

## EXTENDED ABSTRACT

# Evaluation of Geomechanical and Geometric Parameters Affecting Setback Zone: Morris's Sensitivity Analysis and Machine Learning

Morteza Ezzati Fesaghandis, Ahmad Reza Mahboubi Ardakani \*

Faculty of Civil Engineering, Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 04 August 2025; Reviewed: 12 February 2026; Accepted: 25 April 2026

### Keywords:

Sensitivity analysis, Setback zone, Geometric and geomechanical parameters, Normal faulting, Reverse faulting.

## 1. Introduction

Seismic events are a direct consequence of fault movements and ruptures that propagate to the ground surface, often causing severe damage to infrastructure located in the vicinity of active faults. While existing seismic codes and design standards have improved, they are often insufficient to prevent the complete destruction of structures in these zones. Current literature suggests that avoiding construction near active faults is the most effective damage mitigation strategy. Despite extensive research on the individual impacts of geometric and geomechanical parameters on ground deformation, a comprehensive understanding of their combined influence on the fault setback zone remains limited. The primary objective of this study is to qualitatively evaluate the importance and relationships of these parameters. The research aims to identify the most significant parameters affecting ground displacement caused by fault movement and to distinguish them from less influential ones, thereby reducing the computational cost of future numerical simulations and providing a foundation for more effective seismic code guidelines.

## 2. Methodology

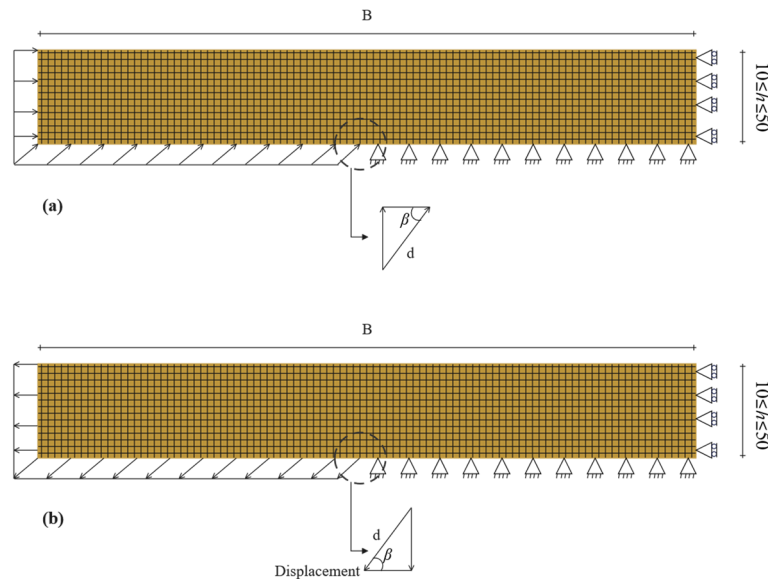
### 2.1. Sensitivity analysis

To achieve the research objectives, a dual analytical approach was employed, combining Morris's global sensitivity analysis with a Random Forest machine learning algorithm. Morris's method is a robust tool for evaluating the influence of input parameters on model outputs, particularly when a large number of variables are involved. The Random Forest algorithm was utilized to validate the findings and uncover potential nonlinear interactions between parameters. The numerical simulations were performed using the finite element software Abaqus, modeling a homogeneous, single-layer sandy soil resting on a bedrock. The study considered both normal and reverse faulting with faulting angles ranging from 20 to 90 degrees. The sensitivity of the parameters was evaluated based on the changes in geometric and geomechanical parameters of model for two different ground surface limit slopes, with boundary slopes of 1:150 and 1:500 chosen to define the boundary between the distorted zone and the fault setback zone.

### 2.2. Numerical modeling

Numerical simulations of fault rupture propagation were conducted through homogeneous, single-layer sandy soil using the Finite Element Method (FEM), implemented via the Abaqus software. The model geometry

considered a soil layer with varying thickness ( $h$ ) from 10 to 50m and fault dip angles ( $\beta$ ) ranging from 20 to 90 degrees. The fault displacement was imposed to bottom boundary of soil layer in hanging wall which interface between soil and bedrock and the foot wall remain fixed in both two coordinates.



**Fig. 1.** Boundary conditions and meshing of the model: a) Reverse fault b) Normal fault

### 2.3. Soil characteristics

Geomechanical parameters evaluated included elastic modulus, Poisson's ratio, cohesion, peak and residual friction angles, peak and residual dilation angles, and density. The soil characteristics has been shown in table1.

The soil's elasto-plastic behavior was accurately modeled using a Mohr-Coulomb constitutive model that incorporated strain softening, with its parameters defined through a user-defined subroutine.

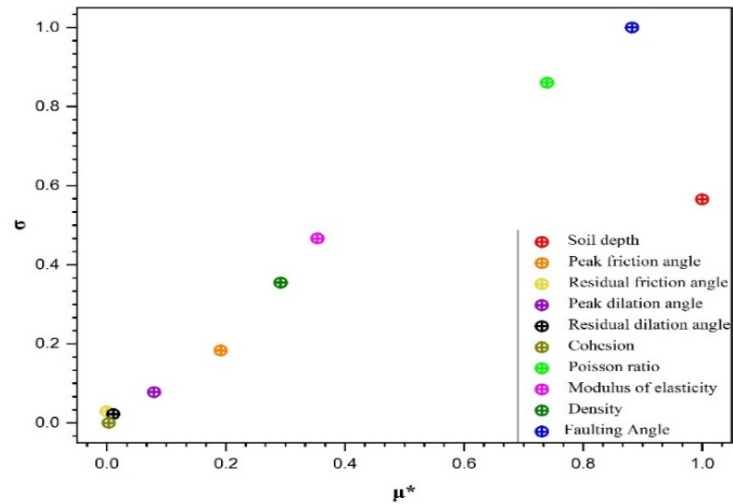
**Table 1.** Input geometric and geomechanical parameters and their ranges

parameters	Lower limit	Upper limit
(m) ( $h$ ) Soil height	10	50
(degree) ( $\varphi_p$ ) Peak friction angle	35	46
(degree) ( $\varphi_{res}$ ) Residual friction angle	25	34
(degree) ( $\psi_p$ ) Peak dilation angle	5	15
(degree) ( $\psi_{res}$ ) Residual dilation angle	0.1	4
(Pa) ( $C$ ) Cohesion	1050	5000
( $\nu$ ) Poisson ratio	0.2	0.4
(MPa) ( $E$ ) Elastic modulus	30	100
(kg/m <sup>3</sup> ) ( $\rho$ ) Density	1650	2000
(degree) ( $\beta$ ) angle	20	90

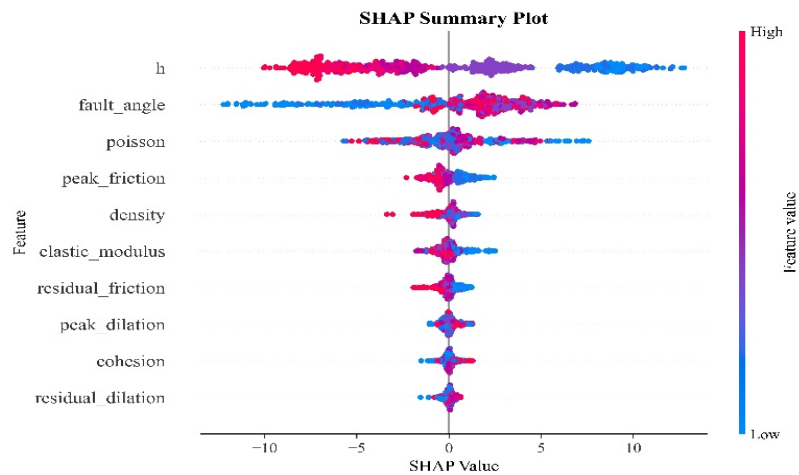
### 3. Results and discussion

The consistent results derived from both Morris sensitivity analysis and SHAP values demonstrated that soil layer thickness ( $h$ ) is the most critical geometric parameter affecting the fault setback zone, exhibiting a greater influence than any individual geomechanical parameter. Among the geomechanical parameters, elastic properties (Elastic Modulus and Poisson's ratio) generally exhibited higher importance when compared to plastic properties. A significant finding was the identification of certain plastic parameters specifically cohesion, residual friction angle, and residual dilation angle which were found to have minimal influence on the fault setback zone. This suggests their potential disregard in future, more computationally efficient analyses

without a significant loss of accuracy. Furthermore, the study highlighted that the type of fault and the limit consideration of deformation magnitude (surface inclination) significantly impacted the sensitivity of parameters and their complex interactions. For normal faults, the fault dip angle emerged as the second most important parameter for the footwall, while Poisson's ratio and Elastic Modulus were key for the hanging wall. For reverse faults, the fault dip angle and Elastic Modulus also showed significant influence, with their specific importance varying depending on the wall (hanging or footwall) and the defined level of deformation.



**Fig. 3.** Results of Morris sensitivity analysis results at a limit slope of 1/150 normal faulting for the foot wall



**Fig. 4.** SHAP values of parameters in machine learning model with random forest algorithm

#### 4. Conclusions

This study successfully evaluated the qualitative importance of geometric and geomechanical parameters on the fault setback zone using a comprehensive Morris sensitivity analysis and a Random Forest algorithm. The findings underscore the critical role of soil layer height, elastic parameters, and faulting angle in determining ground deformation and the extent of the setback zone. This research provides a valuable foundation for future quantitative studies and offers a significant step towards developing more accurate and reliable code guidelines for seismic safety. Identifying less important parameters will help streamline numerical simulations and reduce costs in future geotechnical investigations. The dual analytical approach used in this study enhances the reliability of the results and provides deeper insights into the complex dynamics and relationships between these parameters.

## ارزیابی پارامترهای ژئومکانیکی و هندسی مؤثر بر حریم گسل: تحلیل حساسیت موریس و یادگیری ماشین

مرتضی عزتی فسقندیس<sup>1</sup>، احمدرضا محبوبی اردکانی<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، شهید بهشتی تهران

<sup>2</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، شهید بهشتی تهران

دریافت: 1404/5/13، بازنگری: 1404/11/23، پذیرش: 1405/2/5، نشر آنلاین: 1405/2/5

### چکیده

زلزله نتیجه مستقیم جابه‌جایی و گسیختگی گسل و انتشار گسیختگی در سطح زمین است. بسیاری از زلزله‌های مخرب در امتداد گسل‌های فعال رخ می‌دهد. از این رو، مطالعه و ارزیابی حریم گسل، اقدامی حیاتی برای کاهش بلایای طبیعی مرتبط با زلزله به‌شمار می‌رود. با توجه به این که در دستورالعمل‌های آیین‌نامه‌ای و ادبیات فنی، به اهمیت و تأثیر هم‌زمان پارامترهای مؤثر بر حریم گسل، همچنین به مشخصات خاک و گسل توجه کافی نشده است، در این پژوهش سعی شده تا اهمیت و رابطه پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی مؤثر بر حریم گسل را در هر دو بخش فرادایواره و فرودایواره، به‌صورت کیفی ارزیابی شود. برای ارزیابی اهمیت این پارامترها، از تحلیل حساسیت جامع موریس (Morris global sensitivity analysis) و الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شد. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که ارتفاع لایه خاک بیشترین اهمیت و تأثیر را بر جابه‌جایی‌های ناشی از حرکت گسل دارد که این تأثیر در گسل معکوس بیشتر از گسل نرمال است. همچنین، در میان پارامترهای ژئومکانیکی، پارامترهای الاستیک خاک در مقایسه با پارامترهای پلاستیک خاک در حریم گسل از اهمیت بیشتری برخوردارند. شناسایی پارامترهای کم‌اهمیت‌تر، به کاهش هزینه محاسبات عددی در مطالعات آتی کمک شایانی خواهد کرد. همچنین، نتایج این پژوهش راه را برای بررسی کمی اهمیت و اندرکنش پارامترهای با اهمیت بالا در مطالعات آینده حریم گسل هموار می‌کند. نتایج این پژوهش کمک می‌کند تا دستورالعمل‌های آیین‌نامه‌ای دقیق‌تری برای حفظ ایمنی زیرساخت‌ها توسعه یابد.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل حساسیت، حریم گسل، پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی، گسلش نرمال، گسلش معکوس.

### 1- مقدمه

آیین‌نامه‌ها، اقدامات فعلی در زمینه مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌ها به‌تنهایی چندان مؤثر واقع نشده‌اند (He و همکاران، 2022). مطالعات و تجربیات حاصل از زلزله‌های مختلف، نشان می‌دهند که زلزله‌های به بزرگی بیش از 7 ریشتر، اغلب موجب تغییر شکل بزرگ و بالآمدگی سطح زمین می‌شود. در چنین مواردی، تدابیر مقاوم‌سازی لرزه‌ای کنونی به‌سختی می‌توانند از تخریب کامل سازه‌ها جلوگیری کنند (Zhang و همکاران، 2012). با توجه به تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه کاهش مخاطرات ناشی از زلزله، اجتناب از ساخت‌وساز در حریم گسل‌های فعال مؤثرترین و عملی‌ترین رویکرد برای کاهش خسارات شناخته شده است (He و همکاران، 2022).

انتشار گسیختگی گسل، یکی از مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی است که به زمین‌لرزه و تغییر شکل سطح زمین منجر می‌شود. این پدیده تهدیدی برای ساختمان‌ها و زیرساخت‌های مهمی چون پل‌ها، سدها، خطوط لوله و خطوط حمل و نقل است. جدی‌ترین آسیب زمانی است که ساختمان‌ها در نزدیکی گسل‌های فعال باشند (Hart، 1974؛ Xu و همکاران، 1996؛ Xu و همکاران، 2011).

با وجود تلاش‌های گسترده برای بهبود کیفیت مصالح، طراحی‌ها و روش‌های اجرایی، همچنین اصلاح بسیاری از



از نظر علمی معتبر هستند. این استانداردها برای ایجاد یک سیستم جامع ایمنی در برابر زلزله در آیین‌نامه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند (Leiming و همکاران 2023).

در مطالعات اخیر، توجه کافی به مشخصات هندسی و ژئومکانیکی خاک و گسل و تأثیر هم‌زمان آن‌ها روی حریم گسل نشده است، اما باتوجه به این‌که مشخصات خاک به‌طور گسترده در یک محدوده متفاوت است، همچنین این خواص و شرایط مختلف خاک، باعث اثرات متفاوتی روی سطح زمین می‌شوند؛ توجه به تأثیر این پارامترها ضروری است. پژوهش‌های متعددی روی تأثیر پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی بر تغییر شکل سطح زمین حین گسلش صورت گرفته است.

Salari و Akhtarpour (2025) با تمرکز بر نهشته‌های آبرفتی زون گسلی دشت بیاض، رفتار برشی ماسه لای‌دار غیراشباع را در روش‌های نرخ کرنش شبه‌استاتیکی مورد مطالعه قرار داده‌اند. این پژوهشگران با ابداع یک سیستم اندازه‌گیری ترکیبی شامل تکنیک تصویری PIV دودوربین و سنسورهای LVDT، بر محدودیت‌های متداول در ثبت تغییرات حجمی خاک‌های غیراشباع در بارگذاری‌های سریع غلبه کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش نرخ کرنش، مقاومت انحرافی پیک تا 16.3% و زاویه اصطکاک داخلی تا 3/3 درجه افزایش یافته، در حالی که رفتار خاک از حالت شکل‌پذیر به شبه‌شکننده همراه با تشدید خاصیت اتساعی تغییر می‌کند. این مطالعه، بر ضرورت لحاظ کردن اثرات هم‌زمان نرخ کرنش و مکش ساختار در تحلیل‌های عددی گسیختگی گسل و طراحی لرزه‌ای سازه‌های مجاور گسل‌های فعال تأکید دارد (Salari و Akhtarpour 2025).

گسترش گسیختگی گسل در خاک یکنواخت، از طریق مشاهدات میدانی و مدل‌سازی‌های فیزیکی مورد مطالعه قرار گرفته است (Loukidis و همکاران، 2009؛ Solhmirzaei و همکاران، 2012؛ Zanjani و Soroush، 2019؛ Anastasopoulos و همکاران، 2007؛ Shi و همکاران، 2020؛ Mortazavi و Soroush، 2014؛ Zhang و همکاران، 2012).

مدل‌سازی عددی گسترش گسیختگی گسل با استفاده از روش اجزای محدود به‌طور وسیع مورد استفاده قرار گرفته است (Zanjani و Soroush، 2019؛ Bray و همکاران، 1994؛ Lin و همکاران، 2006؛ Mousavi و همکاران، 2010).

در سال 2012، Wada و Goto، انتشار دینامیکی گسیختگی از سنگ بستر به لایه خاک را با استفاده از روش عددی اجزای محدود توسعه یافته<sup>4</sup> شبیه‌سازی کردند.

حریم گسل، به ناحیه‌ای اطراف گسل اطلاق می‌شود که در آن ناحیه به‌دلیل احتمال تغییر شکل سطح زمین ناشی از گسلش، هرگونه ساخت‌وساز در آن ممنوع اعلام شده است. این مفهوم اخیراً در آیین‌نامه‌های مختلف توسعه یافته است (Loukidis و همکاران، 2009). به‌عنوان مثال، قانون پهنه‌بندی گسل آلکویست-پریولو<sup>1</sup> ایالت کالیفرنیا، فاصله حریم گسل از طرفین خط گسل را برابر 50 فوت و بدون در نظر گرفتن خصوصیات خاک تعیین می‌کند (Loukidis و همکاران، 2009).

باتوجه به مطالعات صورت گرفته و مشاهدات میدانی، گسیختگی سطح ناشی از زلزله‌هایی با بزرگای متوسط و کم، پدیده‌ای نادر محسوب می‌شود، اما در زلزله لوتیل<sup>2</sup> در سال 2019 فرانسه و زلزله اسپارتا<sup>3</sup> در سال 2020 آمریکا، که به‌ترتیب با بزرگای 4/9 و 5/1 ریشتر اتفاق افتادند، باعث گسیختگی با کانون زمین لرزه در عمق کم شدند (Figueiredo و همکاران، 2022؛ Ritz و همکاران، 2021). این نوع زلزله‌ها می‌توانند باعث ایجاد چند ده سانتی‌متر جابه‌جایی و چندین کیلومتر ناحیه گسیختگی در سطح شوند و خسارات جبران‌ناپذیری را ایجاد کنند (Lawson، 1906؛ Pollitz و همکاران، 2005؛ Guo و Zhao، 2019؛ Chen و همکاران، 2001؛ Guo و همکاران، 2012؛ Sun و همکاران، 2012؛ Xi و همکاران، 2018؛ Moss و همکاران، 2015؛ Klinger و همکاران، 2010؛ Wei و همکاران، 2011؛ Dolan و Haravitch، 2014).

کمی‌سازی تغییرات شکل ناشی از گسلش پیچیده بوده و این تغییرات، اغلب با هندسه گسل، بزرگای گسل، میزان فعالیت گسل و ضخامت نهشته‌ها مرتبط است (Klinger، 2010؛ Wei و همکاران، 2011؛ Dolan و Haravitch، 2014؛ Zinke و همکاران، 2014). بسیاری از مناطق با استناد از قانون اجتناب از گسل‌های فعال کالیفرنیا، حداقل فاصله حریم گسل را 15 متر اعلام کرده‌اند (He و همکاران، 2022).

بررسی صورت‌گرفته برای تعیین یک چارچوب اولیه جهت محاسبه حریم گسل، نشان داد که سن خاک موجود در منطقه مورد بررسی به‌عنوان مهم‌ترین عامل در تعیین فاصله حریم گسل است. همچنین پیش از تعیین این فاصله لازم است تا عرض کامل توسعه‌یافته ناحیه برش مشخص شود که برآورد آن نیازمند تحلیل داده‌های حدود 30 رویداد گسلش است. مطابق این پژوهش برای لایه‌های خاکی نسبتاً تازه، تعیین فاصله حریم گسل لازم، از داده‌های به‌دست آمده از خاک‌های قدیمی‌تر محاسبه می‌شود (Borchardt، 2010).

علاوه بر این، مطالعات انجام‌شده روی دستورالعمل‌های حریم گسل در کشورهای چون ایالات متحده آمریکا، تایوان، اروپا و چین، نشان داد که فاصله‌های پیشنهادی حریم گسل برای چین

3. Sparta

4. Extended finite element method (XFEM)

1. Alquist-priolo

2. Le Tail

تحلیل حساسیت جامع مورس<sup>6</sup> یکی از بهترین و کارآمدترین روش‌ها در این زمینه است که می‌تواند سهم هر یک از ورودی‌ها را در تغییرپذیری خروجی، در کل محدوده مورد اندازه‌گیری، تعیین کند (Morris, 1991). این تحلیل قادر است پارامترهایی با تأثیر ناچیز بر حریم گسل را غربالگری کند. برای اعتبارسنجی یافته‌های پژوهش و آشکارسازی اندرکنش‌های غیرخطی احتمالی بین پارامترها، از یک رویکرد تحلیلی دوگانه در این مطالعه بهره گرفتیم. در این راستا، الگوریتم جنگل تصادفی<sup>7</sup>، به‌عنوان یک روش قدرتمند یادگیری ماشین، مورد استفاده قرار گرفت. این الگوریتم، علاوه بر تعیین اهمیت پارامترها، مقادیر SHAP (توضیحات افزایشی Shapley) را با جزئیات کامل ارائه می‌دهد (Hamidia و همکاران، 2024). استفاده از SHAP به ما کمک می‌کند تا تأثیر پارامترها را با استحکام بیشتری ارزیابی کنیم و بینش عمیق‌تری نسبت به عملکرد مدل پیدا کنیم.

در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از روش تحلیل حساسیت جامع مورس و الگوریتم جنگل تصادفی، اهمیت و ارتباط پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی بر حریم گسل در قسمت فرادیواره و فرودیواره، برای دو نوع گسل نرمال و معکوس ارزیابی شود. تحلیل جنگل تصادفی، نتایج مورس را تأیید می‌کند. این رویکرد دوگانه، نه تنها قابلیت اطمینان یافته‌های ما را تضمین می‌کند، بلکه بینش عمیق‌تری در مورد پویایی و روابط پیچیده بین پارامترها ارائه می‌دهد. با تعیین دقیق سهم حساسیت هر پارامتر بر خروجی، نتایج این پژوهش گامی مؤثر در جهت کاهش هزینه‌های مطالعات و شبیه‌سازی‌های عددی آتی در حوزه ژئوتکنیک خواهد بود.

## 2- تحلیل حساسیت جامع مورس

روش مورس (Morris, 1991)، به‌عنوان یکی از روش‌های جامع تحلیل حساسیت، یک ابزار قدرتمند در ارزیابی تأثیر پارامترهای ورودی بر خروجی مدل‌ها به‌شمار می‌رود. این روش به‌ویژه زمانی که تعداد متغیرهای ورودی زیاد است، کارایی بالایی دارد و در تشخیص پارامترهای کم‌اهمیت یا بی‌تأثیر، عملکردی آسان و مؤثر را ارائه می‌دهد (Pujol, 2009). مزیت اصلی شناسایی این پارامترها، کاهش حجم محاسبات و ساده‌سازی تحلیل‌های بعدی با تمرکز بر متغیرهای کلیدی است. روش مورس یک روش تک‌پارامتری تصادفی<sup>8</sup> است که در این روش همه متغیرهای ورودی مسئله با یک مقدار یکسانی تغییر می‌کنند. مقدار همه متغیرهای ورودی مسئله توسط یک رویکرد، نمونه‌گیری

بررسی گسلش شیب لغز در خاک‌های دانه‌ای با استفاده از روش اجزای مجزا<sup>5</sup> انجام شد، در این بررسی طول حریم گسل برای گسل نرمال از 1/7 تا 4/5 برابر ارتفاع لایه خاک و برای گسل نرمال، این طول، 1/8 تا 2/6 برابر ارتفاع لایه خاک تخمین زده شده است (Hazeghian و Soroush, 2017). نتایج برخی مطالعات نشان می‌دهد که نوع خاک در نتایج نهایی اثرگذار است. به‌طوری‌که در خاک متراکم، خط تأثیر گسل معکوس در سطح زمین به‌سمت فرودیواره و برای گسل نرمال به‌سمت فرادیواره متمایل می‌شود (Loukidis و همکاران، 2009؛ Hazeghian و Soroush, 2015؛ Zanjani و همکاران، 2012). همچنین، حداقل نسبت جابه‌جایی گسل به ارتفاع لایه خاک برای رسیدن انتشار گسیختگی گسل به سطح زمین، با افزایش زاویه گسلش، رابطه مستقیمی دارد (Loukidis و همکاران، 2009).

مطالعات بر تغییرات ارتفاعات نسبی ماسه‌های متراکم و سست و آرایش آن‌ها در نیم‌رخ خاک، نشان داده که تغییر شکل سطح زمین برای ماسه متراکم بیشتر از ماسه سست است (Zanjani و Soroush, 2019). علاوه بر این، با افزایش زاویه گسلش، محل اثر گسل در خاک‌های چندلایه به‌سمت فرادیواره متمایل شده و عرض ناحیه تغییر شکل یافته به‌ترتیب برای گسل‌های نرمال و معکوس، افزایش و کاهش می‌یابد (Zanjani و Soroush, 2019).

با استفاده از یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی، به‌صورت عددی گسترش و برهمکنش گسیختگی‌های گسل اصلی و ثانویه هم‌زمان در خاک ماسه‌ای بررسی شد. مشاهده شد که گسیختگی‌های ثانویه عمدتاً امتداد لغز با صفحات عمودی هستند و صفحات گسیختگی هر دو گسل در مناطق منحنی بحرانی ادغام می‌شوند، که الگوها و رخنمون آن‌ها به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر نوع گسل، زاویه گسلش و چگالی ماسه قرار می‌گیرد (Ritz و همکاران، 2021).

با وجود پژوهش‌های گسترده، همچنان توجه جامعی به اندرکنش میان تمامی پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی بر حریم گسل در مطالعات پیشین صورت نگرفته است. مدل‌سازی پدیده‌های ژئوتکنیکی پیچیده بوده و شامل پارامترهای ورودی متعددی هستند که دارای عدم قطعیت هستند. درک این عدم قطعیت‌ها و ارزیابی تأثیر این پارامترها بر خروجی، برای تضمین تصمیم‌گیری‌های مهندسی مهم است. تحلیل حساسیت به‌عنوان ابزاری مؤثر در این زمینه عمل می‌کند. تحلیل حساسیت پارامترها می‌تواند عوامل مؤثر و مهم را از پارامترهای کم‌اثر یا بی‌تأثیر تفکیک کرده و رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را مشخص کند (Franczyk, 2019). این رویکرد، علاوه بر بهبود درک ما از پدیده‌ها، هزینه شبیه‌سازی در مطالعات آتی را نیز کاهش می‌دهد.

7. Random forest

8. Randomized One-At-Time (OAT)

5. Discrete element method (DEM)

6. Morris global sensitivity analysis

برای تعیین ماتریس مسیر، که یک ماتریس  $K \times (K+1)$  است، در ابتدا یک ماتریس پایه است که در مثلث پایین ماتریس مؤلفه‌های ماتریس عدد یک بوده و بقیه مؤلفه‌ها صفر هستند. ماتریس  $(K+1, 1)$  یک ماتریس واحد است. ماتریس  $B'$  می‌تواند با افزایش متوالی یکی از مختصات خود با گام  $\Delta$  نقاط مسیر متوالی را ارائه دهد.

$$B' = (J_{K+1,1}(x^*)^T + \Delta B)^T \quad (4)$$

با این حال،  $B'$  مبانی طراحی تصادفی را برآورده نمی‌کند. بنابراین اصلاحات برای یک ماتریس تصادفی مناسب، مطابق رابطه زیر است:

$$B^* = (J_{K+1,1}x^* + \frac{\Delta}{2} [(2B - J_{K+1,1})D^* + J_{K+1,1}])p^* \quad (5)$$

ماتریس  $K$  بعدی  $D^*$ ، یک ماتریس قطری بوده که دارای مؤلفه‌های 1 یا -1 در قطر اصلی خود به صورت تصادفی است. همچنین،  $p^*$  یک ماتریس جایگشت تصادفی  $K$  بعدی است. جهت تحلیل حساسیت مورس، دو شاخص  $\mu$  و  $\sigma$  که به ترتیب نشان‌دهنده تأثیر کلی هر پارامتر بر خروجی مدل و معیاری برای اثرات با درجه بالاتر و غیرخطی تر است، ارائه شده است. این دو شاخص به شکل زیر قابل محاسبه هستند:

$$\mu_i = \frac{\sum_{i=1}^n EE_i}{r} \quad (6)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{i=1}^n (EE_i - \mu_i)^2} \quad (7)$$

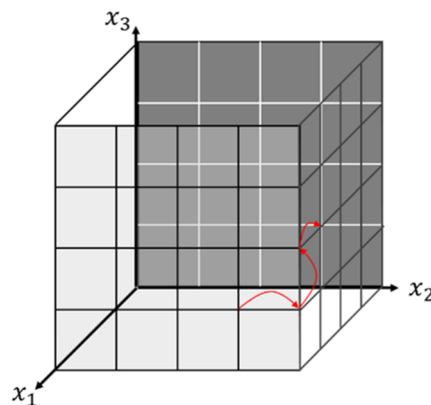
مقدار میانگین نمی‌تواند به‌طور کامل تأثیر اثرات ابتدایی را که دارای علامت مخالف هم بوده و یکدیگر را خنثی می‌کنند، در نظر بگیرد. بدین منظور، شاخص اصلاح شده‌ای معرفی شد (Campolongo و همکاران، 2007):

$$\mu_i^* = \frac{\sum_{i=1}^n |EE_i|}{r} \quad (8)$$

### 3- الگوریتم جنگل تصادفی بر پایه یادگیری ماشین

الگوریتم جنگل تصادفی، که توسط Breiman (2001) معرفی شد، یک روش یادگیری گروهی است که برای مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود. این الگوریتم به دلیل دقت و استحکام بالا، به‌طور گسترده در مسائل رگرسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم با ساخت درخت‌های تصمیم‌گیری متعدد

مورس<sup>9</sup>، انتخاب می‌شود. این روش از یک نقطه تصادفی در فضای  $K$  بعدی شروع شده و با ایجاد یک مسیر در این فضا ادامه می‌یابد. هر مسیر شامل  $K+1$  نقطه است که در آن دو نقطه مجاور فقط در یک بعد از فضای  $K$  بعدی، با گام استاندارد  $\Delta$ ، متفاوت هستند. مختصات هر نقطه از این مسیر به‌عنوان ورودی به رویکرد محاسباتی ارائه می‌شود. نمونه‌ای از ساخت گام‌به‌گام یک مسیر منفرد برای  $K=3$  پارامتر در شکل (1) قابل مشاهده است.



شکل 1- نمودار نحوه نمونه‌گیری به روش مورس

در فرآیند ساخت هر مسیر، فرض می‌شود که هر پارامتر ورودی می‌تواند تعداد گسسته‌ای از مقادیر را به‌خود بگیرد که به آن سطح<sup>10</sup> با نماد  $p$ ، گفته می‌شود. این سطوح، محدوده‌های هر متغیر را به‌طور مساوی نمونه‌برداری می‌کنند. مقادیر معمول برای  $p$  در تحلیل حساسیت مورس 4، 6 یا 8 هستند که به ترتیب متناظر با صدک‌های 25، 50 و 75 از توزیع یکنواخت مقادیر متغیر ورودی می‌باشند (Morris، 1991؛ Campolongo و همکاران، 2007). روش مورس، اهمیت پارامترها را بر اساس مفهومی به نام اثر ابتدایی<sup>11</sup> نشان می‌دهد. برای هر متغیر، اثر ابتدایی با استفاده از روابط (1) و (2) محاسبه می‌شود.

$$x_i = [0, \frac{1}{p-1}, \frac{1}{p-2}, \dots, \frac{p-2}{p-1}, 1] \quad (1)$$

$$EE_i = \frac{F(x_1, \dots, x_i + \Delta, \dots, x_j) - F(x_1, \dots, x_i, \dots, x_j)}{\Delta} \quad (2)$$

در این روابط،  $F(x)$  خروجی شبیه‌سازی،  $\Delta$  اندازه گام بین صفر و  $\frac{1}{p-1}$  و  $p$  شماره سطح است. تعداد شبیه‌سازی‌های مورد نیاز برای یک مسئله با  $K$  متغیر و  $p$  سطح شبکه‌بندی، از رابطه (3) بدست می‌آید.

$$N_s = p \cdot (K + 1) \quad (3)$$

11. Elementary effect

9. Morris's sampling  
10. Level

به منظور ارزیابی اثر پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی گسل، ضخامت لایه خاک، بازه‌ای متغیر از 10 تا 50 متر در نظر گرفته شد (شکل (2)). مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که حداقل جابه‌جایی قائم گسل برای رسیدن گسیختگی به سطح زمین 2% تا 6% ضخامت لایه خاک است (Mortazavi و Soroush، 2014). در این مطالعه جابه‌جایی گسل در سنگ بستر،  $d$ ، 1/75 درصد ضخامت لایه خاک،  $h$ ، در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی مدل برای هردو حالت گسلش نرمال و معکوس با زوایای گسلش در بازه‌ای بین 20 تا 90 درجه انجام شد تا اثرات پارامترهای مختلف بر حریم گسل در فرادیواره و فرودیواره در دو حالت مختلف گسلش مقایسه و بررسی گردد.

#### 4-2- مش‌بندی و شرایط مرزی

تحلیل عددی ارائه شده در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس صورت گرفته است (Dassault، 2024). به منظور شبیه‌سازی عددی لایه خاک در نرم‌افزار آباکوس از مدل رفتاری موهر کولمب با کرنش نرم‌شوندگی و از زیربرنامه نوشته شده توسط کاربر کمک گرفته شد.

لایه خاک در ابتدا تحت اثر نیروی ثقلی خود قرار داشت. سپس برای اعمال حرکت گسل به لایه خاک، در نیمه راست (فرودیواره)، دیوار قائم در جهت افق و کف لایه در محل تماس با سنگ بستر در دو جهت قائم و افق مقید شدند. همچنین در نیمه چپ (فرادیواره)، ابتدا مشابه نیمه چپ در دو جهت مقید بوده سپس جابه‌جایی ناشی از گسل به صورت تدریجی به آن اعمال می‌شود. بنابراین کف لایه خاک که در تماس با بستر سنگی است به دو نیمه تقسیم می‌شود. جابه‌جایی اعمال شده به مرز پایین در فرادیواره موازی با صفحه گسل است، به عبارت دیگر جهت حرکت در مرز پایین با یک زاویه شیب  $\beta$  انجام شده است و برای مرز قائم فرادیواره جابه‌جایی به صورت افقی اعمال می‌شود که در شکل (3) قابل مشاهده است. این فرضیات واقع‌بینانه هستند، زیرا ژئومواد سطوح ناهمواری را تشکیل می‌دهند. به‌ویژه در سطح مشترک بین لایه خاک و سنگ بستر که هوازگی سنگ این ناهمواری و زبری را افزایش داده و از لغزش جلوگیری می‌کند.

شکل (3)، مدل ایده‌آل شده اجزای محدودی لایه خاک را نشان می‌دهد. مشابه کارهای عددی انجام (Soroush و Zanjani، 2019؛ Mortazavi و Soroush، 2014)، این مدل، با استفاده از مش با هندسه چهاروجهی خطی و از نوع کرنش مسطح شبیه‌سازی شده است. ابعاد مش‌های استفاده شده  $37/5 \times 37/5$  سانتی‌متر است.

عمل می‌کند. برای افزایش دقت پیش‌بینی، هر درخت با انتخاب زیرمجموعه‌های تصادفی از ویژگی‌ها و نمونه‌ها از داده‌های آموزشی ایجاد می‌شود (Elie-Dit-Cosaque و Maume-Deschamps، 2024).

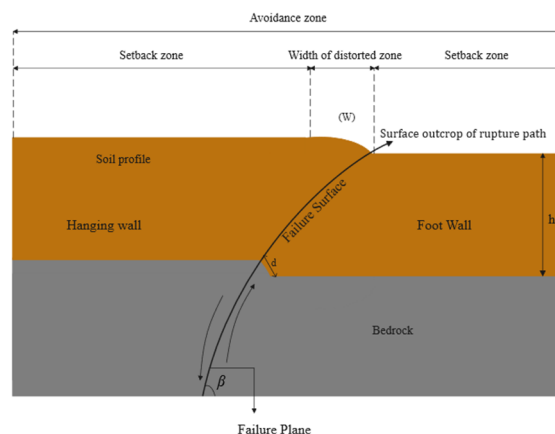
الگوریتم جنگل تصادفی در مقایسه با سایر الگوریتم‌های یادگیری ماشین، مزایای چشمگیری دارد. این الگوریتم به دلیل توانایی بالا در مدیریت مجموعه داده‌های با ابعاد بالا، کشف روابط پیچیده بین پارامترها و مقابله با داده‌های دارای خطا، یک انتخاب برجسته محسوب می‌شود (Salman و همکاران، 2024).

#### 4- روش‌شناسی عددی

شبیه‌سازی عددی انتشار گسیختگی گسل در لایه خاک یکنواخت و همگن برای هر دو گسلش نرمال و معکوس صورت گرفت. در این مطالعه، اثر پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی خاک و گسل بر حریم گسل در فرادیواره و فرودیواره بررسی شدند. برای ارزیابی حساسیت پارامترهای مختلف، تغییرات شیب سطح زمین به‌عنوان معیار انتخاب شدند. با توجه به تغییر شکل سطح زمین، حین گسلش، شیب مرزی 1/150 و 1/500 مرز بین ناحیه اعوجاج یافته و حریم گسل انتخاب شد (Loukidis و همکاران، 2009؛ Soroush و Zanjani، 2019). تحلیل حساسیت مورپس برای هردو شیب مجاز و هر دو نوع گسل نرمال و معکوس انجام شد.

#### 4-1- هندسه و مشخصات گسل

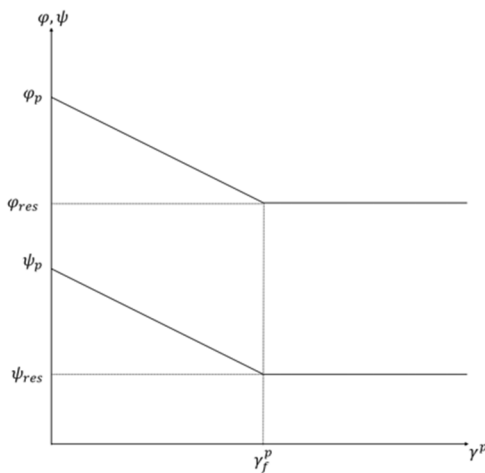
مدل خاک برای یک شبیه‌سازی عددی، خاک تک‌لایه ماسه‌ای به‌عرض 100 متر فرض شد، که روی بستر سنگی قرار دارد. صفحه گسل در سنگ بستر تشکیل شده و تا نقطه تماس بین بستر سنگی و خاک ادامه می‌یابد. انتشار این گسیختگی در لایه خاک بالای سنگ بستر به شکل نوار برشی پلاستیکی قابل مشاهده است؛ که باعث ایجاد تغییر شکل در سطح زمین می‌شود (شکل (2)).



شکل 2- نمایش شماتیک انتشار گسیختگی در نهشته

جدول 1- پارامترهای هندسی و ژئو مکانیکی ورودی و محدوده آنها

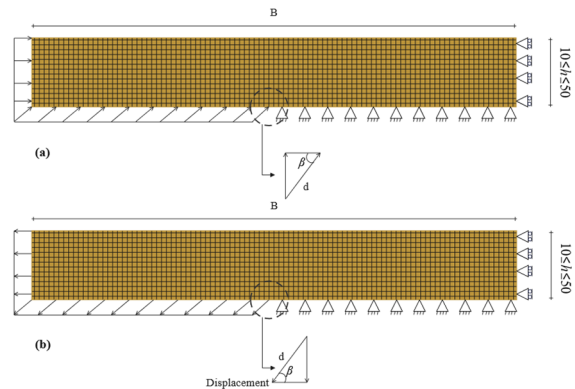
پارامترها	حد پایین	حد بالا
ارتفاع لایه خاک (h) (m)	10	50
زاویه اصطکاک اوج ( $\varphi_p$ ) (degree)	35	46
زاویه اصطکاک باقی مانده ( $\varphi_{res}$ ) (degree)	25	34
زاویه اتساع اوج ( $\psi_p$ ) (degree)	5	15
زاویه اتساع باقی مانده ( $\psi_{res}$ ) (degree)	0/1	4
چسبندگی (C) (Pa)	1050	5000
نسبت پواسون (v)	0/2	0/4
مدول الاستیسیته (E) (MPa)	30	100
چگالی ( $\rho$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	1650	2000
زاویه گسلش ( $\beta$ ) (degree)	20	90



شکل 4- دیاگرام کاهش زوایای اصطکاک و اتساع با کرنش برشی پلاستیک معادل تجمعی در شبیه سازی

#### 5- صحت سنجی

به منظور اعتبارسنجی روش عددی که با نرم افزار اجزای محدود انجام می شود و زیر برنامه کاربر نوشته شده برای مدل رفتاری خاک، آزمایش های سانتریفیوژی انجام شده توسط Anastasopoulos و همکاران (2007) به صورت عددی مدل سازی شدند. در این آزمایش ها طول و ارتفاع نمونه خاک برای شتاب سانتریفیوژ 100 برابر شتاب گرانش، به ترتیب 68 و 25 متر است. همچنین عرض ناحیه بارگذاری، W، برابر با 20 متر است. در این آزمایش، در قسمت سمت راست دستگاه، علاوه بر سیستم هدایت مرکزی اصلی، G، سه گوه آلومینیومی A<sub>1</sub>، A<sub>2</sub> و A<sub>3</sub> تعبیه شده است تا اطمینان حاصل شود که جابه جایی در زاویه شیب مورد نظر 60 درجه اعمال می شود (شکل (5)).



شکل 3- شرایط مرزی و مش بندی مدل: الف) گسل معکوس، ب) گسل نرمال

#### 4-3- مشخصات خاک

برای لایه خاک مورد نظر، خاک ماسه ای فرض شده است. اما با توجه به هدف پژوهش، به منظور بررسی اثر پارامترهای ژئومکانیکی بر حریم گسل، پارامترهای خاک ماسه ای مشابه با پارامترهای هندسی به صورت متغییر در بین بازه هایی که در جدول (1) قابل مشاهده است، در نظر گرفته شده اند.

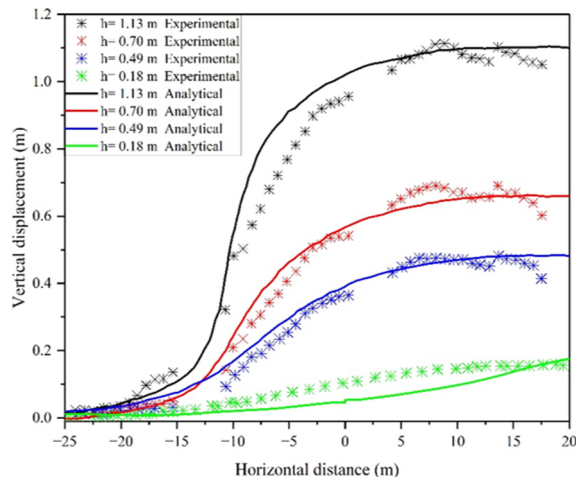
مدل های رفتاری متعددی برای شبیه سازی و ارزیابی تغییر شکل برشی ناشی از گسلش استفاده شده اند، که با مرور ادبیات فنی مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر کولمب با جریان پلاستیک نا مرتبط با توجه بر رفتار پس اوج (نرم شوندگی کرنش)، یک مدل واقع بینانه برای شبیه سازی گسلش محسوب می شود (Loukidis و همکاران، 2009).

مطابق آنچه که پیش تر گفته شد برای این مدل رفتاری با کرنش نرم شوندگی، از یک زیر برنامه نوشته شده توسط کاربر در نرم افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است که در آن زاویه اصطکاک داخلی بین ذرات و زاویه اتساع به صورت تدریجی با افزایش کرنش پلاستیک کاهش می یابد (شکل (4)). مطابق روابط زیر:

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_p - \frac{\varphi_p - \varphi_{res}}{\gamma_f^p} \gamma^p & 0 \leq \gamma^p < \gamma_f^p \\ \varphi_{res} & \gamma^p \geq \gamma_f^p \end{cases} \quad (6)$$

$$\psi = \begin{cases} \psi_p - \frac{\psi_p - \psi_{res}}{\gamma_f^p} \gamma^p & 0 \leq \gamma^p < \gamma_f^p \\ \psi_{res} & \gamma^p \geq \gamma_f^p \end{cases} \quad (7)$$

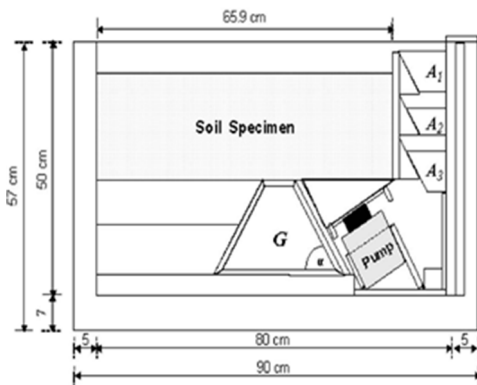
$\varphi_p$  و  $\psi_p$  به ترتیب زوایای اصطکاک و اتساع اوج،  $\varphi_{res}$  و  $\psi_{res}$  نیز به ترتیب زوایای اصطکاک و اتساع باقی مانده و  $\gamma_f^p$  کرنش پلاستیک در زمان تکمیل نرم شوندگی است.



شکل 6- گسلش معکوس 60 درجه با جابه‌جایی سنگ بستر،  $h$ ، از 0/18 تا 1/13 متر: مقایسه جابه‌جایی عمودی سطح در این شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی (Anastasopoulos و همکاران، 2007)

## 6- بحث و نتایج

باتوجه به تعداد متغیرهای ذکر شده در جدول (1) و با استفاده از رابطه (3)، برای هر نوع گسل، 550 مدل، شبیه‌سازی شد. خروجی شبیه‌سازی‌ها به‌صورت جابه‌جایی گره‌ها در سطح زمین، در جهت قائم و افق ثبت شدند. شیب سطح زمین تغییر شکل یافته، با تقسیم اختلاف مختصات تغییر شکل یافته گره‌های متوالی در جهت قائم و افق محاسبه شد. نتایج مورس با مقایسه میانگین و انحراف معیار تابع توزیع هر ورودی، ارزیابی شد (شکل‌های (8)، (9)، (10)، (11)، (12)، (13)، (14) و (15)). بدین‌منظور برای هر شرایط مسئله، انحراف معیار،  $\sigma$ ، در مقابل میانگین مطلق اثرات ابتدایی،  $\mu$ ، به‌صورت نرمال‌سازی شده، رسم شد. در این پژوهش، محور  $X$ ، نشان‌دهنده مقدار میانگین مطلق اثرات ابتدایی مرتبط با هر متغیر است و محور  $Y$ ، نشان‌دهنده انحراف معیار متناظر است. نقاط با میانگین نزدیک به صفر، پارامترهای غیرمهم هستند که می‌توان آن‌ها را نادیده گرفت. در مقابل، هر چقدر مقدار  $\mu^*$  پارامترها از مرکز فاصله داشته باشد و به مقدار یک نزدیک‌تر باشد از اهمیت بیشتری برخوردار خواهند بود و تأثیر بیشتری روی خروجی مورد نظر دارد. به‌طور مشابه هر چقدر از مبدأ محور  $Y$ ، به‌سمت مقدار یک نزدیک شویم، پارامتر مورد نظر رابطه غیرخطی‌تر و اندرکنش پیچیده‌تری با سایر پارامترها و خروجی خواهد داشت. برای ساده‌تر شدن تحلیل می‌توان از یک شاخص به‌نام شاخص حساسیت برای مقایسه اثر متغیرها بر خروجی استفاده کرد. برای محاسبه شاخص حساسیت از رابطه (11) می‌توان استفاده کرد. این رابطه اثر هر دو پارامتر انحراف معیار و میانگین مطلق را در نظر می‌گیرد.

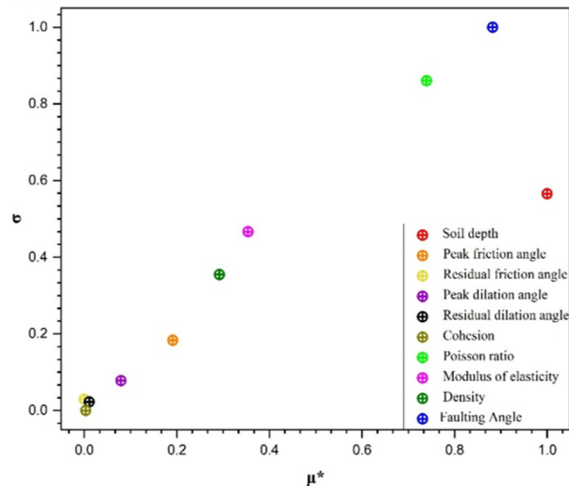


شکل 5- عکس شماتیک دستگاه آزمایشی سانتریفیوژ دانشگاه داندی برای شبیه‌سازی انتشار گسیختگی شیب لغز (Anastasopoulos و همکاران، 2007)

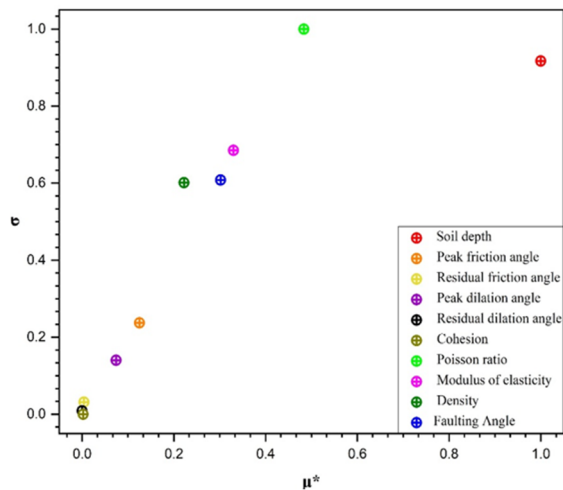
صحت‌سنجی ماسه با تراکم متوسط،  $D_r=80\%$ ، تحت اثر گسلش معکوس انجام شد، که پارامترهای الاستیک، چگالی و پارامترهای پلاستیک از نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم برای نمونه خاک، استخراج شدند. پارامترهای ورودی برای صحت‌سنجی عددی در جدول (2) قابل مشاهده است. به‌منظور ارزیابی کمی دقت مدل‌سازی عددی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی سانتریفیوژ Anastasopoulos و همکاران (2007) مقایسه شد (شکل (6)). انطباق مناسبی میان جابه‌جایی سطح زمین در مدل عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. مقدار خطای متوسط  $9/676\%$  و مقدار متوسط ضریب همبستگی،  $R^2$ ، برابر با  $0/962$  محاسبه شد که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان مدل در پیش‌بینی رفتار سطح زمین در اثر گسلش است. از نتایج حاصله می‌توان دریافت که با افزایش مقدار جابه‌جایی قائم،  $h$ ، تغییر شکل قائم سطح زمین نیز افزایش می‌یابد.

جدول 2- پارامترهای استخراج شده برای صحت‌سنجی مدل سانتریفیوژی (Anastasopoulos و همکاران، 2007)

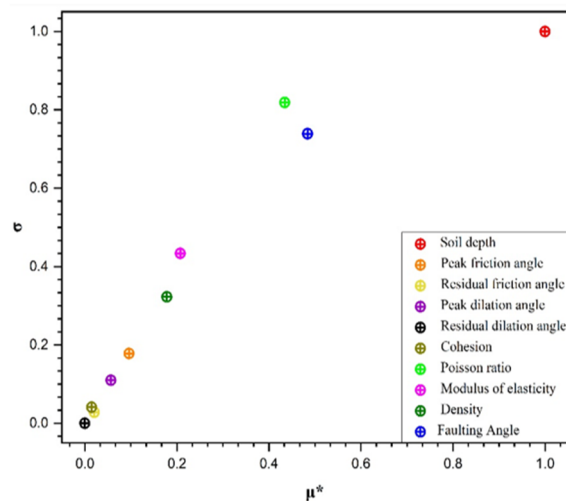
مقادیر	پارامترها
1705	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
13/7	$E$ (MPa)
0/3	$\nu$
39	$\phi_p$ (degree)
30	$\phi_{res}$ (degree)
11	$\psi_p$ (degree)
0	$\psi_{res}$ (degree)
0/6	$c$ (kPa)



شکل 8- نتایج تحلیل حساسیت موریس در شیب مجاز 1/150  
گسلش نرمال برای فرودیواره



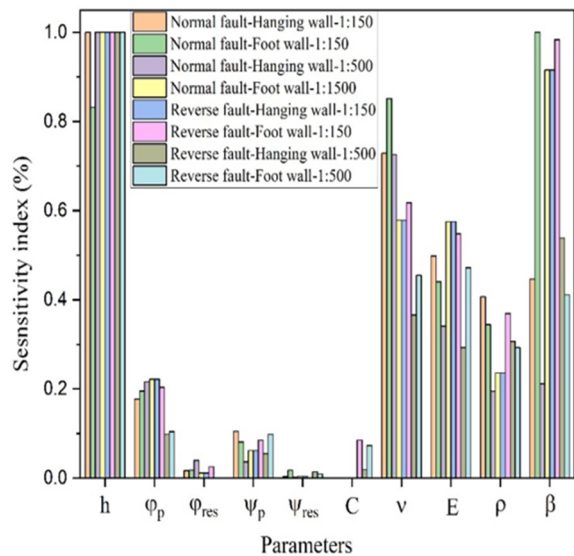
شکل 9- نتایج تحلیل حساسیت موریس در شیب مجاز 1/150  
گسلش نرمال برای فرادیواره



شکل 10- نتایج تحلیل حساسیت موریس در شیب مجاز 1/500  
گسلش نرمال برای فرودیواره

$$S_i = \sqrt{(\mu^*)^2 + (\sigma)^2} \quad (11)$$

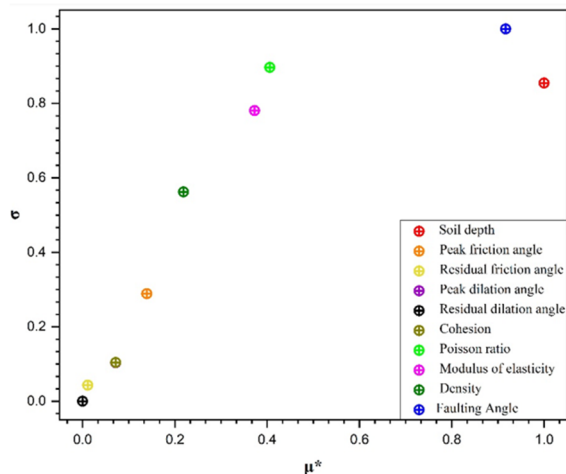
از نظر عملی، مقدار بالای این شاخص نشان‌دهنده تأثیر کلی و قوی‌تر متغیر بر خروجی است، که این تأثیر ممکن است به علت بالا بودن  $\mu^*$  یا  $\sigma$  یا هر دو باشد. در شکل (7)، شاخص حساسیت مربوط به هر پارامتر در شرایط مختلف مسئله محاسبه شده است. با در نظر گرفتن این شاخص، در اغلب شرایط پارامتر  $h$  حساس‌ترین پارامتر است. همچنین پارامترهای هندسی بیشترین تأثیر را دارند. همچنین می‌توان مشاهده کرد که اثر پارامترهای الاستیک بیشتر از پارامترهای پلاستیک است.



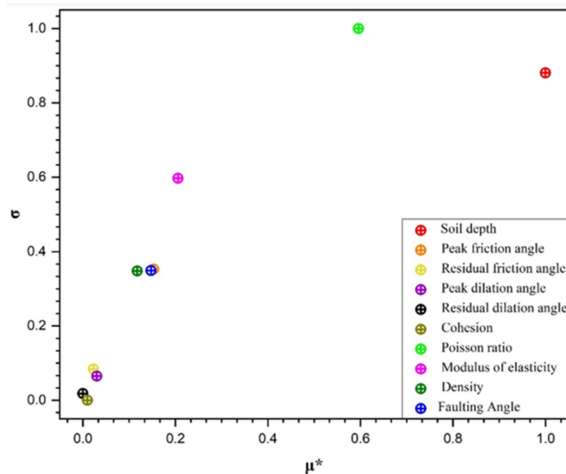
شکل 7- شاخص حساسیت پارامترها بر خروجی

### 6-1- گسل نرمال

برای هردو شیب مرزی هم در قسمت فرادیواره و هم در قسمت فرودیواره، ضخامت لایه خاک،  $h$ ، بیشترین تأثیر را بر حریم گسل دارد. در شکل (10) برای شیب مرزی 1/500 در قسمت فرودیواره، ضخامت لایه خاک علاوه بر بیشترین تأثیر، ارتباط و اندرکنش پیچیده‌تر و غیرخطی‌تری نسبت به سایر پارامترها بر حریم گسل دارا می‌باشد. همچنین در قسمت فرودیواره برای شیب مرزی 1/150، زاویه گسلش دومین پارامتر تأثیرگذار بعد از ضخامت لایه خاک می‌باشد و نیز غیرخطی‌ترین رابطه و اندرکنش را با حریم گسل دارد. برای فرادیواره، در هردو حالت شیب مرزی، شکل (9) و (11)، نسبت پواسون به‌عنوان دومین پارامتر مؤثر، غیرخطی‌ترین رابطه را با حریم گسل دارد. مطابق نتایج، پارامترهای الاستیک خاک، اثرات بیشتر و غیرخطی‌تری را نسبت به پارامترهای پلاستیک خاک داشته و از میان پارامترهای پلاستیک خاک می‌توان اثر چسبندگی، زاویه اتساع و زاویه اصطکاک باقی‌مانده را بر حریم گسل نادیده گرفت.



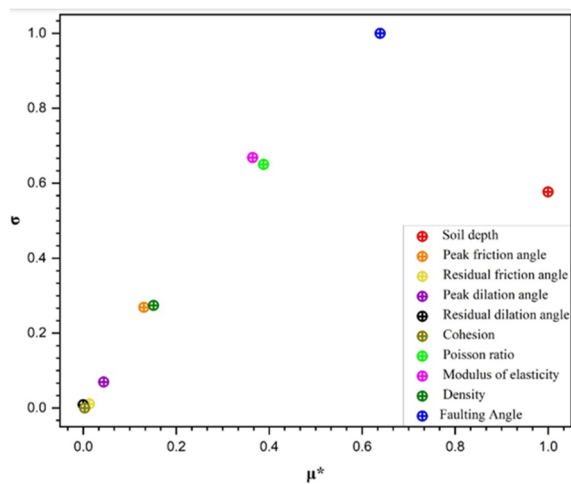
شکل 12- نتایج تحلیل حساسیت موریس در شیب مجاز 1/150  
گسلش معکوس برای فرودیواره



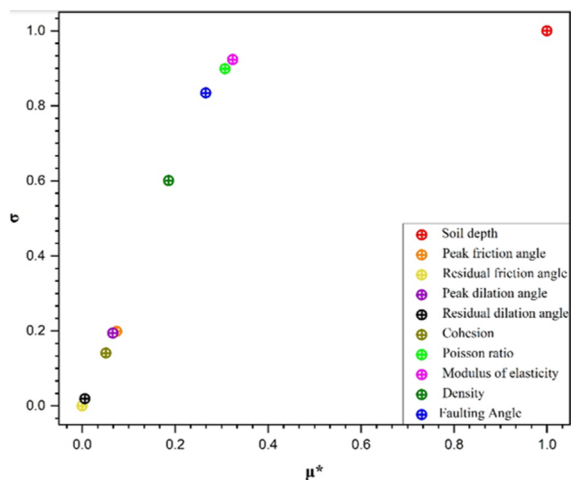
شکل 11- نتایج تحلیل حساسیت موریس در شیب مجاز 1/500  
گسلش نرمال برای فرادیواره

