مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس دوره بیستم، شماره ۴، سال ۱۳۹۹



بررسی کفایت برون مرکزی اتفاقی پیشنهاد شده توسط آییننامههای طراحی لرزهای برای در نظر گرفتن آثار مولفه دورانی زلزله در تحلیل دینامیکی غیرخطی

سامان راحت دهمرده'، مهر تاش معتمدی'*، آرمین عظیمی نژاد"

۱– دانش آموخته دکتری مهندسی عمران-زلزله، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی ۲– مدیر آزمایشگاه مهندسی زلزله، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بریتیش کلمبیا، ونکوور، کانادا ۳– استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی

* mmotamedi@civil.ubc.ca

تاریخ دریافت: [۹۷/۱۰/۳]

تاريخ پذيرش: [۹۸/٤/۱۸]

چکيده :

به دلیل در دسترس نبودن دادههای سه مولفه دورانی زلزلهها، تحلیل لرزهای ساختمانها معمولا تنها با اعمال مولفههای انتقالی انجام میشود. استاندارد ۲۸۰۰ برای در نظر گرفتن اثر مولفه پیچشی زلزله در تحلیل لرزهای این سازهها برون مرکزی اتفاقی را پیشنهاد نموده است. این مقاله روی بررسی آثار مولفه پیچشی بر پاسخ لرزهای سازههای ساختمانی با مشخصات دینامیکی متفاوت متمرکز شده است. علاوه بر این کفایت ٥ درصد برون مرکزی اتفاقی برای گنجاندن اثر مولفه پیچشی در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی نیز مطالعه شده است. برای این منظور تعداد زیادی مدل یک طبقه سخت و نرم پیچشی با دوره تناوبهای انتقالی بین ٥٠/٠ تا ۲ ثانیه و سه مقدار خروج از مرکزیت ٥، ١٥ و ٢٥٪ با استفاده از نرم افزار OpenSees مدلسازی شده و یکبار تحت تحریکات انتقالی و بار دیگر و منفی به وسیله مولفههای انتقالی قرار گرفتهاند. این مدل ها دوباره طبق توصیه استاندارد ٢٨٠٠ با جابهجایی مرکز جرم به میزان ٥٠/٠ بعد ساختمان در جهات مثبت و منفی به وسیله مولفههای انتقالی تحلیل شدهاند. در این پژوهش ١٤ زلزله حوزه دور انتخاب شده و مولفه دورانی آنها به وسیله روشی غیر مستقیم بر پاید و منفی به وسیله مولفههای انتقالی تحلیل شده است. در این پژوهش ١٤ زلزله حوزه دور انتخاب شده و مولفه دورانی آنها به وسیله روشی غیر مستقیم بر پایه و منفی به وسیله مولفههای انتقالی تحلیل شده اند. در این پژوهش ١٤ زلزله حوزه دور انتخاب شده و مولفه دورانی آنها به وسیله روشی غیر مستقیم بر پایه و منفی به وسیله مولفههای استخراج شده است. در مجموع بیش از ٢٦٠٠ تحلیل دینامیکی غیرخطی در این مطالعه پارمتریک انجام شده است. مقایسه پاسخهای حاصل از تحلیل ها نشان می دهد که مولفه پیچشی زلزله اثر قابل ملاحظهای بر ساختمانها دارد و این اثر تابعی از مشخصات دینامیکی و پیچشی سازه ماست. تغییر مکان سازه در اثر گنجاندن مولفه پیچشی در ترکیب بار لرزهای میتواند تا ٥٠٠ افزان موانی بر این اثر تابعی دی و

کلمات کلیدی : تحریک دورانی زلزله، تحلیل لرزهای، ساختمان سخت پیچشی، ساختمان نرم پیچشی، برون مرکزی اتفاقی.

۱- مقدمه

با وجود این واقعیت که سازهها در طول زلزله به وسیله سه مولفه انتقالی و سه مولفه دورانی تحریک میشوند، بیشتر آثار مولفههای دورانی زلزله در تحلیل و طراحی لرزهای سازههای ساختمانی به طور مستقیم دیده نمی شوند. مولفه های دورانی زلزله شامل دو مولفه گهوارهای ناشی از دوران حول محورهای افقی دستگاه مختصات و یک مولفه پیچشی ناشی از دوران حول محور قائم هستند. در دسترس نبودن دادههای مولفههای پیچشی و گهوارهای زلزلهها و همچنین ناچیز شمردن آثار این مولفهها بر پاسخ کلی سازهها علل اصلی نادیده گرفته شدن این مولفهها در تحليل و طراحي سازهها هستند [2, 1]. با اين وجود برخی از پژوهشگران بخشی از خسارات سازهای ایجاد شده را به تحريكات دوراني زلزلهها نسبت دادهاند [3]. هارت و همکاران در سال ۱۹۷۵ [4] گزارش کردند که یاسخ پیچشی ساختمانهای بلند در طول زلزله سنفرناندو (۱۹۷۱) می تواند ناشی از آثار مولفه پیچشی آن زلزله باشد. فروپاشی پلها در زلزلههای میاگی اوکی در سال ۱۹۷۸ [5] و نورتریج در سال ۱۹۹٤ [6] نیز به مولفههای دورانی آن زلزلهها نسبت داده شده است.

در دهمهای اخیر تعداد زیادی پژوهش در زمینه چگونگی تولید مولفههای دورانی به صورت غیرمستقیم و با استفاده از دادههای مولفههای انتقالی انجام شده است. نیومارک (۱۹٦۹) [7] یکی از پژوهشگران پیشگام در این زمینه بود که رابطهای ساده برای ایجاد ارتباط میان مولفههای انتقالی و دورانی بر پایه انتشار امواج هارمونیک با سرعت ثابت پیشنهاد نمود. غفوری آشتیانی و سینگ (۱۹۸۹) [8] روشی در حوزه زمان پیشنهاد نمودند که قادر به استخراج مولفههای دورانی زلزله از مولفه های انتقالی هستند و بنام روش مشتقات زمانی شناخته می-شود. این روش در سالهای اخیر توسط فلامرز شیخ آبادی و فلامرز شیخ آبادی و همکارانش (۲۰۱۷) [0] به طرز قابل توجهی گسترش یافته است. تعدادی از پژوهشگران تلاش کردهاند تا مولفههای دورانی زلزله را با استفاده از تئوری انتشار

امواج در یک محیط همگن الاستیک تولید کنند [13-11]. آن-ها اینگونه در نظر گرفتند که مولفه گهوارهای به وسیله امواج حجمی SV و P^۲ و مولفه پیچشی به وسیله موج حجمی SH⁷ ایجاد می شوند [15, 14]. در این روش ها برای استخراج مولفه های دورانی تنها داده های ثبت شده از مولفه های انتقالی مولفه های دورانی تنها داده های ثبت شده از مولفه های انتقالی روش های تک ایستگاهی (SSP³) شناخته می شوند [16]. به موازات توسعه روش های تکایستگاهی، روش های چند ایستگاهی (MSP^۵) نیز در دهه های گذشته توسعه یافته اند ایستگاهی (MSP^۵) نیز در دهه های گذشته توسعه یافته اند داده های مولفه های انتقالی دو و یا چند ایستگاهی نیاز مند مستند و معمولا داده های حاصل از شبکه های شتاب نگاری متراکم برای آن ها مناسب است [17].

