

مدلسازی عددی اندرکنش پی سطحی و گسیختگی گسل نرمال با تأکید بر تأثیر عمق رسوبات

مهدی آشتیانی

استادیار گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

m.ashtiani@nit.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۱

چکیده

در زلزله‌های اخیر، گسیختگی ناشی از گسلش خرابی‌های زیادی را برای سازه‌های مهندسی به همراه داشته است. تحقیقات نسبتاً زیادی نیز در این خصوص به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام شده است. در این تحقیقات، با توجه به محدودیت‌هایی که وجود داشته است عمق رسوبات بالای سنگ بستر بصورت محدود در نظر گرفته شده است. از آنجایی که امکان تأثیر این پارامتر روی رفتار اندرکنشی سازه‌ها و گسل وجود دارد، در این مقاله به بررسی عددی تأثیر عمق رسوبات بر روی اندرکنش یک پی سطحی و گسل نرمال پرداخته شده است. در این خصوص، چهار عمق ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری لحاظ شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که در شرایط میدان آزاد برای خاک شل، تقریباً تفاوتی در محدوده زون گسلش برای اعماق مختلف رسوبات وجود ندارد. اما برای خاک متراکم، با وجود اینکه زون تحت تأثیر گسلش برای اعماق مختلف یکسان است اما گودال ثقلی برای اعماق بیشتر رسوبات مشاهده می‌شود. در مدل‌های اندرکنشی نیز مشاهده شده است که شکل کلی سازوکار اندرکنش پی و گسل برای دو حالت خاک متراکم و شل ثابت باقی مانده است اگرچه مشابه شرایط میدان آزاد، گودال ثقلی به عنوان یکی از مخاطرات در مدل با عمق‌های بیشتر خاک متراکم مشاهده شد. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که برای تخمین مقادیر دوران پی بهتر است که مدلسازی با عمق‌های رسوبات در حدود ۲۰ متر و بیشتر انجام پذیرد.

واژگان کلیدی: گسل نرمال، پی سطحی، مدلسازی عددی، عمق رسوبات

۱- مقدمه

نمودن آن را در طراحی سازه‌های واقع در نواحی گسلی نشان داده است. در این ارتباط، بررسی‌های میدانی زلزله‌ها، سطوح مختلف خرابی بر روی سازه‌ها را اثبات نموده است. تحقیقات در این خصوص، به سه بخش بررسی انتشار گسیختگی ناشی از گسل در شرایط میدان آزاد [1-8] بررسی اندرکنش سازه‌ها

پدیده گسلش به عنوان یکی از مخاطرات تأثیرگذار روی رفتار سازه‌های سطحی و زیرسطحی است که در چند سال گذشته تحقیقات زیادی روی آن انجام شده است. زلزله‌های بوقوع پیوسته در چند دهه اخیر اهمیت بررسی این پدیده و لحاظ

لوله تأثیرگذار بوده و این پارامتر باید در مدلسازی‌ها لحاظ شود. در محدوده بررسی که نویسنده این مقاله داشته است تحقیق دیگری در این خصوص یافت نشده است. پس، در این مقاله به بحث تأثیر عمق‌های مختلف رسوبات روی اندرکنش پی و گسل نرمال پرداخته شده است. برای این منظور مدلسازی عددی بررسی این پارامتر، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و به صورت دوبعدی کرنش مسطح انجام شد.

۲- تعریف مسئله

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است از یک مدل با لایه خاک یکنواخت به عمق H استفاده شده است که گسل نرمال با زاویه شیب 60° به کف آن برخورد نموده و با انتشار در خاک، با پی واقع بر سطح زمین اندرکنش خواهد نمود. جابه‌جایی قائم گسل با مولفه h و رو به پایین نشان داده می‌شود. پی مورد استفاده نیز با عرض B و فشار q است. لبه سمت چپ پایینی پی نسبت به بیرونزدگی گسیختگی ناشی از گسل نرمال در سطح زمین، فاصله‌ای به اندازه s دارد که موقعیت پی را مشخص می‌کند. با انتشار گسیختگی ناشی از گسل نرمال داخل خاک و رسیدن آن به پی، بسته به محل برخورد آن موجب وقوع سطوح مختلفی از انواع خرابی روی پی خواهد شد که پی به صورت دوران و جابه‌جایی این را نشان خواهد داد. شایان ذکر است به منظور بررسی تأثیر عمق رسوبات در رفتار اندرکنشی پی و گسل نرمال، مقادیر H برابر ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر انتخاب شدند.

جدول ۱. مرور اجمالی بر عمق رسوبات در برخی از تحقیق‌های مرتبط با انتشار گسیختگی گسل و اندرکنش با ساختمان

Problem type	Research type	Alluvium depth (m)	Reference
I	Numerical	20, 40	[3]
I, II	Centrifuge	25	[9]
II	Numerical	24.5	[26]
II	Centrifuge	15	[10]
I	Numerical	10	[27]
I	Centrifuge	15	[28]
II	Numerical	20	[12]
I	Numerical and Centrifuge	50	[4]
II	Centrifuge	12	[14]
II	Numerical	25	[29]

Type I: fault rupture propagation through soil layer

Type II: Interaction of fault rupture and foundation

Table 1. An overview on the alluvium depth in some researches related to fault rupture propagation and interaction with building

و گسلش [9-19] و همچنین کاهش خطرات ناشی از گسلش بر روی سازه‌ها [20-24] معطوف شده است. نتایج تحقیقات (از جمله بررسی‌های میدانی، آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی) نشان داد که پارامترهایی از قبیل نوع گسل، زاویه شیب گسل، نوع و سختی خاک، عمق رسوبات بر روی سنگ بستر، وزن ساختمان، نوع و صلبیت پی، موقعیت پی نسبت به بیرونزدگی گسیختگی ناشی از گسل در سطح زمین و ... تأثیر قابل توجهی در رفتار سازه واقع بر زون گسلی دارد. اما به دلیل ماهیت ناشناخته گسل‌ها، رفتار غیرقابل پیش‌بینی آن‌ها و تا حدودی مبهم بودن اندرکنش ساختمان‌ها و گسل‌ها، این تحقیقات همچنان ادامه دارد.

همان‌گونه که در جدول (۱) نشان داده شده است تحقیقات انجام شده بیشتر با عمق‌های رسوبات کم انجام شده است و در برخی موارد نیز اعماق زیاد رسوبات در بررسی‌ها مدنظر قرار گرفته است. برای نمونه، [3] به بررسی تأثیر انتشار گسلش شیب لغز در خاک با عمق ۴۰ متری پرداختند. در تحقیقات آزمایشگاهی نیز به دلیل محدودیت‌های موجود، عمق‌های کمی از رسوبات مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای نمونه، [14] با استفاده از مدلسازی در سانتیفریوژ، به بررسی اندرکنش پی سطحی و گسلش نرمال با عمق رسوبات ۱۲ متر پرداخته است. از این‌رو، امکان تحت تأثیر قرار گرفتن نتایج در نتیجه تأثیر مرز مدل وجود دارد. از آنجایی که رسوبات موجود روی گسل ممکن است عمیق بوده و به عبارتی گسیختگی ناشی از گسل مسیر طولانی را در خاک طی نماید؛ همواره این سوال وجود دارد که مدلسازی محدود عمق رسوبات در بحث اندرکنش گسل و پی به چه میزانی تأثیرگذار است. در این ارتباط، با توجه به محدودیت‌های موجود در مدلسازی‌های آزمایشگاهی برای عمق‌های زیاد رسوبات و همچنین زمان‌بر بودن مدلسازی‌های عددی با ابعاد بزرگ، نیاز به بررسی دقیق‌تر میزان تأثیر عمق رسوبات روی اندرکنش پی و گسل نرمال وجود دارد. برای نمونه، [25] به بررسی تأثیر عمق رسوبات در اندرکنش گسلش معکوس و لوله‌های مدفون گاز با استفاده از مدلسازی عددی پرداختند. آنها دریافتند که عمق رسوبات روی رفتار اندرکنشی

موردنظر برای تعیین مدول الاستیسیته است.

