



## Numerical Analysis of the Effect of a Wall barrier with Eco-line Spheres on Diverting the Faulting Path of a 45-Degree Reverse dip-slip Fault

Nima Ajeli Lahiji

Department of Civil Engineering, Faculty of Civil & Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Behnam Adhami\*

Department of Civil Engineering, Faculty of Civil & Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Gholamreza Ghodrati Amiri

Natural Disasters Prevention Research Center, School of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

Elham Rajabi

Department of Civil Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

beh.adhami@iauctb.ac.ir

DOI : 10.30495/CIVIL.2023.707422

### Keywords:

faulting,  
barrier wall,  
rupture path  
diversion,  
eco-line  
spheres,  
finite elements

### Abstract

Passing through the different soil layers, earthquake-induced faulting can reach the ground surface and cause serious damage to infrastructure, especially bridge structures. Therefore, it is necessary to divert the rupture path from the vicinity of the structure using modern techniques. Embedding a barrier wall on the path of rupture propagation and in the vicinity of the structure is an efficient solution to mitigate the secondary effects of this phenomenon (such as displacement of the earth's surface, and rotation of the structure's foundation). In this paper, a numerical study is carried out on a barrier wall filled with eco-line spheres near a concrete bridge foundation as a novel faulting path diversion technique. Moreover, the effects of different parameters including changes in width, depth, and barrier wall's distance from bridge foundation on rupture path of the 45-degree reverse dip-slip fault, and changes in the vertical displacement and the rotation of the foundation have been studied. The results indicated that when the barrier wall is placed on the rupture path, it can effectively divert the waves and reduce plastic strains, soil strain energy, and ground surface deflections by up to 100 percent and mitigate structural response by up to 50 percent, hence effectively preventing damage to both the ground surface and the structure.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

# بررسی عددی اثر مانع دیواری شامل گویهای ECO-LINE بر انحراف مسیر گسلش ۴۵ درجه شیب لغز معکوس

نیما آجلی لاهیجی

دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران،

ایران

بهنام ادهمی\*

استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

غلامرضا قدرتی امیری

استاد، مرکز تحقیقات پیشگیری از بلایای طبیعی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

الهام رجبی

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

beh.adhami@iauctb.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۰۱ شهریور ۱۴۰۲

تاریخ دریافت: ۱۱ اردیبهشت ۱۴۰۲

## چکیده

گسلش ناشی از زلزله به صورت گسیختگی از لایه‌های زمین و خاک عبور کرده و به سطح زمین می‌رسد و باعث آسیب به سازه‌های زیرساختی به‌ویژه پل‌ها می‌گردد، بدین منظور انحراف مسیر گسیختگی خاک در مجاورت سازه با روش‌های نوین حائز اهمیت است. حفر مانع دیواری در مسیر انتشار گسیختگی و در مجاورت سازه به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر کاهش اثرات ثانویه (جابجایی سطح زمین، دوران فونداسیون و پایه‌های سازه) ناشی از این پدیده است. در این مقاله مطالعه و بررسی عددی یک مانع دیواری پرشده با گوی‌های Eco-Line در مجاورت فونداسیون یک پل بتنی به‌عنوان روشی جدید جهت انحراف مسیر گسلش ارائه گردید و تأثیر پارامترهای مختلف از جمله تغییرات عرض، عمق و فاصله مانع دیواری از فونداسیون پل بر انحراف مسیر، گسل ۴۵ درجه شیب لغز معکوس و تغییرات جابجایی قائم و دوران فونداسیون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، هنگامی که فاصله مانع دیواری تا پایه پل و همچنین عمق مانع به نحوی باشد که در مسیر انتشار امواج گسلش قرار گیرد به نحو مطلوبی امواج منحرف و کرنش پلاستیک، انرژی کرنش خاک و تغییر شکل سطح زمین تا ۱۰۰ درصد و پاسخ سازه حداکثر تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و از آسیب به سطح زمین و سازه جلوگیری می‌کند.

کلید واژگان: گسلش، مانع دیواری، انحراف مسیر گسیختگی، گوی Eco-Line، اجزای محدود

## مقدمه

جابجایی نسبی گسل‌ها نسبت به هم در مرز شکست آنها، ناشی از حرکت صفحات تکتونیکی و رویداد زلزله، باعث به‌وجود آمدن پدیده گسلش می‌گردد. گسیختگی در لایه‌های زمین و خاک منتشر و در سطح زمین به‌صورت رخنمون گسلش سطحی نمایان می‌شود که با اثرات ثانویه جابجایی‌های عمده، دوران و آسیب به سازه‌های محدوده موردنظر همراه است. بدین منظور آیین‌نامه‌های لرزه‌ای تأکید بر این موضوع دارند که در محدوده گسل ساخت‌وساز صورت نگیرد و یا در صورت ضرورت، ساخت سازه در محدوده گسل با مطالعات و رعایت ضوابط ویژه همراه باشد؛ اما باتوجه به رشد جمعیت، توسعه و گسترده‌گی شهرها و راه‌ها به‌صورت عملی جلوگیری از ساخت‌وساز در محدوده گسل امکان‌پذیر نیست. همچنین شریان‌های حیاتی به‌ویژه پل‌ها می‌بایست با کمترین آسیب، قابلیت سرویس‌دهی پس از زلزله جهت امداد و نجات و خدمات‌رسانی داشته باشند؛ لذا موضوع انحراف تغییر شکل‌های ناشی از گسلش با رویکردهای نوین دیوارهای منحرف‌کننده، جهت افزایش تاب‌آوری سازه‌ها و زیرساخت‌های مجاورت گسل، بسیار حائز اهمیت و همواره موردتوجه پژوهشگران است.

این پدیده بعد از زلزله Landers که در سال ۱۹۹۲ در کالیفرنیا به وقوع پیوست به‌صورت جدی بررسی شد [۱،۲]. پژوهش‌های اصلی در این زمینه بعد از سال ۱۹۹۹ و زلزله‌های *duzce kocaeli*، ترکیه و *chichi*، تایوان آغاز شد. این زلزله‌ها باعث ایجاد خسارت‌های کم تا خیلی شدید به حدود ۷۰۰ بزرگراه و تعداد زیادی پل و ساختمان و سد گردید. در شکل ۱ - آسیب‌های گسلش ناشی از زلزله *Chichi* تایوان، سد *Kang-Shih*، به دلیل بالادگی ۹،۱ متری گسل *Chelungpu* در سال ۱۹۹۹ نشان داده شده است [۳]. برای اولین بار نیومارک و هال اثر گسلش را بر روی خطوط لوله مدفون بررسی کردند [۴].



شکل ۱- آسیب به سد *Shih Kang*، به دلیل جابجایی ۹،۱ متری گسل *Chelungpu* زلزله *Chichi-taiwan* در سال ۱۹۹۹ [۵].

لازارت و همکاران<sup>۱</sup> پس از زلزله ۱۹۹۲ کالیفرنیا به ارزیابی و تحقیق در رابطه با الگوهای شکست گسلش و خطرات گسل سطحی پرداختند [۶].

