

Examining the impact of Flat-Joint and Linear Parallel Bond behavioral models on Aghajari sandstone failure mechanism in PFC2D simulations

Mohammad Ijani¹, Ebrahim Rahimi^{2✉}, Vahab Sarfarazi³, Ali Faghih⁴

1. MSc graduate, Department of Earth Sciences, College of science, Shiraz university, Shiraz, Iran. E-mail: mo.ijan@hafez.shirazu.ac.ir

2. Assistant professor, Department of Earth Sciences, College of science, Shiraz university, Shiraz, Iran. E-mail: rahimi_e@shirazu.ac.ir

3. Associate professor, Department of Mining Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran. E-mail: vahab.sarfarazi@gmail.com

4. Professor, Department of Earth Sciences, College of science, Shiraz university, Shiraz, Iran. E-mail: afaghih@shirazu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 10 November 2024
Received in revised form 6
December 2024
Accepted 16 December 2024

Keywords:
Flat-Joint model, Parallel
Bond model, Sandstone
failure mechanism, PFC2D
Software.

ABSTRACT

Numerical modeling is an essential tool in engineering analysis, particularly within the fields of geoscience and geotechnics. The PFC2D software stands out in this field, using the Distinct Element Method (DEM) to simulate processes related to engineering geology and geotechnical assessment. This study focuses on the analysis and comparison of two common contact models: the Flat Joint Model (FJM) and the Linear Parallel Bond Model (LPBM). The Unconfined Compressive Strength (UCS) test is chosen as a the benchmark for calibrating and validating the PFC models. Sandstone samples for this study are taken from the Aghajari Formation located on the southern limb of the Madar Anticline. The results show that both contact models have a high ability to simulate the UCS in the calibration process. As this test is primarily used to calibrate the failure point (σ_c) and Young's modulus, the output values for both models are almost identical. However, the post-failure behavior in the stress-strain curves differs between the models, with the FJM demonstrating a more brittle response compared to the LPBM. The ability of the FJM model to simulate rough surfaces and material discontinuities allows for the representation of tensile cracking.

Introduction

Numerical methods are now widely used in geological activities, including engineering geological analysis, today. The integration of geological knowledge and engineering techniques with numerical methods can lead to effective and reliable understanding and analysis of various problems. In addition, the limitations encountered in empirically solving or reproducing certain problems, such as the initiation and propagation of fractures in rocks, have contributed to the widespread acceptance and popularity of numerical approaches. The Particle Flow Code (PFC) is a powerful modeling tool based on the Distinct Element Method (DEM), specifically designed to

simulate the mechanical behavior of granular materials and rocks, and has gained considerable popularity among geotechnical and engineering geology researchers. Of the eleven models available in version 6.00.13, the Flat-Joint Material (FJM) and Linear Parallel Bond (LPBM) models are particularly favored by addressing rock mechanics researchers. This study employs the two-dimensional version of the software (PFC2D) to compare and analyze the strengths and weaknesses of these contact models in simulating uniaxial tests on the Aghajari sandstone formation. The rock samples required for the study were selected from the Aghajari formation in Hormozgan province, situated within the Zagros folded structural zone.

Cite this article: Ijani, M., Rahimi, E., Sarfarazi, V., Faghih, A. (2024). Examining the impact of Flat-Joint and Linear Parallel Bond behavioral models on Aghajari sandstone failure mechanism in PFC2D simulations. *Journal of Engineering Geology*, 18 (4), 522-542. <https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.4.1017884>

This area is located on the southern limb of a fold structure where only the Aghajari formation, consisting of marlstone, gypsum, and sandstone, is exposed (Figure 1). The fold is characterized as asymmetric, with a dip of 35 degrees on the southern limb and 15 degrees on the northern limb. The trend of this fold aligns with the general trend of the Zagros, which runs from northwest to southeast, and is located between the provinces of Bushehr and Hormozgan, adjacent to the shores of the Persian Gulf (Ijani,

2024). This study explores how two behavioral models—FJM and LPBM—affect the simulation of failure mechanisms. The comparison between the flat-joint and linear parallel bond models is critical, as each model provides distinct methodologies for simulating rock behavior. This comparison may yield different insights into rock stability and failure, thereby influencing engineering decisions and practices.



Fig. 1. View of the Aghajari Formation facies in the study area (Ijani, 2024)

Materials and Methods

Location of rock sampling

The geographical coordinates of the study area are illustrated in Figure 2. This area is situated within the folded structural zone of the Zagros Mountains. The selection of this region is

attributed to the presence of significant industrial structures, which are integral to the Parsian Special Economic Zone.

Geographic(Desimal degr.)		Geographic(deg. Min. sec.)		UTM	
Long(x)	Lat(Y)	long(X)	lat(Y)	Easting(X)	Northing(Y)
52.888	27.180	52°53'16.8"E	27°10'48.0" N	687038.830	3007780.140

Fig. 2. Geographic coordinates of the study area

Contact models in PFC

The formulation of each of the eleven contact models leads to variations in the impact and simulation of particle interactions within a given simulation. The behavioral models selected for this study can accommodate both ball-ball and ball-facet contacts. In the two-dimensional version of this software, particles are represented as disks. The PFC software has certain limitations in terms of the number of particles it

can generate, which can be attributed to software constraints (Ijani, 2024).

The LPBM model does not prevent the possibility of slip (Potyondy and Cundall, 2004). This contact model has the capability to transfer both force and moment between the pieces, which significantly contributes to load distribution and the maintenance of structural integrity within the model. The parallel connections are conceptualized as a series of

elastic springs, each exhibiting constant normal and shear stiffness, uniformly distributed over a two-dimensional rectangular surface. The forces and moments generated between the contacting components are influential in the overall behavior of the system. Failure within this contact model arises from the rupture of these connections. In addition, the FJM framework describes the macroscopic behavior of a limited linear elastic material, incorporating a bond or frictional interface that may endure minor damage (Potyondy, 2016). Each element within this model is categorized as either bonded or unbonded, with bonded elements initially exhibiting linear elastic behavior, which is sustained until bond failure occurs. Unbonded

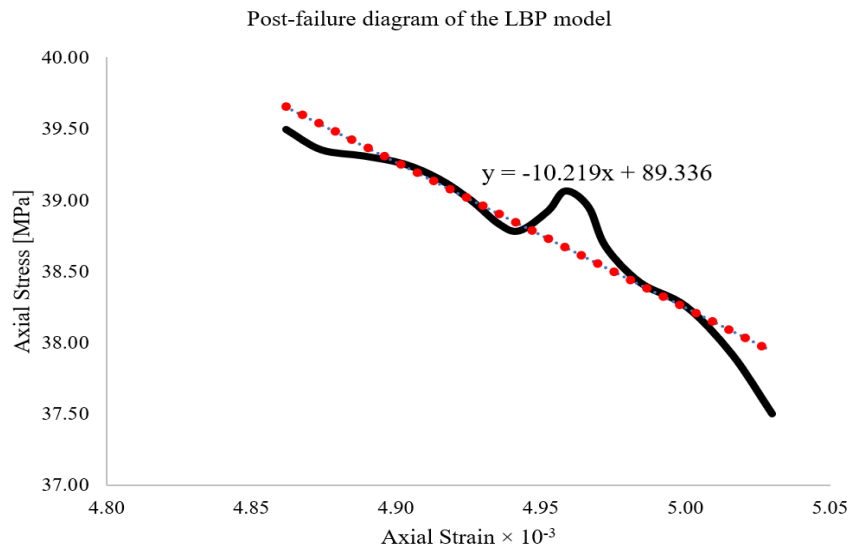
elements also demonstrate linear elastic and frictional characteristics, and the model adheres to the force-displacement law.

