

Investigating the mutual effects of surface faulting and rigid foundation on each other on in the seismic design of buildings near fault

Mohsen Tehranizadeh Haghighifar ^a, Seyed Ahmad Mousavi ^{b*}, Sajad bazgir ^c

a. Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

b. *Master's Student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

c. Master's Student, Faculty of Urban Planning and Architecture, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2024.2027532.1099>

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Surface faulting,
Near-field,
Fault mechanism,
Fault zone,
Story numbers,
Foundation rotation,
Position of the foundation.

The occurrence of great earthquakes in the vicinity of the cities which are in near field is undeniable. Near-field earthquakes have very different effects and characteristics than far-field earthquakes. Considering that the surface faulting causes destructive and irreparable effects for structures near the fault and less attention is paid to it in the regulations, for this purpose, how to design the structure to achieve proper performance against this phenomenon is of great importance. In this study it has been tried to study and evaluate the parameters such as fault mechanism, fault zone, surface faulting, story numbers and the position of the foundation in the seismic design of buildings near the fault. For this purpose, the fault propagation in the substructure soil and its effects on the structure have been investigated according to the number of different story. In the end, it has been observed that with increasing the number of story in the studied sandy soils, the fault deviates out of the foundation and as a result, the amount of foundation rotation decreases with respect to the soil beneath it. It is also observed that the increase in fault displacement has a significant effect on the rotation so that with the increase in vertical displacement from 0.5 to 1.5 meters, the foundation rotation has increased up to 4 times.

Received:

06 May 2024

Received in revised form:

10 June 2024

Accepted:

10 June 2024

pp. 01-17

Corresponding author (Email: Ahmad_mousavi@aut.ac.ir)

Extended Abstract

Introduction

Earthquakes primarily cause ground shaking and ruptures, both of which are pivotal elements contributing to a number of minimal or extensive damages to buildings, or other structures such as bridges and so on and so forth. Apart from seismic shaking, ground ruptures, and visible displacements on the surface along the fault line, earthquakes can impact structures in their path. This can potentially lead to the collapse of these structures. Ground ruptures pose a significant and potential risk to various structures, including bridges, dams, nuclear power plants, and residential buildings. Surface faulting poses a significant risk that necessitates careful consideration during the design or evaluation of structures situated in areas with shallow active faults. In areas where innovative construction methods are not employed, the extent of damage and, consequently, the mortality rate tends to be higher compared to areas where strict building regulations are followed. This underscores the need for more rigorous enforcement of construction standards. Therefore, efforts have been made to set regulatory guidelines by studying the detrimental impacts of surface faulting phenomena.

Methodology

In this study, ABAQUS software which is a suite for finite element analysis has been used for simulation. Previous studies indicate that this software has proven effective in simulating the surface faulting distribution within the soil. In the current study, Abaqus software has been used to conduct a static analysis, examining the impact of various factors on the seismic design of buildings. These factors include surface faulting, the number of floors, fault mechanism, and the width of the fault zone. Moreover, in order to estimate fault propagation path, Mohr-Coulomb theory has been employed for soil modeling. To identify the location of the fault rupture and the foundation's position relative to the fault, the parameter S/B is defined. Here, 'S' represents the distance from the fault rupture to its endpoint on the ground surface in the absence of a foundation. For the model analysis, we have considered three scenarios for this parameter: 0, 0.5, and 1.

Results and discussion

In this study, a rigid foundation is considered for the analysis. Also, Abaqus software was used to simulate the foundation and two types of soil (dense and loose sand). The goal was to examine the impacts of surface faulting with various vertical shifts (0.5 and 1.5 meters) on the degree of foundation rotation. This was done by considering the foundation's location in relation to the surface faulting when the foundation was absent. The slope faulting considered in this study was 45 degrees. Moreover, A dip-slip fault mechanism has been considered, and its impacts on the foundation were observed.

Conclusion

The key findings of this study are as follows:

As the number of floors increases, the degree of rotation diminishes. The greatest rotation is observed when the S/B parameter equals 0. However, even when S/B equals 1, there is a non-zero rotation and a minimum value, the opposite is also true.

The condition associated with $S/B=1$ is the most critical. Nevertheless, as the density of the sandy soil increases, a reduction in the degree of foundation rotation is observed, irrespective of the number of floors. Put differently, as the slope of the fault increases, the degree of foundation rotation diminishes in the critical condition.

Due to the stiffness of the soil, it is prevented from rupturing beneath the foundation when surface faulting occurs, therefore, the foundation subsides minimally or not at all.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



بررسی تأثیرات متقابل گسلش سطحی و فونداسیون صلب بر یکدیگر در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های نزدیک گسل

محسن تهرانی‌زاده حقیقی‌فر - استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

سید احمد موسوی* - کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

سجاد بازگیر - کارشناسی ارشد، دانشکده شهرسازی و معماری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، تهران، ایران.

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2024.2027532.1099>

اطلاعات مقاله	چکیده
واژگان کلیدی: گسلش سطحی، حوزه نزدیک، مکانیزم گسل، پهنه گسلی، سوانح طبیعی، دوران فونداسیون، موقعیت فونداسیون.	وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ در نزدیکی شهرهایی که در حوزه نزدیک قرار دارند غیرقابل انکار است. زمین‌لرزه‌ها در حوزه نزدیک اثرات ویژگی‌های بسیار متفاوتی، نسبت به زمین‌لرزه‌ها در حوزه دور دارند. با توجه به این‌که گسلش سطحی اثرات مخرب و غیرقابل جبرانی را برای سازه‌های نزدیک گسل به وجود می‌آورند و در آیین‌نامه‌ها کمتر به آن توجه شده است به این منظور نحوه طراحی سازه برای رسیدن به عملکرد مناسب در برابر این پدیده از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش سعی شده است به بررسی و ارزیابی پارامترهایی نظیر مکانیزم گسل، پهنه گسلی، گسلش سطحی و نیز تعداد طبقات و موقعیت فونداسیون در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های نزدیک گسل پرداخته شود. برای این عمل ابتدا به نحوه انتشار گسلش در خاک زیر سازه و اثرات آن بر روی سازه با توجه به تعداد طبقات مختلف دیده شده است. در پایان مشاهده گردید با افزایش تعداد طبقات در خاک‌های ماسه‌ای مورد مطالعه گسلش به بیرون فونداسیون منحرف شده و در نتیجه آن، میزان دوران پی با توجه به خاک زیر آن کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود افزایش جابه‌جایی گسل در میزان دوران تأثیر بسزایی داشته به‌طوری که با افزایش جابه‌جایی قائم از ۰/۵ به ۱/۵ متر، دوران فونداسیون تا ۴ برابر افزایش داشته است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۲/۱۷

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۳/۲۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۳/۲۱

صص. ۱۷-۰۱

* نویسنده مسئول

رایانامه: Ahmad.mousavi@aut.ac.ir

مقدمه

از اثرات اصلی که توسط زمین‌لرزه ایجاد می‌شوند لرزش و گسیختگی زمین را می‌توان نام برد که اساساً منجر به آسیب کم یا زیاد به ساختمان‌ها و دیگر سازه‌ها نظیر پل‌ها و... می‌شوند. شدت و میزان آسیب وارد شده به سازه‌ها بسته به عوامل مختلفی نظیر بزرگای زلزله، فاصله از مرکز زلزله، شرایط زمین‌شناسی و غیره دارد که باعث تقویت یا کاهش انتشار امواج می‌گردد. ویژگی‌های خاص زمین‌شناسی محل می‌توانند میزان لرزش زمین را حتی در زلزله‌های خفیف، افزایش دهند. علاوه بر لرزش، گسیختگی زمین و آشکار شدن جابه‌جایی در سطح زمین در طول گسل ممکن است به سازه‌های واقع شده بر مسیر آن اثر بگذارد تا جایی که منجر به فروریزش سازه‌ها گردد. گسیختگی زمین خطر بالقوه و جدی برای سازه‌هایی نظیر پل‌ها، سدها و نیروگاه‌های هسته‌ای و حتی ساختمان‌های مسکونی می‌باشد. در نتیجه نیاز به نقشه‌برداری دقیق از گسل‌های موجود برای شناسایی هرگونه احتمال گسیختگی سطحی در طول مدت عمر سازه است. از دیگر عوامل مهمی که در هنگام یا بعد از وقوع زمین‌لرزه بر سازه‌ها اثرگذار می‌باشند و خطراتی نیز به دنبال دارند می‌توان به رانش زمین، بهمن، روانگرایی خاک، سونامی و سیل اشاره کرد. علاوه بر خسارت‌های گفته شده، زلزله می‌تواند صدمات اجتماعی و اقتصادی نیز به دنبال داشته باشد. صدمات مربوط به سلامت جسمانی، روانی و حتی تلفات جانی به‌عنوان مهم‌ترین ضربه اجتماعی ناشی از زلزله می‌باشند. خرابی‌های فیزیکی به چند طریق بر اقتصاد منطقه تاثیر می‌گذارد. شاید کاهش فعالیت‌های تجاری و تولیدات صنعتی از اساسی‌ترین زیان‌های اقتصادی ناشی از زمین‌لرزه باشند.

کاهش این دو، در ارتباط مستقیم با زیان وارده به کارکرد یا قابل‌استفاده بودن امکانات و تأسیسات می‌باشد. از این رو باید کوشید تا اثرات فیزیکی زمین‌لرزه را به‌خوبی شناسایی و در کاهش آن‌ها راهکارهایی را ارائه نمود. در تحقیق پیش رو اثرات گسلش سطحی و میزان اثرگذاری آن بر فونداسیون سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

گسلش سطحی، خطر بسیار مهمی است که باید در هنگام طراحی یا ارزیابی سازه‌های ساخته‌شده در مناطقی با گسل‌های فعال کم‌عمق مورد توجه قرار گیرد. اهمیت گسلش سطحی بیش‌ازپیش خود را در زمین‌لرزه‌های اخیر همانند لاندروز کالیفرنیا، چی‌چی تایوان، دوزکه و کاکائیلی ترکیه و کوبه ژاپن نشان داده است (Tehranizadeh & Moradi, 2017).

