عملکرد لرزه‌ای سازهٔ قاب صلب لوله‌ای دسته شده تحت رکوردهای حوزهٔ نزدیک مقیاس شده با ویرایش‌های سوم و چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰

آیدا جاهد شیران، مسعود اژدری فر، افشین مشکوه‌الدینی*؛
دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی

تاریخ: دریافت ۹۵/۱/۲٤ **پذیرش** ۹۵/۳/۸

چکیده

در این پژوهش نگرش تحلیلی بر روش مقیاس‌گذاری رکوردهای حوزه نزدیک در توصیف عمل‌کرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند صورت گرفته است. برای دست‌یابی به این هدف، مدل‌های تحلیلی بررسی شده، شامل قاب‌های صلب لوله‌ای دسته شده فولادی میان مرتبه تا بلند مرتبه هستند. سازه‌های بررسی شده در این تحقیق طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران- ویرایش چهارم طراحی شده‌اند. مجموعه‌ای از رکوردهای حوزهٔ نزدیک گسل با در نظر گرفتن خصوصیات آن‌ها برای انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی به‌منظور بررسی پاسخ لرزه‌ای انتخاب شدند. مهم‌ترین ویژگی رکوردهای حوزهٔ نزدیک گسل انتخابی، حضور پالس‌های بلند مدت و پرانرژی سرعت است که آن‌ها را از رکوردهای حوزهٔ دور از گسل متفاوت می‌سازد. بخشی از مجموعه مذکور شامل رکوردهای دو زلزله حادث شده در ایران، به‌ترتیب طبس ۱۹۷۸ و بم ۲۰۰۳ میلادی و دو رکورد از زلزله نورتریج ۱۹۹٤ و بخش دوم نیز شامل رکورد حوزهٔ دور از نورتریج ۱۹۹٤ است. در این پژوهش رکوردهای مقیاس شده بر اساس ویرایش های سوم و چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران، استفاده شده‌اند. خصوصیات عمل‌کرد لرزه‌ای هر یک از مدل‌های بررسی شده شامل حداکثر جابه‌جایی نسبی هر طبقه، برش پایه لرزه‌ای، شتاب مطلق و سرعت نسبی طبقات و نحوهٔ شکل‌گیری مفاصل پلاستیک در سازه با دقت ارزیابی شده‌اند. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که در صورت استفاده از ویـرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰، ضرایب مقیاس

* **نویسنده مسئول** meshkat@khu.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

و به دنبال آن پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های بررسی شده و هم‌چنین نیاز غیرخطی اعضای باربر اصلی تحت رکوردهای مقیاس شده با این ضرایب، نسبت به موارد متناظر تحلیلی، بر پایهٔ کاربرد ویرایش سوم آیین‌نامه ۲۸۰۰ کاهش به نسبت محسوسی می‌یابند.

واژه‌های کلیدی: طراحی لرزه‌ای، رکورد حوزهٔ نزدیک، پالس سرعت، ضریب مقیاس رکورد، قاب صلب لوله‌ای دسته شده

مقدمه

ویژگی‌های رفتار دینامیکی سازه‌ها از عوامل متعددی تبعیت می‌کند. فرضیات تحلیلی سازه، سیستم‌های سازه‌ای ساختمان، شتاب‌نگاشت‌های انتخاب‌شده، الزامات طراحی، طیف طرح، ساختار زمین‌شناسی منطقه پروژه از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در مشخصات رفتاری و نیز طرح نهایی سازه هستند. موارد و موقعیت‌های مختلفی وجود دارند که در آن‌ها باید جنبش‌های نیرومند ثبت شده زمین برای انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی سازه استفاده شوند. هرگاه مجموعه‌ای از شتاب نگاشت‌های طبیعی بر اساس معیارهایی مانند بزرگا و فاصله انتخاب شوند، در نتیجه تنوع چشم‌گیری در پاسخ محاسبه شده سازه‌ها به‌دست می‌آید. هم‌چنین این موضوع را می‌توان به نادیده گرفتن دیگر پارامترهای مهم توصیف حرکت نیرومند زمین نیز نسبت داد. چهارگونه ساختار طیفی مشخص‌تر در رکورد زلزله‌های بزرگ دیده شده است که شامل ارتعاشات حوزهٔ دور با باند فرکانس‌های بالا، نوسانات با مدت دوام زیاد، ارتعاشات با باند فرکانس پایین، ارتعاشات موج‌گونه هستند. بدیهی است که با توجه به‌وجود ویژگی‌ها و ساختارهای فیزیکی گوناگون در رکوردهای مختلف یک زلزله، انتخاب یک یا چند شتاب‌نگاشت برای تحلیل تاریخچه زمانی بسیار دشوار خواهد بود.

توجه به موضوع‌های مذکور نیز در تبیین روش مقیاس‌گذاری شتاب نگاشت‌های انتخابی برای انجام تحلیل‌های تاریخچهٔ زمانی تأثیرگذار خواهد بود. علاوه بر این، از آن‌جا که به‌طورکلی انتخاب دقیق مجموعه‌های متفاوت از رکوردها برای هر حالت حدی (سطوح عمل‌کردی سازه) غیرعملی است، بدین لحاظ فرایند مقیاس‌گذاری به‌عنوان رویه‌ای تحلیلی مؤثر، ضروری است. هم‌چنین از دیدگاه برآورد مقدار پاسخ بحرانی و نیز ارزیابی چگونگی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

تغییرات پارامترهای رفتاری سازه، روش و معیارسازی فرایند مقیاس‌گذاری شتاب نگاشت‌ها به شدت‌های مختلف، روند پژوهشی جامعی است. این امر در حوزه‌های نزدیک گسل‌های لرزه‌زا پیچیدگی بیش‌تری نیز دارد. تاریخچهٔ زمانی برخی از رکوردهای ثبت شده در حوزهٔ مرکز سطحی یک زلزله، دارای پالس‌های بلند مدت شتاب و در بعضی رکوردهای دیگر نیز اسپایک‌های فرکانس بالا و کوتاه‌مدت شتاب (Acceleration Spikes) دیده می‌شود. بدین‌ترتیب روند تغییرات پارامترهای محاسباتی بیان‌گر رفتار لرزه‌ای سازه‌ها، به‌شدت تابع مشخصات فیزیکی رکوردهای کاربردی خواهد بود. این موضوع نیز تأثیر مستقیم در روش معیارسازی و تدوین ضوابط قابل قبول طراحی لرزه‌ای دارد. هم‌چنین یکی از مهم‌ترین مسایل در طراحی سازه‌ها این است که بتوان میان ظرفیت سازه و تقاضای لرزه‌ای تعادل ایجاد کرد [۱]، [۲]، [۳]، [٤].

به‌طورکلی ظرفیت سازه عبارت است از توانایی اسکلت باربر برای مقاومت در برابر حرکات نیرومند زمین بدون این‌که فروپاشی صورت گیرد. تاکنون تحقیقات بسیاری برای تعیین ظرفیت سازه انجام گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که شناخت و توصیف این موضوع بدون اطلاع از ویژگی‌ها و مشخصات فیزیکی رکوردهای مختلف ثبت شده در هنگام وقوع زلزله‌ای شدید و هم‌چنین چگونگی تأثیر آن‌ها بر رفتار سازه امکان‌پذیر نیست. بدین لحاظ و با توجه به موارد اشاره شده، تعیین و تفهیم این مهم برای اسکلت‌های سازه‌ای متوجه تفاوت عظیمی از دیدگاه طراحی لرزه‌ای می‌شود. از عمده‌ترین موضوعات لرزه‌شناسی مهندسی، ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی حرکات نیرومند زمین ثبت شده در حوزهٔ نزدیک گسل‌های فعال و اثرات آن‌ها بر عمل‌کرد سازه‌های خاص به‌ویژه ساختمان‌های میان مرتبه تا بلند است. انجام پژوهش‌های ساختاری در مورد درک بهتر حرکات پالس مانند و موج گونه زمین که از اصلی‌ترین مشخصه‌های حرکات حوزهٔ نزدیک گسل است، از دیدگاه بررسی رفتار لرزه‌ای سه‌بعدی سازه‌ها دارای اهمیت به‌سزایی است. پارامتر دورهٔ پالس در ساختارشناسی این‌گونه رکوردهای نیرومند زلزله نقش مهمی در چگونگی ایجاد و گسترش تغییر شکل غیرالاستیک اعضاء را ایفا می‌کند. افزون بر این مطلب، در صورت نزدیک بودن دورهٔ پالس

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

بزرگ موجود در تاریخچهٔ زمانی رکوردهای حوزهٔ نزدیک به دوره طبیعی سازه، پارامترهای پاسخ لرزه‌ای تا میزان چشم‌گیری تشدید می‌شوند [٤]، [٥]، [٦]، [٧]، [٨]، [٩].

سازهٔ بررسی شده این پژوهش از نوع قاب خمشی محیطی لوله‌ای دسته شده[1] است. هم‌چنین تاکنون چندین مدل ترکیبی از اسکلت‌های مقاوم با سازهٔ پایه قاب محیطی همراه با پیکربندی‌های مختلف در ساخت ساختمان‌های میان مرتبه تا بلند به‌کار برده شده است. ساختار سازه‌ای قاب خمشی محیطی منفرد[2]، قاب خمشی محیطی با سازه پایه دوگانه[3]، قاب خمشی محیطی با اسکلت ستون‌های لینک شده[4]، قاب خمشی محیطی با اسکلت ترکیبی کمربند سخت کننده[5] از جمله سیستم‌های مقاوم یاد شده هستند. نتایج بررسی‌های طراحی ساختمان‌های بلند نشان می‌دهد که سازهٔ قاب خمشی لوله‌ای منفرد که متشکل از چهار قاب خمشی صفحه‌ای در محیط سازه است، دارای مشکل لنگی برش[5] است. پدیدهٔ لنگی برش در اثر تغییرشکل ناشی از ایجاد نیروی بزرگ برشی در شاه‌تیرهای دو سر گیردار شده به ستون‌های محیطی پلان ساختمان پدیدار می‌شود. طراحی و کاربرد قاب‌های خمشی دسته‌کننده اسکلت سازه به چند سیستم صلب لوله‌ای کوچک‌تر، سبب کاهش چشم‌گیر اثرات لنگی برش می‌شود. سازه قاب خمشی لوله‌ای دسته شده حاوی تعدادی سازه قاب با اتصالات صلب است که در دو جهت عمود بر هم قرار می‌گیرند و یک گروه از قاب‌های محیطی با هندسه و اسکلت سازه‌ای کوچک‌تر را تشکیل می‌دهند. با توجه به این‌که هر یک از این لوله‌های قابی صلب دارای مقاومت جانبی بسیار زیادی هستند، می‌توان آن‌ها را به هر شکل دل‌خواه دسته‌بندی کرد و یا در هر تراز ارتفاعی مشخص قطع کرد [١٠]، [١١].