بری و همکاران<sup>۲</sup> ضمن بررسی گسلش معکوس و نرمال ناشی از دو زلزله بزرگ آلاسکا در سال ۱۹۶۴ و *Hebgen* در سال ۱۹۵۹، الگوی گسلش در آبرفت را ارائه نمودند و به این نتیجه رسیدند که گسترش گسلش معکوس در خاک و روند انتشار آن در مصالح سخت با توجه به زاویه گسل در پایه متفاوت است؛ اما در مصالح نرم تفاوتی ندارد [۶،۷].

بری و همکاران، با استفاده از روش عددی المان محدود و مدل‌سازی پروفیل خاک متشکل از لایه‌های مسلح‌کننده ژئوگرید در برابر جابجایی ناشی از گسلش برای مقابله با خطر گسلش سطحی نرمال نشان دادند، استفاده از لایه‌های مسلح‌کننده (ژئوگرید) در خاک باعث گسترده‌گی ناحیه برشی در یک محدوده وسیع‌تر در سطح خاک شده و اعوجاج زاویه‌ای، کرنش‌های کششی افقی و تنش‌های کششی در سطح خاک کاهش می‌یابد [۱].

کلسون<sup>۳</sup> و همکاران، شیوه‌های مختلف تغییر شکل گسل در زلزله چی چی بر اساس ویژگی‌های ژئومورفیک و پاسخ چندین سازه ساخته‌شده را بررسی کردند [۲].

آناستاسوپولوس و همکاران<sup>۴</sup> تحلیل عددی اندرکنش گسل و فونداسیون را انجام دادند. به این نتیجه رسیدند که افزایش اضافه‌بار سازه منجر به انحراف گسیختگی بزرگ‌تر و هموار کردن پروفیل نشست و علاوه بر آن باعث کاهش تنش سازه می‌شود [۸].

<sup>3</sup> Kelson et al.

<sup>4</sup> Anastasopoulos et al.

<sup>1</sup> Lazarte et al.

<sup>2</sup> Bray et al.

کلادیس و همکاران<sup>۹</sup>، قبل از انجام آزمایش‌ها، یک مدل پیش‌بینی عددی از نتایج تجربی تحقیقات گذشته را ارائه کردند و به صورت پارامتریک به بررسی موقعیت پایه پل و محل گسیختگی گسل پرداختند [۱۵].

آناستاسوپولوس و جونز<sup>۱۰</sup>، به عنوان یک روش جدید، نصب مانع پیش ساخته هوشمند متشکل از دو دیواره فولادی و حلقه‌های تسلیم شونده را در مسیر انتشار گسیختگی گسلش، به منظور کاهش تغییر شکل‌های سطحی زمین، در مجاورت فونداسیون سازه پیشنهاد کردند [۵].

آناستاسوپولوس و همکاران، به منظور تاب‌آوری لرزه‌ای زیرساخت‌های موجود، طرح‌هایی را برای کاهش اندرکنش سیستم خاک و سازه در معرض گسلش تحلیل و بررسی کردند [۱۶].

عزیزکندی و همکاران<sup>۱۱</sup>، به منظور کاهش اندرکنش گسل معکوس، دیواره‌های عمودی و شیب‌دار و پایه‌های کم‌عمق را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده آن بود که دیواره‌های عمودی ضعیف زمانی که در مسیر گسیختگی گسل نباشد، بی‌اثر بوده و با توجه به عدم قطعیت‌های رخنمون گسل، دیواره شیب‌دار قوی در گسل‌های معکوس زیر فونداسیون، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد [۱۷].

یائو و همکاران<sup>۱۲</sup>، با استفاده از روش عددی، به بررسی دیوار دیافراگمی صلب جهت کاهش تغییر شکل‌های فونداسیون سطحی، تحت گسل نرمال پرداختند. نتایج نشان داد، اثرات حفاظتی به عمق خاک، عرض پی، محل پی، عمق دیوار، نسبت به گسیختگی و فاصله بین دیوار و فونداسیون بستگی دارد [۱۸].

قوامی و همکاران<sup>۱۳</sup> به بررسی عددی اندرکنش گسل نرمال با پی‌های سطحی پرداخته و نتایج نشان داد که با افزایش فشار سربار پی انحراف مسیر گسیختگی بیشتر می‌شود [۱۹].

سلاجقه و همکاران<sup>۱۴</sup> به بررسی عددی و آزمایشگاهی گسل معکوس با دو سیستم سازه‌ای قاب خمشی و مهاربندی فولادی پرداخته و نتایج نشان دادند که مکانیسم تغییر شکل عناصر سازه‌ای در این دو سیستم اساساً متفاوت بوده و قاب خمشی با آسیب سازه‌ای شدیدتر و یا حتی تخریب کامل مواجه می‌شود [۲۰].

آناستاسوپولوس و همکاران راهکارهای طراحی پل‌ها در برابر تغییر شکل‌های تکتونیکی بزرگ را ارائه کردند [۹].

موسوی و جعفری<sup>۵</sup>، به منظور کاهش آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در برابر خطر گسلش سطحی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و عددی به بررسی رفتار سازه تحت گسلش معکوس با زاویه ۹۰ درجه پرداختند. در نتایج آزمایش‌ها با اعمال جابجایی پایه و مقایسه مقادیر چرخش پی مشاهده کردند لایه ژئوتکنیکی به‌تنهایی برای کاهش خطر گسلش مناسب نیست، اما لایه ژئوتکنیکی به‌سازی شده با ژئوگرید عملکرد مناسبی در کاهش خطر گسلش دارد [۱۰].

فدائی و همکاران<sup>۶</sup>، از دیوار بتونیتی برای محافظت از فونداسیون در مقابل گسل معکوس استفاده کردند. نتایج نشان داد چنین دیواری به دلیل تغییر شکل‌پذیری بالا و مقاومت برشی کم، نیروی فشاری گسل را جذب کرده و گسیختگی را مجبور به انحراف می‌کند. در این حالت فونداسیون بدون تغییر باقی می‌ماند. همچنین عنوان شد در صورتی که مسیر گسل از دیواری محافظ عبور نکند دوران فونداسیون شدید خواهد بود [۱۱].

فدائی و همکاران، در مطالعه امکان‌سنجی انحراف گسیختگی گسل توسط دیواره پر شده با گل حفاری بتونیتی نشان دادند که این دیوار در انحراف گسیختگی گسل می‌تواند مؤثر باشد [۱۲].

بازیار و همکاران<sup>۷</sup>، با مدل‌سازی عددی اندرکنش بین گسل شیب‌لغز و پی سطحی به این نتیجه رسیدند که مقدار جابجایی نسبی و جابجایی سطحی زمین، از روش تقویت خاک با ژئوگرید، کاهش می‌یابد [۱۳].

گازتاس و همکاران<sup>۸</sup>، بررسی آزمایشگاهی و عددی فونداسیون کیسون پلها در گسل‌های نرمال و معکوس را انجام دادند. با روش تجزیه و تحلیل عددی المان محدود سه‌بعدی نتایج را مطابق با آزمایش‌های مدل فیزیکی ارائه دادند. نتایج نشان داد: فونداسیون کیسون یک قید جنبشی را ارائه می‌دهد و بسته به محل دقیق کیسون نسبت به گسیختگی، مکانیسم‌های تعاملی مختلفی ایجاد می‌شود و گسیختگی گسل را به یک سمت یا هر دو طرف خود منحرف می‌کند [۱۴].