جدول ۲. پارامترهای خاک‌های ایده‌آل مورد استفاده در تحلیل‌های پارامتری [12]

Soil type	Density (kg/m ³)	Peak friction angle (°)	Residual friction angle (°)	Dilatation angle (°)	Elasticity modulus (MPa)	Poisson ratio
Dense	2000	45	30	18	2.25Z	0.3
Loose	1600	32	30	5	0.75Z	0.35

Z is soil depth

Table 2. Ideal soil parameters used in parametric analyses [12]

پی به عرض B با استفاده از المان تیر و رفتار الاستیک مدل شده است. پی روی خاک قرار داده شده و از طریق المان‌های تماس به خاک متصل می‌شود. برای این حالت از الگوریتم تماسی سطح به سطح در نرم‌افزار اضافه شده است. این قبیل المان‌ها در فشار دارای سختی بی‌نهایت بوده و اجازه نفوذ سطوح به داخل یکدیگر را نخواهند داد. اما در کشش مقاومتی از خود نشان نمی‌دهند و به راحتی دو سطح از یکدیگر جدا می‌شوند. همچنین، رفتار این المان‌ها در برش نیز از قانون اصطکاکی کولمب پیروی می‌کند. مقدار ضریب لغزش براساس اصطکاک بین خاک و بتن پی فرض شده و برابر $\frac{2}{3}\phi$ لحاظ شده است که ϕ زاویه اصطکاک خاک می‌باشد. در ضمن، جابه‌جایی غیریکنواخت به بخش راست مدل به صورت شبه‌استاتیکی و به صورت مراحل پی‌درپی با نمونه‌های کم اعمال شده است.

۴- تحلیل‌های عددی

به منظور بررسی تأثیر عمق رسوبات در اندرکنش گسیختگی گسل نرمال و پی‌های سطحی، یک سری تحلیل‌های پارامتریک با استفاده از مدل عددی اعتبارسنجی شده با نتایج آزمایش سانتریفیوژ، انجام پذیرفته است. در این مدل‌ها گسل نرمال با زاویه شیب 60° به لایه خاک با عمق‌های متفاوت رسوبات، پی به عرض ۱۰ متر و خاک‌های متراکم و شل اعمال شده است. پی در سطح زمین و بصورت صلب (با صلبیت خمشی kNm^2 در $EI=10^8$) در نظر گرفته شده است. در این حالت، فرض می‌شود که $EI=10^8 \text{ kNm}^2$ معرف یک پی صلب است. پارامترهای زیر در تحلیل‌های پارامتریک مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

- عمق رسوبات: $H=15, 20, 30, 40 \text{ m}$

شکل ۱. تعریف مسئله: اندرکنش بین گسیختگی گسل نرمال و پی سطحی با عرض B و فشار q

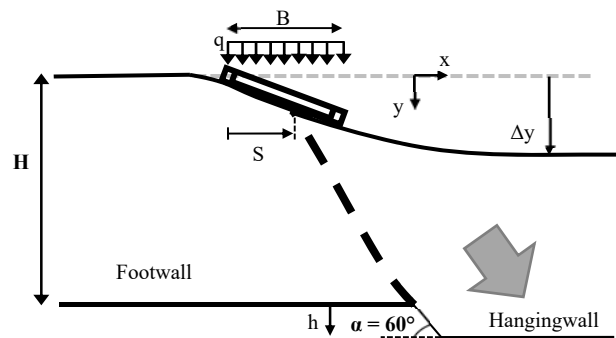


Fig. 1. Problem definition: interaction between normal fault rupture and shallow foundation with width B and surcharge q

۳- پارامترهای مورد استفاده در مدلسازی

تحلیل‌ها به صورت دوبعدی و در شرایط کرنش مسطح با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس انجام شده است. به منظور کمتر کردن تأثیر مرزها روی نتایج مدلسازی‌های عددی، پهنای مدل برای عمق رسوبات ۳۰ و ۴۰ متر برابر $4H$ [2] انتخاب شد. اما برای مدل با عمق رسوبات ۱۵ متر و ۲۰ متر به ترتیب $6H$ و $5H$ در نظر گرفته شدند. دلیل افزایش پهنای مدل برای دو حالت اخیر این است که احتمال دارد با توجه به پهنای کم مدل وجود پی به عرض ۱۰ متر بر روی خاک، نتایج تحلیل‌های عددی تحت تأثیر مرز قرار گیرد. پس، با افزایش مقدار پهنای مدل، سعی در رفع این مسئله وجود دارد. خاک با استفاده از المان‌های کرنش مسطح چهاروجهی با اندازه 0.5 متری مدلسازی شده است. در این تحقیق مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر-کولمب با نرم‌شوندگی همسان کرنش در نظر گرفته شده است که توسط [3] توسعه داده شد. در این مدل رفتاری، رفتار نرم‌شونده بعد از پیک خاک، با استفاده از یک زیربرنامه به نرم‌افزار اضافه شده است.

به منظور انجام مطالعات پارامتریک از دو نوع ماسه ایده‌آل شل و متراکم [3] در مدلسازی‌ها استفاده شده است. رفتار پیش از تسلیم خاک نیز به صورت الاستیک مدلسازی شده است. مقدار مدول الاستیسیته خاک بطور متغیر در عمق خاک لحاظ شده است. مشخصات خاک‌های مورد استفاده در جدول (۲) بطور خلاصه آورده شده است. منظور از Z در این جدول همان عمق

تغییر شکل یافته میدان آزاد انتشار گسیختگی گسل نرمال با زاویه شیب 60° از داخل خاک ماسه ای با دانسیته نسبی 60% و عمق 25 متر را نشان می دهد. نتایج مدلسازی نشان می دهد هرچه گسیختگی گسل به سطح زمین نزدیک شود، شیب این خط بیشتر می شود. کانتورهای کرنش برشی پلاستیک نشان داده در شکل (۲-ب) نیز نشان می دهد که مدل عددی توانسته است تا حد زیادی چگونگی انتشار گسیختگی گسل نرمال را از داخل لایه خاک به خوبی مدل نموده و همخوانی خوبی با نتایج مدل سانتریفیوژ دارد. همچنین، مقایسه نتایج مربوط به جابه جایی قائم سطح زمین در شکل (۲-پ) نیز تصدیق می کند که نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی در این خصوص نیز هماهنگی خوبی دارند.

شکل ۲. مقایسه انتشار گسل نرمال با شیب 60° در شرایط میدان آزاد از داخل ماسه با $Dr=60\%$ (الف) مدلسازی سانتریفیوژ [9]، (ب) مدلسازی عددی، (پ) پروفیل جابه جایی سطح زمین

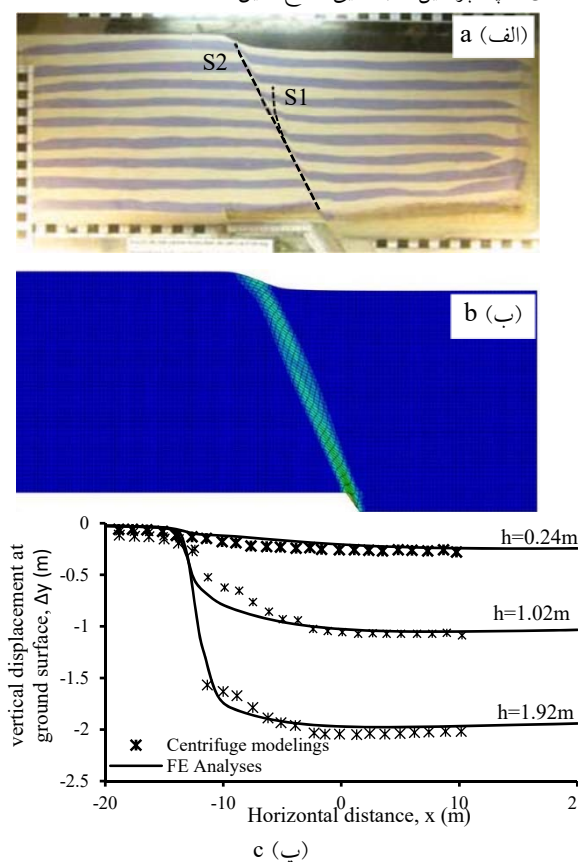


Fig. 2. Comparison of the free-filled normal faulting propagation with a dip angle of 60° through sand with $Dr=60\%$; (a) centrifuge modeling [9] (b) numerical modeling, (c) the vertical displacement profile of the ground surface

- موقعیت پی نسبت به بیرون زدگی گسیختگی سطحی

گسل: $s/B=0/0, 0/25, 0/50, 0/75, 1/0$

- وزن پی: $q=40, 60, 80, 100$ kPa. با فرض اینکه وزن

واحد سطح هر طبقه از ساختمان 10 kN/m^2 باشد، فشارهای مذکور به ترتیب معادل ساختمان های $4, 6, 8$ و 10 طبقه هستند.

