

## Code-based study of pounding prevention between adjacent buildings

Peyman Narjabadifam<sup>1</sup>, Somayeh Mollaei<sup>1\*</sup>, Mehdi Babaei<sup>1</sup>, Nader Shahmammadi<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Bonab, Bonab, East Azerbaijan Iran.

2- Ms. of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, University of Bonab, Bonab, East Azerbaijan Iran.

### ABSTRACT

Earthquake induced pounding between adjacent buildings could be the source of different architectural and structural damages. A minimum distance is required in references, including seismic design codes. These differences motivate an investigation to evaluate the accuracy of each criterion. In this research, the criteria mandated by modern seismic design codes are evaluated based on the separation distances predicted by nonlinear time history analyses. The study is carried out on steel and concrete buildings with different story numbers and lateral systems. A set of 7 far and 7 near – fault records compatible with the design spectrum provided in the seismic design code of Iran (Standard No. 2800 – 4<sup>th</sup> ed.) were used in the analyses. The separation distances are obtained based on SRSS and ABS compared to the criteria mandated by IBC-2009, Euro Code 8, Standard No. 2800, and NBCC 2005. Based on the results, since the ABS method results are larger than SRSS, the criterion in standard No.2800 should be reformed. It is also indicated that the criteria should be different for far and near – fault earthquakes. For moment frames, SRSS in far fault earthquakes and ABS in near fault earthquakes are suggested. For braced frames, however, a separation distance larger than or equal to one percent of the height is required in both the far fault and near fault earthquakes.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 10 February 2022

**Revise Date:** 15 April 2022

**Accept Date:** 24 May 2022

### Keywords:

separation distance  
earthquake excitation  
adjacent buildings  
pounding  
building codes

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.329147.2725>

\*Corresponding author: Somayeh Mollaei

Email address: s.mollaei@ubonab.ac.ir

## ممانعت از ضربه بین ساختمان‌های مجاور تحت اثر زلزله‌های نزدیک به و دور از گسل

پیمان نرج‌آبادی فام<sup>۱</sup>، سمیه ملایی<sup>۱\*</sup>، مهدی بابایی<sup>۱</sup>، نادر شاه‌محمدی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب، بناب، ایران.

۲- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب، بناب، ایران

### چکیده

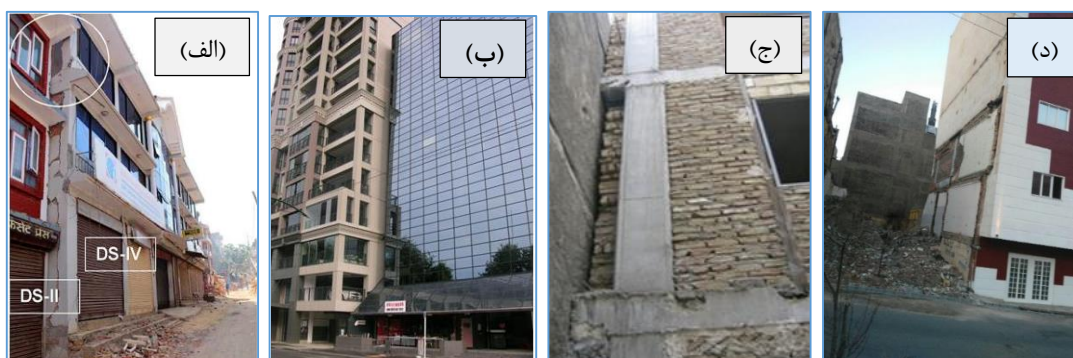
تحت بار لرزه‌ای، در صورت عدم وجود فاصله‌ی کافی بین دو ساختمان مجاور، ضربه‌ی میان ساختمان‌ها می‌تواند عامل وقوع خسارت‌های فراوانی باشد؛ رعایت حداقل فاصله‌ی جانبی یکی از راه‌های پیشگیری از این پدیده می‌باشد. الزامات مختلفی برای رعایت حداقل فاصله‌ی جانبی لازم در آیین‌نامه‌های متفاوت پیشنهاد شده‌است. تفاوت‌های موجود میان این الزامات، نشانگر ضرورت مطالعه و بررسی مبانی و ارزیابی کفایت روابط ارائه شده در مراجع مختلف می‌باشند. با توجه به توضیحات فوق در این مقاله، روابط پیشنهادی در استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم)، آیین‌نامه‌ی بین‌المللی IBC-2009، آیین‌نامه‌ی ساختمانی اروپا EC8، و آیین‌نامه‌ی ساختمانی کانادا NBCC-2005 برای جلوگیری از ضربه‌ی ساختمان‌های مجاور بررسی و کفایت آنها با مقادیر تحلیلی درز انقطاع ارزیابی شد. مدل‌های اجزای محدود برای ۲۵ ساختمان مختلف ۱ تا ۱۳ طبقه‌ی فولادی و بتن مسلح با سیستم‌های مختلف ایجاد و تحریک‌های زلزله به صورت دو مجموعه‌ی ۷ شتاب‌نگاشتی نزدیک به و دور از گسل مقیاس شده جهت انطباق با طیف طرح اعمال گردیدند. طبق نتایج حاصل، عدم تفکیک ساختمان‌های تیب از ساختمان‌های غیر تیب در استاندارد ۲۸۰۰ ایران و همچنین اعمال معیار SRSS برای هر دو حالت یا اعمال ضریب ۰/۷ بر جابجایی غیر خطی هر ساختمان غیر تیب نیازمند اصلاح بود. همچنین، محاسبه‌ی درز انقطاع برای زلزله‌های دور از گسل و نزدیک به گسل باید متفاوت باشد. در سیستم قاب خمشی متوسط، معیار SRSS برای زلزله‌های دور از گسل و معیار جمع مستقیم جابجایی‌های غیر خطی برای زلزله‌های نزدیک به گسل مناسب بوده و معیار یک صدم ارتفاع در سیستم مهاربندی پیشنهاد گردید.

کلمات کلیدی: درز انقطاع، ضربه‌ی ساختمان‌های مجاور، بار زلزله، تحلیل تاریخچه‌ی زمانی، آیین‌نامه‌های ساختمان

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2022.329147.2725">https://doi.org/10.22065/jsce.2022.329147.2725</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.329147.2725	۱۴۰۱/۱۲/۲۹	۱۴۰۱/۰۳/۰۳	۱۴۰۱/۰۳/۰۳	۱۴۰۱/۰۱/۲۶	۱۴۰۰/۱۱/۲۱
				*نویسنده مسئول:		
				سمیه ملایی		
				s.mollaei@ubonab.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

## ۱- مقدمه

ضربه‌ی بین دو ساختمان مجاور در اثر زلزله می‌تواند موجب خسارت‌های قابل توجهی گردد. پژوهشگران با مطالعه‌ی شواهد علمی و بررسی تحلیلی ضربه‌ی بین دو ساختمان مجاور، رعایت حداقل فاصله‌ی لازم میان آن‌ها را به عنوان راهکار اصلی علاوه بر اصل اساسی کاهش نیاز معرفی و توصیه‌هایی مانند هم‌تراز بودن سقف‌های دو ساختمان مجاور در موارد بهسازی را مطرح نموده‌اند. خسارت‌های ناشی از ضربه‌ی بین ساختمان‌های مجاور تحت زلزله از سال‌ها پیش گزارش شده‌اند (همانند شکل (۱))؛ برای نمونه خرابی ساختمان یک هتل ۵ طبقه در زلزله‌ی سال ۱۹۷۲ نیکاراگوئه یکی از این موارد می‌باشد [۱]. مطالعه‌ی اثر ضربه‌ی ساختمان‌های مجاور و حداقل فاصله‌ی میان آنها همواره مورد توجه پژوهشگران قرار داشته است. یکی از محققین مهم در این زمینه Anagnostopoulis است که به مطالعه‌ی اثر ضربه با مدل‌سازی سیستم‌های ساختمانی چند درجه آزاد برشی در کنار یکدیگر پرداخته و با بررسی آثار جرم و پیروید ساختمان‌ها نشان داد درز انقطاع لازم تابع این عوامل می‌باشد [۲-۴].



شکل ۱: مشاهدات و گزارشات مبنی بر اهمیت اجرای درز انقطاع لرزه‌ای: الف) نیال [۵]؛ ب) نیوزیلند [۶]؛ ج) همدان؛ د) تبریز.

از آن زمان با تاکنون مطالعات متنوعی در این حوزه انجام گرفته است. Hao & Shen برای اولین بار با بررسی رفتار برشی-پیچشی دو ساختمان مجاور به تعیین درز انقطاع پرداختند و نشان دادند چنانچه فرکانس ارتعاشی دو سازه نسبت به هم خیلی متفاوت باشد سازه‌ها عمدتاً در فازهای متفاوت عمل کرده و حداقل درز انقطاع افزایش می‌یابد [۷]. Garcia به منظور محاسبه‌ی درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان مجاور از روش‌های مجذور مربعات پاسخ (SRSS<sup>۱</sup>)، ترکیب تفاضلی (DDC<sup>۲</sup>) و شبیه‌سازی با میز لرزه استفاده کرد و نشان داد که هرچه پیوندهای دو ساختمان مجاور به هم نزدیک باشند نتایج حاصل از روش‌های آماری دقت بیشتری دارند [۸-۱۰]. در ادامه، Soong & Garcia تحقیقاتی را برای تعیین فاصله‌ی جدایی لازم برای جلوگیری از آسیب زلزله در بین سیستم‌های خطی و غیر خطی هیستریتیک انجام داده‌اند [۱۱، ۱۲]. Cole و همکاران سازه‌های مستعد ضربه را در حالت‌های مختلف محتمل برای ضربه بررسی کرده و درز انقطاع با روش SRSS بطور مطلوبی برای ساختمان‌ها محاسبه کردند [۶].

در مطالعه‌ی Rajaram & Ramancharla به بررسی اثر ضربه بین دو ساختمان مجاور بر اساس آیین‌نامه‌های معتبر و با مدل SDOF پرداختند [۵]. Shrestha نیز به بررسی درز انقطاع مورد نیاز برای جلوگیری از اثر ضربه بین دو سازه‌ی مجاور هم بر اساس روش‌های SRSS و DDC و ABS<sup>۳</sup> پرداخته است [۱۳]. Efraimiadou و همکاران تأثیر پیکربندی انواع سازه‌های مجاور در هنگام وقوع ضربه بین آن‌ها را بررسی کردند [۱۴]. نتایج بدست آمده حاکی از آن بودند که اثر ضربه‌ی بین دو سازه در پیکربندی‌های متفاوت گوناگون بود و در بعضی از آن‌ها فاصله‌ی زیادی بین دو سازه لازم است. Shirole نیز نشان داد ارتعاش غیر هم فاز سازه‌ها از عوامل اصلی برخورد دو سازه‌ی مجاور در حین زلزله می‌باشد [۱۵].