<sup>5</sup> Moosavi, Jafari.

<sup>6</sup> Fadaee et al.

<sup>7</sup> Baziar et al.

<sup>8</sup> Gazetas et al.

<sup>9</sup> Kladis et al.

<sup>10</sup> Anastasopoulos, Jones.

<sup>11</sup> Saeedi Azizkandi et al.

<sup>12</sup> Yao et al.

<sup>13</sup> Ghavami et al.

<sup>14</sup> Salajegheh et al.







شکل ۲- گوی‌های Eco-Lin

## ۲- مواد و روش‌ها

بهم‌نظور مدل‌سازی عددی حرکت گسل در خاک و انحراف مسیر گسلش از طریق مانع دیواری پر شده با گوی‌های Eco-line از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس 2D-6.14 استفاده شده است. ابتدا مدل پایه پیشنهاد شده به صورت دوبعدی 2D، در نرم‌افزار اجزای محدود مدل‌سازی و صحت‌سنجی شد و با توجه ساختار پیشنهادی دیواره منحرف‌کننده با ابعاد و مشخصات مختلف مدل‌های بیشتر توسعه داده شد و نتایج تغییرات پارامترهای اساسی با توجه به تغییرات پارامترهای مانع دیواری ایجاد شده، بررسی و تحلیل گردید. عمق محاسباتی خاک مدل‌سازی شده ۳۰ متر و به صورت یکنواخت در نظر گرفته شد. طبق پژوهش بری و همکاران [۷]، در سال ۱۹۹۴ طول محاسباتی خاک می‌بایست حداقل ۴ برابر عمق محاسباتی خاک شبیه‌سازی شده باشد که در این پژوهش طول محاسباتی ۱۲۰ متر است. گسل‌های معکوس از دو قسمت فرادیواره Hanging wall و فرودیواره Footwall تشکیل می‌شوند که در حین گسلش قسمت فرادیواره بر روی فرودیواره می‌لغزد. طول قسمت متحرک (فرادیواره) که بر اساس رخنمون گسلش سطحی در حالت آزاد با باتوجه به مشخصات خاک و ابعاد، برابر با ۲۰ متر و طول قسمت ثابت (فرودیواره) برابر با ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده و همچنین سرعت گسلش ۱ متر بر ثانیه در نرم‌افزار اعمال شده است. گسلش با زاویه ۴۵ درجه و فونداسیون پایه پل به عرض ۱۰ متر در مرکز طول محاسباتی خاک در مدل‌سازی می‌باشد و به‌منظور انحراف مسیر گسلش، یک مانع دیواری پر شده با گوی‌های Eco-Line به ضخامت‌های (B)، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر، عمق‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ متر و فواصل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر از لبه فونداسیون در جهت گسل در نظر گرفته شده است. شکل (۳) شماتیکی از ابعاد دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده، شرایط مرزی و موقعیت قرارگیری فونداسیون پل و مانع دیواری نسبت به گسل شیب‌لغز معکوس را نشان می‌دهد.

ساتسیس و همکاران<sup>۱۵</sup> ایمنی لوله‌های حامل سوخت که از گسل‌هایی که پتانسیل تغییر مکان بزرگ را دارند مورد بررسی قرار دادند و نمودارهای مناسب برای راهنمای طراحی توسعه ارائه کردند [۲۱].

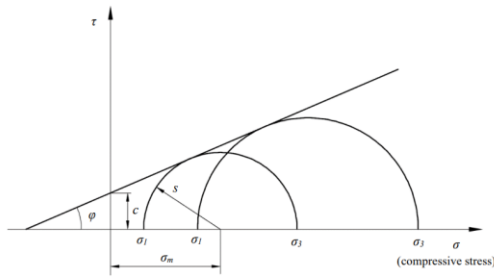
صباغ و قلندرزاده<sup>۱۶</sup> اثرات خصوصیات هندسی، شامل زاویه گسل، جابجایی گسلش، قطر تونل، ضخامت پوشش تونل، و ارتفاع خاک روی تونل بر روی تقاطع گسل-تونل معکوس مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که افزایش قطر تونل باعث افزایش آسیب‌پذیری تونل می‌شود و بیشترین میزان خرابی در گسل ۶۰ درجه رخ می‌دهد [۲۲].

اغلب پژوهش‌هایی که تاکنون در مورد کنترل انتشار گسیختگی ناشی از زلزله و گسلش، از طریق جانمایی مانع دیواری در خاک و جلوگیری از آسیب به سازه به‌وسیله انحراف مسیر گسیختگی خاک انجام شده است، در زمینه ساختمان بوده و در ادبیات فنی مهندسی سازه و زلزله، کمتر به بررسی رفتار پل‌های مجاور مانع دیواری منحرف‌کننده تغییر شکل‌های ناشی از گسلش، پرداخته شده است. همچنین در مطالعات گذشته فضای توخالی مانع دیواری با مصالحی مانند پوک‌ه معدنی، فوم بتن، پلی‌استایرن بتنویت پر شده است. در حالیکه گوی‌های Eco-Line که اغلب به‌عنوان مصالح پرکننده سبک در سقف سازه‌های فولادی و بتن‌آرمه با دهانه‌های عریض کاربرد دارند به علت توخالی بودن و اشغال حجم قابل توجهی می‌توانند گزینه مناسبی جهت قرارگیری در مانع دیواری حفاری شده در زمین باشند. این گوی‌های پلاستیکی که در شکل ۲ نشان داده شده است دارای ابعاد متغیری بوده و قطر خارجی آن‌ها بین ۲۰ تا ۵۰ سانتیمتر (مطابق گزارش شرکت کویاکس ۲۷ تا ۴۵ سانتیمتر) گزارش شده است و عمده کاربرد آن در دال‌های بتنی با دهانه‌های عریض است. این پژوهش با استفاده از روش عددی اجزای محدود، توسط نرم‌افزار آباکوس به‌صورت مدل‌سازی دوبعدی 2D، با تعیین دامنه محاسباتی پیشنهادی خاک شامل گسل، دیواره منحرف‌کننده گسل، حاوی گوی‌های کروی Eco-Line، یک پایه پل بتنی با فونداسیون سطحی انجام شده است. کارایی این دیواره منحرف‌کننده در عرض، عمق و فاصله متغیر مانع دیواری از فونداسیون پایه پل مستقر بر روی سطح خاک و تغییر شکل ناشی از گسلش با زاویه گسل ۴۵ درجه در امواج زلزله، مورد بررسی قرار گرفت.

<sup>16</sup> Sabagh, Ghalandarzadeh.

<sup>15</sup> Tsatsis et al.





