

# محاسبه‌ی ضریب شکل‌پذیری معادل با در نظر گرفتن

## آثار خستگی کم‌چرخه

موسی محمودی صاحبی<sup>۱\*</sup> و حسین حسن‌زاده<sup>۲</sup>

۱- دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

m.mahmoudi@srttu.edu

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۴/۱۴]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۴/۱۵]

**چکیده:** در اثر زیان‌های تجمعی ناشی از بارهای رفت و برگشتی (پدیده خستگی کم‌چرخه)، نیاز شکل‌پذیری سازه‌ها در برابر زلزله‌های شدید افزایش می‌یابد. به همین دلیل، در طراحی سازه‌ها، ظرفیت شکل‌پذیری سازه‌ها، کمتر از حالت معمول در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، تاثیر خستگی کم‌چرخه بر ظرفیت شکل‌پذیری سازه‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور هفت شتاب‌نگاشت مربوط به حرکت افقی زمین در خاک نوع ۲ انتخاب شد. این شتاب‌نگاشت‌ها، به سیستم یک درجه آزادی با مدل‌های مختلف بار-تغییرشکل، اعمال شد و نیازهای شکل‌پذیری در برابر آن‌ها تعیین شد. برای بررسی تاثیر خستگی کم‌چرخه، مدل‌های مختلف آسیب برای پدیده خستگی در نظر گرفته شد و ضریب شکل‌پذیری متناسب با آن‌ها تعیین شد. این مدل‌ها بر پایه تغییرمکان ماکزیمم، اتلاف انرژی ماکزیمم و ترکیب تغییرمکان ماکزیمم و اتلاف انرژی ماکزیمم استوار است. تغییرات ضریب شکل‌پذیری برحسب پارامتر  $(\gamma)$  که تابعی از انرژی چرخه‌ای، تغییرمکان ماکزیمم و فرکانس طبیعی است بیان شد و رابطه‌ای برای آن ارائه شد. نتایج نشان می‌دهد که پارامتر  $(\gamma)$  در تمام طول بازه‌ی زمان تناوب، نسبتاً پایدار و تقریباً برابر ۰/۹ است.

**واژه‌های کلیدی:** ضریب شکل‌پذیری معادل، خرابی تجمعی، خستگی کم‌چرخه، طیف طراحی.

### ۱- مقدمه

با استناد به مطالعات تحلیلی و تجربی، مشخص شده است که نیاز شکل‌پذیری سازه‌ها، به دلیل حرکات رفت و برگشتی در اثر زلزله، افزایش می‌یابد. به عبارت ساده‌تر، هر رفت و برگشت، باعث کاهش در ظرفیت سختی و مقاومت اعضا (و در نتیجه کل سازه) می‌شود و پس کاهش ظرفیت جذب انرژی باید به کمک عامل دیگری مثل شکل‌پذیری جبران شود. بنابراین کاهش سختی و مقاومت، باعث افزایش نیاز شکل‌پذیری در سازه‌ها می‌شود. همچنان که تعداد رفت و برگشت‌ها زیاد می‌شود، میزان نیاز به شکل‌پذیری بیشتر می‌شود. آسیبی که در اثر حرکات رفت و برگشتی، در مرحله ارتجاعی به وجود می‌آید ناچیز است و می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد، اما آسیب‌های ناشی از رفت و

فلسفه طراحی لرزه‌ای در سازه‌ها بر پایه میزان استهلاک انرژی در جریان تغییرشکل‌های بزرگ غیرارتجاعی<sup>۱</sup> استوار است. اگر سازه‌ها، دارای ظرفیت لرزه‌ای کافی در برابر زلزله‌های شدید باشند قادر خواهند بود زلزله‌ها را درحد زیان قابل قبول پشت سر بگذارند. ضریب شکل‌پذیری (نسبت تغییرمکان ماکزیمم به تغییرمکان تسلیم) یک پارامتر موثر در ارزیابی عملکرد سازه‌ها در برابر زلزله‌های شدید به‌شمار می‌آید. این ضریب، در فرآیند رایج ساخت طیف طرح، مورد استفاده قرار می‌گیرد (روش نیومارک-هال) [۱].

کاهش سختی و مقاومت لحاظ کنند و تأثیر آن‌ها را بر شکل‌پذیری به دست آورند.

زرفام و نیکو نشان دادند، در طراحی لرزه‌ای، فقط در نظر گرفتن مقاومت کافی نیست و باید از پارامتر دیگری به نام انرژی چرخه‌ای استفاده کرد [۶]. گرامی و دانشجو نشان دادند که در ارزیابی رفتار سازه، آسیب تجمعی بسیار حائز اهمیت است [۷]. بوجورکویز و همکاران یک شاخص آسیب بر مبنای انرژی در سازه‌های فولادی معرفی کردند و نشان دادند خرابی‌های تجمعی ناشی از تغییر شکل‌های غیرارتجاعی به عنوان یکی از معیارهای اصلی طراحی محسوب می‌شوند [۸].

بر اساس نظریه آسیب تجمعی، سازه‌هایی که تحت بارهای رفت و برگشتی دچار کاهش تدریجی سختی و تنزل مقاومت می‌شوند به شکل‌پذیری بیشتری نیاز دارند. به عبارت دیگر، آسیب تحت بارهای رفت و برگشتی، شدیدتر از حالتی است که سیستم تحت بارهای یک طرفه استاتیکی<sup>۱</sup> قرار می‌گیرد. بنابراین می‌توان عنوان کرد که ظرفیت شکل‌پذیری سازه‌ها، در اثر آسیب‌های تجمعی کاهش می‌یابد و برای استفاده‌های عملی باید ظرفیت شکل‌پذیری واقعی (با لحاظ اثرات خستگی) را کم‌تر از ظرفیت اسمی (تحت بار استاتیکی) آن‌ها در نظر گرفت. به عنوان یک رویکرد، معرفی یک نوع جدیدی از شکل‌پذیری مورد نیاز است که در آن تأثیر بارهای رفت و برگشتی لحاظ شود. در این پژوهش از آن به عنوان ضریب شکل‌پذیری معادل<sup>۶</sup> نام برده می‌شود. ضریب شکل‌پذیری معادل از حاصل ضرب، ظرفیت اسمی سازه در ضرایب کوچک‌تر از یک به دست می‌آید.