با پیشرفت در تولید مولفههای دورانی زلزله در دهههای اخیر، ارزیابی آثار این مولفهها بر رفتار سازهها در نزد پژوهشگران به موضوعي جذاب تبديل شده است [18]. دي لالرا و چوپرا (۱۹۹٤) [19] آثار تحریک پیچشی زلزله بر پاسخ خطی ساختمانهای یک طبقه دارای فنداسیون صلب را مورد سنجش قرار دادند و نتیجه گرفتند که افزایش تغییرمکان در اثر مولفه پیچشی در سازههای منظم بیشتر از سازههای نامنظم است. در ضمن آنها بیان داشتند که برون مرکزی اتفاقی برای در نظر گرفتن آثار ناشی از این مولفه برای بیشتر ساختمانها مناسب است. شکیب و توحیدی در سال ۲۰۰۲ [20] و قائم مقامیان و همکاران در سال ۲۰۰۹ [21] پژوهش های مشابه دی لالرا و چوپرا روی میزان تاثیر مولفه پیچشی زلزله بر رفتار الاستیک سازههای یک طبقه انجام دادهاند. نتایج این مطالعات نشان داد که مولفه پیچشی تاثیر قابل توجهی بر رفتار سازههای دارای نسبت فرکانس پیچشی به انتقالی پایین دارد و ۰/۰۵ برون مرکزی اتفاقی برای آنها مناسب نیست. در سال ۲۰۱۲ فلامرز شیخ آبادی و غفوری آشتیانی [9] روابطی تقریبی را برای

3 Horizontally polarized shear wave

¹ Vertically polarized shear wave

² Primary seismic wave

⁴ Single station procedure

⁵ Multiple station procedure

مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس

تخمین میزان تاثیر مولفههای گهوارهای و پیچشی بر سازهها توسعه دادند. این پژوهشگران با توجه محتوای فرکانسی مولفههای دورانی بیان داشتند که صرفنظر از این مولفهها برای سازههای سخت به هیچ عنوان قابل قبول نیست. روش هایی جایگزین نیز برای در نظر گرفتن برون مرکزی اتفاقی ناشی از مولفه پیچشی توسط باسو و همکاران (۲۰۱٤) [22] و فلامرز شیخ آبادی (۲۰۱٤) [3] توسعه یافته است. در سالهای اخیر مطالعاتی بر روی رفتار لرزهای سازههای خاص از جمله دودکش صنعتی [23]، مخازن زمینی ذخیرہ آب [24]، پل [25]، ساختمان،های بلندمرتبه [26] و همچنین سازههای دارای جداساز لرزهای [27] تحت تحریکات انتقالی و دورانی زلزله انجام شده است. آثار مولفههای دورانی زلزلههای حوزه نزدیک بر سازههای جداسازی شده در سال ۲۰۱۷ توسط تجملیان و همكارانش [28] بررسی شده است. در این پژوهش مدلهایی با نسبتهای ابعادی مختلف و توزیع غیریکنواخت جرم براساس تركيبات مختلف مولفههاي انتقالي و دوراني زلزله تحلیل شدهاند. آن ها نشان دادند که شتاب بام و برش پایه می-توانند در اثر اعمال مولفههای دورانی به ترتیب تا ۲۵۵ و ۱۳۵٪ افزایش یابند. تجملیان و خوشنودیان در سال ۲۰۱۸ [29] تاثیر مولفههای دورانی زلزلههای حوزه نزدیک بر میزان بزرگنمایی شتاب سازههای دارای جداساز لرزهای را بررسی و رابطهای برای تعیین بیشینه شتاب ناشی از مولفههای دورانی در اینگونه سازهها بدون نیاز به تحلیل دینامیکی پیشنهاد نمودند. ویچنسیو و الکساندر (۲۰۱۹) [18] مطالعهای پارامتریک برای ارزیابی اثر مولفههای دورانی حرکت زمین بر پاسخ سازههای ساختمانی با در نظر گرفتن تاثیر اندرکنش خاک و سازه انجام دادند. آنها برای استخراج مولفههای دورانی از روشی چندایستگاهی براساس دادههای شبکه شتابنگاری تایوان (SMART-1) استفاده نموده و روابطی تئوری برای سنجش میزان اثرگذاری این مولفهها بر سازه ارائه کردهاند. این پژوهشگران با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل های دینامیکی بر تاثیر قابل توجه مولفههای دورانی بر پاسخهای تغییرمکان و شتاب ساختمانها تاکید کردند و اینگونه نتیجه گرفتند که میزان تاثیر مولفههای دورانی حرکات زمین بر این پاسخها اصولا به عواملی همچون نسبت شتاب مولفههای دورانی به انتقالی و اختلاف فاز

ارتعاشی با توجه به دوره تناوب سازهها و محتوای فرکانسی زلزلهها بستگی دارد.

در سالهای گذشته مطالعاتی محدود در زمینه آثار مولفه پیچشی زلزله بر پاسخ خطی سازههای ساختمانی ارائه شده است، اما تاکنون و براساس دانش نویسندگان ارزیابی جامعی در زمینه تاثیر این مولفه بر پاسخ غیرخطی ساختمانها دارای مشخصات ديناميكي متفاوت انجام نگرفته است. بيشتر آيين نامههای تحلیل و طراحی لرزهای سازههای ساختمانی از جمله استاندارد ۲۸۰۰ [30] استفاده از برون مرکزی اتفاقی را برای در نظر گرفتن آثار مولفه پیچشی زلزله در تحلیلهای لرزهای خطی و غیرخطی پیشنهاد کردهاند. این در حالیست که هنوز کارایی و کفایت برون مرکزی اتفاقی برای پوشش آثار مولفه پیچشی زلزله در تحلیل دینامیکی غیرخطی ساختمانهای نرم و سخت پیچشی با ویژگیهای متفاوت دینامیکی مورد مطالعه قرار نگرفته است. بر همین اساس در این پژوهش سعی شده تا پاسخ لرزهای ساختمانهای متقارن و نامتقارن با رفتار غیرخطی تحت تاثیر همزمان تحریکات انتقالی و پیچشی مورد مطالعه قرار گیرد و همچنین کارایی و کفایت ۰/۰۵ برون مرکزی اتفاقی در تحلیل دینامیکی غیرخطی به طور کامل بررسى شود.

۲- پیشنهاد استاندارد ۲۸۰۰

بیشتر آییننامههای ساختمانی پارامتری به نام برون مرکزی طراحی (ed) را برای در نظر گرفتن پیچش معرفی کردهاند. برون مرکزی طراحی متشکل از دو برون مرکزی طبیعی (e) و برون مرکزی اتفاقی (ea) است [21]. برون مرکزی طبیعی ناشی از فاصله اولیه میان مراکز جرم و سختی سازه در تراز کف طبقه است. برون مرکزی اتفاقی نیز برای در نظر گرفتن سایر عوامل ایجاد کننده پیچش مانند عدم قطعیت در توزیع جرم و سختی، تسلیم غیر یکنواخت المانهای لرزهبر جانبی و همچنین اثر مولفه پیچشی زلزله تعریف میشود [22]. استاندارد ۲۸۰۰ [30] نیز الگویی مشابه را معرفی نموده که طبق بند ۳–۳–۷–۲ به صورت رابطه (۱) بیان میشود:

 $ed = e_{ij} \pm e_{aj}$ در این رابطه e_{ij} فاصله افقی مرکز جرم طبقه **ز**ام و مرکز سختی طبقه iام است و e_{aj} برون مرکزی اتفاقی طبقه jlم و برابر با βb است، که b بعد ساختمان در جهت عمود بر زلزله و β ضریبی ثابت و برابر ۰/۰۵ هستند. لازم به ذکر است که مقدار ضریب β در آییننامههای ASCE 7-16 (بند ASCE 7-16) [31] و Eurocode-8 (بند 2-3-4) [32] نيز همين ٠/٠ در نظر گرفته شده اما در آییننامههای لرزهای نیوزلند (بند 2-3-5) (33] و همچنين NBCC (بند 11-8-14) [34] برابر ۱/۰ هست. این مقادیر براساس تحلیل الاستیک سازههای ایدهآل و قضاوت مهندسي پيشنهاد شدهاند [9].