شکل ۵- مدل تسلیم موهر کلمب [۲۱]

جدول ۱- مشخصات خاک

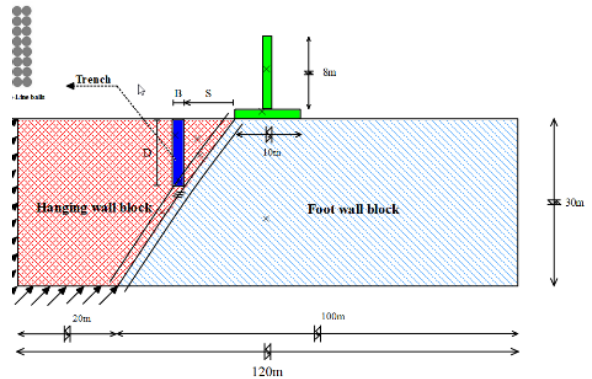
نسبت پواسون	مدول یانگ (مگا پاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
۰٫۳۵	۶۷۵	۱۸۵۰
چسبندگی (کیلو پاسکال)	زاویه اتساع (درجه)	زاویه اصطکاک (درجه)
۱۰	۰	۳۷

برای مش بندی خاک و مانع دیواری از المان CPE4R استفاده شده است. این المان یک المان کرنش صفحه ای Plain strain، ۴ گره ای با انتگرال گیری کاهش یافته Reduced integration، می باشد.

برای در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک و سازه از برخورد تماسی صفحه به صفحه استفاده می شود. به این منظور، روش جریمه Penalty و رفتار مماسی با ضریب اصطکاک بالا برای سنگ بستر تعریف می گردد.

در مازول Load، برای در نظر گرفتن حرکت گسل ابتدا لبه پایینی خاک در فاصله ۲۰ متری از گوشه خاک Partition، زده می شود. سپس قسمت هایی که ثابت هستند مشابه شکل ۶، با تکیه گاه گیردار مقید می شوند. تمامی درجات آزادی انتقالی و دورانی برای این قسمت ها برابر صفر در نظر گرفته می شود. قسمت هایی که باید حرکت کنند به اندازه مشخص در راستای X و Y حرکت داده می شوند. برای اعمال گسلس با توجه به زاویه گسل قسمت فرادیواره می بایست بر روی فرودیواره لغزش کند که مقدار حرکت در راستای Y در همه حالات برابر با ۳ متر در نظر گرفته می شود و مقدار X با توجه به زاویه گسل تعیین می شود.

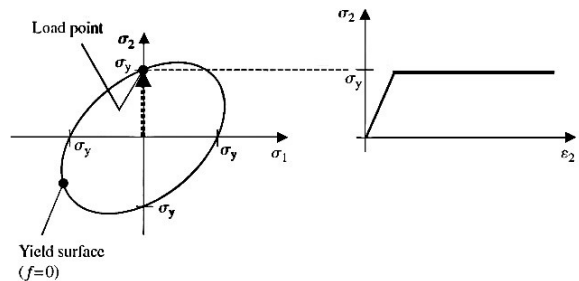
جهت مش بندی دامنه محاسباتی از روش مش آزاد Free-mesh، و از نوع مش بندی صریح Explicit، برای تمامی المان ها از قبیل خاک، سازه و مانع دیواری استفاده شد. ابعاد دقیق المان های مش بندی هر یک از



شکل ۳- شماتیک ابعاد دامنه محاسباتی خاک، گسل، دیواره منحرف کننده، فونداسیون پل

مدل سازی رفتار خاک در نرم افزار آباکوس به روش غیرخطی با مدل ساختاری الاستوپلاستیک خاک با معیار گسیختگی موهر-کولمب و نرم شدگی کرنشی Strain softening، انجام می شود. در این مدل های رفتاری، رفتار مصالح در ابتدا به طور کامل الاستیک بوده و پس از رسیدن به تسلیم، کاملاً پلاستیک می شود. بدین ترتیب مطابق شکل ۴ [۲۳]، منحنی تنش-تنش این مصالح به صورت دوخطی بوده و معیار تسلیم همان معیار گسیختگی است. مدل رفتاری موهر کلمب یک رابطه خطی بین تنش برشی و تنش عمود بر سطح بر روی یک صفحه می باشد که توسط کولمب در سال ۱۷۷۳ ارائه شده است (رابطه ۱) [۲۴]. شکل ۵ [۲۵]، بیانگر مدل تسلیم موهر کلمب می باشد. رفتار سازه به صورت الاستیک و با استفاده از مدول یانگ و نسبت پواسون تعیین می شود. مشخصات متریال در نظر گرفته شده برای خاک در جدول ۱ آورده شده است. همچنین مشخصات گوی های Eco-line و فونداسیون و پایه پل در جدول ۲، نشان داده شده است.

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad \text{رابطه ۱ [۲۰]}$$



شکل ۴- سطح تسلیم در یک مدل رفتاری الاستوپلاستیک و منحنی تنش

– کرنش مربوطه [۱۹]

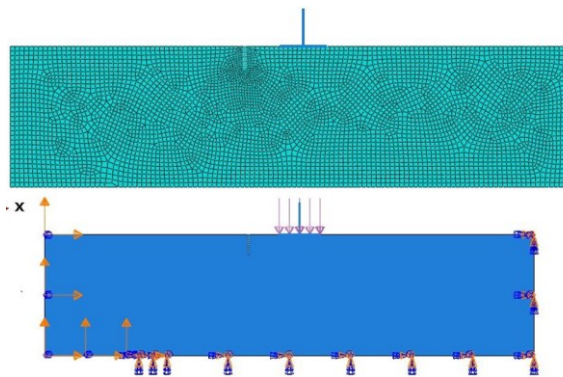


1.5	20	5	A <sub>9</sub>
0.5	5	10	A <sub>10</sub>
1	5	10	A <sub>11</sub>
1.5	5	10	A <sub>12</sub>
0.5	10	10	A <sub>13</sub>
1	10	10	A <sub>14</sub>
1.5	10	10	A <sub>15</sub>
0.5	20	10	A <sub>16</sub>
1	20	10	A <sub>17</sub>
1.5	20	10	A <sub>18</sub>
0.5	5	15	A <sub>19</sub>
1	5	15	A <sub>20</sub>
1.5	5	15	A <sub>21</sub>
0.5	10	15	A <sub>22</sub>
1	10	15	A <sub>23</sub>
1.5	10	15	A <sub>24</sub>
0.5	20	15	A <sub>25</sub>
1	20	15	A <sub>26</sub>
1.5	20	15	A <sub>27</sub>
0.5	5	20	A <sub>28</sub>
1	5	20	A <sub>29</sub>
1.5	5	20	A <sub>30</sub>
0.5	10	20	A <sub>31</sub>
1	10	20	A <sub>32</sub>
1.5	10	20	A <sub>33</sub>
0.5	20	20	A <sub>34</sub>
1	20	20	A <sub>35</sub>
1.5	20	20	A <sub>36</sub>
0.5	5	25	A <sub>37</sub>
1	5	25	A <sub>38</sub>
1.5	5	25	A <sub>39</sub>
0.5	10	25	A <sub>40</sub>
1	10	25	A <sub>41</sub>
1.5	10	25	A <sub>42</sub>
0.5	20	25	A <sub>43</sub>
1	20	25	A <sub>44</sub>
1.5	20	25	A <sub>45</sub>

