

## نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

### اثر مدلسازی اتصالات تیر - ستون و خاک بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی متوسط

حامد رحمن شکرگزار<sup>۱\*</sup>، مریم زارع آقبلاغ<sup>۲</sup>، احمدعلی خدائی اردبیلی<sup>۳</sup>

۱-استادیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲-کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳-دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

#### چکیده

اندرکنش خاک - سازه اختلاف موجود در پاسخ های سازه را در شرایط واقعی و تئوری با فرض تکیه گاه صلب بیان می کند و به مشخصاتی همچون سختی، جرم و میرایی خاک و سازه بستگی دارد. ساختمانهای دارای قاب خمشی از جمله سیستمهای سازه ای هستند که امروزه از فراوانی نسبتا بالایی برخوردار هستند. در این نوع قابها شکل پذیری توسط عواملی همچون تسلیم خمشی تیرها، ستونها و تسلیم برشی چشمه اتصال ستون حاصل می گردد. در این مقاله، تاثیر مدلسازی اتصالات تیر - ستون و اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه بر پاسخ لرزه ای ساختمانهای ۱۰ طبقه با سیستم سازه ای قاب خمشی فولادی متوسط واقع بر خاک نوع IV دارای سرعتهای موج برشی ۱۵۰ و ۸۰ متر بر ثانیه و خاک نوع II با سرعت موج برشی ۵۶۰ متر بر ثانیه ارزیابی شده است. اتصالات بکار رفته برای این ساختمانها از نوع اتصالات از پیش تایید شده ی جوشی به کمک ورقهای روسری و زیرسری (WFP) هستند. به منظور بررسی عملکرد این ساختمانها، مدل‌های اجزای محدود دو بعدی با فرض لحاظ اثر خاک و اتصالات، لحاظ اثر خاک و عدم لحاظ اثر اتصالات، تکیه گاه صلب و بدون لحاظ اثر اتصالات توسط نرم افزار OpenSees ساخته شده اند. این مدلها تحت تحلیلهای دینامیکی تاریخچه ی زمانی غیرخطی قرار گرفته و حداکثر پاسخ آنها با یکدیگر مقایسه گردیده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که در مدل‌های واقع بر خاک نوع IV، لحاظ اثر خاک و اتصالات و یا فقط اثر خاک، منجر به افزایش حداکثر تغییرمکان جانبی و حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقه ای نسبت به مدل‌های بدون لحاظ آنها و در مدل‌های واقع بر خاک نوع II منجر به کاهش برخی از این پاسخها می گردد. در کلیه ی مدلها، لحاظ این دو عامل باعث کاهش حداکثر برش پایه می شود.

کلمات کلیدی: قاب خمشی فولادی متوسط، اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه، اتصالات از پیش تأیید شده، OpenSees، تحلیل

دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیر خطی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2018.95059.1286	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.95059.1286	۱۳۹۸/۰۶/۰۱	۱۳۹۶/۱۱/۰۷	۱۳۹۶/۱۱/۰۷	۱۳۹۶/۱۰/۱۵	۱۳۹۶/۰۵/۱۹
حامد رحمن شکرگزار			*نویسنده مسئول:		
h_rshokgozar@uma.ac.ir			پست الکترونیکی:		

# The Effect of Beam-Column Connections and Soil on the Seismic Behavior of Intermediate Steel Moment-Resisting Frames

Hamed Rahman Shokrgozar<sup>1\*</sup>, Maryam Zare Aghblagh<sup>2</sup>, Ahmad Ali Khodaie Ardabili

1- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh ardabili, Ardabil, Iran

2- M.Sc. in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh ardabili, Ardabil, Iran

3- Ph.D Student in Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

## ABSTRACT

Soil-structure interaction expresses the difference of structural responses between the actual and theoretical rigid based conditions, and depends on the stiffness, mass and damping of soil and structure systems. Nowadays, moment-resisting frame is one the most applied structural systems. Ductility of these frames is due to the flexural yielding of beams, columns and the shear yielding of panel zone of columns. The influence of modeling beam-column connections and soil-foundation-structure interaction on the seismic responses of 10-story intermediate steel moment-resisting frames that located on the soil type IV with various shear wave velocities (150 and 80 m/s) and soil type II (with shear wave velocities 56 m/s) is studied in this paper. Prequalified welded flange plate connections (WFP) are used in these buildings. For this purpose, several 2D finite element models are developed using OpenSees software by assuming three conditions such as models with considering soil and beam-column connections effects, models with considering soil and without connections, models with fixed based and without considering connections. The maximum responses of the studied frames are calculated and compared with nonlinear time-history dynamic analyses. The numerical results show that in the models located on soil type IV, considered connections, SFSI, or just soil, the maximum lateral displacement and maximum inter-story drift are more, compare to models without connections and with fixed based conditions. In the models rested on soil type II, some of these parameters are reduced. The maximum base shear of structures is reduced in the mentioned models.

## ARTICLE INFO

Received: 10/08/2017

Revised: 05/01/2018

Accepted: 27/01/2018

### Keywords:

Intermediate moment-resisting frames, Soil-foundation-structure interaction, Prequalified connections, OpenSees, Nonlinear time-history dynamic analysis.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.95059.1286

\*Corresponding author: Hamed Rahman Shokrgozar

Email address: h\_rshokrgozar@uma.ac.ir

## ۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین مراحل طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، تخمین صحیح حرکت زمین در محل ساخت سازه می‌باشد. با لحاظ اثر اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه در سازه‌های واقع بر خاک نرم یا نسبتاً نرم، رفتار غیرخطی زمین منجر به پاسخی از سازه می‌گردد که می‌تواند کاملاً متفاوت از پاسخ یک سازه با پای صلب و فقط تحت اثر حرکت میدان آزاد زمین باشد. اثر وضعیت خاک محل بر حرکت لرزه‌ای، پارامتر مهمی در تحلیل اندرکنش خاک - سازه به شمار می‌رود. وجود خاک، محتوای فرکانسی دامنه‌ی حرکت زمین را تغییر می‌دهد. گسیختگی گسل باعث آزاد شدن انرژی در محیط سنگی بسیار سخت با فرکانس بالا می‌شود که در نهایت منجر به یک حرکت با فرکانس بالا می‌گردد. این حرکت با فرکانس بالا هنگام عبور از لایه‌های خاک که نسبت به سنگ نرم‌تر بوده و دارای فرکانس پایین می‌باشد، فیلتر می‌شود. چرا که لایه‌های خاک همانند سیستم یک درجه آزادی به فرکانس طبیعی خودشان حساس بوده و فرکانس‌های دیگر باعث تحریک چندانی در آن‌ها نمی‌شود. در نتیجه فرکانس‌های پایین را عبور داده و فرکانس‌های بالا را منتقل نمی‌کنند. این روند از هر لایه به لایه‌ی دیگر ادامه پیدا کرده و در نهایت فرکانس‌های بالای حرکت زمین فیلتر شده و فرکانس‌های پایین‌تر زلزله به سازه می‌رسد. در این حالت اثر سازه در پاسخ محل به دو صورت خود را نشان می‌دهد، انعکاس موج و انکسار موج، که به شرح ذیل بیان می‌گردد:

۱- انعکاس موج: هنگامی که موج از یک محیط نرم به محیط صلب (فونداسیون ساختمان) می‌رسد، منعکس می‌شود.

۲- انکسار موج: هنگامی که موج از یک محیط نرم به محیط نرم دیگر می‌رسد، انکسار پیدا می‌کند. به عنوان مثال اگر مشخصات دینامیکی خاک و سازه یکسان باشد یا خیلی نزدیک هم باشد، عمده موج وارد سازه شده و باعث ارتعاش سازه می‌گردد.

اگر محتوای فرکانسی ورودی، نزدیک به فرکانس‌های طبیعی محل باشد، خاک زیر فونداسیون باعث تشدید امواج زلزله می‌شود و در صورتی که محدوده‌ی فرکانسی سازه با خاک زیر فونداسیون یکی باشد یا خیلی نزدیک به هم باشد، امواجی که وارد سازه می‌شوند یک بار دیگر توسط خود سازه تشدید می‌شود که به این فعل و انفعال پدیده‌ی تشدید مضاعف گفته می‌شود. پدیده‌ی تشدید مضاعف سبب بروز خسارت جدی در سازه می‌شود. اثر اندرکنش خاک - سازه در تحلیل خسارت سازه‌های ساخته شده بر روی خاک نرم بسیار مهم است و به دلیل افزایش تغییر مکان‌های جانبی سازه، تأثیر بسزایی در عملکرد سازه‌های حساس دارد و یکی از پارامترهای مهم در طراحی بر اساس عملکرد به شمار می‌رود [۱]. اندرکنش خاک - سازه را می‌توان به صورت عامل تغییر حرکت آزاد زمین توسط سازه و خاک اطراف فونداسیون دانست که در مقایسه با حالتی که فونداسیون صلب فرض می‌شود، دارای اثرات زیر می‌باشد:

۱- شکل مودها و فرکانس‌های سازه را تغییر می‌دهد.

۲- قسمت اعظم انرژی ارتعاشی، توسط میرایی هندسی یا تشعشعی<sup>۱</sup> و میرایی داخلی یا مصالح<sup>۲</sup> مربوط به خاک اطراف فونداسیون، زائل می‌گردد.