مجموعه رکوردهای انتخابی شامل جنبش‌های نیرومند زمین ثبت شده در هنگام زلزله‌های بزرگ و معروف طبس ۱۹۷۸، بم ۲۰۰۳ ایران و نیز نورتریج کالیفرنیا ۱۹۹٤ است. معیار اصلی در انتخاب رکوردها برای انجام آنالیزهای غیرخطی تاریخچهٔ زمانی، وجود پالس‌های پرانرژی و بلند مدت در تاریخچهٔ زمانی سرعت هر رکورد بوده است [۹]–[۱۵]. دو روش هم‌پایه مقیاس‌گذاری این رکوردها بر اساس ویرایش‌های ۳ و ٤ آیین‌نامه ۲۸۰۰ است و ضرایب مقیاس مربوط به‌ترتیب براساس بندهای ۲-٤-۱-٤-۲ و ۲-٥-۳-۳ این آیین نامه‌ها به‌دست آمده است [١٦]، [١٧]، [١٨].

1. Bundled Framed Tube 2. Flexural Framed Tube 3. Dual Resistant Framed Tube System
4. Linked Column Supported Framed Tube 5. Outrigger Mega Braced Tube 6. Shear Lag

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

شایان ذکر است که در کاربرد و ارزیابی محاسباتی هر دو روش مقیاس‌گذاری، نسبت طیفی مقادیر پارامترهای PGA ، PGV و PGD دو مؤلفهٔ موازی (LN) و عمود (TR) بر صفحه شکست گسل، تغییر داده نشده تا حالت فیزیکی واقعی رکورد حفظ شود. هم‌چنین همگی زوج شتاب‌نگاشت‌های متشکل از دو مؤلفهٔ LN و TR به‌مقدار حداکثر شتاب مؤلفه نیرومندتر عمود بر صفحه شکست گسل، نرمالیزه شده و سپس روش تحلیلی مقیاس‌گذاری آیین‌نامه ۲۸۰۰ به‌کار برده شده است. بدین‌ترتیب با استفاده از رکوردهای مقیاس‌گذاری شده و انجام فرایند تحلیل‌های غیرخطی تاریخچهٔ زمانی، پارامترهای پاسخ لرزه‌ای سازه‌های تحت بررسی، محاسبه شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

سازه‌های تحت بررسی و ملاحظات طراحی

مدل‌های سازه‌ای بررسی شده در این پژوهش، قاب‌های خمشی محیطی دسته‌شده فولادی در دو ارتفاع ۱۰ و ۲۰ طبقه است. چنان‌چه در شکل ۱ مشاهده می‌شود مدل‌های پژوهشی دارای پلان منظم و شامل ٦ دهانه با فاصله مرکز به مرکز ٦ متر در هر دو جهت x و y بوده است که براساس ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه۲۸۰۰ ویرایش چهارم (۲۸۰۰-٤) و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان طراحی شده‌اند. با توجه به نماهای نشان داده شده در شکل ۱، ارتفاع طبقات برای تمامی سازه ها ۳/۵ متر در نظر گرفته شده است. جزییات پلان و نما در شکل ۱ نمایش داده شده است. خطوط کم‌رنگ در پلان سازه‌های پژوهشی، متشکل از صفحات قاب‌های ساده دارای اتصالات مفصلی است و هم‌چنین خطوط ضخیم پررنگ نیز نمایش‌گر صفحات قاب‌های خمشی دارای اتصالات صلب تیر به ستون هستند.

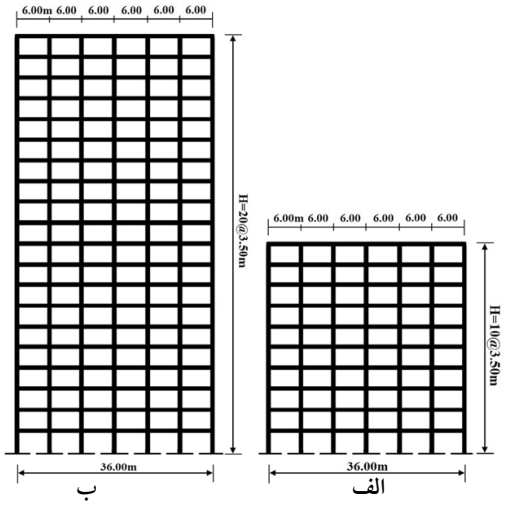
نتایج آنالیز مودال سازه‌های پژوهشی به‌صورت T=۱,۷۷ ثانیه برای دورهٔ مود اول سازه ۱۰ طبقه و هم‌چنین T=۲,۹۹ ثانیه برای دوره مود اول سازه ۲۰ طبقه است. هم‌چنین با توجه به تقارن هندسی و بارگذاری اسکلت‌های سازه‌ای، دورهٔ مودهای اول ارتعاشی سازه‌های مطالعاتی نسبت به هر دو محور X و Y به‌شکل یک‌سان و برابر اعداد مذکور به‌دست می‌آیند. آرایش طیفی دورهٔ سه مود اول ارتعاشی رفتار سه‌بعدی سازه‌های یاد شده به‌صورت انتقالی (محورX)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

- انتقالی (محور Y) – پیچشی به‌دست آمده است. دورهٔ نخستین مود پیچشی (مود سوم ارتعاش) دو سازه ۱۰ و ۲۰ طبقه شکل ۱، به‌ترتیب برابر است با ۰/۶۷ و ۱/۰۸ ثانیه است. بدین‌ترتیب، بیش‌تر بودن دورهٔ مود اول انتقالی در راستاهای X و Y نسبت به اولین مود پیچشی، نشان‌دهندهٔ رفتار سه‌بعدی سازه‌های پژوهشی به‌صورت پیچشی است. این نیز یک ویژگی مطلوب در روند طراحی لرزه‌ای سازه‌ها است.

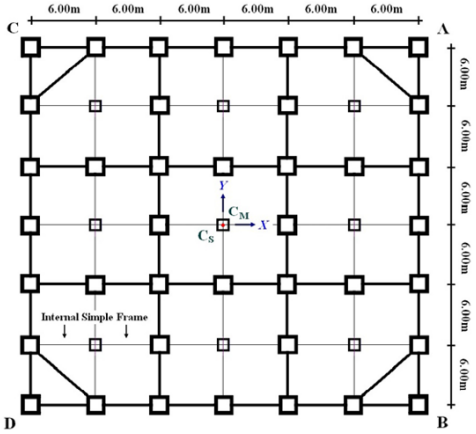
خاک ساختگاه از نوع تیپ ۲ و منطقه پروژه در پهنه‌بندی با خطر نسبی زیاد فرض شده است. دیافراگم سقف با سختی بی نهایت نسبت به عناصر قائم باربر جانبی در نظر گرفته شده است. بارگذاری سازه‌ها نیز بر پایه مبحث ششم مقررات ملی ساختمان صورت گرفته است [۱۹]. هم‌چنین مشخصات و ملاحظات طراحی نیز شامل کنترل دریفت مجاز، رعایت اصل تیر ضعیف–ستون قوی و بررسی مقاومت چشمه‌های اتصال است که در روند طراحی در نظر گرفته شد. هم‌چنین چنان‌که در شکل ۲ و جدول ۱ ملاحظه می‌شود، در روند مدل‌سازی تمامی سازه‌های بررسی شده برای تعریف رفتار غیرخطی المان‌های تیر و ستون، به‌ترتیب از مفصل M (خمشی) و نیز مفصل غیرخطی PMM (اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی) طبق توصیه‌های FEMA356 در تیرها و ستون‌ها استفاده شده است [۱۹]، [۲۶].



شکل ۱. سازه‌های پژوهشی قاب خمشی محیطی دسته شده، الف) پلان سازه شامل صفحات قاب‌های خمشی (خطوط تیره پررنگ) و صفحات قاب‌های ساده مفصلی (خطوط تیره نازک)، ب) مدل ۱۰ طبقه،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

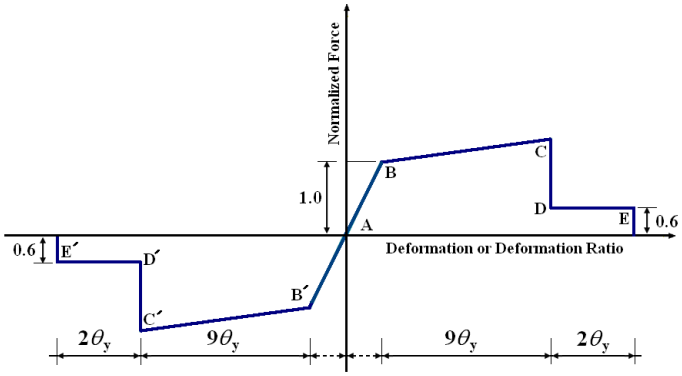


ج

شکل ۱. سازه‌های پژوهشی قاب خمشی محیطی دسته شده، ج) مدل ۲۰ طبقه (C_M و C_S به‌ترتیب مراکز جرم و برش طبقه هستند)

جدول ۱. معیارهای پذیرش عمل‌کرد لرزه‌ای المان‌های تیر و ستون

زاویهٔ چرخش خمیری	معیارهای پذیرش
$۱\theta_y$	IO – عمل‌کرد بی وقفه
$۹\theta_y$	LS – عمل‌کرد ایمنی جانی
$۱۱\theta_y$	CP – عمل‌کرد جلوگیری از فروریزش



شکل ۲. مدل رفتار غیرخطی المان‌های تیر و ستون بر پایه توصیف عددی هر دو مفصل پلاستیک M و PMM [۲۰]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

رکوردهای انتخابی از زلزله‌های بزرگ

یکی از مشخص‌ترین ویژگی‌های که در رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک دیده می‌شود، قابلیت ایجاد پالس‌های پر انرژی کوتاه و بلندمدت در تاریخچهٔ زمانی سرعت زمین[1] است. باید دانست که این ساختارهای موج گونه سرعت نیز بر حسب دوری یا نزدیکی گسل و حوزه مرکز سطحی زلزله[2] به‌صورت‌های متفاوتی پدیدار می‌شود. بهرحال وجود پالس‌های پرانرژی و بلندمدت در تاریخچهٔ زمانی هر کدام از مؤلفه‌های یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک، می‌تواند پارامترهای پاسخ و مشخصات رفتار سازه‌ها به‌خصوص سازه‌های میان مرتبه و بلند را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد. اهمیت این موضوع با افزایش یافتن مدت دوام حرکات نیرومند در رکورد زلزله دو چندان خواهد شد. مجموعه رکوردهای سه مؤلفه‌ای انتخابی این پژوهش حاوی پنج جنبش با طبقه‌بندی به نسبت نیرومند تا پرقدرت از حرکات ثبت شده زمین در حوزه‌های دور و نزدیک نسبت به صفحه شکست گسل هستند. مشخصات اصلی طیفی رکوردهای انتخابی در جدول ۲ آورده شده‌اند.