### ۳- صحت‌سنجی

قبل از مدل‌سازی عددی، انحراف تغییر شکل ناشی از گسلش با استفاده از گوی‌های Eco-Line، نرم‌افزار آباکوس کالیبره شد تا از صحت عملکرد آن در تحلیل مدل‌ها و نتایج خروجی اطمینان حاصل شود. این کار با مدل‌سازی عددی مدل توسعه‌یافته در پژوهش آناستاسوپولوس و همکاران که در نرم‌افزار Abaqus در ۲۰۰۸ انجام شد، و مقایسه جابجایی سطح خاک و انتشار گسلش در خاک به صورت تغییرات کرنش برشی انجام شد. در صورت وجود اختلاف ناچیز میان موارد فوق می‌توان چنین استنباط کرد که نرم‌افزار مورد استفاده جهت مدل‌سازی‌های عددی در این مطالعه قابل اعتماد بوده و از دقت و حساسیت مناسبی جهت ارائه نتایج و خروجی‌ها برخوردار است. برای این کار ابعاد مناسب برای مش‌بندی به روش همگرایی شبکه تعیین گردید، تا علاوه بر افزایش دقت تحلیل و صحت

مصالح با استفاده از همگرایی شبکه محاسبه و اعمال می‌شود. به این منظور ابعاد المان‌های مش بندی خاک برابر با ۱ متر و ابعاد المان‌های مش بندی مانع دیواری برابر با ۰/۱ متر در نظر گرفته شد، از این رو تعداد مش‌های خاک برابر با ۵۵۸۳، تعداد مش‌های مانع دیواری پر شده با گوی‌های Eco-line برابر با ۳۸۴۰ و تعداد مش‌های سازه برابر با ۱۸۰ مش در نظر گرفته شد که در شکل ۶ نمونه‌ای از مش بندی مدل‌ها نشان داده شده است.



شکل ۶- مش بندی مدل و پارتیشن نواحی مرزی  
جدول ۲- خصوصیات مصالح پیل و مانع دیواری

نسبت پواسن (u)	مدول الاستیسیته (E) (kg/m <sup>2</sup> )	چگالی (ρ) (kg/m <sup>3</sup> )	مصالح
0.2	2×10 <sup>9</sup>	2500	فونداسیون و پایه پیل
0.49	2.5×10 <sup>8</sup>	1175	گوی Eco-Line [۲۶، ۲۷]

مدل‌ها با توجه به تغییرات فاصله مانع دیواری از فونداسیون پایه پیل، عمق، عرض مانع دیواری به صورت جدول (۳) نام‌گذاری شد.

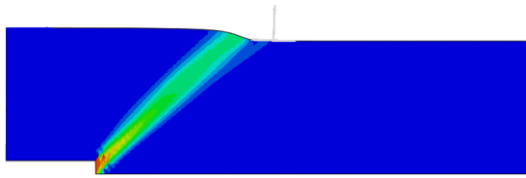
جدول ۳- نام‌گذاری مدل‌ها

نام مدل	فاصله مانع دیواری (s)	عمق مانع دیواری (D)	عرض مانع دیواری (B)
A <sub>1</sub>	5	5	0.5
A <sub>2</sub>	5	5	1
A <sub>3</sub>	5	5	1.5
A <sub>4</sub>	5	10	0.5
A <sub>5</sub>	5	10	1
A <sub>6</sub>	5	10	1.5
A <sub>7</sub>	5	20	0.5
A <sub>8</sub>	5	20	1



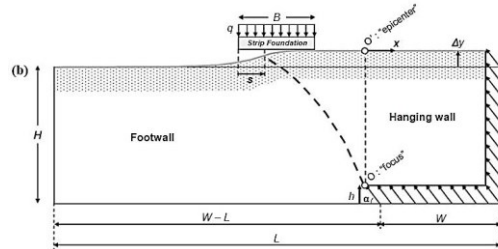
جدول ۴- نتایج مدل‌های پایه

نام مدل	کرنش	انرژی	جابجایی	دوران
	پلاستیک	کرنشی	قائم	حداکثر
	حداکثر	حداکثر	حداکثر	فونداسیون
	خاک	خاک*	فونداسیون	deg
		$J \ 100000$	$m$	
$A_0$	0.775	8.06385	0.358	2.4869

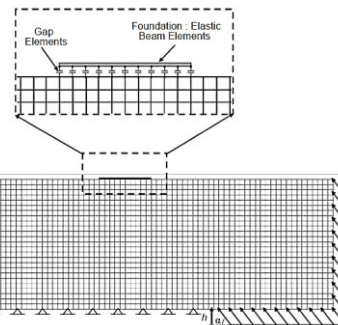
شکل ۹- مدل پایه  $A_0$ 

در تصاویر ۱۰، ۱۱ و ۱۲، انرژی کرنشی حداکثر خاک ناشی از گسلش با تغییر فاصله مانع دیواری از ۵ تا ۲۵ متر از پایه پل نشان داده شده است. برای تفسیر بهتر این نتایج، کرنش پلاستیک در مدل‌ها بررسی خواهد شد. همچنین در تصاویر ۱۳ تا ۱۷، حداکثر کرنش پلاستیک خاک به ازای قرارگیری مانع دیواری در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متری از پایه پل به ترتیب برای ترانشه با عرض ۱ متر و عمق ۱۰ متر نشان داده شده است. با توجه به مدل‌سازی پدیده گسلش با زاویه ۴۵ درجه مسیر و شکل انتشار امواج در طول خاک متفاوت می‌باشد. در گسل ۴۵ درجه برای تمامی عرض‌های مدل شده ترانشه‌ها، نتایج مسیر انتشار امواج مشابه هم بوده و به همین خاطر تصاویر عرض  $B=1.0$  در تصاویر ۱۳ تا ۱۷، نشان داده شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است، در فواصل نزدیک به سازه تمامی ترانشه‌ها با اعماق مختلف در مسیر انتشار موج قرار دارند ولی در ترانشه‌ها با اعماق بزرگ‌تر طبق شکل ۱۸، با عرض ۱ متر و عمق ۲۰ متر، درصدی از طول ترانشه در مسیر گسلش قرار نمی‌گیرد. با زیاد شدن فاصله ترانشه، از طول غیر مؤثر ترانشه‌های عمیق کاسته شده ولی ترانشه‌های کم‌عمق، کمتر در مسیر گسلش قرار خواهند گرفت به نحوی که در فواصل بالای ۱۰ متر عملاً مسیر گسلش از زیر ترانشه با عمق ۵ متری عبور می‌کند. ترانشه‌های با عمق ۱۰ متر تا فاصله ۱۵ متر از سازه موجود مؤثر هستند و ترانشه با عمق ۲۰ متری حداکثر تا فاصله ۲۵ متری در مسیر انتشار امواج می‌تواند مؤثر باشد.

نتایج خروجی، زمان تحلیل نیز کاهش یابد. در شکل ۷ نمایی از دامنه محاسباتی، شرایط مرزی و در شکل ۸ شبکه مش بندی برای مدل‌سازی عددی مسئله انتشار گسلش سطحی بر اساس مدل پژوهش مذکور نشان داده شده است. میانگین اختلاف مقایسه دو مدل عددی مذکور، کمتر از ۵ درصد می‌باشد.



شکل ۷- شماتیکی از دامنه محاسباتی و شرایط مرزی مدل عددی [۸].