<sup>1</sup> Square Root of Sum of Squares

<sup>2</sup> Double Difference Combination

<sup>3</sup> Absolute Sum

در سال‌های اخیر نیز هم‌چنان این حوزه مورد توجه پژوهشگران واقع شده است؛ Raheem و همکاران با استفاده از مدلسازی عددی در نرم‌افزار ETABS به بررسی اثرات پارامترهای طراحی (نظیر تعداد طبقات، درز انقطاع، چیدمان هندسی ساختمان‌ها) بر ضربه‌ی ساختمان‌های مجاور پرداختند [۱۶]. همچنین در مطالعه‌ی مشابه، Abdel Raheem و همکاران تاثیر چیدمان هندسی ساختمان‌ها با تعداد طبقات مختلف در کنار یکدیگر را به روی ضربه‌ی آنها، به کمک مدل‌سازی عددی اجزای محدود بررسی کردند [۱۷]. یک روش نیمه‌تحلیلی توسط Qiao-yun و همکاران معرفی شد که با رویکرد قابلیت اعتماد به تخمین فاصله‌ی بحرانی میان ساختمان‌های مجاور می‌پردازد [۱۸]. در مطالعه‌ی که توسط Khatami و همکاران انجام گرفت، روابطی جهت تخمین زمان تناوب انواع ساختمان‌ها و اثر آن به روی حداقل فاصله‌ی میان ساختمان‌های مجاور معرفی شد [۱۹]. در مطالعه‌ی دیگر Khatami و همکاران روابط مؤثری جهت محاسبه‌ی فاصله‌ی بهینه براساس زمان تناوب و نسبت میرایی ساختمان‌های مختلف ارائه و ارزیابی شد [۲۰]. یک مدل تحلیلی جهت تخمین جابجایی نسبی میان ساختمان‌های مجاور و در نتیجه فاصله‌ی حداقل میان آنها توسط Lin ارائه شد [۲۱].

در ایران نیز مطالعات در این حوزه در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است؛ سیدکاظمی و همکاران اثر ضربه بر پیچش و نیروهای ایجاد شده در اتصالات را مورد بحث قرار دادند [۲۲]. نیکخو و فرامرزی با بررسی حداقل فاصله‌ی لازم بین دو سازه‌ی مجاور نشان دادند که مقادیر پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ برای تعیین حداقل درز انقطاع به روش یک صدم ارتفاع و یا به روش تغییرمکان جانبی نسبی آن طبقه ضربه‌ی ضریب رفتار ساختمان صحیح نبوده و نیاز به اصلاح دارد ولی نتایج تحلیل با روابط پیشنهادی IBC2009 بسیار نزدیک بود [۲۳]. مقابله‌ی به مدل‌سازی سازه‌های مجاور تحت زلزله با در نظر گرفتن تأثیر پریود، میرایی، سختی و فاصله‌ی بین دو سازه در رفتار برخورد را مورد بررسی قرار داده است [۲۴]. گرمی و همکاران اثر زلزله‌های دور و نزدیک به گسل را به روی شاخص خسارت پارک-آنگ<sup>۴</sup> بررسی کرده‌اند [۲۵]. احمدی و همکاران اثر کاربرد میراگر لزوج را بر کاهش ضربه ساختمان‌های مجاور مطالعه کرده‌اند [۲۶]. مقدار فاصله‌ی بهینه میان ساختمان‌های مجاور با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه توسط امینی‌مقدم و خداکرمی ارائه شده و با فاصله‌ی پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه شده است [۲۷]. در مطالعه‌ی دیگر، اثرات مدت زمان تداوم حرکات قوی زمین بر ضربه‌ی میان ساختمان‌های مجاور توسط واثقی و ناصری بررسی شده و کفایت درز انقطاع پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ ارزیابی شده است [۲۸].

با توجه به اهمیت حداقل فاصله‌ی میان ساختمان‌ها (درز انقطاع)، آیین‌نامه‌های مختلف ساختمانی نیز روابطی را برای رعایت حداقل درز انقطاع ارائه می‌کنند. تفاوت‌های موجود میان این روابط و اهمیت موضوع به‌خصوص در شهرهای بزرگ، که کمبود فضا و هزینه‌ی بالای زمین در آنها مطرح است، ضرورت این پژوهش ایجاد می‌کند. بنابراین، در این پژوهش حداقل درز انقطاع لازم برای ساختمان‌های مجاور با مصالح و سیستم‌های سازه‌ای مختلف و در تعداد طبقات متفاوت به طور مستقیم از روی تاریخچه‌های جابه‌جایی و همچنین بر اساس جمع آماری حداکثر جابه‌جایی‌ها بررسی شده است. درز انقطاع لازم تحت اثر زلزله‌های حوزه‌های دور و نزدیک با مقادیر پیشنهادی چهار آیین‌نامه‌ی معتبر بین‌المللی مقایسه گردید تا ابهامات حاصل از تفاوت‌های این روابط بررسی شود. همچنین، معیارهایی مثل معیار ۰/۰۰۵ ارتفاع جهت تأمین فاصله‌ی برابر ۰/۰۱ ارتفاع میان دو ساختمان مجاور هشت طبقه و کمتر (دارای اهمیت‌های متوسط و یا کم)، تغییر معیار رعایت نصف R (ضریب رفتار) برابر حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی به معیار فاصله‌ی برابر با جذر مجموع مربعات تغییرمکان‌های جانبی غیرخطی طرح حداکثر دو ساختمان مجاور، و یا معیار فاصله‌ی برابر با ۰/۷ برابر تغییر مکان جانبی غیرخطی طرح حداکثر توسط هریک از ساختمان‌ها در ویرایش جدید استاندارد ۲۸۰۰ ایران ارزیابی شدند.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- محاسبه‌ی درز انقطاع در استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۲۹]

معیارهای رعایت درز انقطاع برای جلوگیری از ضربه‌ی ساختمان‌های مجاور حین زلزله از نظر استاندارد ۲۸۰۰ ایران را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

<sup>۴</sup> Park-Ang Damage Indicator

الف - معیار  $0.01H$  که در آن  $H$  ارتفاع تراز مورد نظر بین دو ساختمان می باشد. بر اساس این معیار، هر ساختمان می بایست به اندازه  $0.005H_i$  از زمین مجاور فاصله داشته باشد که  $H_i$  ارتفاع ساختمان در نظر گرفته می شود. این معیار برای ساختمان های با هشت طبقه و کمتر دارای اهمیت متوسط و یا کم اعمال می گردد.

ب - معیار SRSS که در آن طبق بند ۳-۵-۶ ویرایش ۴ استاندارد ۲۸۰۰ جذر مجموع مربعات تغییر مکان های جانبی غیرخطی (با در نظر گرفتن اثر  $P - \Delta$ ) ساختمان های مجاور به عنوان حداقل درز انقطاع تعیین شده و برای ساختمان های بیشتر از هشت طبقه دارای اهمیت متوسط و کم و برای تمامی ساختمان های دارای اهمیت های زیاد و خیلی زیاد اعمال می گردد. رابطه ی (۱) این معیار را بیان می کند.

$$SRSS(2800) = \sqrt{(C_d U_{e1})^2 + (C_d U_{e2})^2} \quad (1)$$

در این رابطه  $C_d$  ضریب بزرگنمایی تغییر مکان جانبی ساختمان به علت رفتار غیر خطی آن می باشد و طبق جدول ۳-۴ ویرایش ۴ استاندارد ۲۸۰۰ تعیین می شود و  $U_{ei}$  تغییر مکان جانبی خطی طبقه تحت اثر زلزله ی طرح می باشد.  $C_d U_{ei}$  با تقریب خوبی تغییر مکان غیر خطی طبقه را به دست می دهد.

ج - معیار دیگری که در استاندارد ۲۸۰۰ ایران تعیین شده معیار  $0.7U_m$  است که در صورت عدم امکان آگاهی از وضعیت ساختمان های مجاور اعمال می گردد، و  $U_m$  همان  $C_d U_e$  می باشد.

## ۲-۲- محاسبه ی حداقل درز انقطاع در آیین نامه ی آمریکا IBC-2009 [۳۰]

آیین نامه ی IBC-2009 در بند 7.6.1613 حداقل درز انقطاع ( $\delta_{MT}$ ) را بر اساس جابجایی غیرخطی ( $\delta_M$ ) محاسبه می کند. رابطه ی (۲) برای محاسبه ی  $\delta_M$  و رابطه ی (۳) برای محاسبه ی  $\delta_{MT}$  طبق این آیین نامه ارائه شده اند.

$$\delta_M = \frac{C_d \delta_{max}}{I} \quad (2)$$

$$\delta_{MT} = \sqrt{(\delta_{M1})^2 + (\delta_{M2})^2} \quad (3)$$

$I$  ضریب اهمیت ساختمان (جدول های 1-1 و 1-1.5 در آیین نامه ی ASCE7 [۳۱])،  $\delta_{max}$  جابجایی حداکثر حاصل از تحلیل خطی و  $C_d$  ضریب تشدید جابجایی (جدول 1-12.2 در آیین نامه ی ASCE7 [۳۱]) است.

## ۲-۳- محاسبه ی حداقل درز انقطاع در آیین نامه ی اروپا EC8 [۳۲]

آیین نامه ی EC8 طبق بند 4.3.4 رابطه ی (۴) را جهت محاسبه ی جابجایی غیر خطی ( $d_s$ ) بر اساس جابجایی های حاصل از تحلیل های خطی ( $d_e$ ) به کار می برد.

$$d_s = q_d d_e \quad (4)$$

که  $q_d$  در این رابطه ضریب رفتار بوده و بر اساس جدول 6.2 در آیین نامه EC8 بدست می آید. طبق بند 4.4.2.7 درز انقطاع لازم برای ساختمان‌های تیپ مجاور<sup>۵</sup> به صورت SRSS جابجایی‌های غیرخطی آن‌ها و برای ساختمان‌های غیر تیپ مجاور به صورت ABS جابجایی‌های غیرخطی آن‌ها تعیین می‌گردد. در حقیقت، تنها تفاوت با IBC در محاسبه‌ی جابجایی‌های غیرخطی می‌باشد.

## ۲-۳- محاسبه‌ی حداقل درز انقطاع در آیین‌نامه‌ی کانادا NBCC2005 [۳۳]

آیین‌نامه‌ی NBCC-2005 جمع ساده‌ی حداکثر جابجایی‌های حاصل از تحلیل خطی<sup>۶</sup> هر ساختمان را برای رعایت حداقل درز انقطاع لرزه‌ای پیشنهاد می‌کند.