مشخصات لرزه‌شناسی و طیفی رکوردهای انتخاب شده در این پژوهش، نمود روشنی از اثرات جهت‌داری[3] در فرایند گسلش[4]، ساختارهای پرانرژی اسپایک‌های پردامنه شتاب، پالس‌های سرعت، شناخت باند فرکانس‌های پایین پرانرژی در بازهٔ کم‌تر از ۱۰ هرتز را نشان می‌دهند. هم‌چنین رکوردهای حوزهٔ نزدیک[5] با اثرات نیرومند جهت‌داری از پایگاه داده‌های حرکات زمین، مرکز تحقیقات مهندسی زلزله دانشگاه برکلی کالیفرنیا تهیه شده است [۲۱]. معیار اصلی در انتخاب رکوردهای زلزله در این پژوهش، وجود پالس‌های پرانرژی و بلندمدت در تاریخچهٔ زمانی سرعت زمین بوده است. مجموعه زمین لرزه‌های سه مؤلفه‌ای انتخابی، شامل رکوردهای اصلی دو زلزله بزرگ حادث شده در ایران به نام‌های بم ۲۰۰۳ و طبس ۱۹۷۸، همراه با دو رکورد نیرومند (RRS)[6] و (SCE)[7] از زلزلهٔ نورتریج ۱۹۹٤ کالیفرنیا است. هم‌چنین رکورد نه چندان نیرومند و حوزهٔ دور مورپارک (MRP)[8] از زلزله نوتریج ۱۹۹٤ نیز به‌عنوان معیاری مقایسه‌ای در رابطه با جنبش‌های پالس‌گونه زمین در محدودهٔ نزدیک به صفحه شکست گسل انتخاب شده است.

1. Velocity Pulses **2.** Epicenter Zone **3.** Directivity **4.** Fault Rupturing
5. Nearfield- Records 6. Rinaldi **7.** Sylmar **8.**Moorpark

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

تاریخچهٔ زمانی شتاب و سرعت و طیف انرژی مربوط به رکورد اصلی سه مؤلفه‌ای و حوزهٔ نزدیک طبس ثبت شده در سال ۱۹۷۸ میلادی و نیز رکورد حوزهٔ دور مورپارک (MRP) از زلزله نورتریج ۱۹۹٤ در شکل‌های ۳ و ٤ نمایش داده شده است. ماهیت ساختاری رکوردهای نیرومند حوزهٔ نزدیک، حضور اسپایک‌های پرانرژی شتاب و پالس‌های بلندمدت و پردامنه سرعت است. هم‌چنین اندازه و بازهٔ زمانی روند آزاد شدن انرژی جنبشی برای دو رکورد حوزهٔ نزدیک و دور، بسیار متفاوت است. ملاحظه می‌شود که همگام با فراز و نشیب‌های موضعی دامنهٔ زمانی پالس‌های سرعت، روندی جهشی در آزاد شدن انرژی جنبشی رکورد زلزله به‌وجود می‌آید. این ساختار فیزیکی در شکل ۳ بروشنی دیده می‌شود. این ویژگی‌ها به‌طور مشخص در تاریخچهٔ زمانی رکوردهای حوزهٔ دور ملاحظه نمی‌شود. مطابق شکل ٤ تاریخچهٔ زمانی رکورد حوزهٔ دور (MRP) از زلزله نورتریج ۱۹۹٤، نمایش‌گر روندی پیوسته و با دامنهٔ بسیار کوچک آزاد شدن انرژی جنبشی است [۱۰].

در این پژوهش هر سه مؤلفه رکوردهای انتخابی زلزله به‌طور هم‌زمان در جهات X ، Y و Z مدل سازه‌های بررسی شده شکل ۱ اعمال شده‌اند. مؤلفهٔ موازی با صفحه شکست گسل (LN) در راستای X پلان سازه و هم‌چنین مؤلفهٔ نیرومندتر عمود بر صفحه شکست گسل (TR) در راستای Y و مؤلفهٔ عمودی (UP) در جهت Z وارد شده‌اند. مجموعه تحلیل‌های غیرخطی تاریخچهٔ زمانی برای سازه‌های مدل شده با نرم‌افزارهای PERFORM 3D و SAP2000 انجام شده است [۲۱]، [۲۲]. نمودار تاریخچهٔ زمانی سرعت و شتاب رکوردهای انتخابی زلزله‌ها و پارامترهای فیزیکی آن‌ها نظیر بیشینهٔ شتاب (PGA)، بیشینهٔ سرعت (PGV) و بزرگا به‌ترتیب در جدول ۲ و شکل‌های ۳ تا ٦ نمایش داده شده است.

مطابق با شکل ۵ ملاحظه می‌شود که تاریخچهٔ زمانی سرعت زمین متناظر با دو مؤلفهٔ LN و TR رکوردهای حوزه نزدیک و نیرومند Bam ، SCE و RRS حاوی پالس‌های پیوسته و بلندمدت سرعت هستند. هم‌چنین نکته دیگر نیز وجود آرایش غیر هم‌زمان پدیدار شدن این ساختارهای موجی شکل است. بدین لحاظ روند تشکیل و گسترش مکانیزم مفاصل غیرخطی در اسکلت مقاوم سازه، به‌صورت غیریک‌نواخت و با آهنگ سریع و تأثیر پذیرفته از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

جنبش‌های پرانرژی و متناوب زمین در بازهٔ زمانی پالس‌های سرعت، ایجاد می‌شود. پدیدار شدن این ساختارهای موجی شکل در تاریخچهٔ زمانی رکورد نیز به‌وجود آورنده جنبش‌های ضربه‌ای بسیار نیرومند زمین در منطقه نزدیک به صفحه شکست گسل خواهد بود (شکل ٦).

نتایج پژوهش‌های لرزه‌شناسی نشان می‌دهد که ارتباطی فیزیکی دو جانبه میان فرایند انتشار سه بعدی امواج زلزله و نیز مکانیزم گسیختگی گسل برقرار است. پدیدار شدن اثرات نیرومند شکست پیش‌رونده گسل و فرایند جهت‌داری پیش‌رو[1] به‌ویژه در تاریخچهٔ زمانی رکوردهای زلزله ثبت شده در فواصل کم‌تر از۲۰ کیلومتر نسبت به صفحه گسیختگی گسل بوقوع می‌پیوندد [٢٦]. تفاوت آشکار تاریخچهٔ زمانی دو مؤلفه‌ای سرعت زمین برای رکورد حوزهٔ دور MRP نسبت به سه رکورد نیرومند Bam ، SCE و RRS بیان‌گر موضوع فوق است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و لرزه‌شناسی رکوردهای انتخابی

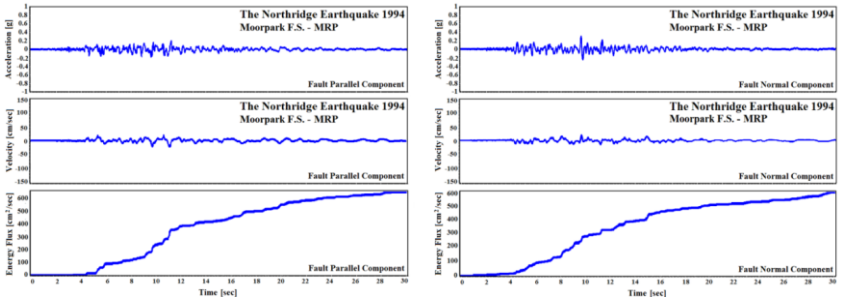
نام زلزله‌ها	بزرگا (Mw)	PGD (cm)			PGV (cm/s)			PGA (g)		
		مؤلفه‌ها			مؤلفه‌ها			مؤلفه‌ها		
		UP	TR	LN	UP	TR	LN	UP	TR	LN
Bam 2003	٦,٦	١٠,١٥	٣٥,١٤	٢٣,٩٨	٣٩,٤٣	١٢٣,٧	٥٩,٨٦	٠,٩٩٩	٠,٧٩٣	٠,٦٣٥
Tabas 1978	٧,٤	١٦,٤٨	١٠١,٧٣	٧٦,١	٤٤,٤	١٢٢,٦٦	١٠٠,٦٨	٠,٦٨٨	٠,٨٥٢	٠,٨٣٦
Northridge 1994 Rinaldi (RRS)	٦,٧	١١,٧٢	٢٩,٨	١٩,٨٨	٥١,٠٥	١٦٦,٨٨	٧٢,٧	٠,٨٥٢	٠,٨٣٨	٠,٤٧٢
Northridge 1994 Sylmar (SCE)	٦,٧	٧,٤١	٣٤,١٦	٢٧,٠٧	٢٤,٣٣	١١٧,٦٧	٧٥,٢٨	٠,٣٧٦	٠,٨٢٨	٠,٤٩٣
Northridge 1994 Moorpark (MRP)	٦,٧	٠,٨٨	٤,٦٨	٤,٥٧	٧,٧٨	٢٠,٤٩	٢٠,٠٩	٠,١٥٩	٠,٢٩٢	٠,١٩٣