- نوع خاک: متراکم و شل

۴-۱- اعتبارسنجی مدلسازی عددی

اندرکنش پی سطحی و گسل نرمال با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ دانشگاه داندی [9] با شتاب $115g$ انجام شده است. برای انجام آزمایش ها از یک شبیه ساز گسلش دو بخشی با ابعاد داخلی $655/9$ mm (پهنا) \times 500 mm (پهنا) \times 220 mm (عمق) استفاده شده است. در این آزمایش ها، تأثیر گسیختگی ناشی از گسل نرمال با شیب 60° روی پی سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. عمق مدل آزمایشگاهی در شرایط واقعی برابر 25 متر، طول مدل نیز برابر 76 متر و خاک از نوع ماسه خشک با تراکم نسبی 60% می باشد. در حدود 24 متر از کف مدل (بخش فرادپواره) تحت جابه جایی ناشی از گسلش قرار گرفته و در حدود 52 متر آن (بخش فرودپواره) نیز به صورت ثابت باقی مانده است. پی به عرض 10 متر با فشار سربار 90 kPa در موقعیت $s=3/0$ m نسبت به بیرون زدگی گسیختگی گسل بر روی سطح زمین قرار داده شد. پارامترهای ماسه مورد استفاده در اعتبارسنجی مدلسازی عددی نیز در جدول (۳) ارائه شده است. شایان ذکر است ابعاد مدل عددی برای اعتبارسنجی به درستی با ابعاد مدل آزمایشگاهی مذکور هماهنگی دارد. همچنین، خاک با المان های کرنش مسطح چهاروجهی با اندازه $0/5$ متری و پی با المان الاستیک خطی تیر مدلسازی شده اند.

جدول ۳. پارامترهای خاک مورد استفاده در اعتبارسنجی مدل عددی [3]

Density (kg/m ³)	Peak friction angle (°)	Residual friction angle (°)	Dilation angle (°)	Elasticity modulus (MPa)	Poisson ratio
1570	36	30	6	45	0.35

Table 3. Soil parameters used in verifying the numerical modeling [3]

پیش از انجام مدلسازی های مربوط به اندرکنش پی و گسل، مدل میدان آزاد مربوط به انتشار گسیختگی گسل نرمال از میان لایه خاک ماسه ای خشک مدلسازی شد. شکل (۲-الف) مدل

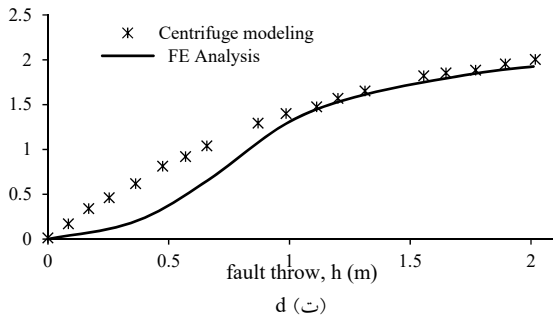


Fig. 3. Foundation-normal fault rupture interaction mechanism for $B=10\text{m}$, $q=90\text{kPa}$, $s=3.0\text{m}$; (a) centrifuge modeling [9], (b) numerical modeling, (c) vertical displacement of the ground surface, (d) rotation of foundation

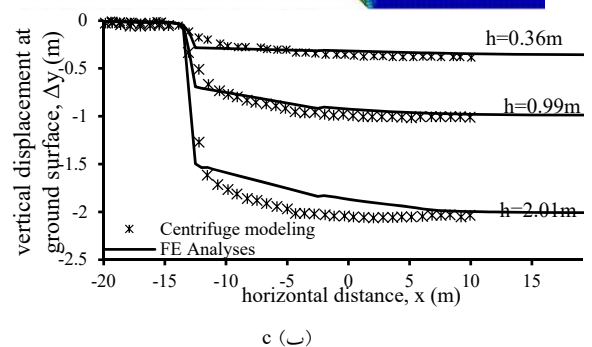
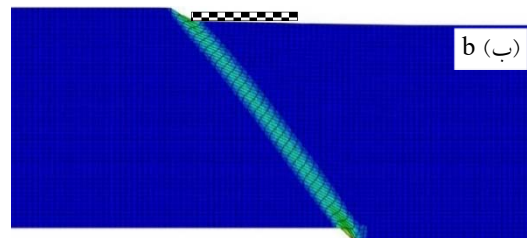
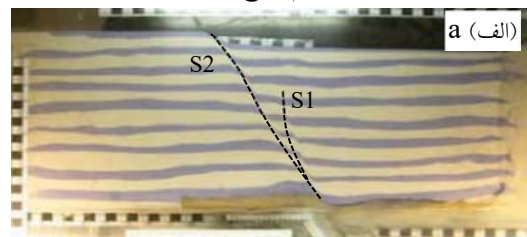
همان‌گونه که در شکل‌های (۳-پ و ۳-ت) نشان داده شده است پروفیل جابه‌جایی قائم سطح زمین و دوران پی مدل‌های عددی و آزمایشگاهی نیز تا حد قابل قبولی مشابه یکدیگر هستند. اگرچه، برای مقادیر کم جابه‌جایی گسل، مقادیر دوران پی در مدل عددی و آزمایشگاهی با هم تفاوت دارند. به نظر می‌رسد دلیل این امر را می‌توان به زودتر رسیدن گسیختگی ناشی از گسل به سطح زمین و تأثیر آن روی پی، در مدل آزمایشگاهی در مقایسه با مدل عددی، نسبت داد. بطور کلی، از جنبه انتشار گسیختگی گسل در خاک و پیش‌بینی دوران پی، می‌توان اذعان نمود که مدل عددی توانسته است اندرکنش پی و گسل را به خوبی شبیه‌سازی نماید.

۴-۲- مدل‌های میدان آزاد

مدل‌های عددی میدان آزاد برای خاک در دو حالت متراکم و شل، برای عمق‌های رسوبات ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر تحلیل شدند. شکل‌های (۴-الف و ۴-ب) پروفیل تغییرات جابه‌جایی قائم سطح زمین را برای عمق‌های مختلف رسوبات به ترتیب برای خاک متراکم و شل در شرایط میدان آزاد گسل نرمال با زاویه شیب 60° نشان می‌دهند. همان‌گونه که در این دو شکل مشخص است محل بیرون زدگی گسل به ازای تغییر در عمق رسوبات یکسان بوده و زون تأثیر گسلش در تمامی عمق‌ها تقریباً یکسان است. موضوعی که باید بدان توجه داشت این است با افزایش عمق رسوبات، برای خاک متراکم گودال‌های ثقلی در زون تأثیر گسلش ایجاد می‌شود. به عبارتی دیگر، علاوه بر گسیختگی اولیه، گسیختگی ثانویه نیز در مدل ایجاد شده که

تمامی مشخصات آزمایش اندرکنش پی و گسل انتخاب شده برای اعتبارسنجی مشابه آزمایش انتشار گسیختگی گسل در شرایط میدان آزاد بوده است؛ بجز اینکه یک پی به عرض ۱۰ متر با فشار سربار 90 kPa در موقعیت $S = 3/0\text{m}$ نسبت به بیرون زدگی گسیختگی گسل روی سطح زمین قرار داده شد. مقایسه نتایج مدل‌های آزمایشگاهی و عددی در شکل (۳) ارائه شده است. در این شرایط، مدل عددی توانسته است به خوبی انحراف گسیختگی گسل به سمت فرودپاره را شبیه‌سازی نماید و پی روی فرادپاره باقی بماند. کانتورهای کرنش برشی پلاستیک و مدل تغییرشکل‌یافته آزمایشگاهی به این منظور با یکدیگر مقایسه شدند.

شکل ۳. سازوکار اندرکنش پی-گسل نرمال برای پی با عرض 1.0m ، سربار 90 kPa و موقعیت 3m (الف) مدلسازی سانتریفیوژ [9]، (ب) مدلسازی عددی، (پ) پروفیل جابه‌جایی قائم سطح زمین، (ت) دوران پی



مدل‌های میدان آزاد این تحقیق، شرط مدل پیشنهادی توسط Cole و Lade [1] را ارضا نکرده‌اند. این در حالی است که برای مدل‌های مربوط به خاک شل، گودال ثقلی وجود نداشته و تمامی اعماق رسوبات تقریباً پاسخ‌های مشابهی را نتیجه می‌دهند. این موضوع را می‌توان به اثر توأم زاویه شیب گسل 60° و زاویه اتساع 5° برای خاک شل نسبت داد که براساس مدل پیشنهادی توسط Cole و Lade [1] احتمال شکل‌گیری گودال ثقلی در مدل‌ها وجود ندارد. البته باید اشاره نمود که با کاهش زاویه شیب گسل (برای نمونه شیب گسل 45°)، احتمالاً در خاک‌های شل نیز گودال ثقلی ایجاد خواهد شد.

