



# Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



## 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

Saeideh Amini Moghaddam<sup>1</sup>, Mohammad Iman Khodakarami<sup>2\*</sup>

1- M.Sc. of Earthquake Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Assistant Professor of Earthquake Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

### ABSTRACT

Since, generally, in high population areas and large cities for maximum use of land, buildings are constructed without distances or with insufficient distance, thus, during severe earthquakes, due to unbalanced vibration of the structure Adjacent bodies (which do not have enough distance from one another) and without considering the effects of the soil, the impact phenomenon occurs. The most natural way to avoid impact is to provide sufficient distance between adjacent structures. In the present article, the proposed distance between the standard 2800 Iran between two adjacent structures is also evaluated for the impact of impact phenomena using time histories analysis of structural-soil-structural models. To this end, evaluation of seismic behavior of structures 3, 6, and 12 of 3rd and 5th craters on type I and III soils was performed and for analysis of 6 earthquake records with different earthquake hazard levels Has been used. These structures were modeled in the OpenSees software. Then, to obtain an optimum distance between the structures, the PSO algorithm was used, the code of this algorithm was written in MATLAB software and connected with the OpenSees software. After reaching the convergence condition, the optimum interval was presented and compared with the proposed interval in the standard 2800. The results indicate that the proposed distance in standard 2800 for high-risk earthquakes is not adequate and is not suitable and, given the soil conditions, structures and earthquakes, there is a possibility of collision.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 19 November 2018

**Revise Date:** 12 May 2019

**Accept Date:** 03 July 2019

### Keywords:

Soil-structure-interaction (SSSI)

Separation gap between two adjacent structure

Time history analysis

Particle swarm optimization (PSO)

Special moment resistance frame

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.157919.1713

\*Corresponding author: Mohammad Iman Khodakarami

Email address: khodakarami@semnan.ac.ir

## ارزیابی کفایت فاصله جدایی بین قاب‌های ساختمانی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش

## سازه - خاک - سازه و استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

سعیده امینی مقدم<sup>۱</sup>، محمدایمان خداکرمی<sup>۲\*</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- استادیار مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

## چکیده

از آنجایی که عموماً در مناطق با جمعیت بالا و شهرهای بزرگ جهت استفاده حداکثری از زمین، ساختمان‌ها بدون فاصله و یا با فاصله ناکافی از یکدیگر ساخته می‌شوند، لذا طی زلزله‌های شدید، بر اثر ارتعاش غیر هم‌فاز سازه‌های مجاور (که دارای فاصله کافی از یکدیگر نمی‌باشند) و در نظر نگرفتن اثرات خاک، پدیده ضربه اتفاق می‌افتد. طبیعی‌ترین راه برای جلوگیری از ضربه، تأمین فاصله کافی بین سازه‌های مجاور می‌باشد. در مقاله‌ی حاضر، مقدار فاصله پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ ایران بین دو سازه‌ی مجاور هم برای مقابله با پدیده ضربه با استفاده از آنالیز تاریخچه زمانی مدل‌های سازه-خاک-سازه مورد ارزیابی قرار گرفته است. به این منظور، ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌های ۳، ۶ و ۱۲ طبقه‌ی ۵ دهانه، واقع بر خاک‌های نوع I و III انجام شده و برای تحلیل از ۶ رکورد زمین‌لرزه با سطوح خطر زلزله متفاوت استفاده شده است. این سازه‌ها در نرم‌افزار *OpenSees* مدل‌سازی شدند، سپس برای به دست آوردن فاصله‌ی بهینه‌ی بین سازه‌ها از الگوریتم *PSO* استفاده شد؛ که کد این الگوریتم در نرم‌افزار *MATLAB* نوشته شد و با نرم‌افزار *OpenSees* مرتبط شد و پس از رسیدن به شرط همگرایی، مقدار فاصله‌ی بهینه ارائه شد و با مقدار فاصله‌ی پیشنهاد شده در استاندارد ۲۸۰۰ مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که مقدار فاصله پیشنهاد شده در استاندارد ۲۸۰۰ برای زلزله‌های با سطح خطر بالا کفایت لازم را ندارد و مناسب نمی‌باشد و با توجه به شرایط خاک، سازه‌ها و زلزله امکان برخورد وجود دارد.

کلمات کلیدی: اندرکنش سازه-خاک-سازه (SSSI)، فاصله‌ی بین سازه‌های مجاور، آنالیز تاریخچه زمانی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، قاب خمشی فولادی ویژه

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.157919.1713	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.157919.1713	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	۳۹۸/۰۴/۱۲	۳۹۸/۰۴/۱۲	۱۳۹۸/۰۲/۲۲	۱۳۹۷/۰۸/۲۸
محمدایمان خداکرمی khodakarami@semnan.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

در اغلب موارد جابجایی فونداسیون یک عامل مهم در طراحی سازه‌ای است و یک مدل‌سازی واقع بینانه از آن می‌تواند با ارزش باشد. در واقع می‌توان گفت یک مدل کامل، مدل مرکب از خاک و سازه است. برای تحلیل سازه در حالت کلاسیک فرض می‌شود حرکت اعمال شده بر پایه سازه، مساوی حرکت میدان آزاد زمین است. این فرض در مورد سازه‌های ساخته شده بر سنگ بستر یا زمین سخت صحیح است. برای سازه‌های ساخته شده بر روی خاک نرم، حرکت شالوده عموماً با حرکت میدان آزاد متفاوت خواهد بود. از طرف دیگر پاسخ دینامیکی سازه، باعث تغییر شکل خاک زیر سازه می‌شود. این روند که پاسخ خاک زیر سازه، تحت تأثیر حرکت سازه و پاسخ سازه، تحت تأثیر حرکت لایه خاک قرار می‌گیرد اندرکنش خاک و سازه نامیده می‌شود [۱].

در یک زلزله دو سازه مجاور با فاصله جداساز ناکافی از یکدیگر به دلیل تفاوت در ارتفاع، جرم و سختی شروع به ارتعاشات غیر هم‌فاز نموده که نتیجه آن وقوع برخورد و ضربه زدن دو سازه به یکدیگر خواهد بود. این پدیده تحت عنوان ضربه<sup>۱</sup> شناخته می‌شود [۲]. نتایج تحقیقات گذشته نشان داده‌است که ضربه بین سازه‌ها می‌تواند باعث آسیب در نقاط برخورد و افزایش قابل توجه در پاسخ سازه گردد. آسیب نوع اول ممکن است باعث خسارت‌های موضعی گردد حال آنکه آسیب نوع دوم می‌تواند منجر به تخریب کلی سازه و واژگونی آن گردد. دلیل اصلی برخورد بین ساختمان‌ها معمولاً ارتعاش غیر هم‌فاز آنها می‌باشد که این نوع ارتعاش به دلیل تفاوت در مشخصات دینامیکی ساختمان‌ها پدید می‌آید؛ بعضی از روش‌های پیشنهادی برای کاهش خسارت ناشی از ضربه زدن عبارتند از: قرار دادن فاصله مناسب برای ساختمان‌های مجاور هم تا از ضربه زدن ساختمان‌ها جلوگیری شود، هم‌تراز بودن سقف‌های دو ساختمان مجاور، جاگذاری مصالح جذب کننده انرژی بین دو ساختمان، طراحی ویژه با قرار دادن سیستم‌های مقاوم-عمود بر بار برای اطمینان از عدم خسارت سازه تحت اثر ضربه [۳].

