

بررسی نیازهای لرزه‌ی سازه‌های با جداگر لرزه‌ی در اثر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک پالس‌گونه

محمود رضا شیراوند* (استادیار)

مجید یارنیا (دانشجوی دکتری)

رضا راستی (استادیار)

پویا زرپور (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۶
دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۱۲-۳

امروزه استفاده از جداگر لرزه‌ی به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر زلزله به سرعت در حال افزایش است، به طوری که در سال‌های اخیر در ایران، مطالعات بسیاری بر روی آن انجام شده و نتایج آن به صورت دستورالعمل طراحی ساختمان‌های با جداساز لرزه‌ی به چاپ رسیده است. اما در آیین‌نامه‌ی مذکور به اثرات زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک در نیازهای لرزه‌ی اشاره‌ی نشده است. زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک به دلیل ماهیت تخریبی شدید، اهمیت خاصی دارند؛ به گونه‌ی که مطالعات وسیعی بر روی این نوع رکوردها و تأثیر آنها در سازه‌های مختلف انجام شده است. در نوشتار حاضر، به بررسی نیازهای لرزه‌ی ساختمان‌های با جداگر پرداخته شده است. در سازه‌های مورد بررسی، اثر زلزله‌های مزبور در نیازهای لرزه‌ی مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهایی همانند جابه‌جایی بین‌طبقه‌ی، توزیع نیروی زلزله در ارتفاع و تغییر مکان در جداگرهای لرزه‌ی مورد مطالعه و بحث قرار گرفته و با روش و مقادیر پیشنهادی در آیین‌نامه مقایسه شده است.

واژگان کلیدی: جداگر لرزه‌ی، حوزه‌ی نزدیک، پالس‌گونه، دینامیکی غیرخطی، استاتیکی معادل.

۱. مقدمه

در ناحیه‌ی نزدیک گسل، گسیختگی در راستای یک ساخت‌گاه می‌تواند باعث به وجود آمدن زلزله‌های پالس‌گونه شود، که بخش اعظمی از انرژی لرزش مربوط به ۱ یا ۲ سیکل بزرگ در تاریخچه‌ی سرعت است. مشخصات و پتانسیل خرابی این نوع از حرکات زمین، اساساً با حرکات عادی زمین متفاوت است. این نوع زمین‌لرزه‌ها براساس پالس موجود در تاریخچه‌ی زمانی سرعت در جهت عمود بر راستای گسل توصیف می‌شوند و معمولاً در محلی رخ می‌دهند که در فاصله‌ی کمی نسبت به گسل قرار دارند. شناخت درست اثر این نوع لرزه‌ها در سازه‌ها بسیار مهم است. سوابق گذشته نشان می‌دهد که خسارت‌های ناشی از این نوع زمین‌لرزه‌ها بسیار زیاد است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های زلزله‌های پالس‌گونه، دوره‌تناوب متناظر با پالس سرعت است، که به صورت TP نشان داده می‌شود و براساس مطالعات انجام‌شده، می‌توان آن را با تقریب خوبی دوره‌تناوبی دانست که طیف پاسخ سرعت را به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رساند.^[۱،۲]

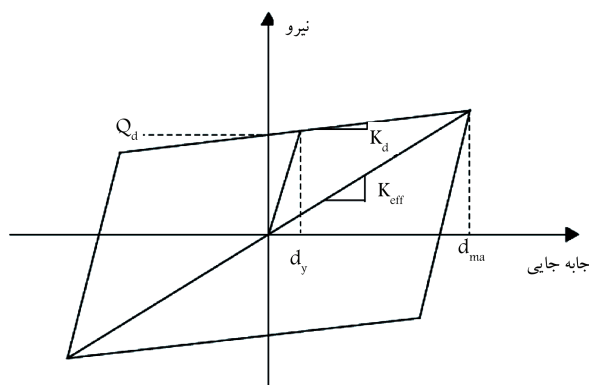
در سال‌های اخیر، رکوردهای به دست آمده از گسل‌های حوزه‌ی نزدیک باعث مطرح شدن مسائل جدیدی در باره‌ی کارایی جداگرهای لرزه‌ی مورد استفاده در سازه‌های ساخته‌شده در حوزه‌ی نزدیک زلزله شده‌اند. از نظر طراحی در آیین‌نامه‌ی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۹/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۴/۸/۲۳، پذیرش ۱۳۹۴/۱۰/۵.

UBC۱۹۹۷، تأثیر بسیار زیادی که این رکوردها در محاسبه‌ی جداگرهای لرزه‌ی در سازه‌های نزدیک به گسل‌ها دارند، به دلیل ماهیت پالس‌گونه‌ی زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، ساختمان‌ها وارد ناحیه‌ی دوره‌تناوب بلند^۱ شده‌اند، که این امر منجر به ایجاد تغییرمکان‌های بزرگ برای سیستم جداگر می‌شود، بر همین اساس به ناچار باید از جداگرهای با قطر بزرگ‌تر استفاده کرد. به عنوان مثال، در کشور ژاپن تمام ساختمان‌های ۱۰ تا ۱۳ طبقه بر روی جداسازهایی با قطری بالغ بر ۱٫۵ متر قرار گرفته‌اند، که از نظر اقتصادی مناسب نیست.^[۳] درخصوص اثر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک در سازه‌های با جداگر لرزه‌ی، دیدگاه‌های مختلفی وجود دارد. در زلزله‌های مذکور، حرکت زمین عمود بر راستای گسل در دوره‌تناوب‌های بلند، مقادیر طیفی بیشتری نسبت به حرکت زمین موازی با خط گسل دارد.^[۳]

زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک به دلیل پالس‌های طولانی موجود به شدت سیستم‌های با جداگرهای لرزه‌ی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این پالس‌ها می‌توانند باعث تغییرمکان‌های بزرگی در جداگرها شوند که دوره‌تناوب‌هایی نزدیک به آن‌ها دارند.^[۴] در سال ۲۰۱۰،^[۴] به بررسی کارایی روش استاتیکی معادل در برآورد تغییرمکان سیستم جداساز در سازه‌های با جداگر لرزه‌ی پرداخته و از روش ارائه‌شده در دستورالعمل ASCE۷-۰۵،^[۵] استفاده شده است و ۲ دسته زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک و دور، مورد بررسی قرار گرفته و این نتیجه به دست آمده است که روش استاتیکی معادل



شکل ۱. نمایش رفتار غیرکشسان چندخطی جداگر لرزه‌یی.

میرایی مؤثر (β_{eff}) نیاز است. این مقادیر براساس معادلات ۱ و ۲ به دست می‌آیند:

$$k_{eff} = \frac{Q_d}{d_{max}} + k_r \quad (1)$$

$$\beta_{eff} = \frac{4Q_d(d_{max} - d_y)}{2\pi k_{eff} d_{max}} \quad (2)$$

که در آن‌ها، D تغییرمکان بیشینه، D_y تغییرمکان تسلیم، K_r سختی ناحیه‌ی غیرکشسان و Q_d مقاومت مشخصه‌ی تسلیم سیستم جداگر لرزه‌یی هستند. تغییرمکان سیستم جداگر لرزه‌یی از طیف طراحی و براساس دوره تناوب سازه با جداگر لرزه و میرایی مؤثر به دست می‌آید. در پژوهشی در سال ۲۰۱۰^[۱۱]، دوره تناوب سازه با جداگر لرزه‌یی به صورت رابطه‌ی ۳ تعریف شده است:

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{eff} g}} \quad (3)$$

که در آن W و k_{eff} به ترتیب وزن مؤثر و سختی مؤثر سازه در زمان زلزله و پارامتر g نیز شتاب گرانش زمین است. همچنین برای در نظر گرفتن اثر افزایش میرایی از ضریب B_1 استفاده می‌شود و در نتیجه، تغییرمکان سیستم جداگر لرزه‌یی به صورت معادله‌ی ۴ به دست می‌آید:

$$D = \frac{g S_a T_D^2}{4\pi^2 B_1} \quad (4)$$

که در آن، D تغییرمکان جداگر لرزه‌یی، g شتاب گرانش زمین، S_a شتاب طیفی طرح، T_D زمان تناوب طراحی هستند. در فرایند طراحی با در نظر گرفتن دوره تناوب سازه با جداگر لرزه‌یی با استفاده از رابطه‌ی ۳، سختی مؤثر آن محاسبه می‌شود. سپس از رابطه‌ی ۴ و فرض اولیه‌ی میرایی مؤثر جداگر لرزه‌یی، تغییرمکان طراحی با استفاده از طیف طراحی محاسبه می‌شود. با در نظر گرفتن مقدار Q برحسب درصدی از وزن سازه (W)، سختی ثانویه از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید. معمولاً در ابتدا نسبت سختی ثانویه به اولیه ۰/۸ در نظر گرفته می‌شود، که برای جداگرهای الاستومتر با هسته‌ی سربی مقدار قابل قبولی است. سپس مقدار تغییرمکان تسلیم و میرایی مؤثر از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که مقادیر به دست آمده در ۲ تکرار به یکدیگر نزدیک باشند.

