

ارزیابی روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی ضرایب تغییر مکان FEMA356 و ASCE41-06 در محاسبه تغییر مکان هدف قاب‌های خمشی ویژه بتنی با دیوار برشی

محمد قائمی امیری

دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
mgh55ir@yahoo.com

مهدی اقبالی

دانشجوی دوره دکتری مهندسی عمران - سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
m_eghbali@iust.ac.ir

غلامرضا قدرتی امیری

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
ghodrati@iust.ac.ir

مرتضی رئیسی دهکردی

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
mraissi@iust.ac.ir

کلید واژه‌ها: تحلیل استاتیکی غیرخطی، قاب‌های خمشی ویژه بتنی با دیوار برشی، روش ضرایب تغییر مکان

چکیده

بروز شدن آیین نامه‌های طراحی و ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها موجب گردیده که فرضیات و ساده‌سازی‌های موجود در ضوابط آیین نامه در جهت کاهش خطاها و امکان ارائه رفتار واقعی از سازه اصلاح و بهبود یابند. در همین راستا گسترش روش‌های کاربردی مهندسی، در طراحی و ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین نیازهای مربوط به علوم مهندسی می‌باشند. از روش‌های کاربردی در ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های موجود استفاده از روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی (تحلیل بار افزون) است که به طور گسترده در آیین نامه‌های مختلف به جزئیات مختلف آنها پرداخته شده است. در این تحقیق میزان کارایی محاسبه تغییر مکان هدف در روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی موجود در FEMA356 و ASCE41-06 برای قاب‌های خمشی بتنی ویژه با دیوار برشی با تعداد ۵، ۷ و ۹ طبقه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. به دلیل استفاده از ضوابط این دو مرجع مذکور در ضوابط ویرایش‌های مختلف دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود بنابراین نتایج بدست آمده از آن برای ارائه پیشنهاداتی جهت افزایش دقت در محاسبات و صرفه‌جویی در زمان و هزینه قابل استفاده خواهد بود. همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که بروز شدن ضوابط مربوط به این روش‌ها در قاب‌های خمشی بتنی با شکل‌پذیری لزوماً به افزایش دقت نتایج منجر نشده است.

مقدمه

روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی^۱ (NSP) تحت عنوان بار افزون^۲ به عنوان شیوه‌ای کاربردی، بطور گسترده در ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌ها توسط مهندسان مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی، سازه در معرض الگوهای مختلف بارهای جانبی فزاینده در ارتفاع قرار می‌گیرند و این بارگذاری تا رسیدن سازه به تغییر مکان هدف اعمال می‌گردد. با رسیدن سازه به این مقدار از تغییر مکان، مقادیر ظرفیت لرزه‌ای سازه نظیر تغییر شکل‌ها و تلاش در اعضا محاسبه می‌شود و با مقادیر مجاز آنها مطابق آیین نامه‌های ارزیابی مقایسه و میزان کفایت سازه در مقابل نیروهای وارد بر آن و برای هر سطح عملکرد^۴ مشخص می‌گردد.

¹Nonlinear Static Procedures (NSP)

² Pushover

³Target Displacement

⁴ Performance Level



دو نوع روش مختلف برای تخمین تغییر مکان هدف در تحلیل استاتیکی غیرخطی ارائه شده است. روش ضرایب تغییر مکان⁵ (DCM) که در ضوابط FEMA 356 (FEMA, 2000) ASCE 41 (ASCE, 2007) و دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود (نشریه ۳۶۰، ۱۳۸۵) و (نشریه ۳۶۰، ۱۳۹۲) ارائه شده است. روش طیف ظرفیت⁶ (CSM) که در ATC-40 (ATC, 1996) و FEMA 440 (FEMA, 2004) به آن پرداخته شده است. روش ضرایب تغییر مکان از طریق اصلاح تغییر مکان های الاستیک خطی با سیستمیک درجه آزاد (SDOF) معادل با ضرایب تجربی انجام می گیرد. سیستمیک درجه آزاد معادل در این روش دارا دوره تناوب و میزان استهلاک انرژی برابر با مودالسیسازه چند درجه آزاد مورد مطالعه است. تحلیل غیرخطی استاتیکی در روش طیف ظرفیت با استفاده از دو خطی سازی معادل منحنی نیرو- تغییر شکل و محاسبه تغییر مکان هدف از حاصل ضرب تغییر مکان الاستیک سیستمیک درجه آزاد معادلر مود اصلی سازه انجام می گیرد. سیستمیک درجه آزادی مورد استفاده در این روش دارای دوره تناوب اصلی و استهلاک موثر بیشتر از سازه اصلی است. همچنین برای تخمین جابجایی SDOF خطی معادل از روابط تجربی برای محاسبه دوره تناوب استفاده می شود و معیار استهلاک انرژی به عنوان ارزیابی شکل پذیر سازه ارائه می گردد.

نمونه ای از تحقیقات انجام گرفته برای توسعه و ارزیابی روش های ضرایب تغییر مکان و طیف ظرفیت موجود، جهت محاسبه تغییر مکان هدف در FEMA P440-A (FEMA, 2009) ارائه شده است. همچنین سایر تحقیقات انجام شده در این زمینه به ارزیابی دقت روش های مختلف استاتیکی غیر خطی در پیش بینی تغییر مکان هدف مدل های نرم افزاری متمرکز بوده است. معیار اصلی در این تحقیقات مقدار دقیق تغییر مکان بام به عنوان حداکثر تغییر مکان طبقات بوده است که بر اساس تحلیل های دینامیکی غیر خطی بدست آمده است. از آنجا که مقدار تغییر مکان هدف و مقادیر حاصل از روش های مختلف استاتیکی غیر خطی مدل های نرم افزاری مقادیر تقریباً مشابهی ارائه نموده اند، بنابراین در این تحقیقات اختلاف ناشی از فرضیات مدل سازی حذف شده است و خطاهای مورد بررسی فقط ناشی از روش های تحلیل استاتیکی غیر خطی بوده است. با انجام تحقیقات اخیر بر روی این موضوع، مقادیر و تغییرات موجود در محاسبه تغییر مکان های هدف با استفاده از روش های مختلف ارائه شده است (Miranda and Ruiz-García, 2002) and (Akkar and Metin, 2007).