۳- مدلسازی سازهها

(1)

سازههای ایدهآل مفروض در این مطالعه از یک دیافراگم صلب با ابعاد ۲۰×۲۰ متر که روی تعدادی ستون بدون جرم قرار گرفته، تشکیل شدهاند. جرم به صورت متمرکز در مرکز جرم دیافراگم در نظر گرفته شده است. تمامی مدلها ۳ درجه آزادی دارند که روی مرکز جرم تعریف شدهاند و عبارتند از حركات انتقالي در جهات افقي و دوران حول محور قائم. ستونها مقاومت جانبی سازه در هر دو جهت را تامین میکنند و باید خاطر نشان کرد که سختی مدلها در دو جهت X و Y یکسان است. همانگونه که در شکل (۱) دیده می شود سازه-های نامتقارن حول محور X متقارن هستند اما حول محور Y دارای سختی نامتقارن هستند که منجر به ایجاد برون مرکزی (e) بین مراکز جرم و سختی شده است.

به منظور مقایسه رفتار سازههای سخت و نرم انتقالی، مدلهایی با دوره تناوبهای انتقالی غیرهمبسته (T) متفاوت از ۰/۰۵ تا ۲ ثانيه (T= 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2sec) انتخاب شده است. در این پژوهش علاوه بر ساختمانهای سخت پیچشی، ساختمانهای نرم پیچشی نیز مطالعه شدند. به طورکلی سازهها با نسبت فرکانس های غیرهمبسته پیچشی به انتقالی (Ω=∞θ/ωx) بزرگتر و یا مساوی ۱ به عنوان سازههای سخت پیچشی و سازهها با نسبت فرکانسی کمتر از ۱ به عنوان سازههای نرم پیچشی نامیده می شوند [35]. بر همین اساس

این پژوهش برای مطالعه ساختمانهای سخت و نرم پیچشی تحت تحریک انتقالی-پیچشی دو نسبت فرکانسی ۱/۵ و ۷۵/۰ را در نظر گرفته است.



Fig. 1. A schematic view of asymmetric one-story model

سیستمهای متقارن (e/r = 0) دارای \mathfrak{t} ستون در گوشههای پلان با سختی برابر (Ki = K) هستند، اما سیستمهای نامتقارن e/r = 0.15, 0.25) ه ستون با سختی متفاوت (K1 K1 و K3) دارند، همانگونه که در شکل (۱) نیز نشان داده شده است. لازم به ذکر است که r شعاع ژیراسیون دیافراگم حول مرکز جرم هستند. برای ایجاد خروج از مرکزیت ابعاد مقطع ستونها نیز تغییر یافته است. ستونهای استفاده شده در مدلها از نوع باکس فولادی با ابعاد کاملا مشابه در جهات X و Y هستند.

جدول ١. مشخصات المان هاى سازهاى مدل هاى مطالعه شده

Model		Dimensions of Columns					
e/r	0	$b_1 = h_1$	b ₂ =h ₂	b ₃ =h ₃	t		
	52	(m)	(m)	(m)	(m)		
0	1.5	0.3	0.3	0	0.01		
0	0.75	0.3	0.3	0	0.01		
0.15	1.5	0.3075	0.302	0.2795	0.01		
0.15	0.75	0.291	0.3085	0.3	0.01		
0.25	1.5	0.2976	0.3024	0.3	0.01		
0.25	0.75	0.27	0.321	0.3094	0.01		

Table 1. Characteristics of structural elements of the studied models

مشخصات ابعادی المان های سازهای مدل های مطالعه شده در جدول (۱) ارائه شده است لازم به ذکر است که b و h ابعاد مقطع باکس و t ضخامت ورق باکس هستند. برای دستیابی به

بيشتر از ١١ كيلومتر است. بيشينه شتاب زلزلهها بين ١٨g/ تا ۷۳g • متغیر است و سرعت موج برشی در محل ایستگاه ثبت رکورد این زلزلهها نیز به گونهای است که در محدودهی شرایط خاک نوع ۲ استاندارد ۲۸۰۰ قرار می گیرند [30]. مشخصات زلزلههای انتخابی در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است که در این مطالعه هر سه معیار بیشینه شتاب، فاصله از گسل و همچنین سرعت موج برشی در محل ثبت ركورد برای انتخاب زلزلههایی منطبق با طیف طرح آییننامه به عنوان معیارهای اصلی در نظر گرفته شدهاند. شکل (۲) طیف پاسخ شتاب زلزلههای انتخاب شده (میرایی ٥ درصد)، طيف ميانگين آنها و همچنين طيف طرح آييننامه براي منطقهای با شرایط لرزهخیزی خیلی زیاد و دارای زمین نوع ۲ را نشان میدهد. همانگونه که مشاهده می شود این ۱۶ زلزله به شکلی انتخاب شدهاند که میانگین آنها هماهنگی مناسبی با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ دارد و در ضمن میانگین بیشینه شتاب نیز نزدیک به شتاب مبنای طرح برای شرایط لرزهخیزی خیلی زیاد است.



Fig. 2. Acceleration response spectra of the used earthquakes in this study

به منظور تعیین اثر واقعی مولفههای انتقالی و دورانی زلزلهها بر رفتار غیرخطی سازهها رکوردها با شدت واقعی استفاده شدند. دادههای تمامی زلزلهها از بانک اطلاعاتی مرکز تحقیقات مهندسی زلزله اقیانوس آرام (PEER) برداشت شده است.

همانگونه که پیشتر نیز اشاره شد مولفههای دورانی به طور مستقیم ثبت نمیشوند و باید با استفاده از روشهای عددی شبیهسازی شوند. از این رو در این پژوهش یک روش تک ایستگاهی بر پایه تئوری انتشار امواج مورد استفاده قرار گرفته سیستمهای متقارن و نامتقارن نرم پیچشی، فاصله ستونها نسبت به مرکز جرم کاهش یافته است. این امر سختی پیچشی سازه و به تبع آن مقدار Ω را کاهش میدهد.

0penSees مدلسازی در نرم افزار

برای شبیهسازی سازهها و انجام تحلیلهای تاریخچه زمانی غیرخطی از نرم افزار غیرتجاری اپنسیس [36] استفاده شده است. لازم به ذکر است که سازههای مفروض از نوع فولادی هستند و برای مدلسازی رفتار غیرخطی مصالح فولادی از مدل Steel-02 بهره برده شده است. این مدل رفتاری به طرز مناسبی رفتار تدریجی فولاد از فاز الاستیک به فاز پلاستیک و همچنین اثر بوشینگر را در نظر میگیرد. برای مدلسازی ستون ها از المان مبتنى بر نيرو (Column Beam element force) با مقطع فايبر (section Fiber- patch quad) استفاده شده و در طول آنها نیز ٥ نقطه انتگرالگیری با فواصل یکسان در نظر گرفته شده است. در ضمن باید بیان داشت که برای در نظر گرفتن سختی پیچشی ستونها از روش مقطع ترکیبی (section Aggregator) بهره برده شده است. همانگونه که ذکر شد سقف به صورت یک دیافراگم صلب در نظر گرفته شده است و برای مدلسازی آن در نرم افزار با استفاده از دستور Diaphragm Multi-Point Constraint - rigid تمام گرههای موجود در تراز سقف به گره مرکزی وابسته شده و درجات آزادی دینامیکی انتقالی و دورانی برای آن تعریف شده است. برای مدلسازی میرایی ذاتی سازهها از میرایی رایلی استفاده شده و برای مودهای اول و سوم نسبت میرایی ٥ درصد لحاظ شده است. برای انجام تحلیلهای تاریخچه زمانی از روش انتگرالگیری نیومارک با ضرایب ۵/۰- α و β -۰/۲۵ از روش بهره برده شده است. در این پژوهش روش نیوتن به منظور در نظر گرفتن تکرار در تحلیل غیرخطی به کار گرفته شده و برای انجام تست همگرایی از معیار انرژی استفاده شده است.