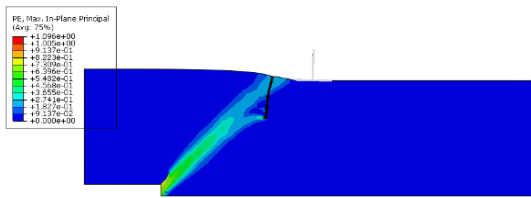
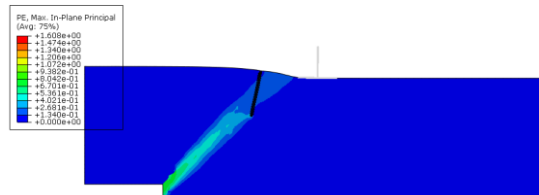
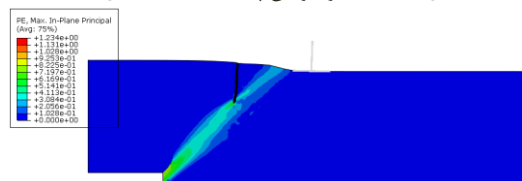
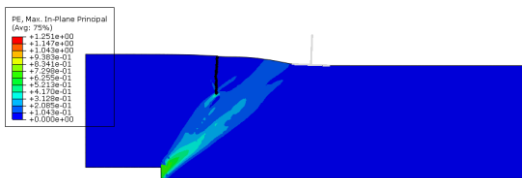
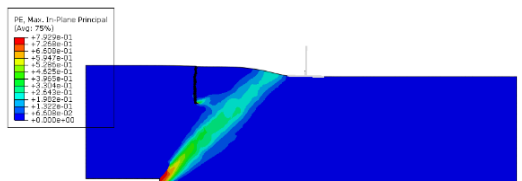
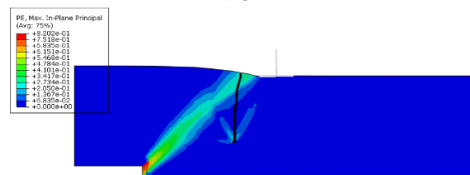
شکل ۸- شماتیکی از شبکه مش بندی مدل عددی [۸].

#### ۴- نتایج و بحث

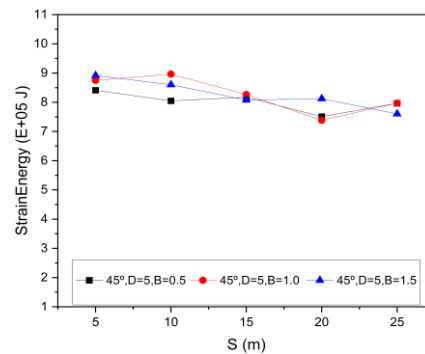
در این مطالعه تحریک ورودی به مدل، برای شبیه‌سازی اثر گسلش، با استفاده از جابجایی فرادیواره به میزان ۳ متر به سمت بالا و میزان جابجایی افقی با توجه به زاویه گسل در نظر گرفته شد. در اثر این جابجایی، انرژی ناشی از لغزش فرادیواره بر روی فرودیواره در مسیر گسلش تا رسیدن به سطح زمین منتشر می‌شود. بررسی کرنش پلاستیک خاک، انرژی کرنشی ایجاد شده و تغییر مکان سطح زمین ناشی از گسلش با تغییر عرض و عمق مانع دیواری، فاصله مانع تا فونداسیون و همچنین با زاویه گسل ۴۵ درجه انجام شده است.

در ابتدا نتایج مدل پایه بدون در نظر گرفتن مانع دیواری در جدول ۴ و شکل ۹، نشان داده شده و در ادامه نتایج مربوط به مدل‌های دارای مانع مورد بررسی قرار گرفته است.

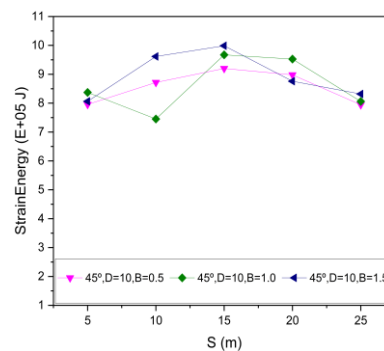


شکل ۱۳- حداکثر کرنش پلاستیک خاک مدل  $A_5$ شکل ۱۴- حداکثر کرنش پلاستیک خاک مدل  $A_{14}$ شکل ۱۵- حداکثر کرنش پلاستیک خاک مدل  $A_{23}$ شکل ۱۶- حداکثر کرنش پلاستیک خاک مدل  $A_{32}$ شکل ۱۷- حداکثر کرنش پلاستیک خاک مدل  $A_{41}$ شکل ۱۸- حداکثر کرنش پلاستیک خاک مدل  $A_8$ 

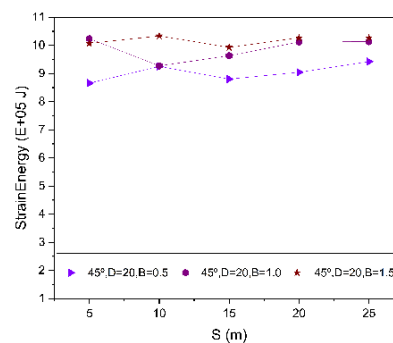
با بررسی نتایج مقادیر جابجایی سطح زمین در اثر گسلش در مدل‌ها، (در اشکال ۱۹ تا ۲۳ نشان داده شده است)، مشاهده می‌شود که در بعضی نقاط جابجایی سطح زمین فرم نرمال خود را نسبت به مدل پایه تغییر می‌دهد که این تغییر به علت قرارگیری ترانشه‌های مصنوعی ایجادشده در آن نقاط است. این ترانشه‌ها در بعضی فواصل دارای مقادیر منفی می‌باشد که نشان‌دهنده فرورفتن سطح زمین در آن ناحیه است. پایین رفتن سطح زمین در اطراف این ترانشه‌ها با افزایش عرض و عمق ترانشه افزایش



شکل (۱۰) انرژی کرنشی حداکثر خاک، مدل‌ها با زاویه گسلش ۴۵ درجه و عمق مانع دیواری ۵ متر

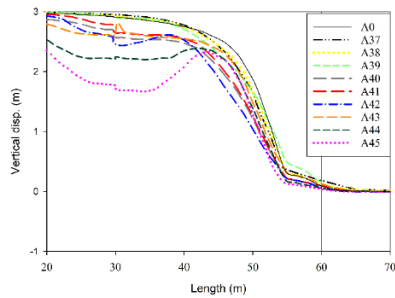


شکل (۱۱) انرژی کرنشی حداکثر خاک، مدل‌ها با زاویه گسلش ۴۵ درجه و عمق مانع دیواری ۱۰ متر



شکل ۱۲- انرژی کرنشی حداکثر خاک، مدل‌ها با زاویه گسلش ۴۵ درجه و عمق مانع دیواری ۲۰ متر