در اینجا، جابجایی‌های خطی مورد نیاز با استفاده از تحلیل استاتیکی معادل استاندارد ۲۸۰۰ ایران بدست آمده و با استفاده از ضرایب موجود در هر یک از آیین‌نامه‌ها به مقادیر غیر خطی تبدیل شدند. به منظور انجام تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی برای محاسبه‌ی جمع مستقیم تاریخچه‌های جابجایی (ABS) و همچنین روش جذر مجموع مربعات (SRSS) در این پژوهش از نرم افزار ETABS v.9.7.0 استفاده شد. نتایج تحلیل (ABS و SRSS) با معیارهای آیین‌نامه‌های ساختمانی (۲۸۰۰ ایران، IBC2009، EC8 و NBCC2005 کانادا) مقایسه گردید. در این مطالعه، ساختمان‌های ۱، ۴، ۷، ۹ و ۱۳ طبقه با سیستم‌های سازه‌ای متفاوت (قاب ساده، قاب خمشی و قاب دوگانه) مد نظر قرار دارد (جدول ۱). درز انقطاع لازم برای حالت‌های مختلف فرارگیری این ساختمان‌ها کنار دیدگر محاسبه گردید. با توجه به منظم بودن ساختمان‌های مورد نظر، مدل‌سازی به صورت دو بعدی انجام شد، به طوری که ارتفاع تمام طبقات ۳ متر و همچنین سازه‌ها دارای ۳ دهانه‌ی ۳ متری باشد. جهت طراحی ساختمان‌ها از الزامات و ویرایش ۴ استاندارد ۲۸۰۰ ایران استفاده شده است. بار مرده برابر با  $200 \text{ Kg/m}^2$  و بار زنده برابر با  $600 \text{ Kg/m}^2$  در نظر گرفته شده‌است. ضریب اهمیت ساختمان‌ها برابر ۱ و میزان مشارکت بار زنده ۲۰٪ در نظر گرفته شده است. مصالح به کار رفته فولاد نرمه‌ی ساختمانی (St37) و بتن C25 بوده و همچنین پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد (A=0.35g) و نوع خاک III بود.

جدول ۱: مدل‌های سازه‌ای مورد نظر در اینجا

Structure	1-story	4-story	7-story	9-story	13-story
قاب خمشی فولادی متوسط	1SMF	4SMF	7SMF	9SMF	13SMF
قاب خمشی فولادی متوسط + مهاربندی	1SDF	4SDF	4SDF	9SDF	13SDF
قاب ساده فولادی + مهاربندی	1SBF	4SBF	7SBF	9SBF	13SBF
قاب خمشی بتنی متوسط	1CMF	4CMF	7CMF	9CMF	13CMF
قاب خمشی بتنی متوسط + دیوار برشی	1CDF	4CDF	7CDF	9CDF	13CDF

در این تحقیق از ۷ شتاب‌نگاشت حوزه‌ی دور و ۷ شتاب‌نگاشت حوزه‌ی نزدیک ثبت شده بر روی خاک نوع سوم بر اساس آیین‌نامه‌ی 2800 ایران با بزرگی بیش از شش (Mw) استفاده شده است. برای مقیاس کردن رکوردها از نرم افزار Seismo Match-2016 استفاده شده تا رکوردها بر طیف طرح آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) منطبق شوند. جدول‌های (۲) و (۳) مشخصات رکوردهای مورد استفاده را نشان می‌دهد. جزئیات مربوط به انطباق رکوردها با طیف طرح آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه شده‌اند و شکل (۴) نیز تاریخچه‌های مقیاس شده‌ی شتاب را نشان می‌دهد.

<sup>5</sup> Same Property Line

<sup>6</sup> ABS-Linear

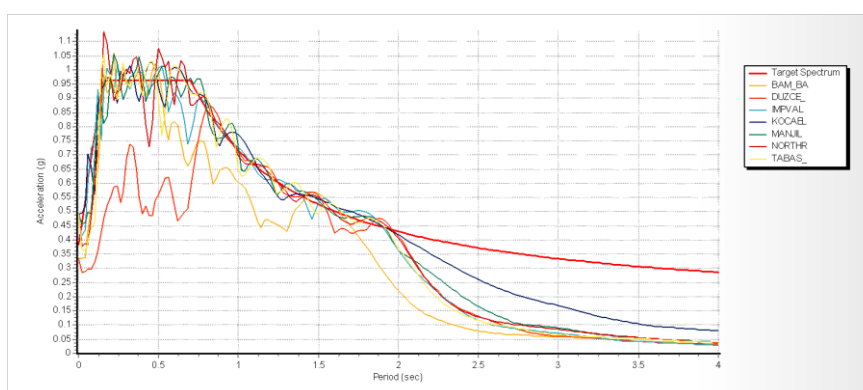
جدول ۲: مشخصات شتاب‌نگاشت‌های حوزه‌ی دور استفاده شده در تحلیل‌های این پژوهش

	Event/component	Station	Magnitude	Distance (Km)	PGV (cm/s)	PGA (g)
1	Bam, Iran 2003 (BAM)	Baft	6.6	169.54	1.65	0.014
2	Tabas, Iran 1978 (TAB)	Tabas	7.3	120.81	4.56	0.066
3	Imperial Valley 1979 (IMP)	Plaster City	6.5	31.7	5.4	0.057
4	Northridge (NOR)	Anaverde Valley	6.7	38.4	5.5	0.06
5	Manjil, Iran 1990 (MAN)	Tonekabun	7.3	93.6	19.5	0.137
6	Duzce 1999 (DUZ)	Arcelik	7.1	131.45	2.78	0.0079
7	Kocaeli (KOC)	Eregli	7.5	142.29	10.9	0.101

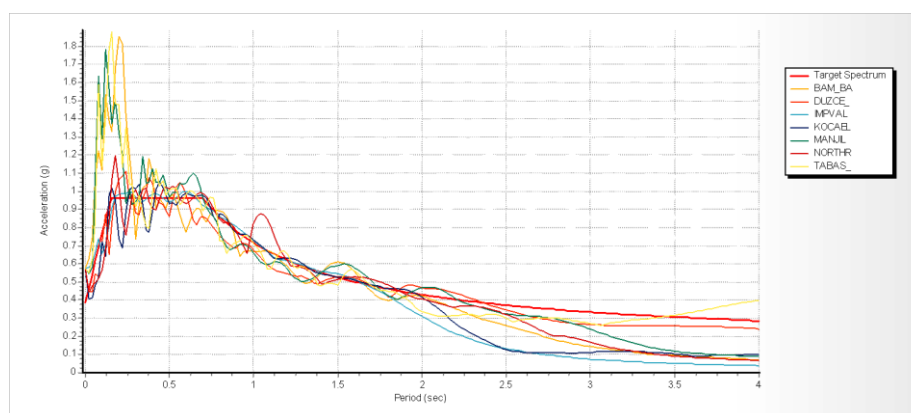
Reference: <http://peer.berkeley.edu/NGA/>

جدول ۳: مشخصات شتاب‌نگاشت‌های حوزه‌ی نزدیک استفاده شده در تحلیل‌های این پژوهش

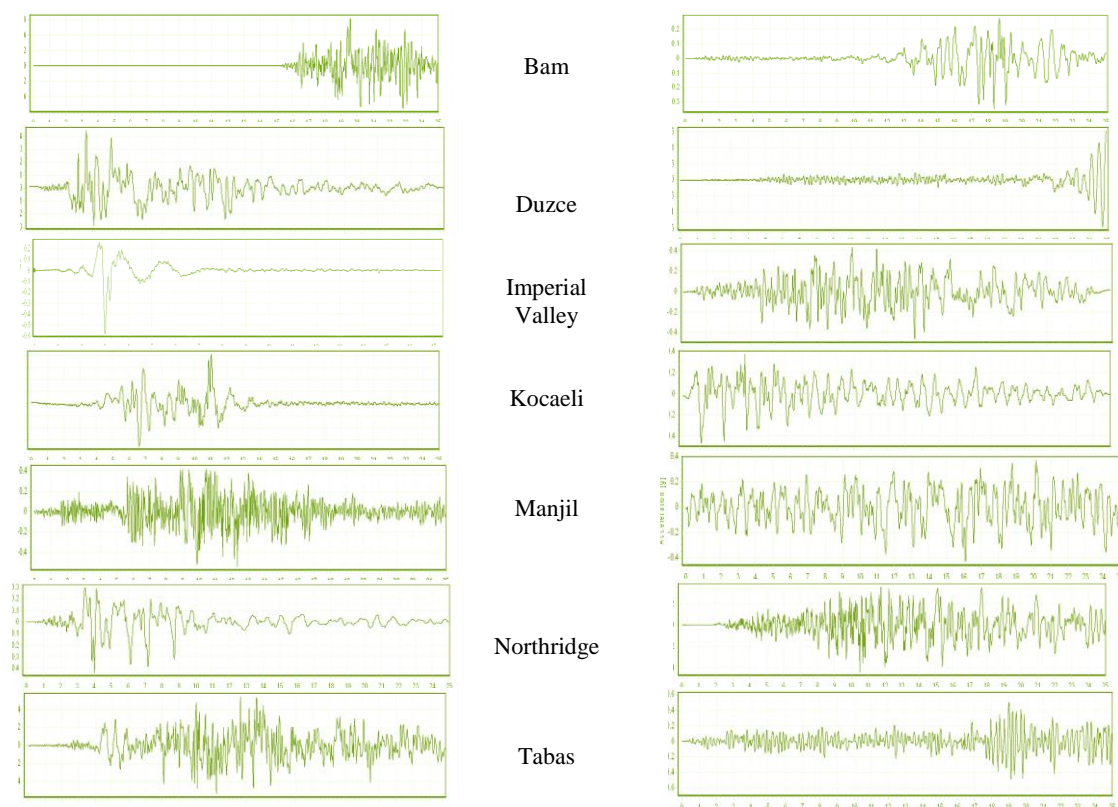
	Event/component	Station	Magnitude	Distance (Km)	PGV (cm/s)	PGA (g)
1	Bam, Iran 2003	Bam	6.6	1.7	60	0.629
2	Tabas, Iran 1978	Tabas	7.3	2.05	123	0.86
3	Imperial Valley 1979	5028 ElCentroArray	6.5	10.31	128.9	0.212
4	Northridge	Jensen Filter Plant	6.7	5.43	97.3	0.617
5	Manjil, Iran 1990	Abbar	7.3	12.55	50.5	0.498
6	Duzce 1999	Duzce	7.1	6.58	84	0.52
7	Kocaeli	Gebze	7.5	10.91	32.6	0.143

Reference: <http://peer.berkeley.edu/NGA/>

شکل ۲: انطباق طیف‌های پاسخ شتاب‌نگاشت‌های حوزه‌ی دور با طیف طرح در نرم افزار Seismo Match.



شکل ۳: انطباق طیف‌های پاسخ شتاب‌نگاشت‌های حوزه‌ی نزدیک با طیف طرح در نرم افزار Seismo Match.



شکل ۴: شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده در حوزه دور (راست) و حوزه‌ی نزدیک (چپ).