علی‌رغم اهمیتی که اثر اندرکنش خاک و سازه در طراحی بعضی ساختمان‌ها دارد، در آیین‌نامه‌ها دستوراتی برای اعمال آن در فاصله جدایی بین دو سازه وجود ندارد. بنابراین بررسی فاصله جدایی بین دو سازه مجاور بدون لحاظ نمودن اثر خاک منجر به نتایج غیرواقعی خواهد شد.

مطالعات زیادی در زمینه فاصله‌ی بین دو سازه‌ی مجاور انجام شده‌است. آناگنوستوپولس [۴] در سال ۱۹۸۸ با مدل‌سازی سیستم‌های ساختمانی چند درجه آزاد برشی در کنار هم به صورت زنجیروار استفاده کرد. به منظور بررسی اثرات تخریبی ناشی از نیروی ضربه و عوامل مؤثر بر آن از یک سیستم فنر-میراگر جهت مدل‌سازی نیروی ضربه بهره گرفت. عمده نتایج حاصل از تحقیق ایشان، بررسی اثر جرم، پیوند سازه و ارتباط این دو پارامتر در بین دو سازه مجاور هم، موقعیت قرارگیری ساختمان (از این نظر که ساختمان در ابتدای زنجیره ساختمان‌ها قرار گرفته یا در میان آنها)، و عدم برابری سختی و ارتفاع دو ساختمان کنار هم می‌باشد. بروس و خاتمی [۵] با بررسی فاصله بین ساختمان‌ها در آیین‌نامه ایران، نشان دادند که فاصله توصیه شده در این آیین‌نامه نمی‌تواند از برخورد ساختمان‌ها جلوگیری کند و نیاز به بازبینی آن احساس می‌شود. وسترمو [۶] به منظور کاهش خسارت‌های ناشی از نیروی ضربه دو ساختمان برشی مجاور هم را از طریق یک تیر اتصال به همدیگر متصل کرد تا به این طریق پاسخ تغییرمکانی دو ساختمان یکی شود. ایشان به این نتیجه رسید که هرچه ویژگی‌های دینامیکی دو ساختمان مجاور هم نزدیک به هم باشد، وجود تیر اتصال سبب کاهش درز انقطاع مورد نیاز می‌گردد. چنگ<sup>۲</sup> و همکاران [۷] درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان را به کمک روش تفاضل طیفی تعیین کردند. فرض رفتار خطی در تحلیل ایشان در نظر گرفته شده و روش مذکور را با روش تاریخچه زمانی مقایسه کردند. هاو<sup>۳</sup> و شین<sup>۴</sup> [۸] مطالعه‌ای در زمینه تأمین فاصله جدایی کافی بین ساختمان‌های نامتقارن مجاور انجام دادند که به طور کامل مانع نیروی ضربه در طول زمین‌لرزه‌های قوی شود. اثرات پارامترهای مختلفی از قبیل خروج از مرکزیت، سختی پیچشی، نسبت فرکانس ارتعاشی دو سازه روی جابجایی‌های نسبی پیچشی- جانبی بین سازه‌های مجاور

<sup>1</sup> Pounding

<sup>2</sup> Jeng

<sup>3</sup> Hao

<sup>4</sup> Shen

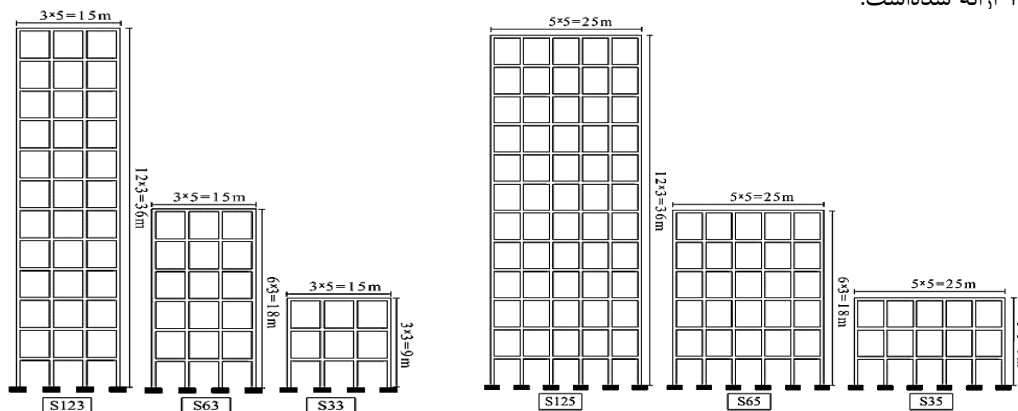
بررسی شد. برای محاسبه‌ی حداکثر جابجایی نسبی، روش ارتعاشات تصادفی استاندارد مورد استفاده قرار گرفت. یانکوفسکی<sup>۵</sup> [۹] مطالعاتی در زمینه‌ی آسیب ناشی از ضربات بین دو ساختمان سه طبقه با خواص دینامیکی بسیار متفاوت و لیز-گارسیا و سونگ [۱۱-۱۰] [تحقیقاتی برای تعیین فاصله جدایی لازم برای جلوگیری از آسیب زلزله در بین سازه‌های خطی و غیرخطی هیسترتیک انجام دادند. پنزی<sup>۶</sup>] [۱۲] مطالعاتی را در زمینه حداقل فاصله مورد نیاز برای جلوگیری از برخورد بین ساختمان‌ها در طی زمین‌لرزه‌های بزرگ برای ساختمان‌های با رفتار خطی و غیرخطی انجام داد. ناصرخاکی<sup>۷</sup> و همکاران [۱۳] مطالعه‌ای در زمینه فاصله جدایی بین سازه‌های مجاور با در نظر گرفتن برخورد و اندرکنش خاک و سازه انجام دادند. آنها دریافتند که وجود خاک پاسخ لرزه‌ای ساختمان را تغییر می‌دهد و سبب افزایش پاسخ لرزه‌ای می‌گردد حتی هنگامی که فاصله جدایی نسبتاً گسترده‌تر باشد.