٤- زلزلههای استفاده شده در این مطالعه

برای انجام تحلیلهای غیرخطی ۱۶ زلزله حوزه دور با بزرگایی در محدوده ۲/۵ تا ۷/٦ انتخاب شده است. نزدیکترین فاصله بین ایستگاه ثبت تا صفحه گسل (Rrup) برای تمامی زلزلهها $\theta_{gz} = \frac{i\omega}{2c(f)}v$

برشی در سطح زمین، رابطه بین طیفهای فوریه حرکات

پیچشی و انتقالی زمین به صورت معادله (۳) تعریف می شود

که θ_{gz} و v طیفهای فوریه مولفههای پیچشی و انتقالی برون

 $\mathbf{i}=\sqrt{-1}$ صفحه زلزله هستند. ω فركانس امواج هارمونيك،

و (c(f) سرعت انتشار امواج وابسته به فرکانس و زاویه برخورد

است. این سرعت را می توان براساس رابطه پیشنهادی سان و

 $c(f) = (5.426 + (1.646)\log f - 0.814(\log f)^2)(1 + 0.2\xi) \ (\xi)$

در این رابطه f فرکانس بر حسب هرتز و ξ عددی تصادفی در

لازم به ذکر است که در این مطالعه مقدار یارامتر ع به پیشنهاد پژوهشگران پیشین برای دستیابی به رکوردهایی با دامنه شتاب

دورانی منطقی نزدیک به حد وسط در نظر گرفته شده است

[37]. پارامترهای fو ω فرکانس امواج هارمونیکی با دو واحد متفاوت هرتز و رادیان بر ثانیه هستند که با استفاده از تبدیل

سريع فوريه و بردن ركوردهاي زلزله از حوزه زمان به حوزه فركانس بدست مي آيند. به عنوان نمونه شتابنگاشت مولفه

پیچشی تولید شده با این روش برای زلزله نورتریج (ایستگاه

Castaic) در شکل (٤) ارائه شده است.

چن [37] مطابق رابطه (٤) تخمين زد:

محدودهی ۱ – تا ۱ است.

است. در این روش فرض بر این است که امواج در یک محیط الاستیک همگن انتشار مییابند [37]. طبق این روش امواج لرزهای در راستای یک صفحه قائم (X,Z) حرکت میکنند [37, 14]: (شکل ۳). همانگونه که در شکل (۳) مشاهده می شود امواج برخورد و انعکاسی SH باعث حرکت برون صفحه ذرات (در جهت Y) می شوند که با نماد v نشان داده شده است. بر اثر برخورد و انعکاس این امواج حجمی مولفه پیچشی زلزله (θ_{gz}) در سطح زمین تولید میشود. در شکل (۳) دامنه امواج برخورد و انعکاسی SH با نمادهای A₀ و A₁ و زوایای این امواج با محور قائم با نماد α₀ معرفی شدهاند.

شکل ۳. مولفه پیچشی ناشی از موج SH



Fig.3. Torsional component due to the SH wave

$$\theta_{gz} = \frac{1}{2} \left(\frac{-\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \tag{(1)}$$

ID	Earthquake	Station	Year	Magnitude	Vs	Rrup	PGA
No.	name				(m/s)	(km)	(g)
1	Cape Mendocino	Centerville Beach	1992	7.01	459.04	18.31	0.477
2	Cape Mendocino	Loleta Fire	1992	7.01	515.65	25.91	0.265
3	Chuetsu-oki	Kashiwazaki	2007	6.80	561.59	20.03	0.727
4	Chuetsu-oki	Yoshikawaku	2007	6.80	561.59	16.86	0.453
5	Hector Mine	Hector	1999	7.13	726.00	11.66	0.328
6	Landers	Joshua Tree	1992	7.28	379.32	11.03	0.284
7	Manjil	Abbar	1990	7.37	723.95	12.55	0.514
8	New Zealand	Matahina Dam	1987	6.60	551.30	16.09	0.284
9	Northridge	Castaic	1994	6.69	450.28	20.72	0.568
10	Northridge	LA-UCLA	1994	6.69	398.42	22.49	0.474
11	Kocaeli	Arcelik	1999	7.51	523.00	13.49	0.210
12	Chi-Chi	TCU045	1999	7.62	704.64	26.00	0.506
13	Friuli	Tolmezzo	1976	6.50	505.23	15.82	0.357
14	Kern county	Taft	1952	7.36	385.43	38.89	0.180

جدول ۲. مشخصات زلزلههای استفاده شده در این یژوهش

(٣)

Table 2. Characteristics of used earthquake records in this study

مجله علمي – پژوهشي مهندسي عمران مدرس

مرکز دیافراگم به عنوان نتایج اصلی انتخاب شدهاند. برای بیان میزان تاثیرگذاری مولفه پیچشی بر پاسخهای مورد نظر پارامتر بدون بعد پاسخ نرمال شده (NR) مطابق رابطه (٥) تعریف شده است:

$$NR = \frac{R_{(X+Y+TOR)}}{R_{(X+Y)}}$$
(0)

که (R(X+Y+TOR پاسخ حداکثر سازه تحت تحریک همزمان انتقالی و پیچشی است و (R(X+Y) به پاسخ حداکثر سازه تحت تحریک انتقالی اشاره دارد. ۱<NR و ۱>NR بیانگر افزایش و کاهش پاسخها در اثر مولفه پیچشی هست. شاخص NR برای هریک از زلزلهها محاسبه و میانگین بدست آمده برای ۱۶ زلزله به عنوان نتیجه نهایی هر پاسخ در نظر گرفته شده است.



Fig. 4. Torsional acceleration time history of the 1994 Northridge earthquake (Castaic)

٥- نتايج

در این پژوهش پاسخهای تغییرمکان لبههای سمت چپ و راست دیافراگم در جهت محور Y و همچنین میزان دوران















Fig. 5. Variations of displacement of the left and right sides of diaphragm due to the earthquake torsional component

٥-١- تاثير مولفه پيچشي زلزله بر پاسخ ساختمانها

در این بخش آثار مولفه پیچشی زلزله بر پاسخهای تغییرمکان و دوران دیافراگم ساختمانها مورد مطالعه و بحث قرار گرفته است. مقادیر NR پاسخ تغییرمکان لبههای سمت چپ و راست ساختمانهای سخت و نرم پیچشی برای طیف گستردهای از دوره تناوبهای انتقالی غیرهمبسته در شکل (۵) ارائه شده است. در این شکل علاوه بر ارائه تغییرات پاسخ جابهجایی مدلهای متقارن در اثر مولفه پیچشی زلزله، تغییرات پاسخ برای مدلهای نامتقارن با دو میزان خروج از مرکزیت ۱۰ و