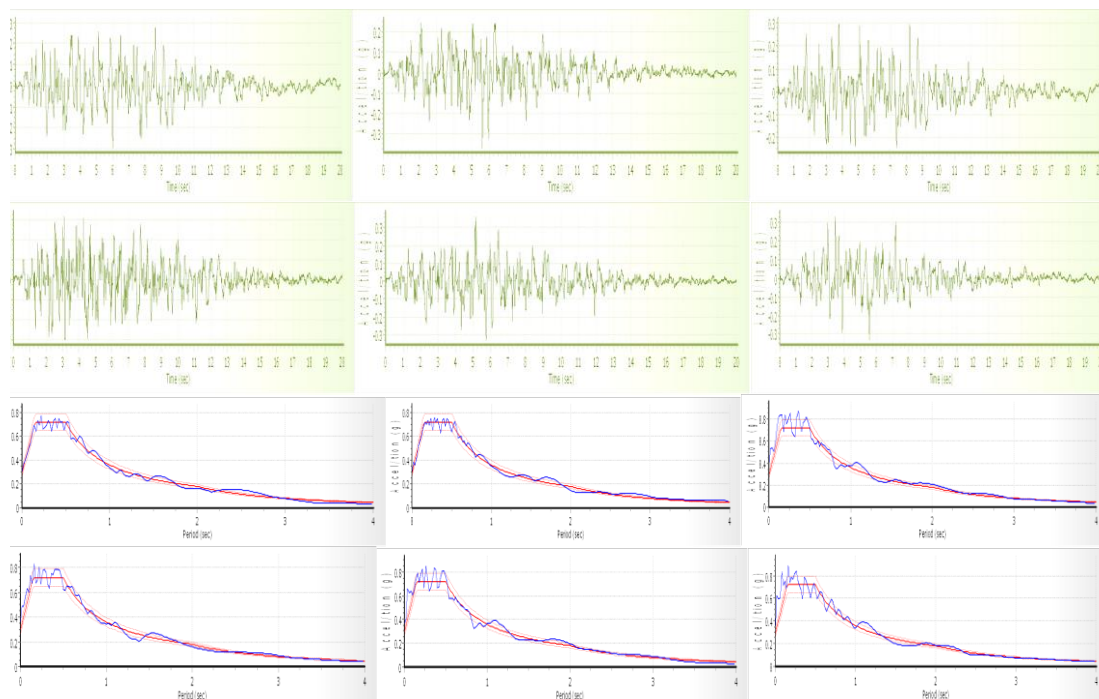
### ۳- نتایج و بحث

در ابتدا به منظور راستی‌آزمایی روش پژوهش در اینجا (تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی در نرم افزار ETABS و محاسبه‌ی درز انقطاع) از دو نمونه‌ی معتبر از پژوهش‌های گذشته استفاده می‌شود. در نمونه‌ی اول، ساختمان ۵ طبقه‌ی مورد مطالعه در مرجع [۱۴] در اینجا در نرم افزار ETABS مدل‌سازی و مقادیر ۳ پیوند اصلی آن به همراه جابجایی نسبی طبقه‌ی ۵ تحت اثر ۶ زلزله‌ی مصنوعی منطبق بر طیف طرح آیین‌نامه EC8 با مقدار گزارش شده در مقاله مقایسه شد. در نمونه‌ی دوم، مقادیر گزارش شده برای جابجایی طبقه‌ی سوم ساختمان ۳ طبقه‌ی مطالعه شده در مرجع [۲۳] در اینجا مدل شده و حداقل درز انقطاع بر اساس روش SRSS با مقادیر حاصل از تحلیل مدل همان ساختمان در نرم افزار ETABS در این پژوهش تحت همان زلزله‌ها مقایسه گردید.

#### ۳-۱- راستی‌آزمایی نمونه‌ی اول: Efraimiadou و همکاران [۱۴]

ساختمان ۵ طبقه‌ی منظم در پلان و در ارتفاع با ۳ دهانه از مرجع [۱۴] انتخاب شده در اینجا مورد مدل‌سازی و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل برای پیوندهای اصلی  $T_1$ ،  $T_2$  و  $T_3$  و همچنین مقدار جابجایی نسبی طبقه‌ی پنجم با نتایج گزارش شده در مقاله [۱۴] مقایسه شد. با توجه به اینکه نتایج ارائه شده در مقاله بر اساس ۶ زلزله‌ی مصنوعی بدست آمده از نرم افزار SeismoArtif-2016 منطبق با طیف طرح EC8 ارائه شده‌اند، از اینرو در این پژوهش نیز برای انجام راستی‌آزمایی ابتدا این ۶ شتاب‌نگاشت مصنوعی توسط همان نرم افزار تولید گردید. این شتاب‌نگاشت‌ها با توجه به گزارش مقاله برای  $PGA=0.24g$ ، خاک از نوع B و میرایی ۵٪ تولید شدند. شکل (۵) شتاب-نگاشت‌های مصنوعی تولید شده در این پژوهش و جزئیات انطباق طیف‌های پاسخ آن‌ها با طیف طرح EC8 را نشان می‌دهد.



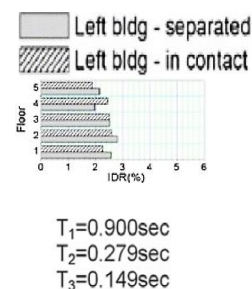


شکل ۵: شتاب‌نگاشت‌های تولید شده در راستی‌آزمایی اول و انطباق طیف‌های پاسخ آن‌ها با طیف طرح EC8.

در جدول (۴) نتایج پیرودهای اصلی و همچنین مقادیر جابجایی‌های حداکثر طبقات ۴ و ۵ جهت محاسبه‌ی جابجایی نسبی طبقه‌ی ۵ در مقایسه با گزارش مقاله مرجع [۱۴] ارائه شده است. چنانچه ملاحظه می‌گردد مقدار پیروید پایه‌ی محاسبه شده برای این ساختمان، که برابر با ۰/۹۰۰۴ ثانیه بود، کمتر از ۰/۰۰۰۰۴ درصد با مقدار گزارش شده در مقاله (۰/۹۰۰ ثانیه) تفاوت دارد. میانگین جابجایی نسبی طبقه‌ی ۵ محاسبه شده در این پژوهش (۲/۱۴۸۲٪) نیز با مقدار گزارش شده در مقاله تفاوتی معادل ۰/۵۱۸٪ دارد.

جدول ۴: مقایسه مقادیر محاسبه شده در اینجا با داده‌های مرجع [۱۴]

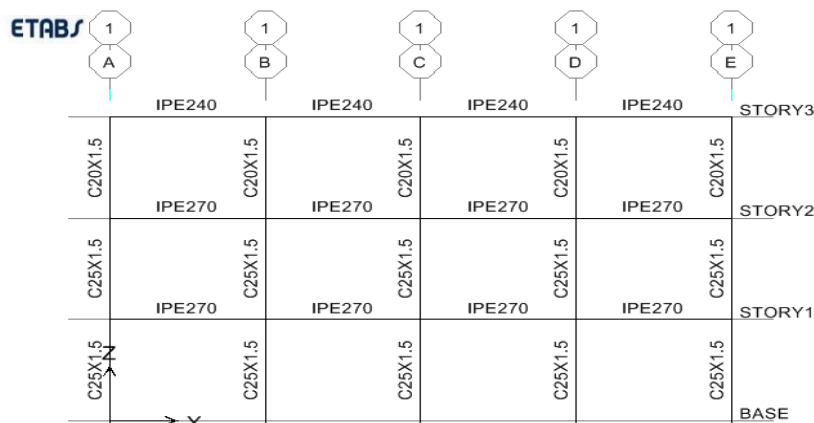
Seismic action	Calculated here			Efraimiadou et al. (2013)	
	$D_4^{max}$ (cm)	$D_5^{max}$ (cm)	$\delta_5^{max}$ (%)	Mode	T (sec)
Artificial_1	طبقه‌ی ۵	0.4359	1.951	1	0.9004
	طبقه‌ی ۴	0.3773			
Artificial_2	طبقه‌ی ۵	0.4165	2.074	2	0.2723
	طبقه‌ی ۴	0.3542			
Artificial_3	طبقه‌ی ۵	0.6663	2.479	3	0.1409
	طبقه‌ی ۴	0.5919			
Artificial_4	طبقه‌ی ۵	0.5502	2.324	3	0.1409
	طبقه‌ی ۴	0.4805			
Artificial_5	طبقه‌ی ۵	0.5052	1.930	3	0.1409
	طبقه‌ی ۴	0.4473			
Artificial_6	طبقه‌ی ۵	0.5468	2.127	3	0.1409
	طبقه‌ی ۴	0.4830			



Average = 2.148

## ۳-۲- راستی آزمایی نمونه‌ی دوم: نیکخو و فرامرزی [۲۳]

شکل (۶) مدل سازه‌ای قاب دو بعدی سه طبقه‌ی مطالعه شده توسط مرجع [۲۳] را نشان می‌دهد و جدول (۵) نیز مقادیر جابجایی‌های محاسبه شده در این پژوهش برای طبقه‌ی سوم و پیوندهای محاسبه شده را در مقایسه با مرجع اصلی ارائه می‌کند. چنانچه ملاحظه می‌گردد پیوندهای محاسبه شده تقریباً برابر با مقادیر گزارش شده می‌باشند و همچنین جابجایی محاسبه شده برای طبقه‌ی بام نیز حدود ۰/۲ میلیمتر با جابجایی گزارش شده در مقاله تفاوت دارد.



شکل ۶: مدل سازه در راستی آزمایی دوم انتخاب شده از مرجع [۲۳].

جدول ۵: نتایج حاصل در این پژوهش برای میانگین حداکثر جابجایی طبقه‌ی بام ساختمان ۳ طبقه‌ی راستی آزمایی تحت ۲۰ شتاب‌نگاشت در مقایسه با مرجع [۲۳]

(نیکخو و فرامرزی، ۱۳۹۱) :  $T_x = 0.788 \text{ sec}$ ,  $T_y = 0.836 \text{ sec}$ , Displacement=12.01 cm

نتایج اینجا :  $T_x = 0.788 \text{ sec}$ ,  $T_y = 0.840 \text{ sec}$

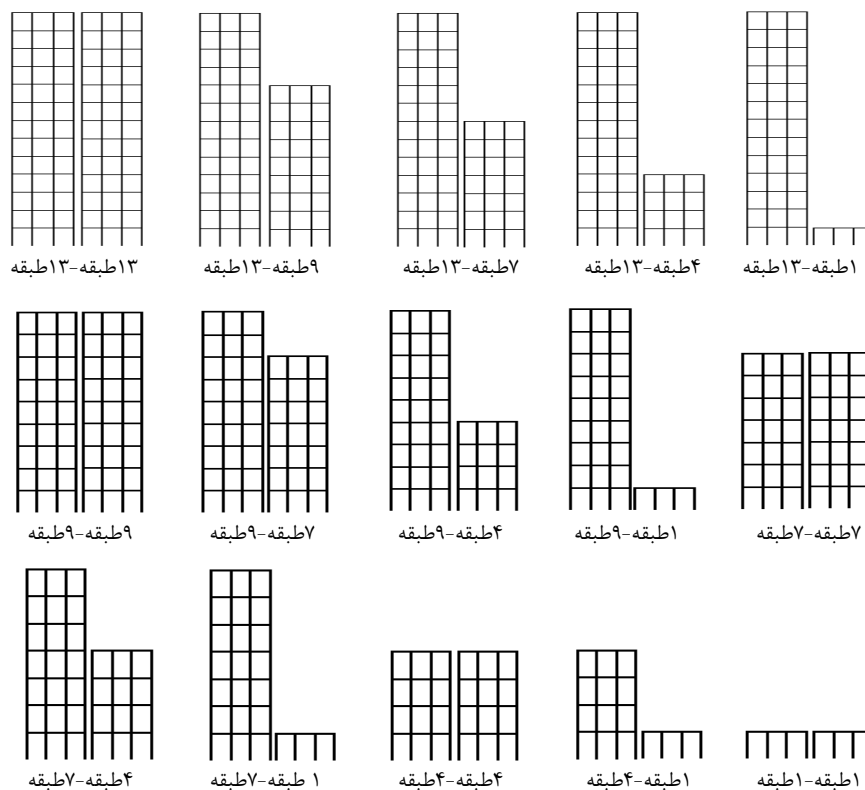
Seismic Action	Imperial Valley 2	Imperial Valley 3	Loma Prieta	Loma Prieta2	Morgan hill	Northridge	Northridge2	Northridge3	San Fernando	Whittier Narrows										
Displacement	15.26	16.69	15.62	15.02	14.66	11.83	8.747	25.15	5.538	7.452	13.84	18.46	7.379	13.43	10.93	10.58	5.58	3.493	15.3	5.666
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
	$\sum \text{SUM} = 240.625$										$\text{AVERAGE} = 12.03125$									

