

# ارزیابی ضریب $C_1$ در رابطه‌ی تغییرمکان هدف نشریه‌ی ۳۶۰ برای سازه‌های روی خاک سخت و دور از گسل براساس شتاب‌نگاشت‌های ایران

سیده‌هدی پارسائیان (کارشناس ارشد)

بهرخ حسینی‌هاشمی\* (دانشیار)

عبدالرضا سروقدمقدم (استادیار)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف  
دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۲، ص. ۱۳۹-۱۴۶، (یادداشت‌نوی)

در این نوشتار، نتایج مربوط به مطالعه‌ی آماری بر روی نسبت بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی به تغییرمکان کشسانی منطبق با ضریب  $C_1$  در رابطه‌ی تغییرمکان هدف، دستورالعمل بهسازی با استفاده از رکوردهای زلزله‌های ایران ارائه شده است. این نسبت‌ها برای سیستم‌های یک درجه آزاد با مدل رفتاری کشسان‌خمیری کامل و ضرایب کاهش مقاومت مختلف تحت تأثیر ۴ تا ۲۰ شتاب‌نگاشت ثبت شده روی خاک سخت ایران محاسبه شده است. سه نوع خاک یک، دو و سه براساس نسبت طیفی  $H/V$  در نظر گرفته شده است. با استفاده از تحلیلهای رگرسیون غیرخطی، رابطه‌ی ساده‌ی برنتایج میانگین برآزش شده است. در نهایت، رابطه‌ی پیشنهادی با ضریب  $C_1$  مندرج در نشریه‌ی ۳۶۰ و استاندارد ASCE 41-06 مقایسه و مشخص شده است که این ضریب در نشریه‌ی ۳۶۰ نیازمند تجدیدنظر و تغییر است.

واژگان کلیدی: سیستم یک درجه آزاد، مدل رفتاری کشسان‌خمیری، تغییرمکان

هدف، ضریب  $C_1$ .

## مقدمه

رابطه‌ی بین بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی و تغییرمکان کشسانی در سیستم‌های یک درجه‌ی آزاد محاسبه می‌شود. از روش‌های رایج محاسبه‌ی بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی ساختمان‌ها، روش ضرایب<sup>[۴]</sup> و روش طیف ظرفیت را می‌توان نام برد. در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ی ساختمان‌های موجود ایران (نشریه‌ی شماره‌ی ۳۶۰) از روش ضرایب برای محاسبه‌ی بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی ساختمان‌ها استفاده شده است.

استفاده از روش ضرایب برای محاسبه‌ی تغییرمکان هدف ساختمان‌ها در تحلیل استاتیکی غیرخطی پس از انتشار FEMA 273 در سال ۱۹۹۷ رواج یافت. در این روش، تغییرمکان غیرکشسانی ساختمان از روی بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی سیستم یک درجه آزاد معادل، با اعمال چهار ضریب محاسبه می‌شود. بخش محاسبه‌ی تغییرمکان هدف نشریه‌ی ۳۶۰ کاملاً برگرفته از FEMA 273 است. در سال ۲۰۰۵، در FEMA 440 براساس ۱۰۰ رکورد زلزله‌ی ثبت شده در کالیفرنیا، ضرایب جدیدی برای محاسبه‌ی تغییرمکان هدف ارائه شد که این ضرایب جدید در استاندارد ASCE 41-06 در سال ۲۰۰۶ اعمال شد.

با توجه به اینکه در سال ۲۰۰۵، FEMA 440 ضرایب جدیدی برای محاسبه‌ی تغییرمکان هدف پیشنهاد داده شده که این ضرایب جدید در استاندارد ASCE 41-06 اعمال شده است، در نشریه‌ی ۳۶۰ تغییری به عمل نیامده است و همچنین، برای

در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های طراحی و ارزیابی سازه‌ها براساس عملکرد رواج یافته است. جامعه‌ی مهندسان بر این باورند که خسارت‌های سازه‌ی و غیرسازه‌ی عمدتاً ناشی از تغییرمکان‌های جانبی تحمیل شده در اثر زلزله بر سازه است. از این رو ضوابط طراحی ارائه شده در این روش‌ها برخلاف روش‌های سنتی طراحی که بر پایه‌ی نیرو بوده است، بر پایه‌ی تغییرمکان بنا نهاده شده است. در واقع، در این روش‌ها تغییرمکان، معرف عملکرد سازه تحت اثر زلزله است. از سوی دیگر، به‌کارگیری روش‌های طراحی براساس عملکرد در کارهای عملی نیازمند روش‌های تحلیلی ساده‌شده‌ی برای تخمین مقادیر تغییرمکان غیرکشسانی برای سازه‌هایی است که در اثر زلزله‌ی محتمل منطقه به‌صورت غیرخطی رفتار می‌کنند. پیش‌استانداردها و استانداردهای اخیر برای ارزیابی و بهسازی ساختمان‌های موجود، روش‌های تحلیلی ساده‌شده‌ی را معرفی کرده‌اند که در این روش‌ها، از سیستم‌های یک درجه آزاد برای تخمین تغییرمکان غیرکشسانی ساختمان‌ها استفاده شده است. مثال‌هایی از این مراجع عبارتند از: FEMA 273، FEMA 356، FEMA 440، FEMA 41-06، ASCE و نشریه ۳۶۰ ایران.<sup>[۵-۱]</sup> در این مراجع، تغییرمکان غیرکشسانی ساختمان‌ها براساس

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۱/۲۰، اصلاحیه ۱۳۸۹/۱۱/۱۷، پذیرش ۱۳۹۰/۰۶/۱۲.

## شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در این نوشتار

در این نوشتار، مجموعه‌ی مشتعل بر ۲۰۴ شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ثبت شده در ایران استفاده شده است. شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده دارای این مشخصات هستند:

۱. ثبت شده توسط SSA۲ بین سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۷؛
۲. بزرگای گشتاور لرزه‌ی کمیته‌ی ۵؛
۳. کمیته‌ی PGA یکی از دو مؤلفه‌ی طولی رکوردها ۵۰ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه؛
۴. رکوردهای ثبت شده روی سطح آزاد؛
۵. رکوردهای ثبت شده در فاصله‌ی بیشتر از ۱۵ کیلومتر از کانون زلزله؛
۶. رکوردهای ثبت شده روی خاک نوع ۱، ۲، ۳؛
۷. رکوردهایی که در هنگام اصلاح و حذف نویز، کمیته‌ی محدودده‌ی گذار فیلتر آن‌ها بین ۰٫۳۳ تا ۲۰ هرتز بوده است.

عامل اصلی در طبقه‌بندی خاک، در استانداردهای روز دنیا، [۷] سرعت موج برشی در ۳۰ متر لایه‌ی فوقانی خاک است. تا این زمان نتایج آزمایش سرعت موج برشی برای تعداد کمی از ایستگاه‌های ثبت زلزله‌ی ایران در دست است؛ لذا، در این نوشتار از اطلاعات مربوط به جنس خاک [۸] با استفاده از روش نسبت طیفی  $H/V$  استفاده شده است. در این روش، براساس نسبت طیفی (تبدیل فوریه) مؤلفه‌ی افقی (H) به مؤلفه‌ی قائم (V) رکورد زلزله‌ی ثبت شده در ایستگاه (روی خاک)، بسامد اصلی خاک محاسبه و براساس ارتباط بین بسامد اصلی و نوع خاک، خاک طبقه‌بندی می‌شود، که هرچه بسامد اصلی بزرگ‌تر باشد، خاک سخت‌تر است. با استفاده از اطلاعات موجود، [۸] سرعت موج برشی در برخی ایستگاه‌ها و مقایسه‌ی آن با بسامد اصلی خاک آن‌ها، محدوده‌هایی از بسامد به‌منزله‌ی خاک نوع یک، دو، سه، و چهار تعیین شده است. مبنای علمی این روش به‌صورت خلاصه به این صورت است که در روش شناسایی سیستم‌ها، اگر ورودی و خروجی سیستمی را در محدوده‌ی بسامدی داشته باشیم، مشخصات بسامدی سیستم قابل محاسبه است. اگر خاک را به‌منزله‌ی سیستم فرض کنیم، رکورد زلزله روی سنگ بستر به‌منزله‌ی ورودی و رکورد زلزله روی سطح خاک (ایستگاه) به‌منزله‌ی خروجی تلقی می‌شود. لیکن رکورد زلزله روی سنگ بستر در اختیار ما نیست، لذا با کمک این حقیقت که لایه‌های خاک اثر ناچیزی روی مؤلفه‌ی قائم رکورد زلزله حین انتقال از سنگ بستر به سطح خاک را دارند، می‌توان رکورد قائم زلزله‌ی ثبت شده در ایستگاه را به‌منزله‌ی رکورد روی سنگ بستر استفاده کرد؛ بنابراین، نسبت طیفی  $H/V$  (نسبت تبدیل فوریه‌ی مؤلفه‌ی افقی به مؤلفه‌ی قائم رکورد زلزله در ایستگاه) معرف بسامد اصلی خاک می‌شود. البته این روش نسبت به روش سرعت موج برشی در ۳۰ متر لایه‌ی فوقانی خاک دارای دقت کمتری است، ولی به دلیل عدم وجود اطلاعات سرعت موج برشی ایستگاه‌ها، ناچار به استفاده از این روش هستیم.