Uniaxial Compression Test (UCS)

This software requires a calibration process for all modelling tasks. The purpose of calibration is to reconcile discrepancies between numerical results and laboratory outcomes, ensuring consistency between these two sets of values. This process is achieved by adjusting the input parameters of the numerical model. Typically, the UCS test is one of the two necessary assessments in this context. Table 1 presents the values and results from the uniaxial test on the sandstone sample.

Table 1. Dimensions and laboratory results of uniaxial testing (UCS) of sandstone samples

Density (kg/m ³)	Porosity (%)	Young's modulus (GPa)	Stress, σ_c (MPa)	Sample height (mm)	Sample diameter (mm)
2200	2.38	8.45	39.59	100	50



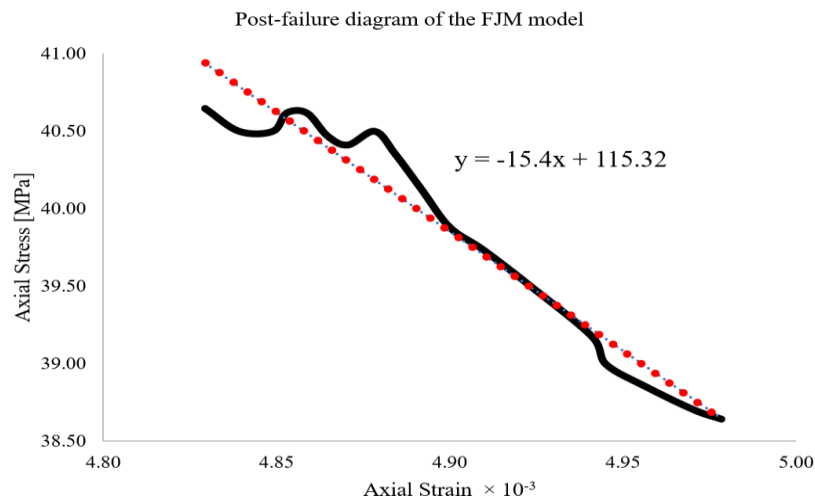


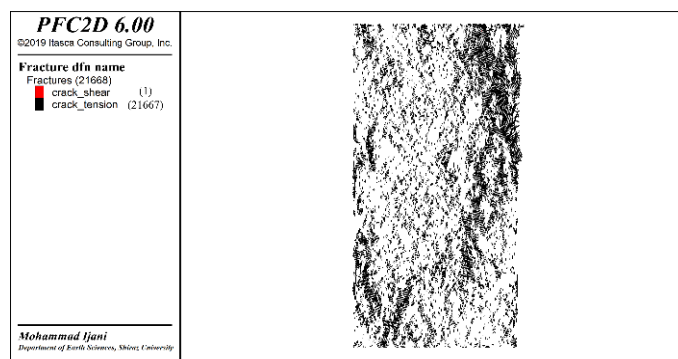
Fig. 3. Post-failure diagram of the two FJM and LPBM models

Results and Discussion

The input values (cohesion and elastic modulus) varied between the two models. The elastic modulus input for the FJM model was closer to the laboratory value by a factor of 1.24 compared to the input for the LPBM model. In contrast, the cohesion value input for the LPBM model was almost twice that of the FJM model.

The slope of the graph after failure, as illustrated in Figure 3, differs between the two models. In the FJM model, the slope decreases by approximately five units more than in the LPBM model following failure. This indicates a more brittle behavior in FJM compared to LPBM.

Conversely, the LPBM model demonstrates a greater ability to maintain continuity between balls even after fracture. As a result, FJM experiences a more rapid post-failure decline, due to its more accurate simulation of cracks and fractures. The LPBM model exhibits greater ductility than FJM, highlighting the distinct mechanical characteristics of both models, as shown in Figure 8. In the LPBM model, stress reduction occurs gradually, whereas FJM experiences a sudden stress reduction, reflecting different failure mechanisms.



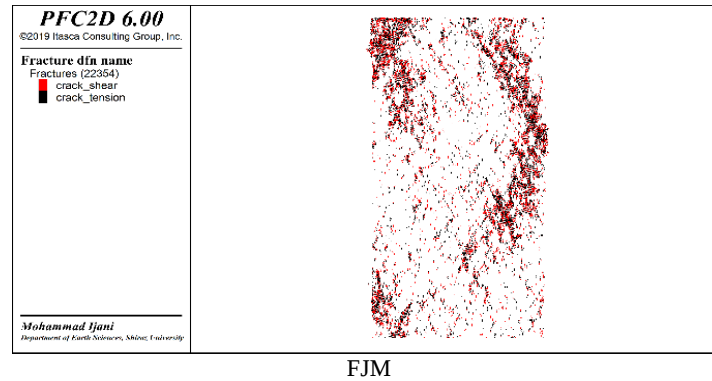


Fig. 4. Initiation and propagation of tensile and shear cracks in both FJM and LPBM models

Conclusions

Both the FJM and LPBM models used are popular, but each has different characteristics. The FJM model, with its ability to simulate uneven surfaces and material discontinuities, proves advantageous in scenarios where fracture and crack propagation are critical. Conversely, the LPBM model, which excels in simulating elastic and continuous behavior, is more suitable

for applications requiring the modeling of materials with high continuity and a more uniform structure. Additionally, the geological process in question can influence the choice of contact model; in other words, the same material, such as sandstone, may be assessed as either continuous or discontinuous under different geological conditions.



بررسی تأثیر دو مدل رفتاری اتصال مسطح و اتصال موازی خطی بر روی مکانیسم شکست

ماسه سنگ آغاچاری در شبیه سازی نرم افزار PFC2D

محمد ایجانی^۱، ابراهیم رحیمی^۲✉، وهاب سرفرازی^۳، علی فقیه^۴

۱. کارشناسی ارشد، بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: mo.ijan@hafez.shirazu.ac.ir

۲. استادیار، بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: rahimi_e@shirazu.ac.ir

۳. دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران. رایانامه: vahab.sarfarazi@gmail.com

۴. استاد، بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: afaghih@shirazu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۲۰۲۴/۰۸/۲۰

تاریخ بازنگری: ۲۰۲۴/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش: ۲۰۲۴/۰۹/۲۶

کلیدواژه‌ها:

مدل اتصال مسطح، مدل اتصال موازی خطی، مکانیسم شکست ماسه سنگ، نرم افزار PFC2D

مدل سازی عددی به عنوان ابزاری حیاتی در تحلیل های مهندسی، به ویژه در علوم زمین و مهندسی ژئوتکنیک، نقش بسزایی دارد. نرم افزار PFC2D یکی از ابزارهای برجسته در این زمینه است که از روش ناپیوسته DEM (Distinct Element Method) برای شبیه سازی فرآیندهای مرتبط با زمین شناسی مهندسی و تحلیل های ژئوتکنیکی استفاده می کند. این مقاله به تحلیل و مقایسه دو مدل تماسی رایج، یعنی اتصال مسطح (FJM) و اتصال موازی خطی (LPBM) می پردازد. آزمون مقاومت تک محوری (UCS) به عنوان معیاری برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل های PFC انتخاب شده است. نمونه های ماسه سنگی در این تحقیق از سازند آغاچاری در یال جنوبی تاقذیس مدار انتخاب شده اند. یافته ها نشان می دهد که هر دو مدل تماسی در شبیه سازی UCS در فرایند کالیبراسیون از توانایی بالایی برخوردارند. از آنجایی که این آزمون بیشتر برای کالیبره کردن مقدار نقطه شکست (σ_c) و همچنین مدول یانگ به کار می رود، مقادیر خروجی به دست آمده برای هر دو مدل تقریباً مشابه است. با این حال، رفتار پس از شکست در منحنی تنش- کرنش مدل ها با یکدیگر متفاوت است، به طوری که مدل اتصال مسطح (FJM) رفتار شکننده تری نسبت به مدل اتصال موازی خطی (LPBM) نشان می دهد. مدل FJM با قابلیت مدل سازی سطوح ناهموار و همچنین عدم پیوستگی مواد می تواند رخداد ترک های کششی و برشی را در مواردی که شکست و ترک خوردگی از اهمیت بسزایی برخوردار است را به نسبت مدل LPBM با عملکرد بهتری شبیه سازی کند. نتایج این پژوهش می تواند محققین را در انتخاب مدل مناسب برای شبیه سازی و تحلیل مکانیسم شکست سنگ ها، به ویژه در شرایطی که شبیه سازی دقیق از اهمیت بالایی برخوردار است، یاری رساند.