در این مقاله سه سازه‌ی فولادی با سیستم قاب خمشی ویژه ۳، ۶ و ۱۲ طبقه‌ی ۳ و ۵ دهانه در نرم‌افزار ETABS طراحی شدند و برای مدلسازی این سازه‌ها و دو نوع خاک I و III، نرم‌افزار OpenSees مورد استفاده قرار گرفته‌است و در کل تعداد ۱۸۰ مدل مورد آنالیز قرار گرفته‌است و هم‌چنین الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شده و با مرتبط شدن با نرم‌افزار OpenSees به بررسی تأثیر اندرکنش خاک و سازه روی فاصله‌ی بین دو سازه‌ی مجاور پرداخته شده‌است و نتایج با مقادیر پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه شده‌است.

## ۲- معرفی مدل‌ها

سیستم‌های سازه‌ای انتخاب شده، ساختمان‌های قاب خمشی ویژه ۳، ۶ و ۱۲ طبقه با تعداد دهانه‌های ۳ و ۵ می‌باشند که عرض هر دهانه ۵ متر و ارتفاع تمام طبقات برابر ۳ متر در نظر گرفته شده‌است. این مدل‌ها در نرم‌افزار ETABS و طبق آیین‌نامه طراحی سازه‌های فولادی AISC-ASD و مطابق استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) [۱۴] طراحی شده‌است. طراحی مدل‌ها به صورت سه‌بعدی انجام شده و یک قاب میانی برای مدلسازی در نرم‌افزار OpenSees انتخاب شده‌است. سازه‌ها در پلان به صورت منظم و مربعی در نظر گرفته شده‌است. فونداسیون‌ها به صورت منفرد و صلب در نظر گرفته شده‌است و نوع خاک در طراحی، خاک تیپ III در نظر گرفته شده‌است.

بارهای وارد بر سازه‌ها شامل: بار مرده  $600 \text{ kg/m}^3$ ، بار زنده  $200 \text{ kg/m}^3$  و بار دیوارهای خارجی  $250 \text{ kg/m}^2$  است. فولاد مورد استفاده در این طراحی دارای تنش تسلیم  $24 \times 10^7 \text{ N/m}^2$  و مدول الاستیسیته  $21 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$  است. نمایی شماتیک از سازه‌های طراحی شده در شکل ۱ نشان داده شده‌است. مقاطع تیر و ستون سازه‌ها به صورت سه طبقه سه طبقه تیپ‌بندی شدند که مشخصات مقاطع در جدول ۱ ارائه شده‌است.



شکل ۱: نمای شماتیک قاب‌های مورد آنالیز از سازه‌های طراحی شده

<sup>5</sup> Jankowski

<sup>6</sup> Penzien

<sup>7</sup> Naserkhaki

جدول ۱: مشخصات مقاطع تیر و ستون‌های سازه‌های طراحی شده

مقطع ستون‌ها	مقطع تیرها	طبقات
Box 400×16	W 21×55	۱۰-۱۲
Box 420×30	W 24×62	۷-۹
Box 470×20	W 24×68	۴-۶
Box 550×20	W 24×76	۱-۳

مشخصات دو سازه‌ی مجاور مشابه یکدیگر می‌باشد و زمان تناوب این سازه‌ها در جدول ۲ ارائه شده‌است.

جدول ۲: زمان تناوب سازه‌ها

سازه‌ها	زمان تناوب (sec)
S33	۰/۶۳۱
S35	۰/۶۵۶
S63	۱/۰۵۵
S65	۱/۰۸۵
S123	۱/۷۴۳
S125	۱/۷۶۷

### ۳- مدلسازی خاک

خاک توسط روش اجزا محدود مدلسازی شده و شرایط مرزی در اطراف بدنه خاک مدلسازی شده‌است. مدل خاک و سازه (شکل ۲) شامل المان‌های تیر با مدل المان‌های ساختاری، المان‌های مربعی دوبعدی برای مدل کردن محیط خاک، مرزهای ثابت برای مدل کردن سنگ بستر، مرزهای ویسکوز برای جلوگیری از امواج انعکاسی تولید شده که در این تحقیق از المان‌های zerolength در جهات افقی و عمودی در اطراف خاک استفاده شده‌است. المان‌های خاک به صورت المان‌های مربعی چهار گرهی quad و با ابعاد ۲/۵ متر انتخاب شد. ابعاد خاک در این تحقیق با انجام آنالیز حساسیت ۶۰×۲۵۰ متر در نظر گرفته شده‌است. این مرز جاذب با استفاده از دو میراگر متعامد در هر گره مرزی تشکیل می‌شود، تا بتواند امواج برخوردی در هر جهت را جذب کند. پارامترهای مورد استفاده برای اینگونه مرزها به صورت زیر است:

$$\sigma = a \cdot \rho \cdot V_p \cdot \dot{w} \quad (1)$$

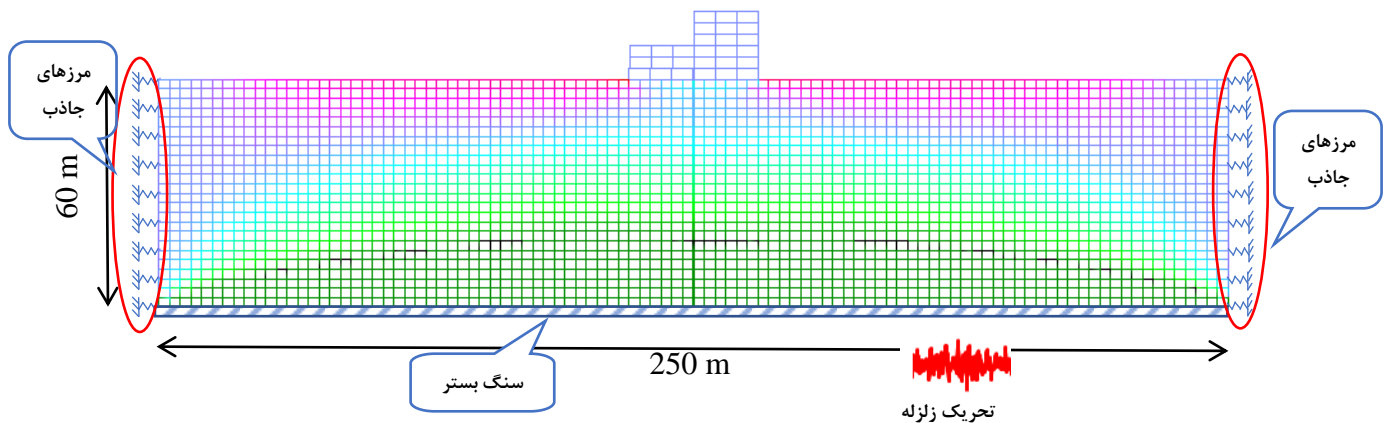
$$\tau = b \cdot \rho \cdot V_s \cdot \dot{u} \quad (2)$$

که در نتیجه دو میراگر با ضرایب میرایی بصورت زیر

$$C_p = a \cdot \rho \cdot V_p \cdot A \quad (3)$$

$$C_s = b \cdot \rho \cdot V_s \cdot A \quad (4)$$

به صورت نرمال و مماسی در مرزها قرار داده می‌شوند. در روابط فوق  $V_p$  و  $V_s$  به ترتیب سرعت موج برشی s و فشاری p بوده و a و b پارامترهای بدون بعد هستند. A سطح مقطع قرار گرفته درحوزه هر میراگر (عرض واحد) بوده و  $\rho$  چگالی محیط و  $\dot{u}$  و  $\dot{w}$  سرعت‌های نرمال و برشی می‌باشند. این مرزها برای مقادیر  $a = b = 1$  بیشترین مقدار جذب انرژی را دارا می‌باشند. در تحلیل دینامیکی برای جلوگیری از انعکاس انرژی امواج برشی از طریق مرزها به داخل هندسه مدل، استفاده از مرزهای جاذب یا میراگرها رایج است [۱۵].