## ۳-۳- نتایج تحلیل سازه‌های موردنظر در اینجا

در این بخش مدل‌سازی ساختمان‌های معرفی شده در جدول (۱) در نرم‌افزار ETABS انجام شده و با اجرای تحلیل‌های مودال، پیوندهای محاسبه شده در جدول (۶) بدست آمده‌است. در شکل (۷) حالت‌های مختلف همجواری ساختمان‌ها نشان داده شده که برای سیستم‌های سازه‌ای مختلف بررسی و مطالعه شده و در جدول (۷) نیز مدل‌های ایجاد شده از سازه‌ها نشان داده شده است.

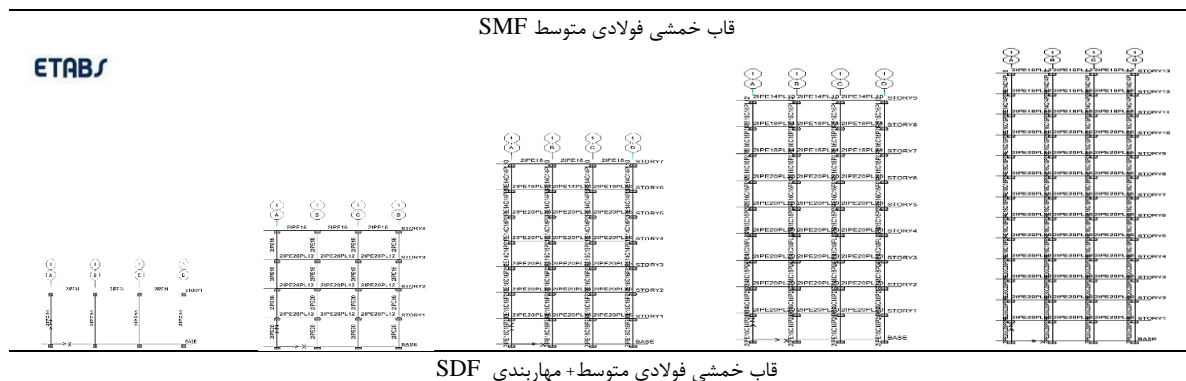
جدول ۶: مقادیر پریود پایه‌ی ساختمان‌های مورد مطالعه (برحسب ثانیه)

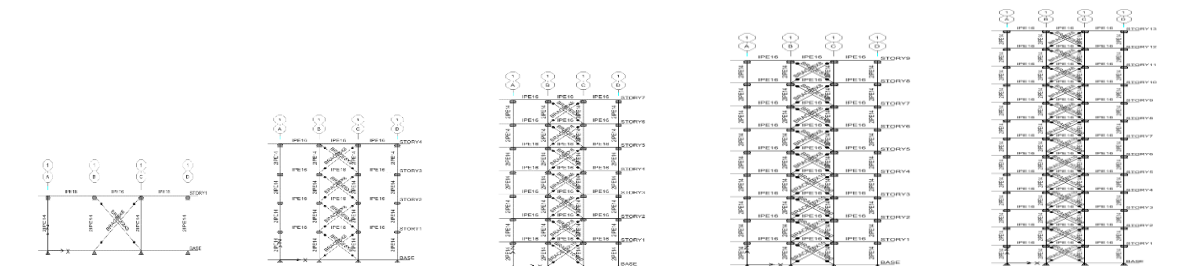
Structure	1-story	4-story	7-story	9-story	13-story
قاب خمشی فولادی متوسط	0.468	0.805	1.289	1.356	1.877
قاب خمشی فولادی متوسط + مهاربندی	0.085	0.242	0.392	0.474	0.649
قاب ساده فولادی + مهاربندی	0.085	0.244	0.386	0.471	0.590
قاب خمشی بتنی متوسط	0.182	0.675	0.925	1.303	1.788
قاب خمشی بتنی متوسط + دیوار برشی	0.037	0.103	0.170	0.215	0.305



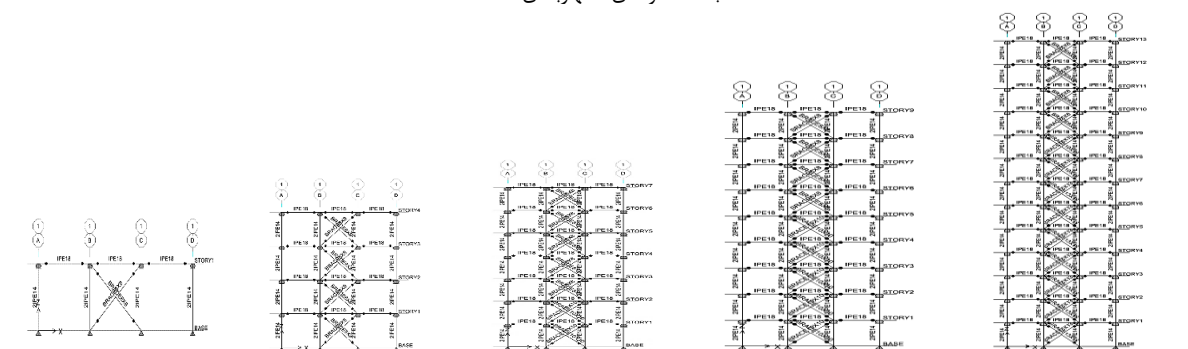
شکل ۷: حالت‌های مورد مطالعه‌ی ساختمان‌ها در مجاورت یکدیگر.

جدول ۷: مقادیر پریود پایه‌ی ساختمان‌های مورد مطالعه (برحسب ثانیه)

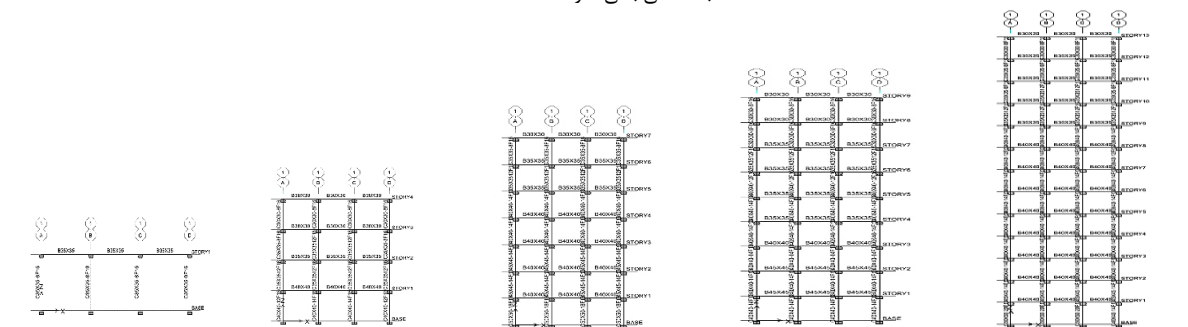




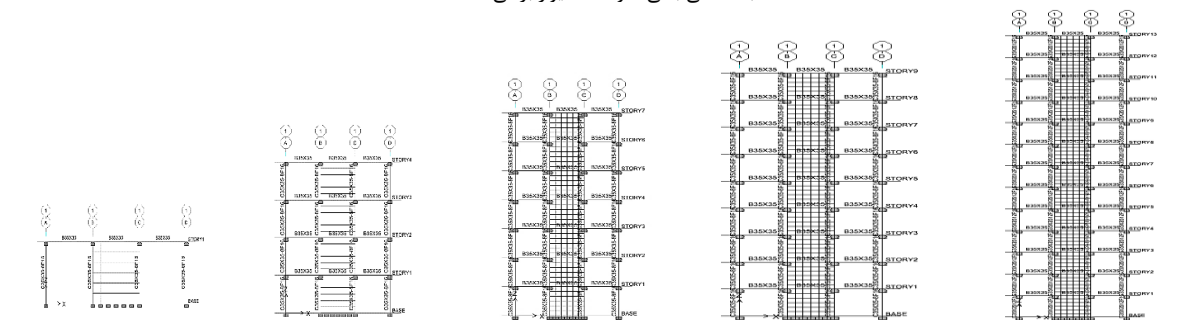
قاب ساده فولادی + مهاربندی SBF



قاب خمشی بتنی متوسط CMF



قاب خمشی بتنی متوسط + دیوار برشی CDF



در ابتدا، نتایج روش SRSS با روش ABS مقایسه گردید تا تفاوت‌هایی که آیین‌نامه‌های IBC2009 و یا EC8 برای ساختمان‌های مجاور تیپ و غیر تیپ قائل شده‌اند اما چنین جزئیاتی در استاندارد ۲۸۰۰ ایران وجود ندارد و با معیار  $0.7U_m$  مشخص شده آشکار گردند. برای انجام این مقایسه دو ساختمان 7SMF و 9SMF و همچنین دو ساختمان 7SBF و 9CMF در کنار یکدیگر بررسی شدند. به این منظور، ابتدا حداکثر جابجایی‌های طبقات تحت ۷ زلزله دور و ۷ زلزله نزدیک بدست آمده و میانگین آن‌ها محاسبه گردید. سپس برای هر زوج ساختمان مجاور (7SMF-9SMF) و (9CMF-7SBF) درز انقطاع لازم بر اساس روش SRSS (با فرض تیپ بودن ساختمان‌ها) و همچنین بر اساس روش ABS (با فرض غیر تیپ بودن ساختمان‌ها) محاسبه شد.