۳. انتخاب رکوردهای مورد استفاده در تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی

در پژوهش حاضر از ۳۵ رکورد زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک پالس‌گونه‌ی عمود و موازی

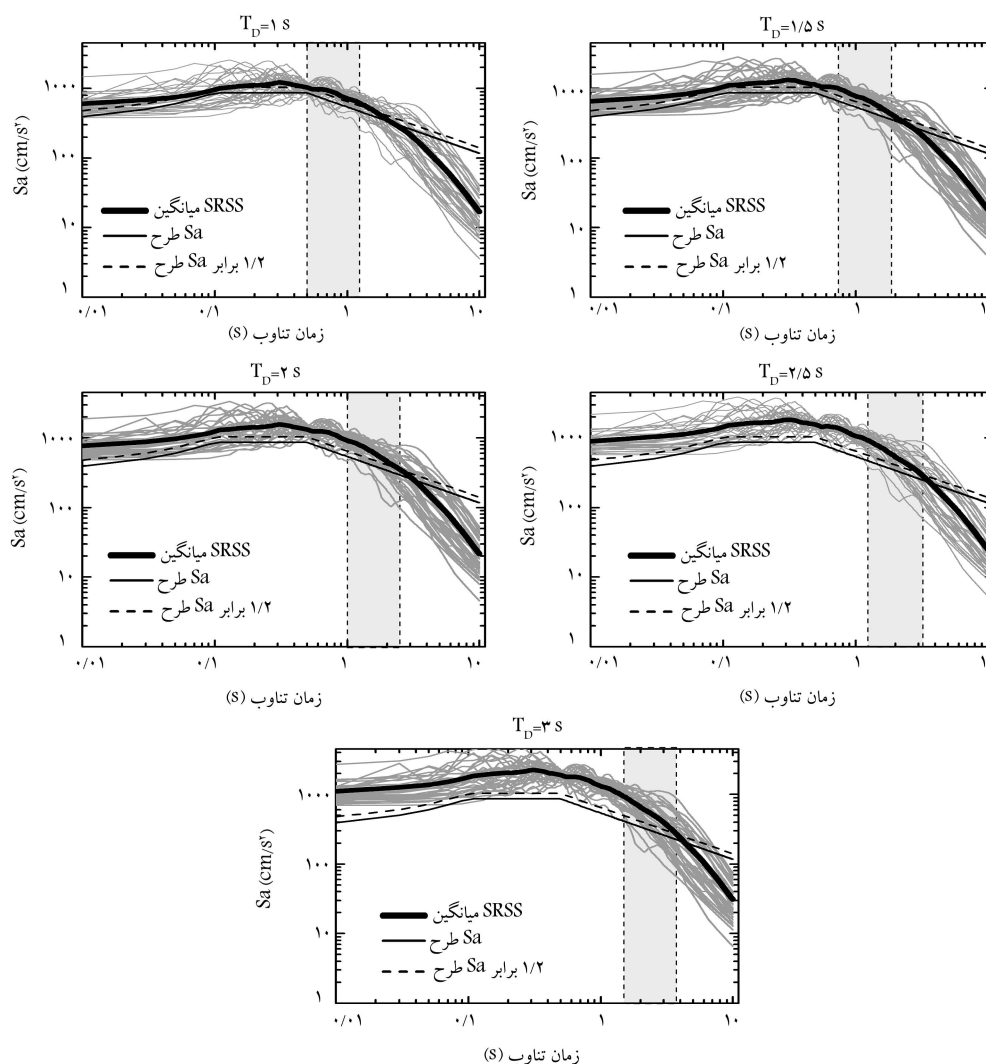
ارائه شده در آیین‌نامه‌ی مذکور برای برآورد تغییرمکان جداساز لرزه‌یی مناسب است. همچنین در ایران (۱۳۹۱) به بررسی قابلیت‌های دستورالعمل طراحی ساختمان‌های جداساز لرزه‌یی در برآورد نیازهای لرزه‌یی سازه‌های با جداگر لرزه‌یی تحت اثر زلزله‌های پالس‌گونه پرداخته شده، و از مدل‌های ۲ بعدی و بدون در نظر گرفتن اثر تحریک چندمؤلفه‌یی استفاده شده و این نتیجه به دست آمده است که مقادیر به دست آمده از روش استاتیکی معادل در برآورد تغییرمکان جداساز کمتر از مقادیر حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت زلزله‌های پالس‌گونه است.^[۶]

در سال‌های اخیر، نیز مطالعات بسیاری در خصوص رفتار سازه‌های با جداگر لرزه‌یی و ارزیابی نیاز لرزه‌یی این‌گونه سازه‌ها صورت گرفته است. برای مثال، اثر پارامترهای مختلف مرتبط با جداگر لرزه‌یی در پیش‌بینی نیاز لرزه‌یی روسازه مورد بررسی قرار گرفته است.^[۷] همچنین نیاز لرزه‌یی سازه‌ها با توجه به مشخصات غیرارتجاعی تکیه‌گاه‌های با جداساز لرزه‌یی مورد ارزیابی قرار گرفته است.^[۸] اثر میزان خرابی نیز با توجه به افزایش ارتفاع ساختمان در سازه‌های با جداگر بررسی و نشان داده شده است که مقادیر کم سختی ثانویه (سختی لاستیک در تکیه‌گاه هسته‌ی سربی) و افزایش خواص مقاومتی جداگرها، باعث کاهش نیازهای لرزه‌یی می‌شود.^[۹] همچنین در خصوص رفتار سازه‌های نامنظم با جداگر لرزه‌یی مطالعاتی انجام و نشان داده شده است که یک آنالیز دینامیکی ساده‌شده‌ی خطی فقط برای تخمین تقریبی مقادیر پاسخ از قبیل تغییرمکان جداساز و برش پایه‌ی سازه کاربرد دارد، که می‌توان از آن فقط در طراحی اولیه استفاده کرد، ولی این روش برای پیش‌بینی رفتار واقعی سازه‌های مذکور کفایت نمی‌کند.^[۱۰]

در مطالعه‌ی حاضر، با توجه به ماهیت متفاوت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک به بررسی نیازهای لرزه‌یی، که در اثر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک پالس‌گونه به صورت چندمؤلفه‌یی بر ساختمان‌های با جداگر اعمال می‌شود، پرداخته شده و پارامترهایی نظیر: تغییرمکان بیشینه در جداگر، جابه‌جایی نسبی طبقات،^۲ و توزیع نیروی زلزله مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. به علاوه نشان داده شده است تا چه مقدار روش استاتیکی معادل موجود در دستورالعمل طراحی سازه‌های با جداساز لرزه‌یی،^[۱۱] برای طراحی سازه‌های با جداگر لرزه‌یی که در معرض زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک پالس‌گونه قرار دارند، کاراست. با توجه به اینکه در دستورالعمل طراحی سازه‌های با جداساز لرزه‌یی،^[۱۱] به صورت صریح به اثرات زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک پالس‌گونه و راهکاری برای در نظر گرفتن اثرات مذکور ارائه نشده است، لذا در پژوهش حاضر نشان داده شده است که این دسته از زلزله‌ها می‌توانند تأثیرات به‌سزایی در پاسخ سازه‌های با جداساز لرزه‌یی داشته باشند و دستورالعمل مذکور نیازمند اعمال تغییرات و بازنگری مجدد در این خصوص است.

۲. مشخصات سیستم جداگر لرزه‌یی

سیستم جداگر مورد استفاده در پژوهش حاضر از نوع الاستومری با هسته‌ی سربی است و رفتار آن به صورت غیرکشسان چندخطی مدل شده است (شکل ۱). برای مدل‌سازی جداگرها، به پارامترهای: سختی مؤثر (K_{eff})، سختی اولیه (K_1)، نیروی تسلیم (Q_d) و نسبت سختی ثانویه به سختی اولیه (η) مورد نیاز است.^[۱۲، ۱۳] اندازه‌گیری سختی اولیه (K_1) دشوار است و معمولاً به صورت یک ضریب تجربی از سختی ثانویه (K_d) (سختی پس از تسلیم) در نظر گرفته می‌شود. هر یک از مقادیر ذکر شده براساس زمان تناوب در نظر گرفته شده برای سازه با جداگر لرزه‌یی به دست آمده است. در روش استاتیکی معادل به پارامترهای سختی مؤثر (K_{eff}) و



شکل ۲. طیف پاسخ رکوردهای مقیاس شده برای زلزله های انتخاب شده.

پاسخ در دوره ی تناوب T_i است. برای کمینه ساختن مقدار ε باید مشتق رابطه ی ۵ نسبت به ضریب مقیاس a برابر صفر شود، لذا مقدار a به صورت رابطه ی ۶ به دست می آید:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n b_i y_i y_{T_i}}{\sum_{i=1}^n b_i y_i^2} \quad (6)$$

مقادیر ضریب مقیاس براساس ۶ دوره ی تناوب ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴ و ضرایب وزنی به ترتیب ۰/۶، ۰/۶، ۰/۶، ۰/۲، ۰/۲ و ۰/۲ محاسبه شده اند. در بخش دوم، متوسط طیف مربوط به جذر مجموع مربعات رکوردهای انتخابی در محدوده ی زمان تناوب های $0.5T_D$ و $1.5T_D$ با طیف طراحی مقایسه شده است. در این محدوده مقادیر میانگین نباید کمتر از ۱/۲ برابر مقدار نظیر آن در طیف طراحی باشند. در انتها، ضریب مقیاس از ضرب دو ضریب به دست آمده در دو بخش به دست آمده است. در پیوست (جدول پ ۱)، مشخصات مربوط به زلزله های انتخابی و مقادیر ضریب مقیاس ارائه شده است. در شکل ۲، طیف پاسخ رکوردهای انتخاب شده پس از مقیاس کردن نشان داده شده و در هر شکل آن، محدوده ی طیف پاسخ رکوردهای زلزله با طیف طراحی مقایسه شده است.