مقدمه

تحلیل کارآمد و قابل اعتماد یک مسئله، از اصلی ترین وظایف یک محقق به حساب می آید. امروزه تحلیل و طراحی اکثر پروژه های سازه ای و عمرانی مرتبط با مهندسی سنگ و زمین شناسی با در نظر گرفتن ویژگی های مکانیکی سازندهای سنگی نظیر مقاومت و مکانیسم گسیختگی انجام می گیرد (Fu et al., 2022a; Fu et al., 2021; Gao and

Sun, 2021; Alneasan et al., 2019). نقش مدل سازی عددی به عنوان یک ابزار اساسی در تحلیل مسائل زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک در چند سال اخیر کاملاً شناخته شده و جایگاه ویژه ای دارد. امروزه روش های عددی با توجه به پیشرفت های صورت گرفته از پر طرفدارترین روش های حل مسائل محسوب شده و واجد مقبولیت و

استناد: ایجانی، م.، رحیمی، ا.، سرفرازی، و.، فقیه، ع. (۲۰۲۴). بررسی تأثیر دو مدل رفتاری اتصال مسطح و اتصال موازی خطی بر روی مکانیسم شکست ماسه سنگ آغاچاری در شبیه سازی نرم افزار PFC2D. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۸ (۴)، ۳۰۳-۳۱۹. <https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.4.1017884>

منظوره دانست که در هر دو صورت دوبعدی و سه‌بعدی در دسترس بوده و به طور خاص در جهت مدل‌سازی رفتار مکانیکی مواد دانه‌ای و سنگ طراحی شده است. این برنامه با داشتن ۱۲ مدل مختلف تماس داخلی در نسخه مورد استفاده این پژوهش (۶/۰۰/۱۳) و همچنین ۱۶ مدل در آخرین نسخه موجود (نسخه ۷/۰) تا زمان انجام این تحقیق، قابلیت شبیه‌سازی دقیق رفتار مصالح مختلف تحت بارگذاری‌های متفاوت را فراهم می‌آورد (جدول ۱).

عمومیت مطلوبی است؛ علت این امر را می‌توان محدودیت‌های موجود در حل برخی مسائل (مثلاً آغاز و گسترش ترک در سنگ‌ها) به صورت تجربی یا آزمایشگاهی (Experimental) مسئله بیان کرد. در حال حاضر، مدل‌سازی عددی به عنوان یک روش گسترده در پروژه‌های مختلف ژئوتکنیکی برای شبیه‌سازی رفتار توده‌سنگ به کار گرفته می‌شود. برنامه PFC (Particle Flow Code) را می‌توان یکی از ابزارهای پیشرفته و قابل اعتماد در این زمینه دانست. این نرم‌افزار را می‌توان یک چارچوب مدل‌سازی همه

جدول ۱. انواع مدل‌های تماسی و خلاصه رفتاری آن‌ها (Ijani, 2024)

Table 1. Types of contact models and their behavioral summary (Ijani, 2024)

Keyword	Name	Behavior Summary
null	null	No mechanical interaction.
linear	linear	Linear elastic, frictional and viscous behavior.
linearcbond	linear contact bond	Linear model and contact bonding for BPM.
linearpbond	linear parallel bond	Linear model and parallel bonding for BPM.
softbond	soft bond	Linear softening bond model for BPM or granular applications.
rrlinear	rolling resistance linear	Linear model and rolling-resistance mechanism for granular applications.
arlinear	adhesive rolling resistance linear	Linear model, rolling-resistance mechanism and adhesion to give a cohesive granular material.
flatjoint	flat joint	Finite-size, linear elastic and either bonded or frictional interface with partial damage for BPM.
smoothjoint	smooth joint	Provides a joint within a BPM.
hertz	hertz	Non-linear elastic, frictional and viscous behavior for granular applications including impact problems.
hysteretic	hysteretic	Similar to hertz model but for impact problems, directly specify normal restitution coefficient.
burger	Burger's	Provides a creep mechanism for granular applications.

ویژگی‌هایی قابل توجه، در اغلب پژوهش‌ها بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از طرفی خود نرم‌افزار نیز برای شبیه‌سازی آزمون تک محوری (UCS) سنگ، این دو مدل

از بین تمامی مدل‌های موجود در PFC، مدل‌های اتصال مسطح (Flat-Joint model: FJM) و مدل اتصال موازی خطی (Linear Parallel Bond model: LPBM) با

همانطور که اشاره شد، نمونه‌های ماسه‌سنگی اخذ شده از سازند آغاچاری در استان هرمزگان واقع در پهنه ساختاری زاگرس چین‌خورده انتخاب شده است. این واحد طی سه مرحله پلاتفرمی، بزرگ ناودیس و پس از کوهزایی تکامل یافته است. تمام فلات ایران و زاگرس در مرحله پس از کوهزایی و همزمان با ته‌نشینی کنگلومرای بختیاری طی میوپلیوسن دچار چین‌خوردگی گشته است. یکی از این چین‌ها، تاقدیس مدار با روند شمال غرب-جنوب شرق (روند عمومی زاگرس) است که در حد فاصل استان‌های بوشهر و هرمزگان و در حاشیه سواحل خلیج فارس واقع شده است (Ijani, 2024). این تاقدیس را می‌توان یک تاقدیس نسبتاً نامتقارن با شیب بیشتر یال جنوبی (۳۵ درجه) نسبت به یال شمال (۱۵ درجه) دانست. محدوده مورد مطالعه در یال جنوبی این تاقدیس واقع شده که تنها سازند آغاچاری (مارن استون، ژئپس و ماسه سنگ) برونزد دارد (شکل ۱).

تماسی را پیشنهاد می‌دهد. نقطه قابل بحث در خصوص این دو مدل تماسی، تفاوت در قابلیت شبیه‌سازی آن‌ها است، به‌طوری که مدل Flat-joint دارای توانایی شبیه‌سازی رفتار سطوح ناهموار و همزمان عدم پیوستگی در مواد می‌باشد؛ در حالی که مدل اتصال موازی خطی، مواد را به صورت پیوسته در نظر گرفته و بر روی تعامل ذرات متمرکز است. در این مقاله به مقایسه مدل‌های اتصال مسطح و اتصال موازی خطی در شبیه‌سازی آزمون تک محوری ماسه‌سنگ سازند آغاچاری پرداخته خواهد شد. ماسه‌سنگ مورد مطالعه به دلیل وجود در ساختگاه سازه‌های صنعتی منطقه ویژه اقتصادی پارسیان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و بنابراین مورد توجه و بررسی دقیق قرار گرفته است. هدف اصلی این تحقیق بررسی نقاط قوت و ضعف هر یک از مدل‌ها و همچنین تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها برای ارائه یک مدل هدفمند و کاربردی برای اهداف گوناگون است.



