

تأثیر مدل‌سازی رفتار بتن بر پاسخ غیرخطی نوسانگرهای یک درجه آزاد

علیرضا آذربخت^{۱*}، فاطمه معصومیان^۲

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اراک
۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اراک

a-azarbakht@araku.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۳/۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۳/۱۳]

چکیده- مجموعه شامل ۴۶۲۰ سیستم یک درجه آزاد با مشخصات مختلف شامل زمان تناوب، درصد میرایی و متغیرهای تعیین کننده رفتار غیرخطی نماینده سازه‌های بتن مسلح با در نظر گرفتن ناحیه ترک خوردگی اولیه بتن، به همراه دو مجموعه شتاب‌نگاشت معرف حوزه دور و نزدیک در این مطالعه در نظر گرفته شده است. با انجام تحلیل‌های دینامیکی فزاینده- که امروزه گسترش فراوانی یافته است. برای سیستم‌های انتخابی، پاسخ تقاضای شکل پذیری سیستم‌ها در سطوح مختلف شدت لرزه ای محاسبه شده است. سپس نمودارهای بیان کننده رابطه بین سه متغیر ضریب کاهش مقاومت، ضریب شکل پذیری و زمان تناوب در سطوح مختلف شدت لرزه ای ارائه شده است. همچنین با در نظر گرفتن پارامترهای تأثیر گذار بر این روابط، تأثیر هر یک از متغیرها مورد بحث واقع شده است. نتایج نشانگر آن است که زمان تناوب طبیعی سیستم و همچنین مدل‌سازی ترک اولیه در بتن باعث تأثیر قابل ملاحظه در پاسخ‌های غیرخطی نوسانگرها می‌شود.

واژگان کلیدی: ضریب کاهش مقاومت، ضریب شکل پذیری، زمان تناوب، طیف غیر خطی، حوزه دور، حوزه نزدیک

۱- مقدمه

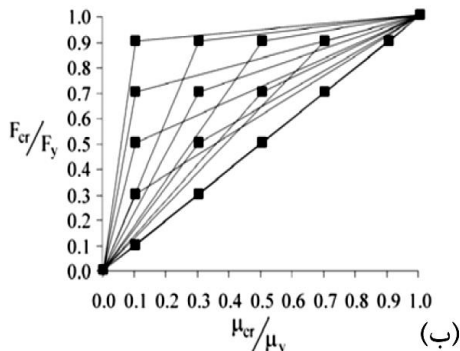
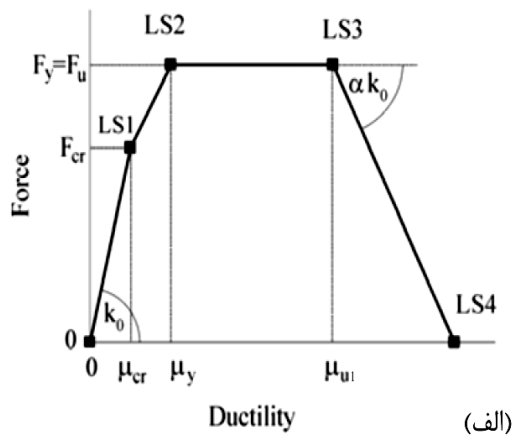
مختلف دوره تناوب، میرایی و نمودار رفتاری انتخاب شده و تحت دو مجموعه نگاشت مختلف شامل زلزله‌های حوزه دور و زلزله‌های حوزه نزدیک قرار گرفته و در پایان طیف‌های غیرخطی استخراج شده است. در ادامه به چگونگی انتخاب سیستم‌های یک درجه آزاد و مشخصات در نظر گرفته شده برای آن‌ها پرداخته شده است. همچنین رکوردهای استفاده شده که شامل ۳۰ نگاشت حوزه دور و ۳۱ نگاشت حوزه نزدیک است معرفی شده و مشخصات آنها ذکر شده است. با استفاده از تحلیل دینامیکی فزاینده^۱ پاسخ غیر خطی سیستم‌های یک درجه آزاد تحت دو گروه زلزله معرفی شده به دست آمده و منحنی‌های تحلیل دینامیکی فزاینده به دست آمده است. با تحلیل این منحنی‌ها، منحنی $R-\mu$ در دوره

سازه‌های بتن مسلح به صورت گسترده‌ای در بیشتر کشورها متداول است. اما رفتار غیرخطی این نوع سازه‌ها کماکان مورد توجه پژوهشگران بوده است. یکی از متداول‌ترین روش‌ها در زمینه پیش‌بینی پاسخ غیرخطی این نوع سازه‌ها، استفاده از طیف‌های غیرخطی است. استفاده از این نوع طیف در بسیاری از آیین نامه‌ها توصیه شده است [۱،۲]. پژوهش‌های متعددی نیز در زمینه پیشنهاد فرمول‌های ساده برای بیان طیف‌های غیرخطی انجام پذیرفته است [۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹] که بیشتر این روابط بر اساس سه متغیر ضریب کاهش مقاومت، ضریب شکل پذیری و زمان تناوب بیان می‌شود. با توجه به مطالعات پیشین در زمینه طیف‌های غیرخطی، در این مقاله مجموعه بزرگی از سیستم‌های یک درجه آزاد با مقادیر

