بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تبریز

دانشکده فنی- مهندسی عمران

گروه سازه

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته ی عمران گرایش زلزله

عنوان

تهیه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک بر مبنای خرابی

استاد راهنما

دکتر سامان یغمایی‌سابق

استاد مشاور

دکتر یوسف حسین‌زاده

پژوهشگر

سحر مکارمی

دی ماه ۱۳۹۳

تقدیر و تشکر:

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق اتمام این پایان نامه را بر من عطا نمود.

از استاد راهنمای گرامی جناب دکتر سامان یغمایی سابق نهایت تشکر و قدردانی را دارم چراکه انجام این تحقیق میسر نبود مگر با راهنمایی های ارزشمند ایشان که در تمامی مراحل، با نظرات و رهنمودهای ارزنده شان، اینجانب را در دست یابی و ارائه هرچه بهتر مطالب یاری نمودند.

از استاد مشاور گرامی، جناب دکتر یوسف حسین زاده که از نظرات شان در مراحل انجام پروژه بهره مند شده ام، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از پدر و مادر عزیزم، همچنین از برادر و خواهر مهربانم که در طی سال های تحصیل، با همراهی و پشتیبانی بی شائبه شان بی ادعا در کنار من بوده اند و مرا همواره به تلاش بیشتر در نیل به اهدافم تشویق نموده اند، بی نهایت سپاسگزارم.

در پایان از همراهی دوستان عزیزم خانم ها مهندس مونا شعاعی، لعیا میرزاندی، مهتا محمدی و شیما مکارمی که همیشه مشوق اینجانب بوده و از هیچ حمایتی دریغ نکرده اند صمیمانه سپاسگذاری کرده و آرزوی سلامتی و موفقیت برای تمام عزیزانم در تمام مراحل زندگی دارم.

نام خانوادگی دانشجو: مکارمی **نام:** سحر

عنوان پایان‌نامه: تهیه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک بر مبنای شاخص خرابی

استاد راهنما: دکتر سامان یغمایی‌سابق

استاد مشاور: دکتر یوسف حسین‌زاده

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی عمران **گرایش:** مهندسی زلزله **دانشگاه:** تبریز

دانشکده: فنی-مهندسی عمران

تاریخ دفاع: ۱۳۹۳/۱۰/۳۰ **تعداد صفحات:** ۸٤

کلید واژه‌ها: طیف پاسخ غیرالاستیک، شاخص خرابی، عملکرد سازه، مدت دوام حرکت زمین

چکیده:

در روش طراحی براساس عملکرد، برای بیان بهتر عملکرد سازه می‌توان نمادی از خسارت سازه مانند جابجایی، نیرو و یا شاخص خرابی را استفاده کرد. یکی از مهم‌ترین اهداف طراحی بر مبنای عملکرد، کاهش خسارت‌های پرهزینه است. جهت کاهش خسارت‌های پرهزینه توصیه می‌شود که آیین‌نامه‌ها اثر مشخصه‌های حرکت زمین ازجمله مدت دوام را در تعیین عملکرد و به‌طورکلی در روش‌های خود در نظر بگیرند. مقاومت طراحی به‌عنوان یک پارامتر اصلی طراحیست که وابسته به عملکرد سازه می‌باشد و عموماً بدون در نظر گرفتن اثر مدت دوام در اکثر آیین‌نامه‌ها مطرح شده است. در این تحقیق به تهیه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک بر مبنای شاخص خرابی با در نظر گرفتن اثر مدت دوام حرکت زمین پرداخته شده است. بدین منظور، ابتدا اثر مدت دوام به‌صورت تحلیلی و با استفاده از روشی مبتنی بر انرژی برروی ضریب شکل‌پذیری اعمال شده و سپس ضرایب کاهش مقاومت بر مبنای شاخص خرابی، R_{D_s}، برای سطوح عملکرد (سطوح خرابی) و ضرایب شکل-پذیری مختلف محاسبه شده‌اند. طیف‌های R_{D_s} برای ۲۵۰ رکورد مربوط به ۳۰ زلزله و به‌ازای ٤٤

سازه‌ی یک درجه‌ی آزادی با پریود ۰/۰۵ تا ٤/۰ ثانیه، پنج شاخص خرابی ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۰/۸ و ۱/۰ و چهار سطح شکل‌پذیری ۲، ٤، ٦ و ۸ تهیه شده‌اند. با بررسی میزان اختلاف بین طیف پاسخ غیرالاستیک بر مبنای شاخص خرابی با و بدون اعمال اثر مدت دوام، مشاهده می‌شود که اثر مدت دوام با افزایش ضریب شکل‌پذیری و سطح خرابی بیشتر می‌شود. همچنین با بررسی اثر نوع ساختگاه برروی طیف‌های R_{D_s} مشاهده می‌شود که اثر رکوردهای مربوط به ساختگاه‌های سخت در محدوده‌ی پریودهای کوتاه، به‌ویژه برای ضرایب شکل‌پذیری و شاخص‌های خرابی بالاتر، قابل ملاحظه می‌باشد.