۳-۴- تأثیر موقعیت پی نسبت به محل بیرون‌زدگی گسل

۳-۴-۱- سازوکار اندرکنش پی-گسل

اندرکنش پی و گسل نرمال برای پنج موقعیت مختلف پی (s/B) شامل $0/0$ ، $0/25$ ، $0/5$ ، $0/75$ و $1/0$ و خاک دانه‌ای در دو حالت متراکم و شل مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های (۵-الف و ۵-ب) سازوکارهای گسیختگی اندرکنش گسل نرمال-پی سطحی را به ترتیب برای خاک متراکم و شل و فشار سربار 60 kPa نشان می‌دهند. مقدار بیشینه جابه‌جایی قائم کف مدل (h) در تمامی سازوکارها برابر یک متر در نظر گرفته شده است. نتایج مربوط به سه موقعیت $0/25$ ، $0/75$ و $1/0$ در شکل‌های مذکور ارائه شده است.

همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود تغییر موقعیت پی موجب تغییر در سازوکار اندرکنش پی و گسل نرمال خواهد شد. به این ترتیب برای موقعیت $0/25$ ، $0/75$ و $1/0$ به ترتیب سه سازوکار فرادیواره، فضای خالی و فرودیواره (تعریف شده در [10]) شکل گرفته است. مقایسه سازوکارهای اندرکنشی برای دو حالت خاک متراکم و شل نشان می‌دهد که علیرغم تغییر در عمق رسوبات، شکل کلی سازوکار گسیختگی (یعنی فرادیواره، فضای خالی و فرودیواره) ثابت باقی مانده است و می‌توان اذعان داشت که عمق رسوبات تغییری در سازوکار گسیختگی ایجاد نکرده است. به منظور بررسی دقیق‌تر این موضوع، پروفیل جابه‌جایی سطح زمین و موقعیت بیرون‌زدگی گسل برای مدل‌های مختلف در شکل (۶) ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل نیز

موجب شکل‌گیری یک بلوک ثقلی خواهد شد. این موضوع در بررسی‌های میدانی و تحقیقات قبلی مشاهده شده است که نشان می‌دهد این نوع خطر (یعنی گودال ثقلی) برای گسلش نرمال بوجود خواهد آمد و در مدلسازی گسیختگی ناشی از گسلش نرمال در شرایط میدان آزاد، برای تعیین دقیق‌تر این نوع خطرات، عمق‌های رسوبات بزرگتری باید مورد ارزیابی قرار گیرد. براساس مدل پیشنهادی Cole و Lade [1]، برای شرایطی که در گسل نرمال $\alpha \leq 45 + \psi/2$ (زاویه شیب گسل) باشد، علاوه بر شکل‌گیری گسیختگی اولیه، گسیختگی ثانویه‌ای نیز تشکیل خواهد شد که به دنبال آن موجب شکل‌گیری بلوک ثقلی (گرابن) بین این دو گسیختگی خواهد شد. با توجه به اینکه، زاویه اتساع در خاک متراکم به مراتب بیشتر از خاک شل است احتمال شکل‌گیری این بلوک بسیار بیشتر است.

شکل ۴. پروفیل جابه‌جایی قائم سطح زمین در شرایط میدان آزاد گسل نرمال با زاویه شیب 60° برای (الف) خاک متراکم، (ب) خاک شل

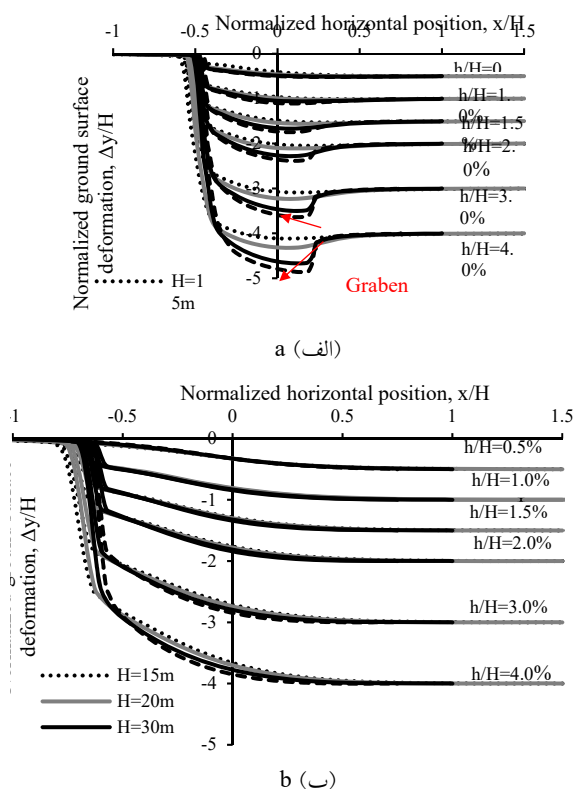


Fig. 4. Vertical displacement profile at ground surface for free-field normal $\alpha=60^\circ$ fault rupture through, (a) dense sand, (b) loose sand

[30] و [9] نشان دادند که برای گسل نرمال با زاویه شیب 60° و خاک متراکم، گودال ثقلی شکل خواهد گرفت، اگرچه

روی سطح زمین کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش عمق رسوبات، زون تأثیر ناشی از گسیختگی گسل روی سطح زمین کاهش می‌یابد. نمونه‌ای از این مقدار را می‌توان در شکل مربوط به موقعیت پی ۰/۷۵ و خاک متراکم شکل (۶) مشاهده نمود.

مشخص است در هر دو حالت خاک متراکم و شل، تغییری در سازوکار کلی اندرکنش پی و گسل رخ نداده است اما برای موقعیت‌هایی که گسیختگی گسل به زیر پی برخورد می‌کند (یعنی سازوکار فضای خالی)، به ازای افزایش عمق رسوبات، فاصله بین موقعیت بیرون‌زدگی گسل در سطح زمین و محل اثر نوک گسل

شکل ۵. مقایسه سازوکارهای اندرکنش پی سطحی-گسل نرمال برای عمق‌های مختلف روباره، سربار پی ۶۰ kPa و $h=1.0m$