تأثیر پدیده‌ی اندرکنش بر روی واکنش سازه در مقایسه با واکنش سازه واقع بر تکیه‌گاه صلب، بسته به خصوصیات سازه و خاک، ممکن است به صورت کاهش یا افزایش و تقویت کننده باشد. موارد اشاره شده در فوق نشانگر این واقعیت است که بررسی و تعیین رفتار سازه در مقابل زلزله با صرف نظر نمودن از پدیده‌ی اندرکنش خاک - سازه، کاری بی نتیجه است و باعث تخمین غیرمحافظة کارانه از تقاضای لرزه‌ای ساختمان‌ها گردیده و سبب فروریزش آن‌ها می‌شود. لذا در چند سال اخیر مطالعه و تحقیق در این مورد بسیار گسترش پیدا کرده و نتایج چشم‌گیری نیز حاصل شده است. هاردن و هوتچین سان [۲]، از مدل تیر بر روی بستر غیرخطی وینکلر، جهت مدلسازی فونداسیون-های سطحی که دارای حرکت گهواره‌ای بودند، استفاده نمودند. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که حرکت گهواره‌ای تحت تحریکات لرزه‌ای نقش بسیار مهمی در بدست آوردن پاسخ‌های سازه‌ای دارد. رایچودهوری و هوتچین سان [۳]، حساسیت پاسخ فونداسیون سطحی را نسبت به پارامترهای ورودی مدل مورد بررسی قرار دادند. تحلیل‌های انجام یافته نشان دهنده‌ی این بود که در بین پارامترهای ورودی خاک، زاویه‌ی اصطکاکی خاک تأثیر قابل توجهی در بدست آوردن تقاضای نیرو و جابجایی فونداسیون دارد. علاوه بر این، عدم قطعیت در زاویه‌ی اصطکاکی باعث تغییر ۸۰ درصدی تقاضای نشست و تغییر ۴۰ درصد تقاضای لنگر می‌شود. تغییر در ضریب پواسون تأثیر کمی در

<sup>1</sup> Geometrical or radiation damping

<sup>2</sup> Internal or material damping

پیش‌بینی پاسخ فونداسیون مورد مطالعه دارد. رایچودهوری [۴]، به بررسی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های دارای قاب خمشی فولادی کوتاه (SMRF) با لحاظ اثر اندرکنش غیرخطی خاک - سازه پرداخت. برای این منظور از مدل BNWF استفاده کرد و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از مدل‌های با تکیه‌گاه صلب و تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر الاستیک مقایسه گردید. با در نظر گرفتن بستر غیرخطی، تقاضای نیرو و شکل-پذیری به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت، بنابراین عملکرد فونداسیون تأثیر بسزایی در پاسخ‌های بدست آمده دارد. مکی و همکاران [۵]، اثر اندرکنش خاک - سازه و تغییر نوع خاک را بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بتن‌آرمه ارزیابی کردند. هدف اصلی این مقاله فرمول‌بندی روش تقریبی برای تحلیل اندرکنش خاک - سازه و بررسی اهمیت نسبی پارامترهای اصلی همچون نقطه‌ی عملکرد، ضریب کاهش، پارامترهای خاک، نسبت سختی فونداسیون به خاک بود. نتایج بدست آمده نشان دهنده‌ی این بود که پاسخ سازه نه تنها به مشخصات دینامیکی سازه و تحریکات لرزه‌ای بستگی دارد، بلکه به عوامل خارجی همچون شرایط پای سازه (اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه) نیز بستگی دارد. قندیل و بهنام‌فر [۶] تقاضای شکل‌پذیری قاب‌های خمشی فولادی واقع بر خاک نرم دارای رفتار غیرخطی را با لحاظ اثر اندرکنش خاک - سازه ارزیابی نمودند. پاسخ‌های سازه‌ای نظیر تغییرمکان نسبی طبقات، نیروهای برشی و تقاضای شکل‌پذیری طبقات با دو شرایط تکیه‌گاهی صلب و منعطف با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی حاصل شدند. نتایج حاکی از آن بود که اندرکنش خاک - سازه، تغییرمکان نسبی و تقاضای شکل‌پذیری را در طبقات پایین‌تر افزایش می‌دهد. محمدپور و همکاران [۷]، تأثیر لحاظ اندرکنش خاک - سازه را بر تغییر تراز پایه در سازه‌های نیمه مدفون مورد بررسی قرار دادند و برای تحلیل اثرات اندرکنش با توجه به رویکرد زیرسازه از مدل ترکیبی اجزای محدود مرز مقیاس - اجزای محدود استفاده کردند. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که لحاظ اندرکنش خاک - سازه می‌تواند باعث کاهش پاسخ دینامیکی و همچنین برش پایه شود. تحقیقی و اربابی [۸]، پاسخ ساختمان‌های فولادی را با لحاظ اندرکنش غیرخطی خاک - سازه مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، ساختمان‌های فولادی در سه ارتفاع سه، شش و دوازده طبقه و دارای دو نوع سیستم باربر جانبی قاب خمشی و مهاربندی هم مرکز در نظر گرفته شدند. برای مدل‌سازی سیستم خاک و فونداسیون در حالت خطی و غیرخطی از مدل وینکلر (BNWF) و نرم‌افزار اجزای محدود OpenSees استفاده گردید. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که اندرکنش خاک - سازه موجب افزایش زمان تناوب و جابجایی افقی ساختمان‌ها در تمامی مدل‌ها می‌شود. همچنین بسته به مشخصات خاک، نوع سیستم باربر و محتوای فرکانسی زمین‌لرزه، هر یک از مقادیر برش، لنگر پایه و تغییرمکان نسبی بین طبقات به میزان قابل توجهی تغییر می‌کند.

در اغلب تحقیقات گذشته اثر اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه همراه با لحاظ اثر اتصالات تیر - ستون بر پاسخ‌های یک سازه با مشخصات ثابت ارزیابی نشده است. هدف عمده‌ی این مقاله، بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های دارای سیستم سازه‌ای قاب خمشی فولادی متوسط با لحاظ اثر اتصالات تیر - ستون و اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه می‌باشد. مدل‌سازی سازه‌ی ۱۰ طبقه یک بار به صورت کامل و با در نظر گرفتن مدل اتصالات، خاک، رفتار غیرخطی هندسی و غیرخطی مصالح و یک بار با در نظر گرفتن خاک و بدون لحاظ اثر اتصالات و در نهایت به شیوه‌ی متداول و بدون در نظر گرفتن اثر عواملی همچون اتصالات و با فرض تکیه‌گاه صلب انجام می‌شود. اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه با فرض بستر انعطاف‌پذیر برای فونداسیون و به صورت رفتار غیرخطی خاک با استفاده از فنرهای غیرخطی وینکلر مدل‌سازی شده است. برای ارزیابی و مقایسه‌ی نتایج حالات مختلف از تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی توسط هفت رکورد زلزله‌ی متفاوت حوزه‌ی دور استفاده می‌شود.

## ۲- روش‌های تحلیل اندرکنش خاک - سازه

برای حل مسائل پیچیده‌ی اندرکنش خاک - سازه نظیر لحاظ اثر هندسه‌ی فونداسیون، رفتار غیرخطی مصالح، اثر سازه‌های مجاور هم و ... می‌توان از روش‌های حل عددی مبتنی بر اجزای محدود استفاده کرد. دو روش مستقیم و زیرسازه از جمله شیوه‌های بسیار مشهور برای تحلیل مسائل اندرکنش خاک - سازه با لحاظ تأثیر عوامل مختلف می‌باشد. در روش مستقیم، سازه و قسمت مهمی از خاک اطراف سازه‌ی مدفون توسط اجزای محدود المان‌بندی شده و تحلیل در یک گام صورت می‌گیرد و در مسائل زیادی با هندسه‌های مختلف می‌تواند بکار برده شود [۹]. در روش مستقیم مسأله را در دو حوزه‌ی زمان و فرکانس می‌توان حل نمود. هم‌اکنون نرم‌افزارهای استانداردی برای حل مسائل اندرکنش دینامیکی خاک - سازه با استفاده از روش مستقیم در دسترس می‌باشد، در حالت کلی، در روش مستقیم

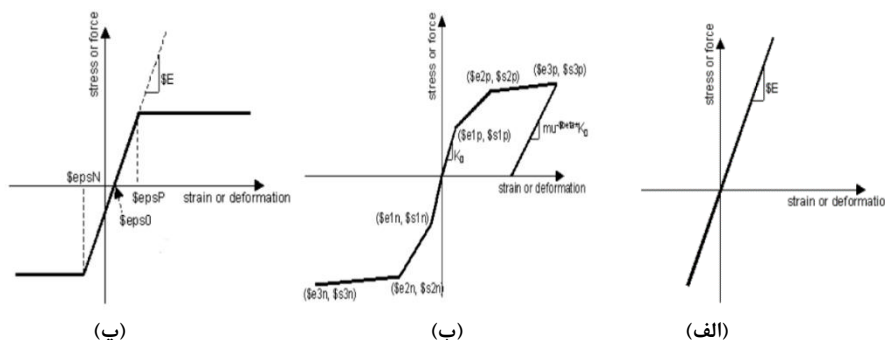
فرضیه‌ی جمع آثار قوا لازم نمی‌باشد و می‌توان تحلیل‌های غیرخطی واقعی را نیز انجام داد. غیرخطی بودن رفتار خاک ناشی از خصوصیات غیرخطی آن به ویژه در سطح تماس خاک و سازه مانند لغزش و بلندشدگی<sup>۳</sup> فونداسیون واقع بر روی خاک می‌باشد. تحلیل‌های غیرخطی می‌تواند نسبت به پارامترهای مدل خاک که به صورت ناقص تعریف شده‌اند، کاملاً حساس باشد که ممکن است با کم‌توجهی نسبت به این پارامترها نتایج اشتباهی حاصل گردد. مزیت عمده‌ی این روش این است که می‌توان مشخصات غیرهمگن خاک یا سنگ را نیز در نظر گرفت. هنگامی که هندسه‌ی سیستم پیچیده بوده و یا رفتار غیرخطی مصالح سازه یا خاک قابل ملاحظه باشد، این نوع تحلیل از لحاظ محاسباتی بسیار حجیم است و بنابراین تحلیل‌های مستقیم اندرکنش خاک - سازه بیشتر با استفاده از روش‌های خطی معادل با تقریب اثرات غیرخطی خاک انجام می‌گردد [۱۰].