برای ساختمان سخت پیچشی متقارن مشاهده می شود که مولفه پیچشی زلزله منجر به مقادیر NR بزرگتر از ۱ در لبه سمت راست و برای تمام دوره تناوبها می شود که به معنای افزایش تغییرمکان سازه است. این روند با افزایش دوره تناوب انتقالي تقويت مي شود و بيشترين افزايش تغييرمكان مربوط به سازه دارای دوره تناوب ۲ ثانیه به میزان ۵۰ درصد است. این نتیجه را می توان به رفتار غیرخطی و حساسیت بیشتر سازههای دارای دوره تناوب بزرگتر به تحریکات دورانی زلزله نسبت داد. دوران ناشی از مولفه پیچشی زلزله در مرکز دیافراگم سازهها با بالا رفتن دوره تناوب روند افزایشی دارد و به تبع آن در اثر اندرکنش ارتعاشات انتقالی و دورانی سازه میزان تغییرمکان دیافراگم غالبا در مدلها با دوره تناوب بزرگتر رشد بیشتری دارند. از طرف دیگر مولفه پیچشی زلزله میتواند در مدلهایی با دوره تناوب انتقالی بزرگتر از ٤/٠ ثانیه سبب کاهش تغییرمکان در لبه سمت چپ شود. برای ساختمان نرم پیچشی نیز مولفه پیچشی زلزله تغییرمکان سازه را افزایش می-دهد، اما با این تفاوت که افزایش تغییرمکان در هر دو لبه سمت چپ و راست دیافراگم رخ میدهد. همانگونه که ملاحظه می شود در ساختمان نرم پیچشی برخلاف ساختمان سخت پیچشی مقدار NR برای مدل های دارای دوره تناوب انتقالی کوچک نیز کاملا قابل توجه است و بیشترین رشد تغییرمکان مربوط به دوره تناوب ۲/۰ ثانیه به میزان ٤٤/٦٪ است. در ضمن باید به این نکته اشاره کرد که شاخص NR

برای ساختمان نرم پیچشی روند مشخصی را با افزایش دوره تناوب انتقالی نشان نمی دهد و در برخی از دوره تناوب ها لبه سمت چپ و در برخی دیگر لبه سمت راست سازه افزایش تغییر مکان بیشتری دارند. براساس نتایج می توان دریافت که به طور کلی روند تغییر پاسخ تغییر مکان مدل های نامتقارن برای هر دو شرایط سخت و نرم پیچشی در اثر مولفه پیچشی زلزله تقریبا مشابه مدل های متقارن است. بیشترین میزان رشد پاسخ تغییر مکان ناشی از مولفه پیچشی زلزله در مدل دارای ۱۵ درصد نامتقارنی برای ساختمان های سخت و نرم پیچشی به ترتیب برابر ۸/۳۵ و ۳۹/۳ درصد و در مدل دارای ۲۰ درصد نامتقارنی برای ساختمان های سخت و نرم پیچشی به ترتیب برابر ۲/۳۵ و ۳۹/۳ درصد است.

شکل ٦. تاثیر تغییر نسبت فرکانسی بر حداکثر افزایش تغییرمکان در اثر



Fig. 6. Effect of the frequency ratio change on the maximum increase of displacement due to the torsional component

دوره بيستم / شماره ٤ / سال ١٣٩٩

لازم به ذکر است که این مقادیر بیشترین رشد برای کل دوره تناوب ها هست. برای درک بهتر میزان تاثیر نسبت فرکانس-های غیرهمبسته پیچشی به انتقالی (Ω)، مقادیر حداکثر رشد پاسخ تغییرمکان مدلهای سخت و نرم پیچشی در اثر مولفه پیچشی زلزله برای دوره تناوبهای مختلف در شکل (٦) مقایسه شدند.

همانگونه که ملاحظه میشود به استثنای دوره تناوبهای کوچک که رفتار سازهها نیز خطی است، برای سایر دوره تناوبها میزان افزایش تغییرمکان ساختمانهای سخت پیچشی بیشتر از ساختمانهای نرم پیچشی است و این روند در مدل های نامتقارن چشمگیرتر است. تنها در محدوده دوره تناوب-های کوچک که رفتار الاستیک حاکم است، کاهش مقدار Ω سبب افزایش تاثیر مولفه پیچشی زلزله میشود. این نتیجه با نتایج ارائه شده توسط پژوهشگران دیگر مانند دی لالرا و چوپرا (۱۹۹٤) [19] و شکیب و توحیدی (۲۰۰۲) [20] که آتار مولفه دورانی زلزله بر پاسخ خطی سازهها را بررسی کرده اند، هماهنگی دارد.

شکل ۷. تاثیر نامتقارنی بر حداکثر افزایش تغییرمکان در اثر اعمال مولفه پیچشی زلزله



Fig. 7. Effect of the eccentricity on the maximum increase of displacement due to the torsional component

لازم به ذکر است که برای محدوده دوره تناوبهای بزرگتر با توجه به شرایط غیرخطی سازهها شباهتی بین نتایج پژوهشهای پیشین و این پژوهش وجود ندارد. براساس این نتایج میتوان اینگونه بیان نمود که نسبت فرکانس پیچشی به انتقالی پایین میتواند نقش مهمی برای سازههای سخت با فرکانسهای انتقالی زیاد تحت تحریک پیچشی داشته باشد.

به منظور تعیین نقش نامتقارنی در تغییرات پاسخ تغییرمکان ساختمان های سخت و نرم پیچشی در اثر اعمال مولفه پیچشی زلزله، بیشترین رشد تغییرمکان دیافراگم این ساختمانها برای سه مقدار نامتقارنی ۰، ۱۵ و ۲۵ درصد مقایسه و در شکل (۷) ارائه شده است. براساس این شکل می توان دریافت که الگوی تغییرات NR حداکثر با تغییر دوره تناوب انتقالی در سازههای سخت پیچشی برای اغلب مدلهای نامتقارن مانند مدلهای متقارن است. این روند در سازههای نرم پیچشی نیز برای محدوده دوره تناوبهای بزرگتر از ٤/٠ ثانیه صادق است. برای ساختمان سخت پیچشی میزان افزایش تغییرمکان دیافراگم ناشی از مولفه پیچشی زلزله در محدوده دوره تناوبهای کوچک (T≤۰/۲) با تغییر مقدار نامتقارنی تغییر قابل توجهی را نشان نمیدهد اما برای دوره تناوبهای بزرگتر (T≥•/٤) افزایش نامتقارنی سبب افزایش اندک رشد تغییرمکان می شود. این درحالیست که برای ساختمان نرم پیچشی به استثنای یک مدل بسیار سخت برای تمامی دوره تناوبها افزایش نامتقارنی منجر به کاهش اثر مولفه پیچشی زلزله بر تغییرمکان دیافراگم مى شود.

شکل ۸. دوران مرکز دیافراگم ساختمانهای متقارن ناشی از مولفه پیچشی



Fig. 8. Rotation of the diaphragm center of the symmetric buildings due to the torsional component

در این روابط MR به معنای بیشترین دوران مرکز دیافراگم در اثر مولفه پیچشی زلزله بر حسب رادیان است و T نیز دوره تناوب انتقالی غیرهمبسته ساختمانها بر حسب ثانیه است.



Fig. 9. Relationship between the maximum diaphragm rotation of symmetric buildings resulting from the torsional component and the translational period

شکل ۱۰. تغییرات دوران مرکز دیافراگم ساختمان های نامتقارن ناشی از



Fig. 10. Variations of rotation of the diaphragm center due to the earthquake torsional component in asymmetric buildings

تغییرات دوران مرکز دیافراگم ساختمانهای نامتقارن در اثر اعمال مولفه پیچشی زلزله برای ساختمانهای سخت و نرم پیچشی با دوره تناوبهای متفاوت در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. طبق این نتایج دوران مرکز دیافراگم در تمامی شکل (۸) بیشترین دوران ایجاد شده در مرکز دیافراگم ساختمانهای متقارن در اثر اعمال مولفه پیچشی زلزله را برای مقادیر متفاوت دوره تناوب انتقالی نشان می دهد. در این شکل تاثیر تغییر نسبت فرکانس پیچشی به انتقالی بر میزان دوران نیز مقایسه شده است. به وضوح مشاهده می شود که مولفه پیچشی می تواند سبب ایجاد دوران در سازههای کاملا متقارن شود و این دوران تابعی از دوره تناوب انتقالی است، به این صورت که با افزایش دوره تناوب دوران حداکثر برای هر دو ساختمان سخت و نرم پیچشی روندی افزایشی دارد. این مسئله می تواند برای ساختمانهای بلند که دوره تناوب بزرگتری دارند اهمیت ساختمان نرم پیچشی بیشتر از ساختمان سخت پیچشی است. به عنوان نمونه در مدل دارای دوره تناوب ۲ ثانیه مقدار دوران افزایش می یابد.