این زمین‌لرزه‌ها نمونه‌های متعددی از اثرات ویران‌کننده گسلش سطحی بر ساختمان‌ها را برجای گذاشته‌اند. گسلش سطحی در امتداد گسل چلینگپو در طی زلزله سال ۱۹۹۹ چی‌چی، ساختمان‌ها را به دلیل جابه‌جایی سطحی زمین تخریب کرد.

به‌طور مشابه، در طول زمین‌لرزه کواکائیلی و دوزکه در ترکیه، گسلش سطحی باعث تخریب پل‌ها، ساختمان‌ها و شریان‌های حیاتی شد. گرچه آسیب‌های کم به‌علت تراکم کم ساختمان‌ها در کویر کالیفرنیا (زمین‌لرزه لاندروز)، ناحیه وسیعی از گسیختگی زمین در طول ۸۰ کیلومتر در ۵ خط گسل متفاوت ایجاد کرد که ساختمان‌ها و شریان‌های حیاتی که از آن عبور کردند را تحت تاثیر قرار داد. در سال ۲۰۱۶ زلزله کایکورا باعث گسیختگی بیش از ۲۰۰ کیلومتر و آسیب رساندن به بسیاری از ساختمان‌هایی که در مسیر خط گسل ساخته شده بودند، شد.

در طول اغلب مشاهدات از خسارت ثبت‌شده این حوادث، نمونه‌هایی از عملکرد رضایت‌بخش سازه‌ها نیز وجود دارد. برخی از سازه‌ها به‌اندازه کافی قدرتمند بودند تا بدون تخریب و فروپاشی بتوانند در برابر حرکت زمین ناشی از گسلش مقاومت نمایند (Bray, 2009).

بسیاری از تحقیقات قبلی در مورد گسیختگی سطح زمین‌لرزه بر چگونگی تاثیر خود محیط خاک بر مسیر و روند انتشار گسل متمرکز است. مطالعات نشان‌داد که خاک سست‌تر و انعطاف‌پذیرتر تمایل دارد به‌طور موضعی گسیختگی برشی را که در آن نفوذ می‌کند جذب کند و تغییر شکل برشی را در منطقه وسیع‌تری پخش نماید. گسیختگی سطحی موضعی تیزتر تمایل به انتشار در خاک‌های متراکم‌تر و شکننده دارد. مشاهدات گسیختگی سطحی در طبیعت این یافته‌های تجربی را تأیید می‌کند و راهبردهای کاهش می‌توانند این یافته‌ها را در برگیرند (Bray, 2022 & Garcia).

در مکان‌هایی که از روش‌های نوین ساخت‌وساز بهره نمی‌گیرند در مقایسه با مکان‌هایی که از آیین‌نامه‌های ساختمانی دقیق استفاده می‌کنند، میزان خسارات و به‌موجب آن میزان مرگومیر نیز بیشتر بوده، در نتیجه نیاز به اعمال سخت‌گیرانه‌تر در ساخت‌وسازها می‌باشد. از این رو سعی شده است با بررسی اثرات مخرب پدیده گسلش سطحی گامی در تعیین ضوابط آیین‌نامه‌ای برداشت.

این گزارش در راستای برنامه کلان پژوهشی در جهت ساخت‌وساز ایمن در پهنه‌های گسلی انجام‌شده است که با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف نظیر پهنه گسلی، مکانیزم گسل، تعداد طبقات، موقعیت فونداسیون و خاک زیر پی، تاثیر فونداسیون بر انحراف گسلش سطحی، میزان دوران پی، گسیختگی خاک زیر فونداسیون و به تبع آن نشست پی و... در حالت‌های مختلف را برآورد می‌کند.

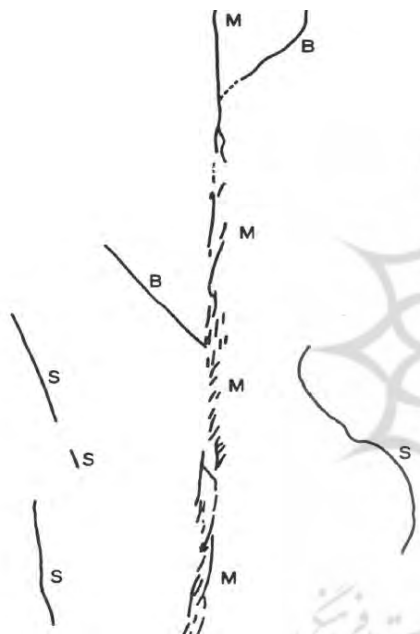
مبانی نظری

گسلش سطحی

حرکت ناگهانی سنگ‌ها در طول صفحه گسل باعث به وجود آمدن زلزله می‌شود. این حرکت و جابه‌جایی، گسیختگی گسل نامیده می‌شود. هنگامی که این گسیختگی به سمت بالا (سطح زمین) حرکت می‌کند، باعث گسیختگی سطحی گسل می‌شود.

باعث می‌شود تا تعیین خواص و فرآیندهای مربوط به پهنه گسلی بسیار چالش‌برانگیز باشد. بسیاری از مسائل اساسی در مورد مکانیزم، ساختار و تکامل پهنه گسلی با وجود تحقیقات گسترده در طول ۱۰۰ سال بی‌جواب مانده است (2009, Ben-Zion & Sammis).

الگوی نقشه گسلش سطحی معمولاً شامل گسل اصلی و گسل‌های جانبی می‌باشد. این نقشه در شکل ۲ به صورت شماتیک نشان داده شده است. گسل اصلی می‌تواند در یک سطح به عنوان یک شکست، یا به صورت پلکانی، موازی یا شاخه‌ای ظاهر شود. گسل جانبی شامل شاخه‌های گسل اصلی هستند که در فاصله قابل ملاحظه‌ای گسترش یافته‌اند، و گسل‌های فرعی در سطحی کاملاً جدا از گسل اصلی قرار گرفته‌اند (Bonilla, 1970).



شکل ۲. الگوی نقشه گسلش سطحی. حروف M، B و S معرف گسل‌های اصلی، جانبی و فرعی می‌باشند

مستندات اخیر گسلش سطحی

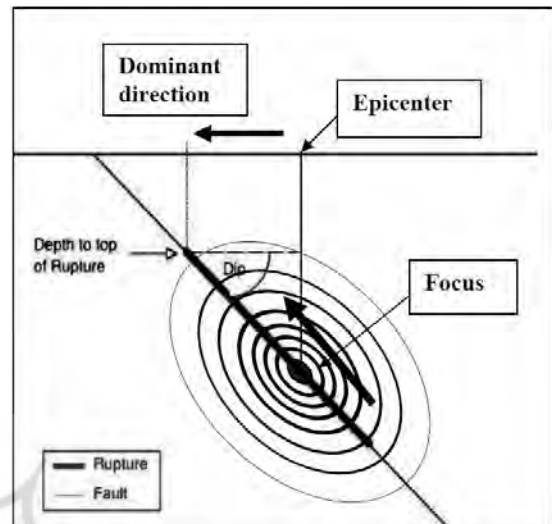
در زیر به برخی از مشاهدات و مستندات کلیدی رخداد‌های مهم گسلش سطحی که در نیوزلند و ترکیه که در سال‌های ۲۰۱۶ و ۱۹۹۹ و روی داده است، پرداخته می‌شود.

مستندات زلزله کایکورا، نیوزلند ۲۰۱۶

زلزله کایکورا، دو دقیقه پس از نیمه‌شب سال ۲۰۱۶ در نیوزلند (با بزرگی $M_w = 7.8$) باعث گسیختگی بیش از ۲۲۰ کیلومتر در سطح زمین شد. در این رخداد بسیاری از ساختمان‌ها (عمدتاً ساختمان‌های مسکونی) تحت تاثیر مستقیم گسلش سطحی ناشی از این زلزله شدند. در این بین خساراتی نیز به ساختمان‌ها وارد شد. مشاهدات این زلزله نشان می‌دهد، ساختمان‌هایی که در معرض گسلش سطحی قرار گرفته‌اند متحمل مقدار بیشتری از خسارت

این گسیختگی می‌تواند زیر سطح باشد که به آن گسل پنهان گفته می‌شود، و یا به سطح برسد و منجر به گسلش سطحی شود (Gioncu & Mazzolani, 2011).

گسیختگی از کانون زلزله (شکل ۱) شروع می‌شود، سپس در همه جهات در امتداد خط گسل گسترش می‌یابد، اما یک جهت غالب دارد.



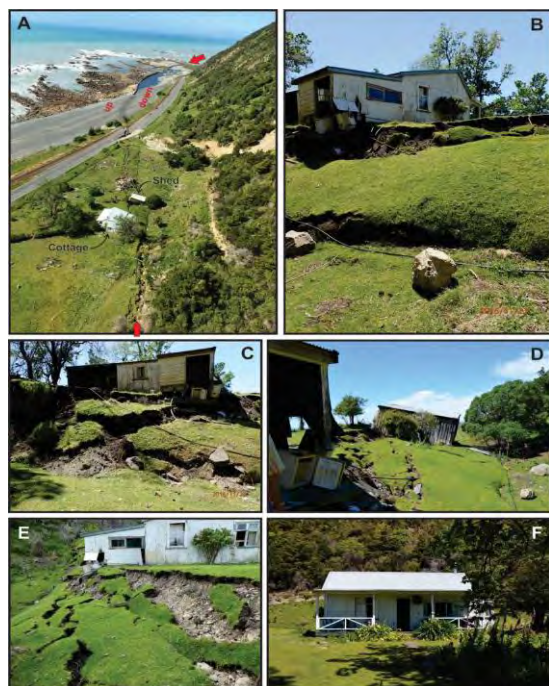
شکل ۱. فرآیند گسیختگی گسل (Mazzolani, 2011) (Gioncu & Mazzolani, 2011)

بیشتر زمین‌لرزه‌ها، به جز موارد مرتبط با فرآیندهای آتشفشانی، لرزش‌ها و فروپاشی غارها، ناشی از حرکت یک توده سنگی است که در اثر گسل مدفون در واکنش به نیروهای تکتونیکی رخ می‌دهد. لرزش زمین و تغییر شکل‌های سطحی از آثار سطحی حرکت گسل در عمق می‌باشند که هر دو اثر اولیه زلزله می‌باشند. با وجود این دو، تکان دادن زمین به‌طور مداوم منجر به خسران زندگی و آسیب به ساختمان‌ها می‌شود. با این وجود، تغییر شکل‌های تکتونیکی در بسیاری از مکان‌ها کاملاً جدی و خطرناک می‌باشند (Bonilla, 1982).