1 Incremental Dynamic Analysis (IDA)

- ۱- یازده حالت دوره تناوب اولیه سیستم به ترتیب برابر $0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2$ ثانیه.
- ۲- سه حالت نسبت میرایی به ترتیب برابر $0.1, 0.3, 0.5$.
- ۳- هفت حالت نسبت μ_{ul}/μ_y برابر $2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$.
- ۴- دو حالت شیب ناحیه کاهش مقاومت (αk_0) برابر 0.5 و 0.05 .
- ۵- پنج حالت نسبت F_{cr}/F_y برابر $0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$.
- ۶- پنج حالت نسبت μ_{cr}/μ_y برابر $0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$.

با ترکیب این حالات و در نظر گرفتن محدودیت برای حالاتی که در آنها $\mu_{cr}/\mu_y \geq F_{cr}/F_y$ است مجموعاً ۶۶۲۰ سیستم یک درجه آزاد تولید می شود که تحت دو گروه زلزله قرار گرفته و تحلیل دینامیکی غیر خطی انجام شده است [۱۱]. تحلیل های دینامیکی به وسیله نرم افزار OpenSees صورت پذیرفته است [۱۲].



شکل (۱): (الف) منحنی رفتاری سیستم های یک درجه آزاد معرف سازه های بتنی با شش پارامتر کنترل کننده. (ب) تمامی حالات ممکن منحنی رفتاری برای نسبت های F_{cr}/F_y و μ_{cr}/μ_y بین ۰ و ۱ [۱۱].

تناوب مشخص به دست آمده و با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف نشان دهنده مدل رفتاری سیستم ها مؤثر بر این رابطه، تأثیر هر کدام از پارامترها بر رابطه $R-\mu$ و رفتار غیر خطی پژوهش شده است.

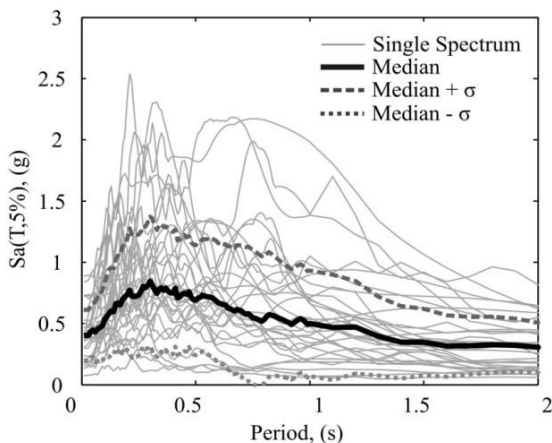
۲- انتخاب سیستم های یک درجه آزاد

در این پژوهش مجموعه بزرگی از سیستم های یک درجه آزاد با مقادیر مختلف دوره تناوب، میرایی و نمودار رفتاری انتخاب شده و تحت دو دسته نگاهت مختلف شامل زلزله های حوزه دور و زلزله های حوزه نزدیک قرار گرفته است. رفتارهای غیر خطی بر اساس پاسخ لرزه ای ساختمان های بتن مسلح شبیه سازی شده است. برای این کار یک نمودار رفتاری چهار قسمتی انتخاب شده تا منحنی رفتاری سیستم های چند درجه آزاد و یک درجه آزاد معادل را شبیه سازی کند. این منحنی رفتاری در شکل ۱ آورده شده است. شکل (الف) به چهار قسمت تقسیم می شود که در قسمت اول رفتار سیستم به صورت الاستیک و خطی تا نقطه ۱ که نقطه ترک خوردگی است ادامه پیدا می کند. در قسمت دوم رفتار خطی از بین می رود تا اینکه در نقطه ۲ تسلیم صورت می گیرد و وارد منطقه غیر خطی می شود. در این نقطه مقدار شکل پذیری $\mu=1$ خواهد بود. رفتار غیر خطی کامل تا نقطه ۳ ادامه پیدا می کند که از این نقطه به بعد نمودار با شیب برابر αk_0 نزول پیدا کرده تا اینکه به مقاومت صفر می رسد.

شکل نمودار رفتاری به وسیله چهار پارامتر کنترل می شود. با تغییر مناسب این چهار پارامتر می توان نمودارهای رفتاری مختلفی را به دست آورد که تقریباً تمامی حالات را پوشش دهد (شکل ۱ ب). پارامترهای سازه ای شامل دوره تناوب و میرایی (متناسب با جرم) فرض می شوند. پارامتر β که سختی باربرداری در مدل هیسترتیک تاکادا [۱۰] است در اینجا برابر مقدار ثابت ۰.۵ فرض می شود.