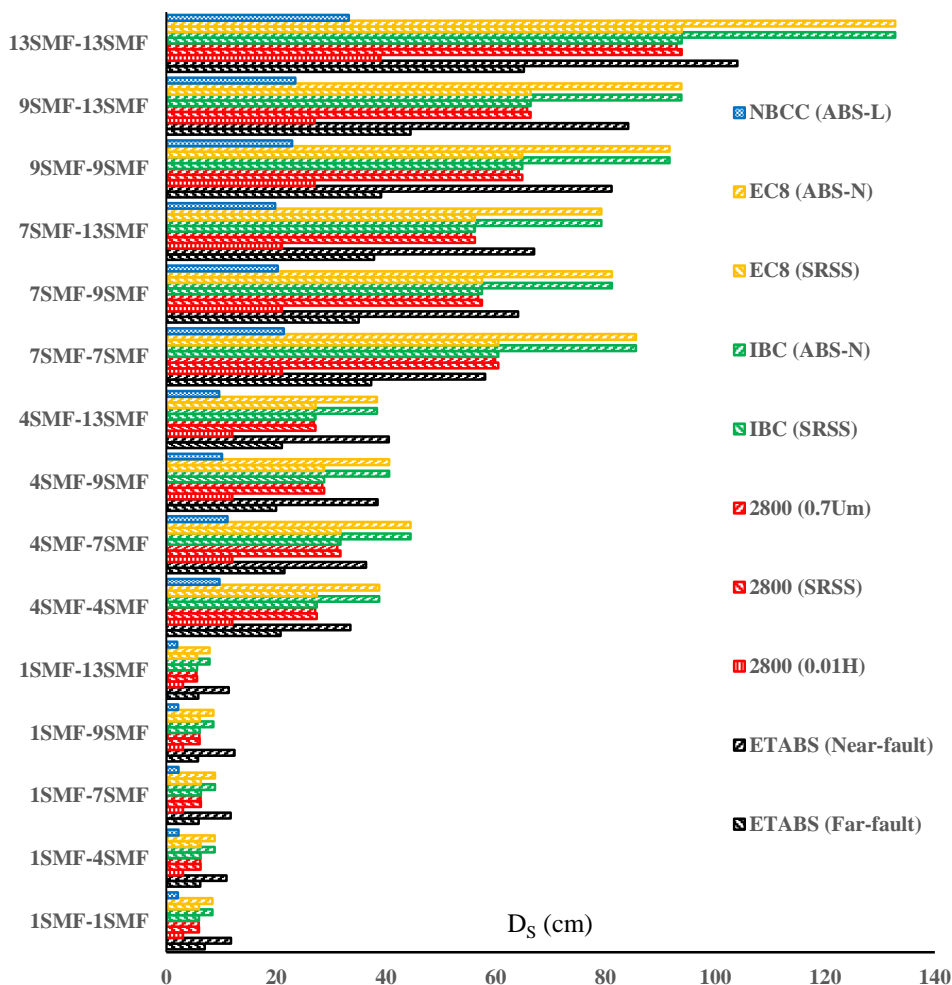
مطابق با نتایج، در جدول‌های (۸) و (۹) مقادیر درز انقطاع به دست آمده بر اساس روش SRSS در مقایسه با روش جمع مستقیم جایابی‌ها را به ترتیب برای حالت 9CMF-7SBF و 7SMF-9SMF خلاصه شده است. نتایج حاصل نشان داد با توجه به فزونی آشکار Ds بر اساس ABS نسبت به SRSS عدم تفکیک ساختمان‌های تپ از ساختمان‌های غیر تپ در استاندارد ۲۸۰۰ و اعمال معیار SRSS برای هر دو، بر خلاف آیین‌نامه‌های IBC و EC8 بوده و نیازمند اصلاح می‌باشد.

جدول ۸: درز انقطاع به روش SRSS و ABS برای حالت 9CMF-7SBF      جدول ۹: درز انقطاع به روش SRSS و ABS برای حالت 7SMF-9SMF

7SMF-9SMF	Ds (cm)			
	SRSS		ABS	
	Far	Near	Far	Near
STORY				
1	4.34	12.31	5.73	12.92
2	10.24	22.63	12.32	24.32
3	15.44	32.55	17.26	34.63
4	20.73	40.97	21.02	41.52
5	25.89	49.1	26.32	53.26
6	30.76	57.86	32.33	58.92
7	35.05	64.05	36.72	65.32

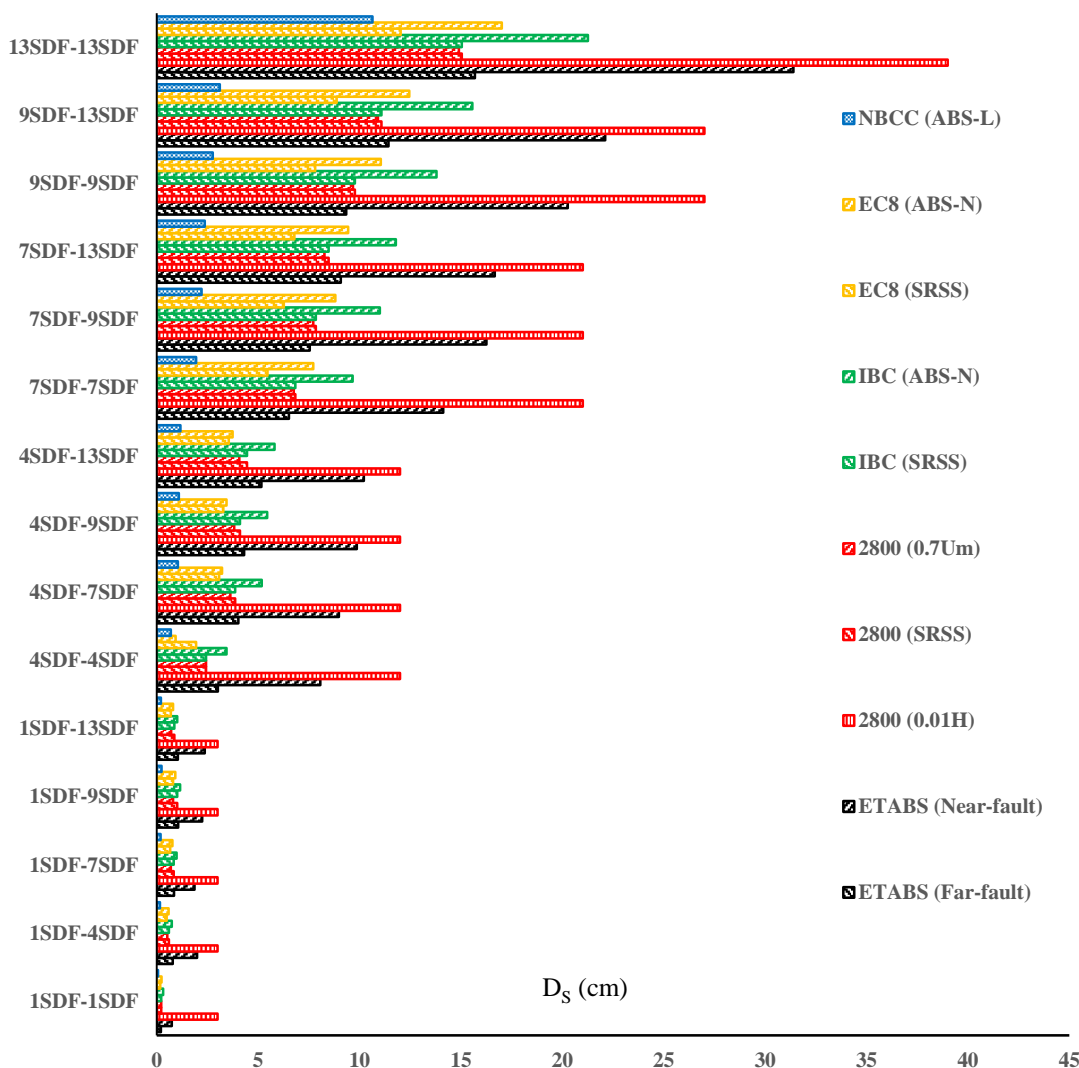
7SBF-9CMF	Ds (cm)			
	SRSS		ABS	
	Far	Near	Far	Near
STORY				
1	2.1	3.689	3.2	5.62
2	4.88	9.03	5.71	10.71
3	7.98	13.61	8.26	15.23
4	11.66	19.18	14.21	21.25
5	15.61	24.69	17.25	26.35
6	19.06	30.47	21.36	31.24
7	22.23	35.47	23.25	37.52

در ادامه، در شکل (۷) مقادیر درز انقطاع بدست آمده از روش‌های مختلف برای قاب‌های خمشی فولادی نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد مقادیر درز انقطاع در زلزله‌های نزدیک به گسل و دور از گسل متفاوت است، و همچنین معیار 0.01H در استاندارد ۲۸۰۰ (در زلزله‌های دور و نزدیک نسبت به گسل) حتی تا ساختمان‌های هشت طبقه نیز بسیار دست پائین می‌باشد. از طرفی، مقادیر ABS غیرخطی چنانچه مورد انتظار بود بیشتر از SRSS است و این یکی دیگر از نقاط ضعف استاندارد ۲۸۰۰ ایران محسوب می‌شود که ساختمان‌های غیر تپ را از ساختمان‌های تپ تفکیک نکرده و یا ضریب ۰/۷ را اعمال نموده است. همچنین، مقادیر SRSS در تمامی آیین‌نامه‌های IBC و EC8 عملاً یکسان می‌باشند و همگی برای زلزله‌های دور از گسل مناسب اما برای زلزله‌های نزدیک به گسل دست پائین می‌باشند که البته در مورد ساختمان‌های یک طبقه حتی برای زلزله‌های دور از گسل نیز می‌توان این مقادیر را دست پائین دانست. در زلزله‌های نزدیک به گسل می‌بایست مقادیر ABS-N را معیار قرار داد و می‌توان اظهار کرد که آیین‌نامه‌ی کانادا (NBCC) همواره مقادیر دست پائینی دارد.