فهرست مطالب

فصل اول: بررسی منابع ۱

فصل دوم: مفاهیم شاخص خرابی و مدت دوام ۱٤

۲-۱. مفهوم شاخص خرابی ۱۵

۲-۱-۱. شاخص‌های خرابی غیرتجمعی ۱٦

۲-۱-۲. شاخص‌های خرابی تجمعی ۱۷

۲-۲. سطوح عملکرد و محدوده‌ی شاخص خرابی ۲۰

۲-۳. مفهوم مدت دوام ۲۲

فصل سوم: مواد و روش‌ها ۲٦

۳-۱. فرضیات تحقیق ۲۷

۳-۱-۱. مدل‌های سازهای ۲۷

۳-۱-۲. شاخص خرابی ۲۸

۳-۱-۳. مدت دوام ۲۹

۳-۲. رکوردهای انتخابی ۲۹

۳-۳. معرفی نرم‌افزار ۳٤

۳-٤. نحوه‌ی اعمال اثر مدت دوام و تهیه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک ۳۷

فصل چهارم: نتایج و بحث ٤٤

٤-۱. ارائه‌ی نتایج ٤۵

٤-۲. طیف پاسخ غیرالاستیک $\boldsymbol{R_D}$ ۵۱

٤-۳. طیف پاسخ غیرالاستیک $\boldsymbol{R_{D_s}}$ ۵٦

٤-٤. بررسی اثر مدت دوام‌های کوتاه، متوسط و طولانی ۵۸

٤-۵. تأثیر تعداد رکوردها ٦٤

٤-٦. بررسی اثر ساختگاه ٦۷

٤-۷. مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده با مطالعات قبلی ۷۰

٤-۸. جمع‌بندی ۷٦

٤-۹. پیشنهادهایی برای پژوهشه‌ای آتی ۷۸

منابع و مراجع ۷۹

فهرست اشکال

شکل ۱-۱. مقایسه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک مطالعات مختلف: (a) $\mu_u = 3$ و (b) $\mu_u = 5$ [۱۹] ۱۰

شکل ۳-۱. جزئیات مدل هیسترزیس استفاده شده ۲۸

شکل ۳-۲. نمودار توزیع بزرگی–فاصله–مدت دوام رکوردهای انتخابی: (a) بزرگی–فاصله، (b) مدت دوام–فاصله، (c) مدت دوام–بزرگی ۳۱

شکل ۳-۳. مقایسه‌ی طیف‌های R_D حاصل از کد مطالعه‌ی حاضر و مطالعه‌ی Lu and Wei: (a) El Centro-NS (1940 Imperial Valley earthquake) و (b) Shin Osaka-00 (1995 Kobe earthquake) ۳۶

شکل ۳-۴. مقایسه‌ی طیف‌های R_D حاصل از کد مطالعه‌ی حاضر و نرم‌افزار Bispec برای زلزله‌ی El Centro-NS .. ۳۶

شکل ۳-۵. روند محاسبه‌ی ضریب R_{D_s} به‌ازای μu و Dی مشخص ۴۳

شکل ٤-۱. طیف R_{D_s} برای زلزله‌های: (a) Kobe، (b) El Centro-NS و (c) Landers و به‌ازای $\mu_u = 4$ ٤٦

شکل ٤-۲. مقایسه‌ی طیف R_D با و بدون اعمال اثر مدت دوام برای زلزله‌ی Kobe و به‌ازای $\mu_u = 4$ ٤٨

شکل ٤-۳. مقایسه‌ی طیف R_D با و بدون اعمال اثر مدت دوام برای زلزله‌ی El Centro-NS و به‌ازای $\mu_u = 4$ ٤٩

شکل ٤-٤. مقایسه‌ی طیف R_D با و بدون اعمال اثر مدت دوام برای زلزله‌ی Landers 1992 و به‌ازای $\mu_u = 4$ ٥٠

شکل ٤-٥. بررسی دقت رابطه‌ی پیشنهادی Lu and Wei برای زلزله‌ی Coyote Lake و به‌ازای $\mu_u = 4$ ٥٢