شکل ۱. نمایی از رخساره سازند آغاچاری در گستره مورد مطالعه (Ijani, 2024)

Fig. 1. View of the Aghajari Formation facies in the study area (Ijani, 2024)

از این دست مطالعات می‌توان به کاسترو-فیلگوئیرا و همکاران (Castro-Filgueira et al., 2020) اشاره کرد که در آن با استفاده از PFC3D، آزمون‌های سه محوری سنگ را بر روی نمونه‌های سنگ گرانیت پیاده‌سازی کرد. این

این پژوهش می‌تواند به پژوهشگران و مهندسين در انتخاب رویکردی قابل اعتماد در پروژه‌های زمین‌شناسی و مهندسی کمک کرده و زمینه‌ای برای تصمیم‌گیری مناسب و دقیق علمی مدل‌سازی عددی رفتار نمونه‌های سنگی فراهم سازد.

این روش به دلیل قابلیت شبیه‌سازی رفتار غیرخطی، شکست‌های موضعی و تغییر شکل‌های بزرگ در زمینه‌های مختلف مهندسی، شامل: مکانیک سنگ، مکانیک خاک و مواد پودری کاربرد گسترده‌ای دارد (Tsang et al., 2023).
نرم‌افزار PFC: این نرم‌افزار را می‌توان یک چارچوب مدل‌سازی مبتنی بر روش DEM عنوان کرد که به‌طور خاص برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی مواد دانه‌ای و به‌ویژه سنگ‌ها طراحی شده است. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان انواع مدل‌های تماسی مختلف موجود و مبتنی بر پایه DEM، رفتار مواد تحت بارگذاری‌های مختلف را شبیه‌سازی کرد. این نرم‌افزار شامل دو نسخه اصلی PFC2D و PFC3D می‌باشد. اولین نسخه این نرم‌افزار در سال ۱۹۹۴ عرضه شد و تا به امروز به‌طور گسترده‌ای در تحقیقات علمی و پروژه‌های صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق نسخه ۶،۰۰،۱۳ نرم‌افزار استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

محل اخذ نمونه‌های مورد مطالعه: نمونه‌های اخذ شده از محدوده مورد مطالعه در فاصله حدود ۶۰ کیلومتری جنوب شرق عسلویه و فاصله ۳۵ کیلومتری غرب پارسین، در استان حوالی بخش کوشکنار از توابع شهرستان پارسین، در استان هرمزگان اخذ شده است (جدول ۲). این محدوده در زون ساختاری زاگرس چین‌خورده واقع شده است. هدف از انتخاب محدوده، بررسی تأثیرات ساختاری و مکانیکی ماسه سنگ‌های سازند آغاچاری با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی در نرم‌افزار PFC است تا بتوان به درک بهتری از رفتار این مصالح در شرایط واقعی دست یافت.

محققین نشان دادند که این گد در تحلیل رفتار مکانیکی مواد دانه‌ای، از دقت بالایی برخوردار است. روش‌های عددی را می‌توان بر حسب نیاز به دسته‌های مختلفی تقسیم‌بندی کرد. سنگ به عنوان یک ماده ناهمسانگرد و ناهمگن، اغلب در چارچوب مکانیک پیوسته مدل‌سازی می‌شود؛ با این حال، یک رویکرد پیوسته قادر به محاسبه شکست و سینماتیک مربوط به سنگ شکسته نیست (Jenabidehkordi, 2019; Haeri and Sarfarazi, 2016; Ijani, 2024). اینک بتوان توده‌سنگ را به عنوان یک ماده گسسته (Discontinuous) و یا پیوسته (Continuous) در نظر گرفت بسیار حائز اهمیت است، چرا که توصیف توده‌سنگ به عنوان اطلاعات ورودی (Input) برای مدل‌های عددی (Numerical models) امری ضروری تلقی می‌شود (Jing, 2003). مدل‌سازی عددی به طور کلی به دو دسته اصلی پیوسته و ناپیوسته دسته‌بندی می‌شوند (Bobet et al., 2009; Gray et al., 2014; Jing, 2003; Nikolić et al., 2016; Shapka-Fels and Elmo, 2022). اما اگر در مسئله‌ای نیاز به استفاده از دو رویکرد شود، روش‌های ترکیبی پیوسته/گسسته اتخاذ می‌گردد (Jing, 2003; Nikolić et al., 2016; Shapka-Fels and Elmo, 2022).

روش المان مجزا (DEM): روش المان مجزا (Distinct Element Method یا DEM) یک تکنیک عددی است که در دسته روش‌های ناپیوسته قرار می‌گیرد. این روش به طور خاص برای شبیه‌سازی رفتار مواد دانه‌ای و ناپیوسته ایجاد گشته و بر پایه اصول فیزیکی و قوانین نیوتن بنا شده است. بنابراین به پژوهشگران این امکان را می‌دهد تا تعاملات پیچیده بین ذرات در محیط ناپیوسته را تحلیل و ارزیابی کنند. در DEM محیط با عنوان مجموعه‌ای از اجزاء (بلوک یا ذرات) صلب یا تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند.

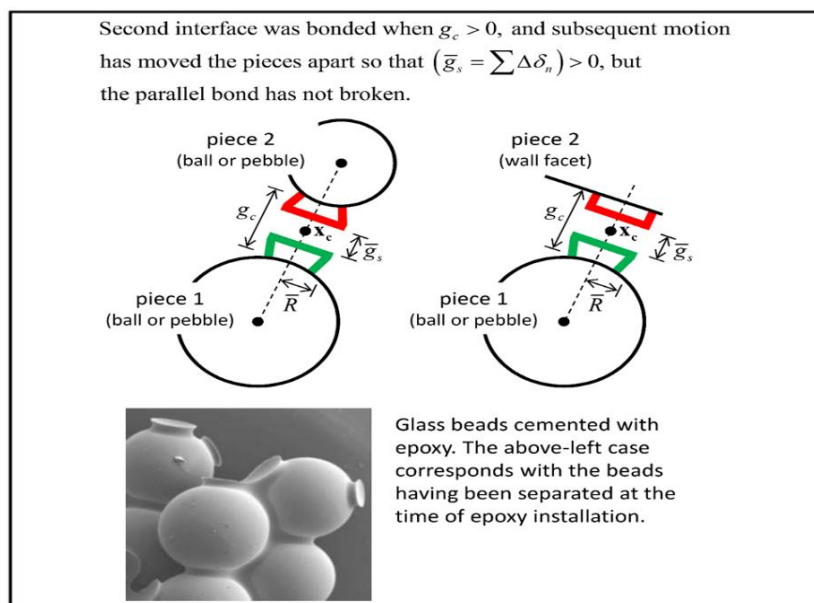
جدول ۲. مختصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Table 2. Geographic coordinates of the study area

Geographic (Desimal deg.)		Geograohic (deg. min. sec.)		UTM	
Long (x)	Lat (Y)	Long (x)	Lat (Y)	Easting (x)	Northing (Y)
52.888	27.180	52°53'16.8"E	27°10'48.8" N	687038.830	3007780

مدل پیوند موازی خطی (اتصال موازی خطی): مدل پیوند موازی با استفاده از میراگرهای (dashpot) غیرفعال و با فاصله مرجع صفر معادل مدلی است که توسط پوتیانندی و کاندال (Potyondy and Cundall, 2004) ارائه شد؛ میرایی‌های غیرفعال و فاصله مرجع تنظیم شده روی صفر مشخص شده که با مدلی که توسط آن‌ها ایجاد شد، مطابقت دارد (Potyondy and Cundall, 2004). از میراگرها به عنوان عناصر مکانیکی یاد می‌شود که برای مدل‌سازی میراکننده یا جذب‌کننده نیرو در سیستم‌های مکانیکی استفاده می‌شوند. این عناصر حرکات را کنترل کرده و از نوسانات ناخواسته جلوگیری می‌کنند. فاصله مرجع صفر نیز به فاصله‌ای اشاره دارد پیوند موازی به توصیف رفتار مکانیکی یک قطعه با ابعاد محدود از مواد سیمان مانند می‌پردازد که در تماس با دو قطعه دیگر قرار دارد (مانند سیمان اپوکسی در مهره‌های شیشه‌ای که در شکل ۲ نشان داده شده است). این جزء پیوند موازی به صورت موازی با جزء خطی عمل کرده و یک برهمکنش الاستیک میان قطعات ایجاد می‌کند. با این حال، وجود پیوند موازی به معنای جلوگیری از احتمال لغزش نیست. این نوع پیوندها قادرند نیرو و گشتاور را بین قطعات منتقل کنند و بدین ترتیب نقش مهمی در انتقال بار و حفظ یکپارچگی ساختاری ایفا می‌کنند (Ijani, 2024).