با استفاده از روش زیرسازه برخی از معایب روش مستقیم برطرف می‌گردد اما این روش نیز دارای محدودیت‌هایی می‌باشد. در تحلیل به روش زیرسازه، سیستم کلی که شامل سازه فوقانی و فونداسیون و خاک می‌باشد، به صورت دو مدل مستقل از هم عمل می‌کنند. معادلات تعادل دینامیکی در قالب جملاتی از درجات آزادی سطح مشترک نوشته می‌شوند. محیط فونداسیون به صورت یک نیم فضای الاستیک برای توابع امیدانس شناخته شده‌اند. در حالت کلی در روش زیرسازه فرض اصلی بر مبنای برقراری اصل بر هم نهی می‌باشد که نیازمند رفتار خطی است. روش زیرسازه بر اساس تقسیم سیستم خاک - سازه به یک سری از زیرمسئله‌های ساده‌تر می‌باشد. هر زیرمسئله جداگانه حل شده و در مرحله‌ی نهایی تحلیل، بر پایه‌ی اصل بر هم نهی نتایج با هم ترکیب می‌شوند. این روش به خصوص در مواقعی که یک قسمت سیستم مثلاً فونداسیون دارای هندسه‌ی ساده‌ای است در حالی که بخش‌های دیگر هندسه‌ی پیچیده‌ای داشته باشند، کاربرد مناسبی دارد [۹].

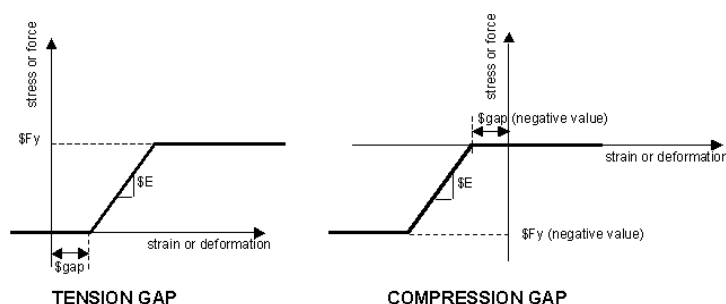
## ۲-۱- مدل‌های رفتاری مصالح خاک در نرم‌افزار OpenSees

به منظور مدل‌سازی اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه در نرم‌افزار OpenSees، مدل‌های متنوعی برای مصالح تک‌محوری وجود دارد که شامل اثرات بلندشدگی نیز می‌باشند. مصالح الاستوپلاستیک کامل همراه با المان‌های گپ، مصالح چرخه‌ای یا هیستریزس و مصالح Qzsimple1 و ... که توسط بولانگر و همکارانش توسعه یافته است و مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند، از جمله‌ی این موارد هستند. مدل مصالح الاستیک خطی، ساده‌ترین مدل رفتاری برای فنر است که دارای سختی اولیه و ظرفیت بی‌نهایت می‌باشد. آزمایش‌های گاجان (۲۰۰۶) نشان داده است که خاک زیر فونداسیون تحت بارهای زیاد دچار تسلیم شدگی و رفتار غیرخطی می‌شود. مدل دیگری از مصالح که در عمل معمولاً از آن استفاده می‌شود، مصالح الاستیک - پلاستیک کامل (EPP) است. در این مدل با رسیدن به کرنش تسلیم، مصالح وارد ناحیه‌ی پلاستیک شده و بدون افزایش تنش، متحمل کرنش‌های بزرگ می‌شوند. در این مدل، تبدیل رفتار از ارتجاعی به پلاستیک بر خلاف رفتار واقعی خاک ناگهانی است. برای تعریف مصالح چرخه‌ای، کاربر دو یا سه نقطه را به ترتیب به منظور تعریف منحنی‌های برگشتی دوخطی یا سه‌خطی فشار و کشش، در قسمت‌های برگشتی فشار و کشش معرفی می‌کند. گزینه‌هایی به منظور تعریف چرخه‌ها و جهت‌های جابجایی، آسیب ناشی از شکل‌پذیری، آسیب ناشی از اتلاف انرژی و سختی‌های کاهش یافته‌ی باربرداری بر مبنای شکل‌پذیری موجود می‌باشند. شکل کلی این نوع مصالح در شکل ۱، نشان داده شده است. مصالح گپ الاستوپلاستیک کامل دارای رفتار مشابهی با مصالح الاستوپلاستیک کامل می‌باشند، به استثنای گپ‌هایی که به صورت موازی با مصالح الاستوپلاستیک کامل قرار گرفته است. مطابق شکل ۲ المان گپ، نقطه‌ی شروع رفتار مصالح را با یک مقدار مشخصی از کرنش جابجا می‌کند، بنابراین این امر می‌تواند برای جذب بلندشدگی در سمت مخالف بارگذاری فونداسیون مناسب باشد [۱۱].

<sup>3</sup> Uplift



شکل ۱: مدل‌های مختلف مصالح به منظور مدل‌سازی فونداسیون‌های سطحی. (الف): مصالح الاستیک، (ب): مصالح الاستوپلاستیک کامل و (پ): منحنی‌های عمومی بک‌بون<sup>۴</sup> هیستریزیس [۱۱]



شکل ۲: مصالح گپ الاستوپلاستیک کامل [۱۱]

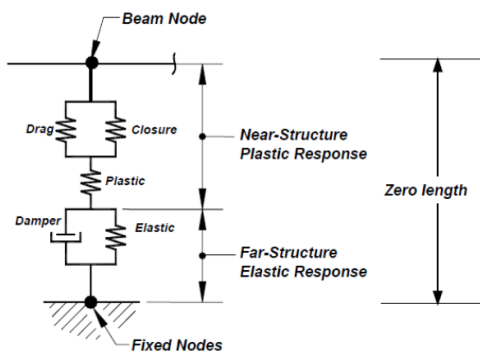
مصالح QzSimple1 دارای پاسخ هیستریزیس غیرمتمقارن است که در آن، منحنی بک‌بون در سمت فشار با بار نهایی و در سمت کشش با مقاومت کاهش‌یافته (برای لحاظ نمودن مقاومت کم خاک تحت کشش) تعریف شده است. مطابق شکل ۳، این مدل دارای تعدادی فنر با رفتارهای مختلف است. فنر ارتجاعی برای بیان رفتار میدان دور و فنر پلاستیک برای نمایش تغییر شکل‌های دائمی میدان نزدیک بکار رفته است. اجزای گپ (شامل فنرهای موازی دراگ<sup>۵</sup> و کلوزشر<sup>۶</sup>) به صورت سری با فنر پلاستیک حضور داشته و برای بیان بلندشدگی (غیرخطی هندسی) فونداسیون بکار رفته‌اند. در ضمن، تحت بارگذاری چرخه‌ای تا زمانی که کرنش به کرنش باربرداری چرخه‌ای قبلی برسد، مصالح به سختی کامل دست نمی‌یابد. در این حالت مصالح دارای گپ هستند که با هر چرخه افزایش می‌یابد، به طوری که نشست به صورت تجمعی می‌باشد. میرایی تشعشعی با استفاده از میراگر لحاظ شده است. نیروی لزوج این میراگر متناسب با سرعت ایجاد شده در فنر ارتجاعی مدل رفتاری است [۱۲].

گرچه مصالح مذکور برای مدل‌سازی رفتار نوک شمع تحت بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد، با این وجود مکانیزم‌های پاسخ محلی در زیر فونداسیون‌های سطحی نیز کمی مشابه با شمع‌ها می‌باشد. بین مصالحی که تاکنون مورد بررسی قرار گرفتند، مصالح QzSimple1 برای مسائل فونداسیون‌های سطحی، قابلیت اجرایی بسیار بالایی دارند. بدین دلیل که این مصالح دارای رابطه‌ی برگشتی نامتمقارن است که توسط بار نهایی در سمت فشاری و مقاومت کاهش یافته در کشش هنگامی که فونداسیون از خاک جدا می‌شود، تعریف می‌شود [۱۲].

<sup>1</sup> Back Bone Curve

<sup>2</sup> Drag

<sup>3</sup> Closure

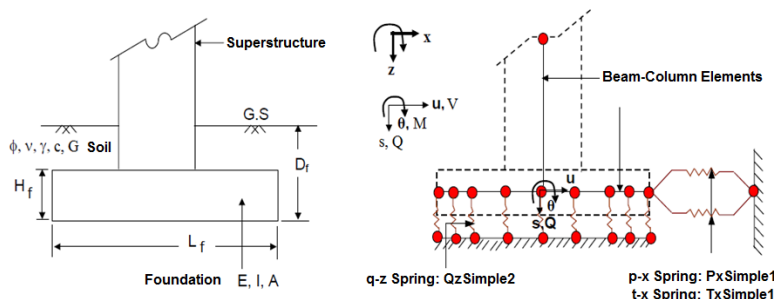


شکل ۳: مدل‌های مصالح TzSimple1, PySimple1, QzSimple1 با طول صفر [۱۲] و [۱۳]

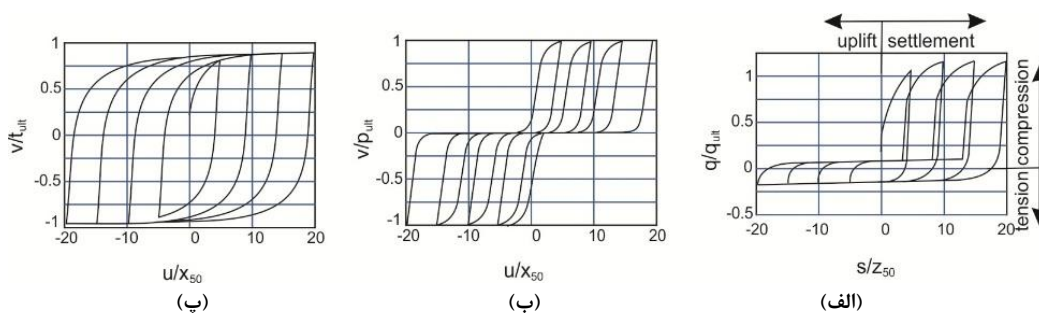
روابط مورد استفاده برای توصیف مصالح QzSimple1، در سال ۱۹۹۹ توسط بولانگر و همکارانش معرفی شدند [۱۲] و [۱۴]. در نرم‌افزار OpenSees، به منظور مدل‌سازی اندرکنش خاک - فونداسیون دو مصالح دیگر نیز با استفاده از المان‌های یک بعدی وجود دارد، که عبارت‌اند از مصالح Pysimple1 و مصالح Tzsimple1، که دارای یکسانی با مصالح Qzsimple1 هستند و تنها پارامترهای ثابتی که کنترل‌کننده‌ی شکل کلی منحنی برگشتی هستند، فرق می‌کنند و برای مطالعه‌ی طیف وسیعی از مسائل اندرکنش خاک - سازه مفید می‌باشند. هر سه مصالح دارای ماهیت شکل ۳ هستند.

