

The Effects of Nonlinear Behavior of Soil and Foundation Uplift on Seismic Response of Inelastic SDOF Structures

Amir Hossein Jafarih^{1*}, Mohammad Ali Ghannad²

1- Assistant Professor, Department of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

2- Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

In this research the simultaneous effects of foundation uplift and nonlinear behavior of soil are investigated. Previous studies have showed that the effects of soil-structure interaction on seismic performance can be described through introducing a limited number of non-dimensional parameters. In most studies it was assumed that the foundation is bonded to the soil and the behavior of the soil was considered to be linear or equivalent linear. In this study it is showed that this concept can be extended to the nonlinear soil-structure systems by introducing number of new non-dimensional parameters. The main goal of this investigation is to study the variations of nonlinear displacement and ductility of nonlinear soil-structure systems. To achieve this goal, the structure is considered as a nonlinear single degree of freedom with concentrated mass which mounted on rigid foundation rested on distributed dampers and springs. Then the variations of the response of nonlinear soil-structure systems are assessed by conducting nonlinear time history analyses for a wide range of non-dimensional parameters. It is shown that the total displacement of soil-structure systems increases because of nonlinear soil behavior but the ductility of the structure as a part of soil-structure system decreases in comparison to the systems with linear soil behavior. So in this study, it is proposed to decrease the safety factor for the design of foundation. Since the permanent settlement of foundation is an important index in performance of soil-structure systems, therefore it was calculated for some applicable systems and it is shown that although the permanent settlement of the foundation increases by decreasing safety factor of foundation but the value of permanent settlement is acceptable for ordinary systems.

ARTICLE INFO

Receive Date: 12 March 2019

Revise Date: 10 June 2019

Accept Date: 20 June 2019

Keywords:

*Nonlinear soil-structure-
interaction*

*Nonlinear displacement-ratio
ductility*

Safety factor

Permanent settlement

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.174887.1803

*Corresponding author: Amir Hossein Jafarih

Email address: ah.jafarih@umz.ac.ir

تاثیر رفتار غیرخطی خاک و بلند شدن فونداسیون بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های تکدرجه آزادی غیرارتجاعی

امیرحسین جعفریه^{۱*}، محمدعلی قناد^۲

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

در این مطالعه اثر همزمان بلندشدگی فونداسیون و رفتار غیرخطی در سازه و خاک بر روی عملکرد سیستم‌های خاک و سازه بررسی شده است. مطالعات گذشته نشان داده است که تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها از طریق معرفی تعدادی پارامتر بدون بعد قابل بررسی می‌باشد. به طور کلی اکثر مطالعات انجام شده در این زمینه با این پیش فرض انجام شده است که فونداسیون اجازه بلندشدگی نداشته و عمدتاً رفتار خاک خطی و یا خطی معادل فرض شده است. در این تحقیق نشان داده شده است که این مفهوم با معرفی تعدادی پارامتر بدون بعد جدید، قابل بسط برای سیستم‌های غیرخطی خاک و سازه می‌باشد. محور اصلی این تحقیق بر مطالعه تغییرات نسبت تغییرمکان غیرارتجاعی و شکل پذیری سازه، به عنوان بخشی از سیستم خاک و سازه، برای این نوع سیستم‌ها قرار داده شده است. بدین منظور سازه به صورت یک مدل تکدرجه آزادی با رفتار غیرارتجاعی دوخطی در نظر گرفته شده است که بر روی فونداسیون صلب واقع بر فنرهای غیرارتجاعی و میراگرهای گسترده وینکلر قرار دارد. تاثیر رفتار غیرخطی خاک بر روی پاسخ سیستم‌های خاک و سازه به صورت پارامتریک از طریق انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی برای محدوده وسیعی از سیستم‌ها با مشخصات مختلف بررسی شده است. مشاهده شد که اگر چه تغییرمکان کل سیستم خاک و سازه به دلیل رفتار غیرخطی خاک افزایش می‌یابد، اما به طور کلی شکل پذیری سازه به عنوان بخشی از سیستم خاک و سازه نسبت به حالتی که رفتار خاک الاستیک فرض می‌شود، کاهش می‌یابد. از آنجا که نشست ماندگار در زیر فونداسیون از نظر عملکرد سیستم خاک و سازه دارای اهمیت می‌باشد لذا این شاخص مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد گرچه با کاهش ضریب اطمینان خاک نشست ماندگار افزایش می‌یابد اما برای مدل‌هایی با مشخصات کاربردی مقدار آن در محدوده قابل قبول می‌باشد.

کلمات کلیدی: اندرکنش غیر خطی خاک و سازه، نسبت تغییرمکان غیرخطی، شکل پذیری، ضریب اطمینان، نشست ماندگار

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.174887.1803	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.174887.1803	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	۱۳۹۸/۰۳/۳۰	۱۳۹۸/۰۳/۳۰	۱۳۹۸/۰۳/۲۰	۱۳۹۷/۱۲/۲۱
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				امیرحسین جعفریه		
				ah.jafari@umz.ac.ir		

۱- مقدمه

عملکرد مناسب سازه‌ها در زمان وقوع زلزله در زمره اهداف اصلی روش‌های طراحی سازه قرار داشته است. برای این منظور آیین‌نامه‌ها جهت طراحی لرزه‌ای سازه‌ها شکل گرفته است. عموماً در روش‌های ارائه شده توسط این آیین‌نامه‌ها به منظور تحلیل دینامیکی و طراحی سازه‌ها از انعطاف‌پذیری خاک صرف‌نظر می‌گردد. اما واضح است که وجود خاک در زیر سازه منجر می‌گردد که سیستم جدیدی با خواص دینامیکی و در نتیجه پاسخ دینامیکی متفاوتی بوجود آید. تلاش‌های زیادی توسط محققین در زمینه طراحی سازه با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه انجام گرفته است. مطالعات صورت گرفته در این زمینه را می‌توان به سه مجموعه تقسیم نمود. در مجموعه اول، رفتار سازه بصورت ارتجاعی و رفتار خاک بصورت ارتجاعی و یا ارتجاعی معادل در نظر گرفته شده است. در زمینه رفتار ارتجاعی سازه، در یک مطالعه تحلیل مودال سیستم خاک و سازه تحت اثر بارگذاری زلزله و باد بررسی شده است [1]. در این تحقیق سختی و میرایی با توجه به خاک زیر فونداسیون برای هر مود ارتعاشی تعیین شده است. در مطالعه دیگری نشان داده شده است که پاسخ سیستم خاک و سازه تحت اثر زلزله را می‌توان همانند سازه بر بستر صلب با در نظر گرفتن تنها چند مود اول ارتعاشی بدست آورد، در حالی که روش پیشنهادی دارای پارامترهای مجهول کمتری بوده و کارآمدتر می‌باشد [2]. سپس در ادامه مدل تکدرجه آزادی با خصوصیات مود اول سازه فوقانی جایگزین سازه شده و از آن برای بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه استفاده گردید و از این طریق پارامترهای موثر بر پدیده اندرکنش خاک و سازه را شناسایی نمودند [3]. این سیستم تکدرجه آزادی معادل اساس ضوابطی گردید که در ATC3-06 [4] بیان شده است. در این دستورات عمل مود اول ارتعاشی تحت تاثیر اندرکنش خاک و سازه قرار گرفته و از اثر اندرکنش بر مودهای بالاتر صرف‌نظر می‌گردد. پیوند طبیعی سیستم خاک و سازه با استفاده از یک مدل ساده تکدرجه آزادی برای سازه محاسبه می‌شود. علاوه بر آن، ضریب میرایی سیستم خاک و سازه بر اساس میزان تغییر ایجاد شده در پیوند طبیعی سیستم و نسبت ابعادی ارتفاع به بعد فونداسیون محاسبه می‌گردد. با کمک این ضوابط، طراحانی که مایلند اثر اندرکنش خاک و سازه را در روند طراحی در نظر بگیرند، از طریق اصلاح برش پایه با استفاده از ضوابط و نمودارهای ارائه شده، این اثر را در طراحی لحاظ می‌نمایند.

در مجموعه دوم تحقیقات، رفتار سازه بصورت غیرارتجاعی در نظر گرفته می‌شود ولی برای خاک همچنان رفتار ارتجاعی و یا ارتجاعی معادل لحاظ می‌گردد. در این مجموعه می‌توان به مطالعاتی اشاره نمود که در آن با ثابت در نظر گرفتن مقادیری از قبیل ارتفاع سازه، ابعاد پی، جرم سازه، اثر اندرکنش خاک و سازه را روی رفتار غیرخطی سازه‌های واقع بر روی خاک‌هایی با مقاومت برشی متفاوت بررسی نموده‌اند. نتایج این مطالعات نشان داد که برای خاک‌هایی با مقاومت برشی کم و برای سازه‌های با پیوند کوتاه، نیروی مقاوم مورد نیاز افزایش می‌یابد [5]. تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر روی ضریب کاهش مقاومت و نسبت غیرارتجاعی تغییرمکان نیز مورد بررسی قرار گرفته است [6]. در این تحقیق نشان داده شده است که تقاضای مقاومت لرزه‌ای که بر مبنای مطالعات سازه‌های شکل‌پذیر در حالت پایه صلب تعیین می‌گردد متفاوت با مقادیر مورد نیاز برای همان سازه‌ها می‌باشد، وقتی روی خاک قرار می‌گیرند. این تفاوت می‌تواند هم در جهت محافظه‌کارانه بوده و هم غیرایمن باشد. بر مبنای مطالعات دیگری نشان داده شده است که تقاضای شکل‌پذیری سازه به عنوان قسمتی از سیستم خاک و سازه، نسبت به حالت پایه صلب تغییر می‌کند. انعطاف‌پذیری تکیه‌گاه باعث افزایش تغییر مکان و کاهش شکل‌پذیری کلی سیستم خاک و سازه نیز می‌شود [7]. همچنین تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر باعث کاهش تقاضای مقاومت برای رسیدن به یک شکل‌پذیری معین می‌گردد که این موضوع را می‌توان به دلیل نسبت میرایی بالای سیستم با توجه به میرایی تشعشعی خاک دانست. به بیان دیگر سازه‌هایی که بر اساس مفهوم تکیه‌گاه صلب طراحی می‌شوند اگر بر روی خاک نرم واقع شوند عموماً شکل‌پذیری کمتری را طلب می‌کنند.

در مجموعه سوم تحقیقات، رفتار سازه هم بصورت ارتجاعی و هم غیرارتجاعی در نظر گرفته می‌شود، ولی تمرکز این مطالعات بر روی مدلسازی خاک جهت در نظر گرفتن بلندشدگی فونداسیون و همچنین تسلیم شدن خاک زیر فونداسیون می‌باشد. در این راستا، مطالعات اولیه عمدتاً به بررسی تاثیر بلندشدگی فونداسیون بر پاسخ و تقاضای لرزه‌ای سیستم‌های خاک و سازه پرداخته‌اند در حالیکه خاک زیر فونداسیون صلب و یا ارتجاعی در نظر گرفته شده است. در این زمینه، در سال ۱۹۷۵ برش در حالت پایه صلب با حالتی که فونداسیون اجازه بلندشدگی دارد، برای مدل‌های تکدرجه آزادی مقایسه شده است. نتایج نشان داد برش طراحی در اثر بلندشدگی کاهش می‌یابد و این

کاهش با افزایش نسبت لاغری بیشتر می‌گردد [۸]. در سال ۱۹۷۶ مدلی برای خاک به منظور در نظر گرفتن بلندشدن فونداسیون ارائه شده است [۹]. در این شیوه مدلسازی، پس از جدا شدن قسمتی از فونداسیون از خاک زیرین، برای بخشی از فونداسیون که در تماس با خاک می‌باشد سختی در راستای افقی، قائم و چرخشی تخمین زده می‌شود. این مدل در سال ۱۹۷۸ برای چند سازه راکتور، دودکش و قاب دو بعدی به کار رفته است [۱۰]. براساس نتایج بدست آمده، بلندشدن فونداسیون باعث کاهش تقاضای برش پایه و پاسخ شتاب می‌گردد. در سال ۱۹۸۱ تحلیل‌هایی برای چند مدل سازه‌ای که هسته مرکزی (شامل دیوار برشی و سیستم مهاربندی) آنها دچار بلندشدگی می‌گردد صورت گرفت [۱۱]. نتایج تحقیق نشان داد که در این سیستم‌ها برش پایه کاهش یافته و توزیع خرابی در اثر بلندشدگی بهبود یافته است. در سالهای ۱۹۸۴ [۱۲] و ۱۹۸۵ [۱۳] مطالعاتی در مورد پاسخ چرخشی سیستم تکدرجه آزادی و چند درجه آزادی به منظور در نظر گرفتن بلندشدگی فونداسیون انجام شد. بر اساس نتایج اولیه مدلسازی، انعطاف پذیری فونداسیون و بلندشدگی تاثیر کمی بر روی مودهای بالای ارتعاشی دارد. همچنین تقاضای برش پایه طراحی با در نظر گرفتن بلندشدگی کاهش می‌یابد و این کاهش در پیوندهای کوتاه بیشتر بوده و تاثیر در نظر گرفتن اثر آن نیز ناچیز می‌باشد. در ادامه این مطالعه روابطی جهت در نظر گرفتن تاثیر بلندشدگی فونداسیون جهت تخمین تقاضای برش پایه برای سیستم‌هایی که فونداسیون آنها اجازه بلندشدگی دارد، ارائه گردید. در سال ۱۹۸۷ با استفاده از فنرهای ارتجاعی با میراگرهای ویسکوز در پایه دیوار برشی سازه مزایای بلندشدگی فونداسیون در طول زلزله بررسی شد [۱۴]. در این تحقیق سازه بصورت دیوار برشی با رفتار غیرخطی حلقوی از نوع سختی کم شونده مدل شده است. بر اساس نتایج این مطالعه در حالتی که پیوند حرکت چرخشی بزرگتر از پیوند سیستم پایه صلب باشد بلندشدن فونداسیون باعث کاهش تقاضای شکل‌پذیری سازه می‌گردد. در سال ۱۹۹۱ با استفاده از ترکیب مدل المان محدود و المان مرزی تحقیقاتی بر روی پاسخ سازه تحت اثر بار لرزه‌ای صورت گرفته است [۱۵]. نتایج مطالعه بر روی یک سازه تحت زلزله السنترو نشان داده است که در اثر بلندشدگی فونداسیون، نیروهای لرزه‌ای وارد بر سازه به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۰۲ بلندشدن فونداسیون با توجه به تغییرمکان‌های بزرگ مورد بررسی قرار گرفت که در آن معادلات حرکت برای مدل تکدرجه آزادی بر روی بستر صلب نوشته شده است [۱۶]. در این مطالعه تحریک قائم نیز در نظر گرفته شده و نشان داده شده است که تاثیر آن بر بلندشدن فونداسیون بسیار قابل ملاحظه می‌باشد. از نتایج این مطالعه کاهش تقاضای برش پایه بدلیل بلندشدگی فونداسیون می‌باشد.

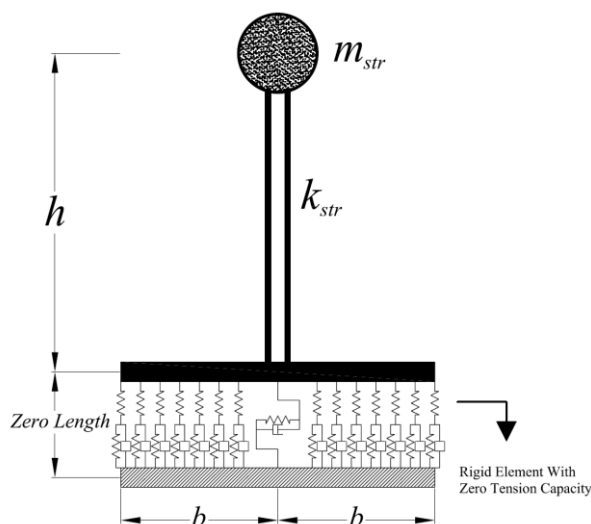
به منظور بررسی تاثیر توامان بلندشدگی فونداسیون و تسلیم شدن خاک زیر آن بر روی پاسخ لرزه‌ای سیستم‌های خاک و سازه، در سال ۲۰۰۴، تحقیقاتی بر روی اندرکنش غیرخطی خاک و سازه با استفاده از مدل المان محدود انجام گردید [۱۷]. در این مطالعه نشان داده شد که در طول زلزله به دلیل حرکت رفت و برگشت، افزایش شتاب تنها برای مدت کسری از ثانیه تا مقداری بیشتر از شتاب استاتیکی مقاوم در مقابل واژگونی، قابل تحمل می‌باشد. مطالعات دیگری بر روی بلندشدگی فونداسیون سازه‌های صلب لاغر انجام گردید [۱۸]. در این تحقیق پاسخ سازه صلب هم بر روی یک بستر صلب و هم بر روی محیط ارتجاعی پیوسته بررسی شده است. شیوه برخورد، در نظر گرفتن تغییرمکان‌های بزرگ به منظور مدلسازی رفتار سازه حتی در آستانه واژگونی می‌باشد و پارامترهای تاثیرگذار در این زمینه بررسی شد. بر اساس نتایج این مطالعه شتاب نظیر واژگونی برای مدل مورد بررسی تحت انواع پالس تحریک تعیین گردید و نشان داده شد با افزایش فرکانس تحریک، بلوک مورد نظر می‌تواند شتاب‌هایی بسیار بزرگتر از شتاب نظیر واژگونی در حالت بارگذاری استاتیکی را تحمل نماید. در سال ۲۰۰۶ تحقیقاتی برای بررسی تاثیر بلندشدگی فونداسیون بر روی روش‌های طراحی لرزه‌ای و بررسی عملکرد سیستم‌های خاک و سازه انجام شده است [۱۹]. طبق این تحقیق بلندشدگی فونداسیون و تسلیم شدن خاک در زیر آن می‌تواند با ایجاد رفتار غیرخطی و استهلاک بیشتر انرژی باعث کاهش تقاضای لرزه‌ای در سیستم گردد. در این تحقیق با تحلیل مدل‌های مختلف خاک و سازه تحت رکوردهای زلزله روابط موجود در زمینه نسبت تغییر مکان غیرارتجاعی به منظور در نظر گرفتن بلندشدن فونداسیون و تسلیم شدن خاک بررسی و اصلاح گردید. در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از روش تحلیل دینامیکی فزاینده تاثیر بلندشدگی فونداسیون بر روی عملکرد غیرخطی سازه پل واقع بر فونداسیون غیرارتجاعی بررسی و مشاهده شد که بلندشدگی باعث کاهش تقاضای شکل‌پذیری در سیستم می‌گردد [۲۰]. همچنین بررسی احتمالاتی پایداری ستونهای دارای مفصل غیرارتجاعی واقع بر فونداسیون نشان داد که سیستم‌هایی که دارای حرکت چرخشی در فونداسیون می‌باشند بسیار پایدارتر بوده و با روشهای متداول نمی‌توان تقاضای جابجایی نسبی و برش پایه را در آنها پیش‌بینی نمود [۲۱].

همچنین در مطالعاتی بصورت پارامتریک تاثیر بلند شدن فونداسیون بر نسبت تغییر مکان غیر ارتجاعی سیستم خاک و سازه و شکل پذیری سازه به عنوان بخشی از سیستم خاک و سازه پرداخته شد [۲۲-۲۳]. در این مطالعات نشان داده شده که با معرفی چند پارامتر می توان رفتار این نوع سیستم ها را تفسیر نمود. بطور کلی بدلیل بلند شدن فونداسیون تغییر مکان کل سیستم خاک و سازه افزایش می یابد اما شکل پذیری آن به عنوان بخشی از سیستم خاک و سازه کاهش می یابد. این تغییرات با افزایش نسبت پر یود سیستم خاک و سازه بیشتر می گردد. اما در این مطالعات رفتار خاک کاملاً ارتجاعی در نظر گرفته شده است در حالی که کشش تحمل نمی کند. این در حالیست که خاک تحت تحریکهای لرزه ای می تواند بصورت قابل ملاحظه ای دارای رفتار شدیداً غیر ارتجاعی باشد.

در یک جمع بندی کلی، بر اساس نتایج مطالعات مورد بررسی در نظر گرفتن بلند شدن فونداسیون همراه با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی خاک می تواند باعث تغییر در تقاضای شکل پذیری و عملکرد لرزه ای در سازه ها گردد. در طول زلزله های شدید اندرکنش خاک و فونداسیون می تواند موجب ایجاد رفتار غیر خطی در خاک گردد. بنابراین فونداسیون توانایی میرا نمودن بخش عمده ای از انرژی را دارا خواهد بود. لذا در این مطالعه تاثیر همزمان بلند شدن فونداسیون و رفتار غیر خطی خاک بر روی عملکرد لرزه ای سیستم های خاک سازه مورد بررسی قرار می گیرد. بدین منظور با معرفی پارامترهای کلیدی تاثیر گذار، عملکرد لرزه ای طیف گسترده ای از سیستم های خاک و سازه مورد ارزیابی قرار می گیرد و تغییرات پاسخ سیستم های خاک و سازه بدلیل بلند شدن فونداسیون و رفتار غیر خطی خاک با تغییر پارامترهای بدون بعد موثر تفسیر می گردد.

۲- سیستم های خاک و سازه

مدل مورد استفاده برای بررسی سیستم های خاک و سازه در این مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. در این تحقیق مدل سازه با یک سیستم یک درجه آزادی جایگزین شده است. مشخصات دینامیکی برای این سیستم به قرار زیر می باشد. T_{str} پر یود سازه با پایه صلب و k_{str} میرایی سازه فرض می شود. این خصوصیات نماینده مشخصات یک سازه با پایه صلب با در نظر گرفتن مود اول ارتعاشی می باشد. جرم موثر این سازه برابر با m_{str} و ارتفاع موثر آن برابر با h می باشد. این سازه بر روی یک فونداسیون سطحی گسترده صلب قرار داده شده است. نحوه قرار گیری فنرهای خاک در زیر فونداسیون بصورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: مدل در نظر گرفته شده برای سیستم های خاک و سازه

جهت بررسی رفتار سیستم های خاک و سازه در زیر فونداسیون فنر و میراگرهای خاک به صورت گسترده (وینکلر) قرار گرفته اند. مقادیر مربوط به ضرایب این فنر و میراگرها مستقل از دامنه تغییر مکان و فرکانس در نظر گرفته شده است. جهت مدل سازی سختی افقی خاک یک فنر و میراگر موازی به صورت متمرکز در وسط فونداسیون قرار داده شده است. مقادیر محاسبه شده برای سختی فنر و میرایی

میراگرها با استفاده از روابط ارائه شده برای فونداسیون سطحی محاسبه شده است [۲۴]. این مقادیر برای سختی جانبی خاک از روابط زیر بدست می آید:

$$k_x = \frac{8}{2-\nu} Gr_x \quad (1)$$

$$c_x = \frac{\pi}{8} (2-\nu) \frac{r_x}{V_s} k_x \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲) V_s ، G و ν بترتیب مدول برشی، سرعت موج برشی و ضریب پواسون خاک می باشند. $r_x = \sqrt{A_f / \pi}$ شعاع معادل فونداسیون برای حرکت جانبی می باشد که با استفاده از A_f مساحت فونداسیون محاسبه می گردد.

همانطور که در شکل (۱) نمایش داده شده است برای مدلسازی رفتار خاک در راستای قائم از المانی استفاده می شود که شامل مجموعه ای از فنر و میراگرهای موازی قائم برای مدلسازی سختی قائم و چرخشی خاک مورد استفاده قرار گرفته اند. این شیوه مدلسازی اجازه می دهد تا فونداسیون از روی سطح خاک جدا شده و همچنین می توان رفتار غیر خطی برای خاک زیر فونداسیون در نظر گرفت. این فنر و میراگرها به گونه ای توزیع شده اند تا خصوصیات دینامیکی سیستم های خاک و سازه مانند پیروید و میرایی قبل از بلندشدگی و ایجاد رفتار غیرخطی در خاک، با مقادیر نظیر آنها در حالتی که فنر چرخشی به صورت متمرکز قرار داده می شود برابر باشد. مقادیر سختی چرخشی و میرایی چرخشی در نظر گرفته شده برای سیستم های خاک و سازه در روابط (۳) و (۴) ارائه شده است.

$$k_\theta = \frac{8}{3(1-\nu)} Gr_\theta^3 \quad (3)$$

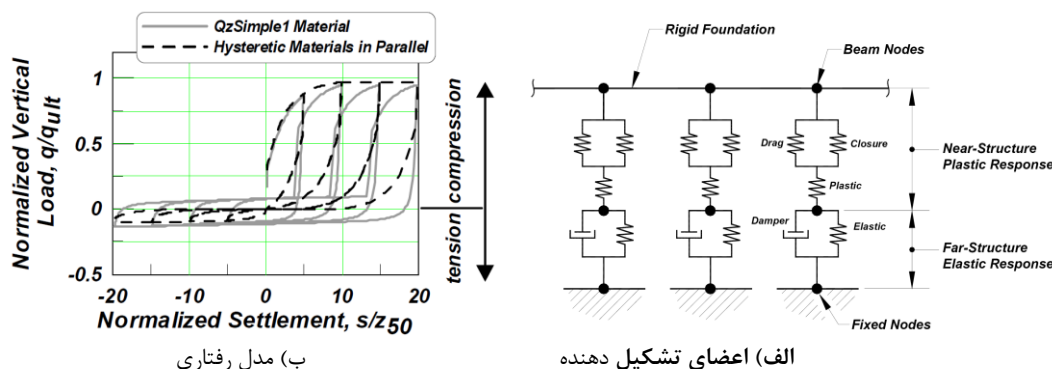
$$c_\theta = \frac{3\pi}{16} (1-\nu) \frac{r_\theta}{V_s} k_\theta \quad (4)$$

در روابط فوق $r_\theta = \sqrt[4]{4I_f / \pi}$ شعاع معادل فونداسیون برای حرکت چرخشی می باشد که با استفاده از I_f ممان اینرسی فونداسیون حول محور چرخش قابل محاسبه می باشد.

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است مدل فونداسیون به صورت تیر صلب بر روی فنرهای گسترده وینکلر در نظر گرفته شده است. به منظور مدلسازی خاک با رفتار غیرخطی خاک در برنامه OpenSees [۲۵] مدل های رفتاری QZ، Py و Tz ارائه شده است. این مدل های رفتاری بر اساس نتایج آزمایش های متعدد برای پی سطحی بدست آمده است. از این مدل های رفتاری به ترتیب برای مدلسازی رفتار نیرو-تغییر مکان در جهت قائم، رفتار نیرو-تغییر مکان به علت نیروی غیر فعال در جهت افقی و رفتار برش-لغزش در زیر پی استفاده می شود. این مدل قادر است غیرخطی شدن خاک و بلندشدن فونداسیون را در نظر بگیرد. در این مطالعه از مدل رفتاری QZ برای مدلسازی رفتار فونداسیون در راستای قائم استفاده شده است. همچنین فرض بر این است که فونداسیون سطحی بوده و در راستای افقی لغزشی رخ نمی دهد. لذا یک فنر ارتجاعی که به مرکز فونداسیون متصل می باشد، جهت مدلسازی رفتار خاک در راستای افقی در نظر گرفته شده است.

این شیوه در مدلسازی و تحلیل سیستم های شمعی بسیار کاربرد دارد، اما با توجه به شباهت رفتار آن با پی سطحی تنها با اصلاح تعدادی از پارامترها می توان آن را برای پی های سطحی کالیبره نمود [۲۶]. مطابق شکل (۲) این مدلسازی به چهار قسمت، که در پاسخ حوزه نزدیک و دور مشارکت دارند تقسیم می شود. این قسمت ها عبارتند از [۲۷]: ۱ - قسمت ارتجاعی که نماینده تغییر شکل حوزه دور خاک می باشد. ۲ - قسمت غیرارتجاعی که نماینده بخشی از خاک می باشد که در نزدیکی فونداسیون تسلیم می شود. ۳ - قسمت دیگر

شامل المانهای بازشونده در زیر فونداسیون می باشد که به منظور مدلسازی جداشدن فونداسیون از خاک بکار می رود. ۴- به منظور انتقال نیرو از کناره های فونداسیون، المان کششی که جهت مدلسازی در نظر گرفته شده است. این مدلسازی با مدل ارائه شده در سال ۱۹۹۹ مطابقت دارد [۲۶].



شکل ۲: اجزای تشکیل دهنده فنرهای وینکلر که دارای مدل رفتاری Qz می باشد [۲۷].

۳- معرفی پارامترهای بدون بعد

اساساً پاسخ سیستم های خاک و سازه به ابعاد و اندازه سازه، خصوصیات دینامیکی، نوع خاک و البته شدت و محتوای فرکانسی تحریک ورودی بستگی دارد. همچنین براساس مطالعات گذشته پاسخ ارتجاعی سیستم های خاک و سازه با جایگزینی یک سیستم پایه صلب با پیرو بلندتر نظیر سیستم خاک و سازه (T_{ssi}) و میرایی اصلاح شده (ξ_{ssi}) قابل بررسی می باشد. در استانداردهای ASCE 41-06 [۲۸] و ASCE 7-10 [۲۹] روشی برای محاسبه افزایش پیرو و میرایی معادل سیستم های خاک و سازه با استفاده از نسبت افزایش پیرو (T_{ssi}/T_{str}) و نسبت ابعادی سیستم خاک و سازه (نسبت ارتفاع سازه به ابعاد فونداسیون) ارائه شده است [۳۰]. بطور کلی از پارامترهای بدون بعد یعنی نسبت افزایش پیرو T_{ssi}/T_{str} و نسبت ابعادی ارتفاع موثر به نصف بعد فونداسیون h/b به عنوان پارامترهای بدون بعد کلیدی برای مطالعه و تفسیر پاسخ مربوط به سیستم های خاک و سازه استفاده می شود.

اما بلندشدگی فونداسیون نوعی رفتار غیرخطی هندسی در سیستم ایجاد می نماید. لذا لازم است پارامتری جهت معرفی این پدیده و تاثیر آن بر رفتار سیستم خاک و سازه تعریف شود [۲۲-۲۳]. این پارامتر جدید شاخص بلندشدگی نامیده شده و به شکل رابطه (۵) تعریف می گردد.

$$R_d = \frac{(F_{el})_{NoUplift}}{P_{iu}} \quad (5)$$

در رابطه (۵) صورت کسر برابر با میزان تقاضای مقاومت ارتجاعی لازم می باشد. این مقدار برابر با مقاومت لازم برای سازه است تا تحت یک تحریک مشخص ارتجاعی باقی بماند. مخرج کسر نیز برابر با نیروی لازم برای شروع بلندشدگی است. با توجه اینکه $P_{iu} = m_{str}gb/3h$ [۲۲-۲۳] تنها تابعی از جرم و مشخصات ابعادی سازه است می توان اینگونه بیان کرد که پارامتر R_d به گونه ای نماینده بزرگی تحریک مورد نیاز برای ایجاد بلندشدگی در یک سیستم مشخص خاک و سازه می باشد. اگر برای سازه به صورت ساده یک مدل رفتاری دو خطی در نظر گرفته شود، آنگاه با توجه به مقدار مقاومت تسلیم سازه (F_y) نسبت به برش پایه لازم برای شروع بلندشدگی ($P_{iu} = mgb/3h$) و واژگونی ($P_{over} = mgb/h$)، ۳ حالت مختلف می توان برای سیستم خاک و سازه در نظر گرفت. مطابق شکل (۳) این ۳ حالت عبارت خواهند بود از:

i. $F_y < P_{iu}$: حالتی که بدلیل تسلیم شدن زود هنگام سازه، بلندشدگی فونداسیون رخ نمی دهد.

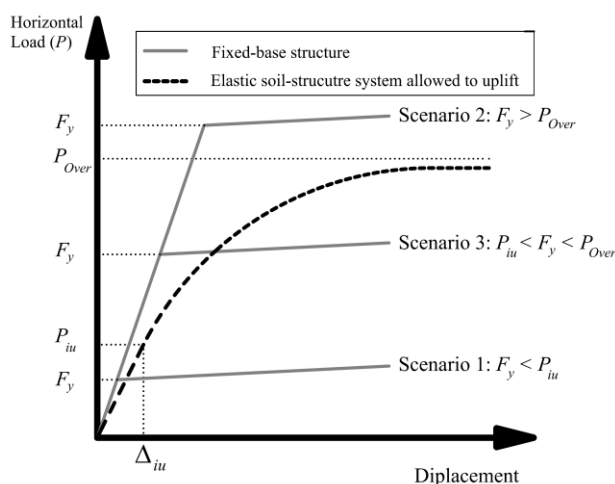
ii. $F_y > P_{over}$: در این حالت امکان رخداد رفتار غیرارتجاعی در سازه وجود ندارد.

iii. در این حالت بلندشدگی فونداسیون و رفتار غیرخطی در سازه همزمان رخ می دهد.

با توجه به حالات فوق پارامتر بدون بعد دیگری لازم است تا مشخص شود کدام حالت برای سیستم اتفاق خواهد افتاد. این پارامتر که با استفاده از رابطه (۶) تعریف می گردد، نسبت مقاومت R_f نامیده می شود:

$$R_f = \frac{F_y}{P_{iu}} \quad (۶)$$

از آنجا که هدف این مطالعه بررسی همزمان رفتار غیرارتجاعی سازه و بلندشدن فونداسیون و تسلیم شدن خاک می باشد، سناریوی سوم ذکر شده در بالا مورد نظر می باشد. همچنین با توجه به تعاریف صورت گرفته برای P_{iu} روشن است که برای اینکه رفتار غیرارتجاعی در سازه و بلندشدگی به صورت توامان رخ دهد R_f باید دارای مقادیری بین ۱ تا ۳ باشد.



شکل (۳): حالات مختلف تسلیم سازه برای یک سیستم خاک و سازه که اجازه بلندشدگی دارد [۲۳].

جهت بررسی تاثیر توامان رفتار غیرخطی خاک و بلندشدگی فونداسیون، میزان غیرخطی شدن خاک با معرفی یک پارامتر بدون بعد کنترل می گردد. در این راستا ضریب اطمینان خاک زیرین در راستای قائم تحت بار ثقلی به صورت زیر معرفی می گردد:

$$FS = \frac{4q_{ult}b^2}{mg} \quad (۷)$$

لازم به ذکر است که در رابطه (۷) b نصف بعد فونداسیون مربعی به ابعاد $2b \times 2b$ ، وزن سازه mg و ظرفیت نهایی خاک زیرین می باشد. در این مطالعه سه مقدار برای ضریب اطمینان $FS = 2, 3, 5$ در نظر گرفته شده است تا تاثیر میزان غیرخطی شدن خاک بر پاسخ سازه بررسی گردد. البته باید ذکر نمود که علاوه بر پارامترهای اصلی ذکر شده در بالا، پارامترهای دیگری نیز وجود دارند که دارای اهمیت کمتری می باشند و میتوان بر اساس مقادیر نظیر برای سازه های معمول و کاربردی، مقادیر ثابتی برای آنها در نظر گرفت [۳۰-۳۱]. اولین آنها نسبت جرم می باشد که برابر با نسبت جرم سازه به جرم خاک هم حجم آن می باشد.

$$\gamma = \frac{m_{str}}{\rho \pi r_0^2 h} \quad (۸)$$

در رابطه (۸) ρ چگالی جرمی خاک می باشد. این پارامتر برای سازه های معمول برابر با ۰,۱۵ در نظر گرفته شده است [۶]. ضریب پواسون نیز برای خاک برابر با $\nu = 0.4$ در نظر گرفته شده است. میزان میرایی مصالح برای هم خاک و هم سازه برابر با ۵ درصد

در نظر گرفته شده است. همچنین نسبت جرم فونداسیون به سازه نیز دارای اهمیت می باشد که در این مطالعه برابر با $m_f / m_{str} = 0.1$ در نظر گرفته شده است.