شکل ۲: مدل خاک و سازه

سه مدل ساختاری دو بعدی، متشکل از ۳، ۶ و ۱۲ طبقه روی دو نوع خاک با سرعت‌های موج برشی بیشتر از ۳۰۰ متر بر ثانیه و به نمایندگی از خاک تیپ I و III [۱۶] مدلسازی شده‌اند. ویژگی‌های خاک‌های مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده‌است.

جدول ۳: مشخصات خاک‌های در نظر گرفته شده

نوع خاک	$\xi_g$	E (kN/m <sup>2</sup> )	G (kN/m <sup>2</sup> )	$E_c$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ (kg/m)	$\nu$	$\nu_s$ (m/s)	$\nu_p$ (m/s)
S1	۵	۷,۰۰۰,۰۰۰	۲,۶۹۲,۳۱۰	۹,۴۲۳,۰۷۷	۲۰۰۰	۰/۳۰	۱۱۴۹/۱	۲۱۴۹/۸۹
S3	۵	۵۰۰,۰۰۰	۱۹۲,۳۱۰	۶۷۳,۰۷۷	۱۹۰۰	۰/۳۵	۳۰۹/۲۲	۶۴۳/۶۸

که در آن  $\xi_g$ : میرایی، E: مدول الاستیسیته، G: مدول برشی،  $E_c$ : مدول یانگ،  $\gamma$ : چگالی خاک،  $\nu$ : نسبت پواسون،  $\nu_s$ : سرعت موج برشی،  $\nu_p$ : سرعت موج فشاری

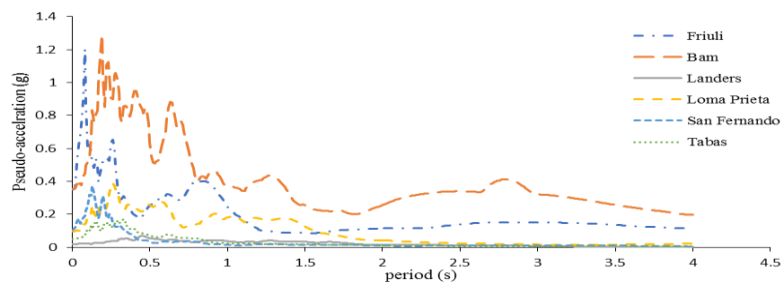
#### ۴- رکوردهای زلزله

برای انجام تحقیق حاضر، ۶ رکورد زمین‌لرزه در سه سطح خطر پایین، متوسط و زیاد (بر اساس FEMA356 [۱۷]) استفاده شده‌است. مشخصات این رکوردهای زلزله در جدول ۴ ارائه شده‌است.

جدول ۴: مشخصات رکوردهای مورد استفاده

نام رکورد زلزله	سال	PGA(g)	بزرگا (R)	مدت زمان موثر (ثانیه)	سطح خطر لرزه‌ای
Tabas	۱۹۷۸	۰/۰۴۷	۷/۳۵	۲۴/۲	کم
Landers	۱۹۹۲	۰/۰۱۷	۷/۲۸	۲۳/۷	کم
Loma Prieta	۱۹۸۹	۰/۰۹	۶/۹۳	۱۳/۰	متوسط
San Fernando	۱۹۷۱	۰/۱	۶/۶۱	۱۱/۳	متوسط
Bam	۲۰۰۳	۰/۳۵	۶/۶	۱۵/۹	زیاد
Friuli	۱۹۷۶	۰/۳۵	۶/۵	۱۰/۴	زیاد

آنالیزهای دینامیکی برای سیستم قاب‌های روی سطح خاک با استفاده از روش مستقیم (پایه انعطاف‌پذیر) انجام شده‌است. تمام رکوردها توسط نرم‌افزار Deepsoil به سنگ بستر انتقال داده شده و به طور مستقیم به ترکیبی از خاک و سازه اعمال شده‌است. طیف شتاب این زمین‌لرزه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده‌است.



شکل ۳: طیف پاسخ زمین‌لرزه‌های مورد استفاده (اعمال شده به سنگ بستر)

## ۵- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۸</sup>

روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) در اواسط دهه ۱۹۹۰ توسط کندی و ابرهات اختراع گردید. در این روش، حرکت گروه پرندگان به عنوان بخشی از مطالعه اجتماعی شناختی که به پژوهش در مورد تصور هوش جمعی در جوامع زیستی می‌پردازد، شبیه‌سازی می‌گردد. در روش PSO، مجموعه راه‌حل‌های تصادفی انتخاب شده (گروه اولیه) در فضای طراحی در جهت رسیدن به راه‌حل بهینه در میان تعدادی تکرار (حرکت) بر اساس مقدار زیاد اطلاعات موجود در مورد فضای طراحی منتشر می‌شود که با هم تلفیق شده و کلیه اعضای گروه از آن بهره می‌برند. روش PSO از توانایی دسته‌های پرندگان، دسته ماهی‌ها و گله جانوران برای سازش با محیط، یافتن منابع سرشار غذایی و دوری از شکارچیان (صیادان) با اجرای شیوه تقسیم اطلاعات الهام گرفته و یک حسن تکاملی دارا می‌باشد. در الگوریتم PSO، تعدادی از موجودات وجود دارند، که به آن‌ها ذره گفته می‌شود و در فضای جستجوی تابعی که قصد کمینه کردن و (یا بهینه کردن) مقدار آن را داریم، پخش شده‌اند. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته‌است، محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی‌اش و بهترین محلی که در گذشته در آن بوده‌است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند. همه‌ی ذرات جهتی برای حرکت انتخاب می‌کنند و پس از انجام حرکت، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا آن‌که جواب موردنظر به دست بیاید. در واقع انبوه ذرات که مقدار کمینه‌ی یک تابع را جستجو می‌کنند، همانند دسته‌ای از پرندگان عمل می‌کنند که به دنبال غذا می‌گردند [۱۸-۲۲].