مدل‌های تماسی: مدل‌های تماسی متنوعی در نرم‌افزار PFC تعبیه شده است. فرمولاسیون هر مدل چگونگی تأثیر و شبیه‌سازی حرکت ذرات و تعاملات آن‌ها در تماس‌های جفت (دوتایی) را مشخص می‌کند. دو مدل بسیار کارا در حوزه مکانیک سنگ را می‌توان مدل‌های اتصال مسطح (FJM) و اتصال موازی خطی (LPBM) عنوان کرد. هر دو مدل، هر دو اتصال گوی-وجه و گوی-گوی را نصب می‌کند. این بدان معنا است هر کدام از مدل‌ها هر اتصالی از نوع گوی-گوی و گوی-وجه وجود داشته باشد را در بر می‌گیرد. مدل عددی که برای این نرم‌افزار ارائه می‌شود، سنگ را به عنوان یک مجموعه از ذرات کروی در سه بعد و دیسک مانند در دو بعد در نظر می‌گیرد. اندازه ذرات نیز متغیر بوده و در دست کاربر قرار دارد. در این پژوهش صرف نظر از مقیاس مدل، نرم‌افزار برای تولید ذرات تا حدودی محدود شده است و تولید بیش از تعدادی خاص (بالای ۲۰۰۰۰ گوی) برای آن نه غیر ممکن اما با اتلاف زمان بسیار زیاد و همچنین کندی غیر قابل انکار همراه است. همه این رفتارها در شرایطی است که سیستم پردازشگر دارای منابع قوی بوده و از منابع سیستم نیز استفاده نمی‌شده است. علت آن را می‌توان محدودیت‌های نرم‌افزاری بیان کرد (Ijani, 2024). ذرات در این نرم‌افزار در نقاط تماسی خود به یکدیگر متصل شده و رفتار مکانیکی که از خود بروز می‌دهند بر پایه روش عنصر متمایز (DEM) پایه‌گذاری شده است.

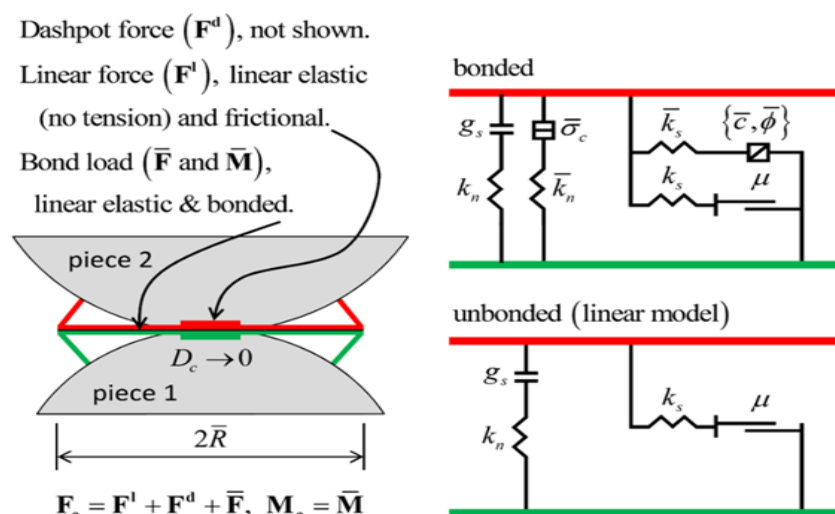


شکل ۲. سطح نظری با اندازه محدود (سبز و قرمز) و شکاف سطح پیوند موازی در تماس‌های پیوند موازی در حالت گوی-گوی (چپ) و وجه-گوی (راست). عکس از مهره‌های شیشه‌ای توسط (Holt et al., 2005)

Fig. 2. Theoretical finite-size surface (green and red) and spacing of parallel bonding surfaces in parallel bonding contacts in ball-ball (left) and facet-ball (right) modes. Glass balls photograph by (Holt et al., 2005)

روی دو قطعه‌ای که در تماس هستند تأثیر می‌گذارد و می‌تواند به حداکثر تنش‌های نرمال و برشی که در داخل ماده پیوند در حاشیه پیوند اعمال می‌شود، مرتبط باشد. در صورتی که هر یک از این حداکثر تنش‌ها از استحکام پیوند مربوطه فراتر رود، پیوند موازی دچار شکست می‌شود و ماده پیوند به همراه نیرو، گشتاور و سختی‌های مرتبط با آن از مدل حذف خواهد شد. شکل ۳، نشانگر رفتار و اجزای رئولوژیکی یک مدل پیوند موازی خطی با داشپات‌های غیر فعال است.

یک پیوند موازی را می‌توان به عنوان مجموعه‌ای از فنرهای الاستیک با سفتی نرمال و برشی ثابت در نظر گرفت که به طور یکنواخت بر روی یک سطح مستطیلی در دو بعد توزیع شده‌اند. این فنرها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در مقطع سه‌بعدی، دایره‌ای را در نقطه تماس ایجاد می‌کنند که در مرکز این نقطه قرار دارد. عملکرد این فنرها به صورت موازی با فنرهای خطی است و حرکت نسبی در محل تماس، که پس از ایجاد پیوند موازی به وقوع می‌پیوندد، منجر به تولید نیرو و گشتاور در ماده پیوند می‌شود. این نیرو و گشتاور بر

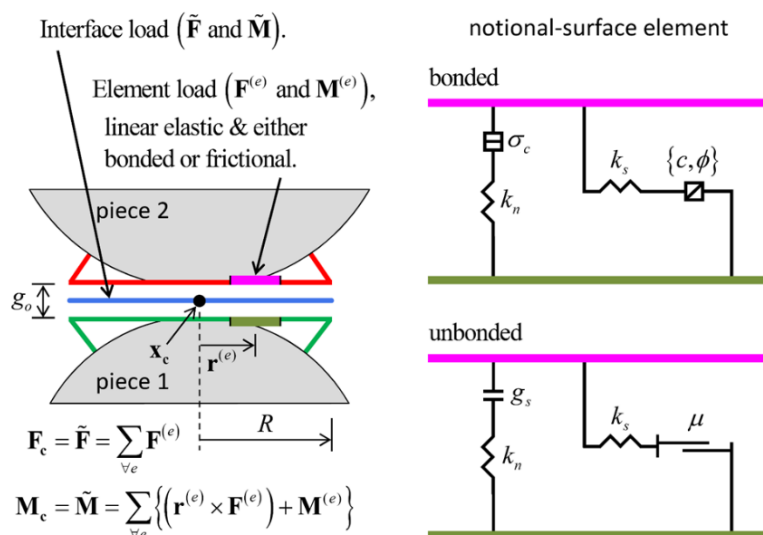


شکل ۳. رفتار و اجزای رئولوژیکی یک مدل پیوند موازی خطی با داشپت‌های غیر فعال (Potyondy, 2019)
 Fig. 3. Behavior and rheological components of the linear parallel bond model with inactive dashpots (Potyondy, 2019).