با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر در نمودار رفتاری سیستم و با تغییر متناسب این پارامترها منحنی های تحلیل دینامیکی فزاینده برای سیستم های یک درجه آزاد در حالت های زیر محاسبه شده است:

پذیری مستقیم برای چهار زلزله متفاوت ثبت شده است و فاصله آن‌ها تا مرکز زلزله کمتر از ۱۶ کیلومتر است. کلیه حرکات زمین طبق آیین نامه NEHRP برای خاک نوع SD یا SC [۱۵] ثبت شده‌اند و به طور یکسان به وسیله Walter Silva برای پایگاه اطلاعاتی PEER تصحیح و پردازش شده است. مشخصات نگاشت‌ها در مرجع [۱۱] و طیف پاسخ الاستیک با میرایی ۵٪ آن در شکل ۳ آورده شده است.



شکل (۳): طیف پاسخ الاستیک با میرایی ۵٪ برای ۳۱ نگاشت زلزله حوزه نزدیک.

۴- تحلیل دینامیکی فزاینده برای نگاشت‌های ثبت شده حوزه نزدیک و حوزه دور

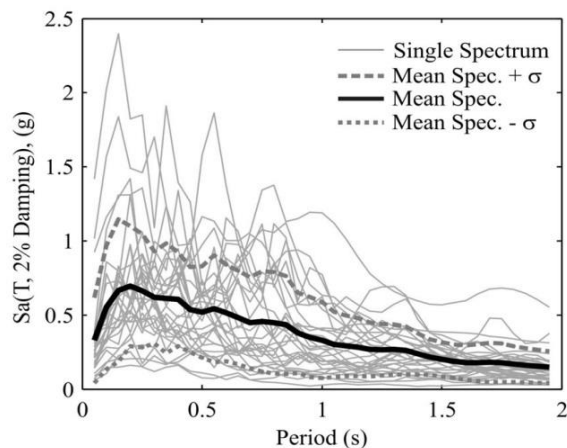
تحلیل‌های دینامیکی فزاینده با استفاده از الگوریتم Hunt & Fill انجام شده است [۱۳]. با در نظر گرفتن یک سیستم خاص با مشخصات تعریف شده آن و همچنین استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، منحنی‌های دینامیکی فزاینده تحت ۳۰ نگاشت حوزه دور و ۳۱ نگاشت حوزه نزدیک حاصل می‌شوند که هر یک از منحنی‌ها دارای ۲۰ نقطه است. این ۲۰ نقطه از تحلیل دینامیکی تحت زلزله‌ای مقیاس شده که ضربی از زلزله اصلی است به دست می‌آیند. بنابراین برای یک سیستم خاص، ۳۰ و ۳۱ منحنی تحلیل دینامیکی فزاینده به ترتیب برای حوزه دور و نزدیک حاصل می‌شوند. تحلیل‌های دینامیکی فزاینده برای نگاشت‌های ثبت شده در حوزه دور نیز مانند تحلیل‌های انجام شده برای نگاشت‌های حوزه نزدیک بوده و تنها تفاوت ناشی از نوع

۳- انتخاب حرکات قوی زمین

برای این پژوهش از دو گروه حرکت ثبت شده زمین استفاده شده که شامل نگاشت‌های حوزه دور و نگاشت‌های حوزه نزدیک است.

۳-۱- نگاشت زلزله‌های حوزه دور

یک مجموعه شامل ۳۰ زلزله حوزه دور، که در بسیاری از پژوهش‌های دیگر نیز مورد استفاده بوده (مانند [۱۳]) که از مجموعه زلزله‌های مرکز تحقیقات مهندسی زلزله پاسیفیک انتخاب شده است [۱]. بزرگای گشتاوری این زلزله‌ها بین ۶٫۵ تا ۶٫۹ ریشتر است و همچنین این زلزله‌ها روی خاک سخت، بدون آثار جهت پذیری در زلزله‌های حوزه نزدیک ثبت شده‌اند. لیست مشخصات این زلزله‌ها در مرجع [۱۳] و طیف آن‌ها در شکل ۲ آورده شده است. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با اینکه بزرگای گشتاوری و فاصله از گسل در محدوده محدودی انتخاب شده است، لیکن پراکندگی قابل توجهی در طیف این زلزله‌ها دیده می‌شود.

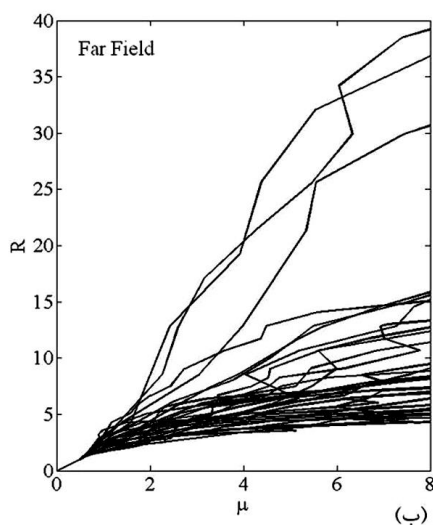
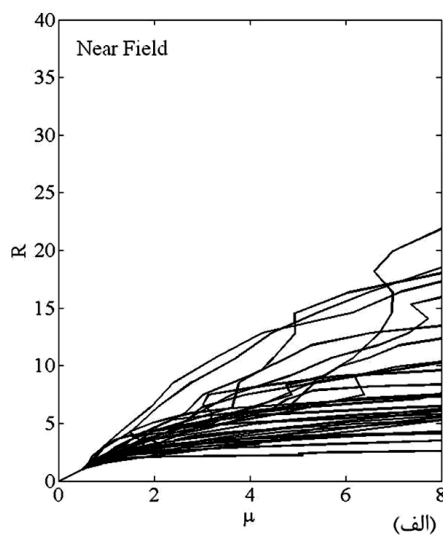


شکل (۲): طیف پاسخ الاستیک با میرایی ۲٪ برای ۳۰ نگاشت زلزله حوزه دور.