هر ذره در الگوریتم PSO از سه بردار  $d$  بُعدی تشکیل شده‌است که  $d$  بُعد فضای جستجو می‌باشد. برای ذره‌ی  $i$ ام این سه بردار عبارتند از:  $x^i$  موقعیت فعلی ذره،  $V^i$  سرعت حرکت ذره و  $x^{i,best}$  بهترین موقعیتی که ذره تا به حال تجربه کرده‌است.  $x^i$  مجموعه‌ای از مختصات است که موقعیت فعلی ذره را نمایش می‌دهد. در هر مرحله‌ای که الگوریتم تکرار می‌شود،  $x^i$  به عنوان یک جواب برای مسئله محاسبه می‌شود. اگر این موقعیت بهتر از جواب‌های پیشین باشد در  $x^{i,best}$  ذخیره می‌شود.  $f^i$  مقدار تابع هدف در  $x^i$  و  $f^{i,best}$  مقدار تابع هدف در  $x^{i,best}$  است که هر دو از عناصر تشکیل دهنده‌ی هر ذره به حساب می‌آیند. ذخیره کردن مقدار  $f^{i,best}$  برای انجام مقایسه‌های بعدی، ضروری است. اما ذخیره کردن مقدار  $f^i$  ضروری نمی‌باشد. در هر تکرار  $x^i$  و  $V^i$  جدیدی به دست می‌آیند و منظور از اجرای الگوریتم، بهتر کردن  $x^{i,best}$  و به احتمال  $x^i$  است.

در مرحله‌ی ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌های تصادفی ایجاد می‌شوند. در طی اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در هر مرحله‌ی  $t+1$ ام از الگوریتم، از روی اطلاعات مرحله‌ی قبلی ساخته می‌شوند. موقعیت هر ذره در فضای جستجو بر اساس بهترین موقعیت به دست آورده شده توسط خودش ( $pbest$ ) و بهترین موقعیت دستیابی شده توسط همسایگی‌اش ( $gbest$ ) در طی فرآیند جستجو تعیین می‌گردد. در هر تکرار، هر ذره موقعیت و سرعت خود را به صورت زیر به روز رسانی می‌کند:

$$v_j^i[t+1] = wv_j^i[t] + c_1r_1(x_j^{i,best}[t] - x_j^i[t]) + c_2r_2(x_j^{gbest}[t] - x_j^i[t]) \quad (5)$$

<sup>8</sup> Particle Swarm Optimization (PSO)

$$x_j^i[t + 1] = x_j^i[t] + v_j^i[t + 1] \quad (6)$$

در این روابط،  $w$  ضریب اینرسی،  $r_1$  و  $r_2$  اعدادی تصادفی در بازه  $[0, 1]$  با توزیع یکنواخت و هم چنین  $c_1$  و  $c_2$  ضرایب دیگری هستند.  $r_1$  و  $r_2$  باعث می شوند که نوع گوناگونی در جوابها به وجود بیاید و به این نحو جستجوی کاملی روی فضا انجام پذیرد. کد مربوط به الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات در نرم افزار MATLAB نوشته شد و شرط توقف در این الگوریتم برای حالتی که مقدار تابع هدف به کوچکتر از  $0.01$  متر برسد، تعیین شد. که تابع هدف به فرم زیر تعریف شده است:

$$\text{Cost function} = \min (\text{space} - (\text{nodebam1} - \text{nodebam2})) \quad (7)$$

که در آن:

space: فاصله ی بین دو سازه

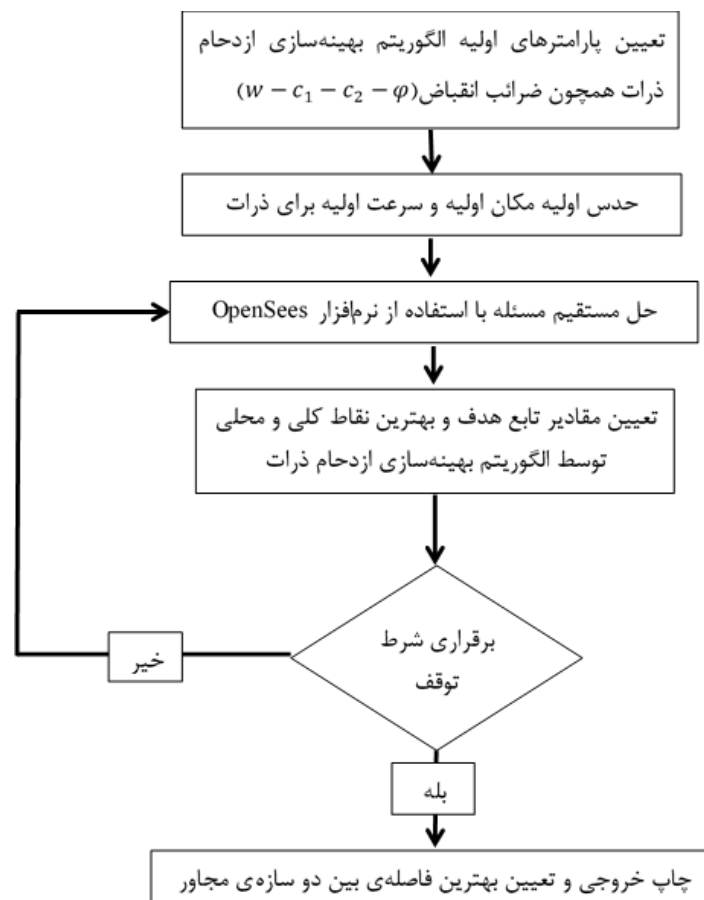
nodebam1: جابجایی بام یا طبقه ی هم تراز با بام سازه ی کوتاه تر از سازه ی مینا

nodebam2: جابجایی بام یا طبقه ی هم تراز با بام سازه ی کوتاه تر از سازه ی دوم

بیان ریاضی این مسئله ی بهینه سازی در ذیل ارائه شده است:

Minimize space  
Subject to Cost function  $\leq 0.01$   
And  $\Delta \text{space} \leq 0$

فلوچارت این الگوریتم نیز در شکل ۴ نشان داده شده است.