۲۰۴ شتاب‌نگاشت زلزله [۹] شامل ۷۰ شتاب‌نگاشت مربوط به خاک نوع یک، ۳۰ شتاب‌نگاشت مربوط به خاک نوع دو و ۱۰۴ شتاب‌نگاشت مربوط به خاک نوع سه است. قابل ذکر است که با توجه به مشخصات هفت‌گانه‌ی انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها، تعداد رکوردهای ثبت شده در سه نوع خاک با هم برابر نیستند و تعداد رکوردها به‌ویژه در خاک نوع دو بسیار کمتر از نوع دیگر است که همین عدم توازن و نابرابری در تعداد رکوردها ممکن است منجر به خطای آماری در نتایج شود. برای رفع این مشکل باید از تعدادی رکوردهای مصنوعی برای ایجاد برابری در تعداد رکوردها استفاده کرد که در این نوشتار این کار انجام نشده و به‌منزله‌ی پیشنهادی برای

محاسبه‌ی ضرایب در رابطه‌ی تغییرمکان هدف از شتاب‌نگاشت‌های سایت امریکای غربی استفاده شده است، درحالی که نوع شتاب‌نگاشت به‌منزله‌ی محرک ساختمان، می‌تواند تأثیر قابل توجهی در محاسبه و ارزیابی این ضرایب داشته باشد و استفاده از شتاب‌نگاشت‌های ایران احتمالاً منجر به ضرایبی غیر از ضرایب استفاده شده در نشریه‌ی ۳۶۰ و استاندارد ۴۱-۰۶ ASCE شود، بنابراین بررسی ضرایب استفاده شده در رابطه‌ی تغییرمکان هدف با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های ایران ضروری به نظر می‌رسد. در این نوشتار، نسبت بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی به تغییرمکان کشسانی سیستم‌های یک درجه آزاد با مدل رفتاری کشسان خمیری کامل (ضریب  $C_1$ ) با استفاده از ۲۰۴ شتاب‌نگاشت ایران بررسی شده است.

## ضریب $C_1$

تغییرمکان هدف در نشریه‌ی ۳۶۰ از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$\Delta_t = C_1 C_2 C_3 S_a \left( \frac{T_e}{T_g} \right)^{\gamma} \quad (1)$$

در رابطه‌ی ۱،  $S_a \left( \frac{T_e}{T_g} \right)^{\gamma}$  معرف بیشینه‌ی تغییرمکان سیستم یک درجه‌ی آزاد است. ضرایب  $C_1$ ،  $C_2$ ،  $C_3$  بیشینه‌ی تغییرمکان کشسانی سیستم یک درجه آزاد معادل را با در نظر گرفتن مشخصات رفتاری مصالح آن به بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی سیستم یک درجه آزاد تبدیل می‌کند. در این ارتباط، ضریب  $C_1$  بیشینه‌ی تغییرمکان کشسانی سیستم یک درجه آزاد را با در نظر گرفتن مدل رفتاری کشسان خمیری کامل به بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی سیستم یک درجه آزاد تبدیل می‌کند، ضریب  $C_2$  اثرات مربوط به مدل رفتاری مصالح دارای کاهش سختی و زوال مقاومت و لغزش را در نظر می‌گیرد، و ضریب  $C_3$  برای لحاظ اثرات مربوط به مدل رفتاری مصالح با شیب قسمت غیرخطی منفی یعنی اثرات  $P - \Delta$  دینامیکی استفاده شده است. بنابراین، با استفاده از این سه ضریب ارتباط بین بیشینه‌ی تغییرمکان کشسانی و تغییرمکان غیرکشسانی سیستم یک درجه آزاد معادل با در نظر گرفتن مدل رفتاری جامعی از مصالح در نظر گرفته شده است. ضریب  $C_1$  بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی سیستم یک درجه آزاد معادل را به بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی سیستم چند درجه آزاد (ساختمان مورد نظر) ارتباط می‌دهد.

ضریب  $C_1$ ، به‌صورت بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی غیرکشسانی تقسیم بر بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی کشسانی بر روی سیستمی با جرم و سختی اولیه‌ی یکسان (زمان تناوب یکسان) تحت تأثیر شتاب‌نگاشت زلزله‌ی یکسان تعریف می‌شود (رابطه‌ی ۲):

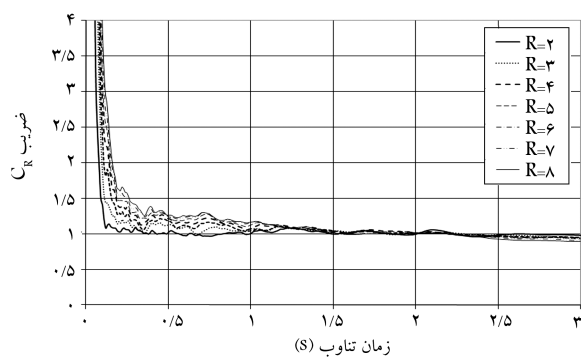
$$C_1 = \frac{\Delta_{in}}{\Delta_{el}} \quad (2)$$

بنابراین، اگر اطلاعات درباره‌ی این ضریب موجود باشد؛ از روی بیشینه‌ی تغییرمکان کشسانی می‌توان بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی را تخمین زد. در این نوشتار، ضریب  $C_1$  برای سیستم‌های یک درجه آزاد با میرایی ۵٪ و مدل رفتاری کشسان خمیری کامل محاسبه شده است. در طراحی سازه در برابر زلزله، محاسبه‌ی ضریب  $C_1$  مرتبط با مقاومت‌های جانبی مختلف سازه لازم است. به همین دلیل در این نوشتار، بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی سیستم مرتبط با ضرایب کاهش مقاومت  $R$  مختلف انجام گرفته است. ضریب  $C_1$  برای سیستم‌های یک درجه آزاد تحت تأثیر ضرایب کاهش مقاومت  $R = 2, \dots, 8$  محاسبه شده است. برای هر رکورد زلزله و هر ضریب کاهش مقاومت، نسبت بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی به تغییرمکان کشسانی برای یک مجموعه شامل ۲۹۶ زمان تناوب بین ۰٫۵ تا ۳ ثانیه محاسبه شده است.

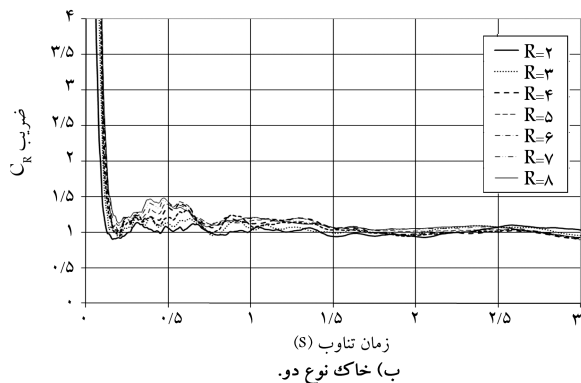
انتظار داریم با افزایش فاصله، بیشینه‌ی شتاب زمین کاهش می‌یابد و محدوده‌ی بیشینه‌ی شتاب زمین (PGA) رکوردها بین ۵۰ تا ۹۲۲/۲ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه در نوسان است.