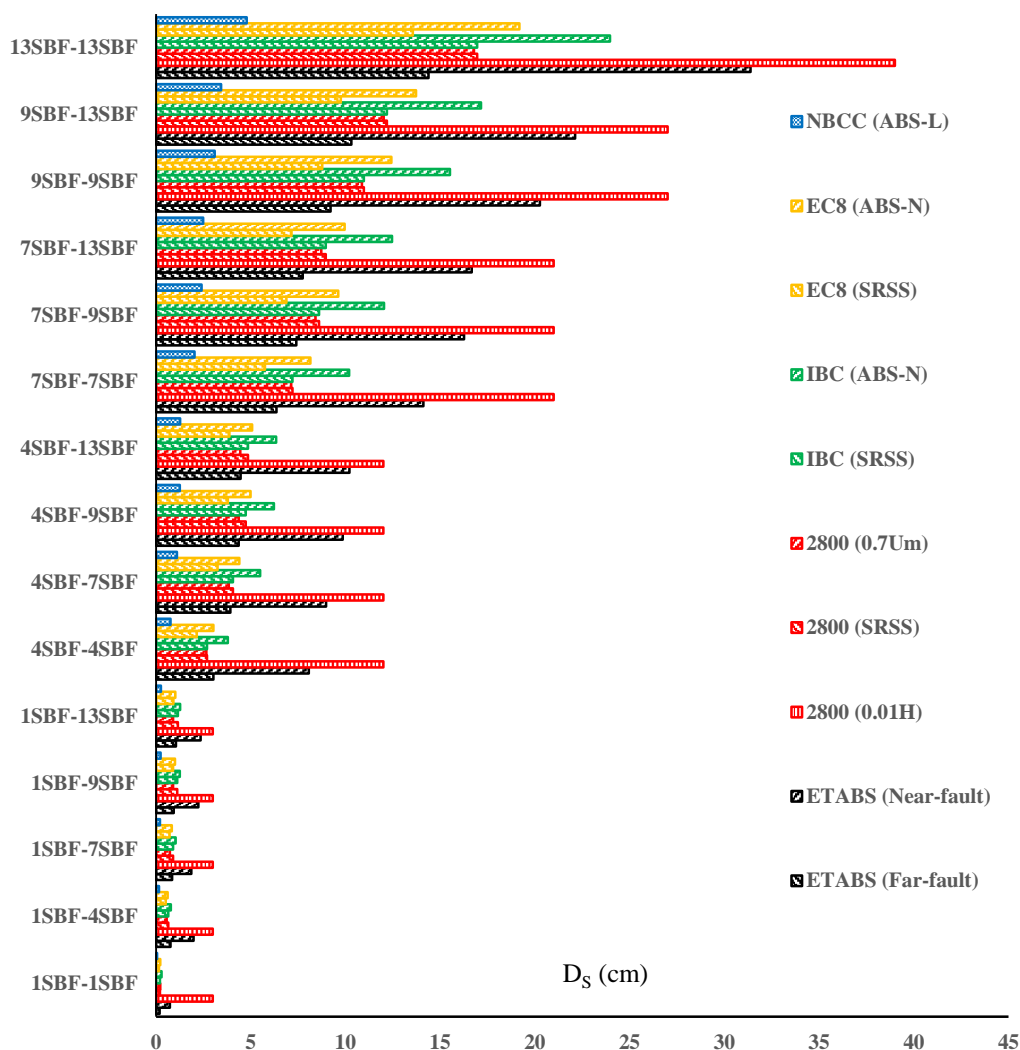
شکل ۷: مقادیر درز انقطاع بدست آمده از روش‌های مختلف برای ساختمان‌های فولادی دارای قاب خمشی.

با توجه به شکل (۸) برای ساختمان‌های فولادی دارای سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی بعلاوه‌ی مهاربندی همگرا ملاحظه می‌گردد مقادیر درز انقطاع در زلزله‌های نزدیک به گسل و دور از گسل متفاوت است. معیار 0.01H در هر ارتفاعی چه برای زلزله‌های نزدیک به گسل و چه برای زلزله‌های دور از گسل مقادیر محافظه کارانه‌ای دارد، همچنین، مقادیر SRSS در آیین‌نامه‌های 2800 و IBC برای زلزله-های دور از گسل تا حدودی دست پائین اما برای زلزله‌های نزدیک به گسل بسیار دست پائین است. مقادیر SRSS در آیین‌نامه‌ی EC8 (برای زلزله‌های دور یا نزدیک) همیشه بسیار دست پائین می‌باشند و آیین‌نامه‌ی کانادا (NBCC) همواره مقادیر دست پائینی دارد.



شکل ۸: مقادیر درز انقطاع بدست آمده از روش‌های مختلف برای ساختمان‌های فولادی دارای سیستم دوگانه قاب خمشی بعلاوه‌ی مهاربندی همگرا.

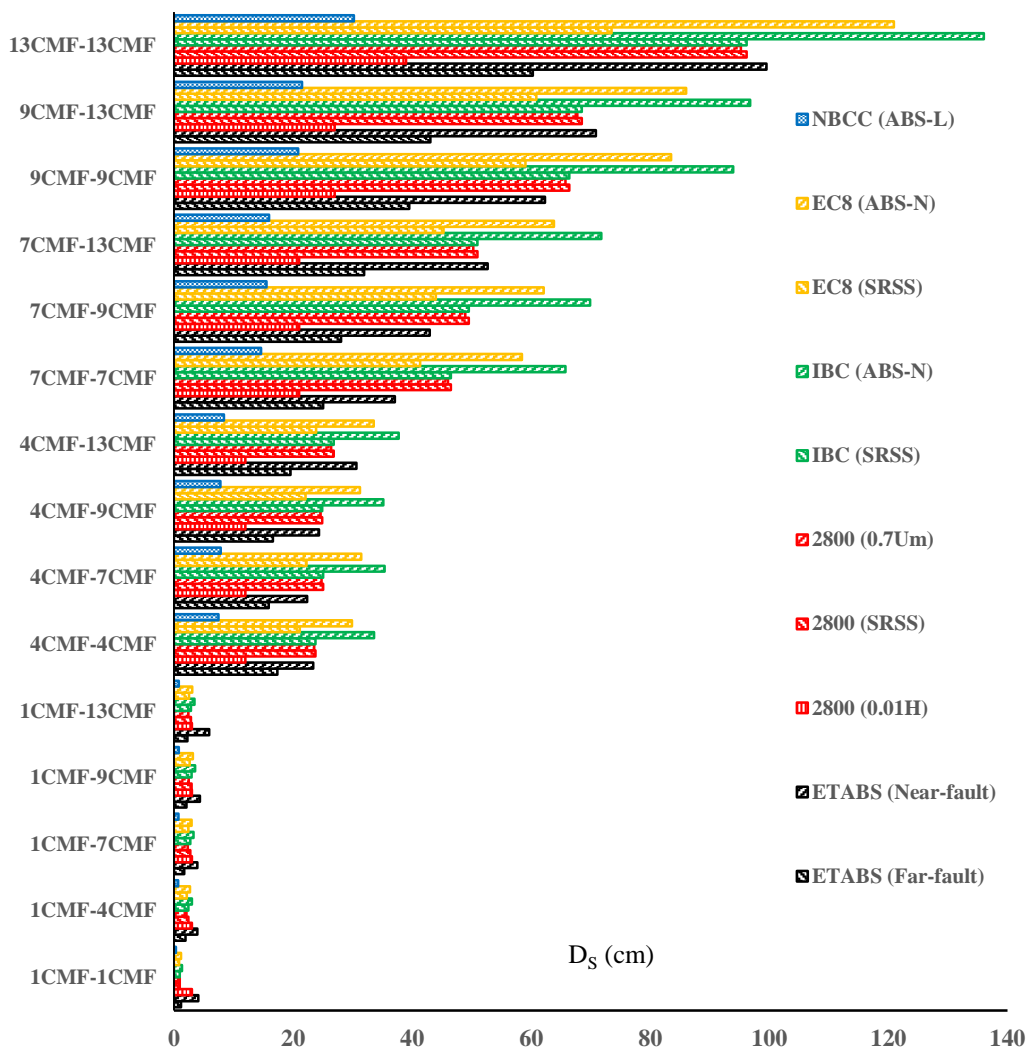
با توجه به شکل (۹) برای ساختمان‌های فولادی دارای قاب‌های ساده‌ی مهاربندی شده‌ی همگرا ملاحظه می‌گردد اولاً مقادیر درز انقطاع در زلزله‌های نزدیک به گسل و دور از گسل متفاوت است، ثانیاً معیار  $0.01H$  در هر ارتفاعی مقادیر محافظه کارانه‌ای دارد. از طرفی، مقادیر SRSS در آیین‌نامه‌های 2800 و IBC برای زلزله‌های دور از گسل مناسب اما برای زلزله‌های نزدیک به گسل دست پائین می‌باشند. همچنین، مقادیر SRSS در آیین‌نامه‌ی EC8 برای زلزله‌های دور از گسل و نزدیک به گسل دست پائین است و برای زلزله‌های نزدیک به گسل می‌بایست از معیار  $0.01H$  استفاده نمود. آیین‌نامه‌ی کانادا (NBCC) نیز همواره مقادیر دست پائینی دارد.



شکل ۹: مقادیر درز انقطاع بدست آمده از روش‌های مختلف برای ساختمان‌های فولادی دارای قاب‌های ساده مهاربندی شده‌ی همگرا.

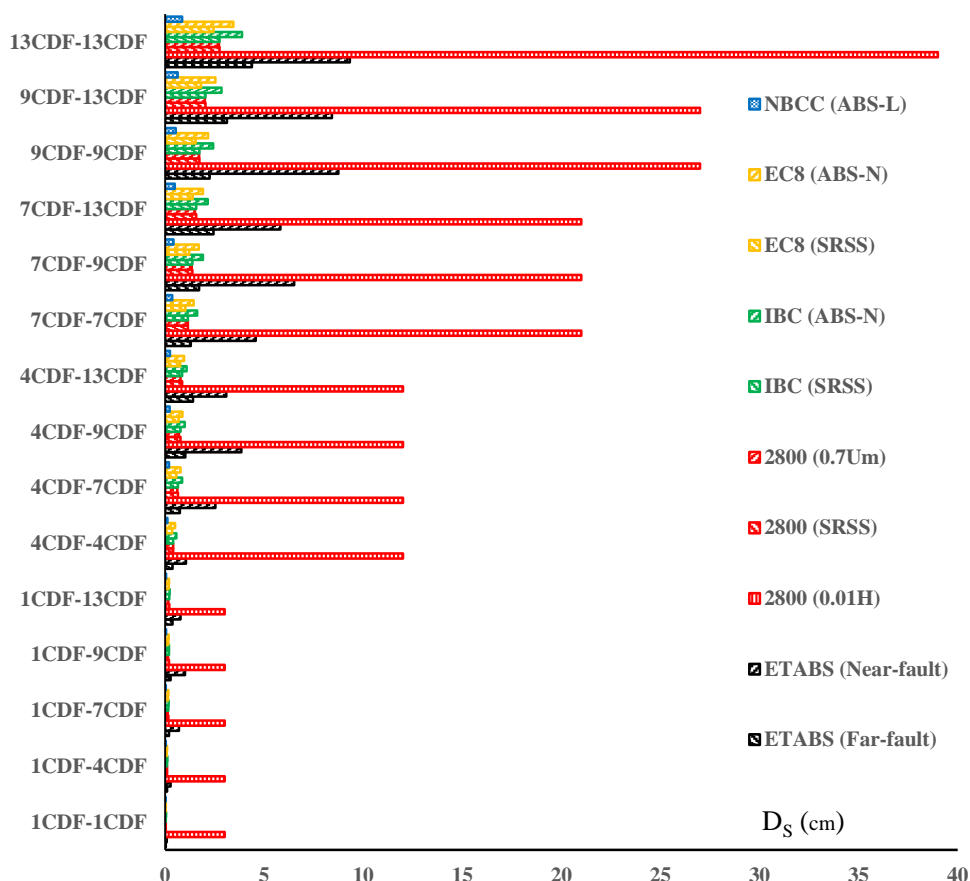
با توجه به شکل (۱۰) برای ساختمان‌های بتنی دارای قاب‌های خمشی متوسط ملاحظه می‌گردد اولاً مقادیر درز انقطاع در زلزله‌های نزدیک به گسل و دور از گسل متفاوت است، ثانیاً معیار 0.01H فقط در ساختمان‌های یک طبقه مناسب و در سایر ارتفاعات دست‌پائین می‌باشد. مقادیر SRSS در تمامی آیین‌نامه‌های 2800، IBC و EC8 برای زلزله‌های دور از گسل کاملاً مناسب و برای زلزله‌های نزدیک به گسل تا حدودی مناسب است اما برای زلزله‌های نزدیک به گسل عملاً می‌بایست از ABS-N استفاده نمود و آیین‌نامه‌ی کانادا (NBCC) نیز همچنان مقادیر دست‌پائینی دارد.