## 2-6- گسل معکوس

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت علمی موریس برای حالت گسلش معکوس در شکل‌های (12)، (13)، (14) و (15) برای هردو شیب مرزی 1/500 و 1/150 قابل مشاهده است. مطابق آنچه که پیش‌تر گفته شد، برای حالت گسل معکوس و در هر دو شیب مرزی مورد نظر، مشابه حالت گسل نرمال، ضخامت لایه خاک بیشترین تأثیر را روی حریم گسل داشته و از اهمیت بیشتری برخوردار است. برای شیب مرزی 1/500 و برای هر دو دیواره، شکل‌های (14) و (15)، پارامتر ضخامت لایه خاک علاوه بر بیشترین اهمیت، غیرخطی‌ترین و پیچیده‌ترین رابطه و اندرکنش را با سایر پارامترها و حریم گسل، که خروجی مورد نظر است، دارد. در قسمت فرودیواره، شکل (14)، مدول الاستیسیته و در قسمت فرادیواره، شکل (15)، زاویه گسلش، بیشترین اهمیت را پس از ضخامت لایه خاک روی حریم گسل دارند. برای شیب مرزی 1/150، در هردو دیواره، شکل (12) و (13)، بعد از ضخامت لایه خاک، زاویه گسلش بیشترین اهمیت را از بین سایر پارامترها دارد. همچنین زاویه گسلش، غیرخطی‌ترین و پیچیده‌ترین رابطه و اندرکنش را با حریم گسل دارد. مشابه نتایج گسل نرمال، پارامترهای الاستیک خاک اهمیت و تأثیر بیشتری نسبت به پارامترهای پلاستیک خاک روی حریم گسل داشته و رابطه غیرخطی‌تری نیز با خروجی دارند. مشابه با گسل نرمال، چسبندگی، زاویه اتساع باقی‌مانده و زاویه اصطکاک باقی‌مانده کمترین اهمیت را بر حریم گسل داشته و می‌توان اثرات آن‌ها را نادیده گرفت.



شکل 13- نتایج تحلیل حساسیت موریس در شیب مجاز 1/150  
گسلش معکوس برای فرادیواره



شکل 14- نتایج تحلیل حساسیت موریس در شیب مجاز 1/500  
گسلش معکوس برای فرودیواره

پایین است که پیش‌بینی خوب الگوریتم استفاده شده را نشان می‌دهد.

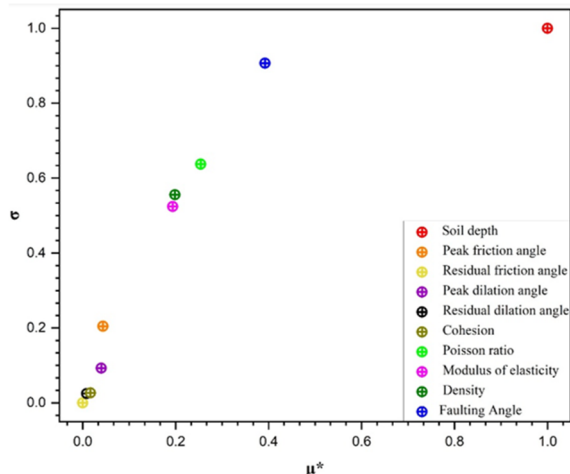
جدول 3- عملکرد جنگل تصادفی

مقادیر	پارامترهای مهم
جستجوی تصادفی	روش بهینه‌سازی
MSE	معیار ارزیابی درخت
800	تعداد درخت‌ها
-	حداکثر عمق درخت‌ها
2	حداقل نمونه برای انشعاب
1	حداقل نمونه در برگ
Log2 (تقریباً 30% از ورودی‌ها)	حداکثر ویژگی‌های در نظر گرفته شده
3/873	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)
0/87	ضریب تعیین ( $R^2$ )

مقادیر SHAP، ابزاری قدرتمند برای تفسیر پذیری مدل‌های یادگیری ماشین، هم در سطح محلی و هم در سطح جامع ارائه می‌دهند. مقادیر SHAP قابلیت توضیح پیش‌بینی‌های منفرد مدل را دارند. آن‌ها سهم هر پارامتر را در ایجاد یک خروجی خاص روشن می‌کنند. هنگامی که این مقادیر در میان تعداد زیادی از پیش‌بینی‌ها تجمع شوند، یک دیدگاه جامع از مدل فراهم می‌کنند. این دیدگاه شامل اهمیت کلی پارامترها و همچنین تاثیر جهت‌دار آن‌ها (سهم مثبت یا منفی) بر خروجی مدل در کل مجموعه داده است (Wang و همکاران، 2024؛ Lundberg و Lee، 2017).

شکل (17)، نمودارهای SHAP را نشان می‌دهد. این نمودارها رتبه‌بندی اهمیت کلی پارامترها را به وضوح نشان داده و سهم مثبت و منفی را تفکیک می‌کنند. مطابق نتایج موجود در شکل (17)، پارامترهای مؤثر از بالا به پایین مرتب شده‌اند، که پارامتر ارتفاع لایه خاک،  $h$ ، مهم‌ترین و مؤثرترین پارامتر روی حریم گسل است. برای گسل‌های نرمال، در فرودپواره، زاویه گسلش به‌عنوان دومین پارامتر مؤثر بر حریم گسل شناسایی شد. درحالی‌که برای فرادپواره، نسبت پواسون و مدول الاستیسیته به‌عنوان پارامترهای مهم بعدی شناسایی شدند.

در شرایط گسل معکوس، برای فرادپواره در هردو شیب مرزی و فرودپواره با شیب مرزی 1/150، زاویه گسلش به‌عنوان دومین پارامتر مهم و در فرودپواره با شیب مرزی 1/500، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون به‌عنوان پارامترهای مهم بعدی شناخته شدند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که تطابقت خوبی با نتایج تحلیل حساسیت موریس وجود دارد.



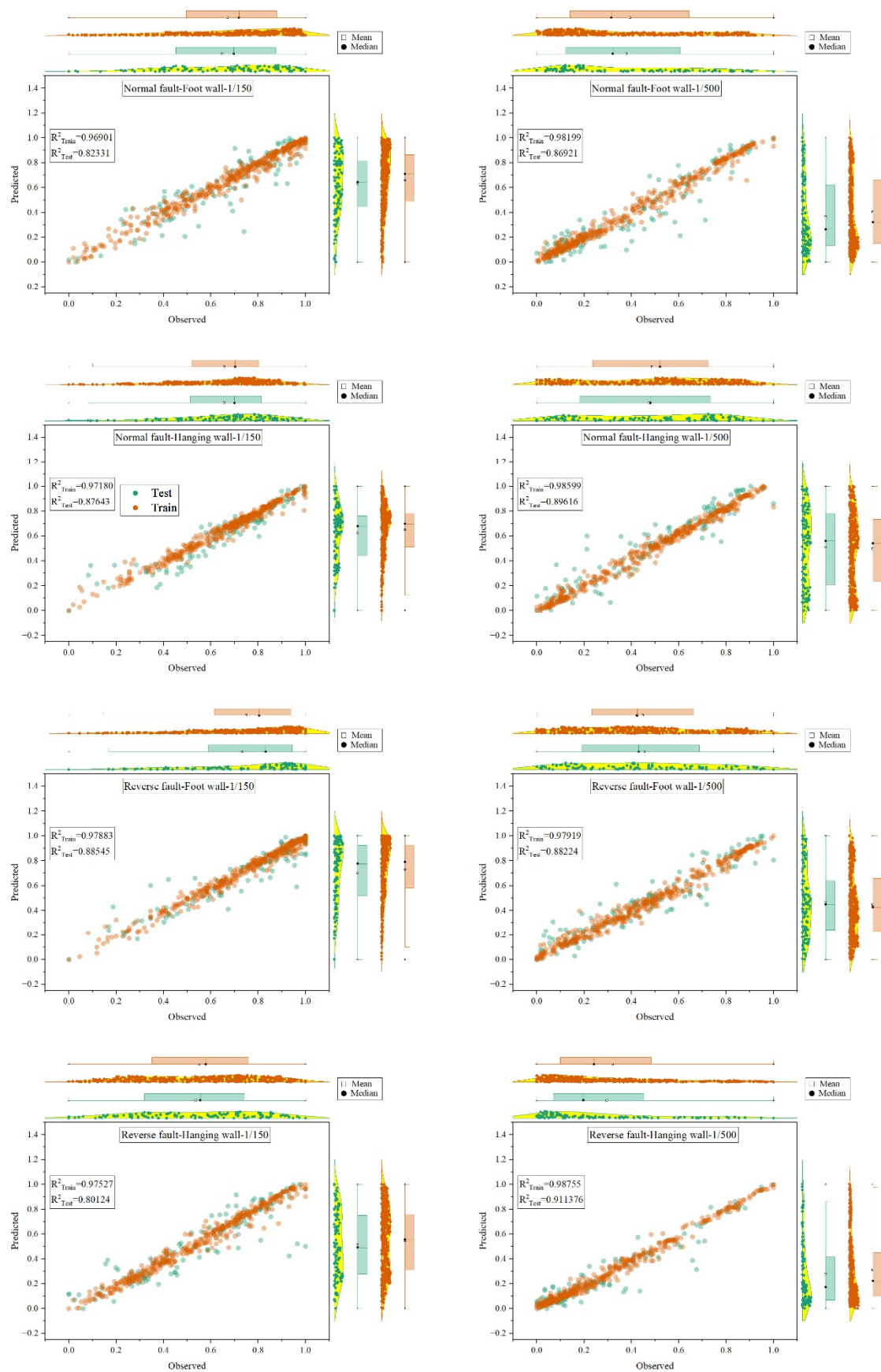
شکل 15- نتایج تحلیل حساسیت موریس در شیب مجاز 1/500 گسلش معکوس برای فرادپواره

### 3-6- تحلیل حساسیت با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی

براساس تحلیل حساسیت موریس ارائه شده، که پارامترهای هندسی را به‌عنوان تأثیرگذارترین پارامترها بر حریم گسل شناسایی کرد، یک رویکرد مبتنی بر یادگیری ماشین با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی برای اعتبارسنجی و گسترش این یافته‌ها به‌کار گرفته شد. این روش از یک چارچوب داده محور برای ثبت روابط غیرخطی و اندرکنش پارامترها استفاده می‌کند و مکملی قوی برای معیار حساسیت جامع موریس است. در این تحلیل از مجموعه داده‌ای شامل 550 شبیه‌سازی عددی برای هر 8 حالت مسئله استفاده شد، که 80% برای یادگیری و 20% برای آزمون اختصاص داده شده است.