### ۳- مدل فنر غیرخطی وینکلر

مدل تیر واقع بر بستر غیرخطی وینکلر (BNWF)، یکی از پرکاربردترین روش‌ها در مدل‌سازی اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه (SFSE) است [۴]، [۱۱]، [۱۳]، [۱۵] و [۱۶]. این مدل توسط رایچودهوری و هوتچین‌سان در سال ۲۰۰۸ در نرم‌افزار OpenSees پیاده‌سازی شد و قابلیت خوبی در پیش‌بینی نتایج تجربی بدست آمده از رفتار فونداسیون‌های سطحی همچون فونداسیون‌های منفرد و نواری واقع بر ماسه و رس با ضرایب اطمینان قائم متفاوت، مدل‌های ساختمانی و پل، بارگذاری استاتیکی و دینامیکی نشان داده است [۱۲]. مدل BNWF از یک سری فنرهای قائم q-z برای بیان مقاومت قائم و دورانی و دو فنر جانبی p-x و t-x برای بیان رفتار پسیو سطح جانبی فونداسیون و لغزش سطح زیر فونداسیون استفاده می‌کند. روابط حاکم بر این فنرها توسط منحنی برگشتی غیرخطی که بر مبنای نتایج چندین آزمایش انجام یافته برای فونداسیون‌های سطحی کالیبره شده‌اند، بدست آمده و در نرم‌افزار OpenSees به صورت مصالح QzSimple2، TxSimple1 و PxSimple1 نامگذاری شده‌اند. این مصالح نسخه‌ی اصلاح شده‌ی مدل‌های مصالح QzSimple1، PySimple1 و TzSimple1 هستند که توسط بولانگر و همکاران برای شمع در نرم‌افزار OpenSees پیاده‌سازی شده بودند [۱۴] و [۱۷]. طرح کلی مدل BNWF برای فونداسیون‌های سطحی در شکل ۴ و منحنی‌های برگشتی غیرخطی مدل‌های مصالح اولیه (مدل‌های پیاده‌سازی شده توسط بولانگر) در شکل ۵ نشان داده شده است.



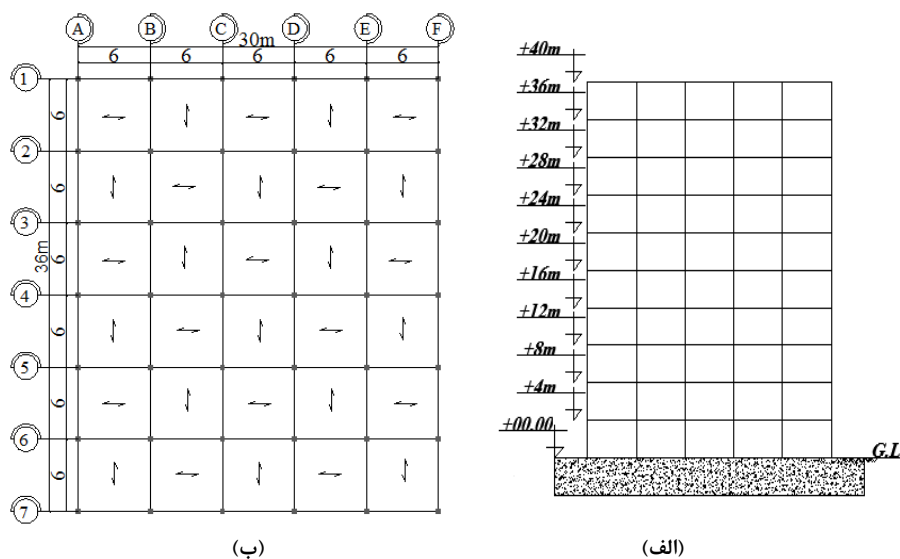
شکل ۴: طرح کلی مدل BNWF برای فونداسیون‌های سطحی [۱۲] و [۱۵]



شکل ۵: پاسخ چرخه‌ای فنرهای (الف): QzSimple1، (ب): PySimple1 و (پ): TySimple1 [۱۲] و [۱۵]

#### ۴- جزئیات مدل انتخابی

در این مقاله، به منظور بررسی تأثیر اتصالات، خاک و فونداسیون بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی، ساختمان ۱۰ طبقه با شکل‌پذیری متوسط واقع بر خاک نوع II و IV [۱۸] لحاظ گردیده است. شکل ۶، پلان و نمای این ساختمان را نشان می‌دهد. مشخصات خاک نوع II و IV استفاده شده در اطراف فونداسیون مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شده است. برای بررسی بیشتر تأثیر خاک نوع IV بر پاسخ‌های سازه، این نوع خاک در دو حالت با سرعت‌های موج برشی متفاوت که به ترتیب برابر با ۱۵۰ و ۸۰ متر بر ثانیه است، در نظر گرفته شده است.



شکل ۶: (الف): پلان ساختمان، (ب): نمای ساختمان ۱۰ طبقه

جدول ۱: مشخصات خاک نوع II و IV

خاک	$\phi$	$\nu$	$V_s$ (m/s)	C (kPa)
II	۴۲	۰/۳	۵۶۰	۰
IV-1	۹	۰/۴۵	۱۵۰	۴۵
IV-2	۹	۰/۴۵	۸۰	۴۵

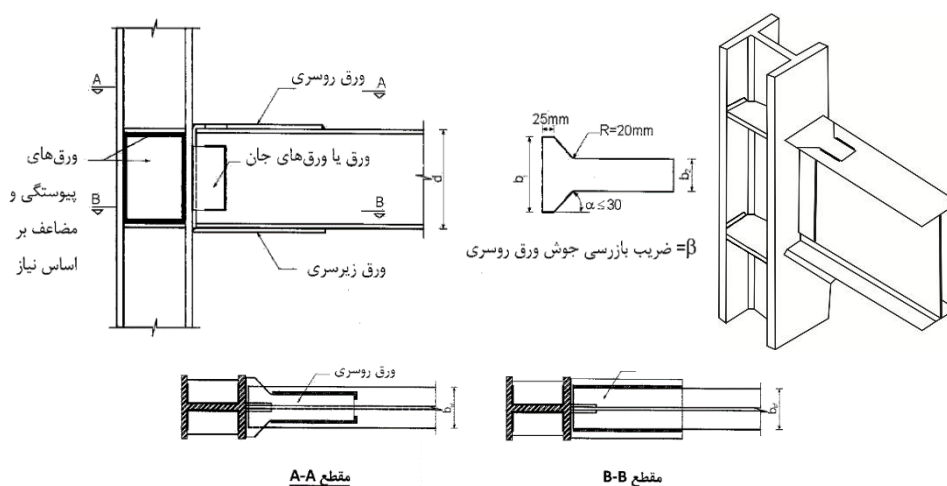


جهت بارگذاری ثقلی این سازه‌ها از مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۱۹] استفاده شده است. بار مرده و زنده‌ی طبقات و بام به ترتیب ۶/۴ و ۲/۴۵ کیلونیوتون بر مترمربع در نظر گرفته شده است. محل احداث پروژه در منطقه‌ای با خطر نسبی خیلی زیاد مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ [۱۸] فرض شده است. طراحی این سازه‌ها طبق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۲۰] صورت گرفته است و کلیه‌ی ضوابط لرزه‌ای برای سازه‌ها لحاظ شده است. نتایج طراحی تیرها و ستون‌ها برای ساختمان‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات سازه‌ای ساختمان‌های ۱۰ طبقه

سیستم سازه‌ای	نوع خاک	شماره‌ی طبقات	مقاطع ستون‌ها	مقاطع تیرها
قاب خمشی متوسط	II	۱ و ۲	BOX 350 x 350 x 30	IPE550
		۳ و ۴	BOX 350 x 350 x 25	IPE500
		۵ و ۶	BOX 350 x 350 x 20	IPE450
		۷ و ۸	BOX 350 x 350 x 15	IPE400
		۹ و ۱۰	BOX 350 x 350 x 12	IPE300
قاب خمشی متوسط	IV	۱ و ۲	BOX 400 x 400 x 35	IPE600
		۳	BOX 400 x 400 x 30	IPE600
		۴	BOX 400 x 400 x 30	IPE550
		۵ و ۶	BOX 400 x 400 x 25	IPE550
		۷ و ۸	BOX 400 x 400 x 25	IPE450
		۹ و ۱۰	BOX 400 x 400 x 20	IPE360

اتصالات تیر - ستون برای ساختمان‌های مفروض مطابق اتصالات خمشی از پیش تأییدشده‌ی مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۲۰] و از نوع اتصالات گیردار جوشی به کمک ورق‌های روسری و زیرسری (WFP) طراحی شده است. نتایج طراحی اتصالات در جدول ۳ نشان داده شده است. شکل ۷، اتصالات گیردار جوشی با استفاده از ورق‌های روسری و زیرسری را نشان می‌دهد.



شکل ۷: اتصال گیردار جوشی به کمک ورق‌های روسری و زیرسری (WFP) [۲۰]

فونداسیون ساختمان‌های مفروض به صورت نواری و با فرض ضریب اطمینان ۳ طراحی شده است [۲۱]. ظرفیت باربری نهایی فونداسیون‌های سطحی واقع بر خاک نوع IV با استفاده از روابط میرهوف [۲۲] و [۲۳] و فونداسیون‌های واقع بر خاک نوع II با استفاده از نتایج آزمایش SPT [۲۲] محاسبه گردیده است. نتایج طراحی فونداسیون‌ها برای حالت‌های مختلف در جدول ۴ ارائه گردیده است.