راستای گسل مسبب براساس مطالعات بیکرانتهاب شده اند. [۱۴] مشخصات رکوردهای انتخاب شده در پیوست (جدول پ ۱) ارائه شده است. رکوردهای انتخاب شده، دست کم در یکی از مؤلفه های عمود و یا موازی راستای گسل، جزء زلزله های حوزه ی نزدیک پالس گونه به حساب می آیند. برای مقیاس کردن رکوردها، هر یک از مؤلفه های افقی ثبت شده به مؤلفه های عمود و موازی راستای گسل دوران و (به صورتی که در ادامه توضیح داده شده است) مقیاس شده اند. [۴]

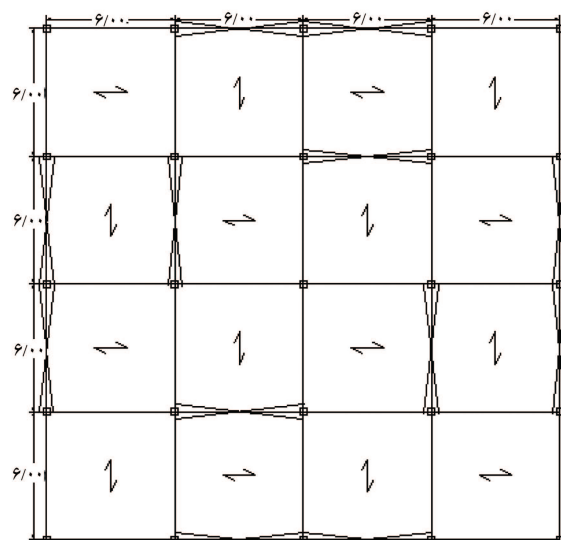
در ابتدا، طیف پاسخ شتاب مربوط به هر یک از مؤلفه های افقی ثبت شده به دست آمده و با استفاده از روش جذر مجموع مربعات SRSS، طیف پاسخ محاسبه شده است. مقیاس کردن شتاب نگاشت های انتخابی شامل دو بخش می شوند: در بخش اول، ابتدا ضریب مقیاس هر یک از رکوردها به گونه یی انتخاب شده است که خطای وزنی بین SRSS دو مؤلفه و طیف طراحی در نقاط طیفی هدف کمینه شود (رابطه ی ۵):

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n b_i (a y_i - y_{T_i})^2 \quad (5)$$

که در آن، b_i ضریب وزنی برای مربع خطا در دوره ی تناوب T_i ، ضریب مقیاس برای هر دسته رکورد، y_i جذر مجموع مربع هر دسته رکورد در دوره ی تناوب T_i و y_{T_i} مقدار طیف

۴. سازه‌های مورد استفاده در تحلیل

۴ گروه سازه‌ی ۳، ۵، ۷ و ۱۰ طبقه با جداگر لرزه‌ی در نظر گرفته شده است. پلان ساختمان‌ها در شکل ۳ نمایش داده شده است. فاصله‌ی دهانه‌ها ۶ متر و ارتفاع طبقات ۳ متر فرض شده است. سازه‌ها به صورت سه‌بعدی مدل شده و رفتار رو سازه در سیستم‌های با جداگر لرزه‌ی در زمان زلزله، کشسان فرض شده است. ساختمان‌ها برای ۵ دوره تناوب مختلف در حالت با جداگر مورد طراحی قرار گرفته‌اند. دوره تناوب‌های انتخابی در حالت با جداگر ۱، ۱٫۵، ۲، ۲٫۵ و ۳ ثانیه در نظر گرفته شده است. سازه‌ها از نوع فولادی و سیستم باربر جانبی آن‌ها از نوع مهاربند هم‌محور است و بر مبنای دستورالعمل طراحی ساختمان‌های با جداساز لرزه‌ی ایران تحلیل شده است.^[۱۱] پارامترهای لرزه‌ی سازه‌ها براساس خاک نوع دوم و منطقه با لرزه‌خیزی خیلی زیاد در نظر گرفته شده است.^[۱۵] طراحی اعضا براساس آیین‌نامه‌ی AISC-LRFD صورت گرفته است.^[۱۶] فولاد مصرفی با تنش تسلیم 2400 kg/cm^2 و بار مرده و زنده‌ی گسترده به ترتیب ۴۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است. برای تحلیل سازه‌ها از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. در تحلیل‌ها اثر $P - \Delta$ نیز در نظر گرفته شده است. سیستم جداگر با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش ۲ مدل‌سازی شده است. میرایی سیستم رو سازه به صورت میرایی رایلی در نظر گرفته شده است. نسبت میرایی برای مدهای اول و سوم، ۳٪ انتخاب شده است. انتخاب مقدار کم از این رو صورت گرفته است که رفتار رو سازه کشسان فرض شده و مدهای انتخابی مربوط به مدهای جداگر بوده است. با توجه به آنکه روسازه کشسان باقی مانده است و ارتعاش نسبتاً کمی دارد، انتخاب میرایی کمتر از ۵٪ مورد قبول و قابل توجیه خواهد بود. هر یک از سازه‌ها برای هر دو امتداد اصلی (x و y) به طور هم‌زمان مورد تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی قرار گرفته‌اند. در همه‌ی سازه‌ها، مؤلفه‌ی عمود بر راستای گسلش در امتداد محور x و مؤلفه‌ی موازی با راستای گسلش در امتداد محور y اعمال شده‌اند. این عمل از آن رو انجام شده است که اثر جهت‌داری زلزله‌ی ۳ در امتداد عمود برگسل زیادتر از امتداد دور از گسل است.



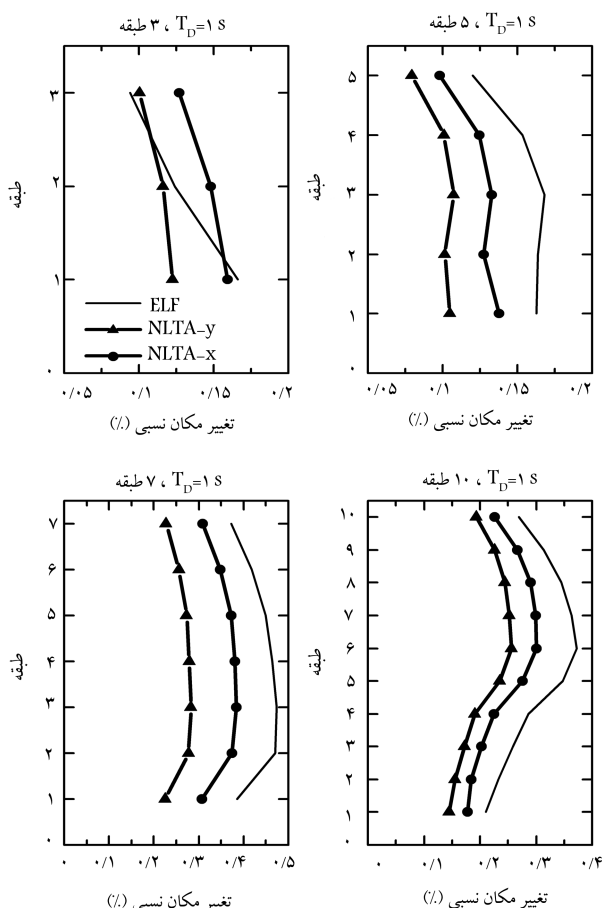
شکل ۳. نمایش پلان مدل.

۵. نتایج تحلیل

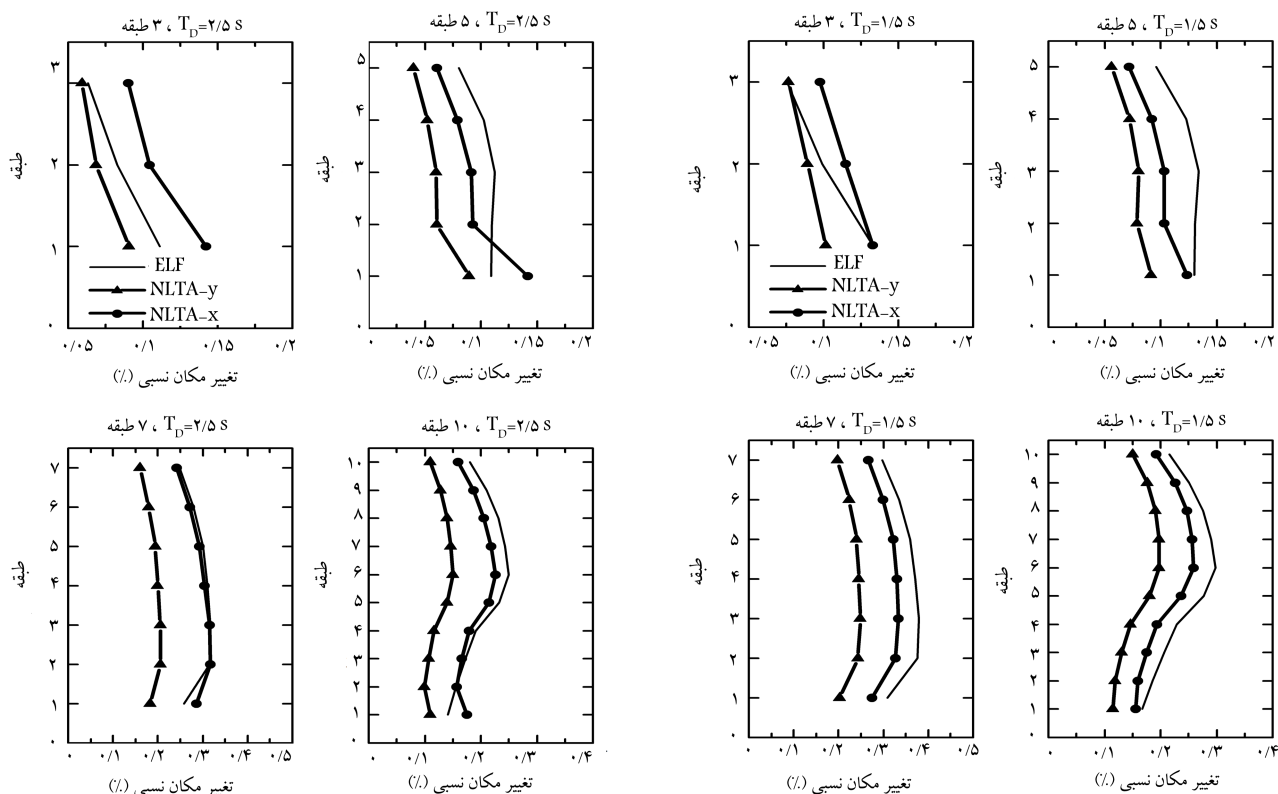
۱.۵. تغییرمکان نسبی طبقات

مقادیر تغییرمکان نسبی به دست آمده از روش استاتیکی معادل و تحلیل‌های دینامیکی صورت گرفته تحت اثر زلزله‌های پالس‌گونه‌ی حوزه‌ی نزدیک در شکل‌های ۴ الی ۸ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان به چند نکته اشاره کرد: در سازه‌های کوتاه مرتبه (۳ طبقه)، نتایج حاصل از روش استاتیکی معادل مقادیر تغییرمکان نسبی طبقات را کم برآورد کرده است. اما در ساختمان‌های میان مرتبه (۵، ۷ و ۱۰ طبقه) مقادیر به دست آمده در دوره تناوب‌های کم (دوره تناوب‌های ۱، ۱٫۵ و ۲ ثانیه) نسبت به نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه‌ی زمانی، برآورد محافظه‌کارانه‌ی داشته است. در سازه‌های میان مرتبه در دوره تناوب‌های کم، روند تغییرات تغییرمکان نسبی طبقات در روش‌های استاتیکی و دینامیکی تا حدود زیادی به یکدیگر شباهت دارند، اما با افزایش دوره تناوب در طبقات پایین، نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی بیش از نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی معادل بوده است.