Dicleli و Durucan (Dicleli and Durucan, 2014) دقت روش ضرایب تغییر مکان FEMA 440 (FEMA, 2005) برای یک ساختمان واقعی با عملکرد طبقه نرم و ظرفیت های شکل پذیری متفاوت را مورد بررسی قرار داده اند. این ارزیابی بر اساس نتایج تغییر مکان هدف، بیشینه جابجایی نسبی طبقات و بیشینه چرخش مفاصل پلاستیک در سازه اصلی و مقاوم سازی شده انجام گرفته است و با نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیر خطی (NTH) برای سه سطح عملکرد زلزله مختلف، مقایسه گردیده است. نتایج نشان دهنده عملکرد ضعیف روش DCM در مقایسه با تحلیل دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی برای این نوع سازه ها بوده است. دلیل این موضوع عدم قطعیت موجود برای مقادیر ضریب C_1 در روش DCM در دوره های تناوب کم به علت عدم توانایی این روش در اعمال اثرات ناشی از مفاصل پلاستیک و شکست اعضا سازه ای تحت بارهای جانبی بوده است. García و González (García and González, 2014) نتایج تحقیقاتی با هدف گسترش روش ضرایب تغییر مکان برای ارزیابی لرزه ای ساختمان های موجود روی شرایط خاک سست را ارائه نموده اند. برای این منظور، پاسخ تغییر مکان جانبی چهار قاب فولادی و شش قاب بتن آرمه تحت اثر یک مجموعه از شتابنگاشت های ثبت شده بر روی خاک سست بستر قدیمی دریاچه مکزیکوسیتی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بیانگر این است که پاسخ لرزه ای ساختمان ها به میزان زیادی بستگی به نسبت دوره تناوب اصلی ارتعاش سازه به مود غالب حرکت زمین دارد (T/Tg). همچنین نتایج کاربرد روش ضرایب تغییر مکان برای بدست آوردن تخمینی از بیشینه نیازهای غیر الاستیک تغییر مکان هدف نشان داده است که این روش، تخمین های منطقی خوبی را فراهم نموده است.

Goel (Goel, 2011) به طور جامع محاسبه تغییر مکان هدف حاصل شده از چهار روش غیر خطی استاتیکی فعلی (FEMA 356, FEMA 2000) ATC 40 (ATC, 1996) و ASCE 41 (ASCE, 2007) را با نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی برای پنج ساختمان بتنی موجود بررسی نموده است. نتایج نشان داده است که این روش های تحلیل ممکن است به تخمین های متفاوت و چشمگیری از تغییر مکان هدف منجر شوند. این موضوع بخصوص برای سازه های با زمان تناوب کوتاه و در محدوده رفتار غیر خطی بیشتر بوده است. قدرتی امیری و عمیدی (قدرتی و عمیدی، ۱۳۸۷) اثرات ناشی از کاهش سختی و مقاومت در روش ضرایب تغییر مکان FEMA 356 (FEMA, 2000) مورد ارزیابی قرار داده اند. با مطالعات انجام شده برای قاب های خمشی بتنی با دیوار برشی و مقایسه نتایج بدست آمده با تحلیل های دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی مشخص گردیده که اثرات کاهش سختی و مقاومت در روش FEMA 356 دقیق یا محافظه کارانه بوده است که می توان با دقت مناسبی مقادیر دقیق آنها را برای شرایط مختلف ساختگاه و سازه پیشنهاد نمود. همچنین قدرتی امیری و همکاران (قدرتی و همکاران، ۱۳۹۱) در پژوهشی دیگر، اثرات ناشی از کاهش سختی و مقاومت در روش ضرایب تغییر مکان FEMA 356 را با استفاده از چرخه های هیستریزس مطالعه نموده اند. نتایج نشانگر این موضوع است که با افزایش زمان تناوب سازه ها، اثرات ناشی از سختی و مقاومت در روش FEMA 356 (FEMA, 2000) محافظه کارانه بوده و می توان آن را کاهش داد و در مواردی نیز می توان از محاسبه آن در تغییر مکان هدف صرف نظر نمود. ولی برای سازه هایی با زمان تناوب پایین کاهش سختی و مقاومت اثرات قابل ملاحظه ای در تعیین آسیب های وارد بر سازه دارد. پارسائیان و همکاران (پارسائیان و همکاران، ۱۳۸۶) مطالعات آماری بر روی نسبت تغییر شکل غیر الاستیک به الاستیک در روش ضرایب تغییر مکان دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود (نشریه ۳۶۰، ۱۳۸۵) برای سازه های با ساختگاه خاک سخت و زلزله های دور از گسل انجام داده اند. نتایج نشان می دهد که این نسبت در روش نشریه ۳۶۰ و همچنین ASCE 41-06 (ASCE, 2007) نیازمند تجدیدنظر و اصلاح است.

⁵Displacement Coefficients Method (DCM)

⁶Capacity Spectrum Method (CSM)



با توجه به تحقیقات انجام گرفته در مورد ارزیابی روش های تحلیل استاتیکی غیرخطی، در این پژوهش میزان دقت این روش ها در برآورد تغییرمکان هدف ساختمان های بتنی مسلح با سیستم باربر جانبی قاب خمشی ویژه با دیوار برشی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشانگر این است که در سازه های مورد مطالعه با ارتفاع کوتاه و متوسط، دقت روش های ضرایب تغییرمکان با در نظر گرفتن پاسخ غیر خطی سازه در محاسبه تغییر مکان نقطه کنترل (هدف) مناسب ارزیابی شده است. البته اختلاف نتایج تحت اثر زلزله های شدید، افزایش یافته است. همچنین در اهداف طراحی نظیر زلزله های طرح متناظر با سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) دقت روش های DCM در مقایسه با روش دقیق تحلیل دینامیکی کاهش یافته است که دلیل آن عدم در نظر گرفتن رفتار غیر خطی (مانند طبقه نرم، گسیختگی ناگهانی و تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضا) در روش های تحلیل غیرخطی استاتیکی است. از نتایج بدست آمده می توان برای ارائه پیشنهاداتی جهت بهبود ضوابط موجود در آیین نامه ها استفاده نمود و امکان گسترش کاربردی روش های مورد مطالعه را برای جامعه مهندسی را در مقابل روش های تحلیلی دقیق و زمانبر با اطمینان بیشتری بیان نمود.