از ضریب شکل‌پذیری معادل، در تعیین ضریب رفتار استفاده می‌شود. ضریب رفتار ضریبی وابسته به شکل‌پذیری است که طراح را از انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی بی‌نیاز می‌کند و در عین حال ظرفیت شکل‌پذیری سازه را در پروسه طراحی لحاظ می‌نماید. اگر در تعیین ضریب رفتار از ظرفیت شکل‌پذیری اسمی سازه استفاده شود، تأثیر خستگی کم‌چرخه منظور نمی‌شود. در صورت استفاده از شکل‌پذیری معادل در تعیین

برگشت‌های غیرارتجاعی بسیار مهم بوده و باید مورد توجه قرار گیرد.

تعیین نیازهای شکل‌پذیری واقعی سازه‌ها، فقط با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی امکان پذیر است که تحلیلی پیچیده و زمانبر است. در آئین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای به مهندسین اجازه داده می‌شود که به جای تحلیل دینامیکی غیرخطی از تحلیل‌های استاتیکی خطی و دینامیکی طیفی خطی استفاده نمایند که بر اساس آن‌ها امکان تعیین نیازهای شکل‌پذیری واقعی وجود ندارد. بنابراین برای اعمال افزایش نیاز شکل‌پذیری در اثر خسارات ناشی از رفت و برگشت (خستگی کم چرخه)، کاهش ظرفیت شکل‌پذیری اسمی سازه، جایگزین می‌شود. منظور از ظرفیت شکل‌پذیری اسمی، ظرفیت شکل‌پذیری سازه در بارگذاری استاتیکی بدون لحاظ کردن اثر رفت و برگشتی است.

به‌طور خلاصه می‌توان گفت نیازهای شکل‌پذیری واقعی همواره بزرگ‌تر از نیازهای شکل‌پذیری اولیه است. چنانچه مدل‌های بار-تغییر شکل مناسبی (کاهنده) وجود داشته باشد که بتواند رفتار واقعی اعضاء و مصالح را در مدت تحریکات رفت و برگشتی، مانند کاهندگی سختی<sup>۱</sup>، تنزل مقاومت<sup>۲</sup> و رفتار باریک‌شدگی حلقه<sup>۳</sup> در نظر بگیرد، استفاده از خسارت تجمعی ضرورت نمی‌یابد. در غیر اینصورت، باید به روش تقریبی آثار آن‌ها را در طراحی در نظر گرفت.

تاکنون مدل‌های خسارت‌های تجمعی متعددی به وسیله‌ی پژوهشگران مختلف پیشنهاد شده است تا بتوان به کمک آن‌ها در غیاب مدل‌های بار-تغییر شکل مناسب، رفتار سازه را تبیین کرد. بوجورکویز<sup>۴</sup> و همکاران [۲] با استفاده از شاخص آسیب پارک و انگ [۳] با در نظر گرفتن رکوردهای حرکت زمین در ۴ نوع خاک واقع در دره مکزیکو، تأثیر خرابی تجمعی در مقدار ضریب شکل‌پذیری را مورد بررسی قرار دادند. بوجورکویز و همکاران [۴] همچنین با استفاده از مدل ارائه شده به وسیله‌ی ریورا<sup>۵</sup> و همکاران [۵] توانستند اثر خرابی تجمعی را در مدل‌های با

- 1 Stiffness Degradation
- 2 Strength Deterioration
- 3 Pinching Behavior
- 4 Bojorquez
- 5 Rivera

6 Monotonic

7 Equivalent Ductility Factor

پذیری سیستم مربوطه است. منظور از تغییر مکان واقعی، تغییر مکان مربوط به شاخص آسیب قابل قبول است [۹]. سه مدل برای تعیین آسیب‌های تجمعی پیشنهاد شده است که بر پایه آن‌ها می‌توان ضریب شکل‌پذیری معادل را محاسبه نمود. دو مدل اول به ترتیب بر پایه تغییر مکان ماکزیمم و اتلاف انرژی ماکزیمم استوار است و مقادیر به دست آمده براساس آن‌ها، حد بالا و پایین محسوب می‌شوند. مدل سوم، مدل پارک-انگ [۳] است که دقت آن در محاسبه ضریب شکل‌پذیری معادل از دو مدل دیگر بیشتر است. در ادامه مدل‌های فوق ارائه شود.

## ۲-۱- مدل بر پایه تغییر مکان ماکزیمم تحت بارگذاری تدریجی

بر پایه فرضیه معمول شکست، خرابی سیستم ناشی از تغییر مکان غیرارتجاعی ماکزیمم است. مطالعات نشان داده است که فرض بالا غیرمحافظة کارانه است زیرا عوامل دیگری نیز در خرابی سیستم نقش دارند. بر پایه این فرض، شاخص آسیب  $(DI)$  به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۰ و ۱۱]:

$$DI = \frac{D - D_y}{D_u - D_y} = \frac{\mu - 1}{\mu_u - 1} \quad (3)$$

که در آن  $D$  تغییر مکان نهایی تحت بار تدریجی،  $\mu$  ضریب شکل‌پذیری مربوطه به آن و  $\mu_u$  ضریب شکل‌پذیری معادل می‌باشند. در صورتی که  $D \leq D_y$  باشد، شاخص زیان برابر صفر است و دلالت بر این دارد که هیچ‌گونه زیان قابل توجهی در سازه رخ نمی‌دهد. اگر  $D = D_u$  شود سازه منهدم شده و به عبارتی  $DI$  برابر یک می‌شود. معادله (۱) را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت:

$$\mu = DI(\mu_u - 1) + 1 \quad (4)$$

در حالت حدی انهدام که  $DI = 1$  است،  $\mu$  برابر  $\mu_u$  خواهد شد و این بدان معنی است که مدل بالا نمی‌تواند اثر آسیب‌های تجمعی را در تعیین ضریب شکل‌پذیری معادل اعمال نماید.

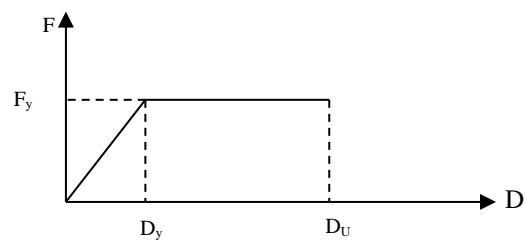
ضریب رفتار، تاثیر آسیب حاصل از چرخه‌های رفت و برگشتی منظور می‌شود و دقت طراحی افزایش می‌یابد.