شکل ۱۰: مقادیر درز انقطاع بدست آمده از روش‌های مختلف برای ساختمان‌های بتنی دارای قاب‌های خمشی متوسط.

با توجه به شکل (۱۱) برای ساختمان‌های بتنی دارای سیستم دوگانه‌ی قاب‌های خمشی متوسط بعلاوه‌ی دیوار برشی ملاحظه می‌گردد مقادیر درز انقطاع در زلزله‌های نزدیک به گسل و دور از گسل متفاوت است و معیار 0.01H در تمامی موارد مقادیر بسیار محافظه کارانه‌ای دارد. مقادیر SRSS در تمامی آیین‌نامه‌های 2800، IBC و EC8 برای هر دوی زلزله‌های دور از گسل و نزدیک به گسل دست پائین می‌باشند و آیین‌نامه‌ی کانادا (NBCC) همواره مقادیر دست پائینی دارد. بنابراین می‌بایست در هر دوی زلزله‌های نزدیک به گسل و دور از گسل از معیار 0.01H استفاده نمود.



شکل ۱۱: مقادیر درز انقطاع بدست آمده از روش‌های مختلف برای ساختمان‌های بتنی دارای سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط بعلاوه دیوار برشی متوسط

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، حداقل درز انقطاع لرزه‌ای در ساختمان‌های مجاور به روش‌های ABS و SRSS و با داده‌های حاصل از تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی در نرم افزار ETABS محاسبه شده و به با معیارهای تعدادی از آیین‌نامه‌های ساختمانی معتبر (۲۸۰۰ ایران، IBC2009 آمریکا، EC8 اروپا و NBCC2005 کانادا) مقایسه گردید. برای انجام مطالعات، ساختمان‌های ۱، ۴، ۷، ۹ و ۱۳ طبقه با سیستم‌های سازه‌ای مختلف (قاب ساده، قاب خمشی و قاب دوگانه) و با حالت‌های مختلف قرارگیری در کنار یکدیگر مد نظر قرار گرفت. با توجه به منظم بودن ساختمان‌های مورد نظر، مدل‌سازی به صورت دو بعدی انجام شد و طراحی قاب‌های ساختمانی براساس ویرایش ۴ استاندارد ۲۸۰۰ ایران انجام گردید. ۷ شتاب‌نگاشت حوزه‌ی دور و ۷ شتاب‌نگاشت حوزه‌ی نزدیک جهت تحلیل‌های لرزه‌ای انتخاب شد. مهم‌ترین نتایج حاصل به صورت زیر خلاصه شده است:

۱- مقایسه‌ی مقادیر درز انقطاع توصیه شده در آیین‌نامه‌های مورد مطالعه با درز انقطاع بدست آمده تحت زلزله‌های دور از گسل و نزدیک به گسل نشان داد که برای زلزله‌های دور از گسل در قاب‌های خمشی متوسط، برای مصالح فولادی و بتن مسلح، معیار SRSS (مطابق با EC8، 2800 و IBC) کفایت لازم را دارد.

۲- مقادیر درز انقطاع توصیه شده در آیین‌نامه‌ها در مقایسه با درز انقطاع بدست آمده محاسبه شده در اینجا نشان داد در قاب‌های منظم دو گانه با مصالح فولادی یا بتن مسلح، معیار 0.01H مناسبی است. و برای قاب‌های ساده‌ی منظم فولادی معیارهای SRSS آیین‌نامه‌های 2800 و IBC کفایت لازم را دارد، اما ضریب بزرگنمایی آیین‌نامه‌ی EC8 باعث دست پائین شدن نتایج این معیار شده است.

۳- مطابق با داده‌های حاصل، برای زلزله‌های نزدیک به گسل در قاب‌های خمشی منظم (فولادی و بتن مسلح) معیار ABS-N و در قاب‌های مهاربندی شده‌ی منظم معیار 0.01H پیشنهاد می‌شوند.

۴- در مجموع، می‌توان گفت نوع مصالح تأثیری در معیار درز انقطاع ندارد. با این وجود، با فرض منظم بودن ساختمان دارای اهمیت متوسط اگر سیستم باربر جانبی قاب خمشی باشد، معیار SRSS برای زلزله‌های دور از گسل و معیار جمع مستقیم جابجایی‌های غیرخطی (ABS-N) برای زلزله‌های نزدیک به گسل مناسب است. و اگر سیستم جانبی مهاربندی باشد، معیار یک صدم ارتفاع در هر دوی زلزله‌های دور از گسل و نزدیک به گسل توصیه می‌شود.

در ادامه‌ی این مطالعات، بررسی ساختمان‌های با اهمیت‌های زیاد و خیلی زیاد و نامنظم در پلان و ارتفاع در برنامه‌ی کار نویسندگان قرارداد.

## مراجع

- [1] Ambraseys, N. (1973). The Earthquake of Managua-Nicaragua 1972. *Nature*, 244, 427-428.
- [2] Anagnostopoulos, S.A. (1996). Buildings pounding re-examined: how serious a problem is it? In: *11<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*. Pergamon: Elsevier Science Oxford.
- [3] Anagnostopoulos, S.A. (1988). Pounding of buildings in series during earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16(3), 443-456.
- [4] Anagnostopoulos, S.A. & Spiliopoulos, K.V. (1992). An investigation of earthquake induced pounding. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21(4), 289-302.
- [5] Rajaram, C.H. & Ramancharla, P.K. (2012). Comparison of codal provisions on pounding between adjacent buildings. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 2012, 72-82.
- [6] Cole, G.L. Dhakal, R.P. Carr, A.J. & Bull, D.K. (2010). Building pounding state of the art Identifying structures vulnerable to pounding damage. In: *2010-NZSEE Conference*. Wellington, New Zealand.
- [7] Hao, H. & Shen, J. (2001). Estimation of relative displacement of two adjacent asymmetric structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 81-96.
- [8] Garcia, D.L. (2003). Probabilistic evaluation of the separation distance between adjacent systems. *Student Research Accomplishments*, 2002, 63-68.
- [9] Garcia, D.L. (2004). Separation between adjacent nonlinear structures for prevention of seismic pounding. In: *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver B.C, Canada
- [10] Garcia, D.L. (2004). *Separation distance necessary to prevent seismic pounding between adjacent structures*. New York: State University of New York at Buffalo.
- [11] Garcia, D.L. & Soong, T. (2009). Assessment of the separation necessary to prevent seismic pounding between linear structural systems. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 24(2), 210-223.
- [12] Garcia, D.L. & Soong, T. (2009). Evolution of current criteria in predicting the necessary to prevent seismic pounding between nonlinear hysteretic structural systems. *Engineering Structures*, 31(5), 1217-1229.
- [13] Shrestha, B. (2013). Effects of separation distance and nonlinearity on pounding response of adjacent structures. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 3(3), 603.
- [14] Efraimiadou, S. Hatzigeorgiou, G.D. & Beskos, D.E. (2013). Structural pounding between adjacent buildings subjected to strong ground motions. Part I: The effect of different structures arrangement. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 42(10), 1509-1528.
- [15] Shirole, A.B. (2015). Seismic pounding between adjacent building structures. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)*, 2(2), 37.
- [16] Raheem, S.E.A. Fooly, M.Y. Shafy, A.G. Abbas, Y.A. Omar, M. Latif, M. & Mahmoud, S. (2018). Seismic pounding effects on adjacent buildings in series with different alignment configurations. *Steel and Composite Structures*, 28(3), 289-308.
- [17] Abdel Raheem, S.E. Fooly, M.Y. Abdel Shafy, A.G. Taha, A.M. Abbas, Y.A. & Abdel-Latif, M. (2019). Numerical simulation of potential seismic pounding among adjacent buildings in series. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(1), 439-471.
- [18] Qiao-yun, W.U. Tao, W. Min, W. & Hong-ping, Z.H.U. (2019). Study on the critical separation distance of adjacent structures based on seismic pounding fragility. *Engineering Mechanics*, 36(7), 89-98.
- [19] Khatami, S.M. Naderpour, H. Barros, R.C. & Jankowski, R. (2019). Verification of formulas for periods of adjacent buildings used to assess minimum separation gap preventing structural pounding during earthquakes. *Advances in Civil Engineering*, 2019.

- [20] Khatami, S.M. Naderpour, H. Mortezaei, A. Nazem Razavi, S.M. Lasowicz, N. & Jankowski, R. (2021). Effective gap size index for determination of optimum separation distance preventing pounding between buildings during earthquakes. *Applied Sciences*, 11(5), 2322.
- [21] Lin, J.H. (2021). Evaluation of critical separation distance to avoid seismic pounding between buildings: A spectral approach. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(11), 2863-2882.
- [22] Seyyed Kazemi, A. Ghaninia Tabarestani, M. & Esfandyarifard, A. (2011). Investigation of the effect of pounding on torsion and forces created in connections between adjacent buildings during an earthquake. In: *6<sup>th</sup> Iranian National Congress of Civil Engineering*. Semnan, Iran. (In Persian)
- [23] Nik-khoo, A. & Faramarzi, M. (2012). Investigation of minimum separation distance in medium steel bending frame structures by nonlinear time history analysis. *Pajuheshnameh of Seismology & Earthquake Engineering*, 15(3), 47-55. (In Persian)
- [24] Moghabeli, R. (2013). *Investigating the effects of adjacent RC buildings colliding during an earthquake on their seismic performance*. Ms thesis, University of Science and Culture. (In Persian)
- [25] Gerami, M. Vahdani, R. Mollaeian, M. & Khatami, M. (2021). Evaluation of Park-Ang Damage Indicator in collisions of two adjacent frames under the near-fault field disturbances. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(4), 184-198. (In Persian)
- [26] Ahmadi Taleshian, H. Mirza Goltabar Roshan, A. & Vaseghi Amiri, J. (2021). The rule of viscous damper for behavior improvement and pounding mitigation under random seismic input. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(7). (In Persian)
- [27] Amini-Moghaddam, S. & Khodakarami, M. (2021). The adequacy of the separation gap between the adjacent structural frames considering the effects of structure-soil-structure- interaction and using particle swarm optimization algorithm. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(3), 154-168. (In Persian)
- [28] Vaseghi Amiri, J. & naseri, S. (2019). The Effect of strong motion duration on pounding of steel moment frame building. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6(2), 39-56. (In Persian)
- [29] Building and Housing Research Center (BHRC). (2015). *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings: Standard No. 2800-05*, 4th Ed, Iran.
- [30] International Code Council (ICC). (2009). *International Building Code (IBC-2009)*.
- [31] ASCE 7-10. (2005). *Minimum design loads for buildings and other structures*. American Society of Civil Engineers (ASCE).
- [32] The Euro code 8 Regulation. (1998). *Design of structures for earthquake resistance – part 1: general rules, seismic action and rules for buildings*.
- [33] NBCC-2005. (2005). *National Building Code of Canada 2005*. National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC.