاب‌های مجاور از ۱۲ تا ۲۰ طبقه، مقدار درز انقطاع روند کاهشی دارد. درخصوص زاویه‌ی درز انقطاع طبق شکل ۱۹ ب، بیشترین مقدار متعلق به ترکیب قاب‌های ۲ و ۲۰ طبقه (۲ و ۲۰) است، که بیشترین اختلاف ارتفاع را نسبت به هم دارند و با افزایش تراز برخورد دو قاب مجاور، این نیاز روند کاهشی می‌یابد.

۲.۴. مقایسه‌ی «نیاز زاویه‌ی درز انقطاع» تحت رکوردهای زلزله‌ی

حوزه‌ی نزدیک و دور از گسل

مقایسه‌ی میانگین زاویه‌ی درز انقطاع ۴۵ ترکیب همجواری قاب‌ها از میان ۱۰۰ ترکیب مورد بررسی (صرف‌نظر از تقدم و تأخر در نحوه‌ی چیدمان و قرارگیری قاب‌های با تعداد طبقات یکسان در مجاورت هم) تحت رکوردهای زلزله‌ی حوزه‌ی دور و نزدیک گسل در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. در کلیه‌ی ترکیب‌های همجواری مورد بررسی مقدار زاویه‌ی درز انقطاع تحت مؤلفه‌ی عمود بر گسل رکوردهای زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک بیش از مقادیر به‌دست آمده از رکوردهای حوزه‌ی دور از گسل است، به نحوی که میانگین این افزایش ۱/۴۸ برابر است. بیشترین

شکل ۵. تاریخچه‌ی زمانی نیاز درز انقطاع دو قاب مجاور ۲ و ۴ طبقه.

۱.۴. نتایج تحلیلی و مقادیر آیین‌نامه‌یی «نیاز زاویه‌ی درز انقطاع»

تحت مؤلفه‌ی عمود زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل

در بخش کنونی، میانگین زاویه‌ی درز انقطاع به‌دست آمده از تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی و ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ تحت ۱۰ مؤلفه‌ی عمود بر گسل زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. اهم نتایج حاصل عبارت‌اند از:

الف) مقایسه‌ی نتایج در بالاترین تراز برخورد: در شکل ۶ (الف الی ی) مقدار زاویه‌ی درز انقطاع برای ترکیب‌های مختلف قرارگیری قاب‌ها در مجاورت یکدیگر در دو حالت تحلیلی و آیین‌نامه‌یی مشاهده می‌شود که مطابق آن محور افقی نسبت زمان تناوب دو سازه است که برای محاسبه‌ی آن از روابط تجربی ارائه شده در بخش ۱۳.۳.۳ آیین‌نامه‌ی استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شده است. برای محاسبه‌ی زاویه‌ی درز انقطاع بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰ برای ساختمان‌های تا ۸ طبقه از ضابطه‌ی بند ۱۴.۱ و برای بیش از ۸ طبقه از ضابطه‌ی بند ۶.۵.۳ (ضوابط بخش ۱۲.۱۲.۳ از آیین‌نامه‌ی ۱۶-ASCEV) استفاده شده است. به عنوان نمونه شکل ۶ الف، بیانگر حالتی است که قاب ۲ طبقه در سمت چپ در ترکیب با سایر قاب‌ها در سمت راست قرار گرفته و مقدار زاویه‌ی درز انقطاع به منظور جلوگیری از برخورد دو قاب مجاور بر حسب نسبت زمان تناوب قاب‌های سمت راست به قاب ۲ طبقه‌ی مینا در سمت چپ ارائه شده است. نتایج حاصل حاکی از آن است که با نزدیک شدن زمان تناوب دو سازه به یکدیگر، مقدار زاویه‌ی درز انقطاع کاهش می‌یابد، به نحوی که مقدار آن برای دو سازه با زمان تناوب برابر به صفر می‌رسد. ضابطه‌ی بند ۶.۵.۳ استاندارد ۲۸۰۰ نیز تخمین دست بالایی از زاویه‌ی درز انقطاع در مقایسه با نتایج تحلیل ارائه می‌کند. این موضوع به ویژه در زمانی که دو سازه، زمان تناوب برابر دارند، مشهودتر است. همچنین در شکل‌های ۶ الف الی ۶ د که شامل برخورد قاب‌های کوتاه‌تر از ۸ طبقه است، در برخی موارد نتایج تحلیل از مقادیر بند ۱۴.۱ استاندارد ۲۸۰۰ بیشتر است که نشان‌دهنده‌ی تخمین دست پایین زاویه‌ی درز انقطاع آیین‌نامه‌یی است.

ب) اختلاف نتایج در بالاترین تراز برخورد: اختلاف مقادیر زاویه‌ی درز انقطاع نتایج تحلیلی و ضابطه‌ی بند ۶.۵.۳ استاندارد ۲۸۰۰ برای شکل‌های ۶ الف الی ۶ ی در شکل ۷ نشان داده شده است. به‌طور کلی با افزایش نسبت زمان تناوب دو سازه‌ی مجاور، مقدار اختلاف نتایج تحلیل و استاندارد ۲۸۰۰ کاهش می‌یابد، به

شکل ۶. تغییرات نیاز زاویه‌ی درز انقطاع در بالاترین تراز برخورد قاب‌های مجاور.

شکل ۷. تغییرات اختلاف «نیاز زاویه‌ی درز انقطاع» تحلیلی و آیین‌نامه‌یی برحسب نسبت زمان تناوب دو قاب مجاور.

شکل ۹. تغییرات درز انقطاع و زاویه‌ی درز انقطاع بر حسب طبقات برخورد.

شکل ۸. تغییرات زاویه‌ی درز انقطاع در ارتفاع قاب‌های مجاور.

شکل ۱۰. مقایسه‌ی «نیاز زاویه‌ی درز انقطاع» تحت مؤلفه‌ی عمود بر گسل رکوردهای حوزه‌ی دور و نزدیک گسل.

۳.۴. مقایسه‌ی «نیاز زاویه‌ی درز انقطاع» تحت مؤلفه‌های عمود و

موازی رکوردهای زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل

مقایسه‌ی میانگین زاویه‌ی درز انقطاع ۴۵ ترکیب از میان ۱۰۰ ترکیب مورد بررسی (صرف‌نظر از تقدم و تأخر در نحوه‌ی چیدمان و قرارگیری قاب‌های با تعداد طبقات یکسان در مجاورت هم) تحت مؤلفه‌ی عمود و موازی رکوردهای

افزایش نیز متعلق به ترکیب قاب‌های ۶ و ۲۰ طبقه است، که مقدار زاویه‌ی درز انقطاع تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک به ۲/۰۴ برابر مقدار به‌دست آمده از رکوردهای دور از گسل می‌رسد. به عبارت دیگر، به دلیل ماهیت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل و آثار جهت‌پذیری پیش‌رونده، تجمع انرژی در یک بازه‌ی زمانی کوتاه رخ می‌دهد و پالس قوی حرکت با دامنه‌ی بلند و مدت دوام کوتاه در جهت عمود بر لغزش و در ابتدای نگاشت زلزله به‌وجود می‌آید که منجر به افزایش تغییرمکان‌های جانبی و به دنبال آن افزایش زاویه‌ی درز انقطاع قاب‌های مجاور می‌شود.

شکل ۱۲. بیشینه‌ی درز انقطاع و زاویه‌ی درز انقطاع در ترازهای برخورد.

زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، مؤلفه‌های موازی گسل زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک و رکوردهای حوزه‌ی دور از گسل، ترکیب مجاورت قاب‌های (۲ و ۲۰)، (۲ و ۱۶) و (۲ و ۱۴) است.

۵. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به تخمین «نیاز زاویه‌ی درز انقطاع» در 10° ترکیب مختلف همجواری قاب‌های منظم در بالاترین تراز برخورد پرداخته و نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های انجام شده تحت 3° رکورد زلزله (10° مؤلفه‌ی عمود بر گسل زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، 10° مؤلفه‌ی موازی گسل متناظر با مؤلفه‌های عمود و 10° رکورد حوزه‌ی دور از گسل) عبارت‌اند از:

- در برخی حالت‌های همجواری، نتایج تحلیل در ترکیب قاب‌های با ارتفاع تا ۸ طبقه از مقادیر استاندارد 280° بیشتر است که نشان‌دهنده‌ی تخمین دست‌پایین زاویه‌ی درز انقطاع آیین‌نامه‌ی است.
- مقادیر زاویه درز انقطاع مجاز استاندارد 280° در ترکیب قاب‌های با ارتفاع بیش از ۸ طبقه بیش از نتایج تحلیلی است، به ویژه این اختلاف در مورد قاب‌های با زمان تناوب تقریباً مساوی به بیشترین مقدار خود می‌رسد.
- میانگین مقادیر زاویه‌ی درز انقطاع ترکیب‌های مورد بررسی تحت مؤلفه‌ی عمود بر گسل رکوردهای زلزله حوزه‌ی نزدیک به ترتیب $1/48$ و $1/35$ برابر مقادیر

شکل ۱۱. مقایسه‌ی «نیاز زاویه‌ی درز انقطاع» تحت مؤلفه‌ی عمود و موازی گسل رکوردهای حوزه‌ی نزدیک گسل.

زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. در 89% ترکیب‌های همجواری مورد بررسی، مقدار زاویه‌ی درز انقطاع تحت مؤلفه‌ی عمود بر گسل بیش از مقادیر به‌دست آمده از مؤلفه‌ی موازی گسل است، به نحوی که میانگین افزایش اشاره شده، $1/35$ برابر است. بیشترین افزایش نیز متعلق به ترکیب قاب‌های ۶ و ۲۰ طبقه است که مقدار زاویه‌ی درز انقطاع تحت مؤلفه‌ی عمود بر گسل به ۲ برابر مقدار به‌دست آمده از مؤلفه‌ی موازی گسل می‌رسد. طبق مطالعات بسیاری از پژوهشگران درخصوص تأثیر بیشتر جهت‌پذیری در مؤلفه‌ی عمود بر گسل به دلیل پراکنش‌های شعاعی جابه‌جایی برشی گسل و بزرگ‌تر بودن مقادیر بیشینه‌ی سرعت و جابه‌جایی طیفی در مؤلفه‌های عمود نسبت به مؤلفه‌های موازی، مقدار زاویه‌ی درز انقطاع بیشتر در مؤلفه‌های عمود بر گسل قابل توجیه است.

۴.۴. بیشینه‌ی نیاز درز انقطاع و زاویه‌ی درز انقطاع تحت

رکوردهای زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک و دور از گسل

از میان ترکیب‌های مختلف همجواری قاب‌ها (صرف‌نظر از تقدم و تأخر در چیدمان)، میانگین بیشترین مقدار درز انقطاع تحت رکوردهای زلزله‌ی حوزه‌ی دور و نزدیک گسل در طبقات برخورد مختلف در شکل ۱۲الف مشاهده می‌شود. در تمامی رکوردهای مورد بررسی، بیشترین مقدار درز انقطاع در تراز برخورد 10° طبقه ایجاد می‌شود و مقدار آن در تراز مذکور برای مؤلفه‌های عمود بر گسل زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک به ترتیب $1/68$ و $1/45$ برابر مقادیر نظیر تحت رکوردهای حوزه‌ی دور از گسل و مؤلفه‌های موازی گسل زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل است. درخصوص زاویه‌ی درز انقطاع طبق شکل ۱۲ب، میانگین بیشترین مقدار متعلق به تراز برخورد ۲ طبقه است. بیشینه‌ی مقدار زاویه‌ی درز انقطاع در این تراز برای مؤلفه‌های عمود بر گسل زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک به ترتیب $1/25$ و $1/12$ برابر مقادیر نظیر تحت رکوردهای حوزه‌ی دور از گسل و مؤلفه‌های موازی گسل زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل است. لازم به ذکر است که مقادیر بیشینه‌ی درز انقطاع و زاویه‌ی درز انقطاع، در همه‌ی رکوردها از یک ترکیب مجاورت قاب‌ها ایجاد نشده است. به عنوان نمونه، ترکیب مجاورتی که منجر به زاویه‌ی درز انقطاع بیشینه در تراز برخورد ۲ طبقه می‌شود، به ترتیب برای مؤلفه‌های عمود بر گسل

دور از گسل و مؤلفه‌های موازی زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل است.

- در تمامی رکوردهای مورد بررسی، بیشترین مقدار زاویه‌ی درز انقطاع در تراز برخورد ۲ طبقه ایجاد شده و مقدار میانگین آن برای مؤلفه‌های عمود بر گسل زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک به ترتیب ۱/۲۵ و ۱/۲۱ برابر مقادیر نظیر تحت رکوردهای حوزه‌ی دور از گسل و مؤلفه‌های موازی زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل بوده است.

به دست آمده از رکوردهای زلزله‌ی حوزه‌ی دور از گسل و مؤلفه‌ی موازی رکوردهای زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل است.

- در تمامی رکوردهای مورد بررسی، بیشترین مقدار درز انقطاع در تراز برخورد ۱۰ طبقه ایجاد می‌شود و مقدار میانگین آن برای مؤلفه‌های عمود بر گسل زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک به ترتیب ۱/۶۸ و ۱/۴۵ برابر مقادیر نظیر تحت رکوردهای حوزه‌ی

پانویس‌ها

1. ABS
2. SRSS
3. DDC
4. NF-SN
5. NF-SP
6. FF
7. Northridge

منابع (References)

1. Efraimiadou, S., Hatzigeorgiou, G.D. and Beskos, D.E. "Structural pounding between adjacent buildings subjected to strong ground motions. Part I: The effect of different structures arrangement", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley, **42**(10), pp. 1509-1528 (2013).
2. Efraimiadou, S., Hatzigeorgiou, G.D. and Beskos, D.E. "Structural pounding between adjacent buildings subjected to strong ground motions. part II: The effect of multiple earthquakes", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley, **42**(10), 1529-1545 (2013). pp.
3. Mazloom Fazel, B. and Saleh Jalali, R. "Pounding response of three adjacent buildings under near-Fault strong ground motion and its effect on seismic behavior of interior and exterior buildings", *Sharif Civil Engineering Journal*, **33**(1.2), pp. 113-123 (2015).
4. Shehata, E. and Raheem, A. "Mitigation measures for earthquake induced pounding effects on seismic performance of adjacent buildings", *Bull. Earthquake Eng., Springer*, **12**(4), pp. 1705-1724 (2014).
5. Khatawada, S, Chouw, N. and Butterworth, J.W. "Development of pounding model for adjacent structures in earthquakes", *9th Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand (14-16 Apr., 2011).
6. Shrestha, B. "Effects of separation distance and nonlinearity on pounding response of adjacent structures", *International Journal of Civil and Structural Engineering*, **3**(3), pp. 603-612 (2013).
7. Abdous, F. "Analytical investigation of dynamic of steel Mid and high rise adjacent building approach performance levels", Master of Science Earthquake Engineering, Semnan University, Faculty of Civil Engineering (2014).
8. Hao, H. "Analysis of Seismic Pounding between Adjacent Buildings", *Australian Journal of Structural Engineering*, Taylor & Francis, **16**(3), pp. 208-225 (2015).
9. Naderpour, H., Khatami, S.M. and Barros, R.C. "Prediction of critical distance between Two MDOF systems subjected to seismic excitation in terms of artificial neural networks", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Paper 9618 (2017).
10. Road, Housing and Urban Development Research Center, "Iranian national building code: Design loads for buildings-division 6", Tehran, Iran, Publisher Tosseh Iran (2014).
11. Road, Housing and Urban Development Research Center, "Iranian standard No.2800. Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings", Tehran, Iran (2014).
12. Computers and Structures, Inc., "Analysis reference manual for ETABS2015", Berkeley, USA, (2015).
13. Road, Housing and Urban Development Research Center, "Iranian national building code: Design and construction of steel structures-division 10", Tehran, Iran, Publisher Tosseh Iran (2014).
14. McKenna, F. and Fenves, G. "Open system for earthquake engineering simulation", University of California, Berkeley (2007).
15. Baker, J.W. "Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**(5), pp. 1486-1501 (2007).
16. Seismosoft, Seismosignal Ver. 5.1.2, (www. seismosoft. com).
17. Garcia, R. and Negrete-Manriquez, C. "Evaluation of drift demands in existing steel frames under As-recorded far-field and near-fault mainshock-aftershock seismic sequences", *Engineering Structures*, Elsevier, **33**(2), pp. 621-634 (2011).