### نتایج مطالعه‌ی آماری

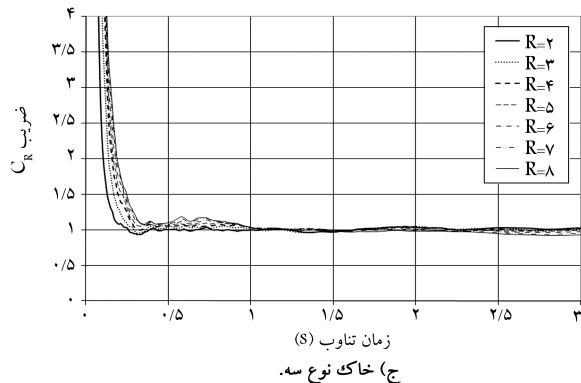
در این نوشتار آماری، ۴۲۲۶۸۸ نسبت تغییرمکان غیرکشسان به تغییرمکان کشسان (مرتبط با ۲۰۴ شتاب‌نگاشت، ۲۹۶ زمان تناوب و ۷ ضریب کاهش مقاومت) از روی پاسخ سیستم‌های یک درجه‌ی آزاد با مدل رفتاری کشسان خمیری کامل محاسبه شده است. مقادیر میانگین نسبت بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی به تغییرمکان کشسانی برای هر زمان تناوب و هر ضریب کاهش مقاومت به ازای تمام رکوردهای زلزله به‌منزله‌ی مقدار موردانتظار مجموعه داده‌ها ارائه شده است. شکل ۳، نشان‌دهنده‌ی مقادیر میانگین نسبت بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی به کشسانی



الف) خاک نوع یک؛



ب) خاک نوع دو.

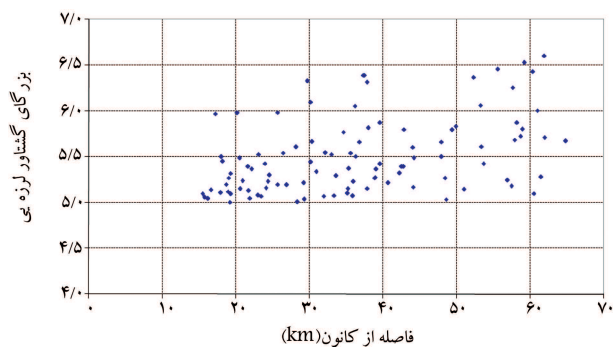


ج) خاک نوع سه.

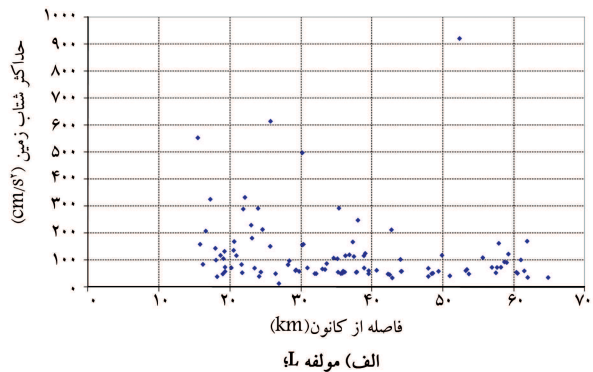
شکل ۳. نسبت بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی به تغییرمکان کشسانی میانگین.

کارهای آینده قابل ذکر است. به همین دلیل، پراکندگی نتایج در خاک نوع دو بیشتر است. از طرفی، امکان استفاده از تعداد ۳۰ رکورد برابر در هر نوع خاک مقدر بوده که به دلیل کوچک شدن جامعه‌ی آماری و ایجاد پراکندگی بیشتر در هر سه نوع خاک این کار انجام نگرفت.

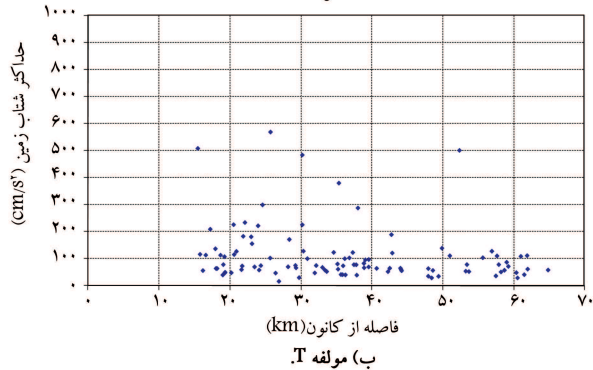
شکل ۱، توزیع بزرگای زلزله نسبت به فاصله از کانون زلزله برای شتاب‌نگاشت‌های این نوشتار را نشان می‌دهد. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، رکوردها در فاصله‌ی بین ۱۵ و ۶۵ کیلومتری از کانون زلزله قرار دارند و بیشترین تعداد رکوردها دارای بزرگای بین ۵ و ۶ هستند. برای انجام تحلیل‌های موردنیاز از طول کل رکورد یعنی فواصل بین اولین و آخرین آستانه‌ی تحریک استفاده شده است. همچنین برای ارزیابی نسبت بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسان به تغییرمکان کشسان که پارامتری بدون بعد است، شتاب‌نگاشت‌ها مقیاس نشده‌اند. شکل ۲، توزیع بیشینه‌ی شتاب زمین نسبت به فاصله از کانون زلزله برای شتاب‌نگاشت‌های این نوشتار را نشان می‌دهد. همان‌طورکه



شکل ۱. توزیع بزرگای زلزله نسبت به فاصله از کانون زلزله برای شتاب‌نگاشت‌های این نوشتار.



الف) مولفه ما؛



ب) مولفه T.

شکل ۲. توزیع بیشینه‌ی شتاب زمین نسبت به فاصله از کانون زلزله برای شتاب‌نگاشت‌های این نوشتار.

و ساده‌ی توأمان است، لذا به ازای ضرایب کاهش مقاومت مختلف  $R = 2, \dots, 8$ ، ضریب  $\tilde{C}_R$  محاسبه شده است. بنابراین، رابطه‌ی ۴ برای محاسبه‌ی نسبت بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی به تغییرمکان کشسانی سیستم‌های یک درجه آزاد با مدل رفتاری کشسان خمیری کامل پیشنهاد شده است:

$$\tilde{C}_R = \frac{\theta_1}{T\theta_2} + 1 \quad (4)$$

$\theta_1$  و  $\theta_2$  متغیرهایی‌اند که تناسب  $\tilde{C}_R$  و  $T$  را به تساوی تبدیل کرده‌اند و برای تحلیل رگرسیون استفاده می‌شوند، که به ازای تغییرات ضریب کاهش مقاومت تغییر می‌کنند. در این نوشتار، برای تعیین متغیرهای  $\theta_1$  و  $\theta_2$  تحلیل رگرسیون غیرخطی در برنامه‌ی MATLAB با استفاده از الگوریتم گاوس-نیوتن<sup>۱</sup> و روش لونیگ-مارکوارت<sup>۲</sup> انجام شده است.<sup>[۱۰]</sup> در جدول‌های ۱ الی ۳ متغیرهای  $\theta_1$  و  $\theta_2$  برای خاک‌های مختلف آورده شده است.

جدول ۱. تخمین پارامترهای  $\theta_1$  و  $\theta_2$  برای رابطه‌ی ۴ مرتبط با ۷۰ رکورد خاک نوع یک.

خاک نوع یک	$\theta_1$	$\theta_2$
$R = 2$	۰٫۰۰۰۱۴	۳٫۴۳۶
$R = 3$	۰٫۰۰۰۰۷۴	۳٫۱۳۶
$R = 4$	۰٫۰۰۰۵۴۶	۲٫۵۵۶
$R = 5$	۰٫۰۰۰۸۹۴	۲٫۴۶
$R = 6$	۰٫۰۰۱۳۸۷	۲٫۳۴۷
$R = 7$	۰٫۰۰۲۸۵۳	۲٫۰۸۱
$R = 8$	۰٫۰۰۱۴۱۴	۲٫۳۷۴

جدول ۲. تخمین پارامترهای  $\theta_1$  و  $\theta_2$  برای رابطه‌ی ۴ مرتبط با ۳۰ رکورد خاک نوع دو.