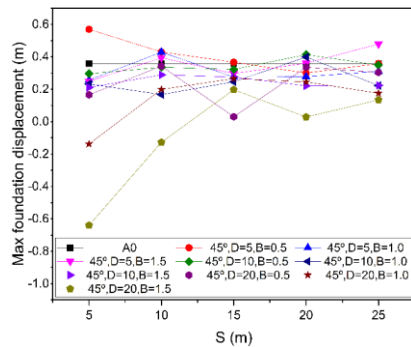
بیشترین کرنش پلاستیک خاک با زاویه گسل ۴۵ درجه و عرض مانع دیواری (B) برابر با ۱ متر، عمق مانع دیواری (D) برابر با ۱۰ متر، فاصله (S) از پایه پل برابر با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ متر در اشکال شماره ۱۳ تا ۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۲۳- مقادیر جابجایی سطح زمین در مدل پایه و مدل‌های  $A_{37}$  -  $A_{45}$

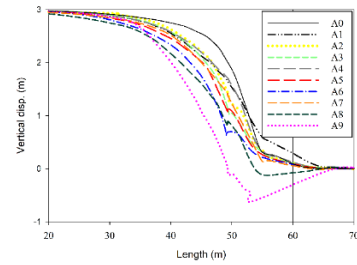
در اشکال شماره های ۲۴ و ۲۵ به ترتیب مقادیر بیشترین جابجایی قائم و دوران فونداسیون برای همه مدل‌ها بر اساس فاصله ترانشه از فونداسیون (S) نشان داده شده است. در این تصاویر مشاهده می‌گردد که نتایج بیشترین پاسخ سازه‌ای وابستگی زیادی به عمق ترانشه دارد.

در گسلش با زاویه ۴۵ درجه ترانشه‌های با عمق ۵ متر نتایج پراکنده‌ای دارد ولی در عرض ۱٫۵ متر تا فاصله حدود ۲۰ متر می‌تواند موجب کاهش پاسخ‌های سازه در مقابل گسل شود. در این گسلش ترانشه‌های با عمق ۱۰ متر در تمامی فاصله‌ها به شکل مطلوبی پاسخ‌ها را کاهش داده که حداکثر مقدار کاهش پاسخ تا ۵۰ درصد نیز می‌رسد. در ترانشه‌های ۱۰ متری افزایش عرض ترانشه و نزدیک شدن به فونداسیون تأثیر کاهش پاسخ‌ها را افزایش می‌دهد. در مورد ترانشه های ۲۰ متری اثرگذاری کلی، مشابه ترانشه ۱۰ متری بوده که با افزایش عرض ترانشه از ۰٫۵ به ۱٫۵ متر با توجه به ریزش خاک ترانشه سازه برخلاف جهت مدل پایه به سمت پایین حرکت کرده و با حرکت پادساعت‌گرد فونداسیون شرایط را نسبت به حالت مبنا تا ۲۵۰ درصد نیز می‌رسد که این شرایط فونداسیون را بحرانی‌تر کرده، در نتیجه باید در انتخاب محل قرارگیری ترانشه با عرض و عمق زیاد دقت کافی به عمل آید.

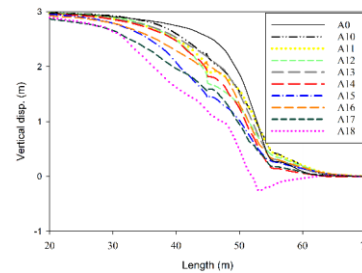


شکل ۲۴- بیشترین جابجایی قائم فونداسیون با زاویه گسلش ۴۵ درجه در همه مدل‌ها

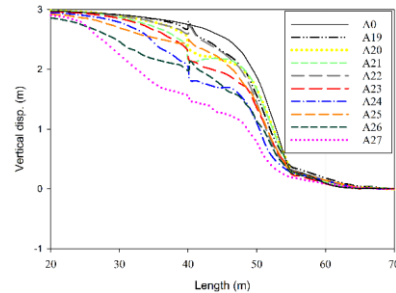
می‌یابد که این عامل موجب کاهش پاسخ‌های سازه (جابجایی قائم و دوران فونداسیون) می‌شود.



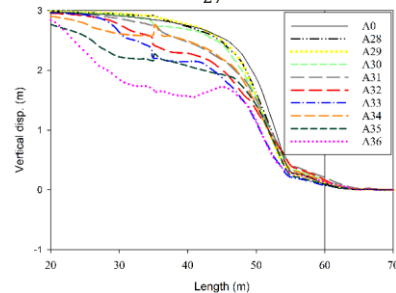
شکل ۱۹- مقادیر جابجایی سطح زمین در مدل پایه و مدل‌های  $A_1$  -  $A_9$



شکل ۲۰- مقادیر جابجایی سطح زمین در مدل پایه و مدل‌های  $A_{10}$  -  $A_{18}$



شکل ۲۱- مقادیر جابجایی سطح زمین در مدل پایه و مدل‌های  $A_{19}$  -  $A_{27}$



شکل ۲۲- مقادیر جابجایی سطح زمین در مدل پایه و مدل‌های  $A_{28}$  -  $A_{36}$

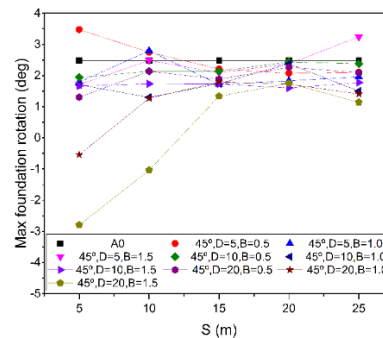
عمق مانع دیواری در بیشترین اندازه ممکن و همچنین عرض مانع به جز فواصل نزدیک به سازه، بیشینه باشد.

#### ۶- پیشنهادات برای تحقیقات آتی

نتایج حاصل از این پژوهش، در یک مطالعه عددی برای گسل ۴۵ درجه و مصالح مورد استفاده در دیوار منحرّف کننده گسلش، گویهای Eco-Line در نظر گرفته شده است، پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آتی اثرات سایر پارامترها مانند زوایای مختلف گسل، لایه‌های خاک، استفاده از سایر مصالح انعطاف‌پذیر نوین در ترانشه، بررسی شود. همچنین ساختن مدل‌های آزمایشگاهی این پژوهش توصیه می‌گردد.

#### منابع

- [1] Bray JD, Ashmawy A, Mukhopadhyay G, Gath EM. Use of geosynthetics to mitigate earthquake fault rupture propagation through compacted fill. In R. Koerner (Ed.), *Geosynthetics' 93: Proceedings of the 4th International Conference on Geosynthetics*; 1993; 1: 379-392).
- [2] Kelson KI, Kang KH, Page WD, Lee CT, Cluff LS.. Representative styles of deformation along the Chelungpu fault from the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake: Geomorphic characteristics and responses of man-made structures. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2001; 91(5): 930-952.
- [3] Pamuk, A., Kalkan, E., Ling, H.I. Structural and geotechnical impacts of surface rupture on highway structures during recent earthquakes in Turkey. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2005; 25(7-10), 581-589.
- [4] Newmark NM, Hall WJ, editors. Pipeline design to resist large fault displacement. *Proceedings of US national conference on earthquake engineering*; 1975: Ann Arbor, MI.
- [5] Anastasopoulos, I., Jones, L. On the development of novel mitigation techniques against faulting-induced deformation: "Smart" barriers and sacrificial members. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019; 124: 297-306.
- [6] Lazarte CA, Bray JD, Johnson AM, Lemmer RE. Surface breakage of the 1992 Landers earthquake and its effects on structures. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994; 84(3): 547-61.
- [7] Bray JD, Seed RB, Seed HB. Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive



شکل (۲۵) بیشترین دوران فونداسیون مدل‌ها با زاویه گسلش ۴۵ درجه در همه مدل‌ها

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش مدل‌سازی عددی یک مانع دیواری پر شده با گوی‌های Eco-Line در مجاورت یک فونداسیون با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود 6.14-2 Abaqus و تأثیر پارامترهای عرض، عمق و فاصله مانع دیواری از فونداسیون پل بر انحراف مسیر گسلش و پارامترهای سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. گسلش با زاویه ۴۵ درجه، عرض مانع دیواری ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر، عمق آن ۵، ۱۰ و ۲۰ متر و فاصله آن از فونداسیون پل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر انتخاب شد. نتایج پژوهش نشان داد به منظور کاهش اثرات گسلش و کاهش کرنش پلاستیک خاک، ابعاد مانع دیواری و فاصله از محل فونداسیون پل برای نمونه مورد بررسی مانع دیواری کم عمق می‌بایست کاملاً در مسیر انتشار امواج ناشی از گسلش قرار گیرد، درحالی‌که درصدی از اندازه عمق مانع‌های با عمق بیشتر، پایین‌تر از مسیر انتشار امواج و مؤثر هستند. در مانع‌های دیواری با عمق ۵ متر در فاصله‌های بالای ۱۰ متر مسیر انتشار امواج گسلش از زیر مانع عبور می‌کند. همچنین مشخص گردید ترانشه‌های با عمق ۱۰ متر تا فاصله ۱۵ متر از سازه موجود مؤثر هستند و ترانشه با عمق ۲۰ متری حداکثر تا فاصله ۲۵ متری در مسیر انتشار امواج می‌تواند مؤثر باشد، لذا انتخاب ابعاد هندسی ترانشه و فاصله از سازه بسیار حائز اهمیت است. مانع دیواری با عمق ۲۰ متر در عرض‌های ۰/۵ و ۱، ۱۰ متری بهترین پاسخ را دارد و نتایج پاسخ سازه اعم از حداکثر جابجایی و دوران فونداسیون را تا ۱۰۰ درصد می‌تواند کاهش دهد، در گسلش ذکر شده نتایج مانع با عمق ۲۰ متر و عرض ۱/۵ متر در فواصل نزدیک، باعث افزایش مقدار حداکثر جابجایی و دوران در خلاف جهت پاسخ‌های مدل‌های پایه می‌شود. لذا در صورتیکه ابعاد هندسی ترانشه و فاصله از سازه به‌درستی طراحی و انتخاب نشود می‌تواند اثرات معکوس و افزایش پاسخ داشته باشد. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت در صورت استفاده از مانع دیواری پر شده با گوی‌های Eco-Line، جهت انحراف مسیر گسلش می‌بایست طراحی



Takewaki I, Yang TY, Astaneh-Asl A, Gardoni P, editors. Resilient Structures and Infrastructure. Singapore: Springer Singapore; 2019. p. 315-60.

[17] Saeedi Azizkandi A, Baziar MH, Ghavami S, Hasanaklou SH. Use of vertical and inclined walls to mitigate the interaction of reverse faulting and shallow foundations: centrifuge tests and numerical simulation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2021;147(2):04020155.

[18] Yao C, Yan Q, Sun M, Dong W, Guo D. Rigid diaphragm wall with a relief shelf to mitigate the deformations of soil and shallow foundations subjected to normal faulting. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020;137:106264.

[19] Ghavami S, Saeedi Azizkandi A, Baziar MH, Jahanbakhsh H. Numerical study on interaction of normal fault with underground tunnels. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*. 2019;5(4):1-12.

[20] Salajegheh A, Davoodi M, Jafari MK, Fadaee M. Experimental and numerical investigation of reverse fault rupture interaction with steel frame structures. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*. 2019;21(1):11-24.

[21] Tsatsis A, Loli M, Gazetas G. Pipeline in dense sand subjected to tectonic deformation from normal or reverse faulting. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019;127:105780.

[22] Sabagh M, Ghalandarzadeh A. Numerical modelings of continuous shallow tunnels subject to reverse faulting and its verification through a centrifuge. *Computers and Geotechnics*. 2020;128:103813.

[23] Jawad SI. Seismic Response of Single Pile Soil Structure Interaction Effect of Cordera bridge foundation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*: IOP Publishing; 2021. p. 012126.

[24] Berdychowski, M., Talaška, K., Malujda, I., Kukla, M. (Eds.). Application of the Mohr-Coulomb model for simulating the biomass compaction process. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Bristol, UK*: IOP Publishing. 2020; 776 (1): 012052

soil. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1994;120(3):562-80.

[8] Anastasopoulos I, Callerio A, Bransby M, Davies M, Nahas AE, Faccioli E, et al. Numerical analyses of fault–foundation interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2008;6(4):645-75.

[9] Anastasopoulos I, Gazetas G, Drosos V, Georgarakos T, Kourkoulis R. Design of bridges against large tectonic deformation. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2008;7(4):345-68.

[10] Moosavi, S., & Jafari, M. (Eds.). Investigation of the surface fault rupture hazard mitigation by geosynthetics. In *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering (Paper No. 1602)*. Lisbon, Portugal: International Association for Earthquake Engineering. 2012; 1602.

[11] Fadaee M, Anastasopoulos I, Gazetas G, Jafari M, Kamalian M. Soil bentonite wall protects foundation from thrust faulting: analyses and experiment. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2013;12:473-86.

[12] Fadaee M, Jafari M, Kamalian M, Moosavi M, Shafiee A. Feasibility study of fault rupture deviation by slurry wall. *International Journal of Civil Engineering*. 2013;11(2):90-9.

[13] Baziar MH, Nabizadeh A, Jabbari M. Numerical modeling of interaction between dip-slip fault and shallow foundation. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2015;13(6):1613-32.

[14] Gazetas G, Zarzouras O, Drosos V, Anastasopoulos I. Bridge–Pier Caisson foundations subjected to normal and thrust faulting: physical experiments versus numerical analysis. *Meccanica*. 2015;50(2):341-54.

[15] Kladis, A., Gelagoti, F., Loli, M., & Gazetas, G. (2016). Bridge subjected to surface fault rupture: A numerical investigation into the mechanics of a bridge system. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(9), 2545-2568.

[16] Anastasopoulos I, Agalianos A, Sakellariadis L, Jones L. Seismic Resilience of Existing Infrastructure: Mitigation Schemes for Soil–Structure Systems Subjected to Shaking and Faulting, and Crisis Management System. In: *Noroozinejad Farsangi E,*



[25] Manual ASUs. Abaqus 6.11. [http://130149.2012;89\(2080\);v6](http://130149.2012;89(2080);v6).

[26] Material property data for engineering materials [Internet]. Department of Engineering, University of Cambridge 2021. Available from: <https://www.ansys.com/content/dam/amp/2021/august/webpage-requests/education-resources-dam-upload-batch-2/material-property-data-for-eng-materials-BOKENGEN21>. 2021.

[27] IRAN C. katalog cobiax 1396 Available from: <https://parsmangroup.com/fa/cobiax>. 1396.