بر طبق نظریه آسیب، آسیب سازه‌ای که در اثر بارهای رفت و برگشتی به وجود می‌آید تنها به جابه‌جایی حداکثر وابسته نیست. بلکه به آسیب تجمعی حاصل از رفت و برگشت‌های غیرخطی نیز بستگی دارد. تمام پارامترهای موثر در تعیین تغییر شکل‌های سازه با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرارتجاعی<sup>۱</sup> بر آسیب تجمعی<sup>۲</sup> نیز مؤثر می‌باشند. این پارامترها عبارتند از: تعداد چرخه‌ها و بزرگی رفت و برگشت‌ها.

هدف این مقاله، تعیین پارامترهای موثر در تعیین شکل‌پذیری معادل و نیز چگونگی تاثیر هر یک از آنهاست. همچنین ارائه یک رابطه برای تعیین ضریب شکل‌پذیری معادل با در نظر گرفتن عوامل تاثیرگذار آن، از دیگر اهداف این مقاله به شمار می‌رود.

## ۲- ضرایب شکل‌پذیری معادل براساس مدل‌های مختلف آسیب

اگر سیستم سازه‌ای به صورت یک سیستم یک درجه آزادی ارتجاعی-خمیری مشابه شکل ۱ شبیه‌سازی شود، روابط زیر در مورد آن درست است:



شکل ۱. سیستم ارتجاعی-خمیری

$$F_y = m \omega^2 D_y \quad (1)$$

$$\mu = \frac{D}{D_y} \quad (2)$$

که در آن  $F_y$  مقاومت تسلیم،  $m$  جرم،  $\omega$  فرکانس طبیعی،  $D_y$  تغییر مکان تسلیم،  $D$  تغییر مکان واقعی و  $\mu$  ضریب شکل-

## ۲-۲- مدل بر پایه اتلاف انرژی تحت بارگذاری تدریجی ۱

بر پایه یک فرضیه بسیار محافظ کارانه، ظرفیت سیستم سازه‌ای در اتلاف انرژی هیسترتیک تحت بارگذاری چرخه‌ای ۲، برابر ظرفیت اتلاف انرژی تحت بارگذاری تدریجی فرض می‌شود [۹]. به همین دلیل، همواره مقادیر ضریب شکل‌پذیری معادل به دست آمده براساس فرض بالا، دست پایین است. بر پایه این فرض، در یک سیستم ارتجاعی-خمیری ایده‌آل، شاخص آسیب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DI = \frac{E_H}{F_y (D_u - D_y)} = \frac{E_H}{F_y D_y (\mu_u - 1)} \quad (5)$$

که در آن  $E_H$  اتلاف انرژی هیسترتیک و  $\frac{E_H}{F_y D_y}$  انرژی هیسترتیک همپایه است [۳]. با استفاده از معادلات (۱) و (۲) می‌توان نوشت:

$$\frac{E_H}{F_y D_y} = \frac{E_H}{m \omega^2 D_y^2} = \frac{\mu^2 E_H}{m \omega^2 D^2} = \mu^2 \left( \frac{E_H/m}{\omega^2 D^2} \right) \quad (6)$$

اگر  $\frac{E_H/m}{\omega^2 D^2}$  با  $\gamma^2$  نشان داده شود، می‌توان نوشت:

$$\gamma^2 = \frac{E_H/m}{\omega^2 D^2} \Rightarrow \gamma = \frac{\sqrt{E_H/m}}{\omega D} \quad (7)$$

با قرار دادن معادله (۷) در معادله (۶):

$$\frac{E_H}{F_y D_y} = \mu^2 \gamma^2 \quad (8)$$

و با قرار دادن رابطه (۸) در رابطه (۵) ضریب شکل‌پذیری معادل ( $\mu$ ) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\mu = \frac{\sqrt{DI (\mu_u - 1)}}{\gamma} \quad (9)$$

بر اساس معادله (۹) کاهش ضریب شکل‌پذیری ناشی از خستگی کم چرخه ۳ (و یا زیان‌های تجمعی) به وسیله پارامتر  $\gamma$  کنترل می‌شود. این پارامتر بدون بعد بوده و بر اساس رابطه (۷) تعیین می‌شود. پارامتر  $\gamma$  به فرکانس طبیعی سیستم، ماکزیمم تغییر مکان و نسبت  $\sqrt{E_H/m}$  بستگی دارد. هر چه مقدار  $\gamma$  بزرگتر باشد،

کاهش ظرفیت شکل‌پذیری معادل شدیدتر خواهد بود. اگر  $\gamma$  کوچک باشد اثر خستگی کم چرخه قابل چشم‌پوشی است. پارامتر  $\gamma$  وقتی کم‌ترین مقدار را داراست که سیستم یک نیم دور بزند [۹]. برای سیستم‌های ایده‌آل ارتجاعی خمیری رابطه زیر می‌تواند به دست آید:

$$E_H = E_{min} = F_y (D - D_y) \quad (10)$$

با استفاده از معادله (۱۰) و معادلات (۹) و (۷) با فرض  $DI = 1$  خواهیم داشت:

$$\gamma_{min} = \sqrt{\frac{\mu - 1}{\mu}} \quad (11)$$

با قرار دادن معادله (۱۱) در معادله (۹) و با فرض  $DI = 1$ ،  $\mu = \mu_u$  به دست خواهد آمد. در حالت رفتار ارتجاعی مقدار انرژی هیسترتیک حذف شده و مقدار  $\gamma$  برابر صفر می‌شود. معادله (۸) را می‌توان این‌گونه نیز نوشت:

$$\gamma = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{E_H}{F_y D_y}} \quad (12)$$

این معادله نشان می‌دهد که پارامتر  $\gamma$  همپایه شده  $E_H$  است.

## ۲-۳- مدل پارک - انگ

براساس پیشنهاد پارک و انگ [۳] شاخص آسیب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DI = \frac{D}{D_u} + \beta \frac{E_H}{F_y D_u} = \frac{\mu}{\mu_u} + \beta \frac{E_H}{F_y D_y \mu_u} \quad (13)$$

مدل پارک - انگ یک ترکیب خطی ساده شده از مدل‌های تعریف شده قبلی است که مزیت آن ساده بودن روش است. در صورتی که شاخص آسیب سازه‌ای کوچک‌تر از  $0.4$  ( $0.4 < DI$ ) باشد، بدان معنی است که آسیب حادث در سازه پایین بوده و سازه قابل مرمت است. با افزایش مقدار شاخص آسیب، سازه از حالت قابلیت مرمت خارج می‌شود. وقتی شاخص آسیب برابر یک شود، بدین معنا است که سازه منهدم می‌شود.