LN: مؤلفه موازی با صفحه شکست گسل، **TR**: مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل، **UP**: مؤلفه قائم

1. Forward Directivity

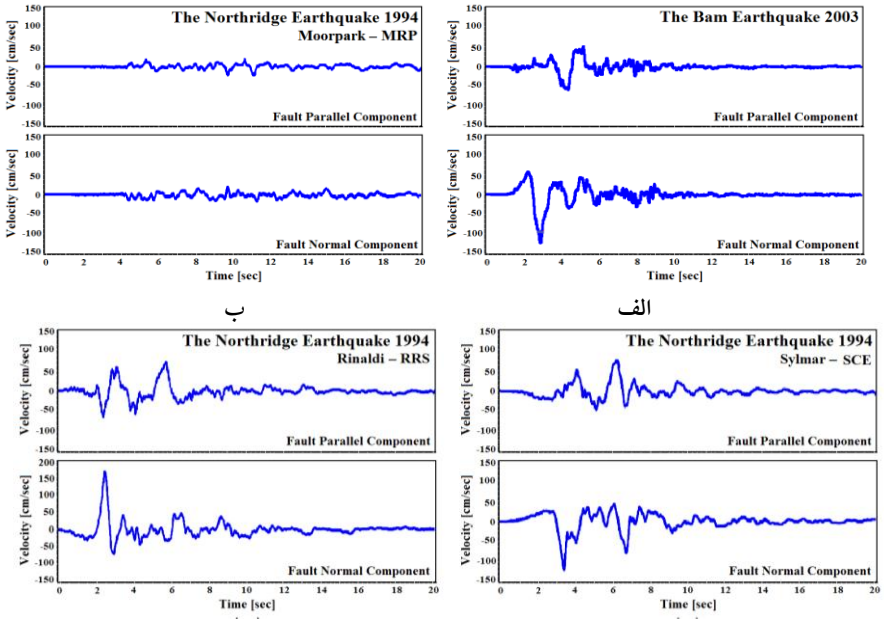
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]



ب الف

شکل ٤. تاریخچهٔ زمانی شتاب، سرعت زمین و طیف انرژی رکورد نه چندان نیرومند و حوزهٔ دور MRP از زلزله نورتریج ۱۹۹٤ کالیفرنیا دارای اسپایک‌های کوچک و کم‌دامنه شتاب، الف) مؤلفه عمود بر جهت فرایند گسلش (مؤلفه TR)، ب) مؤلفه موازی با جهت فرایند گسلش (مؤلفه LN)

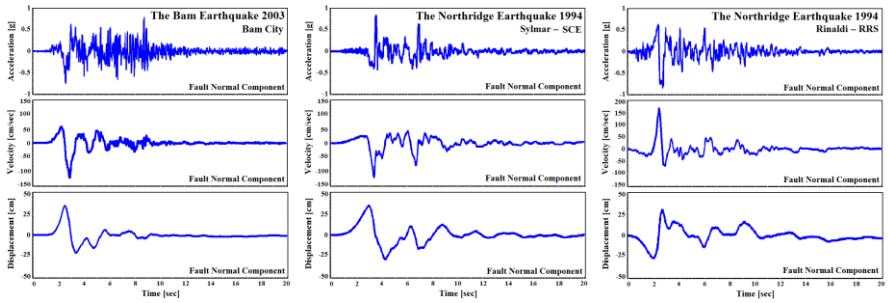


ب الف

ت پ

شکل ۵. تاریخچهٔ زمانی سرعت زمین متناظر با مؤلفه‌های شتاب LN (موازی صفحه شکست گسل) و شتاب TR (عمود بر صفحه شکست گسل) رکوردهای انتخابی از زلزله بم ۲۰۰۳ ایران و زلزله نورتریج ۱۹۹٤ کالیفرنیا: الف) رکورد اصلی زلزله بم، ب) رکورد حوزهٔ دور MRP ، پ) رکورد حوزه نزدیک و نیرومند SCE ، ت) رکورد حوزهٔ نزدیک و پر انرژی RRS ، پالس‌های پردامنه و بلند مدت در تاریخچه زمانی سرعت متناظر با هر دو مؤلفهٔ شتاب LN و TR برای رکوردهای Bam ، SCE و RRS دیده می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]



پ ب الف

شکل ٦. تاریخچهٔ زمانی شتاب، سرعت و تغییر مکان زمین متناظر با مؤلفهٔ TR (عمود بر صفحه شکست گسل) رکوردهای انتخابی از زلزله بم ۲۰۰۳ ایران و زلزله نورتریج ۱۹۹٤ کالیفرنیا: الف) رکورد حوزه نزدیک و پرانرژی RRS ، ب) رکورد حوزه نزدیک و نیرومند SCE، پ)) رکورد اصلی زلزله بم، یک پالس مشخص همراه با گروه اسپایک‌های پردامنه شتاب در تاریخچهٔ زمانی شتاب ثبت شده زمین در هر سه رکورد ملاحظه می‌شود. تاریخچهٔ زمانی هر سه رکورد حاوی پالس‌های پیوسته سرعت و موج‌های شبه سینوس رفت و برگشتی تغییر مکان است.

چنان‌چه در شکل ٦ نشان داده شده است وجود اثرات نیرومند جهت‌داری پیش‌رونده در فرایند انتشار امواج زلزله در حوزهٔ نزدیک گسل، سبب ایجاد ترکیبی از یک یا دو پالس مشخص همراه با یک مجموعه پیوسته از اسپایک‌های پر دامنه در تاریخچهٔ زمانی شتاب خواهد شد. متناظر با این ساختار فیزیکی نیز پالس‌های بلندمدت و پردامنه در تاریخچهٔ زمانی سرعت و تغییرمکان زمین آشکار می‌گردد. ماهیت ضربه‌ای پالس‌های بزرگ تغییر مکان زمین سبب افزایش شدید پارامترهای برش پایه، نیروی محوری ستون ها، نیاز شکل‌پذیری و دریفت طبقات در رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های با اسکلت قاب خمشی میان مرتبه تا بلند خواهد شد.

روند انجام پژوهش

شایان ذکر است که ابتدا ضرایب مقیاس برای هر یک از رکوردهای طبیعی زلزله‌ها به‌ترتیب طبق بندهای ۲-٤-۱-٤-۲ ویرایش سوم (۲۸۰۰-۳) و ۲-۵-۳-۳ ویرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰ (۲۸۰۰-٤) محاسبه شده است. فرایند تحلیلی یاد شده به گونه‌ای است که علاوه بر استفاده از بازهٔ زمانی (0.2T , 1.5T) برای مقیاس کردن زوج مؤلفه LN و TR هر کدام از شتاب نگاشت‌ها، مقدار متوسط طیف جذر مربعات مربوط به تمام زوج مؤلفه‌ها در

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

محل محور طیفی T (برابر با دورهٔ مود اول ارتعاشی سازه‌های بررسی شده) نیز به‌طور جداگانه حساب شد. بدین‌ترتیب برای هر زوج مؤلفه LN و TR مربوط به هر شتاب‌نگاشت اعمالی بر مدل‌های بررسی شده ۱۰ و ۲۰ طبقه، چهار ضریب مقیاس به‌ترتیب ۲ مورد برحسب ویرایش سوم و نیز ۲ مورد برحسب ویرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰ حاصل شد.

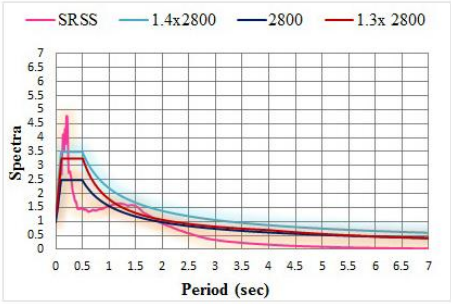
شکل ۷ نشان‌دهندهٔ طیف‌های طرح استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم و چهارم و طیف ترکیبی واحد (SRSS Spectra) برای زوج مؤلفهٔ متناظر با شتاب‌نگاشت‌های مربوط به رکوردهای بم و مورپارک است. چنان‌که ملاحظه می‌شود در بازهٔ (۰/۲T–۱/۵T) ، فاصلهٔ طیفی بین دو منحنی SRSS و ۱/٤x۲۸۰۰ بر اساس ویرایش سوم آیین‌نامه ۲۸۰۰، بیش‌تر از فاصله طیفی آن با منحنی ۱/۳x۲۸۰۰ بر پایه ویرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰ است. موضوع فوق نشان‌دهندهٔ این مفهوم است که ضرایب مقیاس به‌دست آمده از آیین‌نامه ٤–۲۸۰۰ به‌طور نسبی کم‌تر از ضرایب مقیاس حاصل از آیین‌نامه ۳–۲۸۰۰ است. مقادیر مربوط به این ضرایب در جدول ۳ آمده است. پاره‌ای از ضرایب مقیاس، کوچک‌تر از ۱ حاصل شده‌اند. این مسئله را تنها می‌توان به ساختار تحلیلی روش طیفی محاسبه ضریب مقیاس ربط داد. هم‌چنین لحاظ کردن دیدگاه‌های تحلیلی دیگر مانند فاکتور مشارکت مودهای بالاتر، محاسبات طیف ترکیبی SRSS بر اساس مؤلفه قائم نیز می‌تواند در تغییر عددی ضرایب مقیاس تأثیرگذار باشد. کاربرد ضریب مقیاس برابر با یک نشان‌گر تعریف رکورد سه مؤلفه‌ای زلزله در حالت میدان آزاد است.