شکل ٤-٦. بررسی دقت رابطه‌ی پیشنهادی Lu and Wei برای زلزله‌ی Coyote Lake و به‌ازای $\mu_u = 8$ ٥٣

شکل ٤-۷. بررسی دقت رابطه‌ی پیشنهادی Lu and Wei برای زلزله‌ی Landers و به‌ازای $\mu_u = 4$ ٥٤

شکل ٤-۸. بررسی دقت رابطه‌ی پیشنهادی Lu and Wei برای زلزله‌ی Landers و به‌ازای $\mu_u = 8$ ٥٥

شکل ٤-۹. طیف R_{D_s} میانگین ۲۵۰ رکورد ٥٧

شکل ٤-۱۰. حداکثر مقادیر اختلاف بین R_{D_s} و R_D در اثر اعمال مدت دوام مربوط به $T = 3\ sec$ ٥٧

شکل ٤-۱۱. مقایسه‌ی طیف R_{D_s} مربوط به گروه‌های مختلف مدت دوام با طیف R_D به‌ازای $\mu_u = 2$ ٦٠

شکل ٤-۱۲. مقایسه‌ی طیف R_{D_s} مربوط به گروه‌های مختلف مدت دوام با طیف R_D به‌ازای $\mu_u = 4$ ٦١

شکل ٤-۱۳. مقایسه‌ی طیف R_{D_s} مربوط به گروه‌های مختلف مدت دوام با طیف R_D به‌ازای $\mu_u = 6$ ٦٢

شکل ٤-۱٤. مقایسه‌ی طیف R_{D_s} مربوط به گروه‌های مختلف مدت دوام با طیف R_D به‌ازای $\mu_u = 8$ ٦٣

شکل ٤-۱٥. مقادیر اختلاف R_{D_s} مربوط به میانگین گروه‌های مختلف (با تعداد رکوردهای ۵۰ تا ۲۵۰) نسبت به R_{D_s} گروه مبنا به‌ازای پریودهای مختلف ٦٦

شکل ٤-۱٦. طیف میانگین R_{D_s} برای گروه ساختگاه‌های مختلف: (a) $\mu_u = 4$ و (b) $\mu_u = 6$ ٦٨

شکل ٤-۱۷. نمودار توزیع رکوردها براساس مدت دوام و ضریب av برای ساختگاه‌های مختلف ٦٩

شکل ٤-۱۸. طیف نرمال مربوط به ساختگاه‌های مختلف: (a) $\mu_u = 4$ و (b) $\mu_u = 6$ ٦٩

شکل ٤-۱۹. مقایسه‌ی طیف R_{D_s} با مطالعات قبلی به‌ازای $\mu_u = 4$ و مدت دوام‌های: (a) ۱۰، (b) ۲۰ و (c) ٤٠ ثانیه ۷۳

شکل ٤-۲۰. مقایسه‌ی طیف R_{D_s} با مطالعات قبلی به‌ازای $\mu_u = 8$ و مدت دوام ۲۰ ثانیه ۷۵

فهرست جداول

جدول ۱-۱. ضرایب پیشنهادی Lai and Biggs برای محاسبه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک ٤
جدول ۱-۲. مقادیر پیشنهادی T^* و R^* برای محاسبه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک [١٤]..... ٦
جدول ۱-۳. پارامترهای مورد نیاز محاسبه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک [١٦]..... ٧
جدول ۲-۱. محدوده‌ی شاخص خرابی برای سطوح عملکرد مختلف [٤٧, ٤٨]..... ٢١
جدول ۳-۱. توزیع رکوردها براساس مدت دوام ٣١
جدول ۳-۲. مشخصات کل رکوردهای انتخابی ٣٢
جدول ٤-۱.مشخصات رکوردهای انتخابی جهت بررسی اعمال اثر مدت دوام..... ٤٥
جدول ٤-۲. مشخصات رکوردهای انتخابی جهت بررسی دقت رابطه‌ی پیشنهادی Lu and Wei ٥١
جدول ٤-۳. توزیع رکوردها براساس مدت دوام در گروه‌های مختلف ٦٥

مقدمه

با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی سازه‌ها در برابر تحریک‌های قوی، نیاز به تعیین مقاومت حداقل معینی در طراحی است که این مسأله مستلزم تحلیل غیرخطی (یا غیرالاستیک) و معرفی مفهوم شکل-پذیری می‌باشد. تهیه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک، یک روش معمول برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی سازه در طراحی است که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش متداول برای تهیه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک، استفاده از ضریب کاهش مقاومت به منظور کاهش طیف طراحی الاستیک به سطح مقاومت طراحی غیرالاستیک است. ضریب کاهش مقاومت به عوامل مختلفی بستگی دارد که رابطه‌ی این ضریب با شکل‌پذیری یک رابطه‌ی فیزیکی صریح است.

پس از معرفی مفهوم طیف پاسخ غیرالاستیک توسط Veletsos et al. [۱]، محققین روابط متعددی را به‌منظور تعیین ضریب کاهش مقاومت پیشنهاد کردند. این روابط عموماً به‌صورت تابعی از ضریب شکل‌پذیری و پریود سازه بیان شده‌اند (روابط $R\mu$-μ-T). تجربه‌ی زلزله‌های اخیر نشان داد که علیرغم تلاش‌های چندین ساله‌ی محققان، هم‌چنان خسارات قابل توجه و تلفات جانی ناشی از زلزله در بیشتر بخش‌ها ادامه دارد. گرچه بسیاری از ساختمان‌های طراحی شده طبق آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای مدرن در طول زلزله دچار فروپاشی نمی‌شوند، ولی سطح خرابی به‌وجود آمده بیش از حد انتظار است. در پاسخ به نگرانی‌های روزافزون در مورد ضرر و زیان ناشی از خرابی ساختمان‌ها، مفهوم طراحی لرزه‌ای براساس عملکرد (PBSD) تعریف شده است [۲-٤]. در چارچوب طراحی براساس عملکرد، لازم است اهداف طراحی چندگانه به‌طور صریح در قالب سطوح عملکرد مناسب و سطوح خطر زلزله‌ی قابل انتظار در نظر گرفته شوند. در این مسیر یکی از مشکلات اصلی، تعریف خرابی سازه‌ای و همچنین تعریف یک روش مؤثر برای در نظر گرفتن آن در طراحی لرزه‌ای است. با

بیان عملکرد سازه به‌عنوان نمادی از خرابی سازه مانند جابجایی، نیرو و یا شاخص خرابی می‌توان خرابی سازه‌ای را در طراحی لحاظ کرد.

خرابی سازه خود متأثر از عواملی از قبیل خرابی تجمعی، توزیع خرابی سازه‌ای، مود گسیختگی المان‌ها، تعداد چرخه‌ها و مدت دوام زلزله می‌باشد. در میان این عوامل مدت دوام زلزله پارامتریست که وابستگی تعداد چرخه‌های غیرالاستیک سازه و در نتیجه خرابی تجمعی به آن توسط محققین زیادی [۵-۹] اثبات شده است. با این وجود اکثر آیین‌نامه‌های طراحی اثر آن را به‌طور صریح در مقررات خود اعمال نکرده‌اند. یکی از روش‌های اعمال اثر مدت دوام در طراحی، می‌تواند اعمال آن در تعیین سطوح عملکرد/خرابی سازه باشد. در این میان ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر شاخص خرابی که برای سطوح عملکرد (سطوح خرابی) مختلف تعریف می‌شود، می‌تواند به‌عنوان پارامتری مؤثر در طراحی انتخاب شود و با اعمال اثر مدت دوام برروی این ضرایب، اثر مدت دوام در طراحی لحاظ شود.

هدف اصلی این پژوهش تهیه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک بر مبنای خرابی با در نظر گرفتن اثر مدت دوام است. همچنین اثر عواملی ازجمله تعداد رکوردهای استفاده شده و نوع ساختگاه برروی طیف پاسخ غیرالاستیک مبتنی بر شاخص خرابی مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به‌ذکر است که در این پژوهش اثر مدت دوام به‌صورت تحلیلی برروی طیف پاسخ غیرالاستیک مبتنی بر شاخص خرابی بررسی شده است.

این پایان‌نامه در چهار فصل نگارش شده است. در فصل اول، به مروری بر مطالعات انجام شده در مورد طیف پاسخ غیرالاستیک پرداخته شده است. در فصل دوم تعریف مختصری از شاخص خرابی و مدت دوام ارائه شده است. در فصل سوم به بیان مشخصات رکوردهای انتخابی، مراحل

انجام پژوهش و فرضیات تحقیق پرداخته شده است. در فصل چهارم ارائه‌ی نتایج و بحث برروی آن-ها و همچنین جمع‌بندی کلی ارائه شده است.

