

## ضریب کاهش مقاومت تسلیم و نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک بر اساس زلزله‌های ثبت شده در ایران

مهدی پورشاء\*<sup>۱</sup> و سمیه حبیبی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

(دریافت: ۹۵/۱۲/۲۱، پذیرش: ۹۶/۱۰/۱۷، نشر آنلاین: ۹۶/۱۰/۱۷)

### چکیده

در این مقاله، ضریب کاهش مقاومت تسلیم، نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک و شکل‌پذیری نیاز با در نظرگیری اثر پارامترهایی شامل زمان تناوب سیستم، نسبت میرایی، سطح شکل‌پذیری و شرایط ساختگاه با استفاده از رکوردهای زلزله ثبت شده در ایران در ساختگاه سنگی و خاک نرم مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور، پس از تصحیح رکوردهای زلزله، ۵۵۶۰۸ تحلیل تاریخیچه زمانی خطی و ۱۲۹۰۲۴ تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی بدون تکرار و ۱۵۶۰۰ تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی با فرایند تکراری، برای سیستم‌های یک درجه آزادی انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب کاهش مقاومت تسلیم و نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک به طور قابل توجه به زمان تناوب سیستم و سطح شکل‌پذیری و تا حدودی به شرایط ساختگاه بستگی دارد. همچنین با افزایش سطح شکل‌پذیری، ضریب کاهش مقاومت به ویژه در محدوده‌های متوسط و بلند، بیشتر شده و نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک نیز در محدوده‌های خیلی کوتاه، افزایش می‌یابد. مقایسه طیف‌های ضرائب به دست آمده بر اساس زلزله‌های ایران در ساختگاه سنگی با روابط پیشنهادی محققین دیگر نشان می‌دهد که بین آنها مقداری اختلاف وجود دارد. در نهایت، در این پژوهش با انجام تحلیل رگرسیون غیرخطی روی نتایج به دست آمده برای ضریب کاهش مقاومت تسلیم و نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک، روابطی برحسب زمان تناوب و سطح شکل‌پذیری برای ضرائب یاد شده بر اساس رکوردهای ثبت شده در ایران در ساختگاه‌های سنگی و خاک نرم ارائه گردید.

**کلیدواژه‌ها:** ضریب کاهش مقاومت تسلیم، نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک، شکل‌پذیری نیاز، زلزله‌های ثبت شده در ایران، ساختگاه.

### ۱- مقدمه

می‌شوند. مقاومت تسلیم همپایه شده  $\bar{f}_y$  یک سیستم الاستوپلاستیک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{f}_y = \frac{f_y}{f_0} = \frac{u_y}{u_0} \quad (1)$$

که  $u_0$  و  $f_0$  به ترتیب مقادیر حداکثر نیروی مقاوم و تغییرشکل ناشی از زلزله در سیستم خطی نظیر می‌باشند.  $f_0$  را می‌توان مقاومت لازم برای بقای سازه در حوزه الاستیک خطی در حین زلزله تعریف نمود. اگر مقاومت هم‌پایه شده یک سیستم کم‌تر از واحد گردد، سیستم در حین زلزله تحت تغییر شکل‌های غیرخطی (فرا ارتجاعی) واقع خواهد شد (Chopra, ۲۰۱۲). همچنین ضریب شکل‌پذیری برای یک سیستم الاستوپلاستیک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu = \frac{u_m}{u_y} \quad (2)$$

یک سازه را می‌توان در مقابل زلزله به یکی از صور زیر طراحی نمود:

الف) ساخت یک سازه قوی به طوری که در حین زلزله در حوزه الاستیک (ارتجاعی) رفتار نماید؛

ب) ساخت یک سازه شکل‌پذیر به طوری که در حین زلزله تحت تغییر شکل‌های فراتر از الاستیک قرار گرفته و وارد حوزه پلاستیک (خمیری) گردد (Chopra, ۲۰۱۲).

به دلایل اقتصادی، فلسفه طراحی موجود به ساختمان‌ها اجازه می‌دهد که در زلزله‌های شدید تغییر مکان‌های غیرالاستیک را تجربه کنند. در نتیجه، مقاومت جانبی طراحی در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای، کم‌تر و در برخی موارد خیلی کم‌تر از مقاومت جانبی مورد نیاز برای بقای سازه در ناحیه الاستیک می‌باشد. کاهش در نیروها به دلیل رفتار هیسترتیک غیرخطی، با ضرائب کاهش مقاومت بیان

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: +۹۸۹۱۴۱۰۶۳۱۲۰

آدرس ایمیل: poursha@sut.ac.ir (م. پورشاء)، s\_habibi@sut.ac.ir (س. حبیبی).

و غیرالاستیک مؤلفه NS زمین‌لرزه‌السنتر و (کالیفرنیا ۱۸ می ۱۹۴۰)، مشاهده کردند که:

- (۱) در نواحی طیفی فرکانس پایین و متوسط، سیستم‌های الاستیک و غیرالاستیک جابه‌جایی حداکثر تقریباً یکسانی دارند؛
- (۲) در ناحیه فرکانس خیلی بالا، سیستم الاستیک و غیرالاستیک نیروی یکسانی دارند؛
- (۳) در ناحیه فرکانس بالا، اصل بقای انرژی قابل استفاده می‌باشد.

این مشاهدات به توصیه یک روش برای ساخت طیف‌های غیرالاستیک از طیف‌های الاستیک منجر شد. این روش شامل کاهش طیف‌های الاستیک به وسیله ضرایب کاهش مقاومت به واسطه شکل‌پذیری برای هر ناحیه طیفی است. عباراتی برای ضریب کاهش مقاومت تسلیم برای نواحی مختلف طیفی پیشنهاد شد و نتیجه‌گیری شد که ضریب کاهش مقاومت تسلیم به نسبت شکل‌پذیری و ناحیه طیفی بستگی دارد (Newmark و Hall، ۱۹۶۹).

Riddell و Newmark در سال ۱۹۷۹ ضریب کاهش مقاومت تسلیم را برای سیستم‌های الاستوپلاستیک دوخطی و دارای کاهش سختی بازای میرایی ۵ درصد و نسبت شکل‌پذیری ۱ تا ۱۰ بدست آوردند. مطالعه نشان داد که پاسخ‌های حداکثر سیستم‌های الاستوپلاستیک دوخطی و سیستم‌های دارای کاهش در سختی بسیار مشابه هستند و استفاده از طیف الاستوپلاستیک برای تحلیل غیرالاستیک به طور کلی محافظه کارانه است. همچنین این مطالعه نشان داد که ضریب کاهش مقاومت تسلیم علاوه بر نسبت شکل‌پذیری و ناحیه طیفی به نسبت میرایی،  $\beta$  بستگی دارد (Riddell و Newmark، ۱۹۷۹).

Lai و Biggs در سال ۱۹۸۰ دو سطح میرایی و چهار نسبت شکل‌پذیری را در نظر گرفته گرفتند. این مطالعه به سیستم‌های الاستوپلاستیک محدود گردید و ضریب کاهش مقاومت تسلیم به صورت زیر پیشنهاد شد:

$$R_{\mu} = \alpha + \beta(\log T) \quad (۶)$$

که  $T$  زمان تناوب سیستم بوده و  $\alpha$  و  $\beta$  به نسبت شکل‌پذیری و ناحیه طیفی (محدوده زمان تناوب) بستگی دارد (Lai و Biggs، ۱۹۸۰).

Elghadamsi و Mohraz در سال ۱۹۸۷ طیف‌های پاسخ غیرالاستیک را با در نظرگیری سیستم‌های یک درجه آزادی با رفتار الاستوپلاستیک روی زمین آبرفتی و سنگ مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که ضریب کاهش مقاومت تسلیم به طور قابل توجهی تحت تأثیر شرایط خاک قرار نمی‌گیرد و تأثیر آن‌ها

که  $u_m$  قدرمطلق حداکثر تغییر شکل سیستم الاستوپلاستیک به علت زمین‌لرزه و  $u_y$  تغییر شکل تسلیم سیستم می‌باشد (Chopra، ۲۰۱۲). ضریب کاهش مقاومت تسلیم (یعنی کاهش در مقاومت نیاز به دلیل رفتار هیستریتیک غیرخطی)،  $R_y$ ، به صورت نسبت مقاومت نیاز الاستیک به مقاومت نیاز غیر الاستیک تعریف می‌شود:

$$R_y = \frac{f_y(\mu=1)}{f_y(\mu=\mu_i)} = \frac{u_0}{u_y} \quad (۳)$$

که در رابطه فوق  $f_y(\mu=1)$  مقاومت تسلیم جانبی مورد نیاز برای پرهیز از تسلیم سیستم تحت زلزله مفروض و  $f_y(\mu=\mu_i)$  مقاومت تسلیم جانبی مورد نیاز برای باقی ماندن نسبت شکل‌پذیری جابه‌جایی نیاز،  $\mu$ ، کم‌تر یا مساوی با نسبت شکل‌پذیری هدف از قبل مشخص شده،  $\mu_i$ ، تحت همان زلزله می‌باشد (Miranda و Bertero، ۱۹۹۴). همان‌طور که ملاحظه می‌شود،  $R_y$  عکس  $\bar{f}_y$  می‌باشد. به طور کلی، برای سازه‌هایی که طی زلزله‌های شدید به طور غیرالاستیک پاسخ می‌دهند، در صورتی که مقاومت تسلیم جانبی سازه‌ها کاهش یابد (یا وقتی که ضریب کاهش طراحی افزایش یابد)، تغییر شکل‌های غیرالاستیک افزایش می‌یابد (Bertero و Miranda، ۱۹۹۴).

برای زمین‌لرزه مفروض، محاسبه مقاومت نیاز  $f_y(\mu=\mu_i)$  برای هر زمان تناوب و یک شکل‌پذیری هدف، به یک فرایند تکراری نیاز دارد، تا نیاز شکل‌پذیری محاسبه شده  $\mu$ ، در تلورانس خاص، با شکل‌پذیری هدف  $\mu_i$  برابر شود. برای تاریخچه زمانی شتاب زمین مفروض،  $\ddot{u}_g(t)$  طیف  $R_y$  می‌تواند با رسم ضریب کاهش مقاومت (محاسبه شده با معادله (۳) برای سیستم‌های یک درجه آزادی (SDOF) به ازای زمان‌های تناوب ارتعاش مختلف که تحت اثر  $\ddot{u}_g(t)$  سطوح مختلف تغییر شکل‌های غیرالاستیک  $\mu_i$  را تحمل می‌کنند، ساخته شود (Bertero و Miranda، ۱۹۹۴).

نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک،  $C_{\mu}$ ، به صورت نیاز جابجایی غیرالاستیک یک سیستم SDOF غیرالاستیک با نسبت شکل‌پذیری  $\mu$ ، تقسیم بر حداکثر نیاز جابه‌جایی الاستیک سیستم SDOF الاستیک متناظر مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$C_{\mu} = \frac{\Delta_{ine}}{\Delta_e} = \frac{u_m}{u_0} \quad (۴)$$

که  $\Delta_e$  و  $\Delta_{ine}$  ( $u_0$ ) به ترتیب جابه‌جایی‌های غیرالاستیک و الاستیک می‌باشد (Chopra، ۲۰۱۲).  $C_{\mu}$  به صورت رابطه زیر هم نوشته می‌شود:

$$C_{\mu} = \frac{u_m}{u_0} = \mu \bar{f}_y = \frac{\mu}{R_y} \quad (۵)$$

ضریب کاهش مقاومت تسلیم به واسطه شکل‌پذیری در چند دهه اخیر توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. Newmark و Hall در سال ۱۹۷۳ بر اساس طیف پاسخ الاستیک

مقاومت به طور قابل توجهی تحت تأثیر سطح تغییرشکل غیرالاستیک، زمان تناوب ارتعاش و شرایط ساختگاهی محل می-باشد (Bertero و Miranda، ۱۹۹۱).

Miranda در سال ۱۹۹۱ تأثیر شرایط ساختگاهی محل را روی ضرایب کاهش مقاومت در ناحیه وسیعی از شرایط خاک طی زلزله‌های مختلف با در نظرگیری تأثیر شرایط ساختگاهی، اثر بزرگی و فاصله کانونی مورد بررسی قرار داد و رابطه زیر را برای ضریب کاهش مقاومت تسلیم ارائه نمود (Miranda، ۱۹۹۱):

$$R_{\mu} = \frac{\mu-1}{\Phi} + 1 \geq 1 \quad (12)$$

که  $\Phi$  تابع  $\mu$ ،  $T$  و شرایط خاک است و برای ساختگاه‌های سنگی، آبرفتی و خاک نرم به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

برای ساختگاه‌های سنگی:

$$\Phi = 1 + \frac{1}{10T-\mu T} - \frac{1}{2T} \exp \left[ -\frac{3}{2} \left( \ln T - \frac{3}{5} \right)^2 \right] \quad (13)$$

ساختگاه‌های آبرفتی:

$$\Phi = 1 + \frac{1}{12T-\mu T} - \frac{2}{5T} \exp \left[ -2 \left( \ln T - \frac{1}{5} \right)^2 \right] \quad (14)$$

برای ساختگاه‌های خاک نرم:

$$\Phi = 1 + \frac{T_g}{3T} - \frac{3T_g}{4T} \exp \left[ -3 \left( \ln \frac{T}{T_g} - \frac{1}{4} \right)^2 \right] \quad (15)$$

این محققین نتیجه گرفتند که شرایط خاک ساختگاه می‌تواند به‌طور قابل توجهی ضریب کاهش مقاومت تسلیم را تحت تأثیر قرار دهد، در حالی که بزرگی و فاصله کانونی اثر قابل اغمازی روی ضریب کاهش مقاومت تسلیم دارند (Miranda، ۱۹۹۱). Vidic و همکاران در سال ۱۹۹۴ سیستم‌های SDOF با رفتار هیسترتیک دو خطی و سختی نزولی (مدل Q) و میرایی متناسب با جرم و سختی لحظه‌ای را مورد بررسی قرار دادند (Vidic و همکاران، ۱۹۹۴). عبارات پیشنهادی برای ضریب کاهش مقاومت تسلیم به صورت زیر می‌باشد:

$$R = c_1(\mu - 1)^{c_R} \frac{T}{T_0} + 1, \quad T \leq T_0 \quad (16)$$

$$R = c_1(\mu - 1)^{c_R} + 1, \quad T \geq T_0 \quad (17)$$

$$T_0 = c_2 \mu^{c_T} T_1 \quad (18)$$

ثابت‌های  $c_1$ ،  $c_2$ ،  $c_T$  و  $c_R$  به رفتار هیسترتیک و میرایی بستگی دارد. Gupta و Tiwari در سال ۲۰۰۰ یک مدل مقیاس جدید را برای طیف‌های ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر شکل‌پذیری پیشنهاد کردند. در این مدل، نسبت شکل‌پذیری نیاز، مدت حرکت

در درجه اول ناشی از تأثیر روی طیف‌های پاسخ الاستیک می‌باشد (Mohraz و Elghadamsi، ۱۹۸۷).

Riddell و همکاران در سال ۱۹۸۹ سیستم‌های یک درجه آزادی با رفتار هیسترتیک الاستوپلاستیک را در نظر گرفتند (Riddell و همکاران، ۱۹۸۹). ضریب کاهش مقاومت پیشنهادی در این مطالعه شامل دو قسمت خطی به صورت زیر می‌باشد:

$$R_{\mu} = 1 + \frac{R^*-1}{T^*} T, \quad 0 \leq T \leq T^* \quad (7)$$

$$R_{\mu} = R^*, \quad T \geq T^* \quad (8)$$

که  $T^*$  بین ۰/۱ و ۰/۴ ثانیه برای نسبت‌های شکل‌پذیری ۲ تا ۱۰ تغییر می‌کند و  $R^*$  مساوی  $\mu$  برای  $2 \leq \mu \leq 5$  و کوچک‌تر از  $\mu$  برای  $5 \leq \mu \leq 10$  می‌باشد.

Hidalgo و Arias در سال ۱۹۹۰ براساس میانگین تقریبی ضرایب کاهش مقاومت محاسبه شده توسط Riddell و همکاران (۱۹۸۹) رابطه (۹) را برای محاسبه ضریب کاهش مقاومت پیشنهاد دادند که به صورت منحنی غیرخطی بوده و در تمامی نواحی زمان تناوب قابل استفاده می‌باشد (Hidalgo و Arias، ۱۹۹۰).

$$R_{\mu} = 1 + \frac{T}{kT_0 + \frac{T}{\mu-1}} \quad (9)$$

ضریب  $kT_0$  برای گروه‌های مختلف حرکات زمین تغییر می‌کند. این مطالعه برای پیش‌نویس آیین‌نامه شیلی مقدار  $k = 0.1$  را توصیه کرد.

Nassar و Krawinkler در سال ۱۹۹۱ علاوه بر پارامترهای سیستم سازه‌ای مانند زمان تناوب طبیعی، سطح تسلیم، نسبت سخت شوندگی کرنشی و نوع رفتار مصالح، تأثیر فاصله کانونی را روی ضرایب کاهش مقاومت برای ۱۵ حرکت زمین ثبت شده در ساختگاه‌های سنگی و آبرفتی مورد بررسی قرار دادند و رابطه زیر را برای برآورد ضریب کاهش مقاومت تسلیم پیشنهاد کردند (Nassar و Krawinkler، ۱۹۹۱):

$$R_{\mu} = [c(\mu - 1) + 1]^{1/c} \quad (10)$$

که در آن:

$$c(T, \alpha) = \frac{T^a}{1+T^a} + \frac{b}{T} \quad (11)$$

که  $\alpha$  سختی بعد از تسلیم به عنوان درصدی از سختی اولیه سیستم می‌باشد.

Miranda و Bertero در سال ۱۹۹۱ طیف‌های ضریب کاهش مقاومت را با استفاده از مدل‌های یک‌درجه آزادی دو خطی الاستیک و غیرالاستیک محاسبه کردند و تأثیر شرایط ساختگاه محلی را بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که ضرایب کاهش

دارای کاهش در سختی و سیستم‌های بدون کاهش سختی استفاده شد. این مطالعه نشان داد که سیستم‌های دارای سختی کاهش و زمان تناوب ارتعاش کوتاه‌تر از زمان تناوب غالب حرکت زمین می‌توانند مقاومت‌های جانبی بزرگ‌تری را در مقایسه با سیستم‌های بدون کاهش در سختی با همان زمان تناوب تجربه کنند، در حالی که برای سیستم‌های با زمان تناوب مساوی یا بلندتر از زمان تناوب غالب حرکت زمین، مقاومت جانبی سیستم‌های دارای سختی کاهش کوچک‌تر از سیستم‌های بدون سختی کاهش با همان زمان تناوب می‌باشد.

Lee و همکاران در سال ۲۰۰۶ یک مطالعه مقدماتی روی ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر جابه‌جایی برای قاب‌های مقاوم خمشی فولادی بلند انجام دادند (Lee و همکاران، ۲۰۰۶). در این مطالعه، ضریب تصحیح  $\beta$  مربوط به زمان تناوب‌های طبیعی برای اصلاح ضریب کاهش مقاومت در طراحی مبتنی بر جابه‌جایی، معرفی گردید و ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر جابه‌جایی نهایی به عنوان تابعی از شکل‌پذیری نیاز، زمان تناوب اصلی و نسبت انرژی تغییر شکل تعریف شد. در این مطالعه نتیجه‌گیری شد که مقدار ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر جابه‌جایی کم‌تر از مقدار ضریب کاهش مقاومت قراردادی می‌باشد. از طرف دیگر، در خصوص نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک هم مطالعاتی انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

Miranda در سال ۲۰۰۰ نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک را برای سیستم‌های یک درجه آزادی تحت سطوح مختلف تغییرشکل غیرالاستیک تحت اثر تعداد زیادی زلزله ثبت شده در ساختمان‌های سخت در کالیفرنیا مورد بررسی قرار داد (Miranda، ۲۰۰۰). در این مطالعه، اثر زمان تناوب ارتعاش، سطح شکل‌پذیری نیاز، شرایط ساختمانی، بزرگی زلزله و فاصله کانونی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک با افزایش سطح شکل‌پذیری نیاز افزایش می‌یابد. بزرگی زلزله و فاصله کانونی تأثیری روی نسبت‌های جابه‌جایی غیرالاستیک ندارد و برای ساختمان‌های خاک سخت، اثر شرایط ساختمانی نسبتاً کوچک می‌باشد و در اهداف طراحی می‌تواند نادیده گرفته شود. تحقیقات Chopra و Chintanapakdee در سال ۲۰۰۱ نشان داد که برای ضریب شکل‌پذیری یکسان، نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای هر دو گروه زلزله‌های حوزه دور و نزدیک، در نواحی طیفی متناظر، مشابه می‌باشد.

Chopra و Chintanapakdee (۲۰۰۱). همچنین این محققین در سال ۲۰۰۴ اثر پارامترهایی چون سختی بعد از تسلیم، بزرگی زلزله، فاصله از گسل و شرایط خاک ساختمان سخت را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که سختی بعد از تسلیم،

شدید زمین، زمان تناوب غالب، بزرگی زلزله و شرایط زمین‌شناسی ساختگاه به عنوان پارامترهای حاکم در نظر گرفته شد. این محققین، مدل الاستوپلاستیک با میرایی ۵٪ را برای محاسبه ضریب کاهش مقاومت در نظر گرفتند و معادله زیر را برای  $R_{\mu}(T)$  ارائه نمودند (Gupta و Tiwari، ۲۰۰۰):

$$\log_{10} R_{\mu}(T) = b_1(T) \log_{10} T_s + b_2(T) T_g + b_3(T) M + b_4(T) M^2 + b_5(T) \quad (19)$$

در رابطه فوق  $T_s$  مدت حرکت زمین و  $T_g$  زمان تناوب غالب زلزله می‌باشد که در آن، دامنه طیف فوریه حداکثر می‌شود.  $b_i(T)$ ها ضرایب وابسته به زمان تناوب به دست آمده برای مجموعه‌ای از شرایط زمین‌شناسی ساختگاه،  $\mu$  و نسبت شکل‌پذیری  $\mu$  می‌باشد که با تحلیل رگرسیون خطی به دست می‌آیند. این مطالعه نشان داد که ضریب کاهش مقاومت به واسطه شکل‌پذیری به میزان اندکی به بزرگی زلزله و مدت حرکت شدید زمین بستگی دارد و اثر این پارامترها به شدت وابسته به زمان تناوب می‌باشد.

Borzi و Elnashai در سال ۲۰۰۰ اثر بزرگی، فاصله و شرایط خاک را با به کارگیری دو مدل رفتار هیسترتیک الاستوپلاستیک کامل<sup>۱</sup> (EPP) و مدل هیسترتیک سخت‌شونده-نرم‌شونده<sup>۲</sup> (HHS) مورد بررسی قرار دادند و تأثیر سطح شکل‌پذیری و پارامترهای حرکت زمین (بزرگا و فاصله) و شرایط خاک را روی ضریب رفتار با استفاده از مدل هیسترتیک الاستوپلاستیک مطالعه نمودند (Elnashai و Borzi، ۲۰۰۰).

این مطالعه نشان داد که اثر پارامترهای حرکت زمین (بزرگی، فاصله و شرایط خاک) مشابه می‌باشد و تأثیر سطح شکل‌پذیری روی ضریب اصلاح پاسخ بسیار قابل توجه است.

Chopra و Chintanapakdee در سال ۲۰۰۱ پاسخ سیستم‌های یک درجه آزادی الاستیک و غیرالاستیک را تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک گسل بررسی کردند و نتیجه گرفتند که برای ضریب شکل‌پذیری یکسان، زلزله‌های نزدیک گسل مقاومت نیاز بزرگ‌تری را در ناحیه حساس به شتاب نسبت به حرکات دور از گسل تحمیل می‌کند و ضریب کاهش مقاومت برای هر دو نوع حرکات زمین در نواحی طیفی، مشابه هستند (Chopra و Chintanapakdee، ۲۰۰۱).

Miranda و Ruiz-Garcia در سال ۲۰۰۲ اثر سختی کاهش را روی ضرایب کاهش مقاومت سیستم‌های یک درجه آزادی تحت رکوردهای خاک نرم مورد بررسی قرار دادند.

Miranda و Ruiz-Garcia (۲۰۰۲). مدل‌های سختی Clough اصلاح شده و الاستوپلاستیک به ترتیب برای سیستم‌های

تهرانی‌زاده و حامدی در سال ۱۳۸۲، اثر شکل‌پذیری، نوع خاک و زمان تناوب را روی ضریب کاهش تسلیم سیستم الاستوپلاستیک تحت اثر زلزله‌های ایران بررسی کردند (تهرانی‌زاده و حامدی، ۱۳۸۲).

پارسائیان و همکاران در سال ۱۳۹۱ نسبت بیشینه تغییر مکان غیرالاستیک به الاستیک را برای سازه‌های روی خاک سخت با استفاده از رکوردهای زلزله‌های ایران به دست آوردند (Parsaean و همکاران، ۲۰۱۳). براساس بررسی‌های انجام شده، نسبت تغییر مکان غیرالاستیک برای رکوردهای ثبت شده در ایران برای خاک نرم در تحقیقات قبلی مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین، اهداف این مقاله عبارت است از:

- مطالعه جامع در خصوص محاسبه ضریب کاهش مقاومت تسلیم به واسطه شکل‌پذیری و نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک (نسبت حداکثر جابه‌جایی غیرالاستیک به حداکثر جابه‌جایی الاستیک) برای زلزله‌های ثبت شده روی خاک نرم و ساختگاه سنگی در ایران.

- بررسی اثر پارامترهایی چون زمان تناوب، سطح شکل‌پذیری و نوع خاک روی ضرائب یاد شده.

- مقایسه طیف‌های ضریب کاهش مقاومت تسلیم و نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک به دست آمده بر اساس زلزله‌های ایران با روابط پیشنهادی محققین دیگر و پیشنهاد روابطی برای آنها بر اساس زلزله‌های ثبت شده در ایران.

## ۲- نحوه مدل‌سازی و انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی

به منظور انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی خطی و غیرخطی، ابتدا یک سیستم یک درجه آزادی<sup>۳</sup> (SDOF) در نرم‌افزار SAP2000 (SAP2000 Ultimate 15.0.0, 2011) مدل‌سازی گردید. در این سیستم، به منظور تغییر زمان تناوب، جرم، ثابت فرض گردید و سختی سیستم متغیر در نظر گرفته شد. در تحلیل‌های تاریخچه زمانی از روش انتگرال‌گیری مستقیم، روش ضمنی نیومارک با شتاب خطی  $(\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{6})$  استفاده گردید. مدل رفتار هیسترتیک سیستم، مطابق شکل (۱) به صورت الاستوپلاستیک کامل از نوع سینماتیک (Kinematic) در نظر گرفته شد. گام زمانی برای انتگرال‌گیری مستقیم، در محدوده زمان تناوب ۰/۲ تا ۰/۵ ثانیه، ۰/۰۲ و در محدوده زمان تناوب ۰/۵ تا ۵۰ ثانیه، برابر ۰/۰۱ منظور گردید. از آنجا که محدوده زمان تناوب از ۰/۲ تا ۵۰ ثانیه در نظر گرفته شده است، برای تغییر زمان تناوب سیستم در نرم‌افزار SAP2000 از نرم‌افزار MATLAB (MATLAB R2011b, 2011) استفاده گردید.

بزرگی زلزله و شرایط خاک در ساختگاه سخت تأثیر اندکی بر نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک دارد (Chopra و Chintanapakdee، ۲۰۰۴).

Miranda و Ruiz-Garcia در سال ۲۰۰۳ تحلیل آماری روی نسبت‌های جابه‌جایی غیرالاستیک با استفاده از مجموعه‌ای از رکورد زلزله‌های مکزیکوسیتی و سانفرانسیسکو روی خاک نرم انجام دادند (Miranda و Ruiz-García، ۲۰۰۳). در این مطالعه تأثیر زمان تناوب مقیاس شده با زمان تناوب غالب حرکت زمین، سطح تغییرشکل غیرالاستیک، بزرگی زلزله و فاصله کانونی و همچنین اثر سختی کاهشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که طیف‌های نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک تابع زمان تناوب مقیاس شده با زمان تناوب غالب حرکت زمین می‌باشد. همچنین بزرگی زلزله و فاصله کانونی تأثیری روی نسبت‌های جابه‌جایی غیرالاستیک ندارد و اثرات سختی کاهشی برای سازه‌های روی خاک نرم، مهم‌تر از سازه‌های واقع در ساختگاه‌های سنگی یا خاک سخت می‌باشد.

Zhai و همکاران در سال ۲۰۰۷ مشخصه‌های طیف‌های نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک را برای حرکات زمین پالس‌گونه در حوزه نزدیک گسل مورد بررسی قرار دادند (Sun، Xie، Li، Zhai، ۲۰۰۷).

همچنین تأثیر شرایط ساختگاهی، نسبت حداکثر سرعت زمین (PGV) به حداکثر شتاب زمین (PGA)، PGV و حداکثر سرعت افزایشی (MIV) روی طیف‌های نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد که اثر حرکات زمین نزدیک گسل روی این طیف‌ها فقط در زمان‌های تناوب بین ۰/۲ تا ۱/۵ ثانیه قابل توجه است. همچنین نسبت PGV به PGA تأثیر قابل توجهی روی طیف‌های نسبت جابه‌جایی دارد و تأثیر شرایط ساختگاهی، PGV و MIV اندک می‌باشد.

بهشتی اول و کبیری در سال ۱۳۹۰ ضریب کاهش مقاومت ناشی از شکل‌پذیری سازه‌ها را برای حرکات نزدیک گسل استخراج نمودند (بهشتی اول و کبیری، ۱۳۹۰).

حسینی و همکاران در سال ۱۳۹۲ نسبت تغییر مکان غیرالاستیک را برای سازه‌های در معرض زلزله‌های پالس‌گونه حوزه نزدیک مورد بررسی قرار دادند (Hassani و همکاران، ۲۰۱۳).

ضریب کاهش مقاومت تسلیم و نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک، در دهه‌های اخیر برای زلزله‌های ثبت شده در خارج از ایران، محاسبه و روابطی برای آنها ارائه شده است. برای زلزله‌های ثبت شده در ایران، تحقیقات محدودی در خصوص ضرائب یاد شده انجام شده است.

مسکن و شهرسازی (شبکه شتاب‌نگاری زلزله ایران، ۱۳۹۳) تهیه شده است.

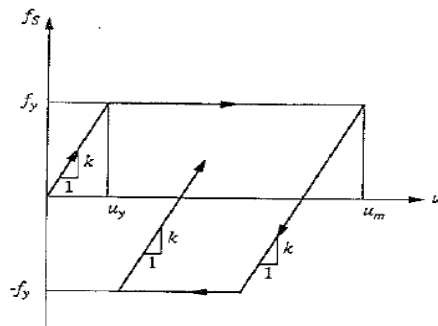
#### ۴- پردازش رکوردها

رکوردهای زلزله گرفته شده از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، رکوردهای تصحیح نشده و خام می‌باشند. داده‌های خام حاصل از دستگاه‌های ثبت حرکات زمین ممکن است دارای خطاهایی باشند که بایستی منابع ایجاد خطا و میزان آن با دقت ارزیابی شده و تصحیح لازم بر روی آن‌ها صورت گیرد تا داده‌های تصحیح شده حاصل را بتوان در تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها به کار برد (امیری و همکاران، ۱۳۸۳). به منظور پردازش رکوردها ابتدا تصحیح خط مبنا برای رکوردها انجام شد و سپس طیف فوریه شتاب‌نگاشت رسم گردید تا فرکانس‌های قطع مورد نیاز برای فیلتر میان‌گذر مشخص شود (Key و Naeim، ۱۹۹۰).

بدین صورت، دو فرکانسی که در آن‌ها FFT مینیمم می‌باشد (در ابتدا و انتهای نمودار) به طور چشمی محاسبه شده و سپس فیلتر میان‌گذر باترورث ۴ مرتبه چهار با این دو فرکانس بر شتاب‌نگاشت اعمال شد و رکورد تصحیح شده برای انتگرال‌گیری و محاسبات طیفی به دست آمد (مقدم و فنائی، ۱۳۸۵). مقادیر به دست آمده برای حداکثر جابجایی زمین (PGD) برای هر دو گروه رکورد انتخاب شده در حالت تصحیح نشده و تصحیح شده در جدول‌های (۳) و (۴) ارائه شده است. FL و FH فرکانس‌های قطع بالا و پایین هستند که در پردازش رکورد تصحیح شده مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

#### ۵- بحث و بررسی نتایج

تحلیل تاریخچه زمانی برای هر یک از رکوردهای گروه اول و دوم انجام شد. طیف‌های پاسخ غیرالاستیک از میانگین پاسخ‌های هفت رکورد برای نتایج متناظر با مقدار  $T_n$  در حد فاصل  $0.02$  تا  $0.5$  ثانیه به دست آمده است. در شکل (۲-الف) طیف شکل‌پذیری نیاز ( $\mu$ ) برای سیستم با میرایی ۵ درصد، به ازای مقادیر مقاومت تسلیم همپایه شده ( $\bar{f}_y$ ) برابر با  $0.125$ ،  $0.25$  و  $0.5$  برای خاک نرم و سنگ مقایسه شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، برای زمان تناوب‌های کم‌تر از  $0.1$  ثانیه (سیستم‌های خیلی سخت) شکل‌پذیری نیاز به ازای مقادیر  $\bar{f}_y$  مختلف برای سیستم‌های واقع در ساختمانی خاک نرم و ساختمانی سنگی، تقریباً یکسان و بسیار بزرگ می‌باشد. به عنوان مثال، به ازای  $0.5$ ،  $\bar{f}_y = 0.5$  شکل‌پذیری نیاز در محدوده زمان تناوب یاد شده حدوداً بین ۱۰ تا ۲۰۰ می‌باشد.



شکل ۱- مدل رفتاری هیسترتیک مورد استفاده در این مطالعه (Chopra، ۲۰۱۲)

نحوه ارتباط این دو نرم‌افزار به این صورت است که برنامه‌ای در نرم‌افزار MATLAB نوشته شد که تغییر سختی سیستم (تغییر زمان تناوب)، تغییر پارامترهای میرایی و زمان تناوب در روش انتگرال‌گیری مستقیم و استخراج توسط این برنامه انجام می‌شود و برای هر زمان تناوب و هر پارامتر مورد نظر، نرم‌افزار SAP2000، توسط MATLAB اجرا می‌گردد. پس از انجام تحلیل، نتایج موردنیاز توسط برنامه MATLAB ذخیره می‌شود. روند کلی انجام تحلیل‌ها به این صورت که تحلیل تاریخچه زمانی خطی برای سیستم‌های SDOF با زمان تناوب  $0.2$  تا  $0.5$  ثانیه انجام شده و تغییر مکان حداکثر ( $u_0$ ) و حداکثر نیروی استاتیک معادل ( $f_{s0}$ ) مربوط به هر زمان تناوب به دست می‌آید. سپس، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای مقادیر  $\bar{f}_y$  برابر با  $0.125$ ،  $0.25$  و  $0.5$  انجام شده و تغییر مکان حداکثر سیستم الاستوپلاستیک ( $u_m$ ) و شکل-پذیری نیاز ( $\mu = u_m/u_y$ ) برای هر زمان تناوب به دست می‌آید. به منظور به دست آوردن ضریب کاهش مقاومت تسلیم ( $R_y$ ) و نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک ( $u_m/u_0$ ) به ازای ضریب شکل-پذیری ثابت (برابر با  $1/5$ ،  $4$  و  $8$ ) از یک روش با فرایند تکراری استفاده می‌شود (Chopra، ۲۰۱۲).

#### ۳- انتخاب رکوردهای زلزله

به منظور انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی خطی و غیرخطی، از ۲ گروه ۷ تایی رکوردهای زلزله ثبت شده در ایران در حوزه دور از گسل استفاده شد. گروه اول شامل ۷ رکورد زلزله ثبت شده روی خاک نرم (با سرعت موج برشی کم‌تر از ۱۷۵ متر برثانیه) با بزرگی  $5/1$  تا  $6/2$ ، و گروه دوم شامل ۷ رکورد زلزله ثبت شده در ساختمانی سنگی (با سرعت موج برشی بیشتر از ۷۵۰ متر بر ثانیه) با بزرگی  $6/1$  تا  $6/4$  می‌باشد. مشخصات این رکوردها در جدول‌های (۱) و (۲) آورده شده است. رکوردهای انتخابی از مرکز تحقیقات راه،

جدول ۱- مشخصات رکوردهای زلزله گروه اول، ثبت شده روی خاک نرم

ردیف	نام ایستگاه	شماره رکورد	تاریخ وقوع زلزله	فاصله رومرکز (کیلومتر)	بزرگی $M_b$	بیشترین شتاب تصحیح نشده (cm/s/s)			سرعت موج برشی (m/s)
						مؤلفه طولی	مؤلفه قائم	مؤلفه عرضی	
						۹۵	۹۶	۱۰۹	
۱	رودسر	۱۱۵۱	۰۷/۲۲/۱۹۸۰	۲۶	۵/۳	۹۵	۹۶	۱۰۹	۱۷۰
۲	رودسر	۱۱۸۵	۱۲/۰۳/۱۹۸۰	۱۶	۵/۱	۱۲۱	۴۳	۷۲	۱۷۰
۳	رودسر	۱۳۵۵	۰۶/۲۰/۱۹۹۰	۸۶	۶/۲	۹۴	۸۵	۸۱	۱۷۰
۴	نوشهر	۳۳۶۸/۰۱	۰۵/۲۸/۲۰۰۴	۴۳	۶/۲	۷۳	۳۸	۱۰۷	۱۶۵
۶	بابل	۳۴۳۱	۰۵/۲۸/۲۰۰۴	۱۰۰	۶/۲	۱۴	۱۲	۱۳	۱۵۵
۷	بابل	۵۳۶۲	۰۱/۱۱/۲۰۱۲	۱۸	۵/۱	۳۳	۱۵	۱۱	۱۵۵

جدول ۲- مشخصات رکوردهای زلزله گروه دوم، ثبت شده در ساختمان سنگی

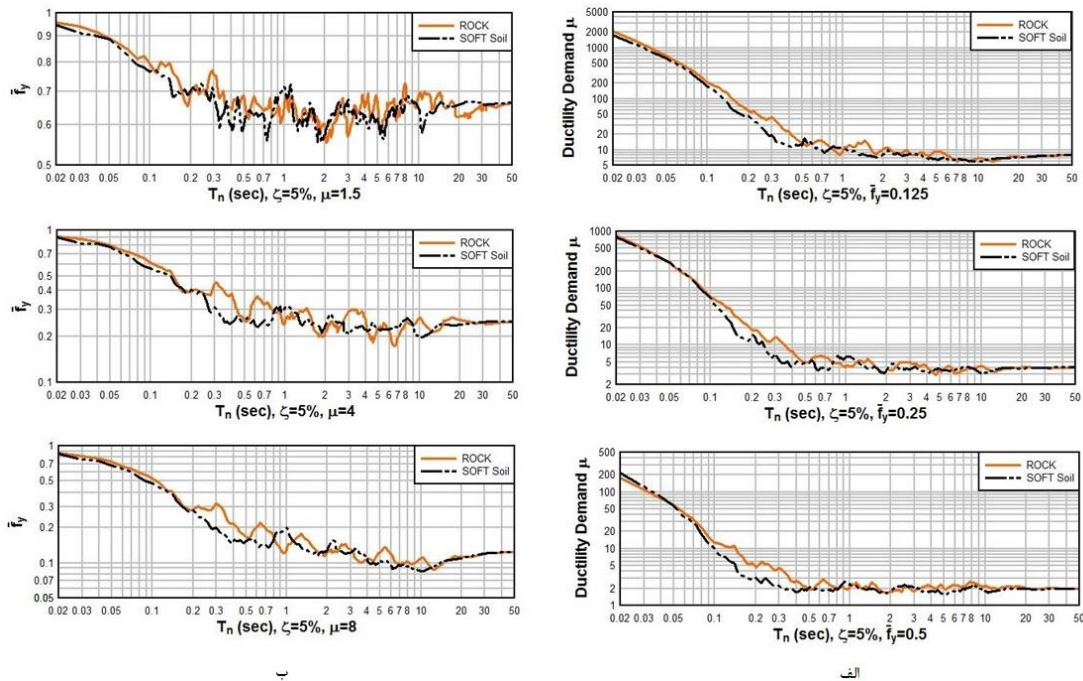
ردیف	نام ایستگاه	تاریخ وقوع زلزله	شماره رکورد	فاصله رومرکز (کیلومتر)	بزرگی $M_b$	بیشترین شتاب تصحیح نشده (cm/s/s)			سرعت موج برشی (m/s)
						مؤلفه طولی	مؤلفه قائم	مؤلفه عرضی	
						۲۹	۱۲	۲۵	
۱	سده	09/16/1078	۱۰۸۵/۰۲	۱۶۶	۶/۴	۲۹	۱۲	۲۵	۸۵۴
۲	کاخک	11/27/1979	۱۱۳۵	۹۰	۶/۱	۵۹	۳۳	۴۵	۱۷۵۰
۳	سده	11/27/1979	۱۱۳۸/۰۱	۸۶	۶/۱	۹۴	۸۵	۸۱	۸۵۴
۴	مود	05/10/1997	۱۷۵۱	۱۳۰	۶/۴	۴۱	۱۹	۳۰	۱۰۰۴
۵	بهار	06/22/2002	۲۷۵۰	۹۶	۶/۲	۳۴	۱۷	۴۰	۹۱۳
۶	رودبار	05/28/2004	۳۴۳۷	۲۰۵	۶/۲	۳۲	۱۸	۴۳	۸۰۰
۷	رزگرد	05/28/2004	۳۴۴۴	۱۲۸	۶/۲	۴۳	۳۰	۶۰	۸۹۸

جدول ۳- مشخصات رکوردهای تصحیح شده گروه اول (خاک نرم)

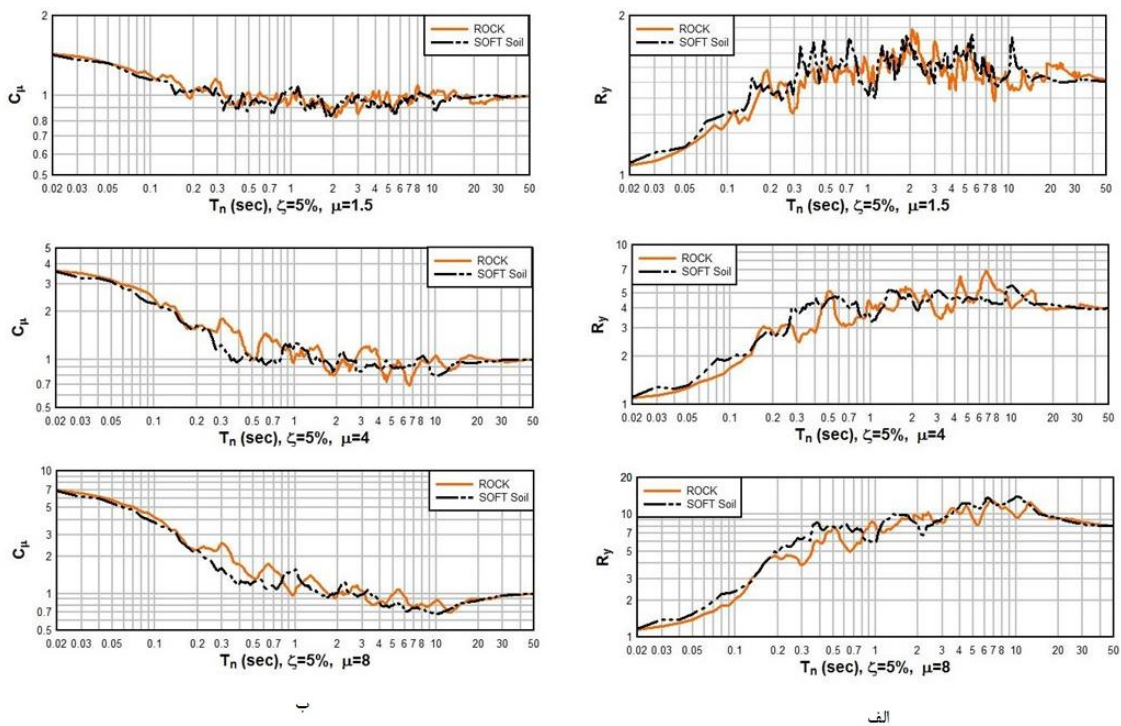
شماره رکورد	حداکثر شتاب تصحیح نشده (cm/s <sup>2</sup> )	حداکثر شتاب تصحیح شده (cm/s <sup>2</sup> )	حداکثر سرعت تصحیح نشده (cm/s)	حداکثر سرعت تصحیح شده (cm/s)	حداکثر جابه‌جایی تصحیح نشده (cm)	حداکثر جابه‌جایی تصحیح شده (cm)	فرکانس بالا و فرکانس پایین (Hz)
۱۱۵۱	۱۰۸/۸۶	۱۰۶/۵۲	۱۰/۲۴۵۶۹	۴/۵۶۵۲۹	۶۹/۸۴	۰/۷۷۲۷۷	۰/۲-۴۰
۱۱۸۵	۱۲۱/۲۷	۱۲۴/۷۳	۱۲/۰۴۷۶۵	۵/۱۴۷۰۸	۱۰۳/۰۴۷	۰/۶۴۳۴۴	۰/۲۵-۴۰
۱۳۵۵	۹۲/۹	۹۵/۹۶	۳۷/۴۸۰۳۱	۱۵/۳۶۹۶۲	۴۷۳/۴۱۲	۱۵/۳۲۳۳۸	۰/۰۶-۲۵
۳۳۶۸/۰۱	۱۰۶/۷۴	۱۰۶/۹	۱۲/۳۹۵۱۱	۹/۳۰۶۸	۵۸/۶۳۳۹	۳/۷۰۶۴۲	۰/۱۵-۲۰
۳۳۷۳	۵۲/۶۳	۵۷/۳	۶/۴۲۳۱۴	۵/۵۸۴۶۴	۱۵/۵۴۲۷۱	۱/۰۲۸۰۴	۰/۱۷-۱۵
۳۴۳۱	۱۳/۴۹	۱۳/۲۱	۱/۶۶۷۴۹	۱/۲۷۴۸۴	۹/۰۶۳۸۸	۰/۵۰۵۸۹	۰/۰۵-۲۰
۵۳۶۲	۳۲/۷۵	۳۳/۹۸	۲/۳۶۶۴۵	۲/۴۹۹۳۶	۷/۸۴۸۳۶	۰/۳۶۶۱۴	۰/۱۵-۲۰

جدول ۴- مشخصات رکوردهای تصحیح شده گروه دوم (ساختمان سنگی)

شماره رکورد	حداکثر شتاب تصحیح نشده (cm/s <sup>2</sup> )	حداکثر شتاب تصحیح شده (cm/s <sup>2</sup> )	حداکثر سرعت تصحیح نشده (cm/s)	حداکثر سرعت تصحیح شده (cm/s)	حداکثر جابه‌جایی تصحیح نشده (cm)	حداکثر جابه‌جایی تصحیح شده (cm)	فرکانس بالا و فرکانس پایین (Hz)
۱۰۸۵/۰۲	۲۸/۶۷	۲۵/۶۵	۲۸/۱۵۱۷	۲/۶۶۶۲	۴۴۶/۱۸۸۶	۱/۳۱۸۰۵	۰/۱۷-۵۰
۱۱۳۵	۵۹/۰۱	۶۰/۰۱	۲۱/۴۷۴۵۲	۵/۶۸۹۴۶	۹۱/۲۴۵۲۷	۲/۰۳۷۶۹	۰/۲-۳۰
۱۱۳۸/۰۱	۸۷/۴۱	۹۲/۳۱	۴۰/۹۱۳۶۷	۴/۷۳۵۷۹	۸۳۴/۸۱۳	۷/۴۵۸۸۳	۰/۱-۳۰
۱۷۵۱	۴۰/۸۵	۳۶/۸۳	۷/۸۱۷۶۵	۷/۶۹۱۱۱	۸/۰۶۲۷۳	۳/۳۲۲۱۴	۰/۱-۱۵
۲۷۵۰	۴۰/۱۸	۳۸/۷۶	۲/۲۸۳۹	۲/۳۳۷۰۸	۱۲/۳۳۲۵۱	۰/۴۶۵۶۴	۰/۱-۲۰
۳۴۳۷	۴۳/۰۹	۴۳/۳۸	۱/۸۳۱۶۲	۱/۸۹۸۷۶	۱/۶۹۶۹۳	۰/۲۶۲۷۱	۰/۱-۲۰
۳۴۴۴	۵۹/۸۷	۶۷/۱۱	۹/۳۴۶۶۴	۹/۱۲۲۹۳	۷/۱۶۶۹	۱/۵۷۷۹۲	۰/۱-۱۵



شکل ۲- الف) طیف شکل پذیری نیاز، ب) طیف مقاومت تسلیم هم پایه شده برای سیستم با میرایی ۵ درصد، در خاک نرم و ساختمانی سنگی

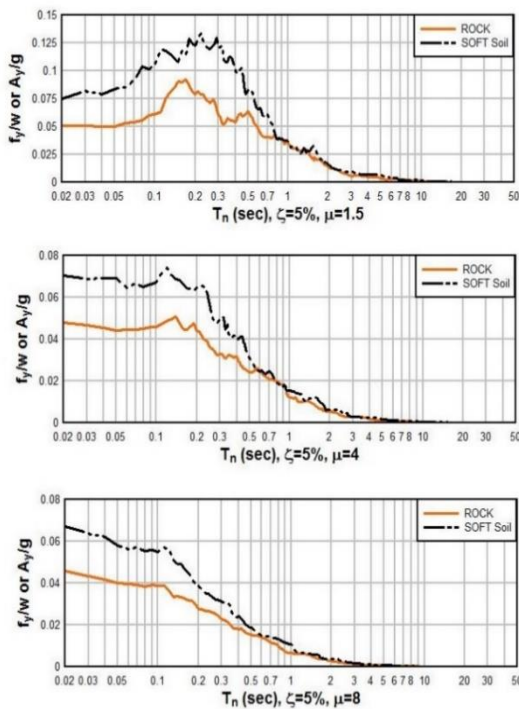


شکل ۳- الف) طیف ضریب کاهش مقاومت تسلیم، ب) طیف نسبت جابه جایی غیرالاستیک برای سیستم با میرایی ۵ درصد، در ساختمانی سنگی و خاک نرم



محدوده زمان‌های تناوب متوسط ضریب کاهش مقاومت تسلیم ( $R_y$ ) می‌تواند بیشتر یا کم‌تر از نسبت شکل‌پذیری ( $\mu$ ) باشد. در محدوده زمان تناوب‌های بلند ضریب کاهش مقاومت تسلیم برای هر دو ساختگاه سنگی و خاک نرم به نسبت شکل‌پذیری مفروض میل کرده و مقدار آن برای سیستم‌های با زمان تناوب کم (صلب) به مقدار یک میل می‌نماید که این با (Elnashai و Borzi، ۲۰۰۰؛ Chopra، ۲۰۱۲) مطابقت دارد.

شکل (۳-ب) نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک را برای ساختگاه سنگی و خاک نرم نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با افزایش شکل‌پذیری در محدوده زمان‌های تناوب کوتاه، شدت کاهش نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک افزایش می‌یابد (شیب نمودار در قسمت اول با افزایش شکل‌پذیری، افزایش می‌یابد). برای هر دو نوع ساختگاه وقتی زمان تناوب به صفر میل می‌کند، نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک تقریباً برابر با شکل‌پذیری مفروض می‌باشد که این با توجه به رابطه  $\frac{u_m}{u_0} = \frac{\mu}{R_y}$  قابل توجیه می‌باشد. مشاهده می‌شود که در ناحیه سرعت ثابت طیف، با افزایش شکل‌پذیری طیف هموارتر می‌شود. همچنین در زمان‌های تناوب بسیار بلند نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای هر دو ساختگاه به سمت یک میل می‌کند که با عنایت به رابطه یاد شده و قانون تغییرمکان‌های مساوی قابل تفسیر است. شکل (۴) طیف شبه‌شتاب تسلیم را برای دو نوع ساختگاه نشان می‌دهد.



شکل ۴- طیف شبه‌شتاب تسلیم همپایه شده برای سیستم با میرایی ۵ درصد واقع در خاک نرم و ساختگاه سنگی

در محدوده زمان تناوب ۰/۱ ثانیه تا ۰/۵ ثانیه، مقادیر شکل‌پذیری نیاز به ازای مقادیر مختلف  $\bar{f}_y$  برای سیستم‌های واقع در ساختگاه سنگی بیشتر از ساختگاه خاک نرم می‌باشد. در محدوده زمان‌های تناوب متوسط تغییرات شکل‌پذیری نیاز برای هر دو ساختگاه از الگوی مشخصی پیروی نمی‌کند. در این محدوده برای هر دو نوع خاک، نسبت شکل‌پذیری نیاز می‌تواند بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از ضریب کاهش مقاومت تسلیم باشد. در محدوده زمان تناوب‌های بلند (سازه‌های انعطاف‌پذیر) نسبت شکل‌پذیری برای هر دو نوع ساختگاه به ضریب کاهش مقاومت تسلیم میل می‌کند. شایان ذکر است که به ازای یک پرپود مشخص با افزایش مقاومت تسلیم هم‌پایه شده ( $\bar{f}_y$ ) شکل‌پذیری نیاز کاهش می‌یابد. در شکل (۲-ب) طیف مقاومت تسلیم همپایه شده ( $\bar{f}_y$ ) برای هر دو نوع خاک به ازای نسبت شکل‌پذیری برابر با ۱/۵، ۴ و ۸ مقایسه شده است.

همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود در محدوده زمان تناوب‌های کم‌تر از ۰/۲ ثانیه به جز برای نسبت شکل‌پذیری ۱/۵ که در برخی زمان‌های تناوب اختلاف بین مقاومت تسلیم سیستم واقع در ساختگاه خاک نرم و ساختگاه سنگی قدری بیشتر می‌شود، برای مقادیر نسبت شکل‌پذیری برابر ۴ و ۸، مقاومت تسلیم تقریباً یکسان می‌باشد. مقاومت تسلیم همپایه شده برای سیستم با شکل‌پذیری برابر با ۱/۵ در محدوده زمان تناوب ۰/۲ تا ۳۰ ثانیه و برای سیستم‌های با شکل‌پذیری برابر با ۴ و ۸ از زمان تناوب ۰/۷ تا ۲۰ ثانیه روند الگوی مشخصی ندارد. برای شکل‌پذیری‌های ۴ و ۸ در حد فاصل زمان تناوب ۰/۲ تا ۰/۷ ثانیه مقاومت تسلیم همپایه شده برای سیستم واقع در ساختگاه سنگی بیشتر از سیستم متناظر واقع در ساختگاه خاک نرم می‌باشد. همچنین با توجه به شکل (۲-ب) می‌توان مشاهده کرد که برای سیستم با شکل‌پذیری برابر با ۱/۵ از زمان تناوب ۰/۱۵ ثانیه تا ۳۰ ثانیه، مقاومت تسلیم برای هر دو نوع ساختگاه می‌تواند کم‌تر یا بیشتر از  $1/\mu$  باشد که با افزایش شکل‌پذیری طول این محدوده کاهش می‌یابد. همانگونه که در شکل (۲-ب) مشاهده می‌شود، در محدوده زمان تناوب‌های بلند (سازه‌های انعطاف‌پذیر) مقاومت تسلیم همپایه شده برای هر دو نوع ساختگاه به مقدار  $1/\mu$  میل می‌کند.

در شکل (۳-الف) طیف ضریب کاهش مقاومت تسلیم برای هر دو نوع خاک به ازای نسبت شکل‌پذیری برابر با ۱/۵، ۴ و ۸ مقایسه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که ضریب کاهش مقاومت تسلیم با افزایش زمان تناوب در محدوده پرپودهای کوتاه افزایش می‌یابد و در زمان تناوب ۰/۲ تا ۰/۱۵ ثانیه ضریب کاهش مقاومت تسلیم برای ساختگاه سنگی قدری کم‌تر از ساختگاه خاک نرم می‌باشد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش شکل‌پذیری، میزان همواری طیف افزایش می‌یابد. در

$$C_{\mu} = \frac{\mu}{R_y} = \frac{\mu}{1 + (\mu - 1)[(1 - e^{-aT}) + (bT\mu^{-1}e^{-cT})]} \quad (23)$$

مقادیر  $a$ ،  $b$  و  $c$  در رابطه (۲۳) که با استفاده از روند ذکر شده برای  $R_y$  به دست آمده‌اند، در جدول (۶) برای ساختگاه سنگی و خاک نرم ارائه شده است.  $R2$  ضریب تعیین می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{reg}}{SS_{tot}}$$

که  $SS_{reg}$  کم‌ترین مربعات به دست آمده از رگرسیون و  $SS_{tot}$  کم‌ترین مربعات کل داده‌ها می‌باشد. شکل (۵) ضریب کاهش مقاومت تسلیم و نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک را برای ساختگاه سنگی نشان می‌دهد. شکل (۵-الف) ضریب کاهش مقاومت تسلیم بدست آمده از رابطه پیشنهادی (۲۲) را برای شکل‌پذیری‌های  $1/5$ ،  $1/4$  و  $1/8$  نشان می‌دهد که طیف حاصل از رابطه پیشنهادی با روابط Miranda (۱۳) (۲۰۰۰، Miranda) و همچنین Krawinkler و Nassar در ساختگاه سنگی مقایسه شده است (Krawinkler و Nassar، ۱۹۹۱).

شکل (۵-ب) نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک به دست آمده از رابطه (۲۳) را برای ساختگاه سنگی نشان می‌دهد که با رابطه پیشنهادی Ruiz-Garcia و Miranda مقایسه شده است (Ruiz-Garcia و Miranda، ۲۰۰۲). روابط ارائه شده توسط Miranda و همچنین Krawinkler و Nassar برای سیستم‌های واقع در ساختگاه سنگی ایران، در محدوده زمان‌های تناوب خیلی کوتاه، ضریب کاهش مقاومت تسلیم را در محدوده پیوندهای کوتاه قدری بیشتر تخمین می‌زند. همچنین، رابطه Ruiz-Garcia و Miranda نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک را در محدوده پیوندهای کوتاه قدری کم‌تر محاسبه می‌نماید.

شکل (۵) نشان می‌دهد که روابط پیشنهادی دارای انطباق بسیار خوبی با مقادیر به دست آمده براساس زلزله‌های ایران در مقایسه با روابط محققین دیگر در ساختگاه سنگی ایران می‌باشد.

در شکل (۶) هم ضریب کاهش مقاومت تسلیم و نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای خاک نرم نشان داده شده است که این نمودارها از متوسط نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی و روابط پیشنهادی (۲۲) و (۲۳) به دست آمده‌اند. با عنایت به شکل، روابط پیشنهادی مقادیر حدی را اقناع می‌نمایند.

با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در ناحیه پیوندهای کوتاه و متوسط، شبه‌شتاب تسلیم برای خاک نرم به طور قابل توجه (تا حدود ۵۰ درصد) بیشتر از ساختگاه سنگی می‌باشد. برای سیستم با شکل‌پذیری  $1/5$  در محدوده زمان تناوب  $0/02$  تا  $0/8$  اختلاف بین شبه‌شتاب تسلیم برای دو نوع ساختگاه خاک نرم و سنگ زیاد می‌باشد، در خارج از این محدوده شبه‌شتاب تسلیم مستقل از نوع ساختگاه می‌باشد. برای سیستم با شکل‌پذیری  $1/4$  خارج از محدوده  $0/02$  تا  $0/6$  ثانیه و برای سیستم با شکل‌پذیری  $1/8$  خارج از محدوده  $0/02$  تا  $0/5$  این مسئله صدق می‌کند.

خارج از محدوده  $0/02$  تا  $0/6$  ثانیه و برای سیستم با شکل‌پذیری  $1/8$  خارج از محدوده  $0/02$  تا  $0/5$  این مسئله صدق می‌کند.

### ۶- ارائه روابط برای ضریب کاهش مقاومت تسلیم و نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک

میانگین ضریب کاهش مقاومت به دست آمده از تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی نشان می‌دهد که شرایط حدی زیر برای ضریب کاهش مقاومت تسلیم برقرار می‌باشد:

(۱) برای زمان‌های تناوب خیلی کوتاه (سیستم‌های صلب):

$$R_y(T \rightarrow 0, \mu_i) = 1 \quad (20)$$

(۲) برای زمان تناوب‌های بلند (سیستم‌های انعطاف‌پذیر):

$$R_y(T \rightarrow \infty, \mu_i) = \mu_i \quad (21)$$

با توجه به شرایط حدی ذکر شده، رابطه زیر برای ضریب کاهش مقاومت تسلیم ارائه شد:

$$R_y = 1 + (\mu - 1)[(1 - e^{-aT}) + (bT\mu^{-1}e^{-cT})] \quad (22)$$

$a$ ،  $b$  و  $c$  ثابت‌هایی هستند که با استفاده از برازش منحنی در نرم‌افزار MATLAB به دست آمدند. به منظور برازش منحنی از الگوریتم Levenberg-Marquardt استفاده شده است که به عنوان روش کم‌ترین مربعات کاهش یافته شناخته می‌شود و برای حل مسائل کم‌ترین مربعات غیرخطی استفاده می‌گردد. این روش، یک تکنیک تکراری است که حداقل یک تابع را که به صورت مجموعی از مربعات توابع غیرخطی بیان می‌کند، تعیین می‌نماید. همانگونه که قبلاً ذکر شد، نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$C_{\mu} = \frac{u_m}{u_0} = \mu \bar{f}_y = \frac{\mu}{R_y}$$

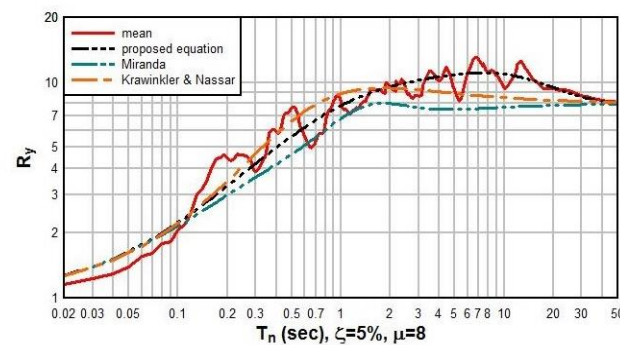
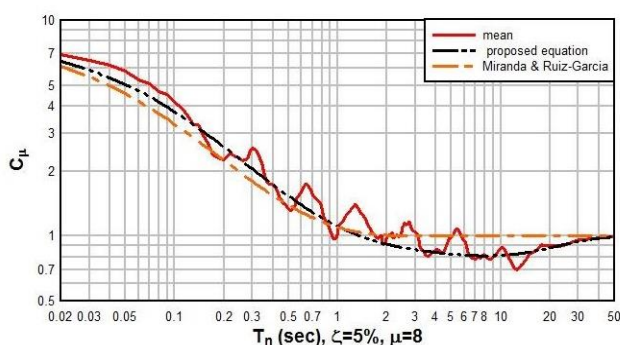
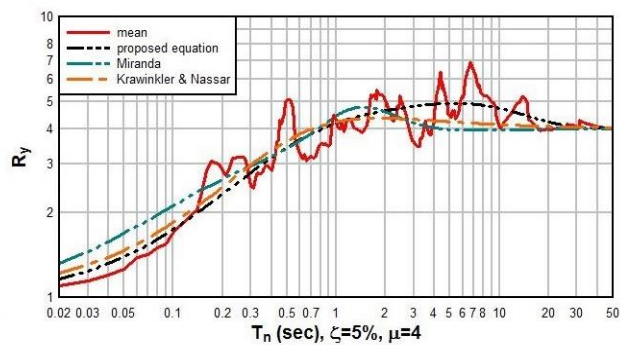
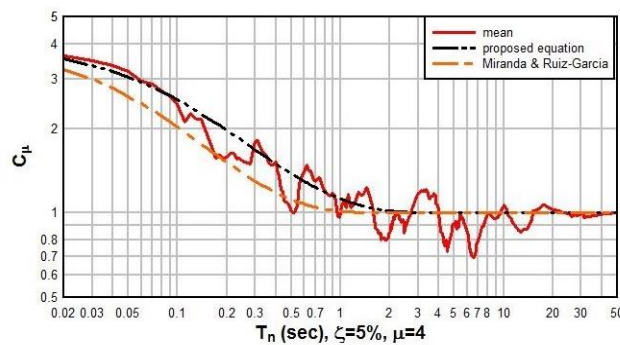
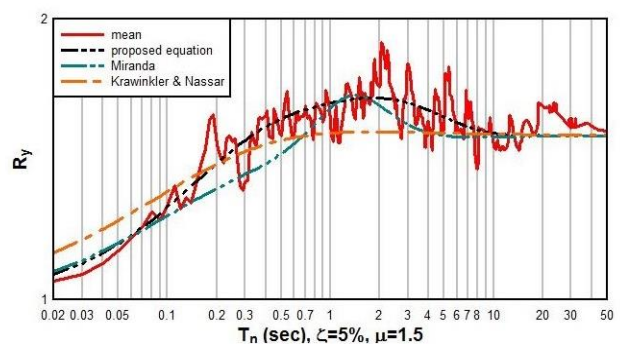
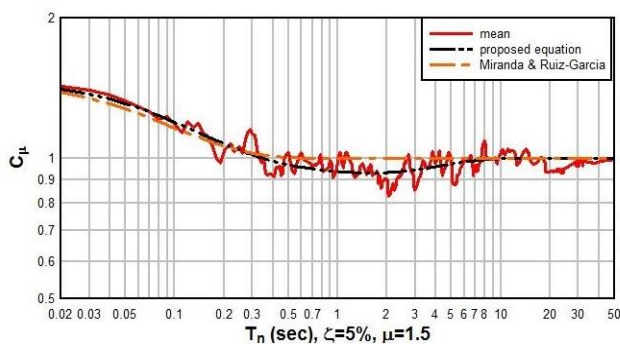
با استفاده از رابطه نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برحسب ضریب کاهش مقاومت تسلیم،  $C_{\mu}$  را به صورت زیر می‌توان ارائه داد:

جدول ۵- مقادیر ثابت‌های a, b و c در رابطه (۲۲)

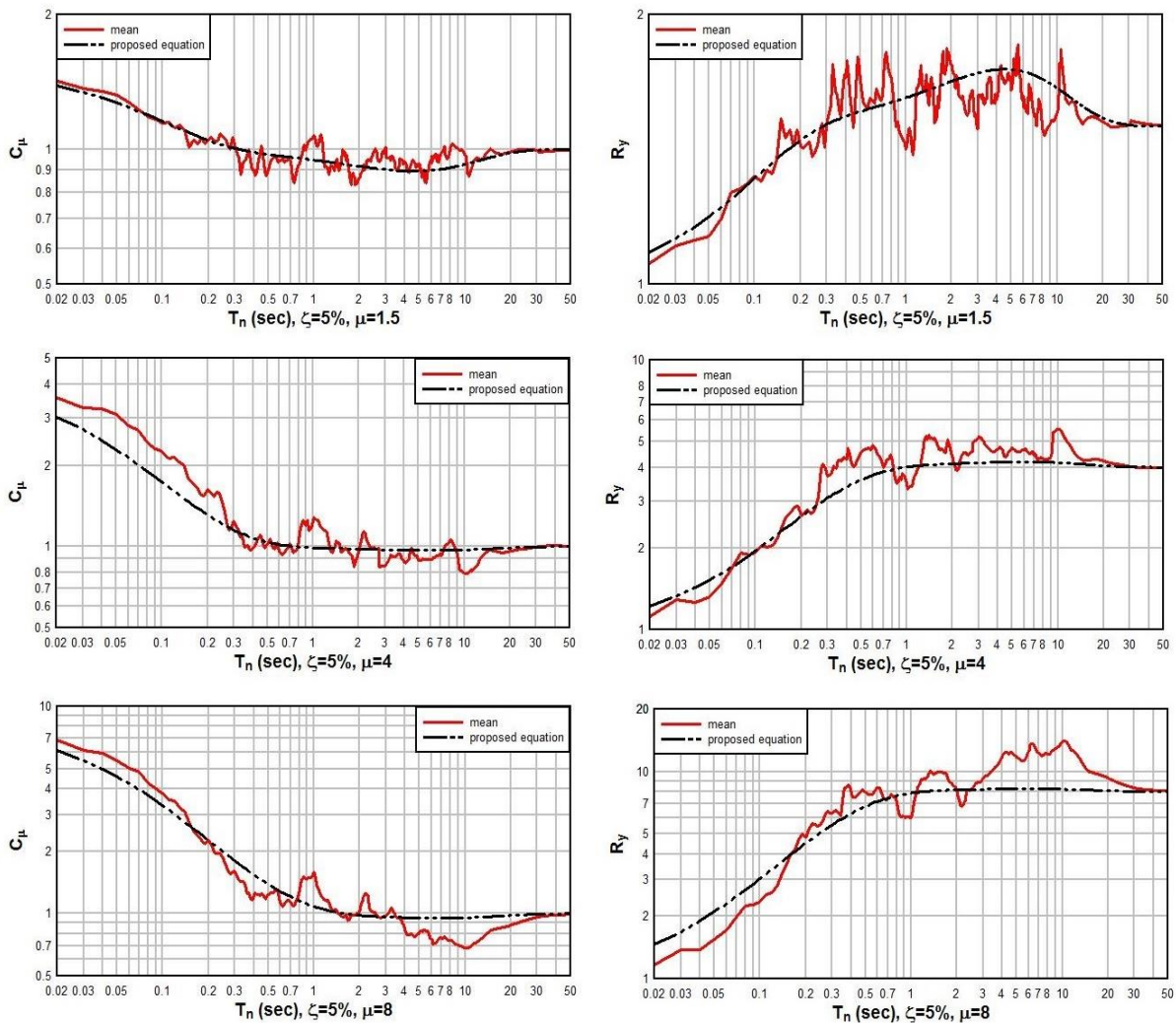
$\mu = 1.5$				$\mu = 4$				$\mu = 8$				نوع ساختگاه
a	b	c	R2	a	b	c	R2	a	b	c	R2	
۶/۳۸۲	۰/۶۵۴۱	۰/۵۵۰۵	۰/۳۸۶	۲/۶۷	۰/۶۱۸۵	۰/۱۸۵۸	۰/۶۲۸۷	۱/۷۶۱	۱/۳۱	۰/۱۳۶۸	۰/۸۵۲۸	سنگ
۹/۱۱۵	۰/۲۴۵۱	۰/۲۲۱۶	۰/۸۳	۰/۸۳۵	۰/۳۴۴۹	۰/۱۶۸۳	۰/۹۵۶۶	۳/۴۳۲	۰/۹۲۸۹	۰/۱۶۴۱	۰/۹۲۸۹	خاک نرم

جدول ۶- مقادیر ثابت‌های a, b و c در رابطه (۲۳)

$\mu = 1.5$				$\mu = 4$				$\mu = 8$				نوع ساختگاه
a	b	c	R2	a	b	c	R2	a	b	c	R2	
۶/۳۹۶	۰/۵۶۵۶	۰/۶۲۰۸	۰/۴۴۵	۱/۸۷۳	۱/۳۶۶	۳/۹۶۸	۰/۸۴۲	۱/۶۴۵	۰/۷۱۶۳	۰/۱۲۲۹	۰/۹۹	سنگ
۸/۶۵۲	۰/۱۵۷۱	۰/۲۱۶۶	۰/۷۹	۵/۶۷۸	۰/۳۳۱۵	۰/۱۶۳۸	۰/۹۸	۲/۲۵۵	۱/۲۹۷	۰/۱۴۶۹	۰/۹۹	خاک نرم



شکل ۵- الف) ضریب کاهش مقاومت تسلیم به دست آمده از رابطه (۲۲)، ب) نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک به دست آمده از رابطه (۲۳) برای ساختگاه سنگی



شکل ۶- الف) ضریب کاهش مقاومت تسلیم به دست آمده از رابطه (۲۲)، ب) نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک به دست آمده از رابطه (۲۳) برای خاک نرم

## ۶- نتیجه‌گیری

بزرگ، در زمان تناوب ( $0.1 < T < 1 \text{ sec}$ ) نسبت شکل‌پذیری نیاز برای ساختگاه سنگی بیشتر از خاک نرم و در محدوده زمان‌های تناوب بلند، نسبت شکل‌پذیری نیاز برای دو ساختگاه یکسان بوده و به ضریب کاهش مقاومت تسلیم ( $R_y$ ) میل می‌کند. ۴- ضریب کاهش مقاومت تسلیم ( $R_y$ ) به ازای مقادیر مختلف شکل‌پذیری در محدوده زمان‌های تناوب خیلی کوتاه ( $T < 0.2 \text{ sec}$ )، برای خاک نرم اندکی بیشتر از ساختگاه سنگی می‌باشد. در محدوده زمان تناوب‌های میانی، ضریب کاهش مقاومت تسلیم در بیشتر نواحی این محدوده برای خاک نرم بیشتر می‌باشد. در محدوده زمان تناوب‌های بلند، ضریب کاهش مقاومت تسلیم برای هر دو ساختگاه یکسان بوده و به ضریب شکل‌پذیری ( $\mu$ ) میل می‌کند. ۵- نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک، به ازای مقادیر مختلف شکل‌پذیری در محدوده زمان تناوب‌های خیلی کوتاه

۱- برای هر دو نوع ساختگاه سنگی و خاک نرم، طیف شبه-شتاب تسلیم همپایه شده ( $\frac{A_y}{g}$ ) با افزایش شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. برای سیستم‌های سخت با شکل‌پذیری پایین طیف ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد، اما برای شکل‌پذیری‌های بالا شبه-شتاب تسلیم در طول تمام محدوده زمان تناوب کاهش می‌یابد. در محدوده زمان تناوب‌های بلند، شبه‌شتاب تسلیم به صفر میل می‌کند. ۲- شبه‌شتاب تسلیم هم‌پایه شده برای زمان تناوب‌های کوتاه، به ازای سطوح شکل‌پذیری مختلف برای خاک نرم به طور قابل توجهی (تا حدود ۵۰ درصد) بیشتر از ساختگاه سنگی می‌باشد. ۳- شکل‌پذیری نیاز به ازای مقادیر مختلف مقاومت تسلیم همپایه شده در محدوده زمان تناوب‌های خیلی کوتاه ( $T < 0.1 \text{ sec}$ ) برای هر دو ساختگاه برابر و دارای مقادیر بسیار

مقدم ح، فنائی ن، "بررسی روابط کاهندگی مختلف در پیش-بینی شتاب رکوردهای زمین-لرزه سیلاخو"، مجله عمران شریف، ۱۳۸۵، ۱۷ (۳۵)، ۶-۱۵.

Borzi B, Elnashai AS, "Refined force reduction factors for seismic design", *Engineering Structures*, 2000, 22 (10), 1244-1260.

Chopra AK, "Dynamics of Structures: Theory and Application to Earthquake Engineering (4<sup>th</sup> ed. Vol. 4<sup>th</sup> Edition). NJ: Prentice-Hall: Englewood Cliffs, 2012.

Chopra AK, Chintanapakdee C, "Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions", *Earthquake Engineering & structural Dynamics*, 2001, 30 (12), 1769-1789.

Chopra AK, Chintanapakdee C, "Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures: single-degree-of-freedom bilinear systems", *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130 (9), 1309-1319.

Elghadamsi F, Mohraz B, "Inelastic earthquake spectra", *Earthquake engineering & structural dynamics*, 1987, 15 (1), 91-104.

Hassani N, Ghodrati Amiri G, Bararnia M, Sinaiean F, "Inelastic Displacement Ratio for Structures Subjected to Pulse Like Near Fault Ground Motions", *Modares Civil Engineering journal*, 2013, 13 (1), 15-28.

Hidalgo P, Arias A, "New Chilean code for earthquake-resistant design of buildings", Paper presented at the Proceedings 4<sup>th</sup> US National Conference on Earthquake Engineering.

Lai SSP, Biggs JM, "Inelastic response spectra for aseismic building design", *Journal of the Structural Division*, 1980, 106 (6), 1295-1310.

Lee W, Yu C, Tung S, "A displacement-based strength reduction factor for high-rise steel moment-resisting frames", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2006, 15 (3), 233-247.

MATLAB R2011b (Version 7.13.0.564), 2011, the Math Works Inc.

Miranda E, "Seismic evaluation and upgrading of existing buildings", (Ph.D.), University of California at Berkeley, Berkeley, California, 1991.

Miranda E, "Inelastic displacement ratios for structures on firm sites", *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126 (10), 1150-1159.

Miranda E, Bertero VV, "Evaluation of structural response factors using ground motions recorded during the Loma Prieta earthquake", *CSMIP-1991*.

Miranda E, Bertero VV, "Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design", *Earthquake spectra*, 1994, 10, 357-357.

Miranda E, Ruiz-Garcia J, "Influence of stiffness degradation on strength demands of structures built on soft soil sites", *Engineering Structures*, 2002, 24 (10), 1271-1281.

Naeim F, Key D, "The seismic design handbook", edited by Farzad Naeim, Van Nostrand Reinhold, New York, 1989. No. of pages: 450. Price: £49. ISBN:

$(T < 0.2 \text{ sec})$  برای هر دو ساختگاه خاک نرم و سنگ تقریباً یکسان می‌باشد. در محدوده زمان تناوب‌های بزرگ‌تر از  $0.2$  ثانیه در بیشتر نواحی نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای ساختگاه سنگی قدری بیشتر از خاک نرم می‌باشد. در محدوده زمان تناوب-های بلند، نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای هر دو ساختگاه یکسان بوده و به عدد یک میل می‌کند.

۶- روابط Miranda و همچنین Krawinkler و Nassar برای سیستم‌های واقع در ساختگاه سنگی ایران، ضریب کاهش مقاومت تسلیم را در محدوده پریودهای کوتاه قدری بیشتر تخمین می‌زند. همچنین، رابطه Ruiz-Garcia و Miranda نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک را در محدوده پریودهای کوتاه قدری کم-تر محاسبه می‌نماید.

۷- با استفاده از تحلیل رگرسیون، روابطی برای ضریب کاهش مقاومت تسلیم  $R_y$  و نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک  $C_{\mu}$  بر اساس زلزله‌های ثبت شده در ساختگاه‌های سنگی و خاک نرم پیشنهاد گردید که روابط پیشنهادی انطباق بسیار خوبی را با مقادیر به دست آمده بر اساس زلزله‌های ایران در مقایسه با روابط محققین دیگر (در ساختگاه سنگی) ارائه می‌دهد.

#### ۷- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی که رکوردهای زلزله ایران را در اختیار این نویسندگان قرار دادند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمائیم.

#### ۸- مراجع

"شبکه شتابنگاری زلزله ایران"، مرکز تحقیقات راه، ساختمان و مسکن.

بهشتی اول س، کبیری ش، "معرفی ضریب کاهش مقاومت ناشی از شکل‌پذیری سازه‌ها برای حرکات نزدیک گسل"، اولین کنفرانس بین‌المللی ساخت و ساز شهری در مجاورت گسل-های فعال، ۱۳۹۰.

تهرانی‌زاده م، حامدی ف، "بررسی اثر شکل‌پذیری و نوع خاک و زمان تناوب بر ضریب کاهش تسلیم الاستوپلاستیک تحت اثر زلزله‌های ایران"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی زلزله-شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۲.

قدرتی امیری غ، زاهدی م، مهدویان ع، غلامی س، "محدوده فرکانسی مناسب جهت پردازش شتابنگاشت‌های ایران برای انواع شرایط ساختمانی"، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۶، ۳۵ (۲)، ۲۳۱-۲۴۹.

- W42-26992-6, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1990, 19 (4), 623-623.
- Nassar AA, Krawinkler H, Seismic Demands for SDOF and MDOF Systems (95), Retrieved from Stanford, California, 1991.
- Newmark NM, Hall WJ, "Seismic design criteria for nuclear reactor facilities", Paper presented at the Proc. World Conf. Earthquake Eng., B-4, 1969.
- Parsaeian SMP, Hosseini Hashemi B, Sarvghad Moghadam AR, "Inelastic Displacement Ratios for Structures on Firm Soil Sites Subjected to Iran Earthquakes Records", Modares Civil Engineering journal, 2013, 12 (4), 11-25.
- Riddell R, Hidalgo P, Cruz E, "Response modification factors for earthquake resistant design of short period buildings", Earthquake spectra, 1989, 5 (3), 571-590. University of Illinois Engineering Experiment Station. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1979.
- Ruiz-García J, Miranda E, "Inelastic displacement ratios for evaluation of existing structures", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2003, 32 (8), 1237-1258.
- SAP2000 Ultimate 15.0.0, Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three Dimensional Structures, 2011, Berkeley, CA: Computers and Structures Inc.
- Tiwari AK, Gupta VK, "Scaling of ductility and damage-based strength reduction factors for horizontal motions", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 29 (7), 969-987.
- Vidic T, Fajfar P, Fischinger M, "Consistent inelastic design spectra: strength and displacement, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1994, 23 (5), 507-521.
- Zhai C, Li S, Xie L, Sun Y, "Study on inelastic displacement ratio spectra for near-fault pulse-type ground motions", Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 6 (4), 351-355.

## EXTENDED ABSTRACT

# Yield Strength Reduction Factor and Inelastic Displacement Ratio Based on Earthquake Ground Motions Recorded in Iran

Mehdi Poursha\*, Somayeh Habibi

Department of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Received: 11 March 2017; Accepted: 07 January 2018

### Keywords:

Yield strength reduction factor, Inelastic displacement ratio, Ductility demand, Earthquake ground motions recorded in Iran, Soft-soil and rock sites.

## 1. Introduction

For economic reasons, current design philosophy allows buildings to experience inelastic deformations under the influence of strong earthquake ground motions. As a result, the design lateral strengths prescribed in earthquake-resistant design provisions are generally lower and, in some cases, much lower than the lateral strength required to maintain a structure in the elastic range in the event of severe earthquakes. Reductions in forces, produced by the hysteretic energy dissipation capacity of a structure, are expressed by strength reduction factors. The yield strength-reduction factor,  $R_y$ , is defined as the ratio of the elastic strength demand to the inelastic strength demand as follows (Chopra, 2012; Miranda, 1994):

$$R_y = \frac{f_y(\mu = 1)}{f_y(\mu = \mu_i)} = \frac{u_0}{u_y} \quad (1)$$

in which  $f_y(\mu = 1)$  is the lateral yielding strength required to maintain the system in the elastic range; and  $f_y(\mu = \mu_i)$  is the lateral yielding strength needed to maintain the displacement ductility demand,  $\mu$ , less or equal to a predefined ductility ratio  $\mu_i$ .

Also, the inelastic displacement ratio,  $C_\mu$ , is defined as the ratio of the peak lateral inelastic displacement demand,  $u_m$ , to the peak lateral elastic displacement demand,  $u_0$ , of a SDOF oscillator as follows (Chopra, 2012):

$$C_\mu = \frac{\Delta_{ine}}{\Delta_e} = \frac{u_m}{u_0} \quad (2)$$

This research investigation aims to study the yield strength reduction factor and inelastic displacement ratio using earthquakes recorded in Iran on soft soil and rock sites.

## 2. Methodology

To determine the yield strength reduction factor and the inelastic displacement ratio, 14 seismic ground motions including seven ground motions recorded on soft-soil sites and seven ground motions corresponded to rock sites, were selected. The records were corrected and linear and nonlinear time history analyses were carried out for single-degree-of-freedom (SDOF) systems. A comprehensive study was conducted to elaborate the effects of several parameters including the period of the SDOF system, damping ratio, ductility level and site soil conditions on the strength reduction factor and inelastic displacement ratio. A total of 55608 linear time history analyses, 129024 nonlinear time history analyses without iteration and 15600 analyses with an iterative process were conducted and the results were obtained individually for soft-soil and rock sites.

\* Corresponding Author

E-mail addresses: poursha@sut.ac.ir (Mehdi Poursha), s\_habibi@sut.ac.ir (Somayeh Habibi).

### 3. Results and discussion

The results indicate that the yield strength reduction factor and inelastic displacement ratio depend significantly on the period of the system and the level of ductility and slightly on the soil type at the site. The results also elucidate that with an increase in the ductility level, the strength reduction factor increases in the medium- and long-period regions, and the inelastic displacement ratio increases in the short-period region. The expressions proposed by Miranda (Miranda, 1991) and also by Nassar and Krawinkler (Nassar, 1991), give slightly larger values of strength reduction factor for short-period systems in rock sites in Iran, whereas the equations proposed by Ruiz-García and Miranda, slightly lead to lower estimates of inelastic displacement ratio in the short-period region. The mean values of yield strength reduction factor derived by means of time history analyses indicate that the following limit states should be satisfied for the yield strength reduction factor:

1) For very short periods (stiff systems)

$$R_y(T \rightarrow 0, \mu_i) = 1 \tag{3}$$

2) For very long periods (flexible systems)

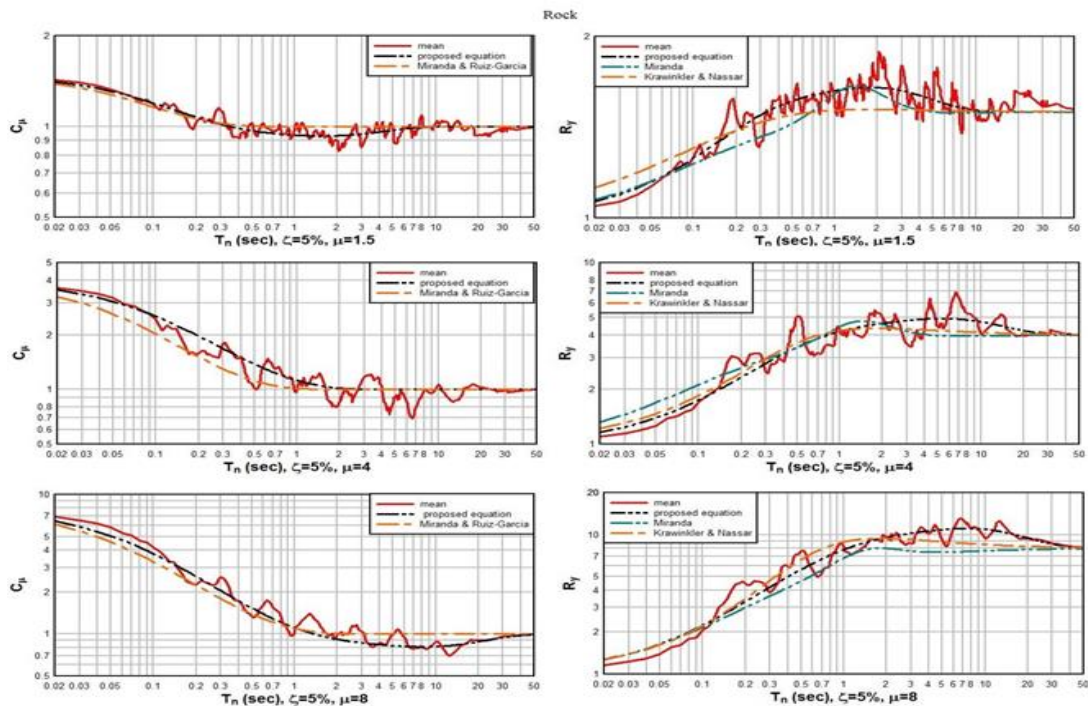
$$R_y(T \rightarrow \infty, \mu_i) = \mu_i \tag{4}$$

The following relations were proposed considering the above-mentioned limit states:

$$R_y = 1 + (\mu - 1)[(1 - e^{-aT}) + (bT\mu^{-1}e^{-cT})] \tag{5}$$

in which a, b and c are constants obtained with the regression analysis in MATLAB software. For this purpose, Levenberg-Marquardt algorithm was employed in which the sum of the squares of the errors between the data points and the function is minimized. With the aid of the relation defined for the inelastic displacement ratio,  $C_\mu$ , in terms of the yield strength reduction factor, the former parameter is presented as follows:

$$C_\mu = \frac{\mu}{R_y} = \frac{\mu}{1 + (\mu - 1)[(1 - e^{-aT}) + (bT\mu^{-1}e^{-cT})]} \tag{6}$$



**Fig. 1.** The yield strength reduction factor and inelastic displacement ratio obtained by the relations proposed in this paper and other researchers

Fig. 1 shows the yield strength reduction factor and inelastic displacement ratio obtained by Eqs. (5) and (6). The spectrum obtained by Eq. (5) is compared to the relations proposed by Miranda and Bertero (1991) and



Nassar and Krawinkler (1991) for rock sites. Also, the inelastic displacement ratio derived by Eq. (6) is compared to that proposed by Ruiz-Garcia and Miranda (2003). A similar figure was obtained for these parameters considering ground motions recorded on soft soil.

#### **4. Conclusions**

The yield strength reduction factor and inelastic displacement ratio were studied in this paper by using earthquake ground motions recorded in Iran on soft-soil and rock sites. Finally, expressions were proposed for the strength reduction factor and inelastic displacement ratio in terms of the period of a system and level of ductility by means of statistical analysis. The proposed equations are in good agreement with those obtained by the other researchers and altogether they provide more accurate results than those proposed by the other researchers.

#### **5. References**

- Chopra AK, "Dynamics of Structures: Theory and Application to Earthquake Engineering (4<sup>th</sup> ed. Vol. 4<sup>th</sup> Edition). NJ: Prentice-Hall: Englewood Cliffs, 2012.
- Miranda E, Bertero VV, "Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design", *Earthquake spectra*, 1994, 10, 357-357.
- Miranda E, Bertero VV, "Evaluation of structural response factors using ground motions recorded during the Loma Prieta earthquake", CSMIP-1991.
- Nassar AA, Krawinkler H, *Seismic Demands for SDOF and MDOF Systems (95)*, Retrieved from Stanford, California, 1991.
- Ruiz-García J, Miranda E, "Inelastic displacement ratios for evaluation of existing structures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2003, 32 (8), 1237-1258.