روند تحلیل‌های غیرخطی تاریخچهٔ زمانی با استفاده از مدل‌سازی عددی بارگذاری دینامیکی متناظر با شتاب‌نگاشت رکوردهای انتخابی و کاربرد نرم‌افزارهای SAP2000 و PERFORM انجام گرفت. بر این اساس روش نیومارک با معیار شتاب متوسط ثابت و پارامترهای γ =1/2 و β =1/4 برای تحلیل سازه‌های مطالعاتی تحت رکورد حوزهٔ دور MRP به‌کار برده شد. هم‌چنین از روش هیلبر α بر اساس معیار کنترل میرایی عددی α=-0.333 برای تحلیل پاسخ لرزه‌ای و مدل‌سازی بارگذاردی دینامیکی متناظر با رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک حاوی پالس‌های مشخص و اسپایک‌های پردامنه شتاب و نیز پالس‌های پیوسته سرعت استفاده شد. افزون بر آن، بر پایهٔ بررسی‌های قبلی روش ویلسون θ با تعریف

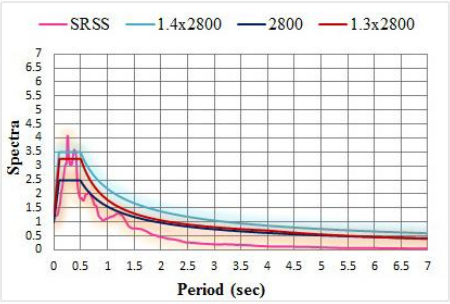
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

فاکتور افزایش دامنه طیفی $\theta = 1.42$ جهت مدل‌سازی عددی رکورد طبس حاوی دو پالس سرعت بلند مدت در هر دو مؤلفه LN و TR لحاظ شد [۲٤]، [۲۵]، [۲٦].



(الف)



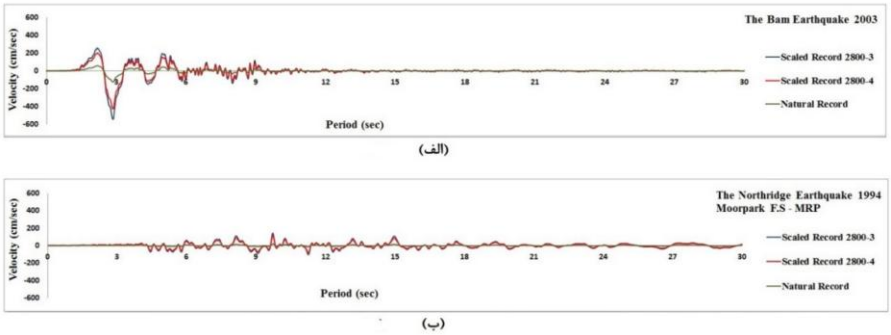
(ب)

شکل۷. طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ همراه با اعمال اثر ضرایب آماری ۱/٤ و ۱/۳، الف) طیف SRSS رکورد بم، ب) طیف SRSS رکورد Moorpark از زلزله Northridge 1994

شایان ذکر است که یک مجموعه نمودارسازی عددی پارامترهای پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی نیز برای بررسی و مقایسه دامنه تفاوت‌های ویژگی‌های رفتاری تحت رکوردهای مقیاس شده بر پایه ویرایش‌های سوم و چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰ ، تنظیم و تکمیل شده است. مقادیر مربوط به این ضرایب برای تمام زلزله‌های بررسی شده در این پژوهش و نیز تاریخچهٔ زمانی سرعت مربوط به دو رکورد حوزهٔ نزدیک بم و حوزه دور مورپارک به‌ترتیب در جدول ۳ و شکل ۸ آمده است. چنان‌که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، فاصلهٔ منحنی تاریخچهٔ زمانی سرعت رکوردهای مقیاس شده با استاندارد ۳-۲۸۰۰ نسبت به منحنی تاریخچهٔ زمانی سرعت رکوردهای مقیاس شده با استاندارد ٤-۲۸۰۰ در مورد رکورد حوزه نزدیک بم بیش‌تر از رکورد حوزهٔ دور مورپارک است. موضوع مذکور بیان‌گر این مسئله است که تفاوت نگرش طیفی دو ویرایش استاندارد ۲۸۰۰ درباره رکوردهای حوزهٔ نزدیک نسبت به رکوردهای حوزهٔ دور مشخص‌تر است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]



شکل۸. **تاریخچهٔ زمانی سرعت مؤلفهٔ TR رکورد طبیعی و مقیاس شده با استانداردهای ۳-۲۸۰۰ و ٤-۲۸۰۰، الف) رکورد حوزهٔ، نزدیک بم ۲۰۰۳، ب) رکورد حوزهٔ، دور مورپارک ۱۹۹٤ از زلزلهٔ نورتریج ۱۹۹٤**

جدول۳. ضرایب مقیاس رکوردها مطابق با ویرایش ۳ و ٤ آیین‌نامه ۲۸۰۰ بر اساس دو معیار طیفی

مدل	استاندارد ۲۸۰۰	رکوردهای زلزله									
		MRP		SCE		RRS		Tabas		Bam	
		ضریب مقیاس		ضریب مقیاس		ضریب مقیاس		ضریب مقیاس		ضریب مقیاس	
		۰,۲T-۱,۵T	T	۰,۲T-۱,۵T	T	۰,۲T-۱,۵T	T	۰,۲T-۱,۵T	T	۰,۲T-۱,۵T	T
۱۰ طبقه	ویرایش ۳	٤,۸۹	۲,٤	۲,۳۲	۱,٦٤	۱,٤٤	۱,۰۹	۲,۰٦	۲,۰۷	۲,۲۷	۱,۲٤
	ویرایش ٤	۳,۷۲	۱,۸۹	۱,٤٤	۱,۲٦	۱,۰۹	۰,۸۳	۱,٦٥	۱,٥۳	۱,۷۳	۰,۹٥
۲۰ طبقه	ویرایش ۳	۷,۹۹	٥,٦٥	٤,۷۲	۱,۹۷	۳,۷۸	۱,۸۰	۲,۳۰	۲,۲۳	٥,٦٦	۲,۹٤
	ویرایش ٤	٦,۰٦	٤,۳۳	۳,٥۹	۱,٥۱	۲,۸۷	۱,۳۸	۱,۷۷	۱,۷۰	۲,۹۹	۲,۲٦
۳۰ طبقه	ویرایش ۳	۱۱,۹	٦,۹٦	٤,۷۲	۱,۹۷	٥,٦۰	۲,۹٤	۲,۳۰	۱,۸۳	۸,۹٤	٤,۳۹
	ویرایش ٤	۸,۲۹	٥,٤۷	۰,٦٦	۱,٥۱	۳,۹۱	۲,۳۱	۱,۷۷	۱,٤٤	٦,۲٤	۳,٤٥

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

ارزیابی نتایج تحلیلی

به‌طورکلی چنان‌که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، ضرایب مقیاس به‌دست آمده از ویرایش چهارم آیین نامه۲۸۰۰ تفاوت چشم‌گیری با ضرایب مقیاس حاصل از ویرایش سوم دارد. هم‌چنین به‌عنوان مثال ضرایب به‌دست آمده برای رکورد حوزهٔ نزدیک بم و نیز رکورد حوزهٔ دور مورپارک متناظر با محور طیفی متناظر با دورهٔ مود پایه مدل ۱۰ طبقه بر حسب ویرایش سوم آیین‌نامه ۲۸۰۰ به‌ترتیب برابر با ۱/۲٤ و ۲/٤ و نیز برحسب ویرایش چهارم برابر با ۰/۹۵ و ۱/۸۹ هستند. بدین‌ترتیب بر پایه مبانی ویرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰، عدد مربوط به ضرایب مقیاس به‌میزان چشم‌گیری در حدود ۲۳٪ و ۲۱٪ برای دو رکورد یاد شده کاهش یافته است. همانند این روند برای ضرایب مقیاس محاسباتی متناظر با سایر رکوردها نیز دیده می‌شود.

نکته مفهومی استنباط شده آن است که این کاهش، پارامترهای پاسخ سازه‌ها نسبت به رکوردهای مقیاس شده را نیز به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهد. بر این اساس در روند مطالعاتی این پژوهش پس از انجام تحلیل‌های غیرخطی تاریخچهٔ زمانی با استفاده از اعمال رکوردهای مقیاس شده بر مدل‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه، نمودارهای پوش بیشینه پارامترهای پاسخ لرزه‌ای متناظر با برش پایه لرزه‌ای، شتاب مطلق، سرعت نسبی، تغییرمکان و دریفت ماکزیمم، مکانیزیم مفاصل پلاستیک و تاریخچهٔ زمانی دریفت، تنظیم و ارزیابی شده است.

نمایش مقایسه‌ای مقادیر پارامتر بیشینه برش پایه دینامیکی به‌ترتیب برای دو مدل مطالعاتی ۱۰ و ۲۰ طبقه قاب خمشی لوله‌ای دسته شده (شکل ۱)، در شکل‌های ۹ تا ۱۰ آورده شده است. چنان‌که از هر دو شکل ۹ و ۱۰ پیداست، بر پایهٔ کاربرد استاندارد ٤-۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) برای مقیاس‌گذاری رکوردهای وارد بر سازه، میزان حداکثر برش پایه نسبت به حالتی که از استاندارد ۳-۲۸۰۰ (ویرایش سوم) برای این منظور استفاده می‌شود، کاهش چشم‌گیری داشته است. هم‌چنین با توجه به اعمال رکوردهای سه مؤلفه‌ای بم، رینالدی و مورپارک، بیشینهٔ برش پایه لرزه‌ای به‌دست آمده در جهت y پلان سازه قاب محیطی خمشی۱۰ طبقه تحت این جنبش‌های نیرومند، در حالت مقیاس شده با روش طیفی استاندارد ۳-۲۸۰۰ به‌ترتیب برابر با و ۳۲۷۲/۹۹ ، ٤۰۸٤/۹۲ و ۲۰۷۳/۸۰ تن است و نیز در حالت مقیاس شده با معیارهای تحلیلی استاندارد ٤-۲۸۰۰ به‌ترتیب برابر با ۲۹۸٤/۱٦، ۳۱٤۳/۲۹ و ۱٦۸۱/٦۳ تن به‌دست آمده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

مقایسهٔ مقادیر متناظر فوق، یک کاهش ۲۳/۹ و ۱۹درصد را نشان می‌دهد. این کاهش در مورد مدل مطالعاتی۲۰ طبقه نیز برقرار است. مقادیر متناظر پارامتر برش پایهٔ دینامیکی برای مدل ۲۰ طبقه در حالت مقیاس‌گذاری با استاندارد ۳-۲۸۰۰ به‌ترتیب برابر با ٤۲۷۳/۰۳، ۷۳۰٦/۳۳ و ۳۵۲۸/۲۸ تن است. هم‌چنین با کاربرد روش مقیاس‌گذاری با استاندارد ٤-۲۸۰۰ نیز مقادیر یاد شده به‌ترتیب برابر با ۳۵۲۹/۱۳، ٦۳۳۷/۲۸ و ۲۷۰۰/٥٦ تن به‌دست آمده‌اند. بررسی تفاوت‌های نسبی متناظر برای رفتار لرزه‌ای مدل قاب خمشی محیطی۲۰ طبقه نیز کاهش به‌ترتیب۱۷/۵، ۱۳ و ۲۳ درصدی پاسخ‌ها را نشان می‌دهد.