خاک نوع دو	$\theta_1$	$\theta_2$
$R = 2$	۰٫۰۰۰۰۲۵	۳٫۳۵
$R = 3$	۰٫۰۰۰۴۱۶	۲٫۶۰۹
$R = 4$	۰٫۰۰۰۱۴۵	۳٫۱
$R = 5$	۰٫۰۰۰۳۲۶	۲٫۸۷۶
$R = 6$	۰٫۰۰۴۸۹۴	۱٫۹۵۴
$R = 7$	۰٫۰۱۲۵۰۰	۱٫۶۳۵
$R = 8$	۰٫۰۰۰۶۶۴	۲٫۶۸۳

جدول ۳. تخمین پارامترهای  $\theta_1$  و  $\theta_2$  برای رابطه‌ی ۴ مرتبط با ۱۰۴ رکورد خاک نوع سه.

خاک نوع سه	$\theta_1$	$\theta_2$
$R = 2$	۰٫۰۰۰۰۳۳	۳٫۵۵۲
$R = 3$	۰٫۰۰۰۴۹۵	۲٫۷۹۱
$R = 4$	۰٫۰۰۰۹۹۹	۲٫۶۳
$R = 5$	۰٫۰۰۱۶۷۱	۲٫۴۸۶
$R = 6$	۰٫۰۰۲۰۹۶	۲٫۴۳۳
$R = 7$	۰٫۰۰۲۵۲۶	۲٫۳۷۹
$R = 8$	۰٫۰۰۲۶۷۵	۲٫۳۷۳

در خاک‌های یک، دو و سه است. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، این نسبت در زمان تناوب‌های کوچک عددی بزرگ‌تر از یک (بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی بزرگ‌تر از بیشینه‌ی تغییرمکان کشسانی) و برای زمان تناوب‌های بزرگ عددی نزدیک به یک (بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی تقریباً برابر بیشینه‌ی تغییرمکان کشسانی) است. برای زمان تناوب‌های کوچک (تقریباً کوچک‌تر از یک ثانیه)، نسبت  $C_R$  وابسته به دوره‌ی تناوب سازه و ضریب کاهش مقاومت است. در این ناحیه نسبت  $C_R$  با افزایش ضریب کاهش مقاومت و کاهش زمان تناوب، افزایش می‌یابد. برای سیستم‌های کشسان خمیری کامل، زمانی که زمان تناوب به سمت صفر میل می‌کند، ضریب  $C_R$  به سمت بی‌نهایت میل می‌کند و این مسئله بیان‌گر این است که سازه‌های با زمان تناوب‌های خیلی کوچک و مقاومت جانبی کم در اثر تحریکات شدید زلزله، تغییرمکان‌های غیرکشسانی خیلی بزرگی را متحمل می‌شوند. البته قابل توجه است که در این مطالعه اثرات اندرکنشی خاک سازه در نظر گرفته نشده است، درحالی‌که در واقعیت اثر اندرکنش خاک سازه بر سازه‌های با زمان تناوب کوچک، باعث کاهش تغییرمکان‌های غیرکشسانی مندرج در شکل ۳ در اثر تحریکات زلزله می‌شود.

زمان تناوبی که نمودار را به دو قسمت تقسیم می‌کند، یک قسمت با ضریب  $C_R$  بزرگ‌تر از یک و قسمت دیگر ضریب  $C_R$  تقریباً برابر یک، به طور جدی وابسته به ضریب کاهش مقاومت است، به طوری که در خاک یک، به ازای ضریب کاهش مقاومت ۲ زمان تناوب جداکننده‌ی دو قسمت، برابر تقریباً ۰٫۳ ثانیه و برای ضریب کاهش مقاومت ۸، زمان تناوب جداکننده‌ی دو ناحیه، معادل تقریباً ۱٫۵ ثانیه است. بنابراین، زمان تناوب تقسیم‌کننده‌ی نمودار به دو ناحیه، با افزایش ضریب کاهش مقاومت افزایش می‌یابد.

## تحلیل رگرسیون غیرخطی

برای طراحی مقاوم در برابر زلزله بر مبنای عملکرد و همچنین بهسازی سازه‌ها در برابر زلزله، لازم است روابط ساده‌ی برای تخمین بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی وارد به سازه از روی بیشینه‌ی تغییرمکان کشسانی سیستم یک درجه آزاد معادل در اختیار داشته باشیم. در ادبیات فنی، رابطه‌های مختلفی برای تخمین نسبت بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی به تغییرمکان کشسانی  $C_R$  منتشر شده است؛ لیکن این روابط عموماً براساس نتایج حاصل از رکوردهای سایت آمریکای غربی به دست آمده است، در این نوشتار رابطه‌ی بر مبنای رکوردهای حاصل از زلزله‌های ایران پیشنهاد شده است.

با ملاحظه‌ی نتایج ضریب  $C_R$  نسبت به تغییرات زمان تناوب و ضریب کاهش مقاومت مشاهده می‌شود که اگر زمان تناوب به سمت صفر میل کند، به ازای هر ضریب کاهش مقاومت، ضریب  $C_R$  به سمت بی‌نهایت میل می‌کند و مجانب قائم  $T = 0$  ملاحظه می‌شود. همچنین با میل زمان تناوب به سمت بی‌نهایت، به ازای هر ضریب کاهش مقاومت، ضریب  $C_R$  به سمت یک میل می‌کند و مجانب افقی  $C_R = 1$  پدیدار می‌شود. با این توضیح به ازای ضریب کاهش مقاومت ثابت، شمای کلی تناسب بین  $C_R$  و  $T$  به صورت رابطه‌ی ۳ است:

$$\tilde{C}_R \propto \left( \frac{1}{T} + 1 \right) \quad (3)$$

در صورتی که تغییرات ضریب  $C_R$  نسبت به تغییرات ضریب کاهش مقاومت  $R$  هم در رابطه لحاظ شود، به رابطه‌ی نسبتاً پیچیده‌ی برای حفظ دقت قابل قبول در محاسبه‌ی ضریب  $C_R$  نیازمندیم و از آنجا که هدف ما به دست آوردن رابطه‌ی دقیق

تعریف شده است:

$$\begin{cases} 1/0 & T_e \geq T_s \\ 1 + \frac{(R-1)T_s}{T_e} & T_e < T_s \end{cases} \quad (5)$$

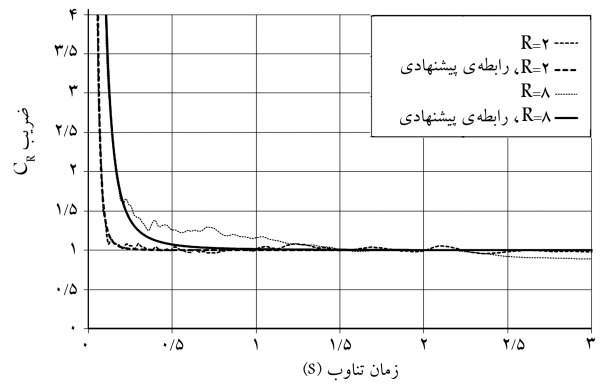
البته این ضریب نباید بزرگ‌تر از مقادیر ضریب  $C_1$  مربوط به بخش روش استاتیکی خطی مطابق با رابطه‌ی ۶ باشد و همچنین کوچک‌تر از یک هم نباشد:

$$\begin{cases} 1/5 & T_e \leq 0/1 \text{ sec} \\ 1/0 & T_e \geq T_s \end{cases} \quad (6)$$

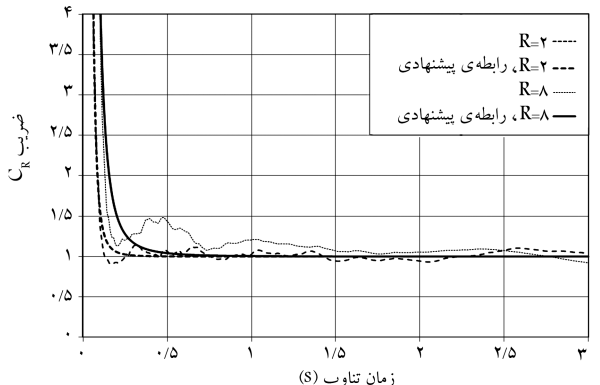
برای مقادیر  $T$  بین  $0/1$  ثانیه و  $T_s$  از درون بایستی خطی استفاده می‌شود. در رابطه‌ی ۴،  $T_e$  معرف زمان تناوب سیستم یک درجه آزاد معادل و  $T_s$  معرف زمان تناوبی است که طیف کشسانی را به دو قسمت شتاب ثابت و سرعت ثابت تقسیم می‌کند و برای خاک‌های نوع یک، دو و سه براساس استاندارد  $280^\circ$  برابر  $0/4$ ،  $0/5$  و  $0/7$  ثانیه است.