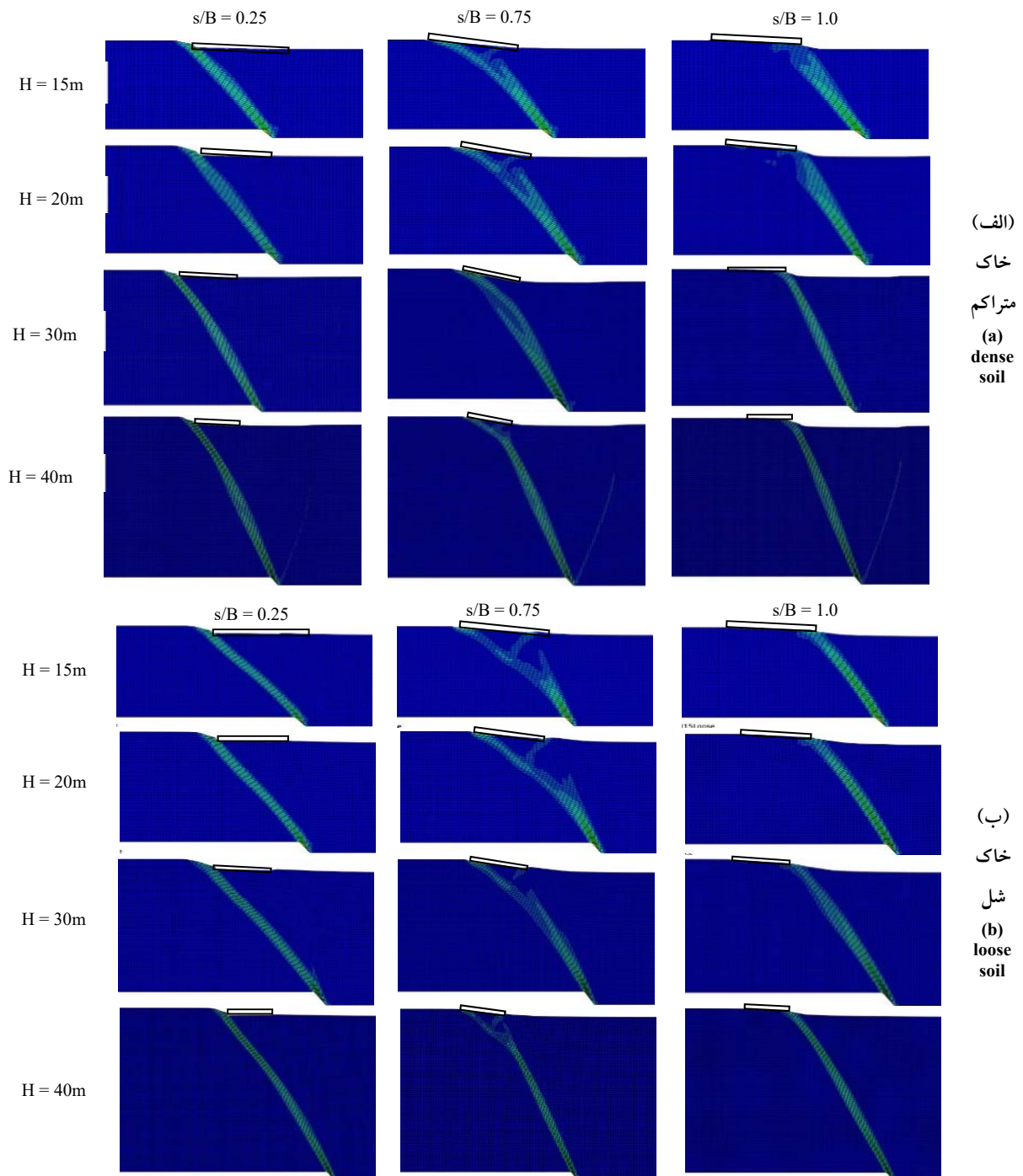


Fig. 5. Comparison of normal fault-foundation interaction mechanisms for different alluvium depths, foundation surcharge $q= 60$ kPa and fault throw $h=1.0m$ (a) dense sand, (b) loose sand

با نسبت تنش بالا فقط در یک بخش از مدل شکل می‌گیرد (یعنی همان گسیختگی اولیه ناشی از گسلش) و هر چه عمق مدل افزایش می‌یابد، زون دوم نسبت تنش بالا (یا گسیختگی ثانویه) به سمت فرادیواره در حال شکل‌گیری است. این در حالی است که با افزایش بیشتر عمق روباره به ۳۰ متر، زون دوم نسبت تنش بالا بطور کامل شکل گرفته و گودال ثقلی بین این دو زون ایجاد شده است.

موضوع دیگری که باید بدان توجه داشت برای خاک متراکم مشابه حالت میدان آزاد، در سمت راست پی (محل بین گوشه سمت راست پی و محل اثر نوک گسل روی سطح زمین) با افزایش عمق رسوبات گودال‌های ثقلی ایجاد می‌شود که در عمق رسوبات ۱۵ متر این پدیده مشاهده نمی‌شود. این در حالی است که این پدیده برای خاک شل رخ نمی‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است، برای روباره ۱۵ متری، زون

شکل ۶. پروفیل جابه‌جایی قائم سطح زمین ناشی از اندرکنش پی سطحی و گسل نرمال برای عمق‌های مختلف روباره، سربار پی ۶۰ kPa به ازای $h=1.0m$

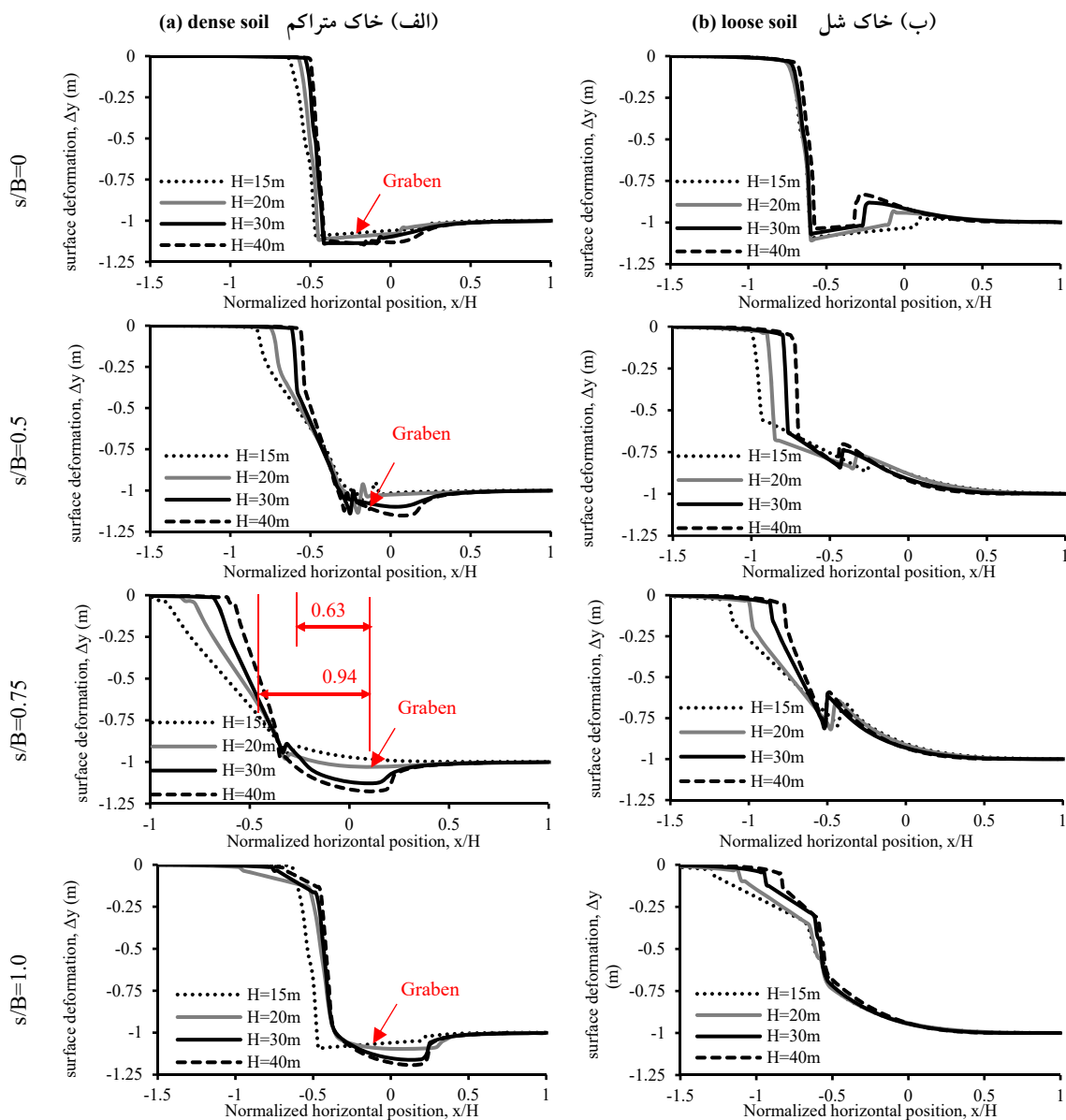


Fig. 6. Vertical displacement profile due to normal fault-foundation interaction for different alluvium depths, surcharge $q=60$ kPa and $h=1.0m$

شکل ۷. چگونگی انتشار باند برشی در مدل‌های اندرکنش گسل نرمال با شیب 60° و پی سطحی، برای خاک‌های با عمق‌های (الف) ۱۵م، (ب) ۲۰م، (پ) ۳۰م