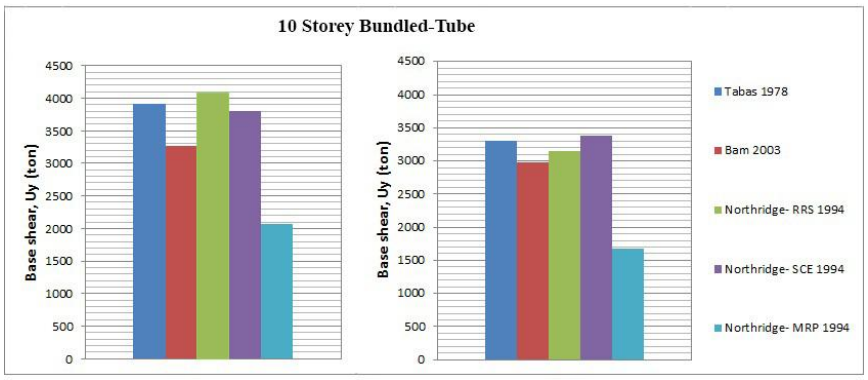
دریفت طبقه یا همان تغییرمکان نسبی بین دو تراز کف متوالی که نسبت به ارتفاع طبقه نرمال شده است، به‌عنوان یک پارامتر اصلی ارزیابی تقاضای لرزه‌ای سازه تعریف می‌شود. بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین، ارتباطی ساختاری میان پارامتر نیاز دریفت و تقاضای شکل‌پذیری هر طبقه وجود دارد. نمودارهای پوش بیشینه تغییر مکان جانبی تمام طبقات و پارامتر دریفت طبقه در نقطه D برای جهت y پلان مدل‌های مطالعاتی، در شکل‌های ۱۱ تا ١٤ نشان داده شده است. هم‌چنین شکل‌های ۱۱ و۱۲ پوش بیشینه تغییرمکان‌های حاصل شده از تحلیل تاریخچهٔ زمانی غیرخطی تحت رکوردهای مقیاس شده به دو روش ویرایش سوم و چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰ را نمایش می‌دهند. چنان‌که از منحنی‌ها مشخص است، برای هر دو مدل ۱۰ و ۲۰ طبقه هنگامی که رکوردهای زلزله بر حسب ویرایش چهارم مقیاس می‌شوند، بیشینه تغییرمکان جانبی به‌اندازهٔ به نسبت زیادی کاهش می‌یابند. هم‌چنین به لحاظ عددی مشاهده می‌شود که بیشینه تغییرمکان جانبی به‌دست آمده تحت رکورد حوزه نزدیک بم و نیز حوزهٔ دور مورپارک در جهت y پلان مدل ۱۰ طبقه، بر حسب ویرایش سوم آیین‌نامه ۲۸۰۰ به‌ترتیب برابر با ۷۵/۹۹ و ۱۹/۲۷۱سانتی‌متر و برحسب ویرایش چهارم برابر با۵۷/۱ و ۱۷/۷٤۹ سانتی‌متر است.

در بارهٔ مدل ۲۰ طبقه نیز موضوع روند کاهش پارامترهای پاسخ به‌روش مشابه جریان دارد، به‌طوری‌که بیشینهٔ تغییر مکان‌های به‌دست آمده تحت دو رکورد بم و مورپارک در جهت y پلان مدل۲۰ طبقه نیز بر حسب ویرایش سوم آیین‌نامه ۲۸۰۰ به‌ترتیب برابر با ۲٤۷/۲۸ و ٥٦/۸٥ سانتی‌متر و برحسب ویرایش چهارم برابر با ۱۸۷/۹۹ و٤۳/٥۷ سانتی‌متر هستند. به‌همین ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ١٤ نیز بیشینه جا به‌جایی نسبی طبقات (دریفت طبقات) به‌دست

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

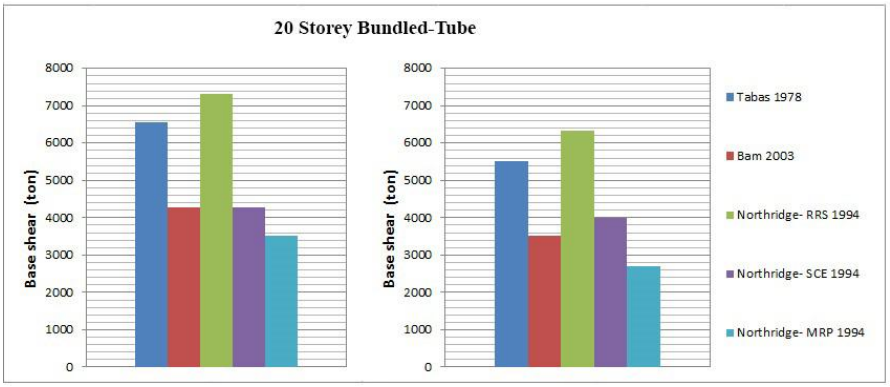
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

آمده از تحلیل تاریخچهٔ زمانی غیرخطی تحت رکوردهای مقیاس شده به‌روش ویرایش‌های سوم و چهارم آیین‌نامه برای مدل‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه نشان داده شده است. باید دانست که با اعمال ضرایب مقیاس‌گذاری بر رکوردهای زلزله، شدت رکوردهای وارد بر سازه تغییر می‌کند. بدین‌لحاظ هر اندازه که مقدار عددی این ضرایب بیش‌تر باشد، آن‌گاه رکوردهای نیرومندتری به سازه وارد شده و در نتیجه امکان تشکیل مکانیزم‌های پلاستیک با دامنهٔ غیرخطی بزرگ‌تر در اسکلت مقاوم افزایش خواهد یافت.



ب الف

شکل ۹. حداکثر برش پایه مدل ۱۰ طبقه، الف) تحت رکوردهای مقیاس شده بر اساس ویرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰، ب) تحت رکوردهای مقیاس شده بر اساس ویرایش سوم آیین‌نامه ۲۸۰۰

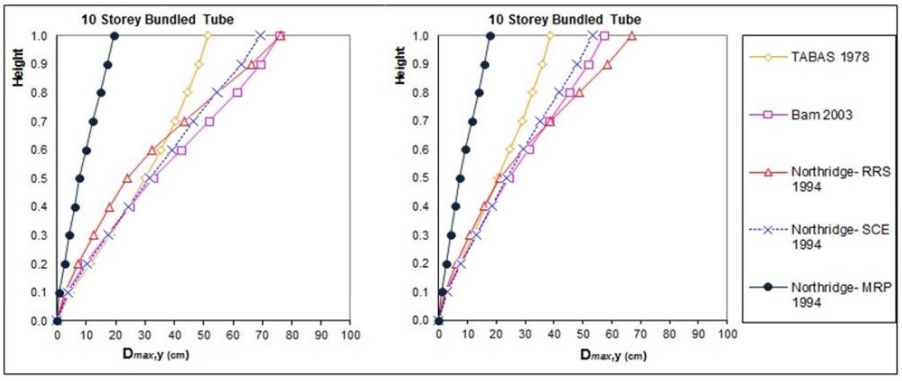


ب الف

شکل ۱۰. حداکثر برش پایه مدل ۲۰ طبقه، الف) تحت رکوردهای مقیاس شده بر اساس ویرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰، ب) تحت رکوردهای مقیاس شده بر اساس ویرایش سوم آیین‌نامه ۲۸۰۰

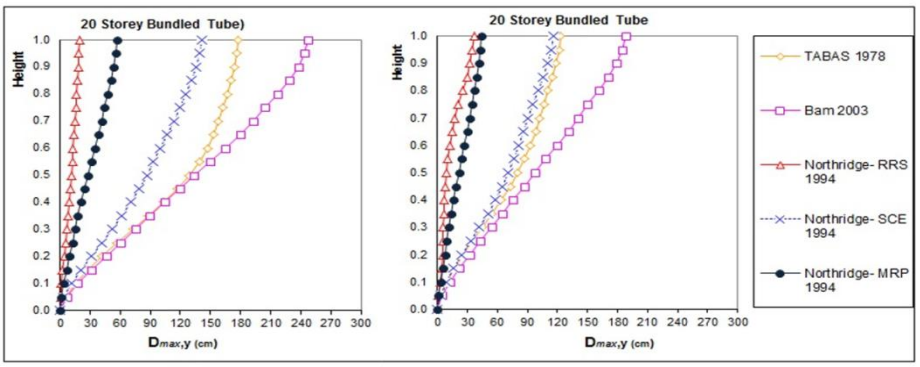
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]



ب الف

شکل ۱۱. پوش بیشینه تغییرمکان جانبی طبقات مدل ۱۰ طبقه در نقطه D پلان، الف) نمایش‌گر پاسخ سازه تحت رکوردهای مقیاس شده بر اساس ویرایش سوم است، ب) نیز نمایش‌گر پاسخ سازه تحت رکوردهای مقیاس شده بر اساس ویرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰ است.