همان گونه که در شکل (۸) مشاهده می شود یک روند افزایشی منظم بین دوران حداکثر مرکز دیافراگم ناشی از مولفه پیچشی زلزله و دوره تناوب انتقالی سازهها وجود دارد. این روند نشان دهنده ارتباط خطی میان دوران و دوره تناوب است. برای تعیین این ارتباط از تحلیل رگرسیون استفاده شده که همبستگی قوی داده ها را نشان می دهد. بر اساس تحلیل رگرسیون انجام شده روابط (٦ و ۷) برای تخمین بیشترین دوران ایجاد شده در شده روابط (٦ و ۷) برای تخمین بیشترین دوران ایجاد شده در از مولفه پیچشی با استفاده از دوره تناوب انتقالی غیرهمبسته از مولفه پیچشی با استفاده از دوره تناوب انتقالی غیرهمبسته ضرکز دیافراگم ساختمانهای متقارن سخت و نرم پیچشی ناشی مرکز دیافراگم ساختمانهای متعارن سخت و نرم پیچشی ناشی مرکز دیافراگم ساختمانهای دوران حداکثر و دوره تناوب توسعه یافتهاند. ارتباط خطی میان دوران حداکثر و دوره تناوب مرایب همبستگی دادهها نیز در این شکل آورده شده که ضرایب همبستگی دادهها نیز در این شکل آورده شده که روابط پیشنهادی است.

- $MR_{(\Omega=1.5)} = (2.91e 03 \times (T)) 2.10e 04 \qquad (7)$
- $MR_{(\Omega=0.75)} = (3.55e 03 \times (T)) 6.23e 05 \quad (\forall)$

مدلهای نامتقارن با خروج از مرکزیت ۱۰/۰ و بیشتر مدلهای دارای خروج از مرکزیت ۲۵/۰ در اثر مولفه پیچشی زلزله افزایش مییابد. این روند برای ساختمان سخت پیچشی در مقایسه با ساختمان نرم پیچشی به ویژه در دوره تناوبهای بزرگتر برجستهتر است. لازم به ذکر است که با افزایش نامتقارنی رشد دوران مرکز دیافراگم در اثر مولفه پیچشی زلزله برای تمامی دوره تناوبها کاهش مییابد که این کاهش در بیشترین میزان افزایش دوران در میان مدلهای نامتقارن مربوط به ساختمان سخت پیچشی با خروج از مرکزیت ۱۰٪ و دوره تناوب انتقالی ۲ ثانیه با افزایشی بیش از ۱۰۰٪ است.

0-۲- ارزیابی کفایت برون مرکزی اتفاقی

در این پژوهش به منظور بررسی کفایت و کارایی برون مرکزی اتفاقی پیشنهاد شده توسط استاندارد ۲۸۰۰ [30] برای در نظر گرفتن آثار مولفه دورانی زلزله در تحلیل تاریخچه زمانی، تمامي مدلهاي مورد مطالعه مجددا طبق آيين نامه تحليل شده اند و در نهایت آثار برون مرکزی اتفاقی و مولفه پیچشی زلزله-ها بر پاسخهای لرزهای ساختمانها مقایسه شدهاند. در این راستا، یکبار مرکز جرم مدلها در جهت مثبت و بار دیگر در جهت منفى به ميزان ٥ درصد بعد پلان حركت داده شده و تنها تحت تاثیر مولفههای انتقالی زلزلهها قرار گرفتند. مقایسه مقادیر NR بیشترین پاسخ تغییرمکان در ساختمانهای سخت و نرم پیچشی متقارن و نامتقارن حاصل از مولفه پیچشی زلزله و ٥ درصد برون مركزي اتفاقي براي دوره تناوبهاي انتقالي متفاوت در شکل (۱۱) ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می شود به استثنای برخی مدلها با دوره تناوب کوچک برای مابقی مدلها میزان افزایش تغییرمکان ناشی از مولفه پیچشی زلزله به میزان قابل توجهی بیشتر از برون مرکزی اتفاقی است که نشان از بی کفایتی ٥ درصد برون مرکزی اتفاقی برای شبیه سازی آثار مولفه پیچشی زلزله در سازههای ساختمانی است. به طور کلی می توان گفت که اختلاف رشد تغییرمکان ناشی از مولفه پیچشی زلزله و برون مرکزی اتفاقی در ساختمانهای سخت پیچشی با افزایش دوره تناوب بزرگتر می شود و در

دوره تناوب ۲ ثانیه به اوج خود میرسد. این روند برای ساختمانهای نرم پیچشی نیز تا حدودی برقرار است و بیشترین اختلاف مربوط به مدل دارای دوره تناوب ۲ ثانیه است. بدین ترتیب ناکارآمدی ۵ درصد برون مرکزی اتفاقی در ساختمانهایی با دوره تناوب بیشتر نظیر سازههای میان و بلند مرتبه میتواند بحرانی تر باشد. به منظور درک بهتر عدم کفایت برون مرکزی اتفاقی در مدلهای مختلف ساختمانی و همچنین بیان آن به صورت کمی، مقادیر بیشترین اختلاف میان NR حاصل از مولفه پیچشی زلزله با NR حاصل از برون مرکزی اتفاقی برای ساختمانهای سخت و نرم پیچشی در جدول (۳) آورده شده است.

ل ۳. بیشترین اختلاف میان NR تغییرمکان حاصل از مولفه پیچشی	جدو
زلزله با NR حاصل از ۰/۰۵ برون مرکزی اتفاقی	

	5 U	
Model	Torsionally	Torsionally
Model	stiff	flexible
Symmetric (e/r=0)	45.2%	40.3%
Asymmetric (e/r=0.15)	47.61%	32.65%
Asymmetric (e/r=0.25)	48.63%	29.98%

Table 3. The maximum difference between the NR ofdisplacement from the torsional component and the NR fromthe 0.05 accidental eccentricity

مقادير ارائه شده در اين جدول نشان دهنده دو نكته مهم است. نکته اول اینکه ضعف برون مرکزی اتفاقی در ساختمان های نرم پیچشی کمتر از ساختمانهای سخت پیچشی است و این روند برای مدلهای نامتقارن برجستهتر است. دلیل این نتیجه را میتوان ناشی از تاثیر متفاوت مولفه دورانی زلزله بر سازهها با مشخصات دینامیکی و پیچشی متفاوت دانست. همان گونه که قبلا براساس نتایج ارائه شده در شکل (٦) ذکر شد، در اغلب موارد به ویژه برای مدلهای نامتقارن رشد پاسخ تغییرمکان ناشی از مولفه دورانی زلزله در ساختمانهای سخت پیچشی بیشتر از ساختمانهای نرم پیچشی است، و از طرف دیگر طبق شکل (۱۱) در محدوده دوره تناوبهای بزرگ که به عنوان معیار مقایسه در نظر گرفته شده است رشد تغییرمکان در اثر ۵ درصد برون مرکزی اتفاقی برای ساختمانهای نرم و سخت پیچشی تفاوت قابل توجهی ندارد. بر این اساس بیشترین اختلاف NR ناشی از مولفه دورانی زلزله و برون مرکزی اتفاقی در مدلهای نرم پیچشی کمتر است.





Fig. 11. Comparing the maximum growth of displacement due to the torsional component and the 0.05 accidental eccentricity

می سازد. به راحتی می توان مشاهده نمود که در مدل های متقارن میزان دوران حاصل از مولفه پیچشی زلزله برای دوره تناوب های بزرگتر از ٤/٠ ثانیه به میزان قابل توجهی بزرگتر از دوران ناشی از برون مرکزی اتفاقی است و این اختلاف با افزایش دوره تناوب نیز روندی افزایشی پیدا میکند. بیشترین اختلاف دوران برای ساختمانهای سخت و نرم پیچشی متقارن به ترتیب برابر ۱۹/۱۳٪ و ۱۰/۱۰۱٪ است. برای ساختمانهای نامتقارن جابه جایی مرکز جرم در جهت مثبت و منفی منجر به دوران های متفاوتی در مرکز دیافراگم می شوند. جابه جایی مرکز جرم و میخی می از جرم و می خری تولید میکند که این سختی می شود و تبع آن دوران بزرگتری تولید میکند که این دوران برای بیشتر دوره تناوب ها حتی بزرگتر از دوران ناشی از مولفه پیچشی زلزله است. دومین نکته تاثیر متفاوت نامتقارنی بر ضعف برون مرکزی اتفاقی در مدلهای مختلف است به این صورت که افزایش نامتقارنی در ساختمانهای سخت پیچشی سبب افزایش اندک بی کفایتی برون مرکزی اتفاقی میشود و بلعکس در ساختمان-های نرم پیچشی تا حدودی ضعف برون مرکزی اتفاقی را بهبود می بخشد. لازم به ذکر است که جابه جایی مرکز جرم سبب تغییر مشخصات دینامیکی سیستم و همچنین ماتریس میرایی در صورت استفاده از روش کلاسیک رایلی می شود، در حالیکه مولفه دورانی زلزله هیچ تاثیری بر مشخصات دینامیکی اولیه سیستم ندارد و این مسئله مهم می تواند یکی از دلایل اصلی بی کفایتی برون مرکزی اتفاقی باشد.

شکل (۱۲) مقادیر دوران مرکز جرم دیافراگم ساختمانها ناشی از مولفه پیچشی زلزله و ٥ درصد برون مرکزی اتفاقی را نمایان



شکل ۱۲. مقایسه دوران مرکز دیافراگم پس از اعمال مولفه پیچشی زلزله و ۰/۰۵ برون مرکزی اتفاقی

Fig.12. Comparing the rotation of diaphragm center after applying the torsional component and the 0.05 accidental eccentricity

۱- برای ساختمانهای سخت پیچشی مولفه پیچشی زلزله سبب افزایش تغییرمکان در یک سمت سازه و کاهش آن در سمت دیگر می شود که بیشترین افزایش (تا ۰۰٪) مربوط به دوره تناوبهای بزرگتر است. اما برای ساختمانهای نرم پیچشی تغییرمکان هر دو سمت سازه در اثر اعمال مولفه پیچشی زلزله افزایش می یابد که بیشترین افزایش (تا ٤٤٪) در دوره تناوبهای کوچک ایجاد می شود.

 ۲- کاهش مقدار Ω موجب افزایش تاثیر مولفه پیچشی زلزله بر تغییرمکان دیافراگم تنها برای مدلهای سخت با دوره تناوب
های کوچک می شود. برای سایر دوره تناوبها میزان رشد این روند در ساختمانهای نامتقارن دارای ۲۵٪ خروج از مرکزیت نسبت به ساختمانهای دارای ۱۵٪ چشمگیرتر است. این در حالیست که جابهجایی مرکز جرم دیافراگم در جهت مثبت نامتقارنی را کاهش میدهد و منجر به دوران کوچکتر میشود و برای تمامی دوره تناوبها کمتر از دوران ناشی از مولفه پیچشی زلزله است.

۲- نتیجه گیری

مهمترین نتایج بدست آمده از این پژوهش پارامتریک را می توان به شرح زیر بیان نمود: بررسی کفایت برون مرکزی اتفاقی پیشنهاد شده توسط آیین نامههای طراحی لرزهای ...

3. Falamarz-Sheikhabadi M.R. 2014 Simplified relations for the application of rotational components to seismic design codes. *Engineering Structures*, 59, 141–152.

4. Hart G.C., DiJulio R.M. & Lew M. 1975 Torsional response of high-rise buildings. *Journal of the Structural Division*, 101, 397–415.

5. Bycroft G.N. 1980 Soil-foundation interaction and differential ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 8(5), 397–404.

6. Trifunac M.D., Todorovska M.I. & Ivanovic S.S. 1996 Peak velocities, and peak surface strains during Northridge, California earthquake of 17 January 1994. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 15(5), 301–310.

7. Newmark N.M. 1969 Torsion in symmetrical building. *Proceedings of the 4th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, Chile.*

8. Ghafory-Ashtiany M. & Singh M.P. 1986 Structural response for six correlated earthquake components. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 14(1), 103–119.

9. Falamarz-Sheikhabadi M.R. & Ghafory-Ashtiany M. 2012 Approximate formulas for rotational effects in earthquake engineering. *Journal of Seismology*, 16(4), 815–827.

10. Falamarz-Sheikhabadi M.R., Zerva A. & Ghafory-Ashtiany M. 2017 Revised Seismic Intensity Parameters for Middle-Field Horizontal and Rocking Strong Ground Motions. *Journal of Structural Engineering*, 143(1), 04016155,1–10.

11. Lee V.W. & Trifunac M.D. 1985 Torsional accelerograms. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 4(3), 132–139.

12. Lee V.W. & Trifunac M.D. 1987 Rocking strong earthquake accelerations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 6(2), 75–89.

13. Li H.N., Sun L.Y. & Wang S.Y. 2002 Frequency dispersion characteristics of phase velocities in surface wave for rotational components of seismic motion. *Journal of Sound and Vibration*, 258(5), 815–827.

14. Li H.N., Sun L.Y. & Wang S.Y. 2004 Improved approach for obtaining rotational components of seismic motion. *Nuclear Engineering and Design*, 232(2), 131–137.

15. Lee V.W. & Liang J. 2008 Rotational Components of Strong-motion Earthquakes. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October.*

تغییرمکان ساختمانهای سخت پیچشی بیشتر از نرم پیچشی است که این روند با افزایش نامتقارنی شدت مییابد.

۳- نامتقارنی تاثیر چندانی بر میزان رشد تغییرمکان ساختمان های سخت پیچشی ندارد و تنها سبب افزایش اندک رشد تغییرمکان در دوره تناوبهای بیشتر از ۱/۶ ثانیه میشود، درحالیکه از سوی دیگر منجر به کاهش رشد تغییرمکان ناشی از مولفه پیچشی در ساختمانهای نرم پیچشی میشود.

٤- مولفه پیچشی زلزله در مرکز دیافراگم ساختمانهای کاملا متقارن دوران ایجاد میکند که این دوران با افزایش دوره تناوب انتقالی روندی افزایشی دارد. کاهش مقدار Ω دوران را افزایش میدهد به شکلی که برای ساختمان نرم پیچشی با دوره تناوب ۲ ثانیه دورانی در حدود ۰/۰۰۷ رادیان تولید میشود. در مدلهای نامتقارن نیز مولفه پیچشی زلزله در بیشتر موارد باعث افزایش دوران میشود که این رشد دوران با افزایش خروج از مرکزیت کاهش مییابد.