با مقایسه‌ی ضریب  $C_1$  در نشریه‌ی  $36^\circ$  و نتایج این نوشتار، ملاحظه می‌شود که براساس رابطه‌ی پیشنهادی، هرچه زمان تناوب به سمت صفر میل کند، ضریب  $C_1$  به سمت بی‌نهایت میل می‌کند که البته این روند توسط پژوهشگران پیشین هم تأیید شده است، [۱۰] درحالی‌که نشریه‌ی  $36^\circ$  در محدوده‌ی زمان تناوب‌های کوچک (کوچک‌تر از  $0/1$  ثانیه)، محدودیت  $1/5$  را برای ضریب  $C_1$  قرار داده است. بخش محاسبه‌ی تغییرمکان هدف در نشریه‌ی  $36^\circ$  به‌طورکامل برگرفته از FEMA 356 است. در قسمت ۵-۲-۲-۲ از FEMA 440، دلایل اعمال این محدودیت روی ضریب  $C_1$  به این صورت بیان شده است که گردآوران FEMA 356 به دو دلیل این محدودیت را اعمال کرده‌اند. اول اینکه، باوری در جامعه‌ی مهندسان وجود دارد که ساختمان‌های کوتاه و سخت به تکان‌های لرزه‌ی آن‌گونه که با مدل‌های تحلیلی ساده پیش‌بینی می‌شوند، پاسخ نمی‌دهند که البته توضیحات منطقی برای این پدیده با در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف اثرات اندرکنشی خاک و سازه قابل بیان است. این عوامل به دلیل عملکرد مطلوب این‌گونه ساختمان‌ها در زلزله‌های گذشته، به‌منزله‌ی توجیه برای اعمال محدودیت و کاهش تقاضای لرزه‌ی این ساختمان‌ها در استانداردها قابل استناد است. دومین علت به روش‌های طراحی سنتی (روش‌های طراحی براساس نیرو) برمی‌گردد که گردآوران FEMA 356 معتقد بودند که نیاز استفاده از روابط تجربی بدون اعمال محدودیت و کاهش تقاضا در محدوده‌ی دوره‌های تناوب کوچک، مهندسان را تحریک به بازگشت به استفاده از روش‌های سنتی (تحلیل‌های خطی) می‌کرد، که درمقایسه با تحلیل‌های غیرخطی دقت کمتری دارد. با توجه به توضیحات گفته‌شده و به جهت در نظر گرفتن اثرات اندرکنشی خاک و سازه در این نوشتار، مقایسه‌ی بین ضریب  $C_1$  مندرج در نشریه‌ی  $36^\circ$  و رابطه‌ی پیشنهادی، به ازای زمان تناوب‌های بزرگ‌تر از  $0/1$  ثانیه ارائه شده است. برای اینکه بتوان مقایسه‌ی دقیق‌تر و گویاتری انجام داد، ضریب  $C_1$  مندرج در نشریه‌ی  $36^\circ$  را بر ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی برای خاک‌های نوع یک، دو، سه و به ازای  $R = 2, \dots, 8$  تقسیم کرده و در شکل ۵ نشان داده شده است.

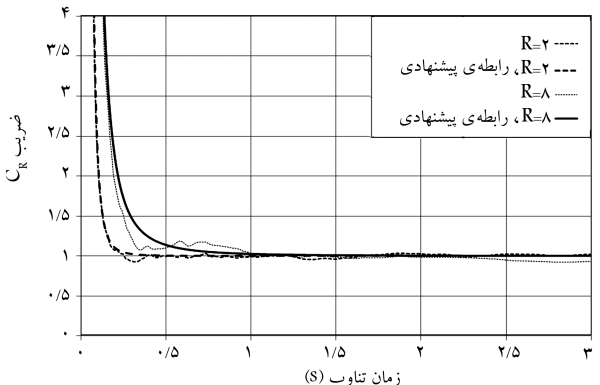
همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، مقایسه را می‌توان در سه بازه‌ی  $0/1$  ثانیه الی  $T_s$ ،  $T_s$  الی  $1$  ثانیه و بزرگ‌تر از  $1$  ثانیه بررسی کرد. برای زمان تناوب‌های بزرگ‌تر از  $1$  ثانیه، ضریب  $C_1$  حاصل از نتایج، تقریباً معادل ضریب  $C_1$  مندرج در نشریه‌ی  $36^\circ$  و معادل  $1$  است. برای زمان تناوب بین  $T_s$  تا  $1$  ثانیه، استفاده از نشریه‌ی



الف) خاک نوع یک؛



ب) خاک نوع دو.



ج) خاک نوع سه.

شکل ۴. نسبت بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی به تغییرمکان کشسانی میانگین، ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی به ازای  $R = 2, 8$ .

همچنین در شکل ۴، نتایج تحلیل سیستم‌های یک درجه آزاد با روابط پیشنهادی برای انواع خاک و به ازای ضرایب کاهش مقاومت  $R = 2, 8$  ارائه شده است.

### مقایسه‌ی رابطه‌ی پیشنهادی با نشریه‌ی شماره‌ی $36^\circ$

نسبت بیشینه‌ی تغییرمکان غیرکشسانی به تغییرمکان کشسانی برای سیستم یک درجه آزاد با مدل رفتاری کشسان خمیری کامل در نشریه‌ی شماره‌ی  $36^\circ$  ایران به صورت ضریب  $C_1$  در محاسبه‌ی تغییرمکان هدف نشان داده شده و به صورت رابطه‌ی ۵

ازای  $R = 2, 3, 4$ ، استفاده از ضریب  $C_1$  مندرج در نشریه‌ی ۳۶۰ درمقایسه با ضریب  $C_1$  حاصله از رابطه‌ی پیشنهادی، در محدوده‌ی زمان تناوب‌های نزدیک به ۰٫۱ ثانیه منجر به نتایج دست‌پایین تا بیشینه‌ی ۶۰٪ و در محدوده‌ی زمان تناوب نزدیک ۰٫۲ ثانیه منجر به نتایج دست‌بالا تا بیشینه‌ی ۳۰٪ می‌شود. همین‌طور به ازای  $R = 5, \dots, 8$  در خاک نوع یک، استفاده از ضریب  $C_1$  مندرج در نشریه‌ی ۳۶۰ منجر به نتایج دست‌پایین تا بیشینه‌ی ۷۰٪ در محدوده‌ی زمان تناوب ۰٫۱ تا ۰٫۲ ثانیه و بیشینه‌ی ۱۵٪ در محدوده‌ی زمان تناوب  $T_s$  می‌شود. در خاک نوع دو و سه هم، چنین روندی دیده می‌شود. پراکندگی بیشتر نتایج در خاک نوع دو نسبت به خاک یک و سه، به دلیل تعداد کمتر رکورد ثبت‌شده در این نوع خاک در این نوشتار است. صرف‌نظر از نتایج مربوط به خاک نوع دو، می‌توان گفت با افزایش  $R$ ، نسبت ضریب  $C_1$  نشریه‌ی ۳۶۰ به ضریب پیشنهادی کاهش می‌یابد و این نسبت با افزایش زمان تناوب تا محدوده‌ی ۰٫۲ ثانیه به صورت صعودی می‌رود تا به بیشینه‌ی خود برسد و پس از آن تا رسیدن به  $T_s$  نزول و بعد از گذر از  $T_s$  تا زمان تناوب ۱ ثانیه به سمت عدد یک صعود می‌کند.