فصل اول:

بررسی منابع

مفهوم طیف پاسخ غیرالاستیک برای اولین بار توسط ولتسوس و همکاران در سال ۱۹٦۵ معرفی شد. در این راستا تحقیقات و مطالعات گسترده‌ای انجام شده است و طیف‌های پاسخ غیرالاستیک به صورت طیف‌های پاسخ جابجایی تسلیم، مقاومت ثابت، شکل‌پذیری ثابت، ضریب کاهش مقاومت، شتاب غیرالاستیک و جابجایی تسلیم غیرالاستیک ارائه شده‌اند که متداول‌ترین آن‌ها، استفاده از ضریب کاهش مقاومت به منظور کاهش طیف طراحی الاستیک به سطح مقاومت طراحی غیرالاستیک می‌باشد. روابط متعددی در مطالعات برای محاسبه‌ی ضرایب کاهش مقاومت پیشنهاد شده است که در ادامه به توضیح برخی از این روابط پرداخته شده است.

براساس طیف پاسخ الاستیک و غیرالاستیک زلزله‌ی السنتروی سال ۱۹٤۰، محققین سه ناحیه‌ی طیفی مختلف مشاهده کردند: ۱) محدوده‌های طیفی با فرکانس پایین و متوسط که سیستم‌های الاستیک و غیرالاستیک تقریباً جابجایی ماکزیمم یکسانی دارند؛ ۲) محدوده‌ی فرکانسی بسیار بالا که سیستم‌های الاستیک و غیرالاستیک نیروی تقریباً یکسانی دارند؛ و ۳) محدوده‌ی فرکانسی بالا که در آن قانون بقای انرژی قابل استفاده است در صورتی که دیاگرام نیرو-تغییرشکل سیستم الاستیک تحت بارگذاری یکنواخت مشابه رفتار سیستم الاستوپلاستیک کامل تحت بارگذاری چرخه‌ای باشد. این مشاهدات منجر به ارائه‌ی روش‌هایی برای تهیه‌ی طیف غیرالاستیک با استفاده از طیف الاستیک شد که شامل ضرایب کاهش مختلفی برای هر یک از نواحی طیفی می‌باشد.

در سال ۱۹٦۹، Newmark and Hall [۱۰] ضرایب کاهش مقاومت، R_μ، را به‌صورت روابط زیر برای محدوده‌های مختلف پریود ارائه کردند.

$$R_\mu = 1 \qquad \text{for} \quad 0 \le T < \frac{T_1}{10} \tag{۱-۱}$$

$$R_\mu = \sqrt{2\mu - 1}\left[\frac{T_1}{4T}\right]^{2.513\, log\left[\frac{1}{\sqrt{2\mu-1}}\right]} \qquad \text{for} \quad \frac{\mathrm{T}_1}{10} \le T < \frac{T_1}{4} \tag{۲-۱}$$

$$R_\mu = \sqrt{2\mu - 1} \qquad \text{for} \quad \frac{\mathrm{T}_1}{4} \le T < T_1' \tag{۳-۱}$$

$$R_\mu = \frac{T\mu}{T_1} \qquad \text{for} \quad T_1' \le T < T_1 \tag{٤-۱}$$

$$R_\mu = \mu \qquad \text{for} \quad T_1 \le T < T_2 \tag{۵-۱}$$

$$R_\mu = \mu \qquad \text{for} \quad T_1 \le T < 10.0\ s \tag{٦-۱}$$

که در روابط فوق، μ ضریب شکل‌پذیری، T پریود سازه و T_1، T_1' و T_2 پریودهای حدی هستند که با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$T_1 = 2\pi\frac{\varphi_{ev}\, V}{\varphi_{ea}\, A} \tag{۷-۱}$$

$$\mathrm{T}_1' = \mathrm{T}_1\frac{\mu}{\sqrt{2\mu - 1}} \tag{۸-۱}$$

$$T_2 = 2\pi\frac{\varphi_{ed}\, D}{\varphi_{ev}\, V} \tag{۹-۱}$$

در روابط فوق A، V و D به‌ترتیب ماکزیمم شتاب، سرعت و جابجایی زمین هستند و φ_{ea}، φ_{ev} و φ_{ed} به‌ترتیب ضرایب تشدیدی هستند که با ضرب آن‌ها در ماکزیمم پارامترهای حرکت زمین، مقادیر طیف طراحی الاستیک در ناحیه‌های شتاب، سرعت و جابجایی به‌دست می‌آید. برای تهیه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک با استفاده از روابط فوق، معمولاً از مقادیر میانگین توصیه شده برای ضرایب V/A

و D/V^2 و مقادیر پیشنهاد شده برای ضرایب تشدید φ_{ea}، φ_{ev} و φ_{ed} به‌ازای ضریب میرایی ٪۵ استفاده می‌شود.