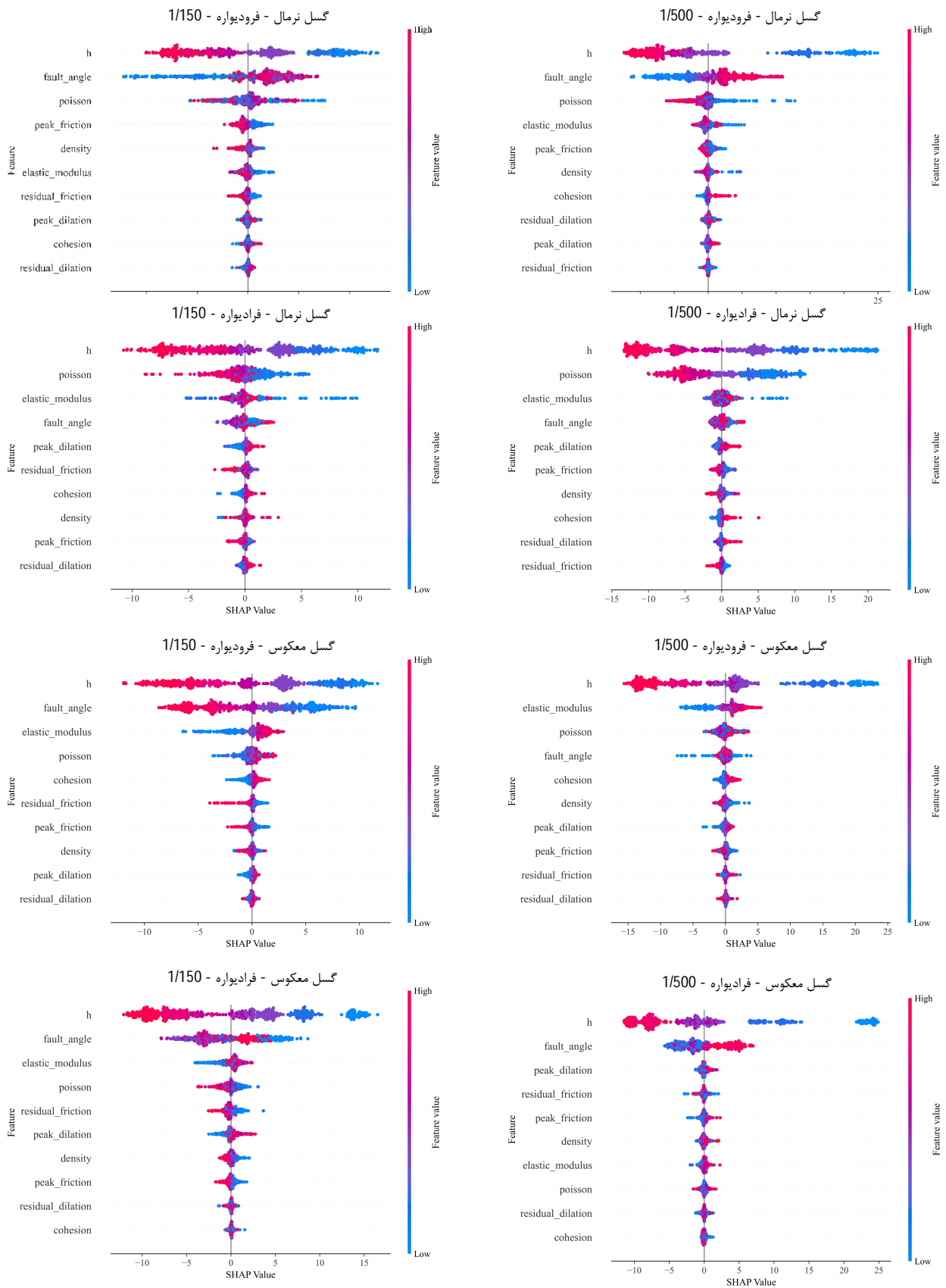
به‌منظور دستیابی به بالاترین دقت و جلوگیری از بیش‌برازش، پارامترهای مدل جنگل تصادفی با استفاده از روش جستجوی تصادفی<sup>12</sup> با اعتبارسنجی متقابل 5 لایه تعیین شدند. فضای جستجو شامل تغییرات تعداد درخت‌ها، عمق درخت و معیارهای انشعاب بود. پس از انجام 30 تکرار بر روی داده‌های آموزشی، ترکیب بهینه پارامترها انتخاب شد که جزئیات آن به همراه دقت مدل بر روی داده‌های آزمون در جدول (3) آورده شده است.

یک رگرسیون جنگل تصادفی برای پیش‌بینی حریم گسل براساس 10 پارامتر ورودی آموزش داده شد. عملکرد مدل با ضریب تعیین  $R^2$ ، ارزیابی شد. این ضریب نشان‌دهنده میزان نزدیکی داده‌های مدل به داده‌های واقعی است. مطابق شکل (16)، مدل دارای قابلیت پیش‌بینی قوی و عملکرد مطلوب است. همچنین اختلاف بین پراکندگی‌ها و ضرایب  $R^2$  داده‌های یادگیری و آموزش



شکل 16- پراکندگی مقادیر پیش‌بینی شده 8 طرح مورد بررسی توسط الگوریتم جنگل تصادفی در مقابل مقادیر مشاهده شده

شده



شکل 17- مقادیر SHAP پارامترها در مدل یادگیری ماشین با الگوریتم جنگل تصادفی

تحلیل SHAP که سهم غیرخطی و جزئی هر پارامتر را نشان می‌دهد. این دو پارامتر بیشترین تأثیر را بر خروجی مدل داشته‌اند. این تطابق نشان می‌دهد که روابط حاکم بر مسئله فارغ از نوع روش تحلیل، پایدار هستند. با این حال، روش SHAP توانسته است جزئیات دقیق‌تری از تغییرات حساسیت در بازه‌های مختلف پارامترها، به‌ویژه اندرکنش‌های غیرخطی در مرتبه‌های بالا، را آشکار سازد که در روش مورس کمتر قابل مشاهده بود.

از منظر مکانیک محیط‌های پیوسته، اهمیت کلیدی پارامتر ضخامت لایه پوششی در مکانیزم تکامل و انتشار نوار برشی نهفته است. با افزایش ضخامت خاک، مسیر گسیختگی از سنگ‌بستر تا سطح زمین طولانی‌تر شده و فرصت بیشتری برای بازتوزیع تنش و پخش‌شدگی کرنش‌های پلاستیک فراهم می‌شود. این پدیده منجر به تبدیل یک گسیختگی متمرکز به یک ناحیه تغییر شکل وسیع و در نتیجه افزایش عرض حریم گسل می‌گردد. علاوه بر این، زاویه گسلش به‌عنوان یک قید سینماتیکی، جهت‌گیری مؤلفه‌های تنش را تعیین می‌کند. در زوایای کم، غلبه مؤلفه افقی جابه‌جایی منجر به پاسخ خمشی در لایه‌های سطحی و گسترش افقی ناحیه اعوجاج می‌شود؛ درحالی‌که در زوایای تند، تمرکز شدید تنش برشی در یک پهنای باریک، باعث رسیدن سریع‌تر و متمرکزتر گسیختگی به سطح می‌گردد.

## 7- نتیجه‌گیری

این پژوهش، نتایج ارزشمندی را درباره تأثیر پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی بر حریم گسل ارائه می‌کند. در این مقاله، سعی شده است تا با استفاده از روش تحلیل حساسیت مورس، الگوریتم جنگل تصادفی و مدل‌سازی عددی گسلش، پارامترهای تأثیرگذار بر حریم گسل شناسایی شود. این بررسی برای گسل‌های نرمال و معکوس در یک خاک ماسه‌ای تک‌لایه صورت گرفت. همچنین در این مطالعه، اثر پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی به‌طور جداگانه برای حریم گسل، در قسمت فرادیواره و فرودیواره ارزیابی شد. درحالت کلی، اهمیت و تأثیر این پارامترها برای دو شیب مختلف که مرز بین ناحیه تغییر شکل یافته و حریم گسل را تعیین می‌کنند، در هر دو حالت گسل معکوس و نرمال و برای دو قسمت فرادیواره و فرودیواره بررسی شد و نتایج به‌دست آمده، قسمتی از مطالعات انجام شده در گذشته را تأیید می‌کنند. نتایج به‌دست آمده به‌شرح ذیل می‌باشد:

- 1) ارتفاع لایه خاک، تأثیر و اهمیت پارامتر هندسه، بر حریم گسل بیشتر از پارامترهای ژئومکانیکی است.
- 2) در میان پارامترهای ژئومکانیکی، اهمیت پارامترهای الاستیک خاک بر حریم گسل بیشتر از اهمیت پارامترهای پلاستیک خاک است.

خروجی‌های به‌دست آمده از الگوریتم جنگل تصادفی علاوه بر نشان دادن اهمیت پارامترها، جهت و بزرگی تأثیر هر پارامتر بر پیش‌بینی حریم گسل را نشان می‌دهد. مقادیر مثبت باعث افزایش مقدار پیش‌بینی (اثر مثبت)، مقادیر پایین باعث کاهش مقدار پیش‌بینی (اثر منفی) و مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده حداقل تأثیر هستند. گرادیان رنگ از آبی به قرمز نشان‌دهنده مقادیر پارامترها از کم به زیاد است، درحالی‌که پراکندگی و موقعیت نقاط در امتداد محور  $X$ ، محدوده و مرکزیت تأثیر را برجسته می‌کند. هر نقطه در نمودارها، یک پیش‌بینی را نشان می‌دهد.

در فرودیواره برای حالت گسل نرمال، مقادیر SHAP برای ارتفاع لایه خاک به‌طور منفی افزایش می‌یابد و نشان می‌دهد که این پارامتر در مقادیر بالا، حریم گسل را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و در مقادیر پایین ضخامت لایه خاک، باعث افزایش حریم گسل می‌شود. زاویه گسلش به‌عنوان دومین پارامتر مهم، عملکرد معکوسی نسبت به  $h$  داشته و در مقادیر بالا باعث افزایش حریم گسل می‌شود. در شیب مرزی  $1/500$ ، پراکندگی‌ها وسیع‌تر است که نشان‌دهنده تغییرپذیری بیشتر برای شیب‌های مرزی پایین‌تر است. برای فرادیواره نیز این یافته‌ها برقرار است با این تفاوت که در فرادیواره نسبت پواسون و مدول الاستیسیته در رتبه‌های بعدی قرار دارند که نسبت پواسون مشابه با ضخامت لایه خاک، در مقادیر بالا باعث کاهش حریم گسل می‌شود. این درحالی است که مدول الاستیسیته پیچیده‌تری از خود نشان می‌دهد.

برای گسل معکوس در فرودیواره، مقادیر SHAP بالا و منفی، دوباره نقش حیاتی و غالب پارامتر  $h$  را برجسته می‌کنند. در شیب مرزی  $1/150$ ، بعد از ارتفاع لایه خاک، زاویه گسلش تأثیر منفی و قابل توجهی دارد، درحالی‌که نسبت پواسون و مدول الاستیسیته، مشارکت متوسط و مثبت در خروجی دارند. برای فرادیواره پارامتر  $h$ ، تأثیر خود را حفظ می‌کند. در شیب مرزی  $1/500$ ، زاویه گسلش اثر مثبت خود را بر خروجی در مقادیر بالاتر نشان می‌دهد. همچنین برای شیب‌های مرزی  $1/500$ ، با توجه به گستردگی نقاط، تغییرپذیری ارتفاع لایه خاک بیشتر است.

باتوجه به نتایج، گسل‌های نرمال، سهم متعادل‌تری از زاویه گسلش و خواص مواد نشان می‌دهند درحالی‌که در گسل‌های معکوس، پارامتر  $h$  و پارامترهای ثانویه، اهمیت بیشتری دارند. در فرادیواره‌ها در مقایسه با فرودیواره‌ها، معمولاً مقادیر SHAP وسیع‌تری برای  $h$  نشان می‌دهند. این پراکندگی در شیب مرزی  $1/500$  نیز بیشتر است.

مقایسه نتایج حاصل از تحلیل حساسیت جامع مورس و مقادیر حاصل از الگوریتم جنگل تصادفی نشان‌دهنده همگرایی بالای این دو روش است. در روش مورس که مبتنی بر غربالگری اولیه است، پارامترهای ضخامت لایه خاک،  $h$  و زاویه گسل،  $\beta$ ، بالاترین شاخص حساسیت را کسب کردند. به‌طور مشابه، در

پردازش تصویر برای تحلیل الگوهای پیچیده تغییر شکل سطح زمین، می‌تواند افق‌های جدیدی را در دقیق‌سازی محدوده‌های خطر گسلش بگشاید.