در رابطه (۱۳) پارامترها همان تعاریف قبلی را دارا است. ضریب  $\beta$  ثابتی است که به خصوصیات سازه‌ای بستگی دارد. این ضریب ممکن است به صورت پارامتری تفسیر شود که تنزل مقاومت را به صورت تابعی از مقدار اتلاف انرژی کنترل می‌کند.

- 1 Monotonic Loading
- 2 Cyclic Loading
- 3 Low - Cycle fatigue

بررسی قرار می‌گیرند. در مطالعه پارامتریک، نوع شتاب‌نگاشت، مقدار سختی، مقدار مقاومت، مقدار شکل‌پذیری، مقدار نسبت میرایی و چگونگی رفتار چرخه‌ای سیستم، متغیر فرض می‌شود و اثر هر یک از آن‌ها در شاخص  $\gamma$  با استفاده از تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطالعات به صورت طیفی و در محدوده پریودهای ۰/۱ ثانیه تا ۳ ثانیه انجام می‌شود.

پس از بررسی تعداد زیادی از رکوردهای ثبت شده از زمین لرزه‌های وقوع‌یافته در سال‌های گذشته، ۷ شتاب‌نگاشت با توجه به بزرگای زلزله (کمینه ۶/۵ و بیشینه ۷/۵)، فاصله گسل (کمینه ۱۳ کیلومتری و بیشینه ۴۳ کیلومتری)، نوع خاک منطقه (خاک تیپ ۲ مطابق با استاندارد ۲۸۰۰) و در نظر گرفتن حداقل مدت زمان حرکت شدید زمین (مطابق ضابطه بیان شده در استاندارد ۲۸۰۰)، از پایگاه داده‌های زمین لرزه‌های قوی [۱۴] انتخاب شد که مشخصات آن‌ها در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. این شتاب‌نگاشت‌ها به عنوان رکوردهای ورودی در تحلیل‌های تاریخیچه زمانی برگزیده شده‌اند. شتاب‌نگاشت‌ها باید قبل از استفاده مقیاس شوند. برای مقیاس نمودن شتاب‌نگاشت‌ها، دو روش کلی وجود دارد [۱۵]. روش اول، روش حوزه فرکانسی است و روش دوم، روش حوزه زمان است که در آن مقادیر دامنه رکورد زلزله در یک ضریب اصلاحی ضرب می‌شوند. در اصلاح مقادیر دامنه، دو روش استفاده می‌شود. در روش اول، مقدار ضریب اصلاحی بر اساس مقایسه طیف‌های حاصل از رکوردهای انتخابی و طیف آیین‌نامه به دست می‌آید که البته به زمان تناوب سیستم نیز بستگی دارد. در روش دوم، مقدار ماکزیمم دامنه شتاب در رکورد شتاب‌نگاشت به یک عدد مشخص (در این پژوهش ۰/۳۵g) تبدیل می‌شود و بقیه مقادیر دامنه رکورد به همین نسبت کوچک یا بزرگ می‌شوند. از آنجا که در این پژوهش، محدوده وسیعی از زمان تناوب سیستم یک درجه آزادی مد نظر قرار گرفت استفاده از روش اول در حوزه زمانی مقدور نبود بنابراین از روش دوم برای به مقیاس درآوردن رکوردها استفاده شد.

برای محاسبه پارامتر  $\gamma$  از نرم‌افزارهای NONLIN [۱۶] و SEISMOSIGNAL [۱۷] استفاده شد.

کزنزا و همکاران [۱۱]، بانون و همکاران [۱۲] و کراوینکلر [۱۳] مقدار ۰/۱۵ را برای ضریب  $\beta$  پیشنهاد نمودند.

با قرار دادن معادله (۷) در معادله (۱۳) خواهیم داشت:

$$DI = \frac{\mu}{\mu_u} + \beta \frac{\gamma^2 \mu^2}{\mu_u} \quad (14)$$

با ساده کردن معادله (۱۴) معادله به صورت زیر در می‌آید:

$$\beta \gamma^2 \mu^2 + \mu + DI (\mu_u) = 0 \quad (15)$$

معادله فوق یک معادله درجه دوم است. با حل آن، پاسخ‌ها به صورت زیر در می‌آید:

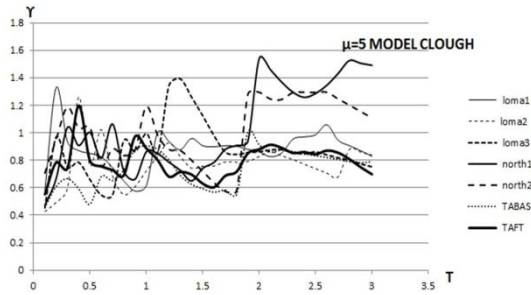
$$\mu = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4(DI)(\mu_u)(\beta \gamma^2)}}{2\beta \gamma^2} \quad (16)$$

$$\mu = \frac{-1 - \sqrt{1 + 4(DI)(\mu_u)(\beta \gamma^2)}}{2\beta \gamma^2} \quad (17)$$

پاسخ رابطه (۱۷) غیر قابل قبول است زیرا شکل‌پذیری نمی‌تواند منفی باشد. معادله (۱۶) پیشنهاد می‌کند که کاهش شکل‌پذیری به علت اثر خستگی کم چرخه (شکل‌پذیری معادل) توسط پارامترهای  $\beta$ ،  $\gamma$ ،  $\mu_u$  و  $DI$  کنترل شود [۹]. با توجه به این‌که، پارامترهای  $\mu_u$  و  $DI$  جزو داده‌های مسئله است و مقدار پارامتر  $\beta$  در پژوهش‌های دیگر تعیین شده است (۰/۱۵)، پس تمرکز عمده این مقاله بر ارزیابی مقدار  $\gamma$  خواهد بود.