نظر گرفته می‌شود. از سوی دیگر فاصله نصبی به عنوان حداکثر فاصله مجاز بین دو ذره تعریف می‌شود که در آن تماس از نوع گوی-گوی به عنوان تماس FJM در نظر گرفته می‌شود. در این مدل تمامی تماس‌های از نوع گوی-گوی که در حین حرکت تشکیل می‌شوند از نوع تماس خطی هستند. هر عنصر در این مدل یا پیوندی یا غیرپیوندی است. هر عنصر پیوند خورده در ابتدا رفتار الاستیک خطی را دارد و این رفتار تا زمانی که پیوند شکسته نشده باشد حفظ می‌شود. عناصر پیوند خورده در این مدل رفتار الاستیک خطی و اصطکاکی است. لازم به ذکر است که هر جسم شامل نیرو و گشتاور می‌باشد که از قانون نیرو-جابجایی تبعیت می‌کند. شکل ۴ رفتار و رئولوژی مدل مشترک مسطح را نشان می‌دهد.

مدل اتصال سطح مشترک مسطح (Flat-Joint)

Model): مدل اتصال سطح مشترک مسطح، رفتار ماکروسکوپی یک الاستیک خطی محدود را به همراه رابط پیوندی یا اصطکاکی که ممکن است آسیب‌های جزئی را تحمل کند، توصیف می‌کند (شکل ۴). یک ماده با اتصال مسطح به عنوان مجموعه‌ای از دانه‌ها تعریف می‌شود که در آن مدل تماس با اتصال تخت در تمامی نقاط تماس دانه‌ها-دانه‌ها با شکاف‌هایی که کمتر یا برابر با فاصله نصبی (Installation gap) در مرحله نهایی‌سازی مواد است، وجود دارد (Potyondy, 2016). برای درک بهتر باید گفت که یک ماده با این مدل تماسی، به عنوان یک مجموعه گرانولی در



شکل ۴. رفتار و رئولوژی مدل سطح مشترک مسطح FJM (Potyondy, 2019).
Fig. 4. Behavior and rheological components of the flat-joint model (Potyondy, 2019).

داده‌های ورودی است. لذا برای "یکسان‌سازی نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی" با تغییر پارامترهای ورودی مدل عددی، فرآیند کالیبراسیون انجام می‌گیرد. فرآیند کالیبراسیون شامل تغییر سیستماتیک ریزپارامترها در یک دامنه معقول و سپس مقایسه پاسخ‌های مدل با داده‌های آزمون‌های آزمایشگاهی است. این مقایسه به محققان کمک می‌کند تا دقت و صحت مدل را ارزیابی کرده و در صورت لزوم، تنظیمات لازم را برای بهبود انطباق مدل با واقعیت انجام دهند (Ijani, 2024).

نمونه‌های ماسه‌سنگی مورد نیاز برای آزمایش مقاومت تک‌محوری به صورت مغزه‌های استوانه‌ای با نسبت طول به قطر ۲ تهیه شدند. قطر هر نمونه حداقل ۵۰ میلی‌متر و طول آن ۱۰۰ میلی‌متر انتخاب شدند. در این آزمایش‌ها، نرخ کرنش برابر با ۰/۰۲۵ در نظر گرفته شده است. جدول ۳ ابعاد نمونه و نتایج آزمون تک‌محوری را نشان می‌دهد.

آزمون فشاری تک محوری (UCS): این آزمایش به جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری محصور نشده نمونه سنگ استفاده می‌شود. این آزمون را می‌توان متداول‌ترین راه برای دستیابی به مقدار مقاومت فشاری محصور نشده سنگ دانست. علت انتخاب این آزمون برای فرآیند شبیه‌سازی در این تحقیق آن است که یکی از دو آزمونی است که در فرآیند کالیبراسیون مدل استفاده می‌شود. نرم‌افزار PFC در هر دو نسخه دوبعدی و سه‌بعدی برای انجام هرگونه مدل‌سازی نیازمند فرآیند کالیبراسیون است. جهت انجام فرآیند کالیبراسیون علاوه بر آزمون UCS، آزمون کشش غیر مستقیم برزیلی (BTS) نیز باید انجام شود (Sarfarazi et al., 2017). به همین جهت شبیه‌سازی یا مدل‌سازی آزمون UCS جهت مقایسه دو مدل Flat-Joint و اتصال موازی خطی انتخاب شد. دلیل انجام فرآیند کالیبراسیون، متفاوت بودن نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی با وجود یکسان بودن

جدول ۳. ابعاد نمونه و نتایج آزمایشگاهی آزمون تک محوری نمونه ماسه سنگ

Table 3. Dimensions and laboratory results of uniaxial testing of sandstone samples

چگالی (kg/m ³)	تخلخل (%)	مدول یانگ (GPa)	مقدار تنش σ_c (MPa)	ارتفاع نمونه (mm)	قطر نمونه (mm)	نوع آزمایش
2200	2.38	8.45	39.59	100	50	آزمایش تک محوری

شبیه سازی با داده های تجربی یا استانداردهای مرجع به منظور اطمینان از دقت و صحت مدل های استفاده شده در نرم افزار می باشد. هدف از کالیبراسیون به منظور اطمینان از اینکه مدل های شبیه سازی شده با رفتار واقعی مصالح مطابقت دارند، انجام می شود. این امر به تحلیل دقیق تر و قابل اعتمادتر نتایج کمک می کند. ابتدا هندسه مدل عددی با توجه به جدول ۳ ساخته شد و سپس ریزپارامترها در هر دو مدل FJM و LPBM وارد گردید تا نتایج عددی آزمون مقاومت فشاری تک محوری با نتایج شبیه سازی عددی آن در گام اول مقایسه شود. در نهایت با بارگذاری مشخص بر روی نمونه نمودار تنش- کرنش آن استخراج شد تا مقادیر مد نظر از قبیل مدول الاستیسیته و همچنین مقاومت شکست با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شود. با توجه به یکسان نبودن نتایج عددی و آزمایشگاهی در آزمون مقاومت فشاری تک محوری ماسه سنگ ها، لزوم انجام تغییرات در مقادیر جهت برابر سازی نتایج یا به اصطلاح کالیبراسیون مشخص می گردد.

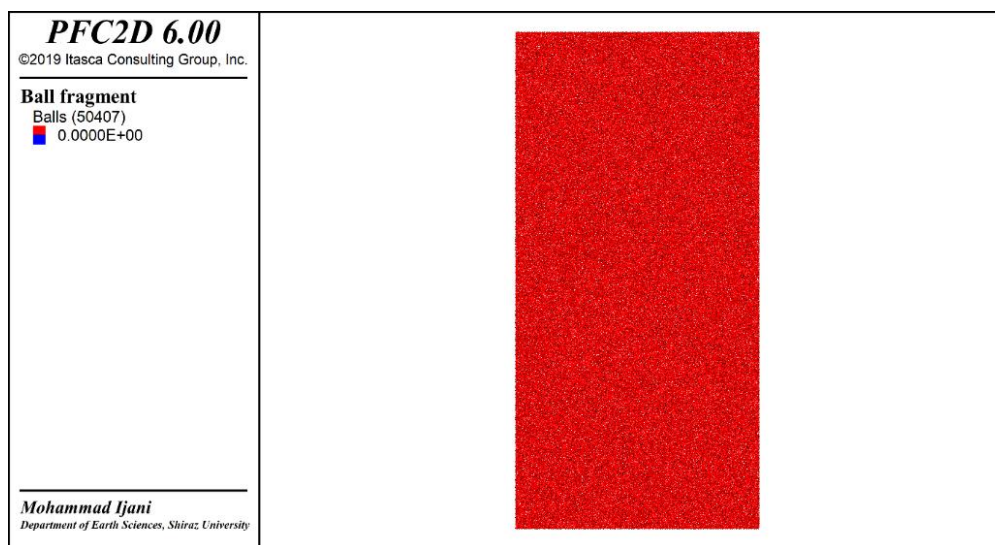
نتایج و بحث

مدل PFC توانایی شبیه سازی حرکت و برهم کنش ذرات با اندازه محدود را دارد (Potyondy, 2015). بنابراین نمونه ایجاد شده از لحاظ تعداد ذرات محدودیت دارد. از طرفی اگر تعداد ذرات کم باشد، نتایج صحت و دقت کافی ندارد و فرآیند حل مسئله به شدت تحت تأثیر قرار می گیرد، به نحوی که امکان حل شدن مدل فراهم نمی شود. تعداد گوی های ایجاد شده در این تحقیق برابر ۵۰۴۰۷ عدد بود