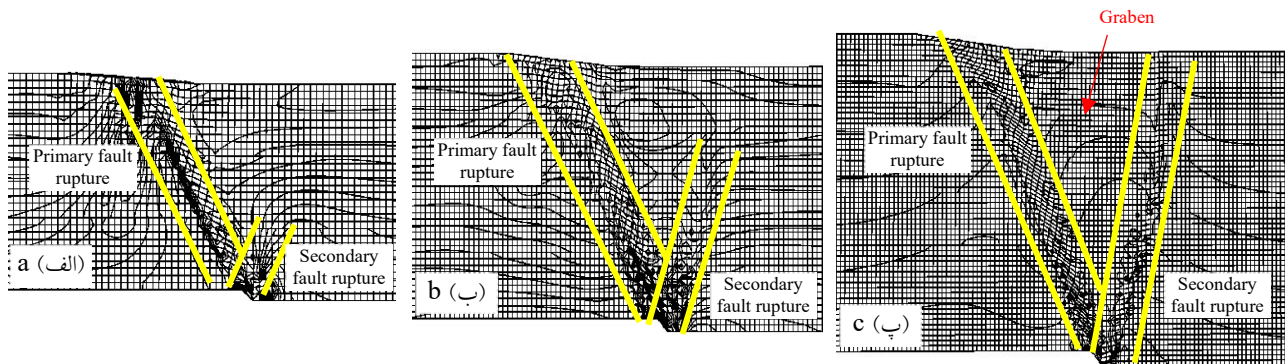


Fig. 7. Pattern of shear band development in normal $\alpha=60^\circ$ fault-shallow foundation interaction for alluvium depths (a) 15m, (b) 20m, (c) 30m

امر را می‌توان به نسبت جابه‌جایی اعمالی توسط گسل به خاک (یعنی h/H)، با توجه به عمق رسوبات، نسبت داد. زیرا مقدار جابه‌جایی اعمالی گسل ثابت بوده و هر چه عمق خاک کمتر باشد، نسبت این جابه‌جایی افزایش یافته و پی دوران بیشتری را تجربه خواهد نمود. به نظر می‌رسد که به منظور تخمین دوران پی، بهتر است مدلسازی با عمق رسوبات در حدود ۲۰ متر و بیشتر انجام پذیرد. همچنین از این شکل می‌توان دریافت که برای خاک متراکم محدوده موقعیت بین $0/5$ تا $0/75$ و برای خاک شل نیز موقعیت $0/75$ ، بیشترین خرابی را به همراه خواهد داشت که این موضوع در تمامی عمق رسوبات صدق می‌کند.

۴-۴- تأثیر فشار وارد بر پی

شکل (۱۰) تغییرات دوران پی را در نتیجه افزایش میزان فشار وارد بر پی برای یک پی در موقعیت $0/5$ و جابه‌جایی قائم یک متری گسل نرمال نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۱۰-الف) مشخص است عمق رسوبات ۱۵ و ۲۰ متری مقادیر دوران بیشتری را برای مدل خاک متراکم نشان می‌دهند. همچنین، در شکل (۱۰-ب) مشخص است که تنها عمق روباره ۱۵ متری مقادیر دوران بیشتری را برای مدل خاک شل نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد که در مدلسازی اندرکنش پی و گسل نرمال می‌توان از مدل با عمق رسوبات بیشتر از ۲۰ متر برای خاک متراکم و برای مدل با عمق رسوبات ۲۰ متر برای خاک شل استفاده نمود.

۲-۳-۴- دوران پی

به منظور بررسی تأثیر عمق رسوبات روی مقدار دوران پی سطحی، شکل (۸) تغییرات دوران پی به ازای افزایش جابه‌جایی قائم گسل نرمال برای پی با فشار باربری 60 kPa و خاک متراکم و شل را نشان می‌دهد. باید عنوان نمود که مقدار منفی دوران به معنای چرخش پی در جهت عقربه‌های ساعت است. از آنجایی که برای موقعیت پی $0/25$ سازوکار فرادیواره رخ داده است، پس برای موقعیت $0/0$ نیز این سازوکار رخ خواهد داد و پی روی فرادیواره باقی می‌ماند. از این رو، مقادیر دوران پی در این موقعیت، بسیار کم و در حد صفر است. اما با انتقال پی به سمت فرادیواره و برخورد گسیختگی ناشی از گسل به زیر پی، مقادیر دوران افزایش می‌یابد و می‌توان اذعان داشت که به ازای افزایش عمق رسوبات، مقادیر دوران تقریباً یکسان بوده و تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. اما در برخی موارد، پی بر روی رسوبات ۱۵ و ۲۰ متری مقادیر دوران بیشتری را به ازای جابه‌جایی مشخص گسل نرمال نتیجه می‌دهند. اگرچه این رویه خیلی ثابت نبوده و حتی در برخی موارد نیز تفاوت خاصی مشاهده نمی‌شود.

به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر تغییرات عمق رسوبات روی دوران پی، شکل (۹) تغییرات دوران پی را به ازای تغییر در موقعیت پی برای پی با فشار باربری 60 kPa و جابه‌جایی قائم یک متری گسل نرمال را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است مدلسازی با عمق رسوبات ۱۵ و ۲۰ متری مقادیر دوران بیشتری را برای پی نتیجه داشته است. دلیل این

شکل ۸. تغییرات دوران پی به ازای جابه‌جایی قائم گسل نرمال برای پی با فشار باربری ۶۰ kPa

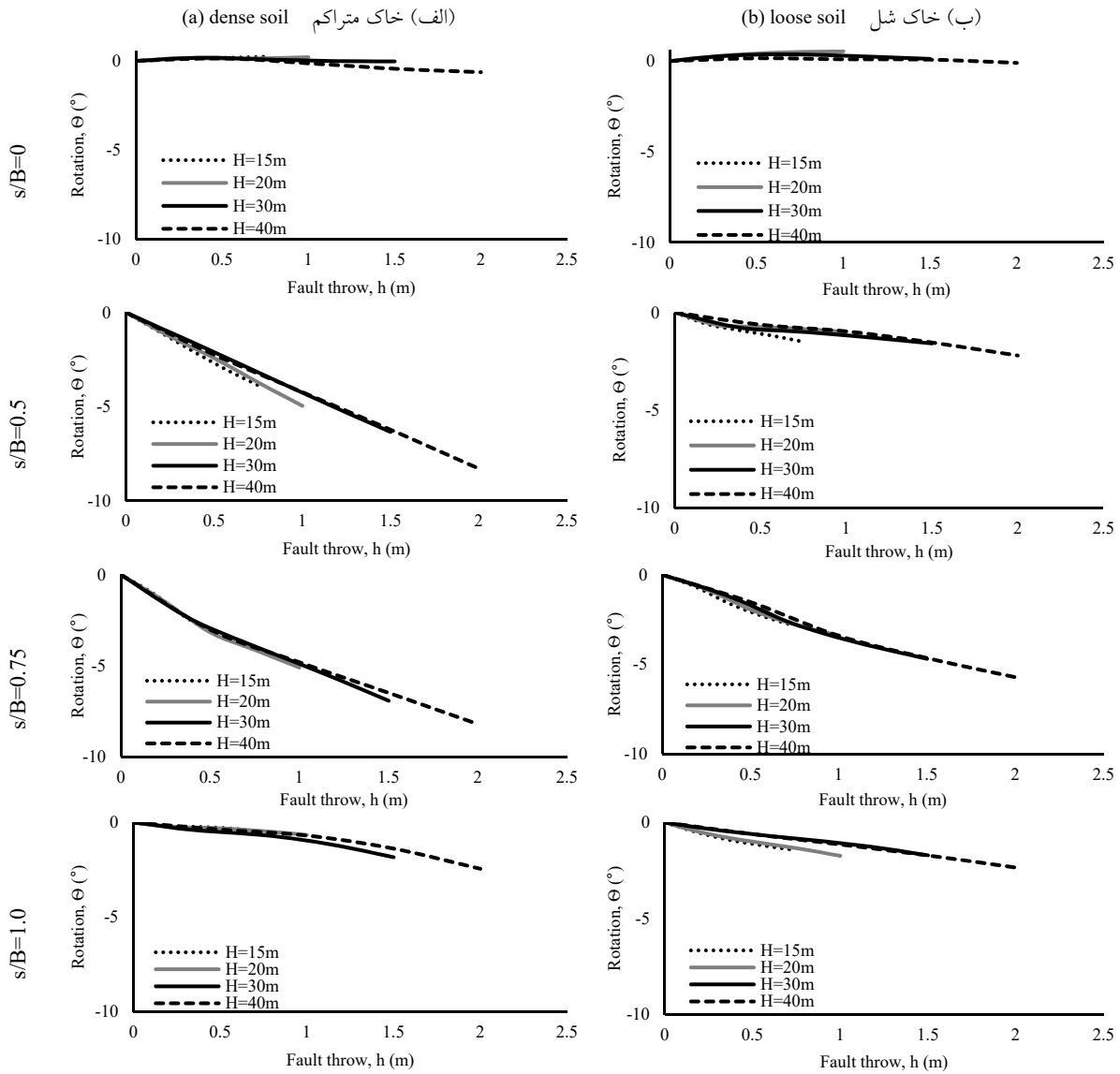


Fig. 8. Variations of foundation rotation versus normal fault throw for B=10m foundation and surcharge $q=60\text{kPa}$