جدول ۳: مشخصات اتصالات تیر - ستون ساختمان‌های ۱۰ طبقه

ابعاد ورق جان (mm)	ابعاد ورق زیرسری (mm)	ابعاد ورق روسری (mm)	شماره‌ی طبقات	تیپ اتصال	نوع خاک	سیستم سازه‌ای
PL 400 x 160 x 12	PL 500 x 250 x 30	PL 500 x 250 x 45 PL 500 x 170 x 45	۱ و ۲	۱		
PL 350 x 150 x 10	PL 450 x 240 x 28	PL 450 x 240 x 42 PL 450 x 160 x 42	۳ و ۴	۲		
PL 300 x 140 x 9	PL 400 x 230 x 25	PL 400 x 230 x 38 PL 400 x 150 x 38	۵ و ۶	۳	II	قاب خمشی متوسط
PL 300 x 130 x 9	PL 350 x 220 x 22	PL 350 x 220 x 34 PL 350 x 140 x 34	۷ و ۸	۴		
PL 300 x 130 x 9	PL 300 x 190 x 18	PL 300 x 190 x 28 PL 300 x 110 x 28	۹ و ۱۰	۵		
PL 450 x 180 x 12	PL 800 x 300 x 40	PL 800 x 300 x 56 PL 800 x 180 x 56	۱ و ۲	۱		
PL 450 x 180 x 12	PL 750 x 260 x 40	PL 750 x 260 x 56 PL 750 x 180 x 56	۳ و ۴	۲		
PL 400 x 160 x 12	PL 700 x 250 x 34	PL 700 x 250 x 50 PL 700 x 170 x 50	۵ و ۶	۳	IV	قاب خمشی متوسط
PL 350 x 150 x 9	PL 650 x 220 x 30	PL 650 x 220 x 42 PL 650 x 150 x 42	۷ و ۸	۴		
PL 300 x 130 x 9	PL 600 x 200 x 24	PL 600 x 200 x 36 PL 600 x 130 x 36	۹ و ۱۰	۵		

جدول ۴: ابعاد و ضخامت فونداسیون‌های نواری ساختمان‌های ۱۰ طبقه

ضخامت (m)	طول (m)	عرض (m)	ضریب اطمینان	نوع خاک	سیستم سازه‌ای
۱/۴	۳۲/۵	۲/۵	۳	II	قاب خمشی متوسط
۱/۴	۳۳	۳	۳	IV	

## ۵- مدل‌سازی با OpenSees

نرم‌افزار OpenSees یک نرم‌افزار اجزای محدود است و به طور تخصصی در حوزه‌ی سیستم‌های عملکردی خاک و سازه تحت زلزله طراحی شده و با این هدف در سال ۱۹۹۰ توسط محققین دانشگاه برکلی آمریکا از جمله مازونی، ام سی کنا، اسکات، فنویس تهیه گردیده و از آن زمان تا کنون در حال بررسی و توسعه‌ی مداوم می‌باشد [۲۴].

برای مدلسازی قاب‌ها، اتصالات، فونداسیون‌ها و خاک به منظور انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی فرضیاتی در نظر گرفته شده‌اند. برای مدلسازی تیرها و ستون‌ها از المان تیر - ستون غیرخطی و مدل رفتاری مصالح Steel01 استفاده شده است. شیب ناحیه‌ی غیرخطی، ۳ درصد لحاظ شده است. با توجه به این که اتصالات تیر - ستون گیردار است، اثر این اتصالات در مدلسازی قاب‌ها لحاظ گردیده است. برای مدلسازی اتصالات گیردار در انتهای تمامی تیرها و ستون‌ها گره‌های جداگانه تعریف شده است. سپس با استفاده از المان به طول صفر به صورت فنر دورانی دوخطی RotSpring2D دو گره واقع در محل اتصال تیر به ستون که دارای مختصات یکسانی می‌باشند، به یکدیگر متصل شده‌اند. مصالح مورد استفاده برای اتصالات از نوع مصالح چرخه‌ای می‌باشد.

در این مقاله، به منظور بیان رفتار چرخه‌ای مصالح اتصالات، از رابطه‌ی ممان انحنای اتصالات دارای ورق‌های روسری و زیرسری مطابق با رابطه‌ی ۱ [۲۵] و [۲۶] استفاده گردیده است.

$$M = \frac{k\phi}{[1 + (k\phi / M_p)^{15.5}]^{1/15.5}} \quad (1)$$

در این رابطه مقدار  $k$  و  $M_p$  با استفاده از روابط ۲ و ۳ [۲۵] و [۲۶] بدست می‌آیند.

$$k = 0.5 E b t h^2 / l \quad (2)$$

$$M_p = b t h \sigma_s \quad (3)$$

که در این روابط،  $l$ ،  $b$  و  $t$  به ترتیب طول، عرض و ضخامت ورق اتصال به بال تیر،  $h$  ارتفاع تیر و  $\sigma_s$  تنش تسلیم صفحه‌ی اتصال است.

با استفاده از رابطه‌ی ۱، منحنی‌های ممان - دوران هر یک از اتصالات ترسیم گردیده و دوران و لنگر نقطه‌ی تسلیم  $(\theta_y, M_y)$  و دوران و لنگر نهایی  $(\theta_u, M_u)$  به عنوان پارامترهای ورودی برای مصالح چرخه‌ای در نظر گرفته شده است. مطابق با آیین‌نامه‌ی FEMA350 [۲۷] مقدار  $\theta_u$  برای قاب خمشی متوسط برابر ۰/۰۴ در نظر گرفته شده است.

## ۵-۱- مدلسازی فونداسیون و خاک

همان‌طوری که در شکل ۴ نشان داده شد، در مدل BNWF، فونداسیون سطحی دو بعدی به صورت یک تیر ارتجاعی توسط المان‌های یک بعدی تیر - ستون با سه درجه آزادی در هر گره مدل می‌گردد. این المان‌ها توسط تعدادی از فنرهای مجزا و غیرخطی وینکلر نگهداری شده است و در نتیجه منجر به ایجاد نیروها و تغییرشکل‌های افقی، قائم و خمشی خواهد شد. هر فنر وینکلر مستقل از سایر فنرها بوده و در برنامه OpenSees به صورت المان یک بعدی با طول صفر در نظر گرفته می‌شود. فنرهای  $q-z$ ،  $p-x$  و  $t-x$  به ترتیب قادر به شبیه‌سازی رفتار بار - تغییرمکان قائم، رفتار بار - تغییرمکان افقی جانبی مقاوم در برابر لغزش فونداسیون و رفتار برش - لغزش افقی در زیر فونداسیون هستند. رفتار لنگر - دوران به صورت ضمنی توسط توزیع فنرهای قائم در طول فونداسیون لحاظ می‌شود. مشخصات سختی افقی و قائم فنرها با استفاده از روابط گازتاس [۲۸] محاسبه شده است.

## ۶- انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها

در این مقاله، برای بررسی پاسخ‌های سازه از تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی استفاده شده است. این روش نیازمند تعدادی شتاب‌نگاشت زلزله است که برای هماهنگ شدن با طرح مورد نظر مقیاس‌سازی شده و به عنوان ورودی تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای انجام تحلیل‌های دینامیکی از روش انتگرال‌گیری نیومارک استفاده شده است. در انتخاب رکوردهای زلزله بر اساس پارامترهای زلزله، سه پارامتر اصلی که عبارت‌اند از بزرگا، فاصله تا گسل و خاک منطقه را باید ملاک انتخاب قرار داد. در این مقاله از رکوردهای زلزله‌ی سایت peer [۲۹] استفاده گردیده است. رکوردهای زلزله‌ی انتخاب شده به صورت رکوردهای حوزه‌ی دور که فاصله‌ی

ایستگاه ثبت از مرکز آن‌ها بیشتر از ۲۰ کیلومتر بوده و همچنین بر روی سنگ بستر به ثبت رسیده‌اند، می‌باشند. تمامی زوج شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده به حداکثر مقدار خود مقیاس شده‌اند و ضریب مقیاس با استفاده از مقررات استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۸] تعیین گردیده و در تحلیل‌های اندرکنش خاک - سازه، این شتاب‌ها به عنوان شتاب‌های ورودی در تراز پایه بکار رفته‌اند. مشخصات شتاب‌نگاشت‌ها در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸: مشخصات شتاب‌نگاشت‌های بکار رفته در تحلیل‌ها

Spectral Ordinate	Rjb (Km)	Vs (Km/h)	بزرگی	ایستگاه	سال	زلزله
SRSS	۸۷/۳۷	۸۱۳/۴۸	۶/۶۱	Cedar Springs, Allen Ranch	۱۹۷۱	San Fernando
SRSS	۳۰/۷۰	۶۶۷/۱۳	۶/۶۱	Santa Anita Dam	۱۹۷۱	San Fernando
SRSS	۶۱/۷۵	۶۶۹/۴۸	۶/۶۱	Tehachapi Pump	۱۹۷۱	San Fernando
SRSS	۳۸/۲۲	۶۸۰/۳۷	۶/۰۲	Anza - Red Mountain	۱۹۸۶	N. Palm Springs
SRSS	۳۲/۱۱	۷۴۰/۰۵	۵/۹۹	LA - Chalon Rd	۱۹۸۷	Whittier Narrows-01
SRSS	۵۴/۹۷	۷۳۵/۴۴	۶/۹۳	Hayward City Hall - North	۱۹۸۹	Loma Prieta
SRSS	۳۷/۹۲	۱۱۰۰	۶/۵۲	Diablo Canyon Power Plant	۲۰۰۳	San Simeon, CA

## ۷- اثر ساختگاه

ارزیابی کلی خسارات وارد بر سازه‌ها و تأسیسات در زلزله‌ها نشان می‌دهد که شرایط ساختگاهی تأثیر قابل توجهی بر نحوه توزیع خرابی‌ها داشته است، همچنین، یکی از عوامل مؤثر در تغییر مشخصات زلزله‌ی ورودی به ساختمان مانند محتوای فرکانسی و شدت زلزله می‌باشد. در این مقاله، جهت بررسی اثرات مذکور در مدل‌های با لحاظ اثر خاک از نرم‌افزار NERA [۳۰] استفاده گردیده است. با استفاده از این نرم‌افزار، پاسخ دینامیکی خاک با حل معادلات دیفرانسیل حرکت امواج در لایه‌های افقی خاک توسط روش غیرخطی بدست آمده است. پاسخ این اثر در مدل‌های مفروض، به صورت جابجایی لایه‌ی زیر پی به عنوان پارامتر ورودی برای تحلیل‌های دینامیکی در نظر گرفته شده است.