در سال ۱۹۸۰، Lai and Biggs [۱۱] طیف پاسخ غیرالاستیک طراحی را بر مبنای میانگین طیف غیرالاستیک ۲۰ زلزله‌ی مصنوعی پیشنهاد دادند. طیف پاسخ غیرالاستیک پیشنهاد شده توسط این محققین با کاهش دادن طیف الاستیک توسط ضرایب غیرتشدیدی در هر سه ناحیه‌ی طیفی حاصل می‌شود. ضریب کاهش مقاومت متناظر با این ضرایب غیرتشدیدی پیشنهاد شده با استفاده از رابطه‌ی ۱-۱۰ محاسبه می‌شود.

$$R_\mu = \alpha + \beta(\log T) \qquad (۱۰-۱)$$

که ضرایب α و β وابسته به ضریب شکل‌پذیری و پریود سازه می‌باشند و مقادیر آن‌ها در جدول ۱-۱ به‌ازای شکل‌پذیری‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۱-۱. ضرایب پیشنهادی Lai and Biggs برای محاسبه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک

محدوده‌ی پریود	ضریب	$\mu_u = 2$	$\mu_u = 3$	$\mu_u = 4$	$\mu_u = 5$
$0.1 \le T \le 0.5\ s$	α	۱/٦٧٩١	۲/۲۲۹٦	۲/٦٥٨٧	۳/۱۱۰۷
	β	۰/۳۲۹۱	۰/۷۲۹٦	۱/۰٥٨٧	۱/٤۳۰۷
$0.5 \le T \le 0.7\ s$	α	۲/۰۳۳۲	۲/۷۷۲۲	۳/۳۷۰۰	۳/۸۳۳٦
	β	۱/٥۰٥٥	۲/٥۳۲۰	۳/٤۲۱۷	۳/۸۳۲۳
$0.7 \le T \le 4.0\ s$	α	۱/۸٤۰۹	۲/٤۸۲۳	۲/۹۸٥۳	۳/٤۱۸۰
	β	۰/۲٦٤۲	۰/٦٦۰٥	۰/۹۳۸۰	۱/۱٤۹۳

در سال ۱۹۷۹، Riddell and Newmark [۱۲] مجموعه‌ی کامل‌تری از ضرایب غیرتشدیدی را بر مبنای تحلیل آماری طیف پاسخ غیرالاستیک سیستم‌های الاستوپلاستیک با ٪۲، ٪۵ و ٪۱۰ میرایی و سیستم‌های دوخطی و سیستم‌های با زوال سختی با ٪۵ میرایی و شکل‌پذیری‌های یک تا ده ارائه دادند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که پاسخ‌های حداکثر سیستم‌های الاستوپلاستیک، دوخطی و سیستم‌های با زوال سختی بسیار نزدیک به‌هم بوده و در نتیجه استفاده از طیف پاسخ سیستم الاستوپلاستیک برای تحلیل غیرالاستیک عموماً محافظه‌کارانه است. طیف غیرالاستیک پیشنهاد شده توسط Riddell and Newmark نیز مانند طیف غیرالاستیک پیشنهادی Newmark and Hall [۱۰] با استفاده از ضرایب غیرتشدیدی وابسته به شکل‌پذیری و پریود (ناحیه‌ی طیفی) محاسبه می‌شود.

Elghadamsi and Mohraz در سال ۱۹۸۷[۱۳]، برای اولین بار اثر ساختگاه را برروی ضرایب غیرتشدیدی در نظر گرفتند. آن‌ها طیف پاسخ غیرالاستیک را برای سیستم‌های یک درجه‌ی آزادی با رفتار الاستوپلاستیک، تحت ۵۰ رکورد ثبت شده در ساختگاه آبرفتی و ۲۶ رکورد ثبت شده در ساختگاه سنگی تهیه کردند. عدم وابستگی زیاد ضرایب غیرتشدیدی به شرایط ساختگاهی از نتایج مطالعه‌ی این محققین می‌باشد.