شکل ۹. تغییرات دوران پی به ازای تغییر موقعیت آن برای فشار باربری ۶۰ kPa ناشی از جابه‌جایی قائم یک متری گسل نرمال

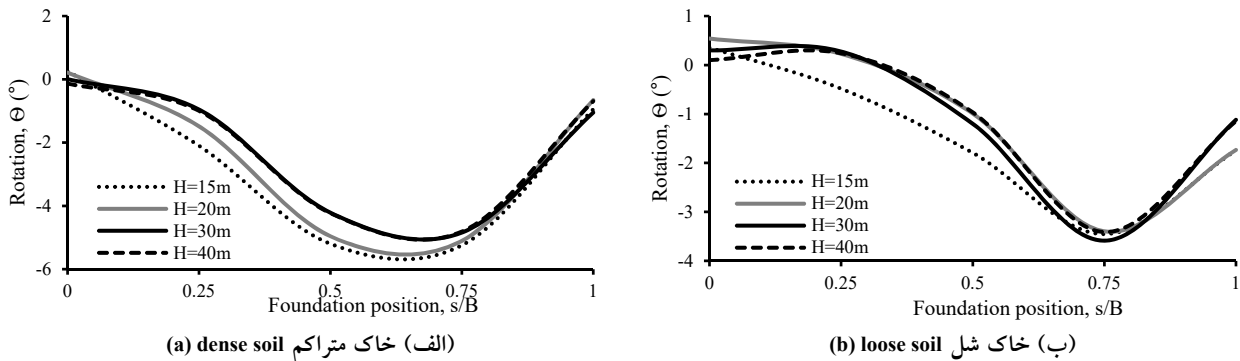
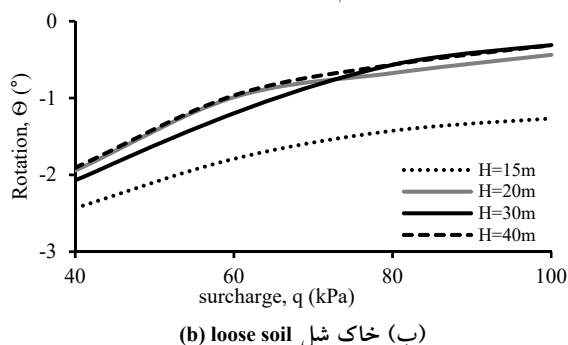
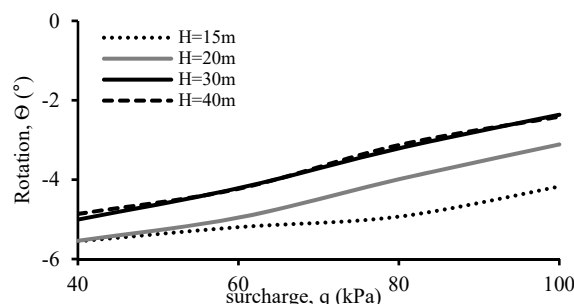


Fig. 9. Variations of foundation rotation versus its position for B=10m foundation and surcharge $q=60\text{kPa}$ due to normal fault throw $h=1.0\text{m}$

شکل ۱۰. تغییرات دوران پی به ازای فشار وارد بر آن برای موقعیت $s/B=0.5$ ناشی از جابه‌جایی قائم یک متری گسل نرمال



(ب) خاک شل (b) loose soil



(الف) خاک متراکم (a) dense soil

Fig. 10. Variations of foundation rotation versus its surcharge for $B=10\text{m}$ foundation and position $s/B=0.5$ due to normal fault throw $h=1.0\text{m}$

اندرکنش پی و گسل (یعنی فرادیواره، فضای خالی و فرودیواره) برای دو حالت خاک متراکم و شل ثابت باقی مانده است. این در حالی است که برای سازوکار فضای خالی، به ازای افزایش عمق رسوبات، زون تحت تأثیر ناشی از گسیختگی گسل در سطح زمین کاهش می‌یابد. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که برای خاک متراکم مشابه حالت میدان آزاد، در موقعیت بین گوشه سمت راست پی و محل اثر نوک گسل بر روی سطح زمین، با افزایش عمق رسوبات گودال‌های ثقلی ایجاد می‌شود که در عمق روباره ۱۵ متر این پدیده مشاهده نمی‌شود. البته این پدیده برای خاک شل رخ نداده است.

- با افزایش عمق رسوبات، مقادیر دوران پی‌ها یکسان بوده و تفاوت خاصی بین مدل‌ها مشاهده نمی‌شود. اما مدل اندرکنشی با عمق رسوبات ۱۵ و ۲۰ متری، مقادیر دوران بیشتری را برای پی به همراه داشته است. بنظر می‌رسد که برای تخمین دوران پی، بهتر است مدلسازی با عمق رسوبات در حدود ۲۰ متر و بیشتر انجام پذیرد.

- با تغییر در میزان فشار وارد بر پی مشخص شد که مدل با عمق رسوبات ۱۵ و ۲۰ متری مقادیر دوران بیشتری را در شرایط خاک متراکم نتیجه می‌دهند. این موضوع در شرایط خاک شل، برای مدل با عمق روباره ۱۵ متری رخ داده است. از این‌رو، به نظر می‌رسد که در مدلسازی اندرکنش پی و گسل نرمال می‌توان از مدل با عمق رسوبات بیشتر از ۲۰ متر برای خاک متراکم و برای مدل با عمق روباره ۲۰ متر برای خاک شل استفاده نمود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سری تحلیل‌های پارامتریک در خصوص تأثیر عمق رسوبات روی اندرکنش گسیختگی گسل نرمال و پی‌های سطحی، با استفاده از مدل عددی اعتبارسنجی شده با نتایج آزمایش سانتریفیوژ، انجام پذیرفته است. نتایج بدست آمده از تحلیل‌ها و بررسی‌ها به شرح ذیل می‌باشند:

- در شرایط میدان آزاد، عمق رسوبات تأثیری روی محل بیرون‌زدگی گسل بر سطح زمین در دو نوع خاک شل و متراکم ندارد. به عبارت دیگر، زون تحت تأثیر گسلش در تمامی مدل‌ها یکسان است. این در حالی است که در شرایط خاک متراکم، برای عمق‌های رسوبات بزرگتر گودال ثقلی در زون گسلش مشاهده می‌شود. این پدیده در بررسی‌های محلی مربوط به انتشار گسیختگی ناشی از گسل نرمال نیز مشاهده شده است و نتایج این تحقیق نیز با مدل پیشنهادی Lade و Cole [1] که همخوانی دارد. به نظر می‌رسد در شبیه‌سازی شرایط میدان آزاد، برای خاک متراکم باید از عمق‌های رسوبات بیشتر از ۲۰ متر استفاده نمود.

- در مدلسازی تمامی عمق رسوبات مشاهده شده است که تغییر موقعیت پی موجب تغییر در سازوکار اندرکنش پی و گسل نرمال می‌شود. در این خصوص، بسته به موقعیت پی نسبت به بیرون‌زدگی گسل در شرایط میدان آزاد، سه نوع سازوکار فرادیواره، فضای خالی و فرودیواره شکل خواهد گرفت.