## ۸- یافته‌ها

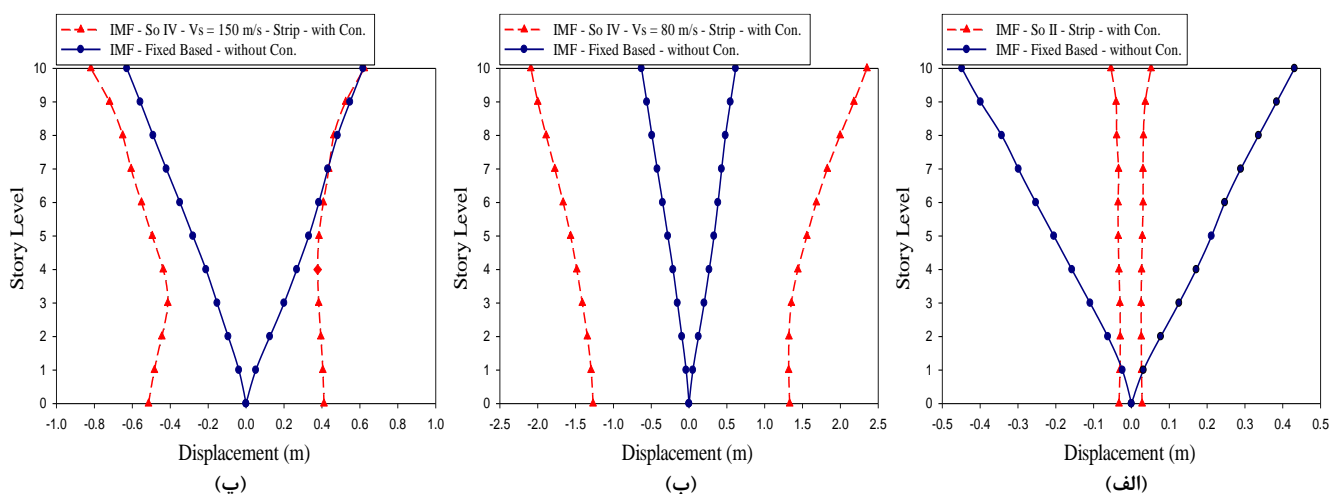
برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی متوسط در هر یک از سازه‌های ۱۰ طبقه، سه حالت که شامل مدل با لحاظ اثر اتصالات تیر - ستون و اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه، مدل بدون لحاظ اثر اتصالات تیر - ستون و با لحاظ اثر اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه و در نهایت مدل بدون لحاظ اثر اتصالات و با تکیه‌گاه صلب در نظر گرفته شده است و تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی انجام یافته است. اثر ساختگاه نیز برای تمامی رکوردهای زلزله در خاک نوع II و IV بررسی شده است. نتایج این تحلیل‌ها در قالب نمودارهای حداکثر تغییر مکان جانبی طبقات، حداکثر تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای و حداکثر برش پایه‌ی طبقات استخراج شده و تأثیر مدلسازی همزمان اتصالات و خاک نسبت به مدل‌های بدون لحاظ اثر اتصالات و خاک و تأثیر مدلسازی یکی از اجزا نظیر اتصالات تیر - ستون در قاب‌های ۱۰ طبقه در قالب بخش‌های زیر ارائه شده است.

## ۸-۱- بررسی اثر لحاظ همزمان مدل خاک و اتصال

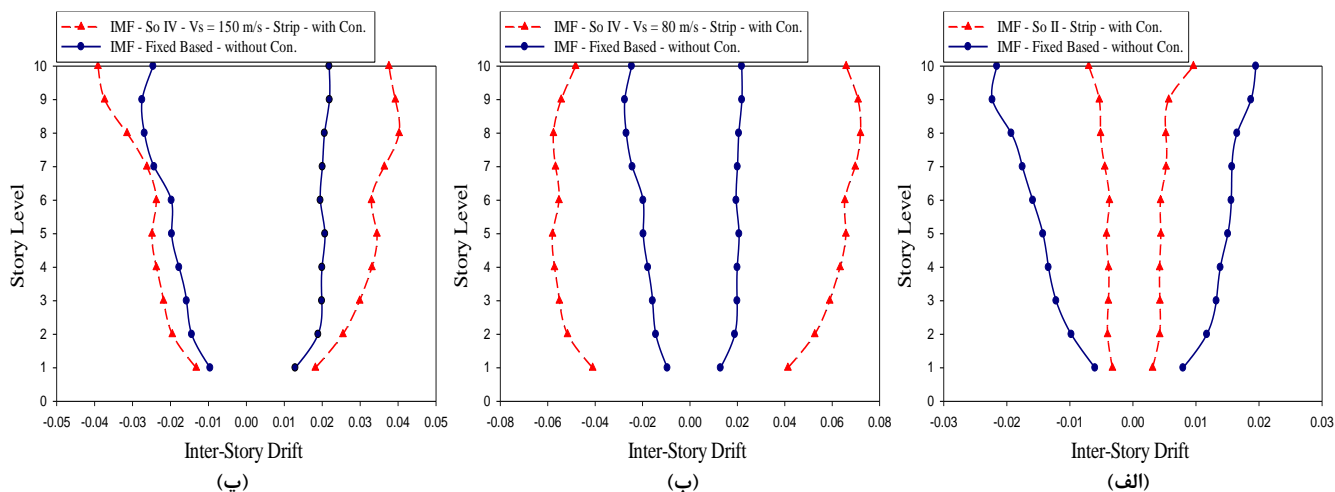
شکل‌های ۸- الف و ب، به ترتیب حداکثر تغییرمکان جانبی طبقات را برای قاب‌های ۱۰ طبقه واقع بر خاک نوع IV دارای سرعت موج برشی ۱۵۰ و ۸۰ متر بر ثانیه و شکل ۸- پ، حداکثر تغییرمکان جانبی طبقات را برای قاب واقع بر خاک نوع II در دو حالت که شامل مدل با لحاظ اثر اتصالات تیر - ستون و خاک و مدل بدون اتصالات و با تکیه‌گاه صلب است، نشان می‌دهند. با مقایسه‌ی این نتایج مشخص می‌شود که در قاب‌های واقع بر خاک نوع IV دارای سرعت موج برشی ۱۵۰ و ۸۰ متر بر ثانیه، حداکثر تغییرمکان جانبی مدل با لحاظ اثر اتصالات و خاک در طبقه‌ی دهم اتفاق افتاده و به ترتیب به میزان ۳۰/۲ و ۲۷۴ درصد نسبت به مدل بدون لحاظ اتصالات و با تکیه‌گاه صلب افزایش یافته است. این نتیجه در مدل واقع بر خاک نوع II، به میزان ۸۷/۹ درصد نسبت به مدل بدون لحاظ اثر اتصالات و خاک کاهش یافته است.

شکل‌های ۹- الف، ب و پ، حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای را برای قاب‌های ۱۰ طبقه برای هر دو حالت مفروض نشان می‌دهند. با مقایسه‌ی این نتایج مشخص می‌شود که در مدل‌های واقع بر خاک نوع IV دارای سرعت موج برشی ۱۵۰ و ۸۰ متر بر ثانیه، حداکثر تغییرمکان نسبی با لحاظ اثر اتصالات و خاک در طبقه‌ی هشتم به ترتیب به میزان ۴۶/۴ و ۱۶۱/۶ درصد نسبت به مدل بدون لحاظ اتصالات و با تکیه‌گاه صلب افزایش یافته است. این کمیت در مدل واقع بر خاک نوع II، به میزان ۵۷ درصد نسبت به مدل‌های بدون لحاظ اثر اتصالات و خاک کاهش یافته است.

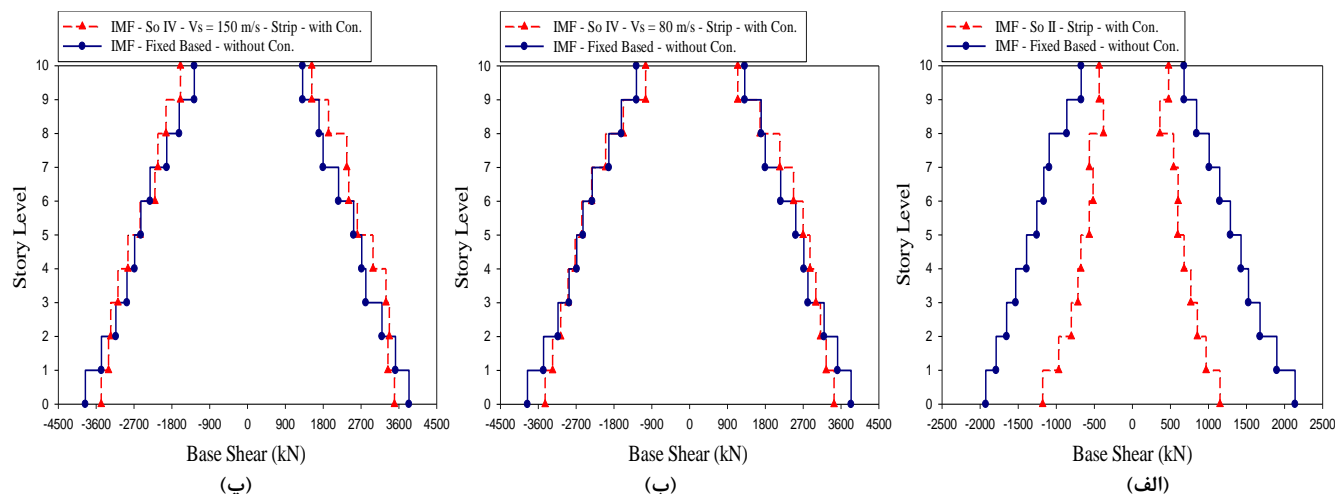
شکل‌های ۱۰- الف، ب و پ، حداکثر برش پایه‌ی طبقات را برای مدل‌های واقع بر خاک‌های نوع IV با فرض دو سرعت موج برشی متفاوت و خاک نوع II نشان می‌دهند. با لحاظ اثر اتصالات و خاک در مدل واقع بر خاک‌های نوع IV، حداکثر برش پایه برای قاب مفروض به ترتیب به میزان ۹/۴ و ۱۱ درصد و در مدل واقع بر خاک نوع II به میزان ۴۴/۹ درصد نسبت به مدل بدون لحاظ اتصالات و با تکیه‌گاه صلب کاهش یافته است.