پهنه گسلی

به منطقه اطراف گسل اصلی که شامل تعداد زیادی گسل کوچک‌تر نیز می‌باشد، پهنه گسلی گفته می‌شود (2011, Gioncu & Mazzolani).

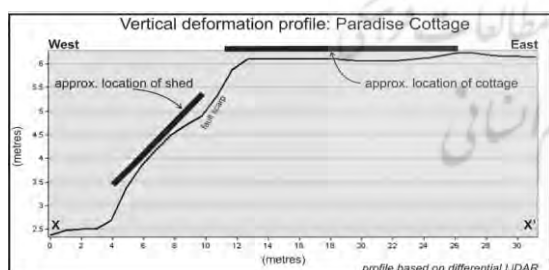
بخش‌های شکننده لیتوسفر زمین حاوی نقاط اتصال، گسل‌ها و پهنه‌های گسلی که در طیف گسترده‌ای از مقیاس طولی وجود دارند و معمولاً دارای هندسه‌های پیچیده‌ای هستند. مواد اطراف این پیچیدگی‌ها به شدت تحت تمرکز تنش قرار دارند که با تغییر شکل منجر به ایجاد شکستگی‌ها و خسارات جدید می‌شوند که به الاستیسیته، نفوذپذیری و هندسه مناطق فعال در حال تغییر شکل وابسته است. پیچیدگی‌های هندسی، ناهمگنی مواد و طیف گسترده‌ای از مقیاس‌های فضا-زمان



شکل ۴. عبور گسل از پایداری زیر ساختمان (Van, 2019)
(Dissen et.al)

جابه‌جایی قائم به وجود آمده در زیر این ساختمان‌ها تابعی از جابه‌جایی افقی آن‌هاست؛ به این صورت که اثر گسلش سطحی در عرضی معادل ۸ الی ۱۰ متری در مجاورت این سازه‌ها دیده می‌شود.

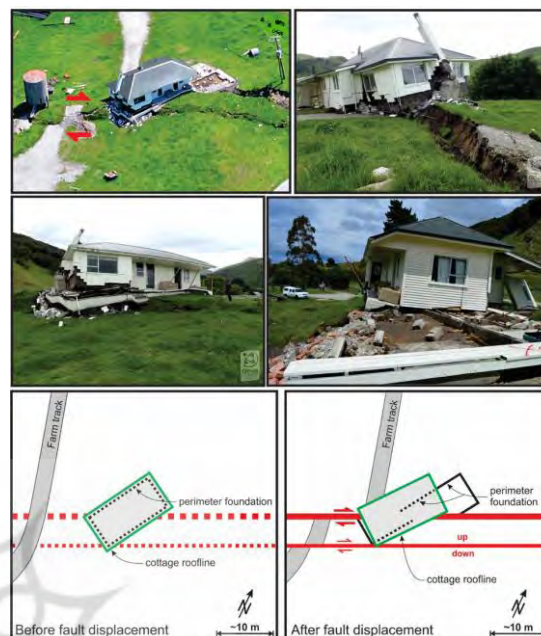
ساختمان اصلی بر روی فرودپایه واقع شده و قسمت پشتی آن در اثر گسلش آسیب دیده است. اما کلبه چوبی بر روی گسل واقع شده و به شدت دچار تغییر شکل شده و آسیب دیده است. اما با این حال هیچکدام از این دو ساختمان تخریب نشده‌اند. در شکل ۵ می‌توان جابه‌جایی و دوران پی ساختمان‌ها را مشاهده کرد.



شکل ۵. تغییر شکل سطح خاک بعد از زلزله در اثر گسلش سطحی
بر روی پی دو ساختمان دیگر (Van Dissen et.al, 2019)

مستندات زلزله کاکائیلی و دوز که ترکیه در سال ۱۹۹۹ زمین‌لرزه ۱۷ آگوست سال ۱۹۹۹ کاکائیلی ترکیه ($M_w=7.4$) باعث گسلش سطحی وسیعی شد. گسیختگی سطحی در اثر جابه‌جایی گسل امتدادلغز به‌طور متوسط ۳ تا ۴ متر، همراه با ۲/۴ متر در جهت قائم بود (Lettis et.al, 2000). گسیختگی گسل امتدادلغز باعث ترک‌هایی که به‌خوبی شکل گرفته‌اند، بالا رفتن شیرها در اثر فشار و نشست مناطق تحت کشش شده است.

ناشی از زلزله شده‌اند. در شکل ۳ خانه روستایی را مشاهده می‌کنیم که در مجاورت گسل قرار گرفته و تحت تأثیر جابه‌جایی گسل متحمل خسارتی شده است. سازه این بنا به از چوب و سقف آن به‌صورت فلز موج‌دار بوده و به هنگام زلزله تخریب نشده است (Van Dissen et.al, 2019).



شکل ۳. خانه روستایی قرار گرفته در مسیر گسل کیکرنکو
(Van Dissen et.al, 2019)

همان‌طور که از اشکال برمی‌آید خطوط قرمز و پیکان‌ها نمایانگر امتداد گسل و جهت حرکت گسل می‌باشند. محل قرار گرفتن پی نسبت به جاده کنار آن در قبل و بعد زلزله نشان می‌دهد که این ساختمان تحت گسلش راستالغز حدود ۱۰ متر جابه‌جا شده است. می‌توان مشاهده کرد با جابه‌جایی سازه محیط پی و شمع‌هایی که زمانی زیر ساختمان قرار داشته‌اند بعد از وقوع زمین‌لرزه نمایان شده‌اند. همچنین علاوه بر جابه‌جایی افقی در حدود ۱۰ متر، گسل به میزان ۱ تا ۲ متر نیز در نزدیکی سازه باعث حرکت زمین شده است. می‌توان نتیجه گرفت نیمی از فونداسیون این ساختمان در اثر جابه‌جایی زمین و گسلش سطحی تغییر مکان داده است.

یکی دیگر از ساختمان‌هایی که در این زلزله آسیب دید در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است یک ساختمان یک طبقه چوبی با سقف شیروانی فلزی است که پلان آن به شکل مربع می‌باشد. اکثر ساختمان‌های این منطقه به همین شکل ساخته شده‌اند به‌گونه‌ای که ساختمان را بر روی تخته‌های چوبی بنا شده‌اند. در فاصله ۱۳ متری از این ساختمان یک کلبه چوبی نیز دیده می‌شود. این ساختمان در نزدیکی ساحل و در مجاورت گسل پایداری بنا شده است، به‌طوری که این گسل بعد از زلزله حدود ۳/۵ متر جابه‌جایی عمودی از خود به‌جای گذاشته است.

نتایج برخی از تحقیقات گذشته

نیکولاس اوتل و همکاران (Oettle et al, 2015)، در تحقیق خود با عنوان اثرات دینامیکی گسلش سطحی و اثر متقابل آن بر سازه، با در نظر گرفتن محاسبات عددی، اثرات نرخ گسلش سطحی بر انتشار گسیختگی گسل در میان خاک و در مجاورت سازه‌ها برای شرایط مختلف سازه و خاک را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق اثر اینرسی خاک و همچنین سازه بر روی آن در نظر گرفته شده است.

برای ارزیابی اثرات بالقوه گسلش سطحی بر روی تغییر شکل سطحی زمین در سطوح بالای گسل، شبیه‌سازی عددی انجام شد. خصوصیات حرکت زمین از مطالعات تجربی این حرکت‌ها به‌دست آمده است.

برای تأیید معقول بودن رویکرد عددی که در این تحقیق استفاده شده است، یک مجموعه داده تجربی محدود از حرکت زمین و ساختار خاک گسل بهره گرفته شد. دینامیک پدیده گسلش سطحی، تنها اثر جزئی و متوسطی بر تغییر شکل سطح زمین ناشی از گسیختگی زمین دارد. اثرات ملایم از سرعت لغزش بالا شامل یک تغییر مسیر آرام انتشار گسل از طریق خاک گسیخته نشده، مخصوصاً برای گسل‌های عادی و یک ناحیه وسیع‌تر از فشارهای ناشی از خاک می‌شود.

با این حال، اثر کلی دینامیکی گسل بر تغییر شکل سطح زمین نسبت به پارامترهای دیگر مانند خواص خاک ویژگی‌های گسل جزئی است. برای مقایسه عملکرد مورد انتظار سازه در مجاورت گسل، یک سری آنالیز شبه استاتیکی و دینامیکی انجام شده است.

برای یک سازه که در فرادیواره گسل معکوس قرار دارد، مقدار انحراف گسلش سطحی وقتی که جابه‌جایی گسل به‌سرعت اعمال شود، افزایش می‌یابد. حداکثر اعوجاج زاویه‌ای مربوطه کاهش می‌یابد و سطح خرابی پایین‌تری برای سازه انتظار می‌رود. برای سازه‌ای که در فرودیواره گسل عادی قرار دارد، مقدار گسسته‌شدن گسل کمی کاهش می‌یابد.

پاسخ تغییر شکل اصلاح‌شده زمین موجب شده که اعوجاج زاویه‌ای محاسباتی کمی افزایش یابد. هرچند، برای سازه‌های قرار داده شده در فرادیواره گسل عادی یا فرودیواره گسل معکوس، روند قابل توجهی در مقدار انحراف گسلش سطحی با نرخ گسیختگی گسل مشاهده نشد.

به‌طور کلی، تاثیر در نظر گرفتن گسلش سطحی دینامیکی در محاسبه تغییر شکل دائمی زمین در زیر سازه وضعیت آسیب‌پذیری مورد انتظار، به‌عنوان یک اثر ثانویه برای اکثر سناریوها محسوب می‌شود.

یونیس آناستاسوپولوس و جورج گاستس (Anastasopoulos & Gazetas, 2007) در تحقیق

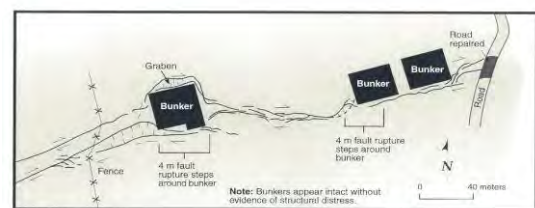
گسیختگی گسل که از مناطق شهری عبور کرده است، نمونه‌ای عالی از اثر گسلش سطحی بر روی سازه‌ها می‌باشد. زلزله ۱۲ نوامبر سال ۱۹۹۹ دوزکه ($M_w=7.1$) گسیختگی‌های واقعه قبلی را تا ۴ متر همراه با جابه‌جایی‌های موضعی عمودی گسترش داد. نمونه‌های متعددی از اثرات گسلش سطحی، خانه‌ها و پل‌هایی است که از بین رفته‌اند (Bray, 2001)... گسلش سطحی اغلب باعث فروپاشی کامل یا خسارت قابل توجه به ساختمان‌هایی که در مسیر خط گسل قرار دارند، می‌شود. به‌طور خاص، در طول بخشی از گسل گولکوک آسیب قابل توجهی رخ داده است، که گسلش سطحی در آن به بیش از ۴ تا ۵ متر می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۶ پیداست، در شهر گولکوک، چندین ساختمان آپارتمانی بتن مسلح به‌وسیله گسلش تخریب یا به‌شدت آسیب دیده‌اند (Bray, 1994, Lazarte &).



شکل ۶. تخریب ساختمان‌ها در اثر گسلش سطحی (Bray, 1994, Lazarte &)

آپارتمان‌های نشان داده شده در سمت راست شکل ۶، به علت گسلش سطحی تخریب شده‌اند. گسل از میان دو آپارتمانی که پابرجا مانده‌اند عبور می‌کند و آخرین آپارتمان حدود ۳ متر از مکان اولیه خود جابه‌جا شده است.

گسلش سطحی همچنین به تعدادی از سازه‌های نیروی دریایی شهر گولکوک آسیب وارد کرد، که در این میان برخی از ساختمان‌ها تخریب شد. هرچند، ۳ پناهگاه که در محل قرار داشت آسیب ندیدند. گسیختگی سطحی، این پناهگاه‌ها که با بتن مسطح تقویت شده‌اند را ۳ تا ۴ متر از هم دور کرده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشهود است، این پناهگاه‌های سنگین بتنی باعث شدند تا گسیختگی به مجاورت آن‌ها انتقال یابد (Bray, 1994, Lazarte &).



شکل ۷. مسیر گسلش در زیر پناهگاه (Bray, 1994, Lazarte &)

(۳) ساختمان‌هایی که پی‌های آن منفرد باشد، ممکن است فقط گسیختگی را به صورت محلی منحرف نمایند. رخنمون گسلش سطحی در محدوده ساختمان، به صورت اعوجاج قابل توجه و اشکال مختلف می‌باشد.

(۴) ساختمان‌هایی که بر روی شمع‌های مجزا (بدون کلاهک مستطیلی پیوسته) قرار دارند، بسیار بدتر از آن‌هایی هستند که بر پی پیوسته و صلب قرار دارند. گرچه شمع‌ها نیز می‌توانند جابه‌جایی را منحرف نمایند.

(۵) سازه‌هایی که در مجاورت گسل‌های فعال قرار دارند، می‌توانند به گونه‌ای طراحی شوند تا در برابر جابه‌جایی تکتونیکی مقاومت نمایند.

جی سن شی و همکاران (Ji-Sen Shi et. al, 2020) در تحقیق خود با عنوان مطالعه بر روی انتشار گسل معکوس در میان خاک ماسه‌ای بر روی زمین شیب‌دار، به بررسی اثرات شیب زمین بر گسل پرداخته‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که شیب زمین تأثیر قابل توجهی بر پاسخ‌های انتشار گسیختگی، لایه خاک و سطح زمین دارد. نتایج اصلی این پژوهش به شرح زیر است:

(۱) میزان گسیختگی گسل در سطح زمین با افزایش شیب افزایش می‌یابد.

(۲) محل رخنمون گسل در سطح زمین در شیب‌های منفی دورتر از شیب‌های مثبت قرار می‌گیرد.

(۳) زاویه شیب گسیختگی گسل در سطح زمین را می‌توان به خوبی با استفاده از تئوری رانکین پیش‌بینی کرد.

(۴) هنگامی که شیب زمین از مثبت به منفی تغییر می‌کند، عرض گسیختگی روی سطح زمین افزایش می‌یابد.

روش پژوهش

جهت شبیه‌سازی در این تحقیق از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس استفاده شده است. تحقیقات گذشته نشان داده است که این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی انتشار گسلش سطحی در خاک نتایج قابل قبولی ارائه داده است.

مطالعات پیشین نشان داده است که مدل موهر-کولومب برای تخمین مسیر انتشار گسلش مناسب است. تغییر شکل سطح زمین در محدوده رخنمون گسل مهم‌ترین عارضه ظاهری گسلش سطحی است که شکل و میزان شیب آن در نقاط مختلف برای سازه‌های سطحی، جدا از اندرکنش گسلش با سازه، اهمیت دارد. از عوامل مهمی که در میزان نشست‌های یکنواخت و غیریکنواخت پی و دوران‌های نسبی آن تأثیرگذارند، جنس خاک و نوع پی را می‌توان برشمرد. در پدیده گسلش سطحی، میزان جابه‌جایی پهنه گسلی، شیب گسل، مکانیزم گسل و در انتها تعداد طبقات ساختمان می‌تواند اثراتی بر میزان دوران پی داشته باشند.

لذا در پژوهش حاضر، برای بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر گسلش سطحی، تعداد طبقات، مکانیزم گسل و پهنه گسلی در طراحی

خود با عنوان سیستم‌های سازه‌ای پی بر روی گسیختگی گسل عادی، به ارائه یک تحلیل عمیق از پدیده انتشار گسیختگی گسل از سنگ‌بستر تا سطح زمین، و اثر آن بر فونداسیون بالای آن، و یا بلافاصله مجاور محل گسلش پرداخته‌اند.

لازم به ذکر است، سازه‌هایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند عبارتند از:

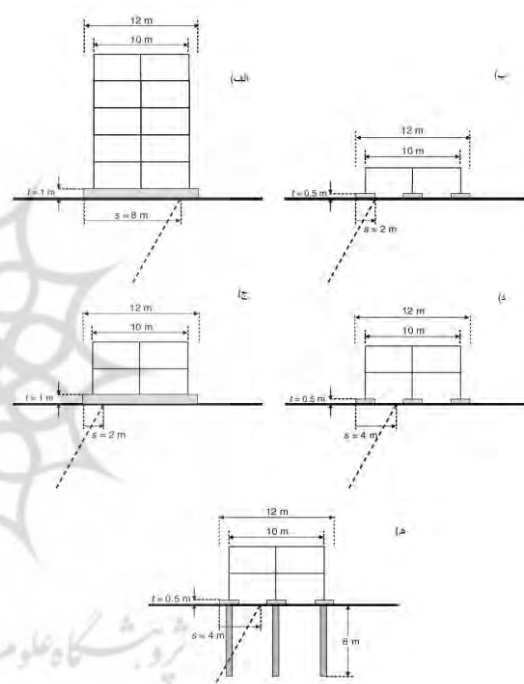
(الف) ساختمان ۵ طبقه با پی گسترده

(ب) ساختمان ۱ طبقه با پی منفرد

(ج) ساختمان ۲ طبقه با پی گسترده

(د) ساختمان ۲ طبقه با پی منفرد

(ه) ساختمان ۲ طبقه با پی شمع



شکل ۸. سازه‌هایی که گسلش سطحی بر روی آن‌ها بررسی شده (Anastasopoulos & Gazetas, 2007)

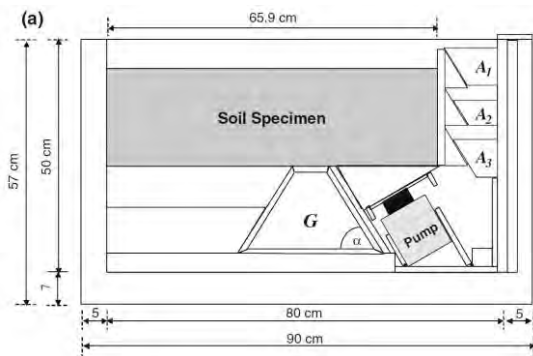
نتایج این تحقیق به شرح زیر است:

(۱) نوع، پیوستگی و صلبیت سیستم پی، تأثیر عمیقی بر پاسخ سازه‌ای که بر روی گسل بنا شده است، دارد. سازه‌هایی که بر روی پی گسترده قرار دارند، بسیار بهتر از آن‌هایی است که روی پایه‌های جداشده یا شمع قرار دارند.

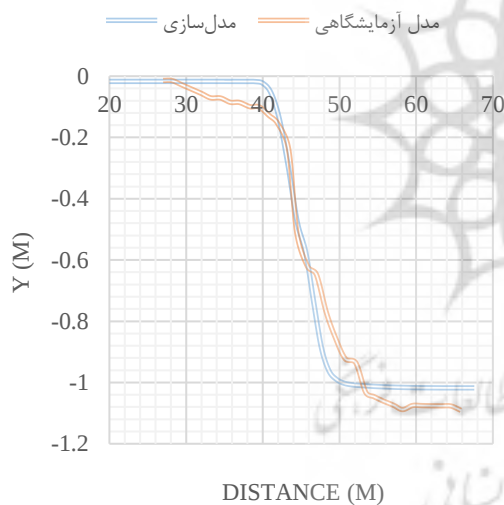
(۲) ساختمان‌هایی که بر پی پیوسته و صلب بنا شده‌اند، ممکن است گسلش را منحرف نمایند. حتی اگر انحراف جزئی باشد، صلبیت فونداسیون باعث گسترش تغییر شکل می‌شود و به سازه اجازه می‌دهد مانند یک جسم صلب، بدون اعوجاج قابل توجهی، بچرخد. این سازه ممکن است از خاک زیر خود جدا شود و از جابه‌جایی‌های اعمال شده رهایی یابد.

صحه‌گذاری

در این گزارش صحه‌گذاری به صورت بررسی کار مشابهی که توسط آناستاسپولوس و گاستس (Gazetas, 2007) و Anastasopoulos & صورت گرفته است، انجام می‌شود و نتایج به دست آمده مقایسه می‌گردد. در این قسمت میزان جابه‌جایی سطح زمین از طریق جابه‌جایی گسل نرمال نشان داده شده است.



شکل ۱۰. شماتیک سانتریفیوژ جهت شبیه‌سازی گسل شیب‌لغز (Anastasopoulos & Gazetas, 2007)



شکل ۱۱. مقایسه نتایج آزمایشگاهی گسل نرمال ۶۰ درجه با جابه‌جایی قائم ۱ متر و نرم‌افزار و کار آزمایشگاهی

همان‌طور که مشخص است اختلاف کمی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی وجود دارد از این رو می‌توان از این مدل جهت بررسی موارد خواسته شده در این تحقیق پرداخت.

یافته‌ها

در ادامه نتایج بررسی اثر گسلش عادی بر روی خاک ماسه‌ای غیر متراکم و خاک ماسه‌ای متراکم به تفکیک و تحت زاویه ۴۵ درجه با در نظرگیری جابه‌جایی‌های قائم ۰/۵ و ۱/۵ متر ارائه شده است.

لرزه‌ای ساختمان‌ها نیز از نرم‌افزار آباکوس جهت تحلیل استاتیکی استفاده شده است.

برای بررسی پدیده گسلش سطحی و اثر آن بر سازه به دو نوع خاک ماسه‌ای غیر متراکم و متراکم پرداخته شده است که مشخصات آن در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱. مشخصات خاک‌های مورد مطالعه

پارامتر	ماسه غیر متراکم	ماسه متراکم
چگالی (kg/m^3)	۱۸۰۰	۲۰۰۰
مدول کشسانی (Mpa)	۲۰	۵۰
ضریب پواسون	۰/۳	۰/۳
زاویه چسبندگی	۳۲	۴۰
زاویه اتساع	۲	۱۰
ضریب چسبندگی	۰	۰

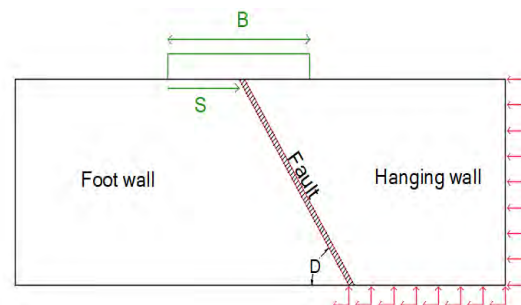
همچنین از پی با طول ۱۰ متر و ارتفاع ۱/۵ متر در همه مدل‌ها استفاده شده است.

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد فونداسیون در نظر گرفته شده در این تحقیق از صلبیت کافی برخوردار است و می‌توان پی را صلب فرض نمود. مشخصات بتن مصرفی در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. مشخصات بتن در نظر گرفته شده

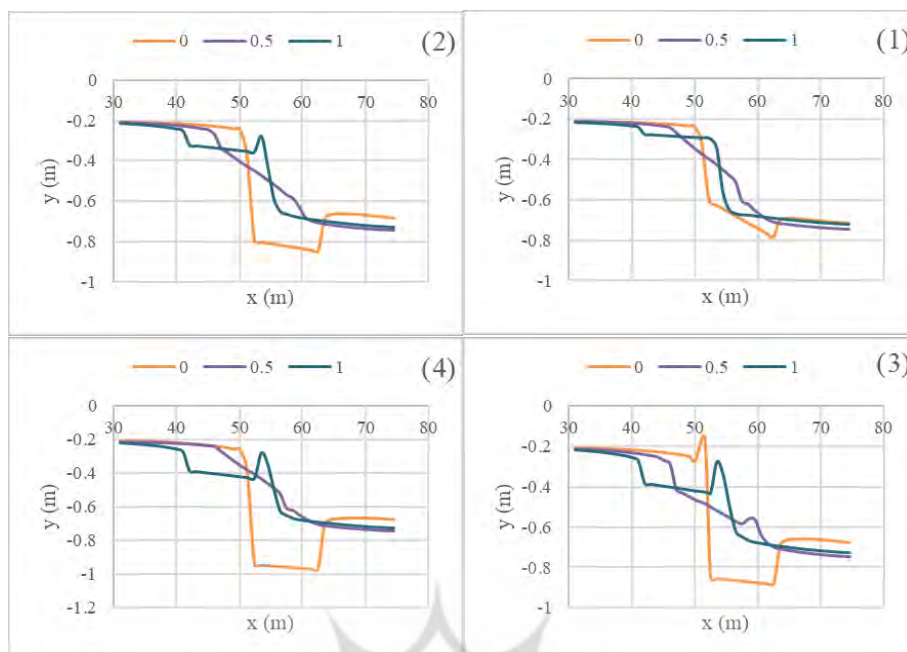
ابعاد (m)	مدول الاستیسیته (Mpa)	ضریب پواسون	چگالی (kg/m^3)	مقاومت فشاری (Mpa)
۱۰×۱/۵	۳۰	۰/۲	۲۵۰۰	۴۰

به منظور تعیین محل رخنمون گسل و موقعیت فونداسیون نسبت به گسل پارامتر S/B تعریف می‌گردد؛ که S فاصله رخنمون گسل در حالت بدون حضور فونداسیون در سطح زمین تا انتهای آن می‌باشد، که ۳ حالت (۰، ۰/۵ و ۱) در تحلیل مدل‌ها استفاده شده است.



شکل ۹. محل رخنمون گسل در سطح زمین و موقعیت فونداسیون نسبت به آن به صورت شماتیک

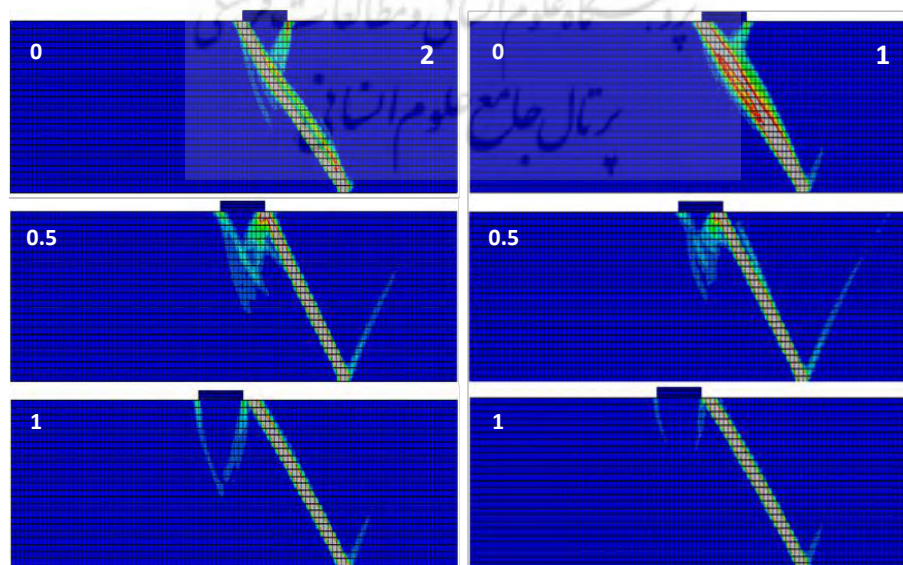
بررسی اثر گسلش عادی بر روی خاک ماسه‌ای غیر متراکم
اثر گسلش با زاویه ۴۵ درجه و جابه‌جایی قائم ۰/۵ متر



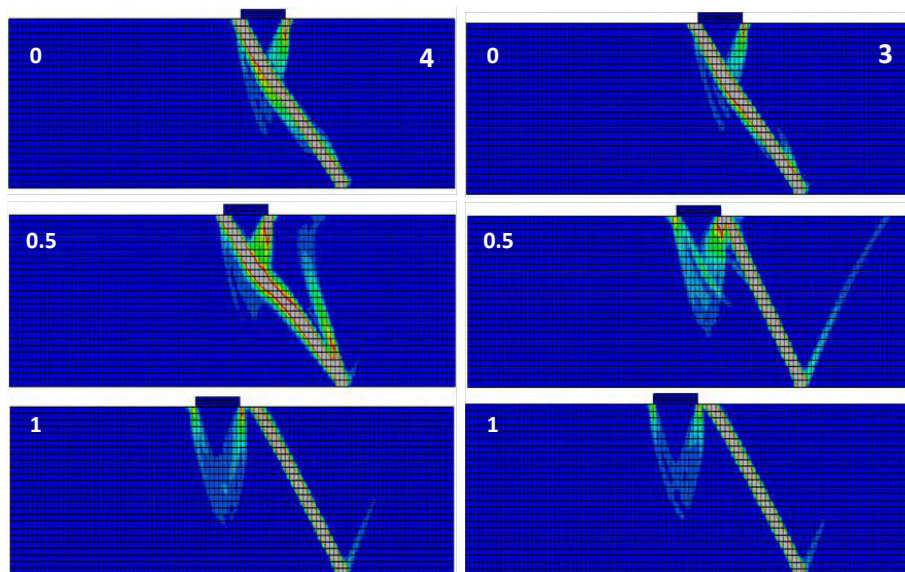
شکل ۱۲. تغییر مکان قائم خاک ماسه‌ای غیر متراکم تحت گسلش با زاویه ۴۵ درجه و جابه‌جایی قائم ۰/۵ متر (۵ طبقه ۲) ۱۰ طبقه ۳) ۱۵ طبقه ۴) ۲۰ طبقه

جدول ۳. دوران پی تحت گسلش با زاویه ۴۵ درجه و جابه‌جایی قائم ۰/۵ متر در خاک ماسه‌ای غیر متراکم

	S/B		
طبقه	0	0.5	1
5	-0.75	-2.61	-0.19
10	-0.49	-2.26	-0.32
15	-0.32	-1.77	-0.46
20	-0.28	-1.51	-0.44

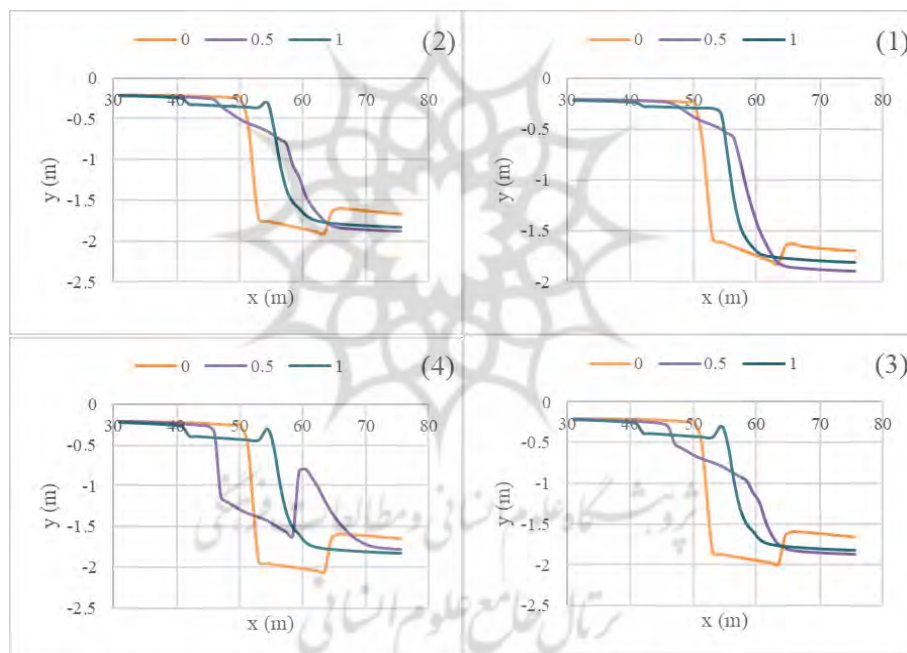


شکل ۱۳. الف) مسیر گسلش با زاویه ۴۵ درجه با جابه‌جایی قائم ۰/۵ متر در خاک ماسه‌ای غیر متراکم (۱) ۵ طبقه ۲) ۱۰ طبقه



شکل ۱۳. ب) مسیر گسلش با زاویه ۴۵ درجه با جابه‌جایی قائم ۰/۵ متر در خاک ماسه‌ای غیر متراکم (۳ طبقه ۱۵ (۴ طبقه ۲۰ طبقه

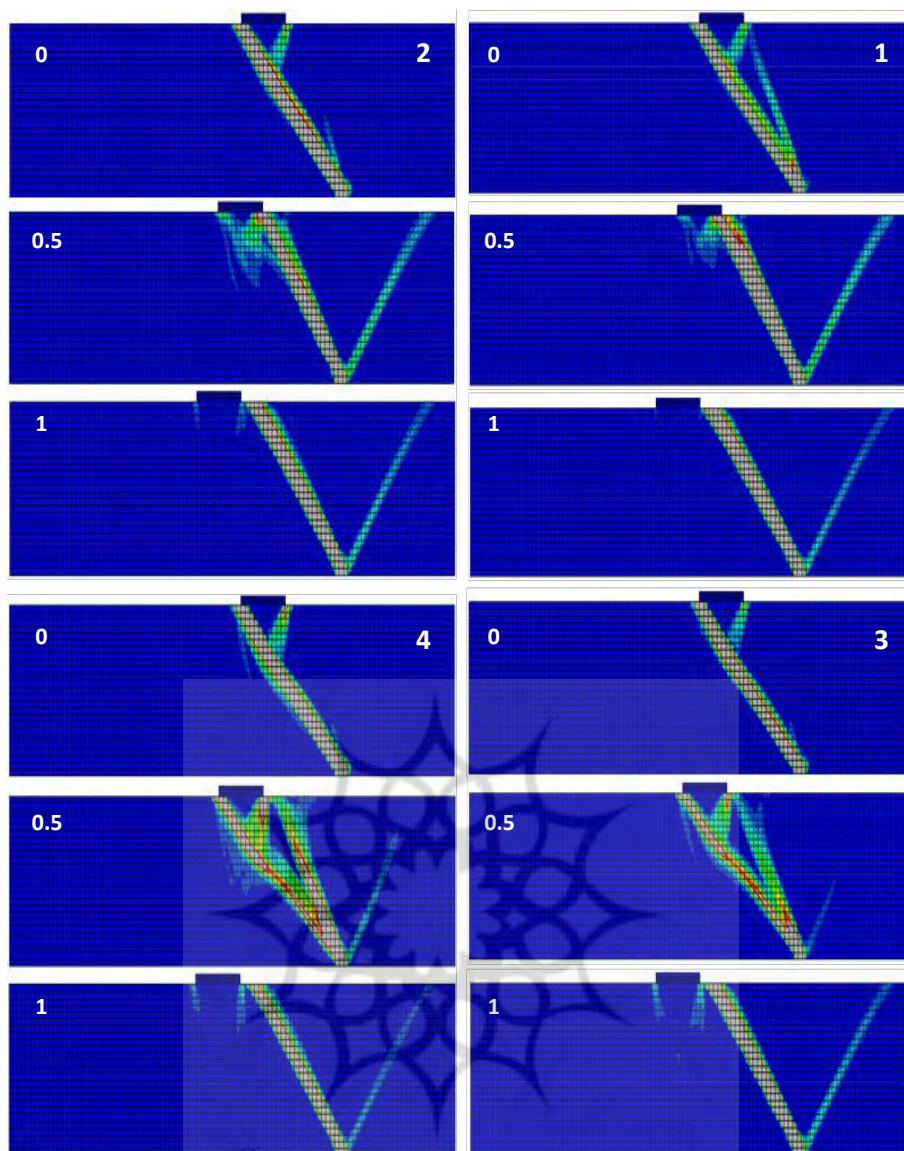
اثر گسلش با زاویه ۴۵ درجه و جابه‌جایی قائم ۱/۵ متر



شکل ۱۴. تغییر مکان قائم خاک ماسه‌ای غیر متراکم تحت گسلش با زاویه ۴۵ درجه و جابه‌جایی قائم ۱/۵ متر (۱ طبقه ۵ (۲ طبقه ۱۰ (۳ طبقه ۱۵ طبقه ۲۰ طبقه

جدول ۴. دوران پی تحت گسلش با زاویه ۴۵ درجه و جابه‌جایی قائم ۱/۵ متر (۱ طبقه ۵ (۲ طبقه ۱۰ (۳ طبقه ۱۵ (۴ طبقه ۲۰ طبقه در خاک ماسه‌ای غیر متراکم

	S/B		
طبقه	0	0.5	1
5	-2.37	-4.01	-0.21
10	-1.67	-4.03	-0.39
15	-1.30	-4.46	-0.52
20	-1.14	-5.64	-0.64



شکل ۱۵. مسیر گسلش با زاویه ۴۵ درجه با جابه‌جایی قائم ۱/۵ متر در خاک ماسه‌ای غیر متراکم (۱) ۵ طبقه (۲) ۱۰ طبقه (۳) ۱۵ طبقه (۴) ۲۰ طبقه

(۴) افزایش جابه‌جایی قائم از ۰/۵ و ۱/۵ تأثیر چندانی بر دوران پی در حالت $S/B=1$ نداشته است. با توجه به انحراف گسلش به اطراف پی، اثرات آن بر پی منتقل نشده و لذا نشست خاک نیز در این حالت کمتر مشاهده می‌گردد. واضح است که در کمترین اثرات در حالتی مشاهده می‌گردد که سازه بر روی فرودبواره قرار داشته باشد.

(۵) در حالت $S/B=0$ ، میزان نشست پی فارغ از میزان جابه‌جایی قائم گسل مشاهده می‌شود، به عبارت دیگر میزان جابه‌جایی گسل بر نشست پی در این حالت اثری ندارد.

(۶) همان‌طور که مشاهده می‌شود مسیر گسلش در سازه ۲۰ طبقه نسبت به سازه‌های کوتاه مرتبه‌تر تغییر کرده که همین امر موجب نشست و دوران بیشتر پی شده است.

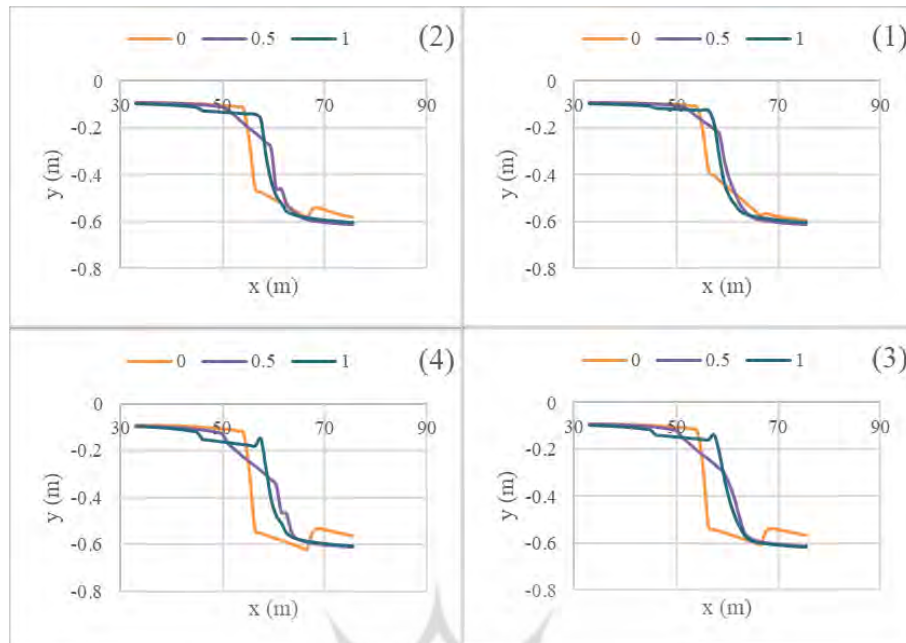
(۷) در این نوع خاک مسیر گسلش به‌خوبی به بیرون از سطح زیر پی منتقل شده اما اثرات آن بر میزان دوران پی قابل چشم‌پوشی نیست.

(۱) در پهنه با جابه‌جایی ۰/۵ متر، با افزایش تعداد طبقات، دوران پی در حالت $S/B=0, 0.5$ کاهش می‌یابد به‌طوری که در $S/B=0$ از ۵ به ۱۰ طبقه این کاهش دوران شدت بیشتری داشته است و علت آن شکل گسیختگی مشاهده شده در زیر پی می‌باشد. در $S/B=1$ با افزایش بار، دوران پی افزایش داشته است. در $S/B=0.5$ گسیختگی و مسیر گسلش به‌طرف دیگر پی منتقل شده است.

(۲) در پهنه با جابه‌جایی قائم ۱/۵ متر، در $S/B=0$ با افزایش تعداد طبقات میزان دوران پی کاهش داشته، در $S/B=1$ افزایش بار موجب افزایش دوران و در $S/B=0.5$ با توجه به نوع گسیختگی که در شکل دیده می‌شود روندی متفاوت دارد.

(۳) دوران پی با توجه به میزان جابه‌جایی قائم ۰/۵ و ۱/۵ متر در $S/B=0$ برای ساختمان‌های ۵ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۲۰۰ و ۳۰۰ درصد افزایش داشته است.

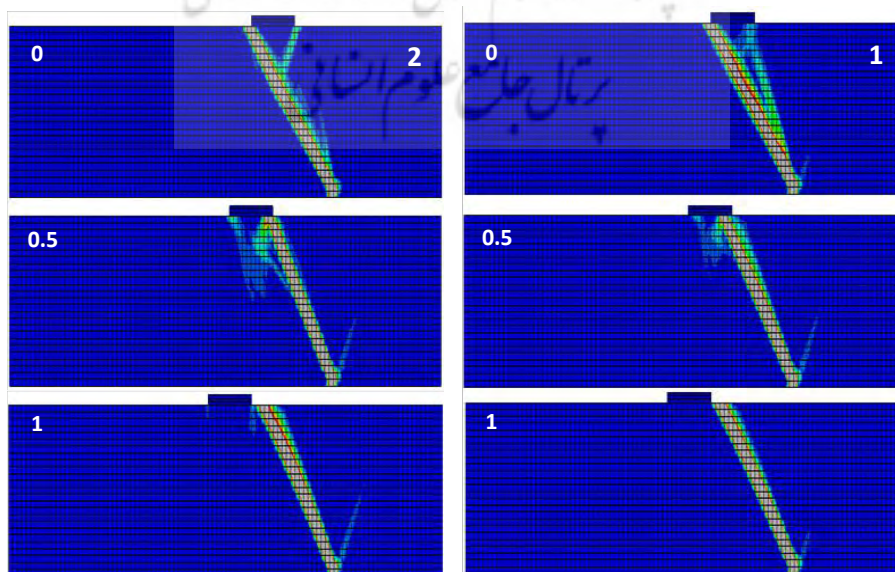
بررسی اثر گسلش عادی بر روی خاک ماسه‌ای متراکم
اثر گسلش با زاویه ۴۵ درجه و جابه‌جایی قائم ۰/۵ متر



شکل ۱۶. تغییر مکان قائم خاک ماسه‌ای متراکم تحت گسلش با زاویه ۴۵ درجه و جابه‌جایی قائم ۰/۵ متر (۱ طبقه ۵ (۲ طبقه ۱۰ (۳ طبقه ۱۵ طبقه ۲۰ (۴ طبقه ۲۵)

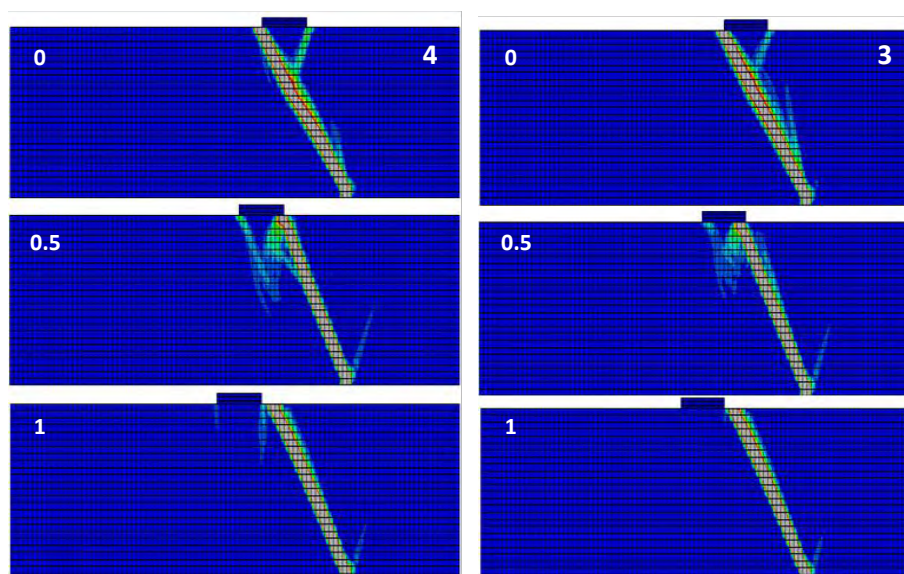
جدول ۵. دوران پی تحت گسلش با زاویه ۴۵ درجه و جابه‌جایی قائم ۰/۵ متر (۱ طبقه ۵ (۲ طبقه ۱۰ (۳ طبقه ۱۵ (۴ طبقه ۲۰) طبقه در خاک ماسه‌ای متراکم

	S/B		
طبقه	0	0.5	1
5	-1.86	-1.79	-0.10
10	-1.19	-1.89	-0.14
15	-0.69	-1.95	-0.20
20	-0.77	-1.95	-0.28



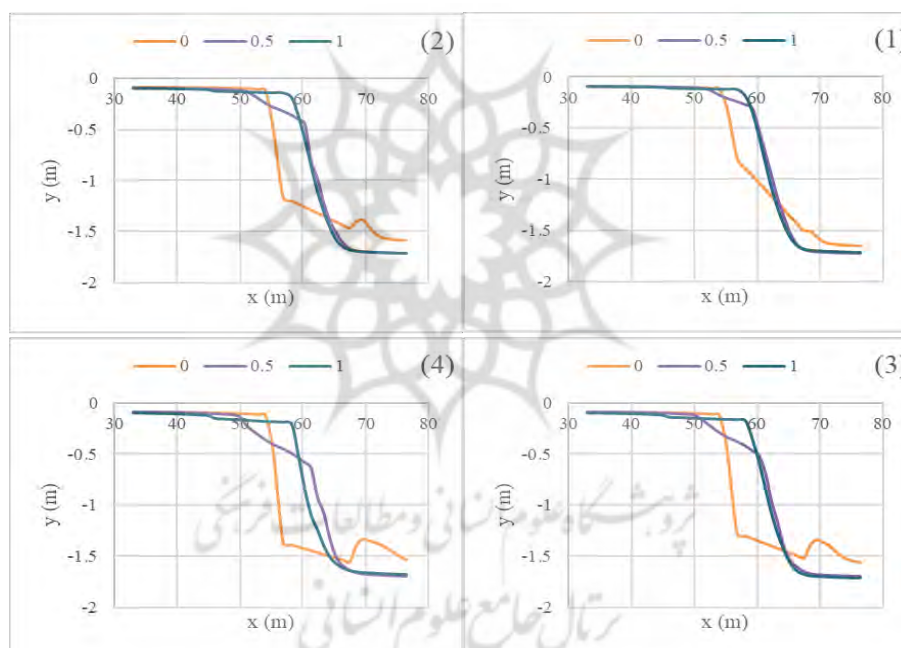
شکل ۱۷. الف) مسیر گسلش با زاویه ۴۵ درجه و جابه‌جایی قائم ۰/۵ متر در خاک ماسه‌ای متراکم (۱ طبقه ۵ (۲ طبقه ۱۰ طبقه ۱۵ (۳ طبقه ۲۰ (۴ طبقه ۲۵)

بررسی تاثیرات متقابل گسلش سطحی و فونداسیون صلب بر یکدیگر در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های نزدیک گسل



شکل ۱۷. ب) مسیر گسلش با زاویه ۴۵ درجه با جابه‌جایی قائم ۰/۵ متر در خاک ماسه‌ای متراکم (۳) ۱۵ طبقه ۲۰(۴) طبقه

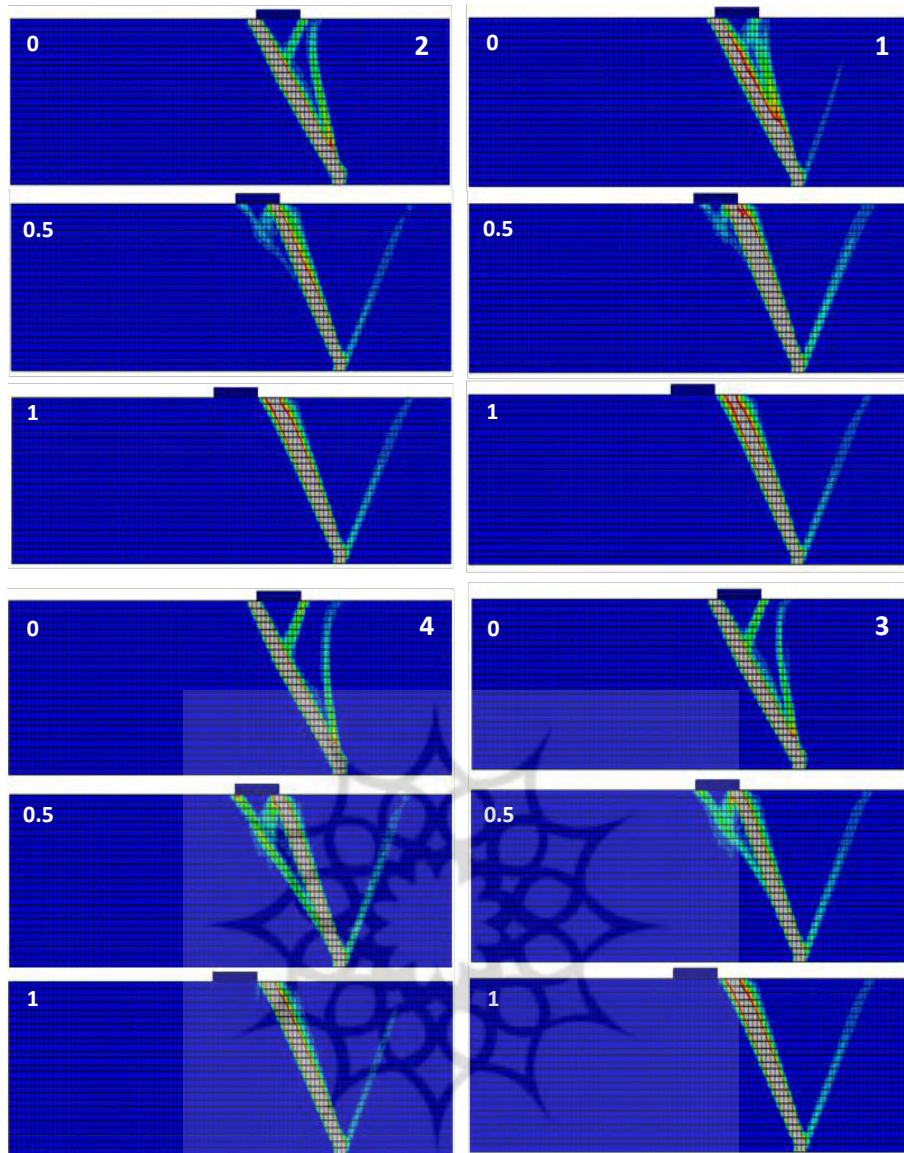
اثر گسلش با زاویه ۴۵ درجه و جابه‌جایی قائم ۱/۵ متر



شکل ۱۸. تغییر مکان قائم خاک ماسه‌ای متراکم تحت گسلش با زاویه ۴۵ درجه و جابه‌جایی قائم ۱/۵ متر (۱) ۵ طبقه (۲) ۱۰ طبقه (۳) ۱۵ طبقه (۴) ۲۰ طبقه

جدول ۶. دوران پی تحت گسلش با زاویه ۴۵ درجه و جابه‌جایی قائم ۱/۵ متر (۱) ۵ طبقه (۲) ۱۰ طبقه (۳) ۱۵ طبقه (۴) ۲۰ طبقه در خاک ماسه‌ای متراکم

	S/B		
طبقه	0	0.5	1
5	-6.55	-3.17	-0.11
10	-2.93	-3.91	-0.16
15	-2.34	-4.40	-0.24
20	-1.81	-4.39	-0.35



شکل ۲۱. مسیر گسلش با زاویه ۴۵ درجه با جابه‌جایی قائم ۱/۵ متر در خاک ماسه‌ای متراکم (۱) ۵ طبقه (۲) ۱۰ طبقه (۳) ۱۵ طبقه (۴) ۲۰ طبقه

(۴) با مشاهده اشکال و نتایج حاصل‌شده، نشست در این نوع خاک به‌شدت کاهش یافته یا به‌طور کلی مشاهده نمی‌شود. (۵) در این خاک بر خلاف خاک غیر متراکم، مسیر گسلش در $S/B=0.5$ تغییر نکرده و به تبع آن نشست پی مشاهده نمی‌گردد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش فونداسیون مورد نظر جهت تحلیل و بررسی به‌صورت صلب در نظر گرفته شده است. فونداسیون و خاک‌های مورد مطالعه در این تحقیق در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و سعی شد تا با بهره‌گیری از ۲ نوع خاک (ماسه متراکم و غیر متراکم) به بررسی اثرات گسلش سطحی با جابه‌جایی‌های قائم مختلف (۰/۵ و ۱/۵ متر) در میزان دوران فونداسیون با توجه به موقعیت قرارگیری آن نسبت به گسلش سطحی در حالت بدون

(۱) در پهنه با جابه‌جایی ۰/۵ متر، با افزایش تعداد طبقات، دوران پی در حالت $S/B=0$ کاهش می‌یابد، در $S/B=0.5$ تقریباً ثابت بوده و در $S/B=1$ روندی افزایشی دارد. علی‌رغم انحراف گسلش به اطراف پی اما به دلیل گسیختگی زیر پی در $S/B=0.5$ موجب دوران بیشتر نسبت به سایر حالات گردیده است.

(۲) در پهنه با جابه‌جایی قائم ۱/۵ متر، در $S/B=0$ با افزایش تعداد طبقات میزان دوران پی کاهش داشته، در $S/B=0.5, 1$ افزایش بار موجب افزایش دوران پی گردیده است. در این پهنه افزایش بار سازه موجب انحراف بهتر گسلش به اطراف پی می‌شود؛ اما گسیختگی زیر خاک پی در حالت $S/B=0.5$ موجب دوران شدیدتر پی شده است. (۳) دوران پی با توجه به میزان جابه‌جایی قائم ۰/۵ و ۱/۵ متر در $S/B=0$ برای ساختمان‌های ۵ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۲۵۰ و ۱۵۰ درصد افزایش داشته است.

اندکی نشست پی مخصوصاً در حالت $S/B=0$ شده است. با افزایش بار این نشست بیشتر شده و دوران پی نیز با شدت بیشتری نسبت به سایر حالات کاهش داشته است.

(۶) در خاک ماسه غیر متراکم در حالت $S/B=0.5$ ، مسیر گسلش سطحی در سازه ۱۵ و ۲۰ طبقه تغییر کرده و نسبت به سازه‌های کوتاه‌تر به طرف دیگر پی منتقل شده است و به دنبال آن خاک زیر پی گسیخته شده که در نتیجه آن پی نشست داشته است.

(۷) سختی خاک موجب شده است تا در اثر گسلش سطحی خاک زیر پی گسیخته نشده و در نتیجه نشست پی اندک یا نشست نداشته باشد.

(۸) افزایش تراکم خاک، بیشترین تأثیر را بر روی دوران پی در سازه‌های ۵ طبقه در حالت $S/B=0$ می‌گذارد. چنان‌که مشاهده می‌گردد با افزایش تعداد طبقات این اثر کاهش می‌یابد.

(۹) در خاک ماسه متراکم با افزایش جابه‌جایی قائم گسل از ۰/۵ به ۱/۵ متر دوران پی بیش از ۲ برابر افزایش داشته و در مقایسه با ماسه غیر متراکم اثر بیشتری بر دوران پی داشته است.

حضور فونداسیون (موقعیت فونداسیون نسبت به رخنمون گسل بدون حضور فونداسیون) پرداخته شود. شیب در نظر گرفته شده جهت گسلش در این تحقیق ۴۵ درجه بوده است. مکانیزم گسل نیز شیب‌الغز در نظر گرفته شده که اثرات بر روی فونداسیون دیده شده است.

در نهایت یافته‌های مهم این تحقیق به شرح زیر است:

- (۱) با بررسی نتایج به‌دست‌آمده، چگونگی انحراف مسیر گسلش به اطراف پی و محل رخنمون این پدیده با توجه به تعداد طبقات و نوع خاک قابل مشاهده است. اما در مواردی نیز اندرکنش این پدیده با لبه پی و یا گسیختگی خاک زیر پی، اثراتی به دنبال دارد.
- (۲) با افزایش تعداد طبقات از میزان دوران کاسته می‌شود؛ و بیشترین میزان دوران در حالی اتفاق می‌افتد که پارامتر $S/B=0$ باشد، با این حال در $S/B=1$ نیز دوران غیر از صفر می‌باشد و مقداری حداقل دارد و بالعکس.
- (۳) بحرانی‌ترین حالت مرتبط با $S/B=0.5$ می‌باشد. با این حال، با افزایش تراکم خاک ماسه‌ای، میزان دوران پی فارغ از تعداد طبقات به میزان کمتری مشاهده می‌شود. به بیان دیگر با افزایش تراکم خاک میزان دوران پی در حالت بحرانی کاهش می‌یابد.
- (۴) گسیختگی خاک زیر پی ناشی از گسلش عادی در خاک ماسه غیر متراکم در بسیاری از حالات موجب

References

- [1] Ben-zion, Yehuda; Sammis, Charles. (2009). [Mechanics, Structure and Evolution of Fault Zones](#). *Pure & Applied Geophysics*; Basel, Vol. 166, Iss. 10-11, 1533-1536.
- [2] Bonilla, M.G., (1982). [Evaluation of potential surface faulting and other tectonic deformation](#). U.S. Geological Survey Open-File Report 82-732, 58 p.
- [3] C. Lazarte, J. Bray, A. Johnson and R. Lemmer. (2000) "[Surface Breakeage of the 1992 Landers Earthquake and Its Effects on Structures](#)," *Bulletin of the Seismological Society*, pp. 547-561, 1994.
- [4] F. Garcia, J. Bray. (2022). "[Discrete element analysis of earthquake surface fault rupture through layered media](#)" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 152, 107021.
- [5] I. Anastasopoulos and G. Gazetas. (2007) "Foundation-Structure Systems over a Rupturing Normal Fault: Part II. Analysis of the Kocaeli Case Histories," *Bull Earthquake Eng*, pp. 277-301.
- [6] J. Bray. (2001). "Developing Mitigation Measures for the Hazards Associated with Earthquake Surface Fault Rupture," *Seismic Fault Induced Failures*, pp. 55-79.
- [7] J. Bray. (2009). "Earthquake Surface Fault Rupture Design Considerations," in Sixth Inter. Conf. on Urban Earthquake Engineering, Center for Urban EQ Engineering, Tokyo.
- [8] Ji-Sen Shi, Dao-Sheng Ling, Cheng-Bao Hu and Fu-bin Tu, "[Study on reverse fault rupture propagation through sand with inclined ground surface](#)" *Engineering Geology*, Volume 276, 105768.
- [9] M. Bonilla, "Surface Faulting and Related Effects," *Earthquake Engineering*, pp. 47-74, 1970.
- [10] M. Tehranizadeh and S. Moradi. (2017). "Investigation on The Effects of Foundation Stiffness on Surface Fault Rupture in Reverse Dip-Slip Faults," *Civil Engineering*, Vols. 33-2, no. 2/2, pp. 61-67. [In persian]
- [11] N. Oettle, J. Bray and D. Dreger. (2015) "[Dynamic Effects of Surface Fault Rupture Interaction with Structures](#)," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 37-47.
- [12] R. Van Dissen and et.al. (2019) "[IMPACTS OF SURFACE FAULT RUPTURE ON RESIDENTIAL STRUCTURES DURING THE 2016 Mw 7.8 KAIKŌURA EARTHQUAKE, NEW ZEALAND](#),"

- Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, vol. 52(1). Pp. 1-22.
- [13] V. Gioncu and F. Mazzolani, [Earthquake Engineering for Structural Design](#), London: Spon Press, 1st edition, 2011.
- [14] W. Lettis and 21 other authors. (2000). "[Surface Fault Rupture](#)," *Earthquake Spectra*, pp. 11-52.