در سال ۱۹۸۹، Riddell et al. [۱٤] مطالعه‌ای مبتنی بر تهیه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک سیستم-های یک درجه‌ی آزادی با رفتار الاستوپلاستیک و میرایی ٪۵ برای مجموعه‌ای از رکوردها انجام دادند. آن‌ها براساس میانگین ضرایب کاهش مقاومت، روابط خطی و ساده‌ی ۱-۱۱ و ۱-۱۲ را برای محاسبه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک پیشنهاد کردند.

$$R_\mu = 1 + \frac{R^* - 1}{T^*}\, T \qquad \text{for} \quad 0 \le T \le T^* \qquad (۱۱-۱)$$

$$R_\mu = R^* \qquad \text{for} \quad T \geq T^* \qquad (۱-۱۲)$$

که در روابط فوق T پریود سازه می‌باشد و مقادیر T^* و R^* برای ضرایب شکل‌پذیری مختلف، متفاوت بوده که جدول ۱-۲ مقادیر این دو پارامتر را به‌ازای شکل‌پذیری‌های ۲ تا ۸ نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲. مقادیر پیشنهادی T^* و R^* برای محاسبه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک [۱٤]

پارامتر	$\mu_u = 2$	$\mu_u = 3$	$\mu_u = 4$	$\mu_u = 5$	$\mu_u = 6$	$\mu_u = 7$	$\mu_u = 8$
R^*	۲/۰	۳/۰	٤/۰	٥/۰	٥/٦	٦/۲	٦/۸
T^*	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/٤	۰/٤	۰/٤	۰/٤

Hidalgo and Arias [۱٥]، براساس ضرایب میانگین کاهش مقاومت پیشنهاد شده توسط Riddell et al [۱٤] رابطه‌ای غیرخطی برای محاسبه‌ی ضرایب کاهش مقاومت ارائه کردند که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$R_\mu = 1 + \frac{T}{kT_0 + \frac{T}{\mu - 1}} \qquad (۱-۱۳)$$

که در آن، T پریود سازه، μ ضریب شکل‌پذیری و kT_0 ضریبی است که مقدار آن برای گروه‌های مختلف حرکت زمین، متفاوت می‌باشد (عموماً $K = 0.1$ و $T_0 = 0.2$ فرض می‌شود).

Nassar and Krawinkler [۱٦]، در مطالعه‌ای پاسخ سیستم‌های یک درجه‌ی آزادی غیرخطی را تحت ۱۵ رکورد ثبت شده در ساختگاه‌های آبرفتی و سنگی ایالات متحده غربی در نظر گرفتند. آن‌ها اثر فاصله‌ی کانونی زلزله و پارامترهای سازه‌ای ازجمله پریود، مقاومت تسلیم، مقدار سخت شوندگی پس از تسلیم و نوع رفتار غیرخطی (دوخطی و زوال سختی) را برروی میانگین ضرایب کاهش مقاومت بررسی کرده و به این نتیجه دست یافتند که فاصله‌ی کانونی و زوال سختی تأثیر چندانی

برروی ضرایب کاهش مقاومت ندارند. Nassar and Krawinkler، با توجه به مقادیر میانگین ضرایب کاهش مقاومت رابطه‌ی ۱-۱٤ را برای تهیه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک پیشنهاد دادند.

$$R_\mu = [c\ (\mu - 1) + 1]^{1/c} \qquad (۱-۱٤)$$

که در آن

$$c(T, \alpha) = \frac{T^a}{1 + T^a} + \frac{b}{T} \qquad (۱-۱۵)$$

که در آن، T پریود سازه، μ ضریب شکل‌پذیری، α نسبت سختی پس از تسلیم به سختی اولیه برحسب درصد و a و b پارامترهایی هستند که با استفاده از جدول ۱-۳ تعیین می‌شوند.

جدول ۱-۳. پارامترهای مورد نیاز محاسبه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک [۱٦]

b	a	α
۰/٤۲	۱/۰۰	۰/۰۰
۰/۳۷	۱/۰۰	۰/۰۲
۰/۲۹	۰/۸۰	۰/۱۰

در سال ۱۹۹۲ .Vidic et al [۱۷]، با استفاده از میانگین ضرایب کاهش مقاومت حاصل از ۲۰ رکورد ثبت شده در ایالات متحده غربی رابطه‌ی ساده‌ای را جهت تهیه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک ارائه کردند. آن‌ها در مطالعه‌ی خود سیستم‌های یک درجه‌ی آزادی با رفتار هیسترزیس دوخطی و رفتار هیسترزیس با زوال سختی (Q-model) را در نظر گرفتند. رابطه‌ی پیشنهادی آن‌ها شامل دو بخش خطی می‌باشد که در بخش اول (پریودهای کوتاه)، R_μ با افزایش پریود به‌شدت افزایش می‌یابد تا زمانی که مقدار آن به عددی برابر یا نزدیک به ضریب شکل‌پذیری برسد و پس از آن در