۳-۲- نگاشت‌های زلزله‌های حوزه نزدیک

زلزله‌های حوزه نزدیک شامل ۳۱ نگاشت زلزله است که این زلزله‌ها دارای مولفه‌های امتداد لغز بوده و در شرایط جهت

با انجام این روند برای کل ۶۲۰ سیستم با مشخصات تعریف شده مجموعه بزرگی از منحنی‌های $R-\mu$ به دست می‌آید. خلاصه نتایج را می‌توان بر اساس مقادیر میانگین نشان داد. در این پژوهش با در نظر گرفتن مقادیر ثابت برای شکل پذیری (برابر ۱، ۱،۵، ۲، ۲،۵، ۳، ۳،۵، ۴، ۴،۵، ۵، ۵،۵، ۶، ۷، ۷،۵، ۸)، مقادیر میانگین ضریب کاهش مقاومت R محاسبه شده است. به این ترتیب منحنی شکل پذیری ثابت در برابر میانگین ضریب کاهش مقاومت به دست می‌آید. یکی از این منحنی‌ها برای سیستم با مشخصات تعریف شده تحت نگاهت‌های حوزه نزدیک در شکل (۵ الف) و تحت نگاهت‌های حوزه دور در شکل (۵ ب) آورده شده است.



شکل (۵): رابطه $R-\mu$ برای سیستمی با مشخصات $T=1s$ ، $\alpha k_0=0.05$ ، $\mu_{ul}/\mu_y=5$ ، $\mu_{cr}/\mu_y=0.5$ ، $F_{cr}/F_y=0.7$ و میرایی برابر ۳٪ (الف) تحت ۳۱ نگاهت حوزه نزدیک، (ب) تحت ۳۰ نگاهت حوزه دور.

نگاشت‌های استفاده شده است. مشخصات سیستم‌های یک درجه آزاد در نظر گرفته شده، در دو حالت شبیه به هم و منطبق با توضیحات قسمت ۲ است. در این تحلیل‌ها معیار تقاضا، شکل پذیری به دست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی و مقیاس شدت^۳، بیشینه شتاب زمین PGA است. مقیاس شدت PGA را می‌توان به سادگی به مقیاس خطی جدید دیگری تبدیل کرد. این مقیاس جدید شتاب طیفی در دوره تناوب سیستم یک درجه آزاد مورد نظر با میرایی مشخص $S_a(T_1, \zeta)$ در نظر گرفته شده است. دلیل این امر کفایت بیشتر معیار شتاب طیفی در مود اول سازه نسبت به معیار سنتی بیشینه شتاب زمین است. با در نظر گرفتن یک زلزله خاص و ایجاد ۲۰ زلزله مقیاس شده از روی زلزله اصلی مقدار شتاب طیفی سیستم مورد نظر تحت این ۲۰ زلزله مقیاس شده محاسبه می‌شود. این روند برای ۳۱ زلزله اصلی حوزه نزدیک و نیز ۳۰ زلزله اصلی حوزه دور انجام شده و در آخر نمودارهای تحلیل دینامیکی فزاینده با مقیاس شدت جدید $S_a(T_1, \zeta)$ و معیار پاسخ شکل پذیری به دست می‌آید. برای بررسی میزان تاثیر ترک خوردگی اولیه بتن، مقدار ضریب کاهش مقاومت R طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{S_{ae}}{S_{ay}} \quad (1)$$

که در آن S_{ae} مقدار شتاب طیفی خطی در دوره طبیعی سیستم مورد نظر و S_{ay} شتاب تسلیم در سیستم غیر خطی و برابر با $S_{ay} = F_{cr}/m$ است؛ که F_{cr} مطابق با شکل ۱ الف و m معرف جرم سیستم است.

با توجه به رابطه (۱) به سادگی می‌توان در منحنی‌های تحلیل دینامیکی فزاینده مقیاس شدت (IM) برابر $S_a(T_1, 3\%)$ را به ضریب کاهش مقاومت تبدیل کرد. این منحنی‌ها بیانگر رابطه $R-\mu$ در یک دوره تناوب مشخص است. این منحنی‌ها برای سیستم با مشخصات تعریف شده تحت نگاهت‌های حوزه نزدیک در شکل (۴ الف) و تحت نگاهت‌های حوزه دور در شکل (۴ ب) آورده شده است.