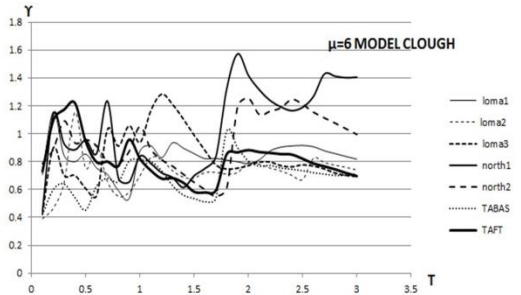
### ۳- ارزیابی تغییرات $\gamma$

یکی از روش‌های متعارف محاسبه انرژی هیسترتیک در نرم‌افزارهای تحلیل غیرخطی محاسبه مساحت زیر منحنی نیرو-تغییرمکان کلیه اجزایی است که وارد ناحیه غیرخطی می‌شوند. این روش مستلزم بررسی رفتار کلیه اجزای سیستم در لحظات مختلف پاسخ است و باید حین تحلیل غیرخطی انجام شود. هدف از این پژوهش محاسبه ضریب شکل‌پذیری معادل با در نظر گرفتن اثر خستگی کم چرخه است. عامل اصلی تعیین این ضریب، شاخص  $\gamma$  است که می‌تواند آثار خستگی را لحاظ کند. به همین دلیل، ادامه مطالعات بر ارزیابی شاخص  $\gamma$  متمرکز می‌شود. برای ارزیابی این شاخص یک مطالعه پارامتریک، روی پاسخ غیرخطی سیستم‌های یک درجه آزادی انجام می‌شود. در این بخش، مهم‌ترین عواملی که بر این شاخص تاثیر دارند مورد



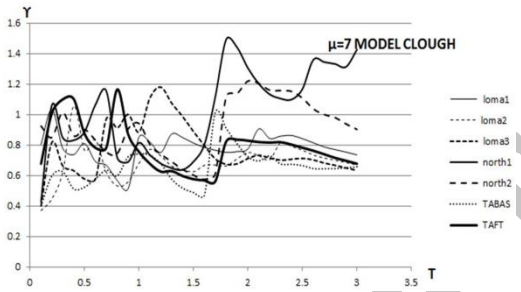
شکل ۳. مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  در مدل چرخه‌ای الاستو پلاستیک کامل با

$\mu=5$



شکل ۴. مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  در مدل چرخه‌ای الاستو پلاستیک کامل با

$\mu=6$



شکل ۵. مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  در مدل چرخه‌ای الاستو پلاستیک کامل با

$\mu=7$

### ۲-۳- تاثیر سختی ثانویه بر طیف $\gamma$

در این حالت بر مبنای مدل دو خطی با سختی ثانویه ۱۰٪ و نیز مقادیر شکل‌پذیری ۴، ۵، ۶ و ۷ با میرایی ۵٪ پاسخ طیفی  $\gamma$  تعیین گردید. شکل‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  را نشان می‌دهد. با مقایسه این شکل‌ها و شکل‌های ۲ الی ۵ می‌توان دریافت که سختی ثانویه تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر پارامتر  $\gamma$  ندارد.

### ۳-۳- پاسخ طیفی $\gamma$ بر مبنای ضریب کاهش مقاومت R

برای مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  از ضرایب کاهش مقاومت (R)، ۴،

۵ و ۶ استفاده شده است که در آن  $R = \frac{F_e}{F_y}$  است.  $F_e$  نیروی

### ۱-۳- تاثیر ضریب شکل‌پذیری و زمان تناوب بر پارامتر $\gamma$

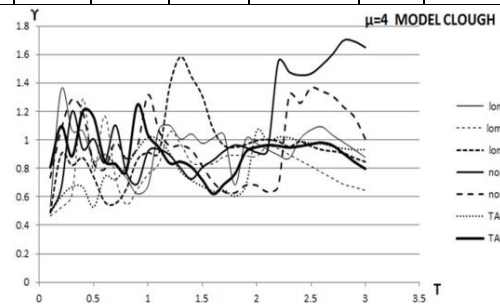
بر مبنای شکل‌پذیری‌های هدف ۴، ۵، ۶ و ۷ با میرایی ۵٪ و بر اساس مدل ارتجاعی خمیری (الاستوپلاستیک) کامل، پارامتر  $\gamma$  محاسبه شد. شکل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ مقایسه پاسخ طیفی پارامتر  $\gamma$  به رکوردهای مقیاس شده را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها می‌توان بیان کرد تغییرات  $\gamma$  بر حسب ضریب شکل‌پذیری چندان قابل ملاحظه نیست ولی شتاب‌نگاشت‌های انتخابی و زمان تناوب سیستم، تغییرات قابل ملاحظه‌ای بر ضریب  $\gamma$  دارد.

جدول ۱. رکوردهای زلزله انتخابی

سال وقوع	ایستگاه	زلزله
۱۹۸۹	Coyote Lake Dam (Downst)	لوماپریتا ۱
۱۹۸۹	Coyote Lake Dam (SW Abut)	لوماپریتا ۲
۱۹۸۹	APEEL 7-Pulgas	لوماپریتا ۳
۱۹۹۴	LA - 116th St School	نورتریج ۱
۱۹۹۴	Santa Monica City Hall	نورتریج ۲
۱۹۷۸	Dayhook	طبس
۱۹۵۲	Taft Lincoln School	تفت

جدول ۲. مشخصات شتاب‌نگاشت‌های انتخابی

زمان تناوب غالب زلزله (ثانیه)	مدت زمان مؤثر زلزله (ثانیه)	PGA (g)	مدت زمان وقوع زلزله (ثانیه)	فاصله تا گسیختگی گسل (کیلومتر)	M	زلزله
۰/۱۸	۱۱/۳۷	۰/۱۷۹	۳۹/۹۵	۲۰/۸۰	۶/۹۳	LOMA1
۰/۶۴	۱۲/۲۲	۰/۴۸۴	۳۹/۹۵	۲۰/۳۴	۶/۹۳	LOMA2
۰/۴۴	۱۴/۶۸	۰/۱۵۶	۳۹/۹۵	۴۱/۸۶	۶/۹۳	LOMA3
۰/۱۸	۱۹/۴۶	۰/۲۰۸	۳۹/۹۸	۴۱/۱۷	۶/۶۹	NORTH1
۰/۱۲	۱۰/۷۲	۰/۳۷۰	۳۹/۹۸	۲۶/۴۵	۶/۶۹	NORTH2
۰/۳۸	۱۲/۳۶	۰/۴۰۶	۲۳/۸۲	۱۳/۹۴	۷/۳۵	TABAS
۰/۴۴	۲۸/۷۸	۰/۱۷۸	۵۴/۱۵	۳۸/۸۹	۷/۳۶	TAFT



شکل ۶. مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  در مدل چرخه‌ای الاستو پلاستیک کامل با  $\mu=4$

## ۵- پردازش اطلاعات

به منظور تعیین محدوده  $\gamma$ ، از مقادیر نمودارهای به دست آمده، میانگین گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار  $\gamma$  بین ۰/۶ تا ۱/۲ تغییر می‌کند. با توجه به مقادیر کمینه و بیشینه برای این ضریب می‌توان مقدار ۰/۹ را برای آن در نظر گرفت.