مدل سازی عددی با استفاده از PFC یک ابزار قدرتمند برای شبیه سازی رفتار مواد دانه ای و توده های سنگی شناخته می شود (Yoon, 2007; Zhang et al., 2024). PFC به عنوان یک مدل برای توصیف ماده، آن را به صورت مجموعه ای از ذرات مجزا در نظر می گیرد که این ذرات بر اساس پارامترهای میکرومکانیکی مشخصی با یکدیگر تعامل می کنند. این ریز پارامترها، ویژگی های تماس میان ذرات را تعیین کرده و در نتیجه، پاسخ ماکروسکوپی کلی سیستم مورد نظر را تحت تأثیر قرار می دهند (Wang and Cao, 2017; Yoon, 2007; Zhang et al., 2024; Ijani, 2024; fu et al., 2023). به عبارت دیگر، این مدل به ما این امکان را می دهد که رفتار کلی ماده را از طریق بررسی تعاملات میکرومکانیکی ذرات آن تحلیل کنیم و درک بهتری از ویژگی های فیزیکی و مکانیکی ماده به دست آوریم. اندازه گیری مستقیم یا تخمین دقیق ریزپارامترهای مناسب برای یک ماده خاص دشوار و چالش برانگیز است (Zhang et al., 2024). به همین دلیل، ایجاد یک فرآیند کالیبراسیون به منظور شناسایی مجموعه ای بهینه از ریزپارامترها که به مدل PFC این امکان را می دهد تا به بهترین نحو با رفتار واقعی ماده مطابقت یابد، از اهمیت ویژه ای برخوردار است (Li et al., 2017; Wang and Cao, 2017; Yoon, 2007; Fu et al., 2022b). فرآیند شبیه سازی آزمون تک محوری شامل دو مرحله می باشد که در ابتدا، هندسه مدل ساخته شده و پارامترهای مورد نیاز اختصاص داده می شود و در گام دوم، نمونه تحت بارگذاری قرار می گیرد (Ijani, 2024). این فرایند شامل مقایسه نتایج

مقادیر ثابت مدل در نظر گرفته شدند. به منظور شبیه‌سازی در هر دو مدل رفتاری، مقادیر حدوداً ۶ مرتبه عوض شدند تا مقادیر نتایج آزمایشگاهی با نمونه‌های عددی برابر گردد. با این حال، مدل LPBM با وجود ۷ مرحله انجام فرآیند کالیبراسیون تا رسیدن به نتایج آزمایشگاهی، نسبت به مدل FJM با ۵ مرحله، سریع‌تر کالیبره شد.

که در شکل ۵ نشان داده شده است. در این حالت هیچ مدل تماسی به گوی‌ها و دیوارها اختصاص نیافته است. نتایج آزمون تک‌محوری بر روی ماسه‌سنگ سازند آجاجاری در مدل‌های LPBM و FJM نشان می‌دهد که مقادیر پارامترهایی که جهت شبیه‌سازی آزمون به کار رفته است (جدول ۳)، با مقادیر آزمایشگاهی بسیار نزدیکی است. بنابراین این مقادیر به عنوان متغیر و باقی موارد به عنوان

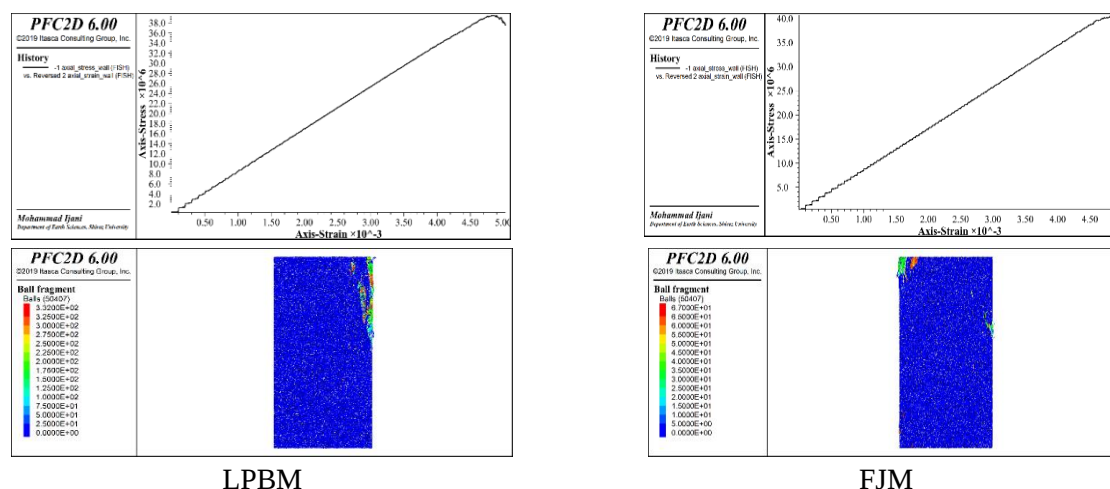


شکل ۵. نمونه عددی بدون مدل رفتاری

Fig. 5. Numerical example without behavioral model

این در حالی است که مقدار مدول الاستیسیته برای مدل LPBM برابر با $5.0e^9$ در نظر گرفته شد تا نتایج تقریباً یکسانی در هر دو مدل به دست آید (جدول ۴). بنابراین، مقدار ورودی به مدل FJM، به مقدار آزمایشگاهی، $1/24$ بار نزدیک‌تر از مقدار ورودی به مدل LPBM است. این در حالی است که زمان صرف شده برای شبیه‌سازی شکست مدل FJM بیشتر از مدل LPBM بود. از سوی دیگر نیز مقدار چسبندگی وارد شده در مدل LPBM ($35.0e^6$) نزدیک به دو برابر بیشتر از مدل FJM ($18.0e^6$) وارد شد. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است میزان اعوجاج مشاهده شده در شروع منحنی تنش-کرنش مدل FJM نیز بیشتر از اعوجاج ایجاد شده در مدل LPBM است.