2 Demand Measure (DM)
3 Intensity Measure (IM)

زلزله‌های حوزه دور در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل‌ها به خوبی مشاهده می‌شود که تغییر زمان دوره تناوب بر منحنی $R_{mean}-\mu_{constant}$ به میزان قابل توجهی اثر گذاشته به گونه‌ای که می‌توان پارامتر T را مهمترین و تاثیرگذارترین پارامتر در تعیین رابطه $R-\mu$ در نظر گرفت.

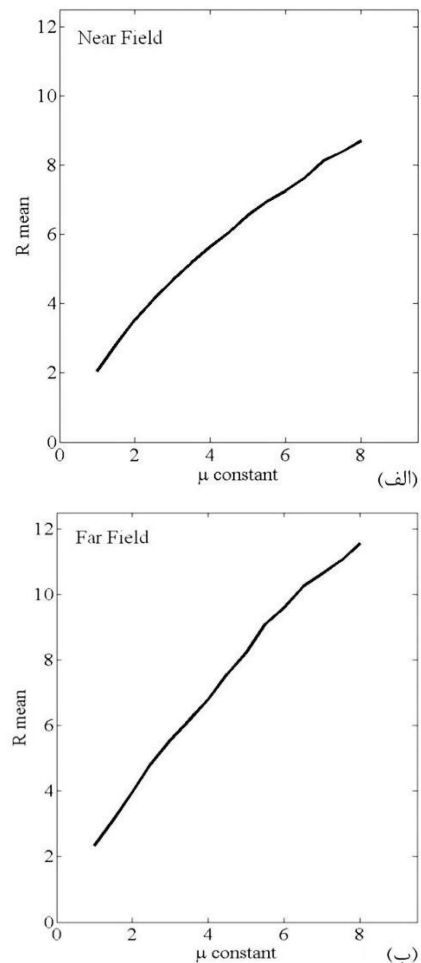
۷- تاثیر نسبت میرایی

اثر تغییر میرایی در دوره تناوب‌های مختلف در تحلیل‌های انجام شده تحت زلزله‌های حوزه نزدیک در شکل ۸ و تحت زلزله‌های حوزه دور در شکل ۹ آورده شده است. می‌توان مشاهده کرد که با افزایش دوره تناوب اثر میرایی بر منحنی شکل پذیری ثابت- ضریب کاهش مقاومت میانگین، افزایش پیدا می‌کند. بنابراین می‌توان تاثیر این پارامتر را در تعیین رابطه $R-\mu$ در نظر گرفت.

ضمناً با مقایسه نمودارهای مربوط به دو گروه زلزله حوزه نزدیک و حوزه دور می‌توان مشاهده کرد که تاثیر میرایی در دو حالت تقریباً یکسان است. البته می‌توان گفت که این تاثیر در زلزله‌های حوزه دور با افزایش دوره تناوب قابل ملاحظه‌تر می‌شود.

۸- تاثیر پارامتر ضریب αk_0

شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ تاثیر پارامتر αk_0 را در تحلیل‌های تحت زلزله‌های حوزه نزدیک نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۱۰ تاثیر پارامتر αk_0 در دوره تناوب‌های کم قابل چشم‌پوشی است ولی با افزایش دوره تناوب تاثیر αk_0 قابل ملاحظه شده و این در حالی است که در شکل پذیری‌های بالا این تاثیر افزایش می‌یابد. بدین معنی که با افزایش دوره تناوب و افزایش شکل پذیری توامان، تاثیر پارامتر αk_0 بر رابطه بین ضریب کاهش مقاومت، ضریب شکل پذیری و زمان تناوب افزایش می‌یابد. همچنین این اثر را می‌توان برای افزایش ضریب r_{II} و افزایش شکل پذیری با توجه به شکل ۱۱ بیان کرد. اما با توجه به شکل ۱۲ می‌توان گفت افزایش پارامتر μ_{II} اثر معکوس بر تاثیر پارامتر αk_0 در رابطه بین ضریب کاهش مقاومت، ضریب شکل پذیری و زمان تناوب دارد. بنابراین



شکل (۵): منحنی میانگین ضریب کاهش مقاومت در برابر مقادیر ثابت شکل پذیری برای سیستمی با مشخصات $T=1s$, $\alpha k_0=-0.05$, $F_{cr}/F_y=0.7$, $\mu_{cr}/\mu_y=0.5$, $\mu_{II}/\mu_y=5$ و میرایی برابر ۳٪ (الف) تحت ۳۱ نگاشت حوزه نزدیک، (ب) تحت ۳۰ نگاشت حوزه دور

۵- پارامترهای مؤثر در این پژوهش

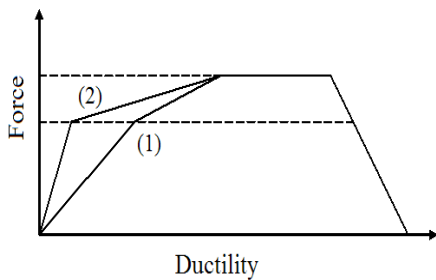
در این پژوهش بر پایه نتایج و منحنی‌های به دست آمده تاثیر پارامترهای زیر مورد ارزیابی قرار گرفته است:

- ۱- زمان تناوب
- ۲- نسبت میرایی.
- ۳- ضریب αk_0 .
- ۴- نسبت $\mu_{II} = \mu_{II} / \mu_{cr}$ معرف شکل پذیری در نقطه شروع کاهش مقاومت سیستم.