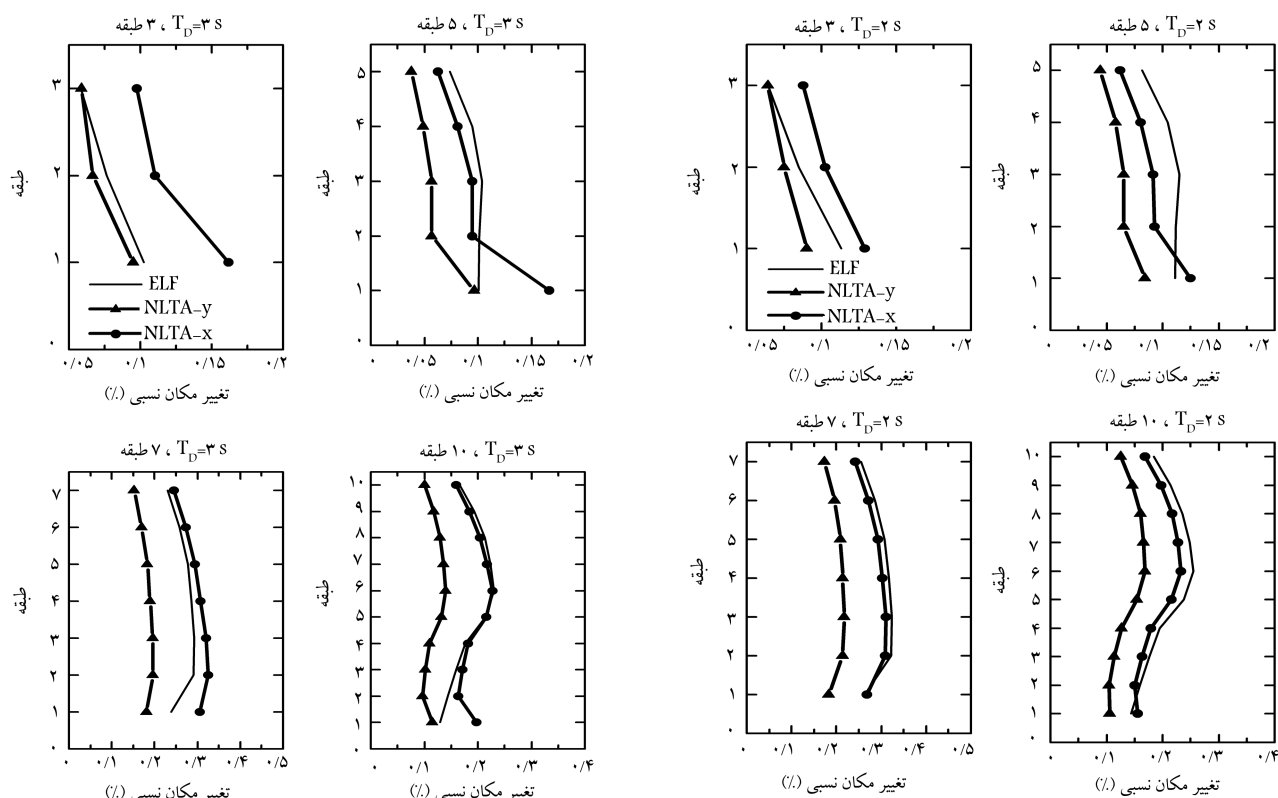
همان‌طور که در بخش‌های قبل توضیح داده شده است، با توجه به شکل‌های ۴ الی ۸ می‌توان مشاهده کرد که مقادیر تغییرمکان نسبی طبقات در امتداد عمود بر راستای گسلش (در امتداد محور x) به مقدار قابل توجهی از مقادیر حاصل از مؤلفه‌ی موازی با امتداد گسلش (در امتداد محور y) بیشتر است.



شکل ۴. تغییرات تغییرمکان نسبی طبقات در سازه‌های با جداگر لرزه‌ی با دوره تناوب ۱ ثانیه.



شکل ۵. تغییرات تغییر مکان نسبی طبقات در سازه‌های با جداگر لرزه‌یی با دوره تناوب ۱/۵ ثانیه.



شکل ۶. تغییرات تغییر مکان نسبی طبقات در سازه‌های با جداگر لرزه‌یی با دوره تناوب ۲ ثانیه.

۲.۵. تغییرات برش پایه و نیروی زلزله

به منظور طراحی سازه‌های با پایه گیردار (بدون جداگر لرزه‌یی) در برابر زلزله، آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌ها به طور گسترده‌یی استفاده از روش بارگذاری استاتیکی معادل را مجاز دانسته‌اند. اما در دستورالعمل‌های تحلیل و طراحی سازه‌ها با جداگر لرزه‌یی، استفاده از روش استاتیکی معادل به میزان بسیار زیادی محدود شده است. لذا در روند طراحی سازه‌های با جداگر لرزه‌یی بیشتر از تحلیل دینامیکی مودال و یا تحلیل دینامیکی تاریخیچه‌ی زمانی استفاده می‌شود. برای استفاده از روش مودی، ضوابطی در دستورالعمل‌های ASCE 41-13^[۱۷]، ASCE 7-10^[۱۸] و FEMA P-751^[۱۹] ارائه شده است، که در انتخاب سازه‌های مورد تحلیل مدنظر قرار گرفته‌اند. در دستورالعمل‌های مذکور، روش استاتیکی معادل برای سازه‌های با جداگر لرزه‌یی (با تعداد طبقات کمتر از ۴ و دوره تناوب کمتر از ۳ ثانیه)، به دلیل دقیق نبودن برای آن‌ها محدود شده است. در صورتی‌که بتوان روش استاتیکی معادل را همانند آنچه در روند طراحی سازه‌های با پایه گیردار به کار برده می‌شود، بهبود بخشید، می‌توان از روش ساده‌ی مذکور، که در مقایسه با روش‌های دیگر زمان و هزینه‌ی کمتری را صرف می‌کند، استفاده‌ی بیشتری کرد.^[۲۰]

یکی از مراحل مهم در روش استاتیکی معادل، توزیع نیروی زلزله در ارتفاع روسازه است. طبق دستورالعمل طراحی ساختمان‌ها با جداساز لرزه‌یی^[۱۱] نیروی زلزله به صورت رابطه‌ی ۷ توزیع می‌شود:

$$F_i = V \frac{W_i h_i}{\sum_{j=1}^n W_j h_j} \quad (7)$$

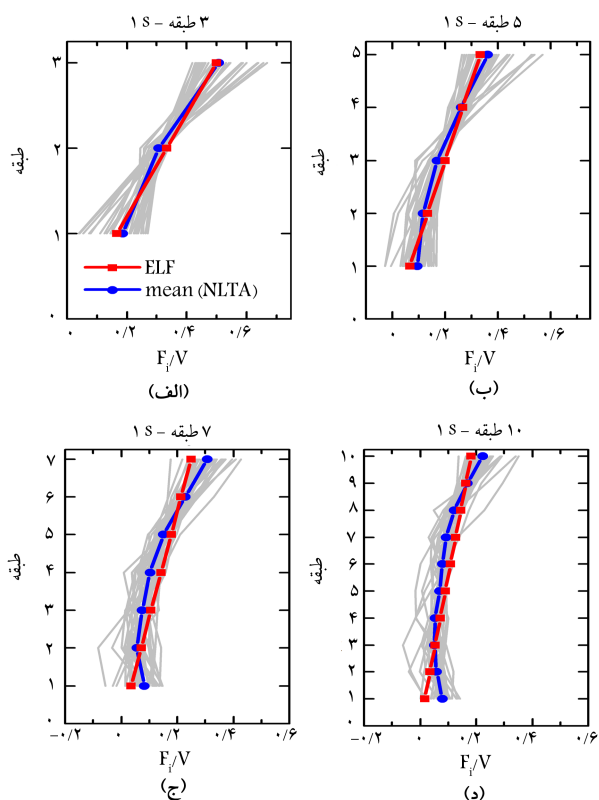
که در آن، F_i نیروی طبقه‌ی i ، V برش پایه‌ی روسازه، W_i وزن مؤثر طبقه‌ی i ، h_i ارتفاع تراز i ام است. براساس مفاهیم اولیه، در سازه‌ها با جداگر لرزه‌یی به نظر می‌رسد که توزیع نیروی زلزله باید به صورت یکنواخت در ارتفاع ساختمان توزیع شود، اما برای درنظر گرفتن مشارکت مدهای بالاتر به دلیل رفتار غیرخطی سیستم جداگر، توزیع نیروی زلزله به صورت مثلی در نظر گرفته شده است. با توجه به توضیحات ارائه‌شده، در این بخش به بررسی رابطه‌ی ۷ پرداخته و میزان دقت و صحت فرض انجام‌شده مورد سنجش قرار گرفته است. براساس تعریف برش طبقه، برش در طبقه‌ی i (V_i) به صورت جمع نیروها در طبقات تعریف می‌شود (رابطه‌ی ۸):