- با تغییر در عمق رسوبات، شکل کلی سازوکار گسیختگی

- [10] Ahmed, W., & Bransby, M. F. (2009) 'Interaction of shallow foundations with reverse faults' *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.135(7), pp.914-924.
- [11] Mousavi, S., Jafari, M. K., Kamalian, M., & Shafiei, A. (2010) 'Experimental investigation of reverse fault rupture-rigid shallow foundation interaction', *International Journal of Civil Engineering*, Vol.8(2), pp.85-98.
- [12] Anastasopoulos, I., Antonakos, G., & Gazetas, G. (2010) 'Slab foundation subjected to thrust faulting in dry sand: Parametric analysis and simplified design method', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.30(10), pp.912-924.
- [13] Baziar, M. H., Nabizadeh, A., Lee, C. J., & Hung, W. Y. (2014) 'Centrifuge modeling of interaction between reverse faulting and tunnel', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.65, pp.151-164.
- [14] Ashtiani, M., Ghalandarzadeh, A., & Towhata, I. (2015) 'Centrifuge modeling of shallow embedded foundations subjected to reverse fault rupture', *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.53(3), pp.505-519.
- [15] Fadaee, M., Hashemi, K., Farzaneganpour, F., Anastasopoulos, I., & Gazetas, G. (2020) '3-storey building subjected to reverse faulting: Analysis and experiments', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.138, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106297>.
- [16] Sabbagh, M., & Ghalandarzadeh, A. (2020) 'Centrifugal modeling of continuous shallow tunnels at active normal faults intersection', *Transportation Geotechnics*, Vol.22, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100325>.
- [17] Keshteli, O. N., Rahimi, S., & Jamkhaneh, M. E. (2021) 'Numerical Investigation of Steel Moment-Resisting Frame on Sandy Soil under Normal Fault Rupture', *International Journal of Steel Structures*, Vol.21(2), pp.703-716.
- [18] Baziar, M. H., Nabizadeh, A., & Jabbari, M. (2015) 'Numerical modeling of interaction between dip-slip fault and shallow foundation', *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol.13(6), pp.1613-1632.
- [19] Ghavami, S., Saeedi Azizkandi, A., Baziar, M. H. (2019) 'Numerical study on interaction of normal fault with shallow foundations', 4th National Conference on Geotechnical

۶- اعلام تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

۷- منابع

- [1] Cole, D.A., & Lade, P.V. (1984) 'Influence zones in alluvium over dip-slip faults', *Journal Geotechnical Engineering*, Vol.110(5), pp.599-615.
- [2] Bray, J. D., Seed, R. B., Cluff, L. S., & Seed, H. B. (1994) 'Earthquake fault rupture propagation through soil', *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120(3), pp.543-561.
- [3] Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M.F., Davies, M.C.R. & El Nahas, A. (2007) 'Fault Rupture Propagation through Sand: Finite-Element Analysis and Validation through Centrifuge Experiments', *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.133(8), pp.943-958.
- [4] Ng, C.W.W., Cai, Q.P., & Hu, P. (2012) 'Centrifuge and Numerical Modeling of Normal Fault-Rupture Propagation in Clay with and without a Preexisting Fracture', *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.138(12), pp.1492-1502.
- [5] Ahmadi, M., Moosavi, M., & Jafari, M. K. (2018) 'Intergranular water effects on shear behavior of wet sand: phenomenology based on direct shear tests and fault rupture physical modeling', *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, Vol.5(1). pp. pp.23-29 (In Persian).
- [6] Ahmadi, M., Moosavi, M., & Jafari, M. K. (2018) 'Experimental investigation of reverse fault rupture propagation through cohesive granular soils', *Geomechanics for Energy and the Environment*, Vol.14, pp.61-65.
- [7] Ahmadi, M., Moosavi, M., & Jafari, M. K. (2018) 'Experimental investigation of reverse fault rupture propagation through wet granular soil', *Engineering Geology*, Vol.239, pp.229-240.
- [8] Yao, C., Takemura, J., Guo, W., & Yan, Q. (2020) 'Hyperbolic spiral model for predicting reverse fault ruptures in sand based on centrifuge tests', *Geotechnique*, <https://doi.org/10.1680/jgeot.19.P.063>.
- [9] Bransby, M. F., Davies, M. C. R., & Nahas, A. E. (2008) 'Centrifuge modelling of normal fault-foundation interaction', *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol.6(4), pp.585-605.

- [26] 26. Anastasopoulos I., Callerio A., Bransby M.F., Davies M.C.R., El Nahas A., Faccioli E., Gazetas G., Masella A., Paolucci R., Pecker A., and Rossignol E. (2008) 'Numerical analyses of fault-foundation interaction', *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol.6, pp.645-675.
- [27] 27. Loukidis D., Bouckovalas G.D. and Papadimitriou A.G. (2009) 'Analysis of fault rupture propagation through uniform soil cover', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.29, pp.1389-1404.
- [28] 28. Chang, Y. Y., Lee, C. J., Huang, W. C., Hung, W. Y., Huang, W. J., Lin, M. L., & Chen, Y. H. (2015) 'Evolution of the surface deformation profile and subsurface distortion zone during reverse faulting through overburden sand', *Engineering Geology*, Vol.184, pp.52-70.
- [29] 29. Naeij, M., & Soroush, A. (2020) 'Comprehensive 3D numerical study on interaction between structure and dip-slip faulting', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.140, pp.106285.
- [30] 30. Hazeghian, M., Soroush, M. (2015) 'DEM simulation of reverse faulting through sands with the aid of GPU computing', *Computers and Geotechnics*, Vol.66, pp.253-263.
- Engineering, Shahid Beheshti University, Iran.
- [20] Fadaee, M., Ezzatyazdi, P., Anastasopoulos, I., & Gazetas, G. (2016) 'Mitigation of reverse faulting deformation using a soil bentonite wall: Dimensional analysis, parametric study, design implications', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.89, pp.248-261.
- [21] Ashtiani, M., Ghalandarzadeh, A., Mahdavi, M., & Hedayati, M. (2018) 'Centrifuge modeling of geotechnical mitigation measures for shallow foundations subjected to reverse faulting', *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.55(8), pp.1130-1143.
- [22] Loli, M., Kourkoulis, R., & Gazetas, G. (2018), 'Physical and numerical modeling of hybrid foundations to mitigate seismic fault rupture effects', *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.144(11), 04018083.
- [23] Sadra, V., Ghalandarzadeh, A., & Ashtiani, M. (2020) 'Use of a trench adjacent to a shallow foundation as a mitigation measure for hazards associated with reverse faulting', *Acta Geotechnica*, Vol.15, pp.3167-3182.
- [24] Yao, C., Yan, Q., Sun, M., Dong, W., & Guo, D. (2020) '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*, Vol.137, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106264>.
- [25] Fadaee, M., Farzaneganpour, F., & Anastasopoulos, I. (2020) 'Response of buried pipeline subjected to reverse faulting', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.132, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106090>.

Numerical modelling of normal fault- shallow foundation interaction emphasizing on the effect of alluvium depth

Mehdi Ashtiani

Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol

m.ashtiani@nit.ac.ir

Abstract

Shallow sediments and large displacement of the fault in bedrock can make the fault activity may appear to be surface faulting. Propagation of the fault rupture through the soil layer is one of the hazards associated with the fault dislocation in bedrock. The ruins from the 1999 earthquakes in Turkey and Taiwan and the 2008 earthquake in Wenchuan of China clarified the effect of fault rupture on the structures located near the fault trace on the ground surface. Also, previous studies have revealed the destructive effects of the impact of surface faulting on a structure. It seems that the alluvium depth can affect the interaction between the structures and faults. Therefore, the present study used a numerical model validated with centrifuge test results to evaluate the effect of alluvium depth on the response of shallow foundation-normal fault interaction. The Mohr-Coulomb constitutive law, with internal friction angle and dilation angle softening behavior, was used to model the interaction. The alluvium depth was considered as 15, 20, 30, and 40 m. The foundation was assumed to be rigid in all cases. It was placed at different positions relative to the free field fault outcrop on the ground surface. Normal faulting also was applied pseudo-statically to the model boundaries at a dip angle of 60° . The rotation of foundation and the vertical displacement profile of the ground surface was investigated to evaluate the effect of alluvium depth on the fault rupture and foundation interaction. The results show that there is no difference between the free-field faulting zones for different alluvium depths of loose soil. A graben is formed for deeper alluvium depths of dense soil in agreement with the analytical models, although the width of faulting zones is the same for different alluvium depths. It should be noted, a graben may form in a low-angle dipping normal fault (i.e. $<60^\circ$) for loose sand. In interaction models, it has been observed that the interaction mechanism of the foundation and fault remains constant for both dense and loose sands. The footwall, gapping, and hanging wall mechanisms were formed for all alluvium depths related to the position of the foundation. Also, a graben was observed as one of the hazards associated with the normal fault rupture and shallow foundation interaction in the deeper alluvium depth of dense soil. By increasing the weight of the structure, the foundation experienced more rotation for 15 and 20m alluvium depths. The reliable foundation rotation could be estimated by considering alluvium depths of 20 m and more for both dense and loose sands.

Keywords: Normal fault, Shallow foundation, Numerical modelling, Alluvium depth