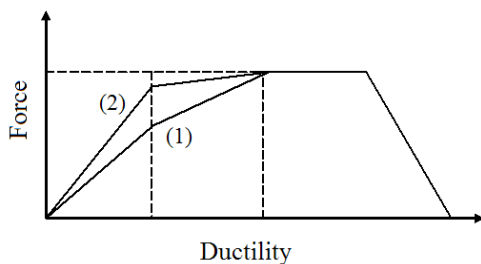
۶- تاثیر زمان تناوب

تاثیر پارامتر دوره تناوب T در سه حالت میرایی در تحلیل‌های انجام شده تحت زلزله‌های حوزه نزدیک در شکل ۶ و تحت

تحلیل‌های تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و زلزله‌های حوزه دور تقریباً یکسان است و تنها با این تفاوت که در مقادیر زیاد μ_s تأثیر پارامتر μ_u بر رابطه $R-\mu$ در تحلیل‌های زلزله‌های حوزه دور بیشتر است. شکل رفتاری در دو حالت (۱) μ_s کم و (۲) μ_s زیاد به طور کلی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. در شکل‌های ۲۱ و ۲۲، نیز مشاهده می‌شود که با ثابت بودن نسبت μ_s و کاهش نسبت r_u تأثیر پارامتر μ_u زیاد می‌شود. اگر سطح جاری شدن $F_y=F_u$ را ثابت فرض کنیم در مقادیر کم $r_u=F_y/F_{cr}$ ، مقدار F_{cr} زیاد و نمودار رفتاری شبیه حالت (۲) و در مقادیر زیاد $r_u=F_y/F_{cr}$ ، مقدار F_{cr} کم و نمودار رفتاری شبیه حالت (۱) در شکل ۱۸ است. در این حالت نیز نتیجه شکل‌های ۱۹ و ۲۰ گرفته می‌شود و نشان می‌دهد که مدل‌سازی ترک اثر قابل ملاحظه‌ای در پاسخ غیر خطی سیستم می‌گذارد.



شکل (۱۷): نمودار رفتاری کلی: r_u ثابت و (۱) مقادیر کم μ_s ؛ (۲) مقادیر زیاد μ_s .



شکل (۱۸): نمودار رفتاری کلی: μ_s ثابت و (۱) مقادیر کم r_u ؛ (۲) مقادیر زیاد r_u .

۱۰- نتیجه گیری

بر اساس نتایج به دست آمده از این پژوهش پارامترهای موثر بر رابطه ضریب کاهش مقاومت میانگین و شکل پذیری ثابت در دوره تناوب‌های مشخص به دست آورده شده است. رفتارهای غیر خطی بر اساس پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بتن

می‌توان تأثیر این پارامتر را در تعیین رابطه $R-\mu$ در نظر گرفت.

همچنین تأثیر پارامتر αk_0 در تحلیل‌های تحت زلزله‌های حوزه دور در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ آورده شده است. با مقایسه این گروه از شکل‌ها با شکل‌های تحلیل‌های زلزله‌های حوزه نزدیک مشاهده می‌شود که تأثیر پارامتر αk_0 در هر دو گروه تقریباً یکسان است.

۹- تأثیر پارامتر μ_u

تأثیر پارامتر μ_u با تغییر هم‌زمان پارامتر μ_s در شکل ۱۹ و با تغییر هم‌زمان پارامتر r_u در شکل ۲۱ در تحلیل‌های تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و در شکل ۲۰ و شکل ۲۲ در تحلیل‌های تحت زلزله‌های حوزه دور نشان داده شده است. در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ مشاهده می‌شود که در مقادیر ثابت r_u ، تأثیر پارامتر μ_u در مقادیر کم μ_s بسیار ناچیز و تقریباً بی‌تأثیر، ولی در مقادیر زیاد μ_s این تأثیر بسیار زیاد است. این مسئله را می‌توان این گونه تفسیر کرد که وقتی μ_s یعنی نسبت μ_{cr}/μ_{cr} کم است، مقدار μ_y کم و مقدار μ_{cr} زیاد است یعنی سیستم زمان زیادی طول می‌کشد تا ترک بخورد ولی سریع جاری می‌شود. این رفتار را می‌توان شبیه رفتار الاستوپلاستیک کامل فرض کرد. در این حالت پارامتر μ_u تأثیری در منحنی نشان دهنده رابطه $R-\mu$ ندارد. اما در حالتی که مقدار μ_s زیاد می‌شود یعنی مقدار μ_y زیاد و مقدار μ_{cr} کم است نشان دهنده این مسئله است که سیستم مورد نظر سریع ترک می‌خورد ولی زمان زیادی طول می‌کشد تا به حد جاری شدن برسد. در واقع در این حالت نمودار رفتاری به گونه‌ای است که تأثیر ترک خوردگی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شکل ۱۹ و ۲۰ مشاهده می‌شود که در این حالت تأثیر پارامتر μ_u در منحنی نشان دهنده رابطه $R-\mu$ بسیار چشمگیر و مورد توجه است. بنابر این می‌توان نتیجه گرفت که چگونگی مدل‌سازی نمودار رفتاری سیستم و در نظر گرفتن اثر ترک خوردگی در نمودار بر پاسخ غیر خطی سیستم اثر می‌گذارد. ضمن اینکه با مقایسه دو شکل ۱۹ و ۲۰ مشاهده می‌شود که تأثیر پارامتر μ_u با تغییر هم‌زمان پارامتر μ_s در دو حالت