۴- روش انجام تحلیل‌ها

در این تحقیق جهت بررسی پارامتریک پاسخ سیستم های خاک و سازه مجموعه ای از آنالیزهای تاریخیچه زمانی غیرخطی انجام گرفته است. رکوردهای مورد استفاده در این تحقیق ۲۰ رکورد مربوط به خاک نوع C (خاک متراکم یا سنگ نرم با سرعت موج برشی ۳۶۰ تا ۷۶۰ متر بر ثانیه) انتخاب شده است. این رکوردها توسط FEMA-440 [۳۲] ارائه شده است. مشخصات رکوردها در جدول (۱) نمایش داده شده است.

جدول ۱: رکوردهای ثبت شده بر روی خاک نوع C [۳۲]

Number	Date	Earthquake Name	Magnitude (Ms)	Station Name	Station Number	Component (deg)	PGA (cm/s2)
1	10/15/79	Imperial Valley	6.8	El Centro, Parachute Test Facility	5051	315	200.2
2	2/9/71	San Fernando	6.5	Pasadena, CIT Athenaeum	80053	90	107.9
3	2/9/71	San Fernando	6.5	Pearblossom Pump	269	21	133.4
4	6/28/92	Landers	7.5	Yermo, Fire Station	12149	0	167.8
5	10/17/89	Loma Prieta	7.1	APEEL 7, Pulgas	58378	0	153
6	10/17/89	Loma Prieta	7.1	Gilroy #6, San Ysidro Microwave site	57383	90	166.9
7	10/17/89	Loma Prieta	7.1	Saratoga, Aloha Ave.	58065	0	494.5
8	10/17/89	Loma Prieta	7.1	Gilroy, Gavilon College Phys Sch Bldg	47006	67	349.1
9	10/17/89	Loma Prieta	7.1	Santa Cruz, University of California	58135	360	433.1
10	10/17/89	Loma Prieta	7.1	San Francisco, Diamond Heights	58130	90	110.8
11	10/17/89	Loma Prieta	7.1	Fremont, Mission San Jose	57064	0	121.6
12	10/17/89	Loma Prieta	7.1	Monterey, City Hall	47377	0	71.6
13	10/17/89	Loma Prieta	7.1	Yerba Buena Island	58163	90	66.7
14	10/17/89	Loma Prieta	7.1	Anderson Dam, Downstream	1652	270	239.4
15	4/24/84	Morgan Hill	6.1	Gilroy, Gavilon College Phys Sci Bldg	47006	67	95
16	4/24/84	Morgan Hill	6.1	Gilroy #6, San Ysidro Microwave Site	57383	90	280.4
17	7/8/86	Palmsprings	6	Fun Valley	5069	45	129
18	1/17/94	Northridge	6.8	Littlerock, Brainard Canyon	23595	90	70.6
19	1/17/94	Northridge	6.8	Castaic, Old Ridge Route	24278	360	504.2
20	1/17/94	Northridge	6.8	Lake Hughes #1, Fire station #78	24271	0	84.9

به منظور بررسی پاسخ سیستم‌های غیرارتجاعی خاک و سازه، ابتدا پاسخ آنها در حالتی که رفتار سازه و خاک ارتجاعی در نظر گرفته می شود و فونداسیون اجازه بلندشدگی ندارد بررسی شده و سپس پاسخ آنها با حالتی که رفتار غیرارتجاعی در سیستم لحاظ می گردد مقایسه می شود. بدین منظور در گام اول فرض می شود که سازه به صورت ارتجاعی رفتار می کند و فونداسیون نیز اجازه بلندشدگی ندارد و رفتار خاک نیز ارتجاعی است. در این حالت تقاضای مقاومت ارتجاعی لازم $(F_{el})_{NoUplift}$ برای هر سیستم خاک و سازه تحت هر کدام از تحریک‌ها محاسبه می گردد. با توجه به اینکه P_{iu} مشخصه سیستم‌های خاک و سازه مورد بررسی می باشد و مستقل از نوع تحریک است، رکوردهای زلزله مقیاس شده تا مقادیر مورد نظر برای R_d بدست آید. در این تحقیق برای هر سیستم خاک و سازه ۷ مقدار مشخص برای R_d انتخاب شده است ($R_d = 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6$). در گام بعدی رکوردهای مقیاس شده مورد استفاده قرار می گیرند تا سیستم‌های خاک و سازه در چهار حالت بررسی گردند.

حالت ۱: برای سازه و خاک رفتار ارتجاعی در نظر گرفته می شود و فونداسیون اجازه بلندشدگی دارد.

حالت ۲: برای سازه رفتار غیرارتجاعی و خاک رفتار ارتجاعی در نظر گرفته می شود و فونداسیون اجازه بلندشدگی ندارد.

حالت ۳: برای سازه رفتار غیرارتجاعی و خاک رفتار ارتجاعی در نظر گرفته می شود و فونداسیون اجازه بلندشدگی دارد.

حالت ۴: برای سازه رفتار غیرارتجاعی و خاک نیز رفتار غیرارتجاعی در نظر گرفته می شود و فونداسیون اجازه بلندشدگی دارد.

میزان رفتار غیرارتجاعی سازه با ضریب نسبت مقاومت (R_f) کنترل می‌شود. در این مطالعه سه مقدار $1/5$ ، 2 و $2/5$ برای آن در نظر گرفته شده است. در حالت ۴ نیز رفتار غیر ارتجاعی در خاک با نسبت (FS) کنترل می‌گردد و سه مقدار 2 ، 3 و 5 برای آن در نظر گرفته شده است. با توجه به سه حالت در نظر گرفته شده برای تحلیل‌ها نسبت‌های تغییر مکان برای تحلیل‌های متناظر به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$C_{d1} = \frac{(\Delta_{el})_{Uplift}}{(\Delta_{el})_{NoUplift}} \quad (9)$$

$$C_{d2} = \frac{(\Delta_{in})_{NoUplift}}{(\Delta_{el})_{NoUplift}} \quad (10)$$

$$C_{d3} = \frac{(\Delta_{in})_{Uplift}}{(\Delta_{el})_{NoUplift}} \quad (11)$$

$$C_{d4} = \frac{(\Delta_{in})_{Uplift-Nonlinear\&il}}{(\Delta_{el})_{NoUplift}} \quad (12)$$

مخرج کسر در روابط بالا یکسان و برابر بیشینه تغییر مکان سیستم خاک و سازه در حالتی می‌باشد که سازه ارتجاعی بوده و فونداسیون اجازه بلندشدگی نداشته و رفتار خاک نیز ارتجاعی می‌باشد و با توجه به مقدار از پیش تعیین شده برای R_d محاسبه می‌شود.

مقادیر C_{d1} ، C_{d2} و C_{d3} در تحقیقات پیشین مورد مطالعه قرار گرفت [۲۲-۲۳] و تاثیر پارامترهای مختلف بر روی آن مورد بررسی شد. اما در این مطالعات رفتار غیر خطی خاک برای مدلها در نظر گرفته نشده بود. روشن است که وجود رفتار غیرخطی در خاک می‌تواند میزان انرژی ورودی به سازه را تغییر داده در نتیجه بر روی عملکرد سازه تاثیرگذار باشد. لذا در این تحقیق رفتار غیر خطی خاک در مدلسازی لحاظ گردید. در رابطه (۱۲) C_{d4} نسبت تغییر مکان غیرارتجاعی سیستم خاک و سازه در حالتی است که سیستم اجازه بلندشدگی دارد و خاک زیرین به ازای ضریب اطمینان مشخصی (FS) اجازه رفتار غیرارتجاعی دارد، به بیشینه تغییر مکان سیستم خاک و سازه در حالتی که سازه و خاک هر دو ارتجاعی بوده و سیستم اجازه بلندشدگی ندارد.

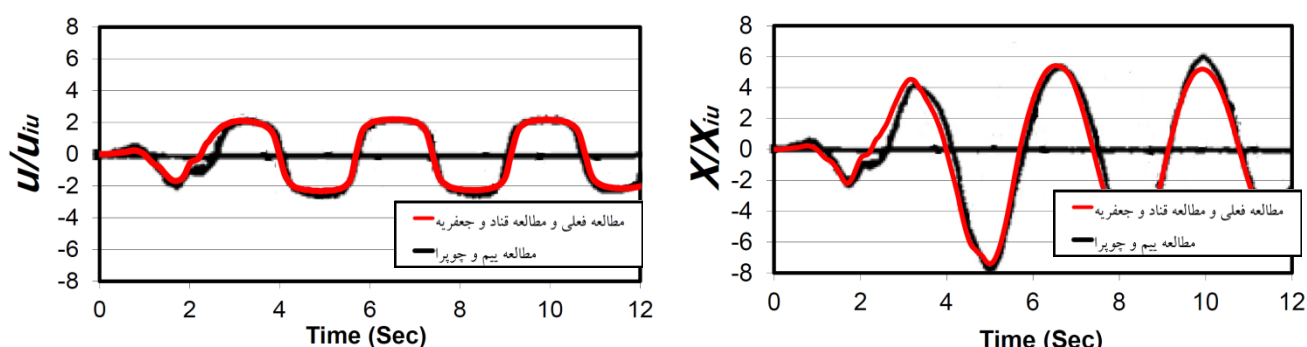
از آنجا که در تحلیل‌های صورت گرفته در این مطالعه تاثیر غیرخطی شدن خاک و بلند شدن فونداسیون بر روی عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های خاک و سازه از طریق ارائه طیف‌های نسبت تغییر مکان غیرارتجاعی و شکل‌پذیری مورد بررسی قرار می‌گیرد، جهت انجام هرگونه تفسیر لازم است شدت تحریک لرزه‌ای در هر طیف برای تمام سیستم‌های مورد بررسی یکسان باشد. لذا در ادامه طیف‌های مذکور برای یک زوج R_d و R_f ثابت و همچنین با توجه به پارامترهای بدون بعد مشخص ارائه می‌گردد.

۴-۱- صحت سنجی پاسخ سیستم‌های خاک و سازه

مدلسازی نشان داده شده در شکل (۱) منطبق با مدل مورد استفاده در مطالعات قناد و جعفریه [۲۲-۲۳] می‌باشد. با این تفاوت که در مدل‌سازی انجام شده در مطالعه جاری برای خاک رفتار غیرارتجاعی لحاظ گردیده است. صحت مدل در نظر گرفته شده در مطالعه فعلی و مطالعات قناد و جعفریه [۲۲-۲۳] با نتایج مربوط به مطالعات انجام گرفته توسط بیم و چوپرا^۱ در سال ۱۹۸۴ [۱۲] کنترل شده است. بدین منظور یک سیستم خاک و سازه با مشخصات زیر در نظر گرفته شده است. پیوند سازه برابر با ۱ ثانیه و نسبت $h/b = 10$ ، میرایی سازه ۵ درصد، میرایی خاک در راستای قائم ۴۰ درصد و پیوند سیستم خاک و سازه برابر با ۲٫۳۹ ثانیه می‌باشد. این سیستم تحت رکورد زلزله السنترو قرار گرفته است و در حالتی که فونداسیون اجازه بلندشدگی دارد پاسخ سیستم خاک و سازه بررسی شده است. به منظور بررسی رفتار بلندشدگی فونداسیون پاسخ سیستم در ۱۲ ثانیه اول رکورد که میزان بلندشدگی فونداسیون قابل ملاحظه می‌باشد در شکل (۴) نمایش داده شده است. در شکل (۴)-الف نسبت تغییر مکان کل سیستم خاک و سازه به تغییر مکان کل در شروع بلند شدگی و

¹ Yim and Chopra

در شکل (۴) -ب نسبت تغییرمکان نسبی داخلی سازه به عنوان بخشی از سیستم خاک و سازه به مقدار نظیر آن در شروع بلندشدگی در دو مطالعه نشان داده شده است. مقایسه نمودارها انطباق مناسب نتایج را نشان می دهد.

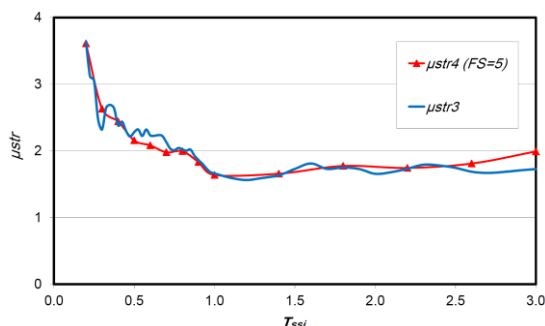


الف: نسبت تغییرمکان کل

ب: نسبت تغییرمکان داخلی سازه به عنوان بخشی از سیستم خاک و سازه

شکل ۴: مقایسه پاسخ سیستم خاک و سازه در مطالعه فعلی و مطالعه قناد و جعفریه [22-23] با مطالعه بیم و چوپرا [۱۲]

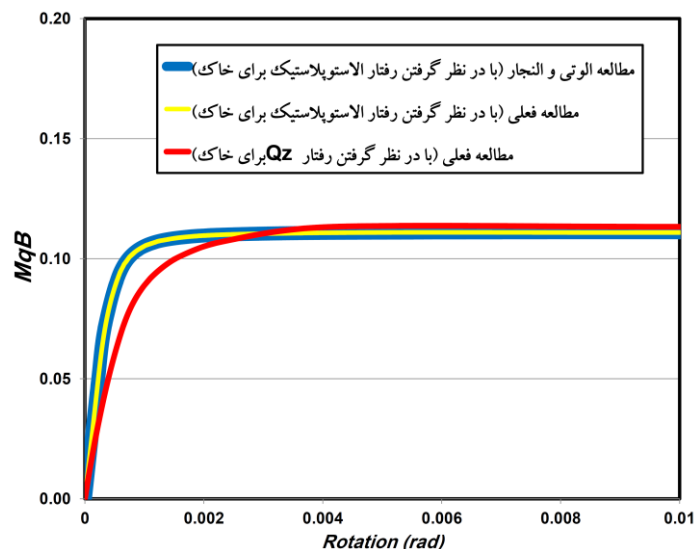
در شکل (۴) رفتار سازه و خاک ارتجاعی در نظر گرفته شده است و فقط فونداسیون اجازه بلندشدگی دارد. در شکل (۵) مدلسازی انجام شده در مطالعه فعلی با مطالعه قناد و جعفریه [۲۳] مقایسه شده است. چنانچه در مطالعه فعلی خاک ارتجاعی در نظر گرفته شود مطابق شکل (۵) نتایج مربوط به شکل پذیری سازه منطبق بر نمودار μ_{str3} مربوط به مطالعه قناد و جعفریه [۲۳] خواهد بود. چنانچه خاک غیرارتجاعی با رفتار QZ در نظر گرفته شود، اما برای ضریب اطمینان خاک مقدار $FS=5$ در نظر گرفته شود تا رفتار خاک در طول تحریک زلزله تقریباً ارتجاعی باقی بماند، شکل پذیری سازه با دقت خوبی به نتایج مربوط به خاک ارتجاعی همگرا می گردد. به منظور بررسی رفتار غیرارتجاعی خاک، در مطالعه الوتی و النجار^۲ [۳۳] روابطی جهت ترسیم منحنی ممان نرمال شده در مقابل چرخش فونداسیون برای فونداسیونهای صلب واقع بر فنرهای غیرارتجاعی خاک (با رفتار الاستوپلاستیک) ارائه شده است. بدین منظور یک فونداسیون به ابعاد $15m \times 15m$ در نظر گرفته شده است. بمنظور افزایش رفتار غیرخطی در خاک، ضریب اطمینان $FS=1.5$ انتخاب شده و شدت سختی قائم خاک در واحد طول برای مدل دو بعدی $k_v = 1.78 \times 10^8 N/m^2$ لحاظ شده است. منحنی ممان-چرخش مدل مورد نظر با استفاده از روابط مطالعه الوتی و النجار [۳۳] در شکل (۶) ترسیم شده است. منحنی ممان-چرخش بدست آمده از مدلسازی در مطالعه فعلی با استفاده از آنالیز استاتیکی غیرخطی در برنامه OpenSees [۲۵] در حالتی که رفتار خاک الاستوپلاستیک در نظر گرفته می شود مطابق شکل (۶) کاملاً منطبق بر منحنی مربوط به روابط الوتی و النجار [۳۳] می باشد. در حالتی که رفتار خاک از نوع QZ در نظر گرفته می شود نیز با دقت خوبی منحنی ترسیم شده منطبق بر منحنی مربوط به روابط الوتی و النجار [۳۳] می باشد. اما باید در نظر داشت در منحنی رفتار QZ با افزایش رفتار غیرخطی سختی خاک به تدریج کاهش می یابد. این در حالیست که هنگامی که رفتار خاک الاستوپلاستیک در نظر گرفته می شود تا رسیدن به مقاومت تسلیم، سختی خاک ثابت می باشد. به همین دلیل شیب اولیه منحنی ممان-چرخش برای خاک با رفتار QZ از خاک با رفتار الاستوپلاستیک کمتر می باشد.



شکل ۵: شکل پذیری سازه به عنوان بخشی از سیستم خاک و سازه

براساس مدلسازی مطالعه فعلی و مطالعه قناد و جعفریه ($h/b=2, T_{ssi}/T_{str}=1.5, R_d=6, R_f=2.5$)

² Allotey and El Naggar

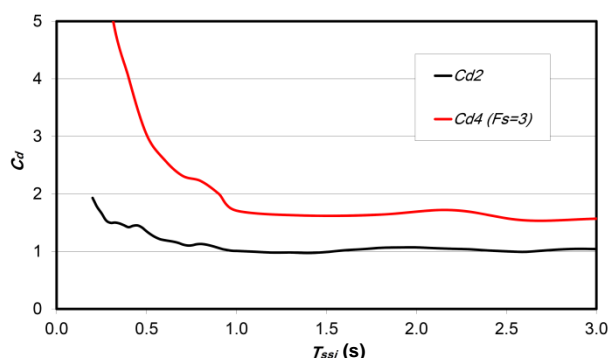


شکل ۶: مقایسه نمودار ممان-چرخش برای مدلسازی در مقاله فعلی و مطالعه الوتی و النجار [33]

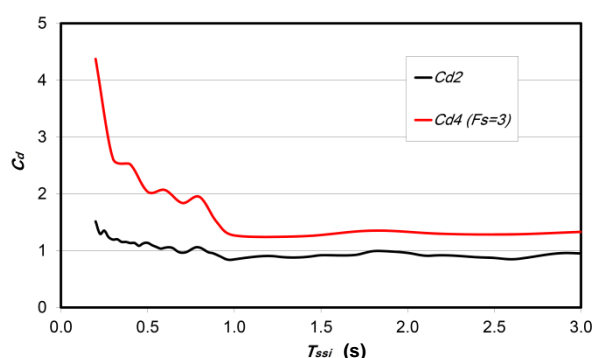
۵- بررسی پاسخ سیستم‌های غیرخطی خاک و سازه

در ادامه مقادیر میانگین C_{d4} و تقاضای شکل‌پذیری سازه و نسبت‌های مختلف پاسخ برای مدل‌های مختلف تحت ۲۰ رکورد ثبت شده بر روی خاک نوع C بررسی شده است. در ابتدا برای چند مدل با مشخصات معین نمودار C_{d4} مربوطه با نمودار C_{d2} نظیر مقایسه می‌گردد تا تاثیر غیرخطی شدن خاک بر روی پاسخ سیستم‌های غیرارتجاعی خاک و سازه مشخص گردد و همچنین تاثیر پارامترهای بدون بعد نیز در حالت رفتار غیرخطی خاک مطالعه شود. در شکل (۷) نمونه‌هایی از C_{d4} در کنار C_{d2} نظیر برای چند نسبت پریود نمایش داده شده است.

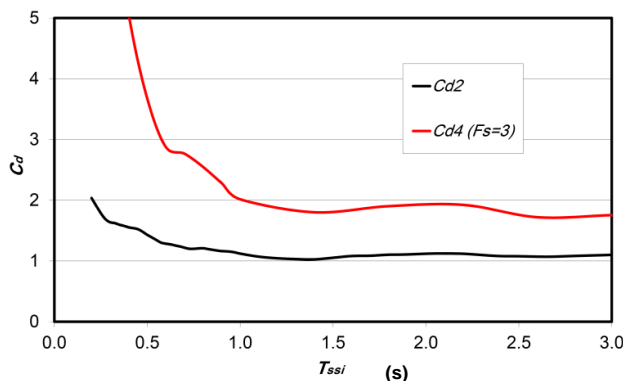
بر اساس نمودارهای نمایش داده شده در شکل (۷)، همانطور که انتظار می‌رود غیرخطی شدن خاک موجب افزایش نسبت تغییرمکان نسبت به حالت خاک ارتجاعی می‌گردد. به عبارت دیگر غیرخطی شدن خاک باعث می‌گردد که تغییرمکان کل سیستم خاک و سازه افزایش یابد. بررسی دقیق تر شکل (۷) نشان می‌دهد که با افزایش نسبت پریود تفاوت C_{d4} نسبت به C_{d3} افزایش می‌یابد. این بدین معنی است که هر چقدر خاک زیرین نسبت به سازه نرم تر بوده و سختی آن کمتر باشد تغییرمکان کل سیستم خاک و سازه به دلیل رفتار غیرخطی خاک بیشتر افزایش می‌یابد.



ب: $T_{ssi}/T_{str} = 1.5$



الف: $T_{ssi}/T_{str} = 1.1$



ج: $T_{ssi}/T_{str} = 2$

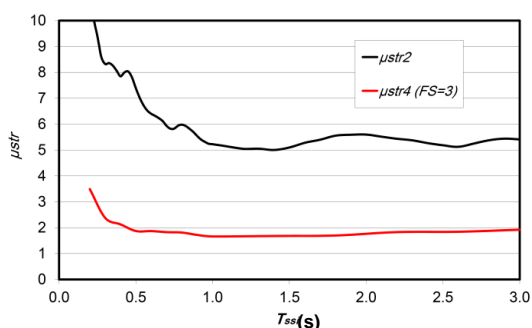
شکل ۷: مقایسه C_{d4} با C_{d2} نظیر جهت بررسی تاثیر نسبت T_{ssi}/T_{str}
 $(h/b = 2, R_d = 6, R_f = 2, FS = 3)$

جهت مطالعه تاثیر غیرخطی شدن خاک بر عملکرد سازه، تقاضای شکل پذیری سازه (به عنوان بخشی از سیستم خاک و سازه) برای سه حالت بررسی می گردد:

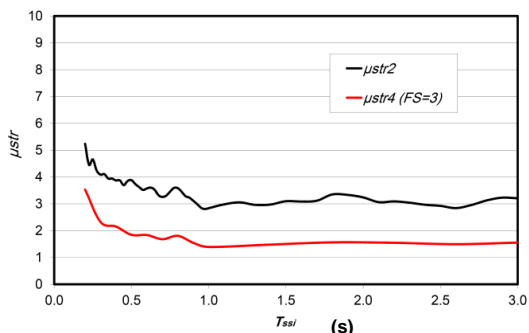
حالت ۱: μ_{str2} مربوط به تقاضای شکل پذیری حالتی است که خاک زیرین دارای رفتار ارتجاعی بوده و فونداسیون اجازه بلندشدگی ندارد.

حالت ۲: μ_{strB} مربوط به تقاضای شکل پذیری حالتی است که خاک زیرین دارای رفتار ارتجاعی بوده و فونداسیون اجازه بلندشدگی دارد. شکل پذیری سازه در این حالت در تحقیقات گذشته بررسی گردیده است [۲۳].

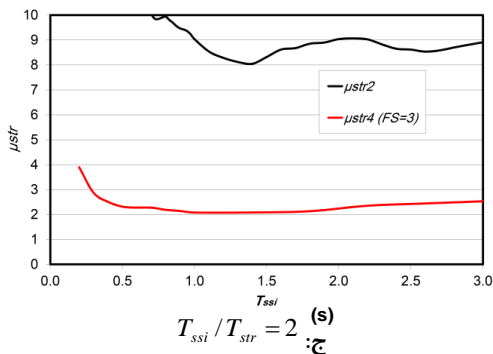
حالت ۳: $\mu_{str4}(FS)$ مربوط به تقاضای شکل پذیری حالتی است که خاک زیرین دارای رفتار غیر ارتجاعی بوده و فونداسیون نیز اجازه بلندشدگی دارد.



ب: $T_{ssi}/T_{str} = 1.5$



الف: $T_{ssi}/T_{str} = 1.1$

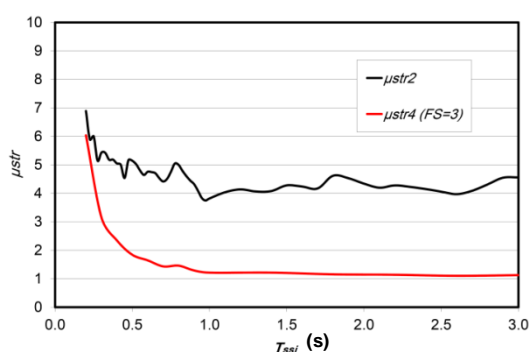


ج: $T_{ssi}/T_{str} = 2$

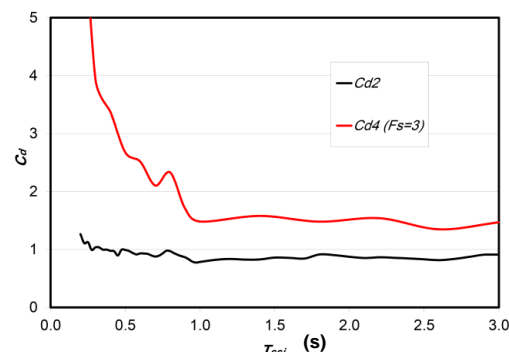
شکل ۸: مقایسه μ_{str4} با μ_{str2} نظیر جهت بررسی تاثیر نسبت T_{ssi}/T_{str}
 $(h/b = 2, R_d = 6, R_f = 2, FS = 3)$

تقاضای شکل پذیری نظیر برای سیستم‌هایی که نسبت تغییرمکان آنها در شکل (۷) ارائه شده بود، در شکل (۸) نمایش داده شده است. مطابق آنچه در شکل (۸) مشاهده می‌شود اگر چه تغییرمکان کل سیستم خاک و سازه در اثر رفتار غیرخطی خاک افزایش می‌یابد اما تقاضای شکل پذیری سازه کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش نسبت پرپود و نرم تر شدن خاک زیرین تقاضای شکل پذیری در سازه بیشتر کاهش می‌یابد.

در شکل (۹) نتایج مربوط به C_{d4} و تقاضای شکل پذیری سازه برای مدل‌هایی با نسبت ابعادی $h/b = 5$ ارائه شده است. مقایسه شکل (۹-الف) با شکل (۷-ب) تاثیر تغییر نسبت ابعادی h/b را بر تغییرات نسبت تغییرمکان به دلیل غیرخطی شدن خاک نشان می‌دهد. مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد که تغییرات نسبت ابعادی تاثیر زیادی بر روی میزان تغییر نسبت تغییرمکان به دلیل غیرخطی شدن رفتار خاک ندارد. اما مقایسه شکل (۹-ب) با شکل (۸-ب) نشان می‌دهد افزایش نسبت ابعادی h/b و یا به عبارت دیگر لاغرتر شدن سیستم‌های خاک و سازه باعث می‌شود غیرخطی شدن خاک، تقاضای شکل پذیری سازه را تا حدودی بیشتر کاهش دهد و در مواردی سازه ارتجاعی باقی بماند. البته با کاهش پرپود سیستم خاک و سازه میزان کاهش تقاضای شکل پذیری بسیار کاهش می‌یابد.



ب: مقایسه μ_{str2} با μ_{str4} نظیر

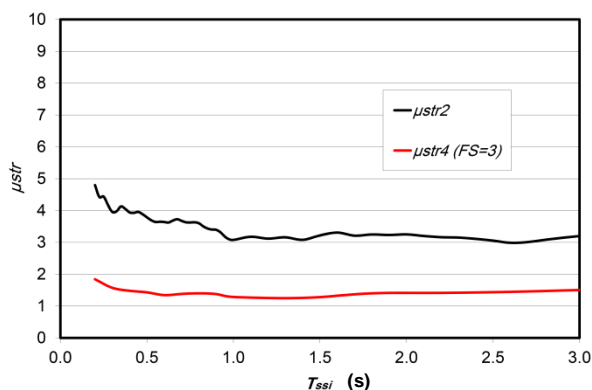


الف: مقایسه C_{d2} با C_{d4} نظیر

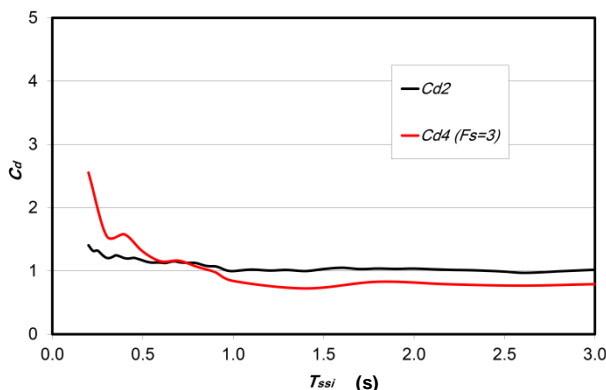
شکل ۹: نتایج مربوط به نسبت تغییرمکان و تقاضای شکل پذیری برای سیستم خاک و سازه با مشخصات

$$(h/b = 5, T_{ssi}/T_{str} = 1.5, R_d = 6, R_f = 2, FS = 3)$$

در شکل (۱۰) نتایج مربوط به C_{d4} و تقاضای شکل پذیری سازه برای مدل‌هایی با $R_d = 4$ ارائه شده است. مقایسه شکل (۱۰-الف) با شکل (۷-ب) نشان می‌دهد که با کاهش R_d تاثیر غیرخطی شدن خاک بر روی تغییرمکان کل سیستم خاک و سازه کاهش می‌یابد. مقایسه شکل (۱۰-ب) با شکل (۸-ب) نشان می‌دهد که در این حالت تاثیر غیرخطی شدن خاک بر روی تقاضای شکل پذیری سازه نیز کاهش می‌یابد. زیرا با کاهش R_d که به معنی کاهش بزرگی و شدت تحریک می‌باشد، میزان بلندشدگی و همچنین میزان رفتار غیرخطی در خاک کاهش یافته در نتیجه تغییرات پاسخ سیستم نیز کاهش خواهد یافت.



ب: مقایسه μ_{str2} با μ_{str4} نظیر

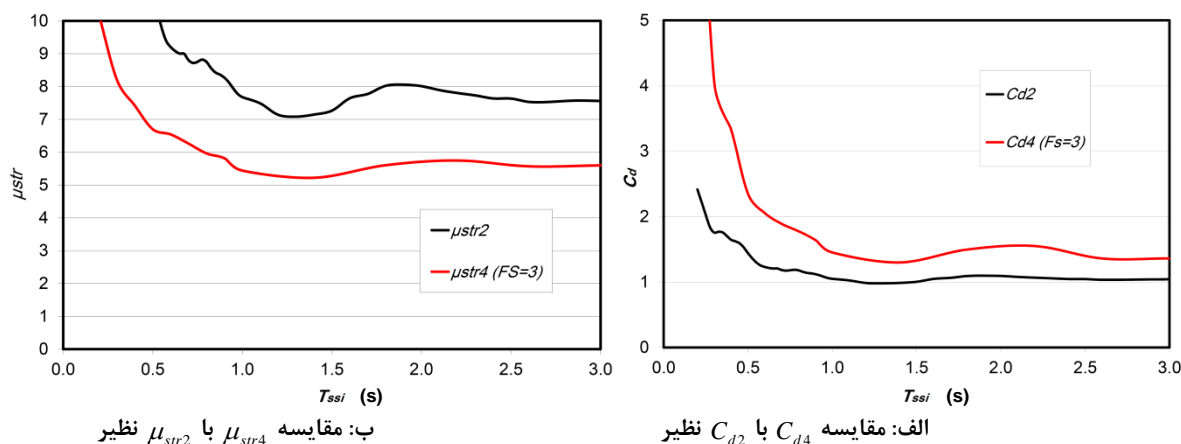


الف: مقایسه C_{d2} با C_{d4} نظیر

شکل ۱۰: نتایج مربوط به نسبت تغییرمکان و تقاضای شکل پذیری برای سیستم خاک و سازه با مشخصات

$$(h/b = 2, T_{ssi}/T_{str} = 1.5, R_d = 4, R_f = 2, FS = 3)$$

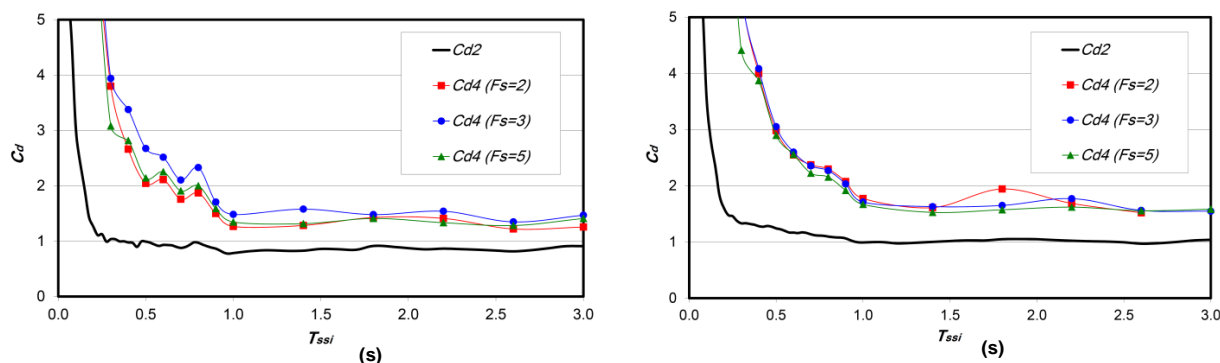
در شکل (۱۱) نتایج مربوط به C_{d4} و تقاضای شکل‌پذیری سازه برای مدل‌هایی با $R_f = 1.5$ ارائه شده است. مقایسه شکل (۱۱-الف) با شکل (۷-ب) نشان می‌دهد که با کاهش R_f تاثیر غیرخطی شدن خاک بر روی تغییرمکان کل سیستم خاک و سازه اندکی کاهش می‌یابد ولی قابل ملاحظه نمی‌باشد. مقایسه شکل (۱۱-ب) با شکل (۸-ب) نشان می‌دهد که در این حالت تاثیر غیرخطی شدن خاک بر روی تقاضای شکل‌پذیری سازه به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. این مساله بدین معنی است تغییرات پارامتر R_f بر روی کاهش تقاضای شکل‌پذیری سازه و میزان تاثیر رفتار غیرخطی در خاک بر روی تغییرمکان کل سیستم خاک و سازه دارای اهمیت می‌باشد.

ب: مقایسه μ_{str2} با μ_{str4} نظیرالف: مقایسه C_{d2} با C_{d4} نظیر

شکل ۱۱: نتایج مربوط به نسبت تغییرمکان و تقاضای شکل‌پذیری برای سیستم خاک و سازه با مشخصات

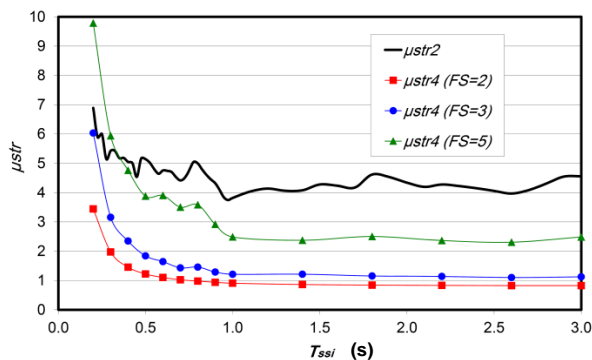
$$(h/b = 2, T_{ssi}/T_{str} = 1.5, R_d = 6, R_f = 1.5, FS = 3)$$

در شکل (۱۲) تاثیر ضریب اطمینان خاک بر روی نسبت تغییرمکان بررسی شده است. همانطور که از نتایج قبلی انتظار می‌رفت، وجود رفتار غیرخطی در خاک موجب افزایش نسبت تغییرمکان C_{d4} در مقایسه با C_{d2} می‌گردد. بدین معنی که با کاهش ضریب اطمینان در خاک C_{d4} افزایش می‌یابد. البته ذکر این نکته لازم است که در تغییرات کم ضریب اطمینان خاک برای مثال تغییر از ۲ به ۳ لزوماً روند افزایش و یا کاهش C_{d4} به وضوح قابل تشخیص نخواهد بود.

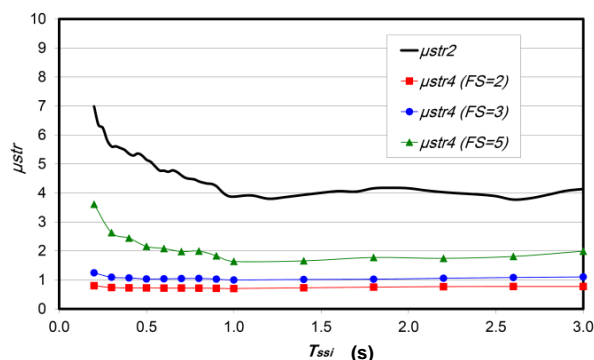
ب: $(h/b = 5, T_{ssi}/T_{str} = 1.5, R_d = 6, R_f = 2)$ الف: $(h/b = 2, T_{ssi}/T_{str} = 1.5, R_d = 6, R_f = 2.5)$

شکل ۱۲: تغییرات نسبت تغییرمکان C_{d4} با توجه به (FS)

شکل (۱۳) تقاضای شکل‌پذیری سازه مربوط به مدل‌های بررسی شده در شکل (۱۲) را برای حالات مختلف نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش ضریب اطمینان خاک تقاضای شکل‌پذیری داخل سازه کاهش می‌یابد. در ضریب اطمینان ۳ شکل‌پذیری سازه در سیستم‌های با پی‌رود بلند بسیار به حالت ارتجاعی نزدیک می‌باشد. همچنین می‌توان مشاهده نمود در ضریب اطمینان حدود ۵ که خاک تقریباً ارتجاعی باقی می‌ماند، نتایج مربوط به پاسخ سیستم‌ها بجز در پی‌رودهای خیلی کم به حالتی که خاک ارتجاعی در نظر گرفته می‌شود نزدیک است.



ب: $(h/b=5, T_{ssi}/T_{str}=1.5, R_d=6, R_f=2)$

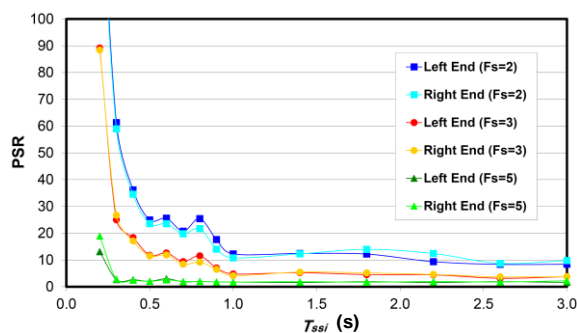


الف: $(h/b=2, T_{ssi}/T_{str}=1.5, R_d=6, R_f=2.5)$

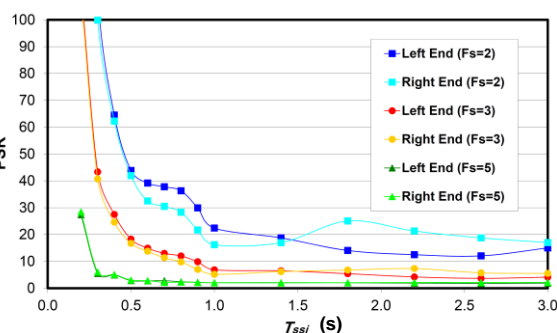
شکل ۱۳: تغییرات تقاضای شکل پذیری سازه بعنوان بخشی از سیستم خاک و سازه با توجه به (FS)

۵-۱- بررسی نشست فونداسیون

در این بخش نشست ماندگار در فونداسیون به عنوان یک شاخص مهم برای بررسی عملکرد سیستم‌های خاک و سازه بررسی شده است. در شکل (۱۴) نسبت نشست ماندگار انتهای چپ و راست فونداسیون به نشست اولیه سیستم ناشی از بار ثقلی نمایش داده شده است (PSR)^۳. همانطور که در این شکل نمایش داده شده است با افزایش ضریب اطمینان خاک نشست ماندگار خاک کاهش می‌یابد. اما چنانچه مشاهده می‌شود در ضریب اطمینان ۵ نیز خاک تا حدودی دارای رفتار غیرخطی می‌باشد.



ب: $(h/b=5, T_{ssi}/T_{str}=1.5, R_d=6, R_f=2)$



الف: $(h/b=2, T_{ssi}/T_{str}=1.5, R_d=6, R_f=2.5)$

شکل ۱۴: تغییرات نسبت نشست ماندگار انتهای چپ و راست فونداسیون به نشست اولیه سیستم ناشی از بار ثقلی با توجه به (FS)

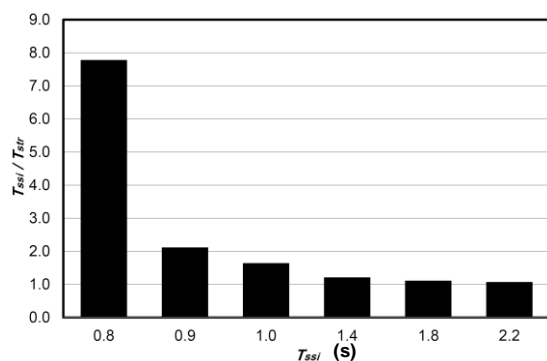
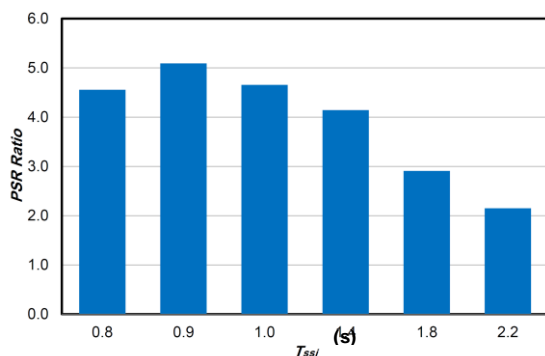
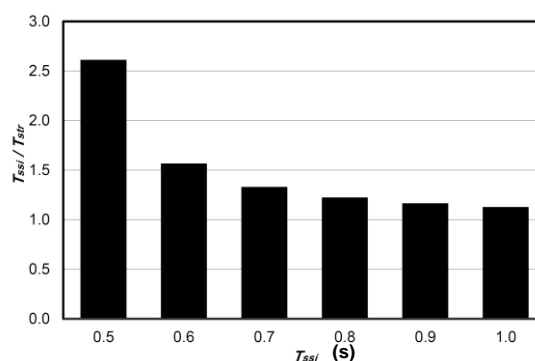
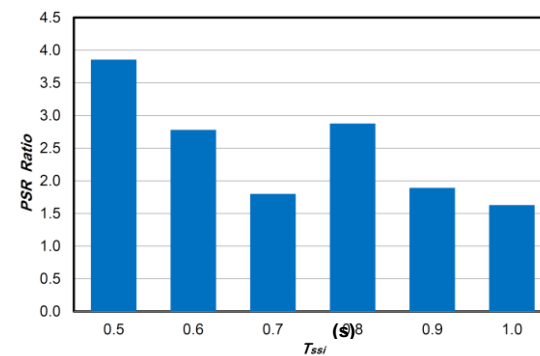
همانطور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود بجز در پیوندهای بسیار کوتاه نسبت نشست ماندگار به نشست اولیه فونداسیون کمتر از ۴۰ برابر می‌باشد. از آنجا که نمودارهای بالا برای پارامترهای بدون بعد ترسیم شده لازم است برای نمونه‌های واقعی با مشخصات کاربردی نیز مقادیر محاسبه شده و مقادیر نشست ماندگار بدلیل رفتار غیر خطی در خاک کنترل گردد. لذا در ادامه جهت بررسی تاثیر کاهش ضریب اطمینان فونداسیون بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، تعدادی مدل سازه‌ای بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰ [۳۴] طراحی شده است. در طراحی این سازه‌ها شتاب مبنای طرح برابر با $0.35g$ و سرعت موج برشی خاک برابر با ۱۰۰ متر بر ثانیه (خاک نوع IV) در نظر گرفته شده است. تعدادی پیوند مطابق جدول (۲) برای سیستم‌های خاک و سازه در نظر گرفته شده است. ابعاد فونداسیون برای سیستم‌های مورد بررسی $15m \times 15m$ فرض شده است و $R=7.5$ در نظر گرفته شده است. مشخصات سیستم‌های خاک و سازه به گونه‌ای انتخاب شده است که تاثیر پارامترهای بدون بعد در مدل‌های کاربردی کنترل گردد. رکوردهای مورد استفاده در جدول (۱) در این قسمت به گونه‌ای مقیاس شده‌اند تا مقدار شتاب طیفی رکوردها در پیوندهای مورد نظر منطبق با مقادیر بدست آمده از طیف استاندارد ۲۸۰۰ باشد.

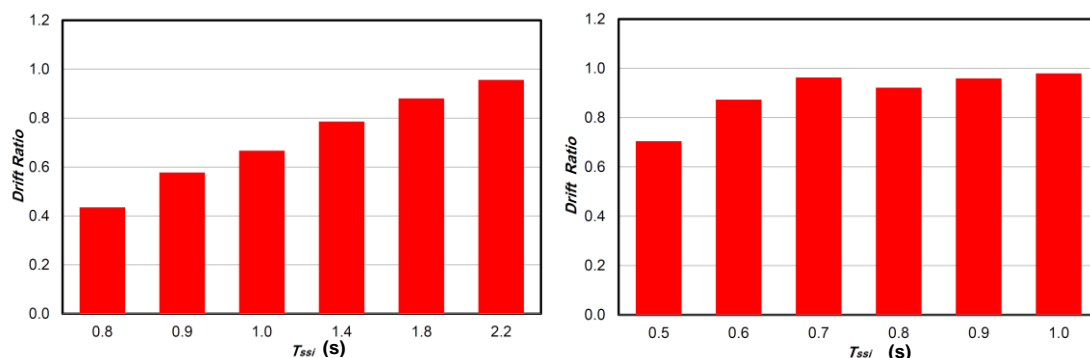
³ Permanent Settlement Ratio

جدول ۲: مشخصات مدل‌های مورد بررسی طراحی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ [34]

Model No.	T_{ssi}	T_{str}	T_{ssi}/T_{str}	h/b	نشست ماندگار برای (FS=۲) (سانتی‌متر)	نشست ماندگار برای (FS=۵) (سانتی‌متر)
1	0.50	0.19	2.61	2	1.94	0.50
2	0.60	0.38	1.57	2	1.26	0.45
3	0.70	0.53	1.33	2	0.78	0.44
4	0.80	0.65	1.22	2	1.26	0.44
5	0.90	0.77	1.17	2	0.81	0.43
6	1.00	0.89	1.13	2	0.69	0.42
7	0.80	0.10	7.78	3	3.96	0.87
8	0.90	0.42	2.12	3	3.87	0.76
9	1.00	0.61	1.64	3	3.37	0.72
10	1.40	1.15	1.21	3	2.85	0.69
11	1.80	1.62	1.11	3	1.93	0.66
12	2.20	2.05	1.07	3	1.40	0.65

در شکل (۱۵-الف) و شکل (۱۵-ب) نسبت T_{ssi}/T_{str} برای مدل‌های مختلف نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این نسبت با افزایش پریود بخصوص برای نسبت های بزرگ h/b کاهش می‌یابد. در شکل (۱۵-ج) و شکل (۱۵-د) نسبت نشست ماندگار نظیر $FS = 5$ می‌باشد محاسبه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این نسبت می‌تواند تا ۵ باشد. اما با مراجعه به جدول (۲) و مقایسه مقادیر ستون مربوط به نشست ماندگار فونداسیون برای $FS = 2$ با مقادیر نظیر $FS = 5$ می‌توان مشاهده نمود اندازه نشست ماندگار همچنان از نظر کاربردی برای سازه مشکلی ایجاد نخواهد نمود و می‌توان با کاهش ضریب اطمینان خاک مطابق آنچه در شکل (۱۵-ه) و شکل (۱۵-و) نشان داده شده است از مزایای کاهش تغییرمکان نسبی سازه (Drift) استفاده نمود. در شکل (۱۵) می‌توان مشاهده نمود کاهش نسبت T_{ssi}/T_{str} منجر به کاهش تاثیر ضریب اطمینان خاک در بهبود عملکرد سازه و کاهش تغییرمکان نسبی داخلی سازه می‌گردد. همچنین مشاهده می‌شود افزایش نسبت h/b سبب کاهش بیشتر تغییر مکان نسبی سازه می‌گردد.

ب) نسبت T_{ssi}/T_{str} برای مدل‌های با $h/b = 3$ د) نسبت نشست ماندگار برای مدل‌های با $h/b = 3$ الف) نسبت T_{ssi}/T_{str} برای مدل‌های با $h/b = 2$ ج) نسبت نشست ماندگار برای مدل‌های با $h/b = 2$



ه) نسبت تغییرمکان نسبی سازه برای مدل‌های با $h/b=2$ و) نسبت تغییرمکان نسبی سازه برای مدل‌های با $h/b=3$

شکل ۱۵: نسبت پریود، نشست ماندگار و تغییرمکان نسبی داخلی سازه برای مدل‌های طراحی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ [34]

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر اندرکنش غیرخطی خاک و سازه بر روی پاسخ غیرارتجاعی سازه مورد بررسی قرار گرفته است. این موضوع به صورت پارامتریک با معرفی تعدادی پارامتر کلیدی بدون بعد که پاسخ سیستم را کنترل می‌نمایند بررسی شده است. مطالعات پارامتریک گسترده‌ای صورت گرفت تا پاسخ سیستم‌های خاک و سازه برای محدوده وسیعی از پارامترهای بدون بعد از طریق مطالعه تغییرمکان کل سیستم و شکل پذیری سازه بررسی گردد. مشاهده شد بدلیل رفتار غیرخطی خاک نسبت تغییرمکان در مقایسه با حالتی که خاک ارتجاعی در نظر گرفته می‌شود، افزایش می‌یابد. وجود رفتار غیرخطی در خاک و کاهش هر چه بیشتر ضریب اطمینان خاک موجب کاهش بیشتر تقاضای شکل‌پذیری داخل سازه می‌گردد. همچنین تاثیر پارامترهای بدون بعد بررسی گردید و نشان داده شد افزایش نسبت پریود و یا به بیان دیگر کاهش سختی خاک و نرم‌تر شدن آن در مقایسه با سازه می‌تواند باعث کاهش بیشتر تقاضای شکل‌پذیری در سازه بدلیل بلندشدگی فونداسیون و رفتار غیر خطی در خاک گردد. همچنین نشست ماندگار خاک زیر فونداسیون مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد گرچه با کاهش ضریب اطمینان خاک نشست ماندگار افزایش می‌یابد اما برای مدل‌هایی با مشخصات کاربردی مقدار آن قابل قبول می‌باشد و می‌توان از مزایای کاهش ضریب اطمینان خاک جهت بهبود عملکرد سازه در عمل استفاده نمود.

مراجع

- [1] Novak, M. (1974). Effect of Soil on Structural Response to Wind and Earthquake. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3, 79-96.
- [2] Chopra, A. K. and Gutierrez J. A. (1974). Earthquake Response Analysis of Multistory Building Including Foundation Interaction. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3, 65-77.
- [3] Veletsos, A. S. and Meek J. W. (1974). Dynamic Behavior of Building-Foundation Systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3, 121-138.
- [4] Applied Technology Council, ATC3-06, (1978). Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings.
- [5] Bazan, E. and Bielak, J. (1978). Earthquake Response of Nonlinear Building-Foundation Systems. Soil-structure interaction (A. S. Cakmak).
- [6] Aviles, J. and Perez-Rocha, LE. (2005). Influence of Foundation Flexibility on R_{μ} and C_{μ} Factors. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 131(2), 221-231.
- [7] Ghannad, M. A. and Ahmadnia A. (2006). The Effect of Soil-Structure Interaction on Inelastic Structural Demands. *European Earthquake Engineering*, 20(1), 23-35.
- [8] Meek, J. (1975). Effects of Foundation Tipping on Dynamic Response. *Journal of the Structural Division, ASCE*, 101, 1297-1311.
- [9] Wolf, J. (1976). Soil-Structure Interaction with Separation of Base Mat from Soil. *Nuclear Engineering and Design*, 38, 357-384.
- [10] Wolf, J. and Skrikerud, P. (1978). Seismic Excitation with Large Overturning Moments: Tensile Capacity, Projecting Base Mat or Lifting-off?. *Nuclear Engineering and Design*, 50, 305-321.

- [11] Huckelbridge, A. and Ferencz, R. (1981). "Overturning Effects in Stiffened Building Frames", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 9, 69-83.
- [12] Yim, C. and Chopra, A. (1984). Earthquake Response of Structures with Partial Uplift on Winkler Foundation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 12, 263-281.
- [13] Chopra, A. and Yim, C. (1985). Simplified Earthquake Analysis of Structures with Foundation Uplift. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 111(4), 906-930.
- [14] Nakaki, D.K. and Hart, G.C. (1978). Uplifting Response of Structures Subjected to Earthquake Motions. U.S.-Japan Coordinated Program for Masonry Building Research, Report No. 2.1-3. Ewing, Kariotis, Englekirk and Hart.
- [15] Patel, P. and Spyarakos, C. (1991). Uplifting-Sliding Response of Flexible Structures to Seismic Loads. *Engineering Analysis with Boundary Elements (Elsevier)*, 8(4).
- [16] Oliveto, G., Calio, I., and Greco, A. (2003). Large Displacement Behavior of a Structural Model with Foundation Uplift under Impulsive and Earthquake Excitations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32, 369-393.
- [17] Gazetas, G. and Apostolou, M. (2004). "Nonlinear Soil-Structure Interaction: Foundation Uplifting and Soil Yielding", In: *Proceedings of 3rd US-Japan workshop on soil-structure interaction*. Menlo Park, California.
- [18] Apostolou, M., Gazetas, G. and Garini, E. (2007). Seismic Response of Slender Rigid Structures with Foundation Uplifting. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 642-654.
- [19] Harden, C., Hutchinson T. and Moore M. (2006). Investigation into the Effects of Foundation Uplift on Simplified Seismic Design Procedures. *Earthquake Spectra*, 22(3), 663-692.
- [20] Pecker, A. and Chatzigogos CT. (2010). Nonlinear Soil Structure Interaction: Impact on the Seismic Response of Structures. *Earthquake Engineering in Europe, Geotechnical, Geological, and Earthquake Engineering*, 17, 79-103.
- [21] Deng, L., Kutter, B. and Kunnath, SK. (2012). Probabilistic Seismic Performance of Rocking-Foundation and Hinging-Column Bridges. *Earthquake Spectra*, 28(4), 1423-1446.
- [22] Jafarieh, A.H. and Ghannad, M.A. (2013). The Effect of Foundation Uplift on Elastic Response of Soil-structure Systems. *International Journal of Civil Engineering*, 12(2), 244-256.
- [23] Ghannad, M.A. and Jafarieh, A.H. (2014). Inelastic Displacement Ratios for Soil-structure Systems Allowed to Uplift. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43, 1401-1421.
- [24] Wolf, J. (1994). *Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Model*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- [25] OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation platform), developed by the Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), at the University of California, Berkeley. Available at: <http://opensees.berkeley.edu/>
- [26] Boulanger, R.W., Curras, Ch. J., Kutter, B. L., Wilson, D. W. and Abghari, A. (1999). Seismic Soil-Pile Structure Interaction Experiments and Analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, 125(9).
- [27] Kutter, B. L., Martin, G., Hutchinson, T., Harden, C., Gajan, S. and Phalen J. (2006). Workshop on Modeling of Nonlinear Cyclic Load-Deformation Behavior of Shallow Foundations. Pacific Earthquake Engineering Research Center Workshop Report, University of California, Davis.
- [28] American Society of Civil Engineers, ASCE 41-06, (2007). *Standard for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, Virginia.
- [29] American Society of Civil Engineers, ASCE 7-10, (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, Virginia.
- [30] Veletsos, A.S. (1977). Dynamics of Structure-Foundation Systems. In *Structural and Geotechnical Mechanics*, Hall WJ (Ed.), A Volume Honoring N.M. Newmark. Prentice Hall: Englewood Cliffs, New Jersey, 333-361.
- [31] Ghannad, M.A., Fukuwa, N. and Nishizaka, R. (1998). A Study on Frequency and Damping of Soil-Structure Systems Using Simplified Model. *Journal of Structural Engineering, AIJ*, 44B, 85-93.
- [32] Federal Emergency Management Agency, FEMA-440 (2005). *Recommended Provisions for Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, Washington, D.C..
- [33] Allotey N. and El Naggat M. H. (2003). Analytical Moment-rotation Curves for Rigid Foundations Based on Winkler Model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23, 367-381.
- [34] Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800, 4th Edition, (2014). Building and Housing Research Center Publication.