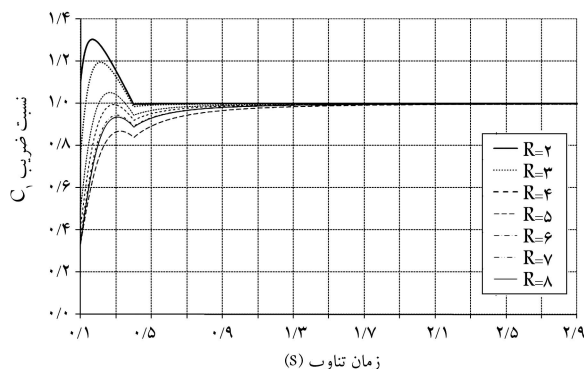
### مقایسه‌ی رابطه‌ی پیشنهادی با استاندارد ASCE 41-06

به جهت اینکه ضریب  $C_1$  نشریه‌ی ۳۶۰ برگرفته از FEMA 356 بوده است، لذا در این قسمت، نتیجه‌ی این نوشتار با آخرین تغییرات ضریب  $C_1$  در ادبیات فنی مقایسه می‌شود. در سال ۲۰۰۵، FEMA 440، ضرایب جدیدی را برای تعیین تغییرمکان هدف با استفاده از روش ضرایب ارائه کرده است که این ضرایب در استاندارد ASCE 41-06 در سال ۲۰۰۶ که مربوط به بهسازی لرزه‌ی ساختمان‌های موجود است، استفاده شده است. قبل از انجام هرگونه مقایسه، این تذکر لازم است که تفاوت مابین مبانی این نوشتار و مطالعات اخیر که منجر به تغییرات روش ضرایب در ASCE 41-06 شده، در رکوردهای زلزله مورد استفاده است، به این صورت که در ادبیات فنی<sup>[۱۰،۱۱]</sup> نتایج عموماً با استفاده از رکوردهای سایت آمریکای غربی حاصل شده، ولی در این نوشتار تماماً از رکوردهای زلزله‌ی ایران برای استخراج رابطه‌ی برای کشور ایران استفاده شده است. با توجه به توضیحات اخیر، در این قسمت ضریب  $C_1$  مندرج در استاندارد ASCE 41-06 با ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی و همچنین رابطه‌ی پیشنهادی به علاوه‌ی انحراف معیار مقایسه شده است. نسبت بیشینه‌ی تغییر مکان غیرکشسانی به تغییرمکان کشسانی برای سیستم‌های یک درجه آزاد با مدل رفتاری کشسان‌خمیری کامل (ضریب  $C_1$ ) در استاندارد ASCE 41-06 به صورت رابطه‌ی ۷ تعریف شده است:

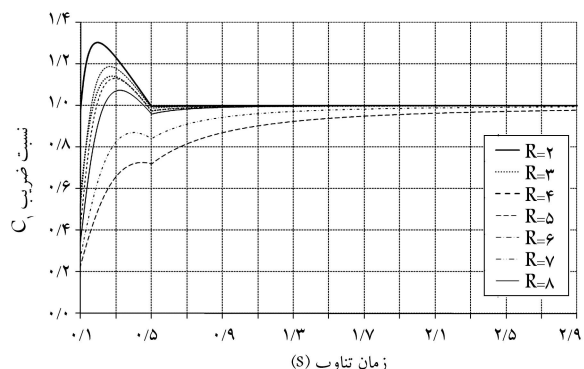
$$\begin{cases} 1.0 & T_e \geq 1.0 \text{ sec} \\ 1.0 + \frac{R-1}{aT_e} & 0.2 \text{ sec} \leq T_e < 1.0 \text{ sec} \end{cases} \quad (7)$$

و به ازای زمان تناوب‌های کوچک‌تر از ۰٫۲ ثانیه، ضریب  $C_1$  به ازای زمان تناوب ۰٫۲ ثانیه لحاظ شود.

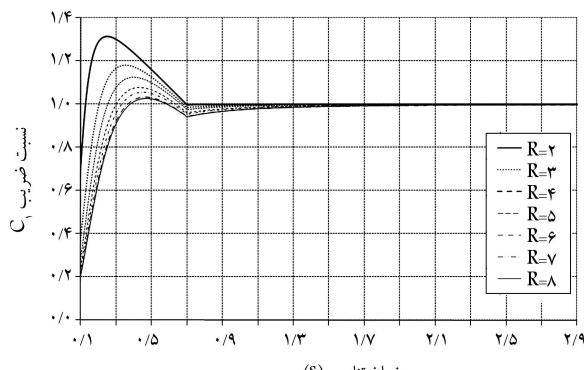
در رابطه‌ی ۷،  $R$  معرف ضریب کاهش مقاومت،  $T_e$  معرف زمان تناوب سیستم یک درجه آزاد و  $a$  به منزله‌ی ضریب ثابت برای بیان اثر نوع خاک است و برای خاک نوع A و B برابر ۱۳۰، برای خاک نوع C برابر ۹۰ و برای خاک نوع D، E، و F برابر ۶۰ ارائه شده است. برای امکان مقایسه‌ی رابطه‌ی پیشنهادی با استاندارد ASCE 41-06، خاک نوع یک، دو و سه تقریباً معادل B، C و D در نظر گرفته شده است. مطابق رابطه‌ی ۷ (همانند FEMA 356)، در این استاندارد هم برای



شکل ۵. الف) نسبت ضریب  $C_1$  مندرج در نشریه‌ی ۳۶۰ بر ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی؛ خاک نوع یک؛



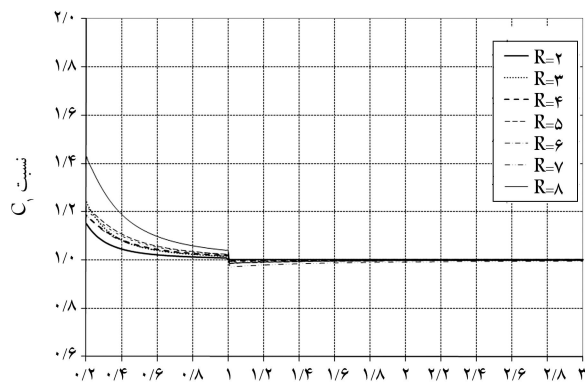
ب) خاک نوع دو.



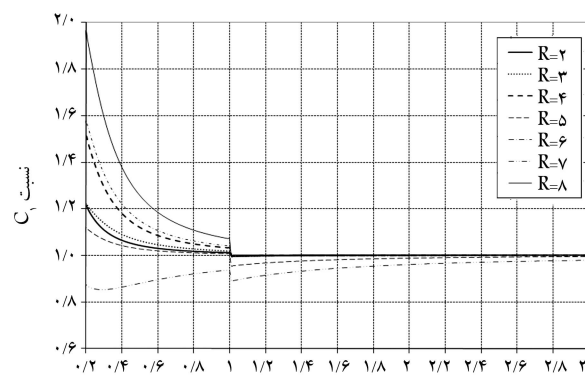
ج) خاک نوع سه.

شکل ۵. نسبت ضریب  $C_1$  مندرج در نشریه‌ی ۳۶۰ بر ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی.