با مشخص شدن مقدار  $\gamma$  و در نظر گرفتن مقدار فرضی برای شاخص خرابی و همچنین مقدار ۰/۱۵ برای  $\beta$  و معلوم بودن ظرفیت شکل‌پذیری در حالت استاتیکی، می‌توان با استفاده از معادله ۱۶، به راحتی و با تقریب قابل قبول مقدار ضریب شکل‌پذیری معادل را در اثر زیان‌های تجمعی از رابطه ۱۹ به دست آورد.

$$\mu = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4(DI)(\mu_{ii})(\beta\gamma^2)}}{2\beta\gamma^2} \quad (19)$$

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، تاثیر خستگی کم‌چرخه بر ظرفیت شکل‌پذیری سازه‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور هفت شتاب‌نگاشت مربوط به حرکت افقی زمین انتخاب شد. این شتاب‌نگاشت‌ها، به سیستم یک درجه آزادی با مدل‌های مختلف بار-تغییر شکل، اعمال شد و نیازهای شکل‌پذیری در برابر آن‌ها تعیین شد. برای بررسی تاثیر خستگی کم‌چرخه، مدل‌های مختلف آسیب برای پدیده خستگی در نظر گرفته شد و ضریب شکل‌پذیری متناسب با آن‌ها تعیین شد. بر پایه یکی از مدل‌ها (مدل پارک-انگ) ضریب شکل‌پذیری واقع‌بینانه‌تر به دست می‌آید. در این حالت، ضریب شکل‌پذیری معادل، به پارامتر  $(\gamma)$ ، ضریب وابسته به انرژی، بستگی دارد. پارامتر  $(\gamma)$  خود به عوامل متعددی از جمله زمان تناوب سیستم، مشخصات شتاب‌نگاشت، سختی سیستم، مقاومت سیستم، ضریب کاهش مقاومت  $(R)$ ، نسبت میرایی و رفتار چرخه‌ای سیستم بستگی دارد. نتایج پژوهش نشان داد عوامل شکل‌پذیری، سختی ثانویه، نسبت میرایی تاثیر چندانی بر ضریب  $\gamma$  ندارند ولی تاثیر نوع رکوردهای زلزله، زمان تناوب و ضریب  $R$  قابل ملاحظه می‌باشد. با فرض مقدار میانگین  $\gamma = 0/9$ ،  $\beta = 0/15$ ، فرض قابل قبول برای شاخص زیان  $(DI)$  و همچنین مقدار معلوم ظرفیت شکل‌پذیری، رابطه‌ای برای تعیین ضریب شکل‌پذیری معادل در اثر

ماکزیمم متناظر با پاسخ خطی است که از تحلیل تاریخچه زمانی ارتجاعی سیستم تحت رکورد زلزله به دست می‌آید.  $F_y$  نیروی متناظر تسلیم است. شکل‌های ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  بر مبنای ضرایب کاهش مقاومت در مدل‌های چرخه‌ای ارتجاعی خمیری کامل و مدل چرخه‌ای ارتجاعی خمیری با سختی ۱۰٪ سختی اولیه را نشان می‌دهد.

## ۳-۴- تاثیر میرایی بر پاسخ طیفی $\gamma$

برای مقایسه پاسخ طیفی پارامتر  $\gamma$  بر مبنای نسبت‌های میرایی از مدل‌های ارتجاعی خمیری کامل و مدل دوخطی با سختی ثانویه ۱۰٪ و با شکل‌پذیری  $\mu_{ii} = 4$  استفاده شد. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مقادیر میانگین پاسخ طیفی  $\gamma$  بر مبنای میرایی ۲، ۵ و ۱۰ درصد را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که تاثیر مقدار میرایی در پاسخ طیفی  $\gamma$  ناچیز است.

## ۴- ضرایب پراکندگی<sup>۱</sup>

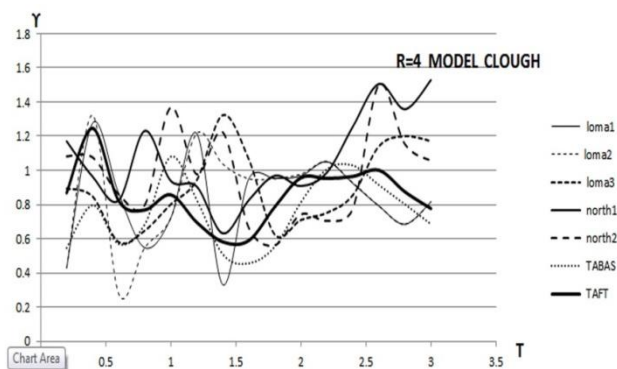
در بسیاری از پژوهش‌ها لازم است برای توصیف داده‌ها، پراکندگی به صورت کسری از میانگین بیان شود. یکی از معیارهای پراکندگی نسبی که ضریب پراکندگی نامیده می‌شود به این صورت تعریف می‌گردد.

$$CV = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (18)$$

که در آن  $\sigma_x$  انحراف معیار و  $\mu_x$  میانگین داده‌ها است. هر چه مقدار  $CV$  کوچکتر باشد نشان‌دهنده پراکندگی کم و هر چه مقدار آن بیشتر باشد نشان‌دهنده پراکندگی زیاد است.

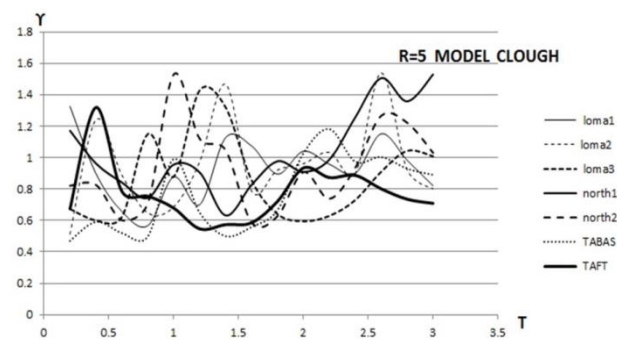
نتایج به دست آمده از محاسبه‌ی ضریب تغییرات داده‌ها در این تحقیق نشان می‌دهد که مقدار آن، مورد به مورد متفاوت است و مقدار متوسط آن در حدود ۰/۲۳ است. با توجه به پایین بودن مقدار متوسط ضریب تغییرات، می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر  $\gamma$  یک پارامتر نسبتاً ثابتی در همه‌ی طول بازه پروده‌ها است. بنابراین اگر مقدار آن به صورت تقریبی تعیین شود می‌توان مقدار شکل‌پذیری معادل را بر حسب آن به دست آورد.