شکل ۸: نمودار تغییرمکان جانبی حداکثر در برابر ارتفاع قاب خمشی متوسط واقع بر (الف): خاک نوع IV با سرعت موج برشی ۱۵۰ متر بر ثانیه، (ب): خاک نوع IV با سرعت موج برشی ۸۰ متر بر ثانیه و (پ): خاک نوع II



شکل ۹: نمودار تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای حداکثر در برابر ارتفاع قاب خمشی متوسط واقع بر (الف): خاک نوع IV با سرعت موج برشی ۱۵۰ متر بر ثانیه، (ب): خاک نوع IV با سرعت موج برشی ۸۰ متر بر ثانیه و (پ): خاک نوع II



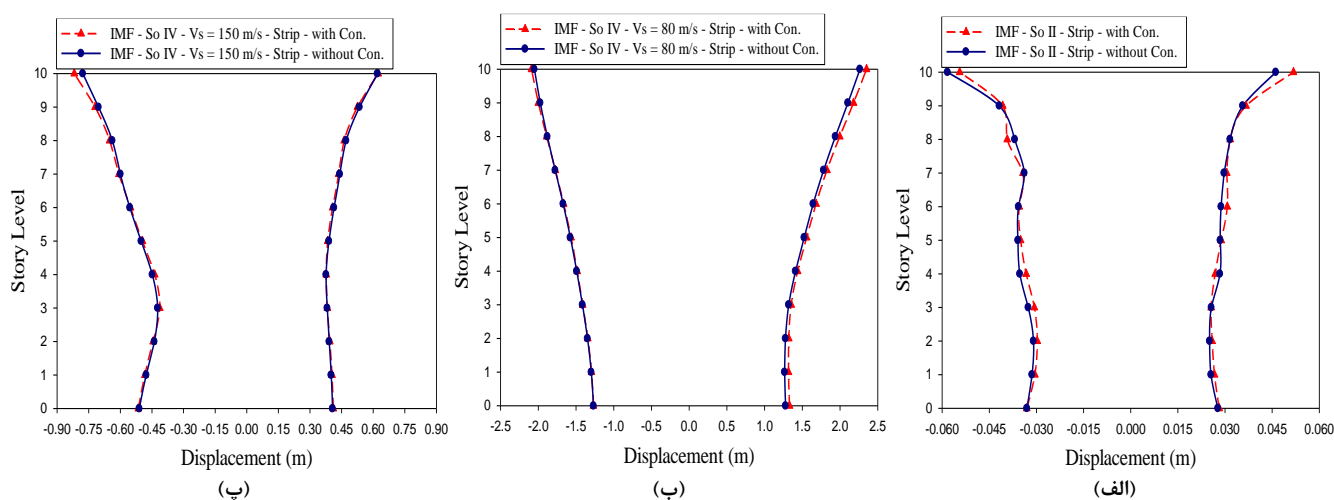
شکل ۱۰: نمودار برش پایه حداکثر در برابر ارتفاع قاب خمشی متوسط واقع بر (الف): خاک نوع IV با سرعت موج برشی ۱۵۰ متر بر ثانیه، (ب): خاک نوع IV با سرعت موج برشی ۸۰ متر بر ثانیه و (پ): خاک نوع II

## ۸-۲- بررسی میزان تأثیر اتصالات تیر - ستون در مدل‌های دارای خاک

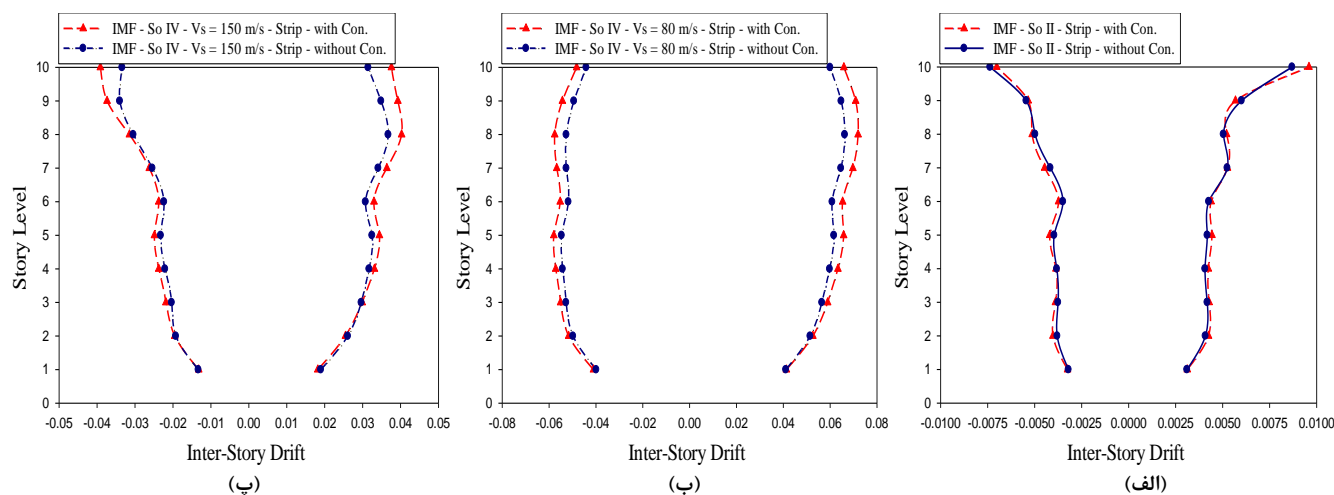
شکل‌های ۱۱-الف، ب، به ترتیب حداکثر تغییرمکان جانبی طبقات را برای مدل ۱۰ طبقه واقع بر خاک نوع IV با سرعت موج برشی برابر با ۱۵۰ و ۸۰ متر بر ثانیه و شکل ۱۱-پ، مقدار این کمیت را در خاک نوع II در دو حالت که شامل مدل با لحاظ اثر اتصالات تیر - ستون و خاک و مدل بدون اتصالات و با لحاظ اثر خاک است، نشان می‌دهند. با مقایسه‌ی نتایج مشخص می‌شود که در مدل واقع بر خاک نوع IV و دارای سرعت موج برشی ۱۵۰ و ۸۰ متر بر ثانیه، حداکثر تغییرمکان جانبی در مدل‌های با لحاظ اثر اتصالات و خاک به ترتیب به میزان ۵/۲ و ۳/۸ درصد نسبت به مدل با لحاظ خاک و بدون اتصالات افزایش یافته است. در حالی که در مدل واقع بر خاک نوع II، به ترتیب به میزان ۶/۶ درصد کاهش یافته است.

شکل‌های ۱۲- الف، ب و پ، حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقات را برای مدل‌های واقع بر خاک‌های نوع IV با دو سرعت موج برشی متفاوت و خاک II، در دو حالت که شامل مدل با لحاظ اثر اتصالات تیر - ستون و خاک و مدل با لحاظ اثر خاک و بدون اتصالات است، نشان می‌دهند. در قاب واقع بر خاک‌های نوع IV، حداکثر مقدار این کمیت در مدل با لحاظ اثر اتصالات و خاک به ترتیب به میزان ۹/۶ و ۸/۶ درصد نسبت به مدل با لحاظ خاک و بدون اتصالات افزایش یافته است. در حالی که در مدل واقع بر خاک نوع II، به میزان ۱۰/۳ درصد افزایش یافته است.

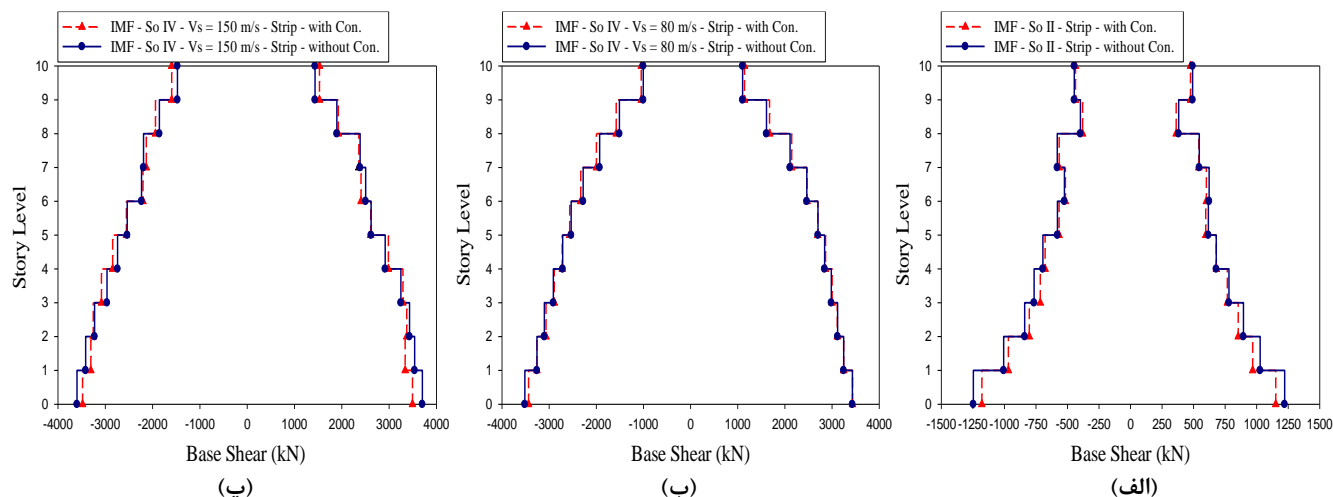
شکل‌های ۱۳- الف، ب و پ، حداکثر برش پایه‌ی طبقات را برای مدل‌های واقع بر خاک‌های نوع IV با فرض دو سرعت موج برشی متفاوت و خاک نوع II در دو حالت مفروض نشان می‌دهند. با مقایسه‌ی نتایج مشخص می‌شود که در قاب واقع بر خاک نوع IV، حداکثر برش پایه در مدل‌های با لحاظ اثر اتصالات و خاک به میزان ۵/۷ و ۲/۱ درصد و در مدل‌های واقع بر خاک نوع II به میزان ۵/۴ درصد نسبت به مدل‌های با لحاظ خاک و بدون اتصالات کاهش یافته است.