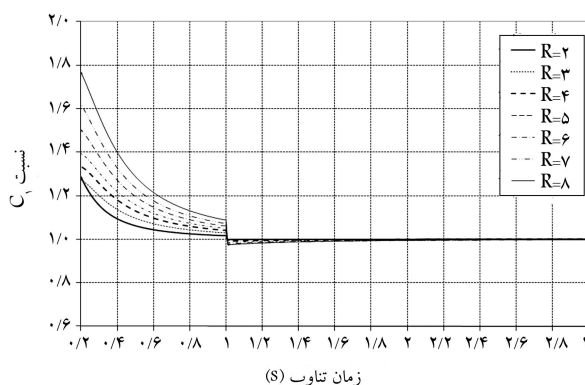
۳۶۰ درمقایسه با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی باعث ایجاد تخمین دست‌پایین در محاسبه‌ی ضریب  $C_1$  می‌شود، که هرچه زمان تناوب از یک ثانیه کاهش می‌یابد و به  $T_s$  نزدیک‌تر می‌شود، خطا بیشتر، و برای خاک نوع یک، دو و سه به ترتیب تا بیشینه‌ی ۱۵، ۳ و ۵ درصد، ضریب  $C_1$  دست‌پایین تخمین زده می‌شود. این تذکر لازم است که تخمین دست‌پایین نسبت به تغییرات  $R$ ، روند مشخصی را نشان نمی‌دهد. همچنین در خاک نوع دو، به دلیل تعداد کمتر رکورد ثبت‌شده (۳۰ عدد) در این خاک، پراکندگی بیشتری دیده می‌شود. در محدوده‌ی زمان تناوب بین ۰٫۱ تا ۰٫۲ ثانیه و همان‌طور که ملاحظه می‌شود نسبت ضریب  $C_1$  مندرج در نشریه‌ی ۳۶۰ به رابطه‌ی پیشنهادی با افزایش زمان تناوب از ۰٫۱ ثانیه، افزایش می‌یابد تا به بیشینه‌ی خود برسد و سپس نزول می‌کند تا به  $T_s$  برسد. در خاک نوع یک به



شکل ۶. ضریب  $C_1$  مندرج در استاندارد ASCE 41-06، ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی و ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی استاندارد به علاوه‌ی انحراف معیار در خاک نوع یک.



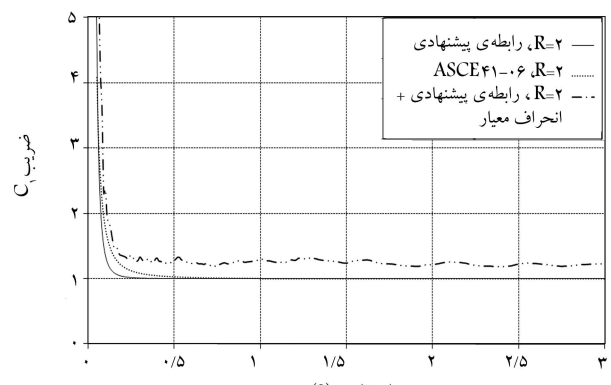
شکل ۷. نسبت ضریب  $C_1$  مندرج در استاندارد ASCE 41-06، به ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی.



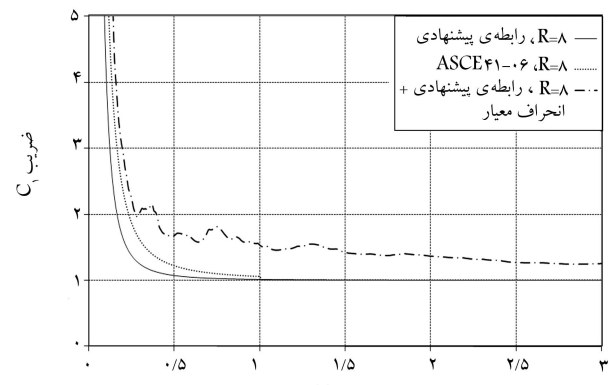
شکل ۸. نسبت ضریب  $C_1$  مندرج در استاندارد ASCE 41-06، به ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی.

شکل ۷. نسبت ضریب  $C_1$  مندرج در استاندارد ASCE 41-06، به ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی.

دست‌بالای استاندارد ASCE 41-06 نسبت به رابطه‌ی پیشنهادی دارد. در این بازه با افزایش زمان تناوب، نسبت دورابطه کاهش می‌یابد و به سمت ۱ نزدیک می‌شود. در خاک نوع یک استفاده از استاندارد ASCE 41-06 در مقایسه با رابطه‌ی پیشنهادی، منجر به تخمین دست‌بالای ضریب  $C_1$  تا بیشینه‌ی ۴۰٪ می‌شود. برای خاک نوع دو به دلیل تعداد کمتر رکورد ثبت‌شده، نتایج پراکندگی بیشتری دارد و به جز برای  $R = 7$ ، استفاده از استاندارد ASCE 41-06 باعث تخمین دست‌بالای ضریب  $C_1$  تا بیشینه‌ی ۹۰٪ می‌شود. در خاک نوع سه هم استاندارد ASCE 41-06 تا بیشینه‌ی ۷۵٪، ضریب  $C_1$  را دست‌بالا تخمین می‌زند.



شکل ۹. ضریب  $C_1$  مندرج در استاندارد ASCE 41-06، ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی و ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی استاندارد به علاوه‌ی انحراف معیار در خاک نوع یک.



شکل ۹. ضریب  $C_1$  مندرج در استاندارد ASCE 41-06، ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی و ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی استاندارد به علاوه‌ی انحراف معیار در خاک نوع یک.

شکل ۹. ضریب  $C_1$  مندرج در استاندارد ASCE 41-06، ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی و ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی استاندارد به علاوه‌ی انحراف معیار در خاک نوع یک.

ساختمان‌های با زمان تناوب کوچک (کوچک‌تر از ۰/۲ ثانیه)، محدودیت اعمال شده است. به این صورت که مقادیر ضریب  $C_1$ ، برای سیستم‌های با زمان تناوب کوچک‌تر از ۰/۲ ثانیه برابر ضریب  $C_1$  سیستم با زمان تناوب ۰/۲ ثانیه لحاظ شده است. فلسفه‌ی اعمال محدودیت در قسمت قبلی توضیح داده شده است. با توجه به توضیحات بالا، در این قسمت مقایسه‌ی بین استاندارد ASCE 41-06 با رابطه‌ی پیشنهادی به ازای زمان تناوب‌های بزرگ‌تر از ۰/۲ ثانیه بحث شده است. در شکل ۶، ضریب  $C_1$  مندرج در استاندارد ASCE 41-06 و ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی، همچنین نتایج حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی به علاوه‌ی انحراف معیار در خاک نوع یک، به ازای  $R = 2, 8$  ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، به‌طور کلی ضریب  $C_1$  مندرج در استاندارد ASCE 41-06 بین ضریب  $C_1$  پیشنهادی و ضریب  $C_1$  به علاوه‌ی انحراف معیار واقع است.

برای اینکه اختلاف‌های بین دو رابطه، به‌صورت گویاتر مشاهده شود، در شکل ۷ نسبت ضریب  $C_1$  مندرج در استاندارد ASCE 41-06 به ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی نشان داده شده است.

در بازه‌ی زمان تناوب بزرگ‌تر از ۱ ثانیه، ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی و استاندارد ASCE 41-06 تقریباً با هم معادل‌اند و فقط در خاک نوع دو به ازای زمان تناوب ۱ ثانیه، استاندارد ASCE 41-06، در حدود ۱۰٪ دست‌پایین تخمین می‌زند.

در بازه‌ی زمان تناوب ۰/۲ تا ۱ ثانیه، روند کلی حکایت از تخمین



## نتیجه گیری

کشسانی برای سیستم‌های یک درجه آزاد با مدل رفتاری کشسان-خمیری کامل روی خاک سخت است.

۴. در مقایسه بین ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی در این نوشتار و ضریب  $C_1$  نشریه‌ی ۳۶۰ ملاحظه می‌شود که به ازای زمان تناوب‌های بزرگ‌تر از یک ثانیه، ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی تقریباً معادل ضریب  $C_1$  نشریه‌ی ۳۶۰ است. در محدوده‌ی زمان تناوب بین  $T_s$  هر نوع خاک و یک ثانیه، استفاده از ضریب  $C_1$  نشریه‌ی ۳۶۰ باعث ایجاد تخمین دست‌پایین تا بیشینه‌ی ۱۵، ۳۰ و ۵ درصد به ترتیب به ازای خاک نوع یک، دو و سه در مقایسه با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی می‌شود. در محدوده‌ی زمان تناوب بین  $0.7$  ثانیه و  $T_s$  بسته به مقدار ضریب کاهش مقاومت، نوع خاک و زمان تناوب رفتار متفاوتی مشاهده می‌شود، لیکن به‌طور مشترک در نزدیکی زمان تناوب  $0.7$  ثانیه، استفاده از ضریب  $C_1$  نشریه‌ی ۳۶۰ منجر به نتایج دست‌پایین تا بیشینه‌ی ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد به ترتیب به ازای خاک نوع یک، دو و سه در مقایسه با رابطه‌ی پیشنهادی می‌شود.