### 8- مراجع

- Anastasopoulos I, Gazetas G, Bransby M, Davies M, El Nahas A, "Fault rupture propagation through sand: finite-element analysis and validation through centrifuge experiments", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133, 943-958. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:8\(943\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:8(943))
- Borchardt G, "Establishing appropriate setback widths for active faults", *Environmental and Engineering Geoscience*, 2010, 16, 47-53. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.16.1.47>
- Bray JD, Seed RB, Seed HB, "Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120, 562-580. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:3\(562\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:3(562))
- Breiman L, "Random forests", *Machine Learning*, 2001, 45, 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Campolongo F, Cariboni J, Saltelli A, "An effective screening design for sensitivity analysis of large models", *Environmental Modelling and Software*, 2007, 22, 1509-1518. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.10.004>
- Chen YG, Chen W S, Lee JC, Lee YH, Lee CT, Chang HC, Lo CH, "Surface rupture of 1999 Chi-Chi earthquake yields insights on active tectonics of central Taiwan", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2001, 91, 977-985. <https://doi.org/10.1785/0120000721>
- Dassault S, "Abaqus Computer software", Dassault Système, 2024.
- Dolan JF, Haravitch BD, "How well do surface slip measurements track slip at depth in large strike-slip earthquakes? The importance of fault structural maturity in controlling on-fault slip versus off-fault surface deformation", *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 388, 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.043>
- Elie-Dit-Cosaque K, Maume-Deschamps V, "Random forest based quantile-oriented sensitivity analysis indices estimation", *Computational Statistics*, 2024, 39, 1747-1777. <https://doi.org/10.1007/s00180-023-01411-3>
- Figueiredo P, Hill J, Mersch A, Scheip C, Stewart K, Owen L, Wooten R, Carter M, Szymanski E, Horton S, "The Mw 5.1, 9 August 2020, Sparta earthquake, North Carolina: The first documented seismic surface rupture in the eastern United States", *GSA Today*, 2022, 32. <https://doi.org/10.1130/GSATG534A.1>
- Franczyk A, "Using the Morris sensitivity analysis method to assess the importance of input variables on time-reversal imaging of seismic sources", *Acta Geophysica*, 2019, 67, 1525. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00353-0>

- (3) باتوجه به مشاهدات صورت گرفته و تئوری تحلیل حساسیت، می‌توان از برخی پارامترهای پلاستیک خاک در تحلیل‌های بعدی صرف‌نظر کرد، زیرا مهم نبوده و اهمیت و تأثیر بسیار پایینی بر حریم گسل دارند. این پارامترها عبارتند از: چسبندگی، زاویه اصطکاک باقی‌مانده و زاویه اتساع باقی‌مانده.
- (4) با بررسی یافته‌ها می‌توان دریافت که انتخاب مقدار شیب مجاز بین ناحیه تغییر شکل یافته و حریم گسل، بر میزان اهمیت و میزان غیرخطی بودن اثر پارامترها بر خروجی تأثیرگذار خواهد بود. همچنین اثر نوع گسل نیز بر نتایج قابل ملاحظه است. برای مثال، در گسل معکوس و با شیب مجاز 1/500، ارتفاع لایه خاک علاوه بر بیشترین اهمیت، غیرخطی‌ترین رابطه را با حریم گسل در فرودپیواره و فرادیواره دارد؛ درحالی که برای شیب مجاز 1/150، زاویه گسلش به‌عنوان دومین پارامتر با اهمیت، غیرخطی‌ترین رابطه را با حریم گسل در هر دو قسمت فرادیواره و فرودپیواره دارد.
- (5) تحلیل نتایج الگوریتم تصادفی، نتایج حاصل از تحلیل موربیس را تأیید می‌کند. مقادیر SHAP، نشان می‌دهند که ارتفاع لایه خاک عامل اصلی با تأثیر منفی بر ناحیه حریم گسل در تمام طرح‌های گسلش است و تأثیر آن در شیب‌های مرزی کم‌تر و در گسل‌های معکوس تشدید می‌شود. همچنین زاویه گسلش و خواص الاستیک نقش حمایتی داشته و اثرات آن‌ها بر اساس نوع گسل و شیب مرزی متفاوت است.
- این مطالعه، با تلفیق روش تحلیل حساسیت موربیس و الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی، درک عمیق‌تری از سلسله مراتب تأثیر پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی بر حریم گسل فراهم آورد. برخلاف رویکردهای سنتی، نتایج نشان داد که پارامترهای هندسی مانند ضخامت لایه خاک و زاویه گسل و ویژگی‌های الاستیک، نقش حاکم و تعیین‌کننده‌تری نسبت به پارامترهای مقاومتی خاک ایفا می‌کنند.
- از منظر کاربردی و مهندسی، این یافته‌ها ضرورت بازنگری در اولویت‌بندی مطالعات صحرایی و تدوین آیین‌نامه‌های تعیین حریم را برجسته می‌سازد. بدین معنا که در پروژه‌های حساس، تمرکز و بودجه‌بندی مطالعات ژئوتکنیک باید بیش از دقیق‌سازی پارامترهای مقاومت برشی، بر شناسایی دقیق هندسه بستر سنگی و ضخامت لایه خاک معطوف گردد. علاوه بر این، مدل یادگیری ماشین توسعه‌یافته در این پژوهش، با دقت قابل‌قبول خود می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد و سریع جایگزین تحلیل‌های عددی زمان‌بر شده و تخمین اولیه حریم گسل را برای مهندسان تسهیل نماید. درنهایت، جهت توسعه این مسیر در پژوهش‌های آتی و گذار از تحلیل‌های کیفی به کمی، پیشنهاد می‌شود اثرات اندرکنش سه‌بعدی گسلش، ناهمگنی و لایه‌بندی خاک در مدل‌ها لحاظ گردد. همچنین، بهره‌گیری از تکنیک‌های یادگیری عمیق و

- Moss RE, Thompson EM, Scott KD, Tiwari B, Hashash YM, Acharya I, Adhikari BR, Asimaki D, Clahan KB, Collins BD, "Geotechnical effects of the 2015 magnitude 7.8 Gorkha, Nepal, earthquake and aftershocks", *Seismological Research Letters*, 2015, 86, 1514-1523. <https://doi.org/10.1785/0220150158>.
- Mousavi S, Jafari M, Kamalian M, Shafiei A, "Experimental investigation of reverse fault rupture-rigid shallow foundation interaction", *International Journal of Civil Engineering*, 2010, 85-98.
- Pollitz FF, Nyst M, Nishimura T, Thatcher W, "Coseismic slip distribution of the 1923 Kanto earthquake, Japan", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110. <https://doi.org/10.1029/2004JB003225>.
- Pujol G, "Simplex-based screening designs for estimating metamodels", *Reliability Engineering and System Safety*, 2015, 94, 1156-1160.
- Ritz JF, Baize S, Ferry M, Larroque C, Audin L, Delouis B, Mathot E, "Surface rupture and shallow fault reactivation during the 2019 Mw 4.9 Le Teil earthquake, France", *Communications Earth and Environment*, 2021. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00111-8>
- Salari M, Akhtarpour A, "Strain rate effects on shear behavior of dense unsaturated silty sand from the Dasht-e-Bayaz Fault Zone", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2025, 43, 528. <https://doi.org/10.1007/s10706-024-02891-2>
- Salman HA, Kalakech A, Steiti A, "Random forest algorithm overview", *Babylonian Journal of Machine Learning*, 2024, 69-79. <https://doi.org/10.58496/BJML/2024/007>
- Shi JS, Ling DS, Hu CB, Tu FB, "Study on reverse fault rupture propagation through sand with inclined ground surface", *Engineering Geology*, 2020, 276, 105768. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105768>
- Solhmirzaei R, Soroush A, Zanjani MM, "Numerical analysis of effects of fault rupture on overlying soil structures", *Proceedings of the International Conference on Dams and Hydropower*, 2012.
- Sun XZ, Xu XW, Chen LC, Tan XB, Yu GH, Li ZM, Su GW, Wang J, Zhang XQ, "Surface rupture features of the 2010 Yushu earthquake and its tectonic implication", *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55, 155-170. <https://doi.org/10.6038/j.issn.0001-5733.2012.01.016>
- Wada K, Goto H, "Generation mechanism of surface and buried faults: effect of plasticity in a shallow-crust structure", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2012, 102, 1712-172. <https://doi.org/10.1785/0120110275>
- Wang H, Liang Q, Hancock JT, Khoshgoftaar TM, "Feature selection strategies: a comparative analysis of SHAP-value and importance-based methods", *Journal of Big Data*, 2024, 11, 44. <https://doi.org/10.1186/s40537-024-00905-7>
- Wei S, Fielding E, LePrince S, Sladen A, Avouac JP, Helmberger D, Hauksson E, Chu R, Simons M, Hudnut K, "Superficial simplicity of the 2010 El Guo H, Zhao J, "The surface rupture zone and paleoseismic evidence on the seismogenic fault of the 1976 Ms 7.8 Tangshan earthquake China", *Geomorphology*, 2019, 327, 297-306. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.11.018>
- Guo TT, Xu XW, Yu GH, "Disasters characteristics of Wenchuan earthquake and analysis of buildings destruction", *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 204, 2505-2513. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.2505>
- Hamidia M, Kaboodkhani M, Bayesteh H, "Vision-oriented machine learning-assisted seismic energy dissipation estimation for damaged RC beam-column connections", *Engineering Structures*, 2024, 301, 117345-117345. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117345>
- Hart EW, "Zoning for surface fault hazards in California: The new special studies zones maps", 1974.
- Hazeghian M, Soroush A, "DEM simulation of reverse faulting through sands with the aid of GPU computing", *Computers and Geotechnics*, 2015, 66, 253-263. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.02.004>
- Hazeghian M, Soroush A, "Numerical modeling of dip-slip faulting through granular soils using DEM", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 97, 155-171. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.03.011>
- He X, Xu C, Xu X, Yang Y, "Advances on the avoidance zone and buffer zone of active faults", *Natural Hazards Research*, 2022, 2, 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2022.01.001>
- Klinger Y, "Relation between continental strike-slip earthquake segmentation and thickness of the crust", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115. <https://doi.org/10.1029/2010JB007517>
- Lawson AC, "Report of the state earthquake investigation commission", *The California Earthquake of April, 1906*, 18, 1, 1-451.
- Leiming W, Xiwei X, Feng L, Jun C, Junjie R, Jia C, Xianbing Z, Qichao J, Guihua C, Xiyang W, "Theory and application of setback distance from active faults", *Coal Geology and Exploration*, 2023, 51, 15.
- Lin ML, Chung CF, Jeng FS, "Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip", *Engineering Geology*, 2006, 88, 70-89. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.08.008>
- Loukidis D, Bouckovalas GD, Papadimitriou AG, "Analysis of fault rupture propagation through uniform soil cover", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29, 1389-1404. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.05.003>
- Lundberg SM, Lee SI, "A unified approach to interpreting model predictions", *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, 30.
- Morris MD, "Factorial sampling plans for preliminary computational experiments", *Technometrics*, 1991, 33, 161-174.
- Mortazavi ZM, Soroush A, "Numerical modeling of fault rupture propagation through two-layered sands", *Scientia Iranica*, 2014, 19-29.

- Mayor–Cucapah earthquake of Baja California in Mexico", *Nature geoscience*, 2011, 4, 615-618.  
<https://doi.org/10.1038/ngeo1213>
- Xi L, Xiwei X, Jianguo Z, Yingqing X, Jiang Y, Yanqi Z, "Surface rupture characteristics of the seismogenic structure of the Ludian MS 6.5 earthquake and identification and dating of related paleoearthquakes", *Earth Science Frontiers*, 2018, 25, 227. <https://doi.org/10.13745/j.esf.yx.2016-11-52>
- Xu X, Zhao B, Ma S, Han Z, Zhang L, Yu G, "Earthquake hazard prediction method and its application in active faults", Beijing: Science Press, 2011, 1-305.
- Xu XW, Yang XP, Yang ZD, "Preliminary discussion on urban seismic geological hazards and their prediction", *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1996, 23, 32-35.
- Zanjani MM, Soroush A, "Numerical modelling of fault rupture propagation through layered sands", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2019, 23, 1139-1155.  
<https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1321978>
- Zanjani MM, Soroush A, Solhmirzaei R, "Effect of mechanical soil parameters on fault rupture propagation through granular soils", *Proceedings of the Fifteenth World Conference on Earthquake Engineering Lisbon Portuga*, 2012.
- Zhang J, Bo J, Huang J, Li X, Lu T, "Research on setback of surface-fault-rupture with statistical analysis", *15<sup>th</sup> WCEE Lisbon*, 2012.
- Zinke R, Hollingsworth J, Dolan JF, "Surface slip and off-fault deformation patterns in the 2013 MW 7.7 Balochistan, Pakistan earthquake: Implications for controls on the distribution of near-surface coseismic slip", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15, 5034-5050.  
<https://doi.org/10.1002/2014GC005538>