شکل ۱۱: نمودار بررسی اثر اتصال بر حداکثر تغییرمکان طبقات قاب‌های خمشی متوسط واقع بر (الف): خاک نوع IV با سرعت موج برشی ۱۵۰ متر بر ثانیه، (ب): خاک نوع IV با سرعت موج برشی ۸۰ متر بر ثانیه و (پ): خاک نوع II



شکل ۱۲: نمودار بررسی اثر اتصال بر حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقه‌های قاب‌های خمشی متوسط واقع بر (الف): خاک نوع IV با سرعت موج برشی ۱۵۰ متر بر ثانیه، (ب): خاک نوع IV با سرعت موج برشی ۸۰ متر بر ثانیه و (پ): خاک نوع II



شکل ۱۳: نمودار بررسی اثر اتصال بر حداکثر برش پایه طبقات قاب‌های خمشی متوسط واقع بر (الف): خاک نوع IV با سرعت موج برشی ۱۵۰ متر بر ثانیه، (ب): خاک نوع IV با سرعت موج برشی ۸۰ متر بر ثانیه و (پ): خاک نوع II

## ۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، میزان تأثیر مدلسازی اتصالات تیر - ستون، اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه، نوع خاک بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی متوسط ۱۰ طبقه با پلان مستطیلی شکل مورد بررسی قرار گرفت. این ساختمان‌ها با استفاده از ضوابط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و آیین‌نامه‌ی طراحی در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) با فرض خاک نوع IV و II طراحی گردیدند. فونداسیون‌ها با لحاظ ضریب اطمینان طراحی ۳ طراحی شدند. تمامی اتصالات تیر - ستون بکار رفته در این مقاله از نوع اتصالات از پیش تأیید شده‌ی جوشی به کمک ورق‌های روسری و زیرسری می‌باشند. برای مدلسازی این سازه‌ها از نرم‌افزار اجزای محدود OpenSees استفاده گردید و فونداسیون و خاک اطراف آن به صورت فنرهای غیرخطی وینکلر مدل گردیدند. جهت مقایسه‌ی نتایج، تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی با استفاده از هفت رکورد زلزله‌ی حوزه‌ی دور صورت گرفت. در نهایت نتایج بدست آمده به صورت نمودارهای حداکثر تغییرمکان جانبی طبقات، حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای و حداکثر برش پایه طبقات برای خاک نوع IV با فرض دو سرعت موج برشی متفاوت (۱۵۰ و ۸۰ متر بر ثانیه) و خاک نوع II ارائه شدند. نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- در مدل‌های واقع بر خاک نوع IV، لحاظ اثر اتصالات و خاک منجر به افزایش حداکثر تغییرمکان جانبی، حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای و کاهش حداکثر برش پایه نسبت به مدل‌های بدون لحاظ اثر اتصالات و با تکیه‌گاه صلب می‌گردد؛ همچنین میزان درصد افزایش حداکثر تغییرمکان و حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای و میزان درصد کاهش حداکثر برش پایه در مدل‌های دارای خاک با سرعت موج برشی ۸۰ متر بر ثانیه بیشتر از مدل‌های تحلیل شده با فرض سرعت موج برشی ۱۵۰ متر بر ثانیه است. این امر بیانگر این است که کاهش سرعت موج برشی و در نتیجه ضعیف‌تر شدن خاک منجر به افزایش قابل ملاحظه در تغییرمکان‌های جانبی طبقات و تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای و کاهش حداکثر برش پایه می‌گردد.
- ۲- در مدل‌های واقع بر خاک نوع II، اثر این دو عامل منجر به کاهش حداکثر تغییرمکان جانبی طبقات، حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای و حداکثر برش پایه طبقات نسبت به مدل‌های بدون لحاظ اثر اتصالات و خاک می‌گردد.
- ۳- در مدل‌های ۱۰ طبقه واقع بر خاک نوع IV و II، لحاظ اثر اتصالات موجب افزایش حداکثر تغییرمکان جانبی طبقات و کاهش برش پایه آن نسبت به مدل‌های دارای خاک و بدون لحاظ اثر اتصالات می‌گردد.



## مراجع

- [1] Rezaie Tabrizi, A. (2002). *Investigation of the effect of soil – structure interaction on the nonlinear responses of tall structures*. M.Sc. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Iran.
- [2] Harden, C.W. and Hutchinson, T.C. (2009). Beam-on-nonlinear-Winkler-foundation modeling of shallow, rocking – dominated footings. *Journal of Earthq spectra*, 25 (2), 277 - 300.
- [3] Raychowdhury, P. and Hutchinson, T.C. (2010). Sensitivity of shallow foundation response to model input parameters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136 (3), 538-541.
- [4] Raychowdhury, P. (2011). Seismic response of low-rise steel moment-resisting frame (SMRF) buildings incorporating nonlinear soil-structure interaction (SSI). *Engineering Structures*, 33 (3), 958-967.
- [5] Mekki, M. and Elachachi, S.M. and Breyse, D. and Zoutat, M. (2016). Seismic behavior of R.C. structures including soil-structure interaction and soil variability effects. *Journal of Engineering Structures*, Vol. 126, 15-26.
- [6] Ghandil, M. and Behnamfar, F. (2017). Ductility demands of MRF structures on soft soils considering soil-structure interaction. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 92, 203-214.
- [7] Mohammadpour, S. and Attarnezhad, R. and Behniya, K. (2011). Investigation of the effect of soil – structure interaction on the variation of base level in the semi buried structures. In: *6<sup>th</sup> national Congress on Civil Engineering*. Iran-Semnan: Semnan university, 1-8.
- [8] Tahghighi, H. and Arbabi, M. (2015). Investigation of steel structures response including nonlinear soil-structure interaction. In: *10<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering*. Iran-Tabriz: Tabriz university, 1-8.
- [9] Datta, T.K. (2010). *Seismic analysis of structures*. India: John Wiley & Sons, 1-454.
- [10] Stewart, J. P. and Fenves. G. L. and seed. R .B. (1999). Seismic soil-structure interaction in buildings, I: Analytical methods and II: Empirical findings. *Journal of Geotech & Geoenv Engrg. ASCE*, 125 (1), 26-37.
- [11] Harden, CW. and Hutchinson, T.C. and Martin, G.R. and Kutter, B.L. (2005). *Numerical modeling of the nonlinear cyclic response of shallow foundations*. California: Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) report. 04, 1 – 233.
- [12] Raychowdhury, P. (2008). *Nonlinear winkler-based shallow foundation model for performance assessment of seismically loaded structures*. Phd. University of California, San Diego.
- [13] Madani, B. and Behnamfar, F. and Tajmir Riahi, H. (2015). Dynamic response of structures subjected to pounding and structure-soil-structure interaction. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol.78, 46-60.
- [14] Boulanger, R.W. and Curras, C.J. and Kutter, B.L. and Wilson, D.W. and Abghari, A. (1999). Seismic Soil-Pile-Structure Interaction Experiments and Analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 125(9), 750-759.
- [15] Raychowdhury, P. (2009). Effect of soil parameter uncertainty on seismic demand of low-rise steel buildings on dense silty sand. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 29(10), 1367-1378.
- [16] Rajeev, P. and Tesfamariam, S. (2012). Seismic fragilities of non-ductile reinforced concrete frames with consideration of soil structure interaction. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol.40, 78-86.
- [17] Boulanger, R. (2000). *The PySimple1, TzSimple1, and QzSimple1 material models, documentation for the OpenSees platform*. URL: <http://opensees.berkeley.edu>.
- [18] Building and Housing Research Center. (2015). *Iranian Code of Practice for Seismic Resistance Design of Buildings: Standard No. 2800 (4rd edition)*. Iran.
- [19] Central Research and Building House. (2013). *Iranian National Building Code, part 6, loads on building*. Iran.
- [20] Central Research and Building House. (2013). *Iranian National Building Code, part 10, steel structures design*. Iran.
- [21] Central Research and Building House. (2013). *Iranian National Building Code, part 7, foundations*. Iran.
- [22] Bowles, J. (1996). *Foundation analysis and design*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1-1164.
- [23] Meyerhof, G.G. (1963). Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations. *Canadian Geotechnical Journal*. 1(1), 16-26.
- [24] OpenSees-Open System for Earthquake Engineering Simulation. Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER. Richmond (CA, USA). <http://opensees.berkeley.edu/>.
- [25] Ackroyd, M. (1987). Design of flexibility-connected unbraced steel building frames. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 8, 261-286.
- [26] Li, G.Q. and Li, J.J. (2007). *Advanced analysis and design of steel frames*. China: John Wiley & Sons, 1-368.
- [27] FEMA 350. (2000). *Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings*. SAC Joint Venture: Washington, DC.
- [28] Gazetas, G. (1991). Formulas and Charts for Impedances of Surface and Embedded Foundations. *Journal of Geotechnical Engineering*. 117(9), 1363-1381.

[29] ([http://peer.berkeley.edu/peer\\_ground\\_motion\\_database](http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database)).

[30] Bardet, J. and Tobita, T. (2001). *NERA, A computer program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of layered soil deposits*. Univ. of Southern California.