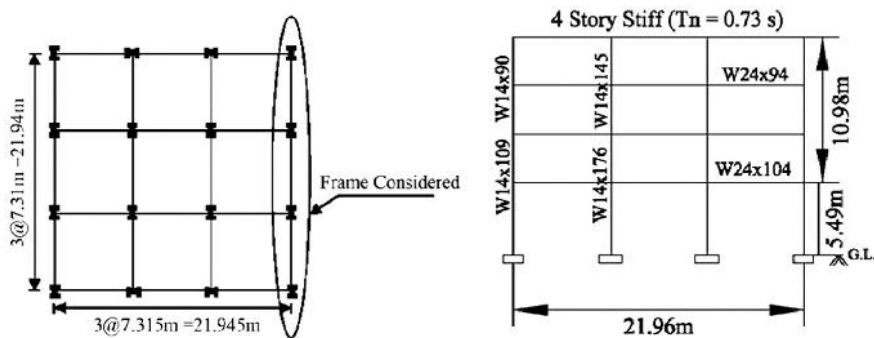


شکل ۴: فلوچارت الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات



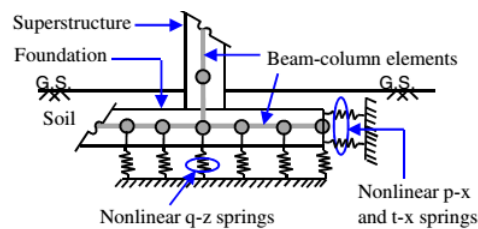
## ۶- صحت سنجی

برای صحت سنجی مدل سازی انجام شده در نرم افزار OpenSees از مقاله‌ی ری چودهاری<sup>۹</sup> و چادهاری<sup>۱۰</sup> [۲۳] استفاده شد. سازه‌ی مورد استفاده در این مقاله، یک قاب خمشی ویژه‌ی ۴ طبقه است که ابعاد آن و مشخصات المان‌های تیر و ستون‌های این قاب در شکل ۵ ارائه شده است.

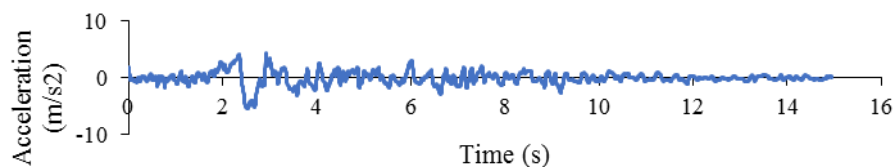


شکل ۵: مشخصات قاب‌های در نظر گرفته شده [۲۳]

در این مقاله رفتار خاک و سازه غیرخطی است و از روش زیرسازه استفاده شده و خاک زیر سازه با المان‌های فنر غیرخطی مدل سازی شده‌اند و شکل کلی این مدل سازی در شکل ۶ و رکورد زمین لرزه‌ای که به این مدل اعمال شده در شکل ۷ ارائه شده است؛ که خاک مورد استفاده از نوع تیپ III بوده، چگالی خاک  $18 \text{ KN/m}^3$ ، زاویه اصطکاک  $36^\circ$ ، نسبت پواسون  $0.35$  و مدول برشی  $50 \text{ MN/m}^2$  است.



شکل ۶: مدل سازی خاک و سازه [۲۳]

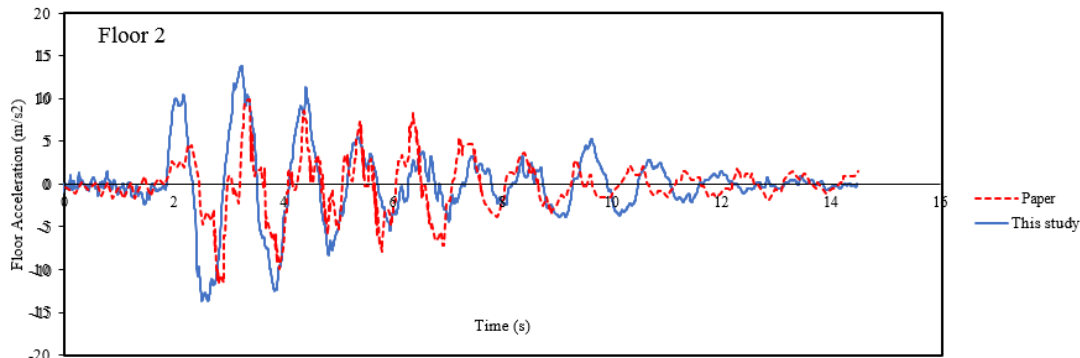


شکل ۷: رکورد زمین لرزه‌ی اعمال شده به مدل صحت سنجی

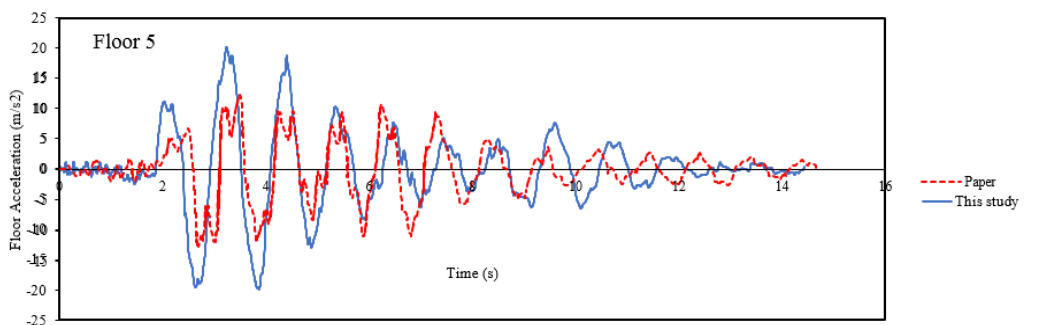
طبق نمودارهای داده شده در مقاله که نمودارهای شتاب طبقه‌ی دوم و چهارم هستند، شتاب‌های این طبقات از نرم افزار OpenSees استخراج شده و نمودارهای آنها در نرم افزار Excel ترسیم شده و با نمودارهای موجود در مقاله مقایسه شدند که این نمودارها در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است.

<sup>9</sup> Raychowdhury

<sup>10</sup> Chaudhuri



شکل ۸: نمودار شتاب بر حسب زمان طبقه‌ی دوم



شکل ۹: نمودار شتاب بر حسب زمان طبقه‌ی چهارم

طبق نمودارهای ارائه شده در اشکال فوق، ملاحظه می‌گردد که نتایج ارائه شده در مقاله مرجع و نتایج حاصل از مدلسازی در این تحقیق انطباق خوبی با هم دارند.

## ۷- تحلیل مدل‌ها و بررسی نتایج

با استفاده از روش مدلسازی بیان شده، در مجموع تعداد ۱۸۰ مدل مورد آنالیز قرار گرفته‌است و دو سازه با فاصله‌ی پیشنهاد شده توسط استاندارد ۲۸۰۰ در کنار یکدیگر قرار گرفته و برای بررسی کفایت این فاصله‌ی پیشنهادی مدلسازی شده‌است و در جداول ۶ تا ۱۰ ارائه شده‌است. با توجه به اینکه احتمال برخورد سازه‌های مشابه در نظر گرفته نشده، مقادیر مربوط به سازه‌های مجاور یکسان در این جداول ذکر نگردیده‌است. در این تحقیق اثرات خاک در نظر گرفته شده‌است، در صورتی که فاصله‌ای که استاندارد ۲۸۰۰ برای دو سازه‌ی مجاور ارائه می‌دهد (جدول ۵) بدون در نظر گرفتن این اثرات است و جابجایی‌های بزرگی که توسط خاک اتفاق می‌افتد را در نظر نمی‌گیرد. در این قسمت به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف روی این فاصله، از جمله: تغییر نوع خاک، تغییر سطح خطر زمین‌لرزه‌ها، تغییر ارتفاع سازه‌ها، تعداد دهانه‌های سازه‌ها و ... پرداخته شده‌است.