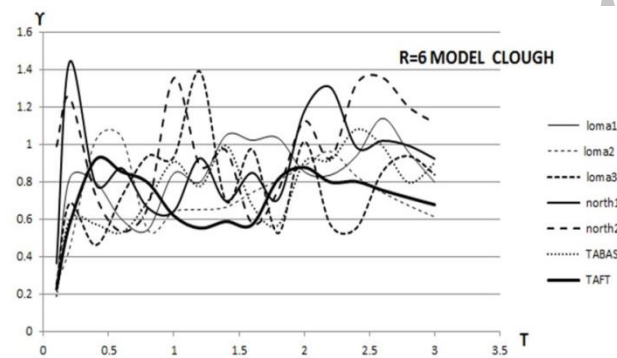
شکل ۱۰. مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  در مدل چرخه‌ای الاستو پلاستیک کامل

$R=4$



شکل ۱۱. مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  در مدل چرخه‌ای الاستو پلاستیک کامل

$R=5$



شکل ۱۲. مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  در مدل چرخه‌ای الاستو پلاستیک کامل با

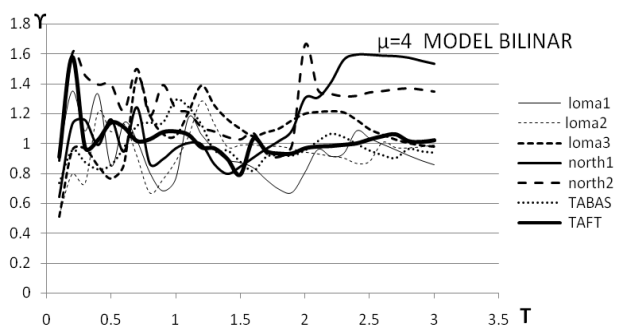
$R=6$



شکل ۱۳. مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  در مدل چرخه‌ای الاستو پلاستیک دو

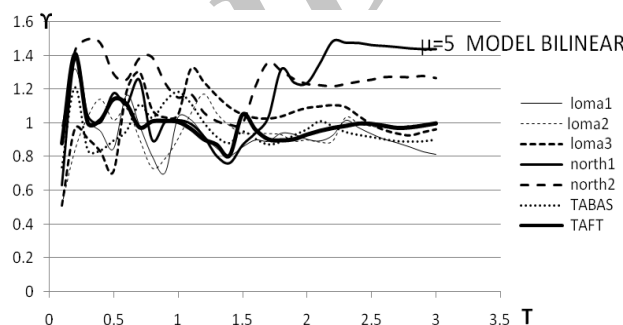
خطی با  $R=4$

زیان‌های تجمعی پیشنهاد شد. به کمک این رابطه می‌توان ظرفیت شکل پذیری معادل را در اثر زیان‌های تجمعی به دست آورد.



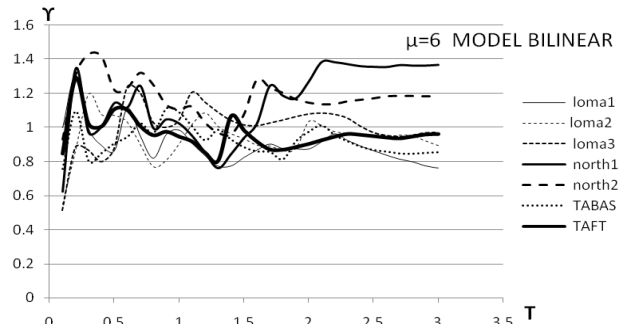
شکل ۶. مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  در مدل چرخه‌ای الاستو پلاستیک دو خطی

با  $\mu=4$



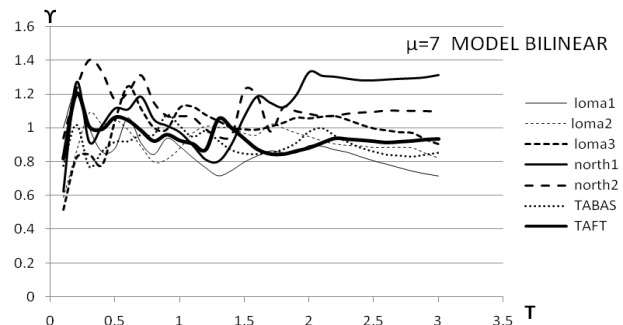
شکل ۷. مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  در مدل چرخه‌ای الاستو پلاستیک دو خطی

با  $\mu=5$



شکل ۸. مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  در مدل چرخه‌ای الاستو پلاستیک دو خطی

با  $\mu=6$



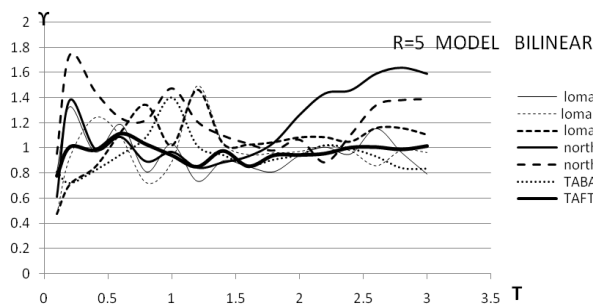
شکل ۹. مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  در مدل چرخه‌ای الاستو پلاستیک دو خطی