ب الف

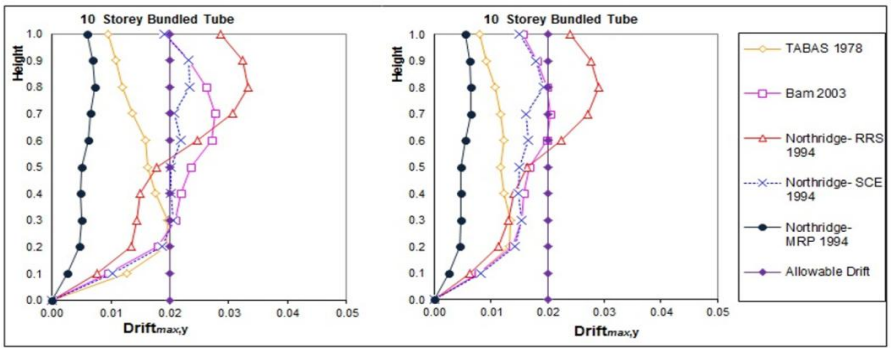
شکل ۱۲. پوش بیشینه تغییرمکان جانبی طبقات مدل ۲۰ طبقه در نقطه D پلان، الف) نمایش‌گر پاسخ سازه تحت رکوردهای مقیاس شده بر اساس ویرایش سوم است، ب) نیز نمایش‌گر پاسخ سازه تحت رکوردهای مقیاس شده بر اساس ویرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰ است.

ملاحظه می‌شود که طبق جدول ۳، ضرایب مقیاس به‌دست آمده از استاندارد ۳-۲۸۰۰ به مراتب بزرگ‌تر از ضرایب حاصل از ویرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰ است. بنابراین انتظار می‌رود که آرایش و دامنهٔ عمل‌کرد غیرخطی مکانیزم تشکیل مفاصل پلاستیک در سازه‌های تحت رکوردهای مقیاس شده با ضرایب حاصل از روش طیفی توصیه شده در ویرایش سوم آیین‌نامه ۲۸۰۰، بیش‌تر از نتایج مشابه بر اساس اعمال ضرایب مقیاس حاصل از استاندارد ٤-۲۸۰۰ باشد. ساختار نهایی و آرایش تشکیل مفاصل پلاستیک حاصل از ارزیابی رفتار لرزه‌ای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

غیرخطی مدل‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه مطالعاتی تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک طبس و رینالدی مقیاس شده با هر دو ویرایش آیین‌نامه ۲۸۰۰ در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به نمایش درآمده است. چنان‌که در این شکل‌ها دیده می‌شود، کاربرد روش مقیاس‌گذاری رکوردها بر پایهٔ استاندارد ٤-۲۸۰۰ در ارزیابی عمل‌کرد لرزه‌ای هر دو مدل۱۰ ،۲۰ طبقه منتهی به تعداد به نسبت کم‌تر مفاصل پلاستیک و نیز دامنه کوچک‌تر رفتار عمومی غیرخطی نسبت به‌روش توصیه شده در استاندارد ٤-۲۸۰۰ می‌گردد.

هم‌چنین نتیجه‌ای آشکار حاصل از تباین فوق نیز در قالب ایجاد آسیب‌های سازه‌ای کوچک‌تر و حصول شاخص خسارت پایین‌تر است. افزون بر آن، نزدیکی و گذر از سطح عمل‌کرد آستانه فروریزش دیرتر اتفاق می‌افتد. هم‌چنین برای بررسی دقیق‌تر اثرات ضرایب مقیاس حاصل از دو ویرایش آیین‌نامه مذکور، تاریخچهٔ زمانی دریفت طبقه بام در سازه ۱۰ و ۲۰ طبقه تحت اثر دو رکورد بم و SCE به‌ترتیب در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ به نمایش در آمده است. این پارامتر لرزه‌ای می‌تواند از نظر برآورد خسارت ایجاد شده نیز استفاده شود. چنان‌که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود تاریخچهٔ زمانی دریفت طبقه بام مدل ۱۰ طبقه به‌دست آمده براساس آیین‌نامه ویرایش سوم، مقادیر بزرگ‌تری را نسبت به همین پارامتر برای آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهام به نمایش می‌گذارد. این پارامتر در شکل ۱۸ که بیان‌گر تاریخچهٔ زمانی دریفت در طبقه بام مدل ۲۰ طبقه است شدت کم‌تری دارد.

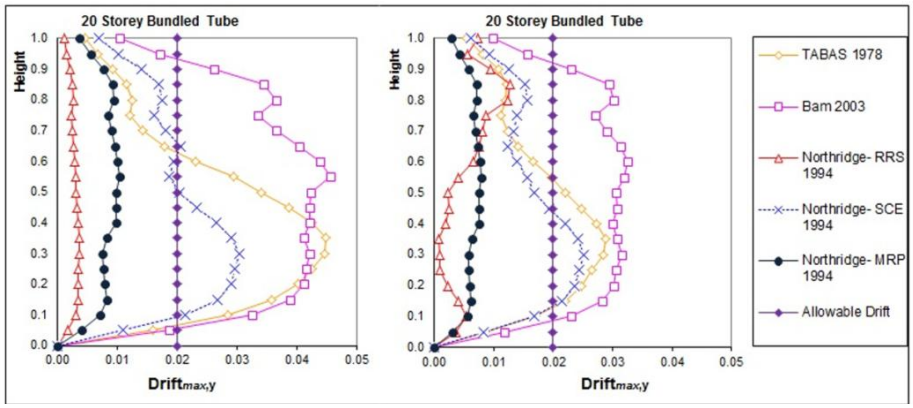


ب الف

شکل۱۳. پوش بیشینه جا به‌جایی نسبی طبقات مدل ۱۰ طبقه در نقطه D پلان، الف) نمایش‌گر پاسخ سازه تحت رکوردهای مقیاس شده بر اساس ویرایش سوم است، ب) نیز نمایش‌گر پاسخ سازه تحت رکوردهای مقیاس شده بر اساس ویرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰ است.

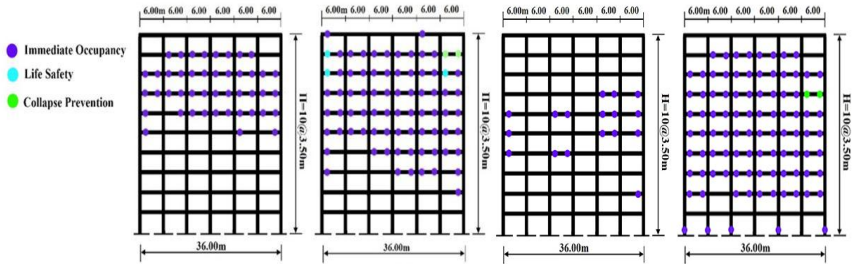
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]



ب الف

شکل ١٤. پوش بیشینه جا به‌جایی نسبی طبقات مدل ٢٠ طبقه در نقطه D پلان، الف) نمایش‌گر پاسخ سازه تحت رکوردهای مقیاس شده بر اساس ویرایش سوم است، ب) نیز نمایش‌گر پاسخ سازه تحت رکوردهای مقیاس شده بر اساس ویرایش چهارم آیین‌نامه ٢٨٠٠ است

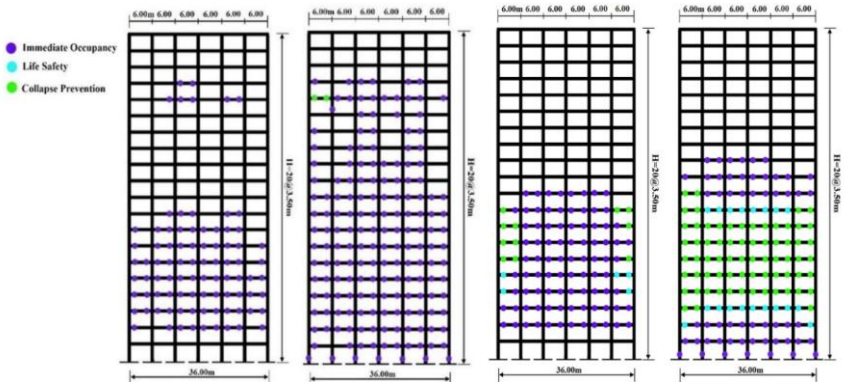


ت پ ب الف

شکل ١٥. محل و آرایش تشکیل مفاصل پلاستیک در مدل ١٠ طبقه با توجه به حدود تعریف شده در Fema 356 ؛ الف) و ب) مدل تحت رکورد مقیاس شده طبس ١٩٧٨ بر اساس استاندارد ٣-٢٨٠٠ و ٤-٢٨٠٠ ، (پ) و (ت) مدل تحت رکورد مقیاس شده نورتریج-رینالدی ١٩٩٤ بر اساس استاندارد ٣-٢٨٠٠ و ٤-٢٨٠٠

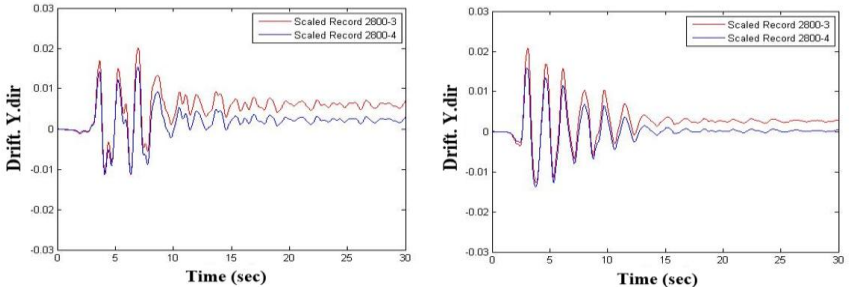
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]



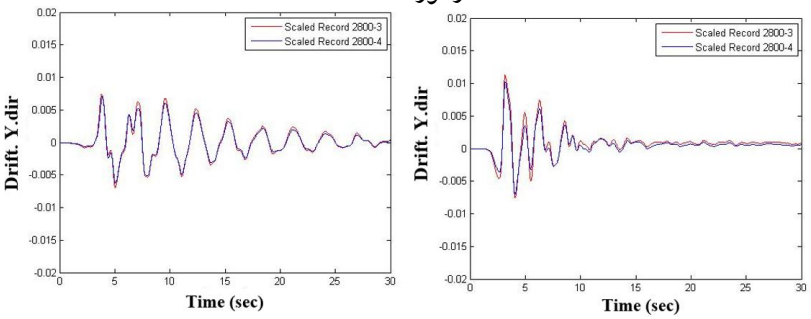
ت پ ب الف

شکل ۱۶. محل و آرایش تشکیل مفاصل پلاستیک در مدل ۲۰ طبقه با توجه به حدود تعریف شده در Fema 356 ؛ الف) و ب) مدل تحت رکورد مقیاس شده طبس ۱۹۷۸ بر اساس استاندارد ۳-۲۸۰۰ و ٤-۲۸۰۰ ، پ) و ت) مدل تحت رکورد مقیاس شده نورتریج-رینالدی ۱۹۹٤ بر اساس استاندارد ۳-۲۸۰۰ و ٤-۲۸۰۰