$$V_i = \sum_{j=i}^n F_j \quad (8)$$

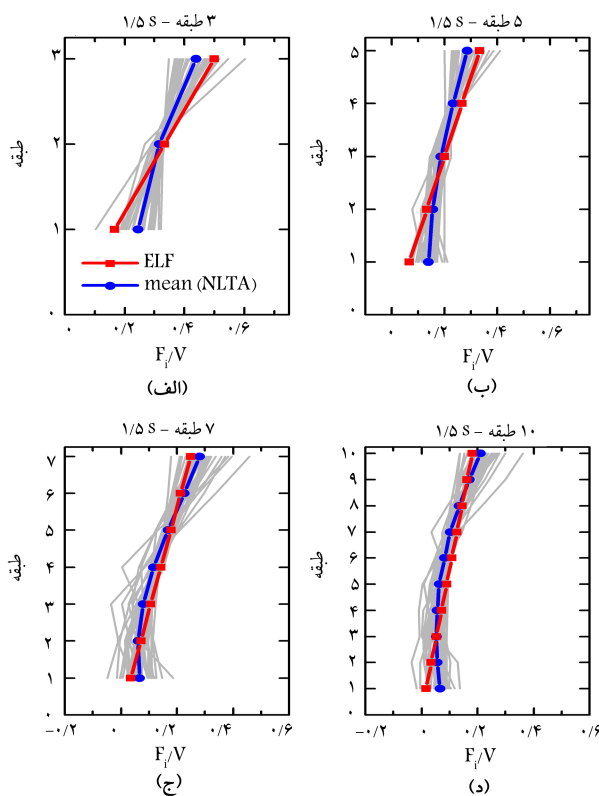
بنابراین نیروی هر طبقه را می‌توان به صورت اختلاف برش طبقه‌ی موردنظر و طبقه‌ی بالای آن به صورت رابطه‌ی ۹ تعریف کرد:

$$F_i = V_i - V_{i+1} \quad (9)$$

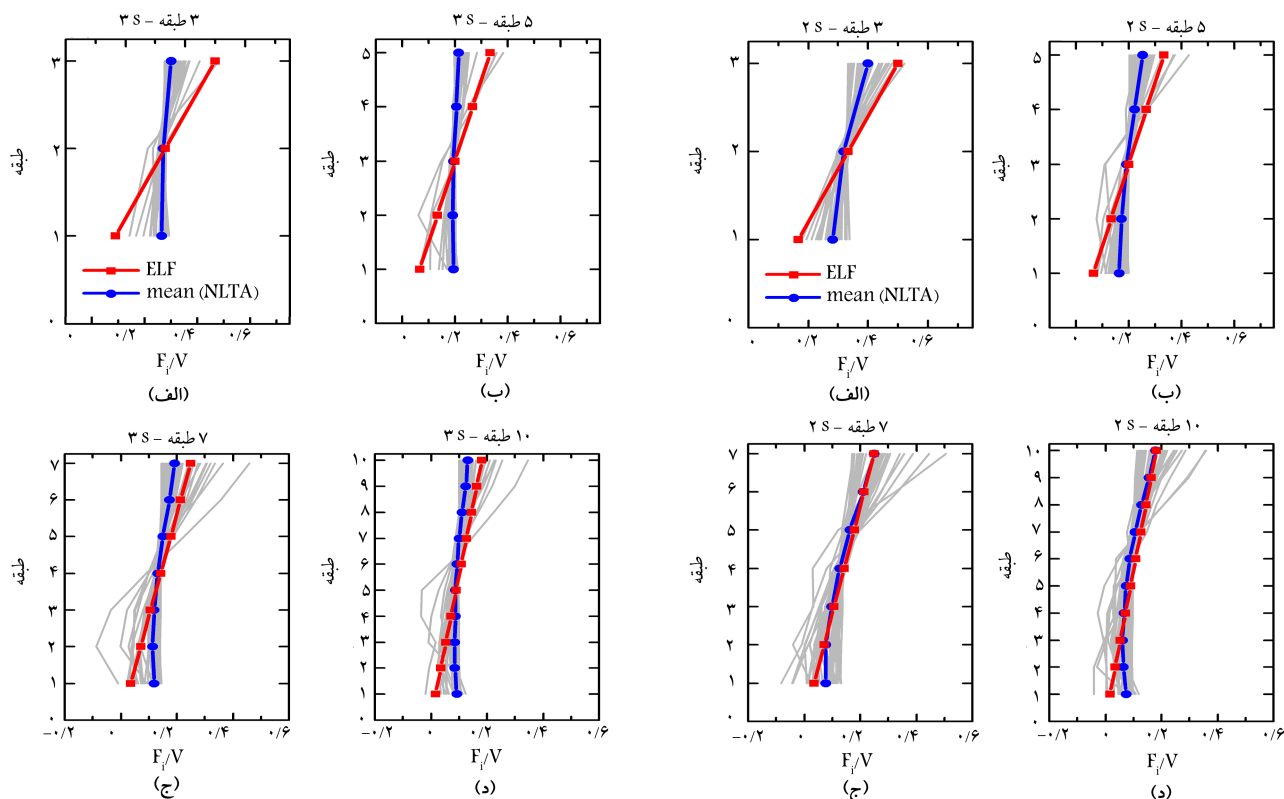
با توجه به اینکه در پژوهش حاضر، هدف نحوه‌ی توزیع نیروی زلزله است نه مقدار آن؛ برای مقایسه از نسبت نیروی زلزله‌ی طبقه‌ی F_i به برش پایه‌ی V استفاده شده است. در شکل‌های ۹ الی ۱۳ نتایج مربوط به تحلیل‌های تاریخیچه‌ی زمانی و روش استاتیکی معادل ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در دوره تناوب ۱ ثانیه در سازه‌های ۳ و ۵ طبقه، توزیع نیروی حاصل از روش استاتیکی و تاریخیچه‌ی زمانی تقریباً به یکدیگر نزدیک و به صورت خطی هستند، اما در سازه‌های ۷ و ۱۰ طبقه، نتیجه‌ی حاصل از روش تاریخیچه‌ی زمانی دیگر خطی نیست؛ یا به عبارتی دیگر،



شکل ۹. تغییرات توزیع نیروی زلزله در طبقات در سازه‌های با جداگر لرزه‌یی با دوره تناوب ۱ ثانیه.



شکل ۱۰. تغییرات توزیع نیروی زلزله در طبقات در سازه‌های با جداگر لرزه‌یی با دوره تناوب ۱/۵ ثانیه.



شکل ۱۱. تغییرات توزیع نیروی زلزله در طبقات در سازه‌های با جداگر لرزه‌یی با دوره تناوب ۲ ثانیه.

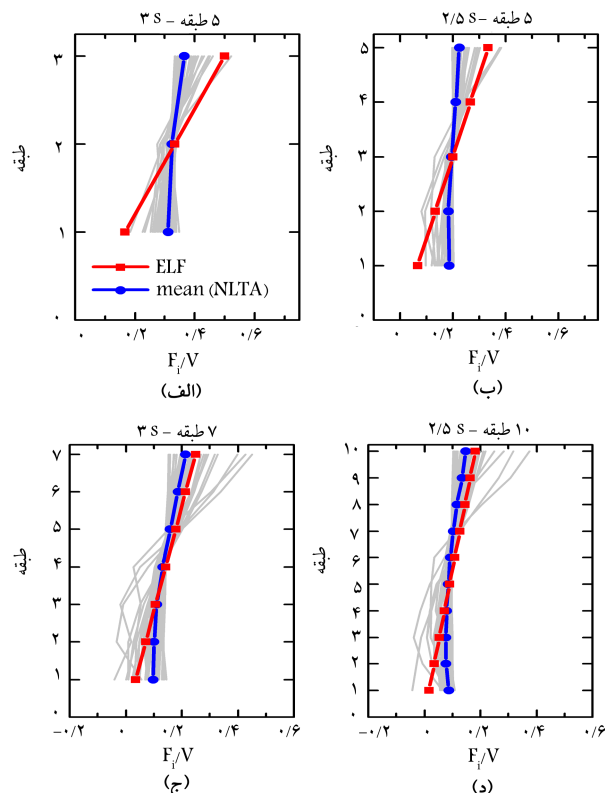
شکل ۱۳. تغییرات توزیع نیروی زلزله در طبقات در سازه‌های با جداگر لرزه‌یی با دوره تناوب ۳ ثانیه.

فرض توزیع نیروی زلزله به صورت مثلثی در این‌گونه سازه‌ها برقرار نیست. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۹ الی ۱۳ مشاهده می‌شود که در سازه‌های ۵ و ۷ طبقه با افزایش دوره تناوب و ثابت بودن مشخصات روسازه (دوره تناوب در حالت پایه‌ی گیردار) از انحنای توزیع نیروی زلزله کاسته و به توزیع نیروی یکنواخت نزدیک شده است.

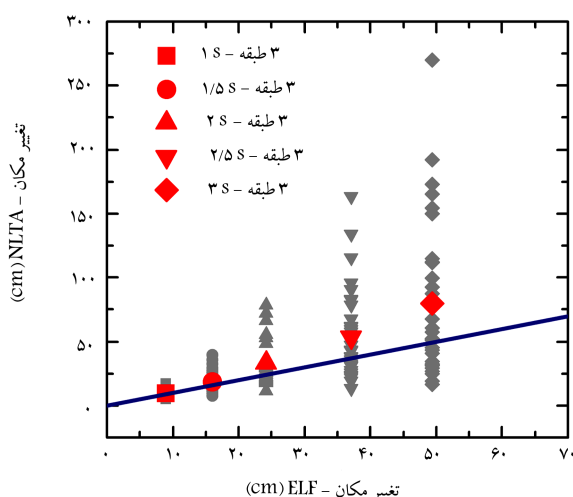
با توجه به نتایج مربوط به سازه‌ی ۳ طبقه می‌توان مشاهده کرد که با ثابت بودن مشخصات روسازه، ولی با افزایش دوره تناوب، نحوه‌ی توزیع نیروی زلزله حاصل از تحلیل تاریخی‌چهی زمانی از روش استاتیکی معادل فاصله گرفته و متفاوت از آن است. این شرایط برای سازه‌ی ۵ طبقه نیز به وجود آمده است. به علاوه می‌توان مشاهده کرد در حالتی که دوره تناوب سازه با جداگر ثابت است، برای روسازه‌های گوناگون شکل توزیع نیروی زلزله تغییر کرده است. با توجه به این توضیحات می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که نخست توزیع نیروی زلزله به مشخصات روسازه (نظیر دوره تناوب روسازه در حالت گیردار) و ثانیاً به دوره تناوب سازه در حالت جداسازی شده وابسته است. برای بررسی بیشتر در این مورد برای هر سازه و نتایج به دست آمده از تحلیل تاریخی‌چهی زمانی و با استفاده از رابطه‌ی ۱۰، مقادیر k با استفاده از برازش غیرخطی محاسبه شده است:

$$\frac{F_i}{V} = \frac{w_i h_i^k}{\sum_{j=1}^n w_j h_j^k} \quad (10)$$

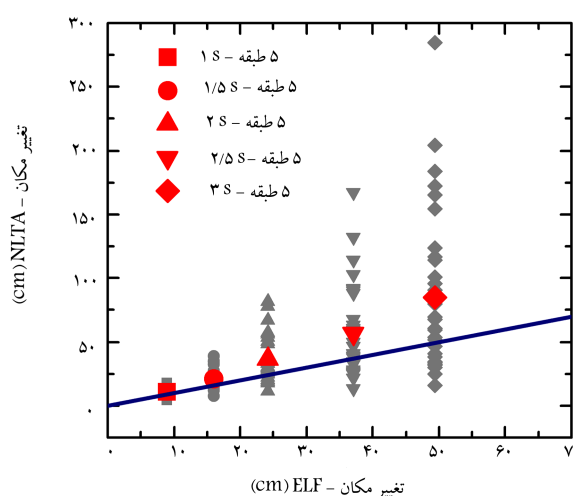
که در آن منظور از F_i نیروی برشی توزیع شده در طبقه‌ی i ام، w_i وزن طبقه‌ی i ام، h_i ارتفاع طبقه‌ی i ام از تراز پایه‌ی ساختمان، V برش پایه‌ی حاصل از نیروی زلزله است. در شکل ۱۴، نتایج مربوط به برازش در مقابل نسبت دوره تناوب در حالت با جداساز به دوره تناوب در حالت با پایه‌ی گیردار (T/T_{fix}) نشان داده شده است.



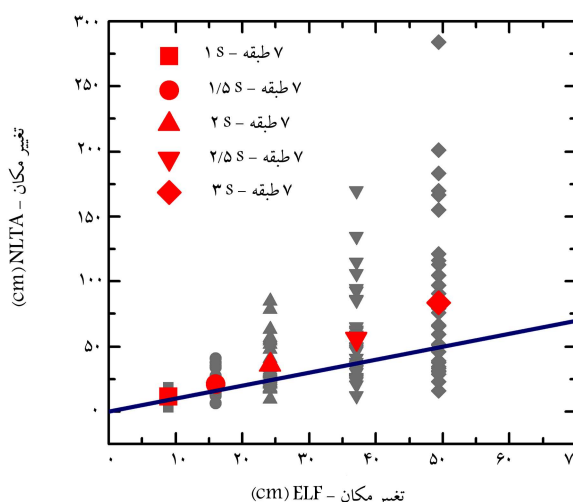
شکل ۱۲. تغییرات توزیع نیروی زلزله در طبقات در سازه‌های با جداگر لرزه‌یی با دوره تناوب ۲/۵ ثانیه.



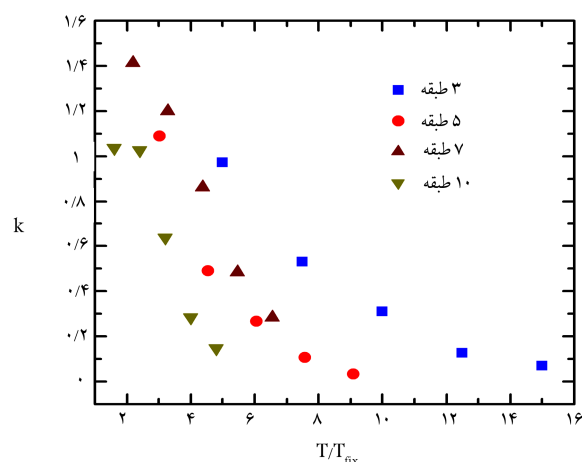
شکل ۱۵. مقایسه‌ی تغییرمکان در جداگرها حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخی‌چهی زمانی و روش بارگذاری استاتیکی معادل در سازه‌های ۳ طبقه.



شکل ۱۶. مقایسه‌ی تغییرمکان در جداگرها حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخی‌چهی زمانی و روش بارگذاری استاتیکی معادل در سازه‌های ۵ طبقه.



شکل ۱۷. مقایسه‌ی تغییرمکان در جداگرها حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخی‌چهی زمانی و روش بارگذاری استاتیکی معادل در سازه‌های ۷ طبقه.



شکل ۱۴. توزیع ضریب k محاسبه‌شده از برآزش در مقابل نسبت دوره‌تناوب سازه در حالت با جداساز به دوره تناوب در حالت با پایه‌ی گیردار.

می‌توان مشاهده کرد که در یک روسازی ثابت با افزایش دوره تناوب سازه در حالت با جداگر، مقدار k کاهش یافته و در نسبت‌های بالا، مقدار k به صفر بسیار نزدیک شده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت T/T_{fix} ، موداول سازه با جداگر لرزه‌ی در توزیع نیروی زلزله حاکم و سهم مودهای بالاتر در اثر تغییرات غیرخطی سیستم جداگر بر توزیع نیروی زلزله کم می‌شود. در پژوهشی در سال ۲۰۰۸ [۲۰]، رابطه‌ی برای مقدار k پیشنهاد شده است (روابط ۱۱ و ۱۲)، که به پارامترهای میرایی مؤثر و دوره تناوب روسازه وابسته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از این بخش به نظر می‌رسد مقدار k به میزان زیادی به نسبت T/T_{fix} وابسته است.

$$k = ۱۶/۴۸\xi^{۱/۱۳۶}T_s^{۱/۲۵} \quad (۱۱)$$

$$k = ۱۳\xi T_s \quad (۱۲)$$

که در آن‌ها، ξ میرایی مؤثر، T_s زمان تناوب رو سازه است. لازم به ذکر است که رابطه‌ی ۱۲ حالت ساده‌شده‌ی رابطه‌ی ۱۱ است.

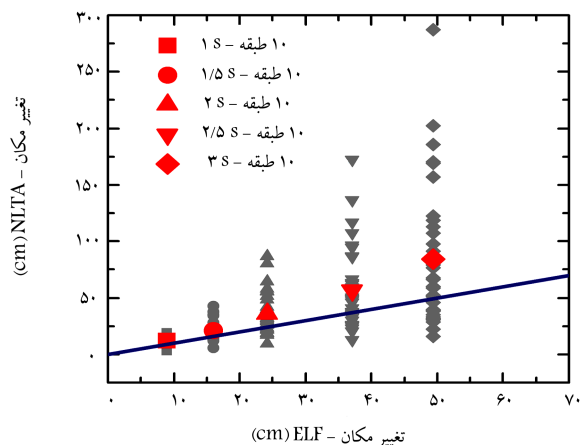
۳.۵. اثر زلزله‌های پالس‌گونه در تغییرمکان سیستم جداساز لرزه‌ی

تعدادی از پژوهشگران بر این باورند که اثر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک پالس‌گونه بر سازه‌های با دوره تناوب بالا قابل توجه است. بر این اساس در بخش حاضر، به بررسی اثر این نوع زلزله‌ها بر تغییرمکان سیستم جداگر پرداخته شده است. پالس موجود در تاریخی‌چهی زمانی سرعت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک در رفتار سیستم‌های با جداگر لرزه‌ی می‌تواند اثر بسیار زیادی داشته باشد، به گونه‌ی که افزایش تغییرمکان در سیستم جداگر، باعث ناپایداری کل سازه خواهد شد. بنابراین برآورد مناسب از مقدار تغییرمکان به وجود آمده در سیستم جداگر، امری ضروری در فرایند طراحی سازه‌های با جداگر لرزه‌ی است.

نتایج تغییرمکان سیستم با جداگر در دو امتداد که از تحلیل تاریخی‌چهی زمانی به‌دست آمده است، براساس جذر مجموع مربعات با یکدیگر ترکیب شده‌اند ($\sqrt{u_x^2 + u_y^2}$). تغییرمکان در روش استاتیکی معادل نیز براساس ۱۰٪ نیروی زلزله در راستای x و ۳۰٪ در راستای y و ترکیب آنها براساس جذر مجموع مربعات به‌دست آمده است. نتایج مربوط به مقایسه، در شکل‌های ۱۵ الی ۱۸ نشان داده شده‌اند، که در آن‌ها محور عمودی، نشانگر تغییرمکان سیستم جداگر براساس تحلیل تاریخی‌چهی زمانی و محوری افقی، نشانگر تغییرمکان جداگر براساس روش استاتیکی معادل است.

حاصل از تحلیل استاتیکی برای سازه‌های با جداگر لرزه‌ی می‌توان این نتایج را به‌طور خلاصه بیان کرد:

۱. در سازه‌های کوتاه مرتبه مقادیر تغییرمکان نسبی طبقات حاصل از روش استاتیکی معادل، کمتر از مقادیر حاصل از تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی است. اما در ساختمان‌های میان مرتبه، مقادیر به دست آمده از روش استاتیکی معادل در دوره تناوب‌های کم نسبت به نتایج حاصل از تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی محافظه‌کارانه‌تر است.
۲. در سازه‌های میان مرتبه در دوره تناوب‌های کم، الگوی تغییرات تغییرمکان نسبی در روش استاتیکی معادل و تاریخیچه‌ی زمانی تا حدود زیادی به یکدیگر شبیه هستند. اما با افزایش دوره تناوب، نتایج حاصل از تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی بیش از نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی معادل برای طبقات پایین است.
۳. مقادیر تغییرمکان نسبی طبقات در امتداد عمود بر راستای گسلش به مقدار قابل توجهی از مقادیر حاصل از مؤلفه‌ی موازی با امتداد گسلش بیشتر است.
۴. به‌طور کلی با افزایش زمان تناوب، نحوه‌ی تغییرات برش در ارتفاع ساختمان از توزیع غیریکنواخت به سمت توزیع یکنواخت تغییر می‌کند. این تغییرات به‌گونه‌ی است که برای سازه‌های کوتاه مرتبه با جداساز لرزه‌ی در زمان تناوب‌های کم با کمی اغماض، الگوهای حاصل از روش‌های استاتیکی و دینامیکی برای توزیع نیروی زلزله در ارتفاع یکسان بوده و با افزایش زمان تناوب اختلاف بین توزیع نیروی زلزله در ارتفاع ساختمان‌ها افزایش یافته است.
۵. توزیع نیروی زلزله به دوره تناوب روسازه در حالت گیردار و دوره تناوب سازه در حالت جداسازی شده وابسته است، به‌گونه‌ی که با افزایش نسبت T/T_{fix} مود اول سازه با جداگر لرزه‌ی در توزیع نیروی زلزله‌ی حاکم و سهم مودهای بالاتر در اثر تغییرات غیرخطی سیستم جداگر بر توزیع نیروی زلزله کم می‌شود.
۶. مقایسه‌ی توزیع نیروی زلزله نشان می‌دهد که بین مقادیر حاصل از تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی و رابطه‌ی ارائه شده در دستورالعمل طراحی ساختمان‌های با جداساز لرزه‌ی اختلاقی وجود دارد. لذا براساس نتایج پژوهش حاضر می‌توان گفت که ضریب توزیع توانی بار k علاوه بر میرایی مؤثر به نسبت دوره تناوب در حالت با جداساز به دوره تناوب در حالت با پایه‌ی گیردار (T/T_{fix}) نیز وابسته است.