٥- اعمال ٥ درصد برون مرکزی اتفاقی با روش فعلی پیشنهاد شده در استاندارد ۲۸۰۰ نمیتواند پاسخها را به میزان مولفه پیچشی زلزله افزایش دهد و از آنجا که سبب تغییر مشخصات دینامیکی سازه نیز میشود راه حل مناسبی برای شبیه سازی آثار مولفه پیچشی زلزله در سازه های ساختمانی نیست. ضعف برون مرکزی اتفاقی با افزایش دوره تناوب افزایش مییابد که برای ساختمان های سخت پیچشی چشمگیرتر است. افزایش نامتقارنی تاثیر چندانی بر عدم کفایت برون مرکزی اتفاقی در ساختمان های سخت پیچشی ندارد اما سبب بهبود نسبی عملکرد برون مرکزی اتفاقی در ساختمان های نرم پیچشی می شود.

References

7- مراجع

1. Kalkan E. & Graizer V. 2007 Coupled Tilt and Translational Ground Motion Response Spectra. *Journal of Structural Engineering*, 133(5), 609–619.

2. Trifunac M.D. 2009 The role of strong motion rotations in the response of structures near earthquake faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(2), 382–393.

مجله علمي – پژوهشي مهندسي عمران مدرس

effect on tall structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, 358–370.

27. Loghman V., Tajammolian H. & Khoshnoudian F. 2015 Effects of rotational components of earthquakes on seismic responses of triple concave friction pendulum baseisolated structures. *Journal of Vibration and Control*, 23(9), 1495–1517.

28. Tajammolian H., Khoshnoudian F. & Loghman V. 2017 Rotational components of near-fault earthquakes effects on triple concave friction pendulum baseisolated asymmetric structures. *Engineering Structures*, 142, 110–127.

29. Tajammolian H. & Khoshnoudian F. 2018 Acceleration amplification due to rotational components of near-fault earthquakes in triple concave friction pendulum base-isolated structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 45(4), 314–327.

30. Standard No. 2800 (Building and Housing Research Center) 2014 Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, 4th edition, Iran.

31. ASCE (American Society of Civil Engineers), ASCE/SEI 7–16. 2017: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. ASCE, Reston, Virginia, USA.

32. Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance – Part 1. 2004: General rules, seismic actions and rules for buildings, CEN. EN 1998-1.

33. NZS 1170.5, New Zealand Standard, Structural design actions – Part 5. 2004: Earthquake actions. Wellington, New Zealand.

34. NBCC (National Building Code of Canada -Volume 1), National Research Council of Canada, Ottawa, 2015.

35. Haj-Seiyed-Taghia S.A., Moghadam A.S. & Ghafory Ashtiany M. 2014 Seismic performance of torsionally stiff and flexible multi-story concentrically steel braced buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(2), 146-160.

36. PEER. 2015 OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation). PEER, University of California, Berkeley, CA, USA. See http://opensees.berkeley.edu.

37. Che W. & Luo Q. 2010 Time-frequency response spectrum of rotational ground motion and its application. *Earthquake Science*, 23(1), 71–77.

16. Basu D., Whittaker A.S. & Constantinou M.C. 2012 Estimating Rotational Components of Ground Motion Using Data Recorded at a Single Station, *Journal of Engineering Mechanics*, 138(9), 1141-1156.

17. Basu D., Whittaker A.S. & Constantinou M.C. 2012 Characterizing the rotational components of earthquake ground motion. *Technical Report MCEER-12-0005*. *Buffalo, New York, USA: State University of New York at Buffalo*.

18. Vicencio F. & Alexander N.A. 2019 A parametric study on the effect of rotational ground motions on building structural responses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 118, 191–206.

19. De La Llera J.C. & Chopra A.K. 1994 Accidental torsion in buildings due to base rotational excitation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 23(9), 1003–1021.

20. Shakib H. & Tohidi R.Z. 2002 Evaluation of accidental eccentricity in buildings due to rotational component of earthquake. *Journal of Earthquake Engineering*, 6(4), 431–45.

21. Ghayamghamian M.R., Nouri G.R., Igel H. & Tobita T. 2009 The effects of torsional ground motion on structural responses: code recommendation for accidental eccentricity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2B), 1261–1270.

22. Basu D., Constantinou M.C. & Whittaker S.A. 2014 An equivalent accidental eccentricity to account for the effects of torsional ground motion on structures. *Engineering Structures*, 69, 305–377.

23. Basu D., Whittaker S.A. & Constantinou M.C. 2015 Characterizing rotational components of earthquake ground motion using a surface distribution method and response of sample structures. *Engineering Structures*, 99, 685–707.

24. Teymoori E., Abbasi S. & Moradloo J. 2018 Seismic Analysis of Cylindrical Ground Liquid Storage Tanks Incorporating the Effects of Rotational Components of Earthquake. *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)*, 18(4), 251–264. (In Persian)

25. Özşahin E. & Pekcan G. 2019 Effect of torsional ground motion on the seismic response of highway bridges. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(5), 2603–2625.

26. Bońkowski P.A., Zembaty Z. & Minch M.Y. 2019 Engineering analysis of strong ground rocking and its

Investigating the Adequacy of Accidental Eccentricity Recommended by Seismic Design Codes to Consider the Effects of Earthquake Rotational Components in Nonlinear Dynamic Analysis

Saman Rahat Dahmardeh¹, Mehrtash Motamedi^{2*}, Armin Aziminejad³

1- PhD Graduate, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Research Associate & Earthquake Lab Manager, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

*mmotamedi@civil.ubc.ca

Abstract:

Due to the lack of access to the data of three rotational components of earthquakes, seismic analysis of new buildings as well as assessment of the vulnerability of existing structures are usually carried out only by applying the translational components of earthquakes. Iranian Standard 2800 proposed an accidental eccentricity for considering the earthquake rotational component effect in the seismic analysis of building structures. The present investigation is focused on the effects of earthquake rotational excitation on the seismic response of buildings having various dynamic properties which situated on a rigid foundation. In addition, adequacy of the accidental eccentricity of 5% recommended by seismic design code for inclusion of the earthquake rotational component impact in the non-linear time history analysis of buildings is studied, as well. To achieve this, a large number of one-story torsionally stiff and flexible building models with a wide range of lateral vibration periods (T=0.05 to 2sec) and three different values of inherent eccentricity of 0, 15 and 25% were modeled. These models were once excited by the translational components of ground motions and once again by both translational and rotational components of ground motions. The building models were re-analyzed after applying the 5% accidental eccentricity based on the procedure presented by Standard 2800 (shifting the center of mass in the negative and positive directions by 0.05 of the plan dimension). For conducting the non-linear time history analyses, a number of earthquakes were selected and the rotational records for these events were generated by use of an indirect single station method based on the seismic wave propagation in an elastic and homogeneous medium. In total, over than 2600 nonlinear dynamic analyses have been conducted in this numerical research. In order to determine the role of earthquake rotational excitation in the seismic behavior of buildings, the variations of displacement response for the left and right sides of diaphragm and the torsion of diaphragm about the mass center due to the effect of rotational component were evaluated. By comparing the results obtained in this study, it is found that the rotational component has a substantial influence on the structural responses, which this effect is a function of the fundamental dynamic characteristics of system such as uncoupled rotational to translational frequency ratio, lateral vibration period and irregularity. The displacement of diaphragm can be increased up to 50% when the rotational component of ground motion is included in the seismic load combinations. Decreasing the frequency ratio leads to increase of the rotational component effect for the stiff buildings with short periods, while in the other cases reduces the growth of displacement due to the rotational component. Furthermore, results indicate that the accidental eccentricity of 5% cannot increase the seismic responses as much as the earthquake rotational motion, and leads to unreal and underestimate results for the most of lateral vibration periods. Thus, the current Standard 2800 approach cannot be considered as an appropriate alternative for considering the accidental torsion induced by the rotational component of ground motion, and it seems that this approach needs to be re-evaluated.

Keywords: Earthquake rotational excitation, Seismic analysis, Torsionally stiff building, Torsionally flexible building, Accidental eccentricity.