بخش دوم ثابت باقی می‌ماند. روابط پیشنهادی .Vidic et al به رفتار هیسترزیس و میرایی سیستم بستگی دارد و برای سیستم‌های با رفتار هیسترزیس Q-model و میرایی ٪۵ به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$R_\mu = (\mu - 1)\frac{T}{T_0} + 1.0 \qquad \text{for} \quad T \le T_0 \tag{۱-۱۶}$$

$$R_\mu = \mu \qquad \text{for} \quad T > T_0 \tag{۱-۱۷}$$

که در آن، T پریود سازه، μ ضریب شکل‌پذیری و T_0 پریود حدی است که با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$T_0 = 0.65\,\mu^{0.3}\,T_1 \tag{۱-۱۸}$$

$$T_1 = 2\pi\frac{\varphi_{ev}\,V}{\varphi_{ea}\,A} \tag{۱-۱۹}$$

که در آن، V و A به‌ترتیب ماکزیمم سرعت و شتاب حرکت زمین بوده و مقادیر میانگین ضرایب تشدید φ_{ea} و φ_{ev} مربوط به ۲۰ رکورد استفاده شده برابر با ۲/۵ و ۲/۰ می‌باشد.

Miranda [۱۸]، طی مطالعه‌ای با در نظر گرفتن تعداد زیادی رکورد به مطالعه‌ی اثرات مشخصه-های مختلف حرکت زمین برروی ضرایب کاهش مقاومت پرداخت. وی با تهیه‌ی یک مجموعه‌ی ۱۲٤تایی از رکوردهای زلزله‌های مختلف که در ساختگاه‌های متفاوتی ثبت شده بودند، به بررسی اثر ساختگاه برروی ضرایب کاهش مقاومت پرداخت. Miranda رکوردهای انتخابی را براساس شرایط ساختگاهی به سه گروه تقسیم کرد: رکوردهای ثبت شده برروی ساختگاه سنگی، رکوردهای ثبت شده برروی ساختگاه آبرفتی و رکوردهای ثبت شده برروی ساختگاه خاکی بسیار نرم. وی ضرایب

کاهش مقاومت را به‌ازای شکل‌پذیری‌های ۲ تا ٦ و برای سیستم‌های یک درجه‌ی آزادی با رفتار هیسترزیس دوخطی و ضریب میرایی ٪۵ محاسبه کرده و سپس میانگین ضرایب کاهش مقاومت هر گروه را محاسبه کرد. Miranda، به این نتیجه دست یافت که بر خلاف بزرگی و فاصله‌ی کانونی، نوع ساختگاه تأثیر قابل ملاحظه‌ای برروی ضرایب کاهش مقاومت (به خصوص در ساختگاه‌های خاکی نرم) دارد. وی براساس میانگین ضرایب کاهش مقاومت، رابطه‌ی ساده‌ی ۱-۲۰ را برای محاسبه‌ی طیف پاسخ غیرالاستیک پیشنهاد داد.

$$R_\mu = \frac{\mu - 1}{\varphi} + 1 \geq 1 \qquad (۱-۲۰)$$

که در آن، φ تابعی از ضریب شکل‌پذیری μ و پریود T بوده و برای ساختگاه‌های مختلف با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$\varphi = 1 + \frac{1}{10T - \mu T} - \frac{1}{2T} exp\left[-\frac{3}{2}\left(ln\, T - \frac{3}{5}\right)^2\right] \qquad \text{For rock sites} \qquad (۱-۲۱)$$

$$\varphi = 1 + \frac{1}{12T - \mu T} - \frac{2}{5T} exp\left[-2\left(ln\, T - \frac{1}{5}\right)^2\right] \qquad \text{For alluvium sites} \qquad (۱-۲۲)$$

$$\varphi = 1 + \frac{T_g}{3T} - \frac{3T_g}{4T} exp\left[-3\left(ln\, \frac{T}{T_g} - \frac{1}{4}\right)^2\right] \qquad \text{For soft soil sites} \qquad (۱-۲۳)$$

که در روابط فوق، T_g پریود غالب حرکت زمین می‌باشد.

یک نکته‌ی مشترک موجود در همه‌ی مطالعات اشاره شده این است که به‌ازای یک رکورد مشخص، ضرایب کاهش مقاومت به‌شدت وابسته به پریود سازه و ضریب شکل‌پذیری بوده و وابستگی چندانی به میرایی و رفتار هیسترزیس سازه ندارند. یک مقایسه‌ی کلی بین روابط متعدد