ب الف

شکل۱۷. تاریخچه زمانی دریفت طبقه بام مدل ۱۰ طبقه تحت اثر دو رکورد، الف) رکورد بم، ب) رکوردSCE



ب الف

شکل۱۸. تاریخچهٔ زمانی دریفت طبقه بام مدل ۲۰ طبقه تحت اثر دو رکورد، الف) رکورد بم، ب) رکورد SCE

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، بررسی ضرایب مقیاس به‌دست آمده از آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش‌های سوم و چهارم است. هم‌چنین برای بررسی تحلیلی روش مقیاس‌گذاری و ضرایب حاصل از آن، دو سازه ۱۰ و ۲۰ طبقه با اسکلت قاب صلب لوله‌ای دسته شده با پلان مشابه، انتخاب و طراحی شد. با استفاده از تحلیل‌های تاریخچهٔ زمانی غیرخطی، پارامترهای متناظر و مشابه پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مذکور، ارزیابی و مقایسه شدند. بررسی نتایج حاصل از این پژوهش با تمرکز بر دو پارامتر پاسخ تغییرمکان و دریفت طبقات انجام شد. نتایج به‌دست آمده با در نظر گرفتن ضوابط دو ویرایش آیین‌نامه ۲۸۰۰، گویای آن است که ضرایب مقیاس بر اساس ویرایش چهارم به‌میزان چشم‌گیری کوچک‌تر از ضرایب مقیاس به‌دست آمده از ویرایش سوم هستند. این موضوع تأثیر به‌سزایی بر ارزیابی دامنهٔ تغییرات پارامترهای پاسخ لرزه‌ای و نیز قضاوت درباره ویژگی‌های عمل‌کرد لرزه‌ای غیرخطی اسکلتهای مقاوم ساختمان‌های فولادی می‌گذارد.

بررسی عمومی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مقادیر عددی پارامتر دریفت طبقات سازه‌هایی که بر اساس آیین‌نامه ٤-۲۸۰۰ ارزیابی شده‌اند در مقایسه با تعریف مقیاس‌گذاری بر اساس آیین‌نامه ۳-۲۸۰۰ دچار یک کاهش نسبی تا حدود ۳۰ درصد می‌شوند. هم‌چنین روند پدیدار شدن و افزایش تغییرات در مقادیر محاسبه شده ضرایب مقیاس و پیرو آن حصول پراکندگی و تفاوت بیش‌تر میان پارامترهای متناظر پاسخ لرزه‌ای، در خصوص رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک نسبت به رکوردهای حوزه دور مشخص‌تر است.

شایسته است که در روش مقیاس‌گذاری رکوردهای حوزهٔ نزدیک حاوی پالس‌های پردامنه و بلندمدت سرعت و نیز اسپایک‌های پرانرژی شتاب، به معیارهای مشخصه دیگری نظیر PGV و نسبت انرژی آزاد شده در واحد زمان نیز توجه شود. روش مقیاس‌گذاری آیین‌نامه ۲۸۰۰ بر اساس آنالیز آماری طیف ترکیبی پاسخ شتاب دو مؤلفه LN و TR مربوط به رکوردهای زلزله استوار است. بر اساس نتایج حاصل از عمل‌کرد سازه‌های مطالعاتی در حوزهٔ رفتار غیرخطی ملاحظه می‌شود که روند تشکیل مکانیزم مفاصل پلاستیک در حوزه‌های میانی و فوقانی سازه‌های تحلیل شده تحت اثر ویرایش سوم آیین‌نامه ۲۸۰۰، دارای شدت بیش‌تری است و از حدود عمل‌کردی ایمنی جانی و آستانه فروریزش فراتر رفته است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

بنابراین سازه‌های مطالعاتی که تحت اثر رکوردهای مقیاس شده با ویرایش چهارم آیین‌نامه ارزیابی شده‌اند، آسیب کم‌تری را متحمل شده‌اند، در نتیجه اسکلت مقاوم سازه دیرتر به ناپایداری دینامیکی محتمل می‌رسد. بدین لحاظ توجه به پارامترهای روش مقیاس‌گذاری (ویرایش‌های سوم و چهارم) اهمیت به‌سزایی دارد. هم‌چنین تغییرات در مقادیر ضرایب مقیاس و پیرو آن در پاسخ‌های نتیجه شده برای بیشینه تغییر مکان و دریفت طبقات مدل‌های مطالعاتی، تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک نسبت به رکوردهای حوزهٔ دور مشخص‌تر است. این در حالی است که روند یاد شده برای اعداد برش پایه لرزه‌ای در هر دو مدل ۱۰، ۲۰ طبقه ملاحظه نمی‌شود. توضیح آن که میزان تغییرات مقادیر برش پایه لرزه‌ای تحت رکورد حوزه دور نسبت به رکوردهای حوزه نزدیک حدود ٦ تا ۱۳ درصد بزرگ‌تر است.

منابع

1. Kappos A.J., Kyriakakis P., "A Re-evaluation of scaling techniques for natural records", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 20, (2000) 111–123.
2. Gioncu V., Mazzolani F.M., "Influence of earthquake types on the design of seismic resistant steel structures I, challenges for new design approaches", STESSA Conference, Yokohama, Japan (2006).
3. Gioncu V., Mazzolani F.M., "Influence of earthquake types on the design of seismic resistant steel structures II, structural responses for different earthquake types", STESSA Conference, Yokohama, Japan (2006).
4. Jahed-Shiran. A., Azhdarifar. M., Meshkat-Dini. A., "Assessing the Performance of Steel Bundled-tube Rigid Frames under Records Scaled Based on the Third and Fourth Editions of The Iranian seismic code 2800", International Conference on Civil Engineering Architecture and Urban Infrastructure, Iran, Tabriz (2015).
5. Khaloo A.R., Khosravi H., Hamidi Jamnani H., Nonlinear Interstory Drift Contours for Idealized Forward Directivity Pulses using, "Modified Fish-Bone", Models, Vol. 18, No. 5 (2015) 603-627.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

6. Krawinkler H., "Importance of Good Nonlinear Analysis", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 15 (2006) 515-531.

7. Ahmadi A., Azhdarifar M., Meshkat-Dini A., "A Study on the Effects of the Frame Modulation Changes in the Seismic Response Parameters of Bundled Tube Structures under Near-Field Records", International Conference on Civil Engineering Architecture and Urban Infrastructure, Iran, Tabriz (2015).

8. Sofi M., Hutchinson G.L., Duffield C., "Review of Techniques for Predicting the Fundamental Period of Multi-Story Buildings: Effects of Nonstructural", International Journal of Structural Stability and Dynamics Components, Vol. 15, No. 2, DOI: 10.1142/S0219455414500394 (2015).

9. Azhdarifar M, Meshkat-Dini A, Sarvghad Moghadam A., "Evaluation of Seismic Response of Tall Buildings with Framed Tube Skeletons in High Seismic Areas", 7th Int. Conf. Seismology and Earthquake Engineering (SEE7), Tehran, Iran (2015).

۱۰. اژدری‌فر، م.، مشکوه‌الدینی الف.، *مطالعه پارامترهای پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های میان مرتبه فولادی با اسکلت قاب لوله‌ای تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک گسل*، نشریه علمی پژوهشی سازه و فولاد، ۱۳۹۵ (پذیرفته شده برای چاپ).

11. Gunel M.H., Ilgin H.E., "A proposal for the classification of structural systems of tall buildings", Building and Environmnt, Vol. 42, 2667-2675 (2007).

12. Li Q.S., Fan H., "Seismic analysis of the world’s tallest building, Constructional Steel Research, Vol. 65 (2009) 1206-1215.

13. Movahed H., Meshkat-Dini A., Tehranizadeh M., "Seismic evaluation of steel special moment resisting frames affected by pulse type ground motions", Asian Journal of Civil Engineering (BHRC), Vol. 15, No. 4 (2014) 575-585.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]

14. Zaghi A.E., Soroushian S., Itani A., Maragakis E.M., Pekcan G., Mehrraoufi M., "Impact of column-to-beam strength ratio on the seismic response of steel MRFs", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 13 (2014) 635-652.

15. Azhdarifar M., Meshkat-Dini A., Sarvghad Moghadam A., "Assessment of Seismic response of Mid-Rise Steel Buildings with Structural Configuration of Framed Tube Skeletons", 7th Int. Conf. Seismology and Earthquake Engineering (SEE7), Tehran, Iran (2015).

١٦. آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ٢٨٠٠)، ویرایش سوم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، وزارت مسکن و شهرسازی (١٣٨٩).

١٧. مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث دهم: طرح و اجرای ساختمان های فولادی، تهران (١٣٨٧).

١٨. آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله(استاندارد ٢٨٠٠)، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، وزارت مسکن و شهرسازی (١٣٩٣).

١٩. مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث ششم: بارهای وارده بر ساختمان، نشر توسعه ایران، تهران، (١٣٩٢).

20. FEMA 356, Federal Emergency Management.

21. PEER Ground Motion Database, http://peer.berkeley.edu/.

22. CSI (2010) Analysis reference manual for Sap2000, Berkeley-California, USA.

23. CSI (2007) PERFORM3D-structural analysis software, Berkeley-California, USA.

24. Chang S.Y., "Nonlinear evaluations of unconditionally stable explicit algorithms", Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol. 8, No. 3 (2009) 329-340.

25. Chang S.Y., "Accuracy of Time History Analysis of Impulses", Journal of Structural Engineering, Vol. 129, No. 129 (2009) 357-372.

٢٦. جاهدشیران آ.، *نگرش تحلیلی بر روش مقیاس‌گذاری رکوردهای حوزهٔ نزدیک در توصیف عملکرد لرزه‌ای سااختمان‌های بلند*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خوارزمی تهران (١٣٩٤).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.8.6]