جدول ۵: مقدار فاصله پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰

سازه	مقدار فاصله پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ (متر)
۳ طبقه	۰/۰۹
۶ طبقه	۰/۱۸
۱۲ طبقه	۱/۰۲

نامگذاری سازه‌ها به صورت Sij انجام گرفت که در این نامگذاری S نماینده‌ی Structure است، i نماینده‌ی تعداد طبقات سازه است که اعداد ۳، ۶ و ۱۲ هستند، j نماینده‌ی تعداد دهانه‌های سازه است که اعداد ۳ و ۵ هستند.

جدول ۶: بررسی کفایت فاصله جدایی بین سازه‌ها در استاندارد ۲۸۰۰ برای سازه‌ی S33

سازه مجاور					زمین لرزه	خاک	سازه اصلی
S125	S123	S65	S63	S35			
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Tabas	S1	S33
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Landers		
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Loma Prieta		
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	San Fernando		
عدم کفایت	عدم کفایت	عدم کفایت	عدم کفایت	کفایت	Bam		
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Friuli		
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Tabas	S3	
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Landers		
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Loma Prieta		
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	San Fernando		
عدم کفایت	عدم کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Bam		
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Friuli		

در این جداول کلمه‌ی کفایت بدین معناست که مقدار فاصله جدایی پیشنهاد شده در استاندارد ۲۸۰۰ (بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه) با توجه به فاصله‌ی به دست آمده در این تحقیق (با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه) مناسب است و برخوردی بین دوسازه صورت نمی‌گیرد و کلمه‌ی عدم کفایت بدین معناست که مقدار فاصله جدایی پیشنهاد شده در استاندارد ۲۸۰۰ مناسب نیست و برخورد بین دو سازه اتفاق می‌افتد.

در جدول ۶ زمین‌لرزه‌ها از سطح خطر کم به سطح خطر زیاد مرتب شده‌اند و کفایت یا عدم کفایت فاصله‌ی پیشنهاد شده در استاندارد ۲۸۰۰، در این جدول ارائه شده‌است. همان‌طور که در نتایج قرار گرفتن سازه S33 در مقابل سازه S35 که روی خاک نرم و سخت قرار دارند، مشاهده می‌شود که فاصله‌ی پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ برای این سازه‌ها کفایت می‌کند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دو سازه هیچگونه برخوردی با یکدیگر نداشته‌اند.

از مقایسه نتایج قرار گرفتن سازه‌ی S33 در مقابل سازه‌های S63 و S65 و همچنین قرار گرفتن در مقابل سازه‌های S123 و S125 که تحت زمین‌لرزه‌های با سطح خطر بالا قرار گرفته‌اند، مشاهده می‌شود که فاصله‌ی پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ برای این سازه‌ها و زمین-لرزه‌های با سطح خطر بالا کفایت نمی‌کند؛ که این مسئله در جدول ۷ هم مشاهده می‌شود.

طبق جدول ۵ مقدار فاصله‌ی پیشنهاد شده در استاندارد ۲۸۰۰ برای سازه‌ی ۱۲ طبقه در مقابل ۶ طبقه، ۰/۱۸ متر است؛ ولی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که این فاصله فقط برای سازه‌های ۱۲ طبقه در مقابل ۶ طبقه‌ای مناسب است که روی خاک S1 قرار داشته باشند و هم چنین برای سازه‌های قرار گرفته روی خاک S3 با زمین‌لرزه‌های با سطح خطر کم و متوسط مناسب است ولی برای زمین‌لرزه‌های با سطح خطر بالا کفایت نمی‌کند که این نتیجه در جدول ۱۰ نیز مشاهده می‌شود.

جدول ۷: بررسی کفایت فاصله جدایی بین سازه‌ها در استاندارد ۲۸۰۰ برای سازه‌ی S35

سازه مجاور				زمین لرزه	خاک	سازه اصلی
S125	S123	S65	S63			
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Tabas	S1	S35
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Landers		
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Loma Prieta		
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	San Fernando		
عدم کفایت	عدم کفایت	عدم کفایت	عدم کفایت	Bam		
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Friuli		
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Tabas	S3	
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Landers		
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Loma Prieta		
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	San Fernando		
عدم کفایت	عدم کفایت	کفایت	کفایت	Bam		
کفایت	کفایت	کفایت	کفایت	Friuli		

جدول ۸: بررسی کفایت فاصله جدایی بین سازه‌ها در استاندارد ۲۸۰۰ برای سازه‌ی S63 در مقابل سازه S65

سازه مجاور		زمین لرزه	خاک	سازه اصلی
S65	S63			
کفایت	کفایت	Tabas	S1	S63
کفایت	کفایت	Landers		
کفایت	کفایت	Loma Prieta		
کفایت	کفایت	San Fernando		
کفایت	کفایت	Bam		
کفایت	کفایت	Friuli		
کفایت	کفایت	Tabas	S3	
کفایت	کفایت	Landers		
کفایت	کفایت	Loma Prieta		
کفایت	کفایت	San Fernando		
کفایت	کفایت	Bam		
کفایت	کفایت	Friuli		

جدول ۹: بررسی کفایت فاصله جدایی بین سازه‌ها در استاندارد ۲۸۰۰ برای سازه‌ی S123

سازه مجاور			زمین لرزه	خاک	سازه اصلی
S125	S65	S63			
کفایت	کفایت	کفایت	Tabas	S1	S123
کفایت	کفایت	کفایت	Landers		
کفایت	کفایت	کفایت	Loma Prieta		
کفایت	کفایت	کفایت	San Fernando		
کفایت	کفایت	کفایت	Bam		
کفایت	کفایت	کفایت	Friuli		
کفایت	کفایت	کفایت	Tabas	S3	
کفایت	کفایت	کفایت	Landers		
کفایت	کفایت	کفایت	Loma Prieta		
کفایت	کفایت	کفایت	San Fernando		
کفایت	عدم کفایت	عدم کفایت	Bam		
کفایت	کفایت	عدم کفایت	Friuli		

از نتایج به دست آمده برای سازه‌ی S123 در مقابل سازه S125 مشاهده می‌شود که مقدار فاصله‌ی پیشنهاد شده در استاندارد ۲۸۰۰ برای این سازه‌ها کفایت می‌کند.

جدول ۱۰: بررسی کفایت فاصله جدایی بین سازه‌ها در استاندارد ۲۸۰۰ برای سازه‌ی S125

سازه مجاور		زمین لرزه	خاک	سازه اصلی
S65	S63			
کفایت	کفایت	Tabas	S1	S125
کفایت	کفایت	Landers		
کفایت	کفایت	Loma Prieta		
کفایت	کفایت	San Fernando		
کفایت	کفایت	Bam		
کفایت	کفایت	Friuli		
کفایت	کفایت	Tabas	S3	
کفایت	کفایت	Landers		
کفایت	کفایت	Loma Prieta		
کفایت	کفایت	San Fernando		
عدم کفایت	عدم کفایت	Bam		
کفایت	عدم کفایت	Friuli		

## ۸- نتیجه گیری

در این مقاله سه سازه‌ی فولادی با سیستم قاب خمشی ویژه ۳، ۶ و ۱۲ طبقه‌ی ۳ و ۵ دهانه در نرم افزار ETABS طراحی شدند و برای مدلسازی این سازه‌ها و دو نوع خاک I و III، نرم افزار OpenSees مورد استفاده قرار گرفته است و در کل تعداد ۱۸۰ مدل مورد آنالیز قرار گرفته است و فاصله بهینه تا ساختمان مجاور بر اساس الگوریتم ازدحام ذرات با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه محاسبه و با استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه شده است. در این مقاله اثرات خاک در نظر گرفته شده، در صورتی که فاصله‌ای که استاندارد ۲۸۰۰ برای دو سازه‌ی مجاور ارائه می‌دهد بدون در نظر گرفتن این اثرات است و جابجایی‌های بزرگی که توسط خاک اتفاق می‌افتد را در نظر نمی‌گیرد. نتایج حاصل را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- فاصله پیشنهاد شده برای دو سازه‌ی مجاور، توسط استاندارد ۲۸۰۰ برای زلزله‌های سطح خطر کم و متوسط کفایت لازم را داراست و دو سازه‌ی مجاور با هم برخورد نخواهند داشت اما برای زلزله‌های سطح خطر بالا کفایت لازم را ندارد و دو سازه‌ی مجاور با هم برخورد خواهند داشت.
- در زمین لرزه‌های با سطح خطر کم در تمامی سازه‌ها برخوردی اتفاق نمی‌افتد که بیانگر کفایت لازم فاصله‌ی پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ است.

## مراجع

- [1] Yousefi Nejad, Mohammad. (2010). Investigating the effect of soil and structure interaction on the rigidity of seismic response of steel with linear and nonlinear analysis of time history. Tarbiat Moalem University of Tehran.
- [2] Davis. R.O. (1992). Pounding of Buildings Modeled by an Impact Oscillator. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 21. pp. 253-274.
- [3] Nikkhoo, Ali. and Faramarzi, Majid. (2012). Investigation of Minimum Cutting Leak in Fixed Steel Frame Structures by Nonlinear Chronological Time Analysis. Seismology Research Journal and Earthquake Engineering. 15<sup>th</sup> Year. No. 3. Autumn 91.
- [4] Anagnostopoulos, Stavros. (1988). Pounding of buildings in series during earthquakes. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 16, 443-456.
- [5] Barros, Rui Carneiro. and Khatami, Seyed Mohammad. (2012) Importance of separation distance on building pounding under near-fault ground motion, using the Iranian Earthquake Code. 9<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran.
- [6] Westermo, Bruce. (1989). The dynamics of interstructural connection to prevent pounding. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 687-699.
- [7] Jeng, Van. Kasai, Kazuhiko. and Maison, Bruce F. (1992). A spectral difference method to estimate building separations to avoid pounding. Earthquake Spectra, 8, 201-223.
- [8] Hao, Hong. and Shen, Jay. (2001). Estimation of relative displacement of two adjacent asymmetric structures. Earthquake engineering & structural dynamics, 30(1): 81-96.
- [9] Jankowski, Robert. (2008). Earthquake-induced pounding between equal heights buildings with substantially different dynamic properties. Engineering Structures, 30, 2818-2829.
- [10] Lopez-Garcia, Diego. and Soong, T.T. (2009). Assessment of the separation necessary to prevent seismic pounding between linear structural systems. Probabilistic Engineering Mechanics, 24, 210-223.
- [11] Lopez-Garcia, Diego. and Soong, T.T. (2009). Evolution of current criteria in predicting the necessary to prevent seismic pounding between nonlinear hysteretic structural systems. Engineering Structures, 31, 1217-1229.
- [12] Penzien, Joseph. (1997). Evaluation of building separation distance required to prevent pounding during strong earthquakes. Earthquake engineering & structural dynamics, 26(8): 849-858.

- [13] Naserkhaki, Sadegh. and El-Rich, Marwan. and Abdul Aziz, Farah N.A. and Pourmohammad, Hassan. (2013). Separation Gap, A critical factor in earthquake induced pounding between adjacent buildings. *ASIAN Journal of Civil Engineering (BHRC)*, **14**(6): 881-898.
- [14] Building and Housing Research Center. (2005). *Design of Buildings against Earthquake. Standard 2800. Fourth Edition of Tehran.*
- [15] Jamali Moghaddam, Mohammad. and Hajiannya, Alborz. and Moeidi, Hossein. and Nazem, Ramin, (2016). Application of Boundary Bounds in Geotechnical Engineering. 3<sup>th</sup> International Conference on New Research Achievements in Civil Engineering, Architecture and Urban Management. Tehran. International Federation of Inventors of the World (IFIA). Applied Scientific University.
- [16] Livaoglu, Ramazan. (2008). Investigation of seismic behavior of fluid–rectangular tank–soil/foundation systems in frequency domain. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28**(2): 132-146.
- [17] FEMA-356. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Report FEMA-356. Washington (DC): Federal Emergency Management Agency.*
- [18] Olariu, Stephan and Zomaya, Albert. (2006). *Handbook of Bioinspired Algorithms and Applications. Taylor & FrancisGroup, LLC Press.*
- [19] Glover, Fred. and Kochenberger, Gary. (2003). *Hanbook of Metaheuristics. Kluwer Academic Publishers.*
- [20] Siarry, Patrick. (2006). *Metaheuristics for Hard Optimizations. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.*
- [21] Hoorfar, Ahmad. (2007). Evolutionary Programming in Electromagnetic Optimization, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol 55, no. 3.
- [22] Qing, Anyong. (2003). Electromagnetic Inverse Scattering of Multiple Two-Dimensional Perfectly Conducting Objects by the Differential Evolution Strategy, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol 51, no. 6.
- [23] Raychowdhury, Prishati. and Ray-Chaudhuri, Samit. (2015). Seismic response of nonstructural components supported by a 4-story SMRF: Effect of nonlinear soil–structure interaction. *Structures, Elsevier.*