با  $\mu=7$

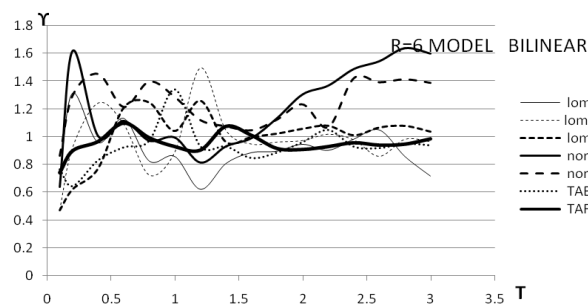


## ۷- مراجع:

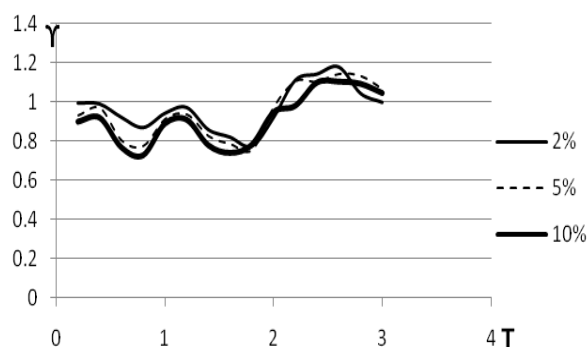
1. Newmark, N.M, and Hall, W.J., Earthquake Spectra and Design. *Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California*, (1982).
2. Bojórquez, E. and Ruiz S.E., Strength reduction factors for the Valley of Mexico, considering low-cycle fatigue effects, *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada*, 516, (2004).
3. Park, Y-J, Ang A.H-S., and Wen, Y. K., Seismic damage analysis damage-limiting design of RC building, *Structural Research Series, report No. UILU-ENG 84-2007, University of Illinois at Urbana, Illinois, Oct*, (1984).
4. Bojórquez, J., Ruiz, S.E., Terán-Gilmore, A., Bojórquez, E., Reyes-Salazar, A., Target ductility and strength reduction factors for degrading structures under the consideration of cumulative damage, *Geo SIG attended the 14th ECEE in Ohrid, Macedonia*, (2010).
5. Bojórquez, E. and Rivera, J.L., Effects of degrading models for ductility and dissipated hysteretic energy in uniform annual failure rate spectra, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China*, (2008).
6. Zarfam, P. and Niko, M., Vulnerability assessment of reinforced concrete frame and shear based on energy-based damage index (Case Study: Tabas and Manjil earthquakes), *Iranian Rehabilitation National Conference, Yazd University*, (2007).
7. Gerami, M. and Daneshjoo, F., Cumulative Plastic Deformation as a Local Damage Index of Moment Resisting Frames in Story Level, *Journal of School of Engineering*, 1: pp. 51-66 (2007).
8. Bojórquez, E., Reyes-Salazar, A., Terán-Gilmore, A., and Ruiz, S.E., Energy-based damage index for steel structures, *Steel and Composite Structures*, 10: pp. 343-360 (2010).
9. Fajfar P., Equivalent ductility factors taking in to account low - cycle fatigue, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 21: pp.837-848 (1992).
10. Powell, G.H., and Allahabadi, R., Seismic damage prediction by deterministic methods: Concepts and procedures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 16, pp.719-734 (1988).
11. Cosenza, E., Manfredi, G., Ramasco K., An evaluation of the use damage function in earthquake-resistant design, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 9, pp.303-312 (1990).
12. Banon, H., Biggs, J.M., and Irvin, H.M., Seismic damage in reinforced concrete frames. *Journal of Structural, ASCE*, 107, pp.1713-1729 (1981).
13. Krawinkler, H., Performance assessment of steel components. *Earthquake spectra*, 2, pp.27-41 (1987).
14. Available on: <http://peer.berkeley.edu>.
15. Zakeri Salehi, M., Check the magnification factor of the shift in the frame flexural reinforced concrete using nonlinear seismic analysis, *Master Thesis, school of Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran* (2008).
16. Available on: <http://www.nees.org/Resources/Nonlin>.
17. Available on: <http://www.seissoft.com/en/SeismoSignal.aspx>.



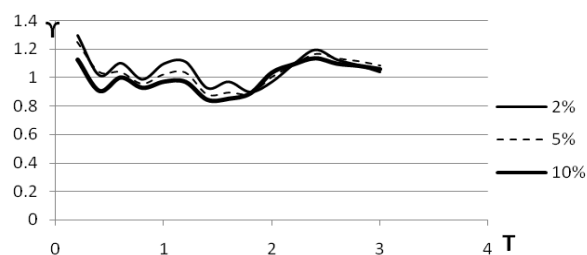
شکل ۱۴. پاسخ طیفی  $\gamma$  در مدل چرخه‌ای الاستو پلاستیک دو خطی با  $R=5$



شکل ۱۵. مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  در مدل چرخه‌ای الاستو پلاستیک دو خطی با  $R=6$



شکل ۱۶. مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  بر مبنای نسبت‌های میرایی مختلف در مدل چرخه‌ای ارتجاعی خمیری کامل



شکل ۱۷. مقایسه پاسخ طیفی  $\gamma$  بر مبنای نسبت‌های میرایی مختلف در مدل چرخه‌ای ارتجاعی خمیری دو خطی

## The Effect of Low-Cycle Fatigue on Ductility Demand Factor

M. Mahmoudi<sup>1\*</sup>, H. Hassanzadeh<sup>2</sup>

1. Associated Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University
2. Ms. Student, Department of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University

Email???????????????

### Abstract:

Ductility demands of structures are increased during strong ground motion as a consequence of the dissipation of hysteretic energy caused by cyclic load reversals. This phenomenon is called Low-cycle fatigue. The monotonic ductility capacity could not take into account Low-cycle fatigue. Hence this ductility capacity should be reduced in design procedures (equivalent ductility factor) and should be used instead of the conventional monotonic ductility supply in design procedures. The equivalent ductility factor is applied for determination of force reduction factor. In this study, the effect of low-cycle fatigue on ductility capacity factor is examined. For this reason the replies of a single degree of freedom system was evaluated using nonlinear dynamic analysis. Seven records related to soil type II from strong ground database are extracted. Three models have been proposed to determine the equivalent ductility factor taking into account cumulative damage. The first two models based on the maximum displacement and maximum dissipation energy are the upper and lower values. The third one model is Park-Ang model. According to the Park-Ang model, the damage is related to hysteretic energy and concluded of maximum displacement and maximum dissipation energy. The parameter  $\gamma$  controls the hysteretic energy and depends on maximum displacement and natural frequency of the system. In order to obtain the quantity of the parameter  $\gamma$ , a parametric study of the inelastic response of SDOF systems was carried out. In the parametric study, input ground motion, as well as the initial stiffness (period), strength, ductility, hysteretic behavior and damping of SDOF systems, was varied. In this paper the variation of this parameter was considered and the effect of the ductility factor, force reduction factor, time history acceleration and damping ratio was evaluated.

The results show that the reduction of the ductility factor due to low-cycle fatigue (controlled by parameter  $\gamma$ ) is significant. It is proved that the parameter is relatively stable during all length of periods. If approximate values for  $\gamma$  are used, the determination of equivalent ductility is very simple, and thus appropriate for design purpose. The parameter  $\gamma$  varies from 0.6 to 1.2. For practice peruses it is assumed that the value of  $\gamma$  is 0.9. Using this assumption it is possible to determine equivalent ductility factor taking into account low cycle fatigue.

**Keywords:** Equivalent Ductility Factor, Cumulative Damage, Design spectra, Low-cycle fatigue.