شکل ۱۸. مقایسه‌ی تغییرمکان در جداگرها حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخیچه‌ی زمانی و روش بارگذاری استاتیکی معادل در سازه‌های ۱۰ طبقه.

خط قطری موجود، شیب ۱ دارد. بر این اساس، نقاط بالای خط قطری مقادیری هستند که در روش استاتیکی معادل کم و نقاط زیر خط قطری مقادیری هستند که محافظه‌کارانه برآورد می‌شوند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در روش استاتیکی معادل، مقادیر بالایی در سیستم به وجود می‌آید که منجر به ناپایدار شدن سیستم جداساز لرزه‌ی می‌شوند. نقاط مربوط به میانگین پاسخ حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخیچه‌ی زمانی نیز نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهند که جهت طراحی سازه‌های با جداگر لرزه‌ی، که در معرض زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک پالس‌گونه هستند، باید به این موضوع توجه خاصی شود و همچنین در آیین‌نامه‌های طراحی نیز باید به این اثر توجه شود.

۶. نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج حاصل از تحلیل‌های تاریخیچه‌ی زمانی و مقایسه‌ی آنها با نتایج

پانویس‌ها

1. long period
2. interstory drift
3. directivity effects

منابع (References)

1. Alavi, B. and Krawinkler, H. "Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **33**(6), pp. 687-706 (2004).
2. Alavi, B. and Krawinkler, H., *Effects of Near-Fault Ground Motions on Frames Structures*, Stanford (CA), John A. Blume Earthquake Engineering Center (2001).
3. Jangid, R.S. and Kelly, J.M. "Base isolation for near-

- fault motions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **30**(5), pp. 691-707 (2001).
4. Ozdemir, G. and Constantinou, M.C. "Evaluation of equivalent lateral force procedure in estimating seismic isolator displacements", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(10), pp. 1036-1042 (2010).
 5. American Society of Civil Engineers., *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE Standard No. SEI 7-05 (2006).
 6. Ghodrati, Gh., Bararnia, M. and Abedpour, M. "Evaluation of static method in estimating seismic demands of structures with seismic isolators subjected To near-field earthquakes", *9th International Congress on Civil Engineering*, Isfahan (2012).
 7. Castaldo, P. and Tubaldi, E. "Influence of FPS bearing properties on the seismic performance of base-isolated structures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **44**(15), pp. 2817-2836 (2015).
 8. Mollaioli, F., Lucchini, A., Cheng, Y. and Monti, G. "Intensity measures for the seismic response prediction of base-isolated buildings", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **11**(5), pp. 1841-1866 (2013).
 9. Cheraghi, R. and Izadifarda, R. "Demand response modification factor for the investigation of inelastic response of base isolated structures", *Earthquakes and Structures*, **5**(1), pp. 23-48 (2013).
 10. Di Sarno, L., Chioccarelli, E. and Cosenza, E. "Seismic response analysis of an irregular base isolated building", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **9**(5), pp. 1673-1702 (2011).
 11. Building and House Research Center (BHRC)., *Guidelines for Seismic Isolated Buildings*, In Persian, Tehran, IRAN (2010).
 12. Naeim, F. and Kelly, j.M., *Design of Seismic Isolated Structures : From Theory to Practice*, John Wiley & Sons Inc. (1999).
 13. Cheng, F.Y., Jiang, H. and Lou, K., *Smart Structures: Innovative Systems fo Seismic Response Control*, Taylor & Francis Group (2008).
 14. 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).
 15. Building and House Research Center (BHRC)., *Seismic Resistant Design of Buildings*, Code 2800?, In Persian, Tehran, IRAN (2005).
 16. AISC., *Specification for Structural Steel Buildings*, Chicago, IL: American Institute of Steel Construction (2010).
 17. American Society of Civil Engineers., *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE, Standard No. SEI 7-10 (2013).
 18. American Society of Civil Engineers., *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*, ASCE, Standard No. SEI 41-13 (2014).
 19. Federal Emergency Management Agency., *2009 NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples*, FEMA, 751p. (2012).
 20. York, K. and Rayan, K.L. "Distribution of lateral forces in base-isolated buildings considering isolation system Nonlinearity", *Journal of Earthquake Engineering*, **12**(7), pp. 1185-1204 (2008).

پیوست

جدول ۱. مشخصات زلزله‌های انتخاب‌شده.

| ردیف شماره توالی رکورد | نام زلزله | سال | نام ایستگاه | بزرگای زلزله | Closest.D | PGV-FN | Is Plus-FN | TP-FN | PGV-FP | IN Plus-FP | Tp-FP | (Sec) ضریب مقیاس | | | | |
|---------------------------------|--------------|------|----------------------------------|-----------------|-----------|--------|------------|-------|--------|------------|-------|------------------|---------|----------|----------|----------|
| | | | | | | | | | | | | $T=1$ | $T=1/5$ | $T=1/10$ | $T=1/20$ | $T=1/40$ |
| ۱ | ۷۷ | ۱۹۷۱ | Pacoima Dam (upper left abut) | سن‌فرناندو | ۶/۶ | ۱/۸ | ۱۱۶/۴۸ | ۱/۶ | ۳۵/۶۵ | ۶/۲ | ۰/۴۱ | ۰/۴۵ | ۰/۵۴ | ۰/۶۴ | ۰/۷۹ | |
| ۲ | ۱۵۸ | ۱۹۷۹ | Aeropuerto Mexicali | امپریال ولی-۶ | ۶/۵ | ۰/۳ | ۴۴/۳۲ | ۱/۴۲ | ۲/۴۶ | ۱/۳ | ۱/۵۳ | ۱/۶۵ | ۲/۳۸ | ۲/۹۵ | | |
| ۳ | ۱۵۹ | ۱۹۷۹ | Agrarias | امپریال ولی-۶ | ۶/۵ | ۰/۷ | ۵۴/۳۸ | ۲/۳ | ۱۹/۷۶ | ۰/۹۵ | ۱/۴۸ | ۱/۶ | ۱/۹۳ | ۲/۳ | ۲/۸۵ | |
| ۴ | ۱۷۱ | ۱۹۷۹ | Ec Meloand Overpass FF | امپریال ولی-۶ | ۶/۵ | ۰/۱ | ۱۱۵/۰۴ | ۳/۳۵ | ۲۷/۳ | ۴/۵۶ | ۱/۰۷ | ۱/۱۶ | ۱/۴ | ۱/۶۶ | ۲/۰۶ | |
| ۵ | ۱۷۹ | ۱۹۷۹ | EI Centro Array #۴ | امپریال ولی-۶ | ۶/۵ | ۷/۱ | ۷۷/۹۳ | ۴/۶۱ | ۴۰/۱۴ | ۲/۲۳ | ۱/۰۸ | ۱/۱۷ | ۱/۴۱ | ۱/۶۸ | ۲/۰۸ | |

ادامه‌ی جدول ۱.