روش تحقیق

به منظور ارزیابی تحلیل استاتیکی غیرخطی، از روش های ضرایب تغییرمکان موجود در ASCE 41-06 (ASCE41, 2007) و FEMA 356 (FEMA, 2000) استفاده شده است. ضرایب هر یک از این روش ها، از ضوابط موجود در دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود (تجدید نظراول) (نشریه ۳۶۰، ۱۳۹۲)، (نشریه ۳۶۰، ۱۳۸۵) بدست آمده اند. برای تعیین میزان کارایی و دقت روش های مذکور، از قاب های خمشی بتنی ویژه با دیوار برشی استفاده گردیده و با نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی به عنوان یک روش دقیق مقایسه شده است. علاوه بر ارزیابی دقت روش های ضرایب تغییرمکان در محاسبه تغییرمکان هدف به دلیل استفاده از زلزله طرح در تحلیل های دینامیکی بنابراین میزان دقت و کارایی این روش ها در برآورد سطح عملکرد ایمنی جانی به عنوان مبنای طراحی لرزه ای سازه ها در استاندارد ۲۸۰۰ ایران (استاندارد ۲۸۰۰، ۱۳۸۴) مورد بررسی قرار گرفته است.

محاسبه تغییرمکان هدف در روش تحلیل استاتیکی غیر خطی ASCE 41-06 بر مبنای ضرایب تغییرمکان (DCM)

مطابق ضوابط ASCE41-06 (ASCE41, 2007)، در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی، تغییر مکان هدف بر مبنای روش ضرایب تغییرمکان^۷ (DCM) و برای ساختمان هایی با دیافراگم صلب مطابق رابطه (۱) محاسبه می شود. این روش در تجدید نظر اول دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود (۱۳۹۲) (نشریه ۳۶۰، ۱۳۹۲)، نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

$$u_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4f^2} g \quad (1)$$

مطابق دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود (۱۳۹۲) (نشریه ۳۶۰، ۱۳۹۲)، در این رابطه؛ C_0 ضریب اصلاح برای ارتباط تغییرمکان طیفی سیستم یک درجه آزاد (SDOF) معادل به تغییرمکان بام سیستم چند درجه آزاد (MDOF) اصلی است، ضریب C_0 برابر یکی از مقادیر ضریب مشارکت مود اول، ضریب مشارکت محاسبه شده با استفاده از بردار شکل متناظر با تغییر شکل سازه در تغییرمکان هدف یا مقادیر تقریبی بر مبنای نوع رفتار ساختمان، تعداد طبقات و نوع توزیع بار است، C_1 ضریب تصحیح برای اعمال تغییرمکان غیرارتجاعی سیستم است و مطابق رابطه (۲) محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} T_e \leq 0.2 &\Rightarrow C_1 = 1 + \frac{25(R_u - 1)}{a} \\ 0.2 < T_e < 1 &\Rightarrow C_1 = 1 + \frac{R_u - 1}{aT_e^2} \\ T_e > 1 &\Rightarrow C_1 = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، ضریب a نشان دهنده تاثیر نوع زمین بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و مطابق جدول (۱) تعیین می شود.

جدول ۱- ضریب نوع زمین

III و IV	II	I	نوع زمین
60	90	130	a

مطابق رابطه (۳) نسبت نیاز مقاومت ارتجاعی به مقاومت تسلیم و به منظور اجتناب از ناپایداری دینامیکی سیستم بکار میرود، R_{II} ضریب

$$R_u = \frac{S_a}{V_y / W} C_m \quad (3)$$

⁷ Displacement Coefficient Method



در رابطه $S_{a,1}$ شتاب طیفی به ازای زمان تناوب اصلی مؤثر T_e است. C_m ضریب جرم مؤثر که برای اعمال اثر موده‌های بالاتر بوده و براساس تحلیل دینامیکی یا مطابق جدول (۲) تعیین می‌شود. V_y برابر برش پایه نظیر حد تسلیم در نمودار چند خطی نیرو-تغییرشکل در تحلیل استاتیکی غیرخطی (مطابق شکل ۱) و W وزن مؤثر لرزه ای می‌باشد. در رابطه (۳)، V_y برابر برش پایه نظیر حد تسلیم در نمودار چند خطی نیرو-تغییرشکل حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی (مطابق شکل ۱) و W وزن مؤثر لرزه ای می‌باشد. برای ساختمان‌ها با سختی پس از تسلیم منفی، حداکثر نسبت مقاومت باید مطابق رابطه (۴) محدود گردد.

جدول ۲- مقادیر ضریب C_m

تعداد طبقات	قاب خمشی بتنی یا فولادی	قاب فولادی مهاربندی شده	سازه با دیوار برشی بتنی	سایر سیستم‌های سازه ای
یک یا دو	1	1	1	1
سه یا بیشتر	0.9	0.9	0.8	1

$$R_{\max} = \frac{\Delta_d}{\Delta_y} + \frac{|r_e|^{-h}}{4} \quad (4)$$

$$h = 1.015 \ln T_e$$

در رابطه (۴)، d برابر کمترین مقدار تغییر مکان هدف δ_d یا تغییر مکان نظیر برش پایه حداکثر مطابق (شکل ۱) است، y تغییر مکان متناظر مقاومت تسلیم (مطابق شکل ۱) و e نسبت شیب ثانویه منفی مؤثر است و مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$r_e = r_{P-\Delta} + \{r_2 - r_{P-\Delta}\} \quad (5)$$

که در آن، p نسبت شیب منفی ناشی از اثرات P - است و ضریب تاثیر حوزه نزدیک است که مطابق رابطه (۶) بدست می‌آید.

$$\} = \begin{cases} 0.8 & S_{x1} \geq 0.6 \\ 0.2 & S_{x1} < 0.6 \end{cases} \quad (6)$$

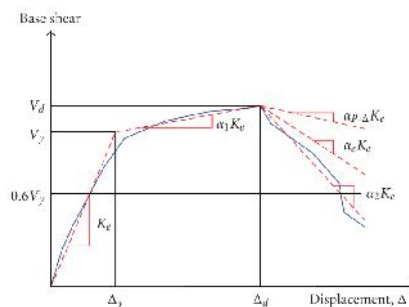
S_{x1} مقدار شتاب طیفی در زمان تناوب ۱ ثانیه برای زلزله سطح خطر ۲ می‌باشد که در صورت عدم وجود طیف ساختمانی می‌توان از ۱/۵ برابر مقدار AB طیف استاندارد ۲۸۰۰ در زمان تناوب ۱ ثانیه استفاده نمود. در رابطه (۱)، C_2 ضریب تصحیح برای اثرات کاهش سختی و مقاومت اعضای سازه‌های اشی از زوال چرخه‌های بر تغییر مکانها است و مقدار آن با استفاده از رابطه (۷) تعیین می‌شود.

$$T < 0.7 \Rightarrow C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{R_u - 1}{T_e} \right)^2 \quad (7)$$

$$T \geq 0.7 \Rightarrow C_2 = 1$$

T_e در رابطه (۱) و (۷)، زمان تناوب اصلی مؤثر ساختمان در امتداد مورد بررسی بر اساس مدل رفتار دو خطی است و مطابق رابطه محاسبه می‌شود که در این رابطه T_i زمان تناوب اصلی تحلیلی ساختمان با فرض رفتار خطی و K_i سختی جانبی ارتجاعی مطابق شکل (۱) می‌باشد.

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (8)$$



شکل ۱- منحنی ساده شده نیرو-تغییر مکان

محاسبه تغییر مکان هدف در روش تحلیل استاتیکی غیر خطی FEMA 356 بر مبنای ضرایب تغییر مکان (DCM)

مطابق ضوابط FEMA-356 (FEMA, 2000) در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی، تغییر مکان هدف همانند ASCE41-06 بر مبنای روش ضرایب تغییر مکان (DCM) و برای ساختمان هایی با دیافراگم صلب مطابق رابطه (۹) محاسبه می شود. این روش در دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود (۱۳۸۵) (نشریه ۳۶۰، ۱۳۸۵) نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

$$u_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4f^2} g \quad (9)$$

مطابق ضوابط دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود (۱۳۸۵) (نشریه ۳۶۰، ۱۳۸۵) در این رابطه؛ ضریب C_0 همانند ضوابط ASCE41-06 تعیین می شود. C_1 ضریب تصحیح برای اعمال تغییر مکان غیر ارتجاعی سیستم است و مطابق رابطه ذیل محاسبه می شود:

$$T_e \geq T_s \Rightarrow C_1 = 1.0$$

$$T_e \leq T_s \Rightarrow C_1 = \frac{1.0 + [R - 1] \frac{T_s}{T_e}}{R} \leq 1.5 \quad (10)$$

در این رابطه R نسبت مقاومت است و مطابق رابطه (۱۱) تعیین می شود.

$$R = \frac{S_a}{V_y / W} C_m \quad (11)$$

مقادیر رابطه R همانند روش ACSE41-06 بدست می آید. ضریب C_2 اثرات کاهش سختی و مقاومت اعضای سازه ای را بر تغییر مکانها به دلیل رفتار غیر ارتجاعی آنها منظور مینماید و مقدار آن با استفاده از جدول (۳) تعیین میشود.

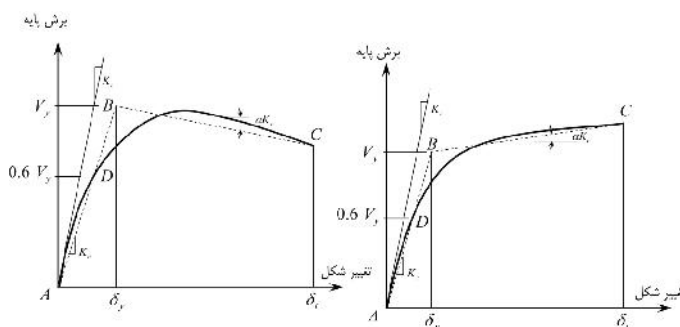
جدول ۳- مقادیر ضریب C_2

T T_s		T 0.1		سطح عملکرد مورد نظر
قاب نوع دو	قاب نوع یک	قاب نوع دو	قاب نوع یک	
1.0	1.0	1.0	1.0	قابلیت استفاده بی وقفه
1.0	1.1	1.0	1.3	ایمنی جانی
1.0	1.2	1.0	1.5	آستانه فروریزش

در جدول (۳)، قابهای نوع یک شامل سیستمهای سازه ای هستند که در آنها بیش از ۳۰٪ بار جانبی توسط اعضای حمل میشود که هنگام زلزله کاهش سختی و مقاومت دارند. قابهای خمشی معمولی، قابهای مهاربندیشده با محورهای متقارب، قابهای با اتصالات نیمهصلب، قابهای با مهاربندهای لاغر که فقط برای کشش طراحی شدهاند، دیوارهای بنایی غیرمسلح و دیوارهای غیرشکلپذیر در برش از این نوع میباشند. سایر سیستمهای سازه ای از نوع دو محسوب میشوند. برای مقادیر T بین ۰/۱ و T_s مقدار C_2 با استفاده از درونبایی خطی محاسبه میشود. ضریب C_3 برای سازههایی که پس از تسلیم دارای سختی مثبت هستند (>0) برابر ۱ و برای سازههایی که پس از تسلیم دارای سختی منفی (<0) از رابطه (۱۲) بدست می آید.

$$C_3 = 1.0 + \frac{|r|[R-1]^{1.5}}{T_e} \quad (12)$$

T_e در رابطه (۱۲)، زمان تناوب اصلی مؤثر ساختمان در امتداد مورد بررسی بر اساس FEMA356 و با فرض رفتار خطی و K_i سختی جانبی ارتجاعی مطابق شکل (۲) می باشد.



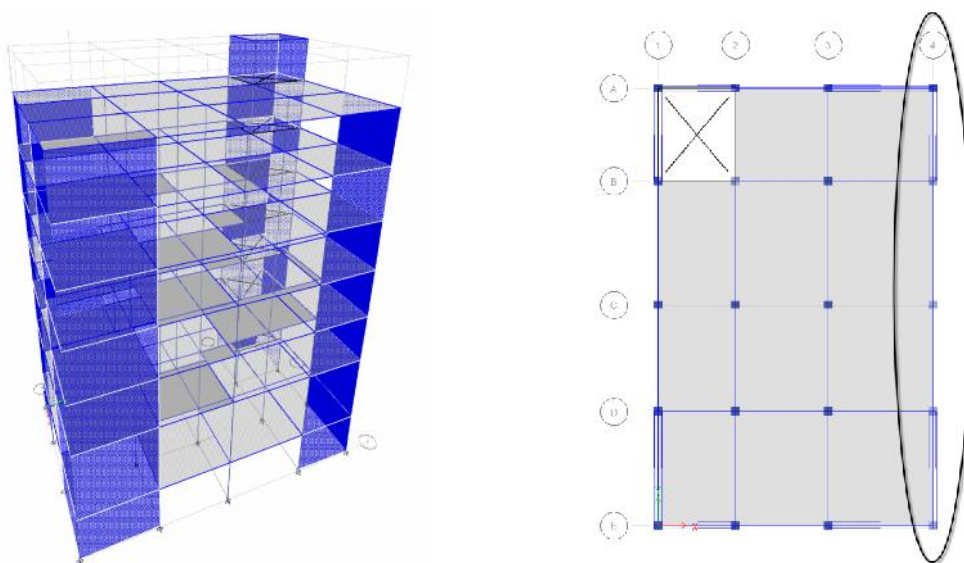
شکل ۲- منحنی ساده شده نیرو - تغییر مکان



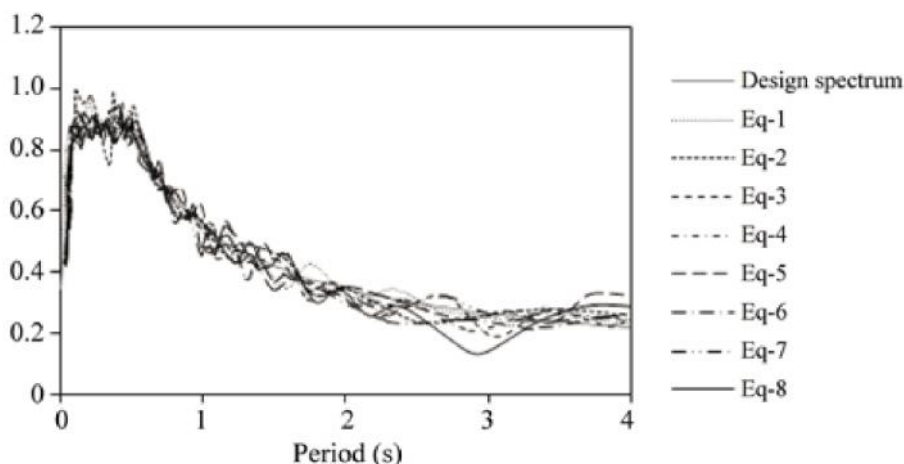
به منظور ارزیابی روش‌های محاسبه تغییرمکان هدف در این پژوهش، از قاب‌های خمشی بتنی مسلح با دیوار برشی با شکل پذیری ویژه استفاده شده است. قاب‌های مورد مطالعه دارای ۵، ۷ و ۹ طبقه می‌باشند و فرض گردیده که در ناحیه‌ای با لرزه خیزی خیلی زیاد واقع شده‌اند و خاک ساختگاه محل سازه از نوع II است. بارگذاری و طراحی لرزه‌ای قاب‌ها مطابق ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ انجام شده است. مطابق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ به دلیل اینکه از آیین‌نامه ACI برای طراحی سازه‌ها استفاده شده است بنابراین ترکیب نیروهای زلزله با سایر نیروها با رعایت ضوابط آیین‌نامه بتن ایران (آبا) (نشریه ۱۲۰، ۱۳۸۳) انجام شده است این موضوع به این دلیل بوده است که ضریب ارتفاع موجود (R) در ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ مطابق با فرض استفاده از سطوح تنش مجاز ارائه شده و همچنین ترکیبات بارگذاری آبا نیز بر اساس تنش مجاز ارائه شده است بنابراین در ترکیبات بارگذاری از آیین‌نامه آبا استفاده شده است. ارتفاع طبقات ۳ متر و طول دهانه‌ها به ۴ متر و سقف طبقات صلب در نظر گرفته شده‌اند. نمای ارتفاعی قاب‌ها در شکل 1(a) نشان داده شده‌اند. مقاومت فشاری مصالح بتن برابر 400 kg/cm^2 ، تنش تسلیم میلگردهای طولی و عرضی 4000 kg/cm^2 فرض شده است. توزیع بار مرده یکنواخت در طراحی 650 kg/m^2 است. بار زنده طبقات و بام بر اساس مقررات ملی ساختمان (مبحث ششم، ۱۳۹۲) به ترتیب برابر 200 kg/m^2 و 150 kg/m^2 در نظر گرفته شده است. وزن‌های سازه‌ای برای طبقات 5175 kg برای بام 5100 kg و زمان‌های تناوب اصلی برای قاب‌های ۵، ۷ و ۹ طبقه به ترتیب 0.17 ، 0.172 و 0.177 بدست آمده است. به علت استفاده از سیستم باربر جانبی دوگانه در قابها بنابراین تاثیر بارگذاری لرزه‌ای برای قاب خمشی و نیز سیستم باربر جانبی دوگانه به طور مستقل بررسی شده است. در طراحی اولیه ساختمان‌ها برای در نظر گرفتن بیشترین تاثیر زلزله، اثرات $100-300$ زلزله در هر امتداد اعمال شده است. همچنین اثرات ناشی از P- نیز در طراحی لحاظ شده است و ضوابط لرزه‌ای طراحی نیز در مدلسازی لحاظ شده است. طراحی با استفاده از نرم افزار ETABS2013 و با توجه به آیین‌نامه (ACI318, 2008) انجام شده است. برای انجام تحلیل‌های دینامیکی و استاتیکی غیرخطی علاوه بر ETABS2013 از نرم افزار OpenSees (OpenSees, 2013) نیز برای انجام تحلیل‌های غیرخطی و صحت‌سنجی نتایج استفاده شده است.

شتابنگاشت‌ها

برای ارزیابی دقت روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی از صحت‌سنجی نتایج بر مبنای تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی استفاده شده است. برای این منظور از هشت رکورد ثبت شده مربوط به SAC (SAC, 1999) استفاده شده است. ساختگاه همه شتابنگاشت‌های انتخاب شده مطابق استاندارد ۲۸۰۰ ایران بر روی زمین خاک نوع II و شدت آنها بین 6.5 تا 7.5 انتخاب شده است. مشخصات این رکوردها در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به اینکه هدف ارزیابی سازه‌ها برای زلزله طرح استاندارد ۲۸۰۰ بوده است بنابراین زلزله‌هایی انتخاب شده‌اند که سطح خطر لرزه‌ای متناظر با ۱۰٪ در ۵۰ سال داشته باشند. بنابراین لازم است شتاب نگاشت‌ها برای منطبق بودن با طیف پاسخ طرح در ارزیابی‌های عملکرد با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی اصلاح شوند. بنابراین، همانند شکل ۴ برای میرایی ۵٪ رکوردها در مقادیری از دامنه فرکانسی تنظیم شدند که طیف پاسخ طرح میانگین آنها با طیف طرح آیین‌نامه زلزله ایران منطبق شوند.



شکل ۳: پلان و نمای سه بعدی تیپ سازه‌های مورد مطالعه



شکل ۴: طیف پاسخ رکوردهای مورد استفاده در این پژوهش و طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ ایران

جدول ۴: مشخصات شتابنگاشت های مورد استفاده

ردیف	زلزله	ایستگاه	بزرگا	فاصله از گسل (کیلومتر)	بیشینه شتاب زمین (g)
01	Loma Prieta	1028 Hollister City Hall	7.1	28.2	0.247
02	Loma Prieta	Gilroy Array#2	7.1	12.7	0.367
03	Landers	22170 Joshua Tree	7.4	11.6	0.284
04	Landers	Barstow	7.4	36.1	0.135
05	Imperial Valley	El Centro Array #9	7.2	8.3	0.313
06	Imperial Valley	El Centro Array #12	6.9	18.2	0.143
07	San Fernando	135 LA Hollywood StorLot	6.6	21.2	0.210
08	Northridge	La Hollywood Storage FF	6.7	25.5	0.358

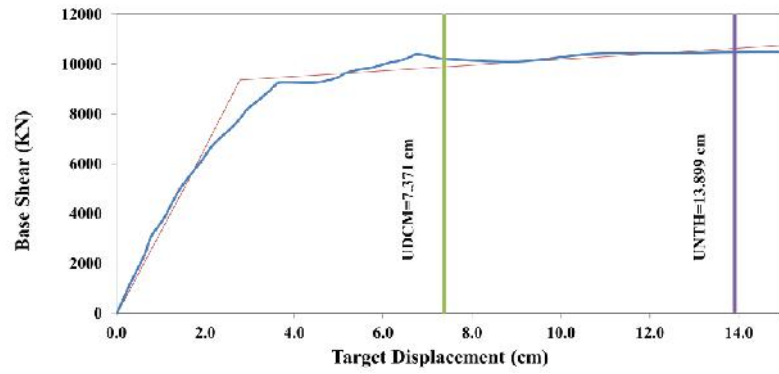
ارائه نتایج ارزیابی

با توجه به زلزله های مورد استفاده و همچنین ارتفاع کم قاب پنج طبقه مورد مطالعه، رفتار لرزه ای این قاب در محدوده الاستیک باقی مانده است. نتایج ارائه شده در شکل ۵ برای این ساختمان نشان می دهد که تخمین حداکثر تغییر مکان های هدف بر اساس روش های تحلیل استاتیکی غیرخطی FEMA356 و ASCE41-06 به ترتیب مقادیر 7.371 cm و 7.207 cm بدست آمده است. مقادیر بدست آمده از تحلیل های استاتیکی غیرخطی که با توجه به مقدار بیشینه تغییر مکان هدف بدست آمده از تحلیل دینامیکی غیرخطی (13.899 cm) غیرمحافظة کارانه بوده است که بیانگر عدم دقت ضرایب تغییر مکان این روش ها در سازه ها با ناحیه رفتار الاستیک بوده است.

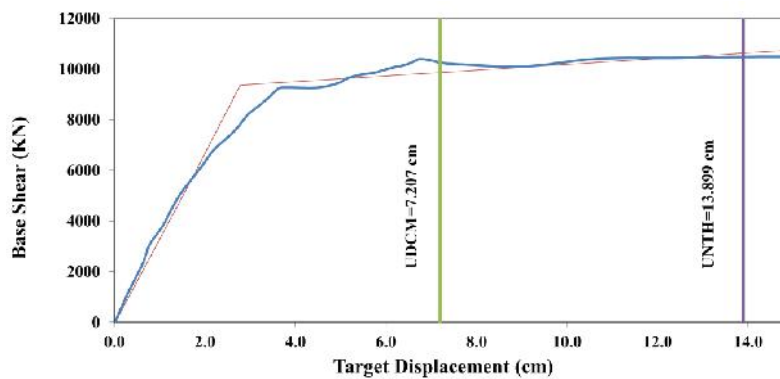
نتایج ارائه شده در شکل ۶ برای این قاب نشان میدهد که تخمین حداکثر تغییر مکان های هدف بر اساس روش های تحلیل استاتیکی غیرخطی FEMA-356 و ASCE41-06 به ترتیب مقادیر 8.748 cm و 8.562 cm بدست آمده اند که با توجه به مقدار بیشینه تغییر مکان هدف بدست آمده از تحلیل دینامیکی غیرخطی 6.138 cm روش های مورد بررسی به صورت محافظه کارانه و در جهت اطمینان بوده اند. تفاوتها بین حداکثر تغییر مکان های بام در دو روش FEMA-356 و ASCE41-06، ناشی از مقادیر متفاوت ضریب تبدیل حداکثر تغییر مکان سیستم یک درجه آزاد الاستیک خطی به حداکثر تغییر مکان سیستم یک درجه آزاد غیرخطی می باشد. ضریب تبدیل تغییر مکان در FEMA356 برابر است با $C_1C_2C_3$ و این ضریب در ASCE-41 برابر C_1C_2 است. علاوه بر این، مقادیر ضرایب نسبت مقاومت و زمان تناوب بین دو روش برای مقادیر یکسان R و T_e متفاوت می باشد.

نتایج ارائه شده در شکل ۷ برای قاب نه طبقه حاصل از روش های تحلیل استاتیکی غیرخطی و همچنین بیشینه تغییر مکان جانبی بام تحت اثر زلزله های انتخاب شده نشان میدهد که برای FEMA-356، ASCE41-06 مقدار تغییر مکان هدف 10.831 cm و 11.786 cm بدست آمده است در حالیکه برای تحلیل دینامیکی غیرخطی این مقدار 8.970 cm به عنوان حداکثر تغییر مکان ثبت شده نقطه کنترل (بام) تحت اثر زمین لرزه های مختلف بوده است. با توجه به نتایج بدست آمده برای قاب نه طبقه هردو روش ضرایب تغییر مکان FEMA-356 و ASCE-41 تخمین های متفاوتی از حداکثر تغییر مکان هدف ارائه نموده اند دلیل آن ضرایب مختلف مورد استفاده در هر روش و همچنین تفاوت تغییرات این ضرایب در زمان های تناوب کوتاه بوده است.



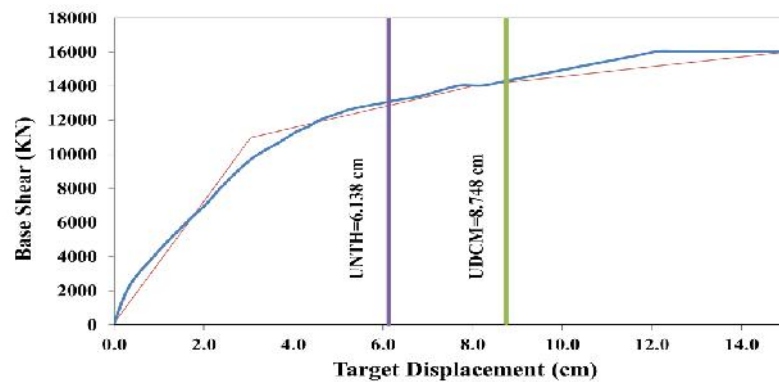


(الف)

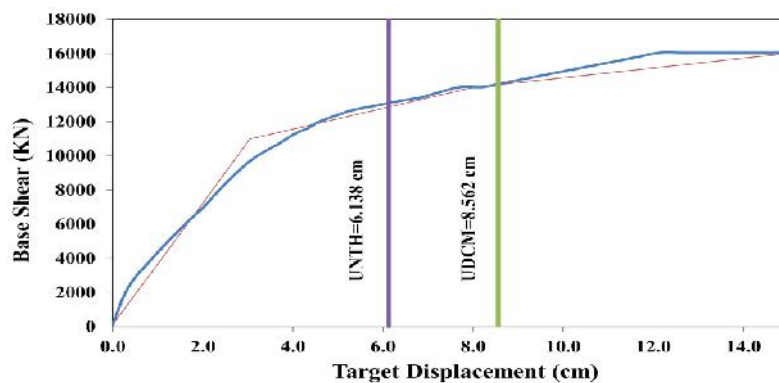


(ب)

شکل ۵: مقایسه تغییر مکان هدف برای قاب ۵ طبقه بر اساس روش ضرایب تغییر مکان (الف) FEMA-356 (ب) ASCE41-06

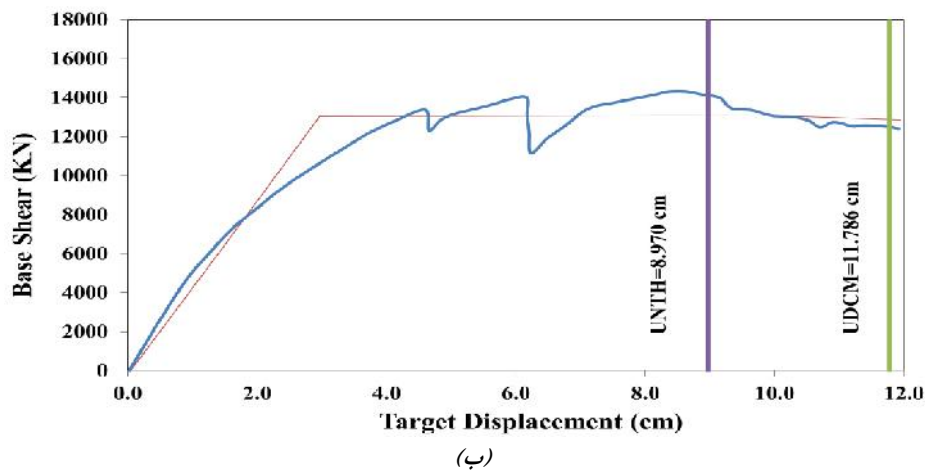
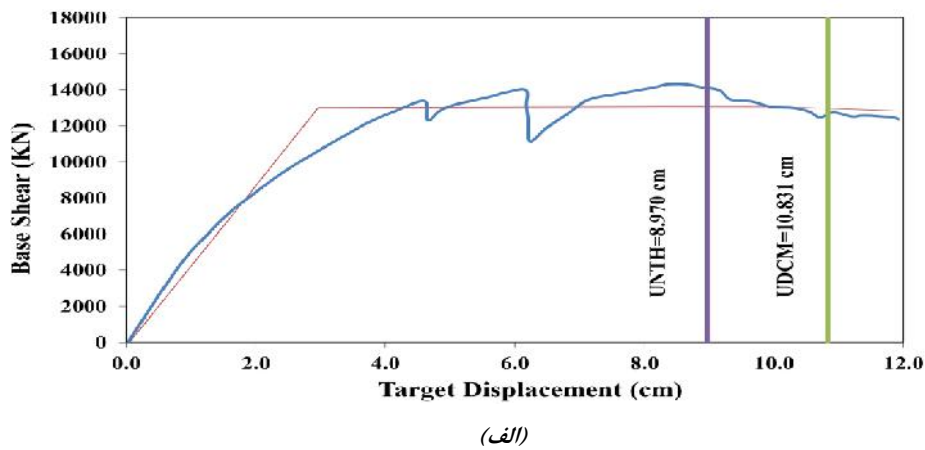


(الف)



(ب)

شکل ۶: مقایسه تغییر مکان هدف برای قاب ۷ طبقه بر اساس روش ضرایب تغییر مکان (الف) FEMA-356 (ب) ASCE41-06



شکل ۷: مقایسه تغییر مکان هدف برای قاب ۷ طبقه بر اساس روش ضرایب تغییر مکان (الف) FEMA-356 (ب) ASCE41-06

نتیجه گیری

در این تحقیق، دقت روش ضرایب تغییر مکان موجود در FEMA356 و ASCE41-06 بر اساس نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی برای قاب های کوتاه مرتبه و میان مرتبه خمشی بتنی با دیوار برشی ویژه مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج این تحقیق، در سازه های با ارتفاع کوتاه و متوسط، دقت روش های ضرایب تغییر مکان با در نظر گرفتن پاسخ غیر خطی سازه در برآورد تغییر مکان نقطه کنترل (هدف) مناسب ارزیابی می شود. البته اختلاف نتایج برای قاب های کوتاه مرتبه در ناحیه رفتار خطی و نیز تحت اثر زلزله های شدید افزایش یافته است. همچنین در اهداف طراحی نظیر زلزله های طرح متناظر با سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) دقت این دو روش در مقایسه با روش دقیق تحلیل دینامیکی کاهش یافته است و دلیل آن ممکن است ناشی از عدم در نظرگیری رفتار غیر خطی (مانند طبقه نرم، گسیختگی ناگهانی و تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضا) در روش های تحلیل غیرخطی استاتیکی باشد.

نتایج تحلیل های استاتیکی غیر خطی در محاسبه تغییر مکان هدف در محدوده رفتار غیرخطی برای ساختمان های کوتاه مرتبه نسبت به ساختمان های میان مرتبه دارای اختلاف زیادی هستند دلیل این امر ممکن است به رفتار غالب ساختمان های کوتاه مرتبه در محدوده رفتار خطی و افزایش سختی و مقاومت و عملکرد برشی سازه های کوتاه مرتبه مرتبط گردد. همچنین ضریب C_1 در روش ضرایب تغییر مکان برای سازه های کوتاه مرتبه تغییر می نماید و بنابراین تغییر مکان هدف کمتری از این روش بدست می آید. همچنین برای قاب های مورد مطالعه، روش ضرایب تغییر مکان ASCE41-06 که بر اساس نتایج تحقیقات اخیر اصلاح و بهبود یافته است لزوماً تخمین بهتری برای تغییر مکان نقطه کنترل (تغییر مکان بام) ارائه ننموده است.

تخمین مناسب ظرفیت سازه های میان مرتبه موجود در این تحقیق نشانگر ارائه پیش بینی رفتار غیرخطی مناسب این قاب های می باشد. در مقایسه با نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی اثرات ناشی از زلزله های حوزه نزدیک نیز بر دقت نتایج روش های تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه های کوتاه و میان مرتبه تاثیر گذار است که اثرات ناشی از آن باید مورد ارزیابی قرار گیرد.



- آیین‌نامه بتن ایران (آبا) (تجدید نظر اول)، نشریه شماره ۱۲۰، ۱۳۹۳، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله
- پارسائیان، س.م.، حسینی هاشمی، ب. و سروقد مقدم، ع.، (۱۳۹۱)، ارزیابی ضریب C₁ در رابطه‌ی تغییر مکان هدف نشریه‌ی ۳۶۰ برای سازه‌های روی خاک سخت و دور از گسل بر اساس شتاب‌نگاشت‌های ایران، *مجله علمی-پژوهشی، مهندسی عمران شریف*، ۲۸(۲)، ۱۳۹-۱۴۶
- کمیته بازنگری آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، آیین نامه طراحی ساختمان هادر برابر زلزله- استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش سوم)، (۱۳۸۴)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، ایران
- دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود، نشریه شماره ۳۶۰، (۱۳۸۵)، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، دفتر امور فنی و تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله.
- دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود-تجدید نظر اول، نشریه شماره ۳۶۰، (۱۳۹۲)، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، معاونت نظارت راهبردی امور نظام فنی
- قدرتی امیری، غ. و عمیدی، ش.، (۱۳۸۹)، ارزیابی ضریب کاهش سختی و مقاومت (C₂) دستورالعمل بهسازی در قابهای بتنی با دیوار برشی، *نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری- دانشکده فنی*، ۴۴، (۳)، ۴۲۵-۴۳۶
- قدرتی امیری، غ.، رضویان امرئی س.ع. و شیخی و. (۱۳۹۱)، بررسی رفتار کاهنده چرخه هیستریزس در تحلیل های غیرخطی (پوش اور) برای قاب‌های بتنی خمشی ویژه با دیوار برشی. *مدل سازی در مهندسی*، ۱۰ (۳۰): ۳۳-۴۱
- مقررات ملی ساختمان- مبحث ششم: بارهای وارد بر ساختمان، ۱۳۸۸، وزارت مسکن و شهرسازی، معاونت امور مسکن و ساختمان، دفتر امور مقررات ملی ساختمان
- ACI Committee, American Concrete Institute, & International Organization for Standardization. (2008). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary, American Concrete Institute.
- ASCE/SEI Seismic Rehabilitation Standards Committee (2007) Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-06). *American Society of Civil Engineers, Reston, VA.*
- Akkar S and Metin A (2007) Assessment of improved nonlinear static procedures in FEMA-440. *Journal of Structural Engineering*, 133(9), 1237-1246
- ATC, A. (1996). 40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Applied Technology Council, report ATC-40. Redwood City
- Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project*(1997), SAC Joint Venture
- Dicleli M and Durucan C (2014) Evaluation of displacement coefficient method for seismically retrofitted buildings with various ductility capacities. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(9), 1285-1306
- Goel R (2011) Variability and Accuracy of Target Displacement from Nonlinear Static Procedures, *Journal of International Scholarly Research Network, Civil Engineering*, Vol. 2011, 16 pages
- FEMA356 (2000) Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings: Rehabilitation Requirement s. Washington, DC: American Society of Civil Engineers
- FEMA A (2005) 440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. *FEMA-440, Redwood City*
- Heintz JA (2009) FEMA P-440A, EFFECTS OF STRENGTH AND STIFFNESS DEGRADATION ON THE SEISMIC RESPONSE OF STRUCTURAL SYSTEMS. In *Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures* (pp. 721-730). ASCE
- Mckenna FT (1997) *Object-oriented finite element programming: frameworks for analysis, algorithms and parallel computing* (Doctoral dissertation, University of California, Berkeley)
- Miranda E and Ruiz-García, J. (2002). Evaluation of approximate methods to estimate maximum inelastic displacement demands, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(3), 539-560
- Ruiz-García J and González, E. J. (2014). Implementation of Displacement Coefficient method for seismic assessment of buildings built on soft soil sites, *Engineering Structures*, 59, 1-12