۵. در مقایسه بین ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی در این نوشتار و ضریب  $C_1$  استاندارد ASCE41-06 مشاهده می‌شود که به ازای زمان تناوب‌های بزرگ‌تر از یک ثانیه، ضریب  $C_1$  حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی تقریباً معادل ضریب  $C_1$  استاندارد ASCE41-06 است. در محدوده‌ی زمان تناوب بین  $0.2$  و ۱ ثانیه روند کلی حکایت از تخمین دست‌بالای استاندارد ASCE41-06 نسبت به رابطه‌ی پیشنهادی دارد، به طوری که با نزدیک شدن به زمان تناوب  $0.2$  ثانیه استفاده از ASCE41-06 در مقایسه با رابطه‌ی پیشنهادی در این نوشتار، برای محاسبه‌ی ضریب  $C_1$  منجر به تخمین دست‌بالا تا بیشینه‌ی ۴۰، ۹۰ و ۷۵ درصد به ترتیب در خاک نوع یک، دو و سه می‌شود.

۱. در محدوده‌ی زمان تناوب‌های کوچک، بیشینه‌ی تغییر مکان غیرکشسانی سیستم به طور کلی بزرگ‌تر از بیشینه‌ی تغییر مکان کشسانی سیستم است. در این محدوده، نسبت بیشینه‌ی تغییر مکان غیرکشسانی به تغییر مکان کشسانی عمدتاً تابعی از زمان تناوب  $T$  و ضریب کاهش مقاومت  $R$  است، به نحوی که این نسبت با افزایش ضریب کاهش مقاومت و کاهش زمان تناوب نوسانات افزایش می‌یابد. برای زمان تناوب‌های بزرگ (حدوداً بزرگ‌تر از یک ثانیه)، بیشینه‌ی تغییر مکان غیرکشسانی سیستم تقریباً معادل بیشینه‌ی تغییر مکان کشسانی سیستم است. بنابراین، در نمودارهای مرتبط با ضریب  $C_R$  (نسبت بیشینه‌ی تغییر مکان غیرکشسانی به تغییر مکان کشسانی) دو مجانب می‌توان متصور شد، یک مجانب قائم به ازای  $T = 0$  که با نزدیکی  $T$  به سمت صفر، ضریب  $C_R$  به سمت بی‌نهایت میل می‌کند و دیگری مجانب افقی به ازای  $C_R = 1$  است که با نزدیکی  $T$  به سمت بی‌نهایت،  $C_R$  به سمت یک نزدیک می‌شود.

۲. زمان تناوبی که نمودار را به دو قسمت تقسیم می‌کند (قسمتی با ضریب  $C_R$  بزرگ‌تر از یک و قسمت دیگر ضریب  $C_R$  تقریباً برابر یک)، به طور جدی وابسته به ضریب کاهش مقاومت است و با افزایش ضریب کاهش مقاومت، افزایش می‌یابد.

۳. با استفاده از تحلیل رگرسیون غیرخطی، رابطه‌ی ساده‌شده‌ی برای تخمین نسبت بیشینه‌ی تغییر مکان غیرکشسانی به تغییر مکان کشسانی براساس نتایج میانگین داده‌ها پیشنهاد شده است. ارزیابی خطا، نشان دهنده‌ی تقریب مناسب رابطه‌ی پیشنهادی برای محاسبه‌ی نسبت بیشینه‌ی تغییر مکان غیرکشسانی به تغییر مکان

۵. دستورالعمل بهسازی لرزه‌ی ساختمان‌های موجود (نشریه‌ی شماره‌ی ۳۶۰)، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها (۱۳۸۵).

۶. پارسائیان، سیدمهدی، بررسی پارامترهای ضرایب تغییر مکان در رابطه تغییر مکان هدف دستورالعمل بهسازی، سمینار کارشناسی ارشد، تهران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۸۶).

۷. آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ویرایش سوم (۱۳۸۳).

۸. سینائیان، فریدون، جنبش شدید زمین در ایران از کاتالوگ تا رابطه‌های کاهندگی، پایان‌نامه‌ی دکتری، تهران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۸۵).

۹. پارسائیان، سیدمهدی، ارزیابی نسبت حداکثر تغییر مکان غیرالاستیک به الاستیک مندرج در آیین‌نامه بهسازی با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، تهران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۸۸).

10. Ruiz-García, J. and Miranda, E., *Performance-Based Assessment of Existing Structures Accounting for Residual Displacements [Technical Report]*, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Report No.153 (2005).

## پانویس

1. Gauss-Newton
2. Levenberg-Marquardt

## منابع (References)

1. Federal Emergency Management Agency, *Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA273 (1997).
2. Federal Emergency Management Agency, *Prestandard and Commentary on the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA356 (2000).
3. Federal Emergency Management Agency, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, FEMA440 (2005).
4. ASCE41-06, *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, American Society of Civil Engineers (2006).



# EVALUATION OF $C_1$ FACTOR IN TARGET DISPLACEMENT OF CODE 360, BASED ON IRAN EARTHQUAKE RECORDS FOR FIRM SOIL AND FAR-FAULT SITES

S. M. Parsaeian

mahdi.smp@yahoo.com

B. H. Hashemi\*

behrokh@iiees.ac.ir

A. S. Moghadam

moghadam@iiees.ac.ir

International Institute of Earthquake Engineering and Seismology

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 28, Issue 2, Page 139-146, Research Note

© Sharif University of Technology

## Abstract

In recent years, performance based design and assessment methods are commonly used. Structural and non-structural earthquake damage is mainly due to imposed lateral displacements. Therefore, in recent methods, design criteria are based on displacement instead of force, as used in old methods. In fact, in these methods, displacement presents the performance of structures subjected to earthquakes. On the other hand, using performance based methods, in practical cases, needs simplified procedures to estimate the inelastic displacement of structures subjected to earthquakes. In general, nonlinear time history analysis presents an appropriate estimation of the imposed displacement of a structure subjected to a specific acceleration time history, but, results of this dynamic analysis are very sensitive to chosen acceleration time history. Thus, more reliable and practical methods are needed for the seismic evaluation and rehabilitation of existing buildings. One of the most practical methods is estimating maximum inelastic displacement from maximum linear elastic displacement.

Recent codes for the evaluation and rehabilitation of existing buildings are such as FEMA273 (1997), FEMA356 (2000), FEMA440 (2005), ASCE-41-06(2006).

Code360 introduced a simplified analytical method called the coefficient method for estimating the inelastic displacement of structures from equivalent SDOF systems. In the coefficient method, maximum inelastic displacement of a structure is calculated from maximum elastic displacement, using 4 coefficients. FEMA 440 proposed new coefficients in the coefficient method based on 100 California earthquake records. These new coefficients are used in the latest code of the rehabilitation of existing buildings, ASCE41-06. The goal of this paper is a presentation of the statistical study of the inelastic displacement ratio for elastic perfectly plastic SDOF systems (according to the  $C_1$  factor of coefficient method), based on Iranian earthquake records. Results of this study are restricted to firm soils. In this paper, results of the statistical study of inelastic displacement ratios related to the  $C_1$  factor in the target displacement equation of seismic rehabilitation methods, based on Iranian earthquake ground motions, are presented. These ratios are calculated for single degree of freedom systems with an elastic perfectly plastic behavior model and various strength reduction factors subjected to 204 earthquake ground motion records. Earthquake records are selected recorded on soil condition types 1, 2 and 3, based on the spectral ratio H/V method. Using nonlinear regression analysis, a simplified equation based on mean results is calculated. Finally, the proposed equation is compared with the  $C_1$  factor in Code360 and the ASCE41-06 standard, and it is realized that this factor should be revised and changed in Code360.

**Key Words:** single degree of freedom, elastic perfectly plastic behavior model, target displacement,  $C_1$  factor.

---

\* corresponding author

Received 9 February 2010; received in revised form 06 February 2011; accepted 03 September 2011