| | | | | |
|--|-----------------------------------|------|-----------------------|--------|
| ۱/۵۷ ۱/۲۷ ۱/۰۷ ۰/۸۸ ۰/۸۲ ۷/۳۲ ۰ ۴۹ ۴/۰۵ ۱ ۹۱/۴۸ ۴ ۶/۵ | EI Centro Array #۵ | ۱۹۷۹ | امپریال ولی-۶۰ | ۱۸۰ ۶ |
| ۲/۰۵ ۱/۶۵ ۱/۳۹ ۱/۱۵ ۱/۰۶ ۲/۵۸ ۱ ۶۴/۷۲ ۳/۸۴ ۱ ۱۱۱/۸۷ ۱/۴ ۶/۵ | EI Centro Array #۶ | ۱۹۷۹ | امپریال ولی-۶۰ | ۱۸۱ ۷ |
| ۱/۸ ۱/۴۵ ۱/۲۲ ۱/۰۱ ۰/۹۴ ۴/۴۵ ۱ ۴۴/۵۳ ۴/۲۳ ۱ ۱۰۸/۸۲ ۰/۶ ۶/۵ | EI Centro Array #۷ | ۱۹۷۹ | امپریال ولی-۶۰ | ۱۸۲ ۸ |
| ۲/۲۶ ۱/۸۲ ۱/۵۳ ۱/۲۷ ۱/۱۷ ۲/۰۷ ۰ ۵۱/۹۸ ۵/۳۹ ۱ ۴۸/۵۵ ۳/۹ ۶/۵ | EI Centro Array #۸ | ۱۹۷۹ | امپریال ولی-۶۰ | ۱۸۳ ۹ |
| ۱/۸۶ ۱/۵ ۱/۲۶ ۱/۰۴ ۰/۹۷ ۲ ۱ ۵۱/۳۸ ۵/۸۶ ۱ ۵۹/۶۱ ۵/۱ ۶/۵ | EI Centro Differential Array | ۱۹۷۹ | امپریال ولی-۶۰ | ۱۸۴ ۱۰ |
| ۲/۵ ۲/۰۱ ۱/۶۹ ۱/۴ ۱/۳ ۳/۴۵ ۱ ۴۵/۵۱ ۳/۰۹ ۱ ۴۱/۵ ۱۰/۸ ۶/۹ | Sturno | ۱۹۸۰ | امپریال ولی-۶۰ | ۲۹۲ ۱۱ |
| ۱/۷۷ ۱/۴۲ ۱/۲ ۰/۹۹ ۰/۹۲ ۱/۳۸ ۱ ۵۵/۵۹ ۲/۴۳ ۰ ۳۵/۷۷ ۱۵/۳ ۵/۹ | Westmorland Fire Sta | ۱۹۸۱ | وست مورلند | ۳۱۹ ۱۲ |
| ۱/۲۱ ۰/۹۷ ۰/۸۲ ۰/۶۸ ۰/۶۳ ۱/۰۹ ۱ ۷۰/۱۵ ۰/۹۵ ۱ ۶۲/۳ ۰/۵ ۶/۲ | Coyoto Lake Dam (SW Abut) | ۱۹۸۴ | مورگان هیل | ۴۵۱ ۱۳ |
| ۳/۰۹ ۲/۴۹ ۲/۰۹ ۱/۷۳ ۱/۶ ۱/۰۵ ۰ ۲۲/۲۶ ۱/۵۵ ۱ ۳۶/۱۲ - ۶/۳ | SMART ^۱ M ^۲ | ۱۹۸۶ | تایوان اسمارتی ۴۰ | ۵۰۸ ۱۴ |
| ۱/۹۵ ۱/۵۷ ۱/۳۲ ۱/۰۹ ۱/۰۱ ۰/۸۹ ۰ ۲۹/۳۵ ۱/۳۸ ۱ ۷۳/۶۳ ۴ ۶/۱ | North Palm Springs | ۱۹۸۶ | نپالم- اسپرینگ | ۵۲۹ ۱۵ |
| ۱/۳۳ ۱/۰۷ ۰/۹ ۰/۷۵ ۰/۶۹ ۱/۷۹ ۱ ۵۲/۳۱ ۰/۸۶ ۱ ۶۲/۲۶ ۶/۳ ۵/۸ | Geotech Investing Center | ۱۹۸۶ | سن سالوادور | ۵۶۸ ۱۶ |
| ۱/۳۵ ۱/۰۹ ۰/۹۱ ۰/۷۶ ۰/۷ ۱/۰۲ ۱ ۷۳/۴۷ ۰/۹۶ ۰ ۳۷/۹۱ ۶/۹۹ ۵/۸ | National Geografical Inst | ۱۹۸۶ | سن سالوادور | ۵۶۹ ۱۷ |
| ۱/۴۴ ۱/۱۶ ۰/۹۸ ۰/۸۱ ۰/۷۵ ۳/۵۷ ۰ ۴۹/۶۷ ۲/۲۸ ۱ ۱۰۶/۷۵ ۱ ۶/۵ | Parachute Test Site | ۱۹۸۷ | سوپراستیشن هیلز-۲۰ | ۷۲۳ ۱۸ |
| ۲/۸ ۲/۲۶ ۱/۹ ۱/۵۷ ۱/۴۵ ۲/۲۸ ۱ ۳۴/۸ ۱/۹۵ ۱ ۲۳/۱۶ ۷۱ ۶/۹ | Alameda Naval Air Stn Hanger | ۱۹۸۹ | لوماپریتا | ۷۳۸ ۱۹ |
| ۲/۴۱ ۱/۹۴ ۱/۶۳ ۱/۳۵ ۱/۲۵ ۱/۷۸ ۱ ۳۸/۷۳ ۱/۳۴ ۰ ۲۱/۹۱ ۱۰/۹۷ ۶/۹ | Gilroy-Historic Bldg. | ۱۹۸۹ | لوماپریتا | ۷۶۴ ۲۰ |
| ۲/۱۸ ۱/۷۶ ۱/۴۸ ۱/۲۲ ۱/۱۳ ۱/۶۲ ۰ ۲۷/۶ ۱/۷۲ ۱ ۴۵/۶۷ ۱۱/۱ ۶/۹ | Gilroy Array #۲ | ۱۹۸۹ | لوماپریتا | ۷۶۶ ۲۱ |
| ۱/۸۱ ۱/۴۶ ۱/۲۳ ۱/۰۲ ۰/۹۴ ۲/۹۹ ۱ ۳۷/۱ ۲/۳۲ ۰ ۴۹/۳۴ ۱۲/۸۲ ۶/۹ | Gilroy Array #۳ | ۱۹۸۹ | لوماپریتا | ۷۶۷ ۲۲ |
| ۱/۰۶ ۰/۸۵ ۰/۷۲ ۰/۵۹ ۰/۵۵ ۴/۱ ۱ ۷۲/۱۸ ۴/۴ ۰ ۹۷/۰۲ ۳/۸۸ ۶/۹ | LGPC | ۱۹۸۹ | لوماپریتا | ۷۷۹ ۲۳ |

ادامه‌ی جدول ۱.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|---|--------|------|---|--------|------|-----|-------------------------------|------|----------------|------|----|
| ۲,۸۵ | ۲,۳ | ۱,۹۳ | ۱,۶ | ۱,۴۸ | ۱,۷۱ | ۱ | ۳۲,۵۴ | ۱,۳۳ | ۰ | ۲۱,۷ | ۷۲,۲ | ۶,۹ | Oakland-Title & Trust | ۱۹۸۹ | لوماپریتا | ۷۸۴ | ۲۴ |
| ۲,۵ | ۲,۰۲ | ۱,۷ | ۱,۴ | ۱,۳ | ۶,۳ | ۰ | ۴۳,۳۳ | ۴,۴۷ | ۱ | ۵۵,۵۸ | ۸,۵ | ۶,۹ | Saratoga-Aloha Ave | ۱۹۸۹ | لوماپریتا | ۸۰۲ | ۲۵ |
| ۲,۲۲ | ۱,۷۹ | ۱,۵ | ۱,۲۴ | ۱,۱۵ | ۵,۰۲ | ۱ | ۶۰,۰۶ | ۱,۹ | ۰ | ۷۱,۳۳ | ۹,۳۱ | ۶,۹ | Saratoga-W Valley Coll. | ۱۹۸۹ | لوماپریتا | ۸۰۳ | ۲۶ |
| ۱,۴۲ | ۱,۱۴ | ۰,۹۶ | ۰,۸ | ۰,۷۴ | ۴,۹۳ | ۱ | ۱۱۹,۴۴ | ۲,۵۵ | ۰ | ۵۹,۵۵ | ۶,۹۶ | ۷ | Mendocino Cape | ۱۹۹۲ | کاپه مندوسینو | ۸۲۵ | ۲۷ |
| ۱,۲۲ | ۰,۹۹ | ۰,۸۳ | ۰,۶۹ | ۰,۶۴ | ۰,۹۵ | ۱ | ۶۰,۷۴ | ۳ | ۱ | ۸۲,۱ | ۸,۲ | ۷ | Petrolia | ۱۹۹۲ | کاپه مندوسینو | ۸۲۸ | ۲۸ |
| ۱,۲ | ۰,۹۷ | ۰,۸۲ | ۰,۶۸ | ۰,۶۳ | ۱,۶۷ | ۰ | ۶۵,۲۸ | ۳,۵۳ | ۱ | ۶۷,۳۸ | ۵,۴ | ۶,۷ | Jensen Filter Plant Generator | ۱۹۹۴ | نورتریج-۱ | ۹۸۳ | ۲۹ |
| ۱,۷۷ | ۱,۴۲ | ۱,۲ | ۰,۹۹ | ۰,۹۲ | ۲,۷۹ | ۱ | ۴۰,۷۵ | ۱,۶۵ | ۱ | ۷۷,۱۱ | ۵,۹ | ۶,۷ | LA Dam | ۱۹۹۴ | نورتریج-۱ | ۱۰۱۳ | ۳۰ |
| ۱,۴۷ | ۱,۱۹ | ۱ | ۰,۸۳ | ۰,۷۶ | ۲,۱۸ | ۱ | ۷۴,۷۵ | ۲,۴۱ | ۱ | ۸۷,۷۵ | ۵,۵ | ۶,۷ | Newhall-W Pico Canyon Rd. | ۱۹۹۴ | نورتریج-۱ | ۱۰۴۵ | ۳۱ |
| ۱,۸۴ | ۱,۴۸ | ۱,۲۴ | ۱,۰۳ | ۰,۹۵ | ۱,۰۹ | ۰ | ۱۹ | ۰,۵ | ۱ | ۵۰,۴ | ۷ | ۶,۷ | Pacoima Dam (downstr) | ۱۹۹۴ | نورتریج-۱ | ۱۰۵۰ | ۳۲ |
| ۰,۸۹ | ۰,۷۱ | ۰,۶ | ۰,۵ | ۰,۴۶ | ۳,۰۱ | ۱ | ۶۲,۷۱ | ۱,۲۳ | ۱ | ۱۶۷,۲ | ۶,۵ | ۶,۷ | Rinaldi Receiving sta | ۱۹۹۴ | نورتریج-۱ | ۱۰۶۳ | ۳۳ |
| ۰,۹۹ | ۰,۸ | ۰,۶۷ | ۰,۵۵ | ۰,۵۱ | ۱,۶۲ | ۰ | ۵۴,۶۷ | ۳,۱۱ | ۱ | ۱۲۲,۷۲ | ۵,۳ | ۶,۷ | Sylmar-Olive View Med FF | ۱۹۹۴ | نورتریج-۱ | ۱۰۸۶ | ۳۴ |
| ۲,۱۲ | ۱,۷۱ | ۱,۴۴ | ۱,۱۹ | ۱,۱ | ۱,۳ | ۰ | ۴۰,۳۳ | ۱,۴۴ | ۱ | ۴۲,۰۵ | ۱۲,۷ | ۷,۶ | CHY۰۳۵ | ۱۹۹۹ | چی‌چی (تایوان) | ۱۲۰۲ | ۳۵ |

Is Pulse = پالس‌گونه است ۱، پالس‌گونه نیست ۰.

FP = مولفه موازی با راستای گسل،

FN = مولفه‌ی عمود بر راستای گسل،