یک مجموعه شامل ۳۰ زلزله حوزه دور، که در بسیاری از پژوهش‌های دیگر نیز مورد استفاده بوده (مانند [۱])، از بانک زلزله‌های PEER انتخاب شده است [۱۴]. زلزله‌های حوزه نزدیک شامل ۳۱ نگاشت زلزله است که این زلزله‌ها دارای مولفه‌های امتداد لغز بوده و در شرایط جهت پذیری مستقیم برای چهار زلزله متفاوت ثبت شده است و فاصله آن‌ها تا مرکز زلزله کمتر از ۱۶ کیلومتر است.

با تحلیل انجام گرفته منحنی $R_{mean}-\mu_{constant}$ به دست آمده است که بر پایه نتایج و منحنی‌های به دست آمده تاثیر پارامترهای در پژوهش‌های زیر قرار گرفته است:

۱- نسبت میرایی.

۲- زمان تناوب.

۳- نسبت $\mu_s = \mu_y / \mu_{cr}$ شکل پذیری در نقطه شروع ترک خوردگی سیستم.

۴- نسبت $\mu_u = \mu_{ul} / \mu_{cr}$ شکل پذیری در نقطه شروع کاهش مقاومت سیستم.

۵- نسبت $\Gamma_u = F_y / F_{cr}$ مبین مقاومت در شروع تسلیم به مقاومت در نقطه ترک خوردگی اولیه.

۶- ضریب αk_0 .

با توجه به منحنی‌های به دست آمده اثر هر یک از پارامترها تحقیق شده است. همان‌گونه که از منحنی‌های به دست آمده مشخص است هر یک از پارامترهای میرایی، زمان تناوب، ضرایب μ_s ، μ_u ، Γ_u و αk_0 اثر زیادی بر منحنی رابطه ضریب کاهش مقاومت میانگین و شکل پذیری ثابت در دوره تناوب مشخص و رفتار غیر خطی سیستم دارند که مشاهده می‌شود اثر پارامتر دوره تناوب چشمگیرتر بوده و می‌توان این پارامتر را اثرگذارترین پارامتر در رفتار غیر خطی سیستم در نظر گرفت.

همچنین در این پژوهش اثر ضرایب نشان دهنده شکل منحنی رفتاری به گونه‌ای که اثر ترک خوردگی در نظر گرفته شود مشاهده می‌شود با افزایش پارامتر μ_s و کاهش پارامتر Γ_u تاثیر این پارامترها بر رابطه ضریب کاهش مقاومت، ضریب شکل پذیری و زمان تناوب افزایش پیدا کرده که این مطلب نشان دهنده تاثیر به سزای چگونگی مدل سازی نمودار رفتاری

مسلح شبیه سازی شده است. برای این کار یک نمودار رفتاری چهار قسمتی انتخاب شده تا منحنی رفتاری سیستم‌های چند درجه آزاد و یک درجه آزاد معادل را شبیه سازی کند. این نمودار به چهار قسمت تقسیم می‌شود که در قسمت اول رفتار سیستم به صورت الاستیک و خطی تا نقطه ۱ که نقطه ترک خوردگی است ادامه می‌یابد. در قسمت دوم رفتار خطی از بین می‌رود تا اینکه در نقطه ۲ تسلیم صورت می‌گیرد و وارد منطقه غیر خطی می‌شود. رفتار غیر خطی کامل تا نقطه ۳ ادامه می‌یابد که از این نقطه به بعد نمودار با شیبی برابر αk_0 نزول پیدا کرده تا اینکه به مقاومت صفر می‌رسد.

شکل نمودار رفتاری توسط چهار پارامتر کنترل می‌شود. با تغییر مناسب این چهار پارامتر می‌توان نمودارهای رفتاری مختلفی را بدست آورد که تقریباً تمامی حالات را پوشش دهد.

با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر در نمودار رفتاری سیستم و با تغییر متناسب این پارامترها منحنی‌های تحلیل دینامیکی فزاینده برای سیستم‌های یک درجه آزاد در حالت‌های زیر محاسبه می‌شود:

۱- یازده حالت دوره تناوب اولیه سیستم به ترتیب برابر ۰٫۱، ۰٫۲، ۰٫۳، ۰٫۴، ۰٫۵، ۰٫۷۵، ۱، ۱٫۲۵، ۱٫۵، ۱٫۷۵، ۲ ثانیه.

۲- سه حالت نسبت میرایی به ترتیب برابر ۰٫۱، ۰٫۳، ۰٫۵٪.

۳- هفت حالت نسبت μ_{ul} / μ_y برابر ۰٫۲، ۰٫۳، ۰٫۴، ۰٫۵، ۰٫۶، ۰٫۷، ۰٫۸

۴- دو حالت شیب ناحیه کاهش مقاومت (αk_0) برابر ۰٫۵- و ۰٫۰۵-.

۵- پنج حالت نسبت F_{cr} / F_y برابر ۰٫۱، ۰٫۳، ۰٫۵، ۰٫۷، ۰٫۹.

۶- پنج حالت نسبت μ_{cr} / μ_y برابر ۰٫۱، ۰٫۳، ۰٫۵، ۰٫۷، ۰٫۹.

با ترکیب این حالات و در نظر گرفتن محدودیت برای حالتی که در آن‌ها $\mu_{cr} / \mu_y \geq F_{cr} / F_y$ است، مجموعاً ۴۶۲۰ سیستم یک درجه آزاد تولید می‌شود که تحت دو گروه زلزله قرار گرفته و تحلیل دینامیکی غیر خطی انجام شده است [۱۱].

برای این پژوهش از دو گروه حرکت زمین استفاده شده که شامل زلزله‌های حوزه دور و زلزله‌های حوزه نزدیک است.

- [7] Miranda E. Estimation of inelastic deformation demands of SDOF systems. *Journal of Structural Engineering (ASCE)* 2001; 127:1005–1012.
- [8] Chopra AK, Chintanapakdee C. Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures: Single-degree-of-freedom bilinear systems with strain hardening. Submitted for publication to *Journal of Structural Engineering (ASCE)* 2003; 130(9):1309–1319.
- [9] Dolsek, M. ; Fajfar, P. “Inelastic spectra for infilled reinforced concrete frames.” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1395-1416. 2004.
- [10] Takeda, T., Sozen, M.A., Nilsen, N.N. “Reinforced concrete response to simulate earthquake.” *Journal of Structural Division*, 96(2), 2557-2573. 1970.
- [11] Azarbakht, A. ; “Comparison of structural seismic response based on real and spectrum compatible near-source ground motion records” *ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering* M. Papadrakakis, N.D. Lagaros, M. Fragiadakis (eds.) Rhodes, Greece, 22–24 June 2009.
- [12] McKenna, F. ; Fenves, G.L. ; Scott, M.H. ; “An object-oriented software for earthquake engineering simulation.” Univ. of California, Berkeley, California. 2000. <<http://opensees.berkeley.edu/>>.
- [13] Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. “Incremental Dynamic Analysis.” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3):491-514. 2002.
- [14] PEER. Strong Motion Database. Available from: <http://peer.Berkeley.edu/NGA>.
- [15] FEMA. The 2000 NEHRP recommended provisions for new buildings and other structures. Report No. FEMA-368, SAC Joint Venture, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC. 2002.

سیستم و در نظر گرفتن اثر ترک خوردگی در نمودار بر پاسخ غیر خطی سیستم اثر می گذارد.

همچنین با مقایسه ای که بین نتایج به دست آمده از در نظر گرفتن دو گروه زلزله حوزه دور و زلزله حوزه نزدیک صورت گرفته است می توان مشاهده کرد که نتایج به دست آمده تقریباً در هر دو گروه یکسان است.

۱۱- تشکر و قدردانی

نگارندگان بر خود لازم میدانند که از حمایت‌های مالی دانشگاه اراک تحت پروژه پژوهشی شماره ۸۸/۱۱۴۰۱ کمال تشکر و قدردانی را ابراز نمایند. معلوم است که تمامی نتایج ارائه شده در این مقاله نظرات نگارندگان آن بوده و لزوماً نظر دانشگاه اراک را شامل نمی‌شود.

۱۲- مراجع

- [1] Applied Technology Council, 1996, *Seismic Evaluation and retrofit of Concrete Buildings*, Report ATC40, November.
- [2] FEMA, 1997, *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA 273; and *NEHRP Commentary on Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA 274, October, Federal Emergency management Agency, Washington, D.C.
- [3] Newmark NM, Hall WJ. *Earthquake Spectra and Design*. EERI: Berkeley, CA, 1982.
- [4] Vidic T, Fajfar P, Fischinger M. Consistent inelastic design spectra: strength and displacement. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1994; 23:507–521.
- [5] Miranda, E. and Bertero, V. V., 1994, Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design, *Earthquake Spectra*, 10, 357-379.
- [6] Reinhorn, A.M., 1997, Inelastic analysis techniques in seismic evaluations, P. Fajfar and H. Krawinkler (eds.), *Seismic design methodologies for the next generation of codes*, Balkema, Rotterdam, 277-287.