مقایسه مقاومت فشاری تک محوری و تحلیل رفتار الاستیک: نمودارهای تنش-کرنش و همچنین شکست هر دو مدل LPBM و FJM در شکل ۷ نشان داده شده است. نرخ بارگذاری برای شبیه‌سازی آزمون مقاومت فشاری تک محوره هر دو مدل با یکدیگر یکسان و برابر با 0.1 mm/s بود. در مقایسه نمودارهای تنش-کرنش مربوط به هر دو مدل، مقادیر متغیرها در دو مورد با یکدیگر متفاوت بود. جهت مدل‌سازی این دو مدل رفتاری مقادیر مدول الاستیسیته و مقدار چسبندگی که به عنوان داده ورودی به مدل مطرح می‌شود با یکدیگر متفاوت بودند به نحوی که مقدار مدول یانگ در مدل FJM برابر $6.2e^9$ انتخاب شد،



شکل ۶. نمودارهای تنش-کرنش دو مدل رفتاری FJM و LPBM

Fig. 6. Stress-strain diagrams of the two behavioral models FJM and LPBM

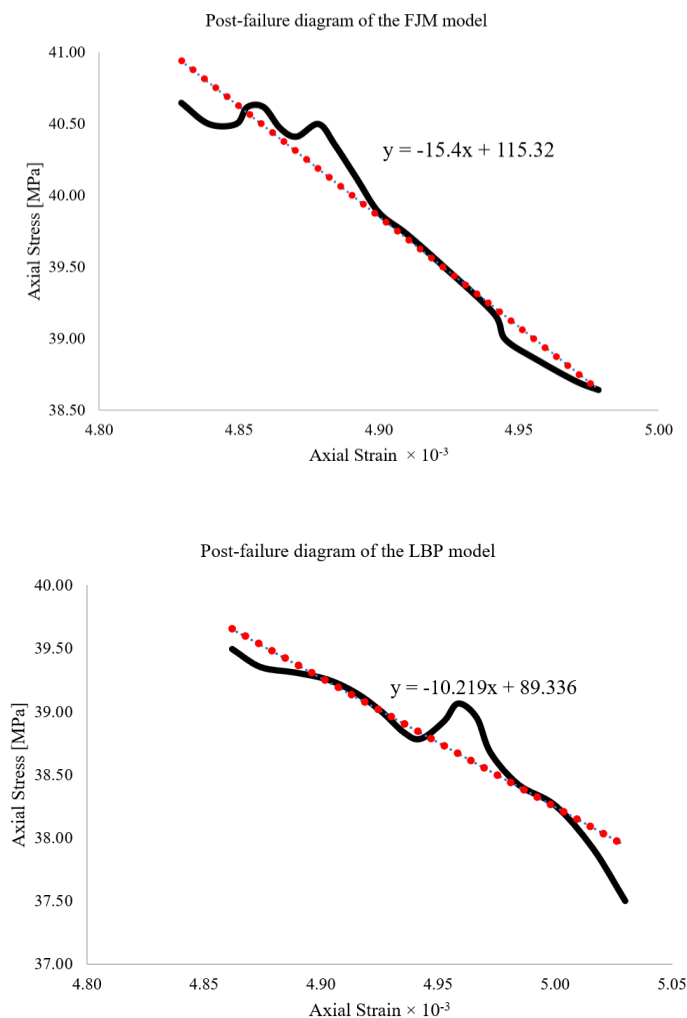
جدول ۴. مقادیر داده‌های ورودی و خروجی در هر دو مدل برای رسیدن به مدول الاستیسیته آزمایشگاهی

Table 4. Input and output data values in both models to achieve the laboratory elastic modulus

مدل تماسی	مقدار داده ورودی	داده خروجی
FJM	$6.2e^9$	$8.56e^9$
LPBM	$5.0e^9$	$8.32e^9$

مدل LPBM در نگهداری و حفظ پیوستگی بین جسم گوی‌ها حتی پس از شروع ترک و گسیختگی عنوان کرد. مدل FJM، بر اساس ویژگی‌های ریزساختاری دانه‌های زاویه‌دار و در هم قفل شده، مشابه آنچه در سنگ مرمر رخ می‌دهد را شبیه‌سازی می‌کند که قادر است آسیب جزئی را تحمل و در واقع ثبت کند (Potyondy, 2016). این موضوع سبب می‌شود که مدل FJM به علت شبیه‌سازی دقیق‌تر ترک و ناپیوستگی‌ها، پس از شکست، افت سریع‌تری را تجربه کند.

رفتار پس از شکست: کد جریان دو بعدی استفاده شده برای این پژوهش به نحوی تنظیم شده است که آزمایش UCS پس از ۵٪ گذر از نقطه اوج متوقف شود. شیب نمودار پس از شکست در هر دو مدل، مطابق شکل ۷ محاسبه شده است. پس از شکست، مشاهده شد که هر دو مدل، کاهش نیرو (تنش) را تجربه می‌کند. اما نکته قابل توجه آن است که شیب نمودار پس از شکست در مدل FJM حدود ۵ واحد بیشتر از نمودار مدل LPBM افت می‌کند (شکل ۷). این رفتار نشان می‌دهد که مدل FJM رفتار شکننده‌تری نسبت به مدل LPBM داراست. علت آن را می‌توان توانایی بیشتر



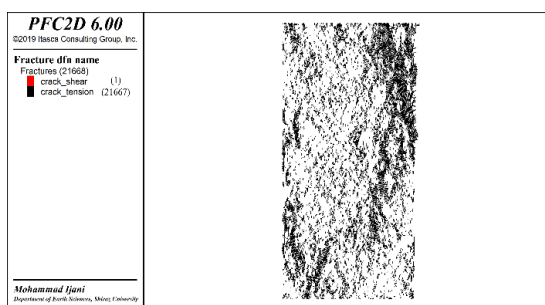
شکل ۷. نمودار پس از شکست دو مدل FJM و LPBM
Fig. 7. Post-failure diagram of the two FJM and LPBM models.

گرچه هر دو مدل مقاومت فشاری نسبتاً مشابهی دارند، اما مکانیسم‌های شکستگی که دنبال می‌کنند، متفاوت است. **الگوی شکست:** هر دو مدل تماسی FJM و LPBM دارای هر دو نوع ترک کششی و برشی هستند. تفاوتی که در بین دو مدل مشاهده می‌شود تعداد ترک‌های کششی و برشی است. در مدل FJM بیشترین تعداد ترک‌ها از نوع ترک‌های برشی است. این در حالی است که تنها یک ترک برشی در مدل LPBM ایجاد شده است. بنابراین می‌توان دریافت که

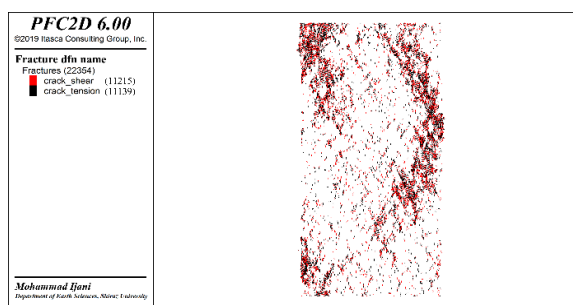
شکل پذیری: تفاوت مشاهده شد در رفتار پس از شکست هر دو مدل (شکل ۷)، نشان دهنده ویژگی‌های متفاوت مکانیکی این دو مدل با یکدیگر است که رفتارهای پس از شکست متفاوتی را ارائه می‌دهند. مدل LPBM شکل‌پذیری بیشتری را نسبت به مدل FJM از خود نشان داد چرا که افت تنش در مدل LPBM به صورت تدریجی‌تر رخ می‌دهد این در حالی است افت تنش در مدل FJM نسبت به مدل LPBM ناگهانی‌تر بود (شکل ۷). این بدین معنی است که

LPBM ترک‌های کششی به صورت نسبتاً یکنواخت در نمونه توزیع شده‌اند، اما در برخی نواحی با تمرکز بیشتر ترک‌ها به احتمال زیاد محل تجمع تنش کششی بالا هستند. برخلاف مدل FJM در مدل LPBM ترک‌ها کمتر در یک الگوی زنجیره‌ای قرار دارند و بیشتر حالت پراکنده را از خود نشان می‌دهند. الگوی شکست در مدل LPBM نشان دهنده ماهیت شکننده (Brittle) این مدل است. شکست کششی به طور معمول با گسیختگی سریع پیوندها همراه است و به همین دلیل ترک‌ها به صورت گسترده در نمونه مشاهده می‌شوند. به طور کلی می‌توان بیان داشت که مدل LBPM برای مطالعه رفتار مواد شکننده و بررسی شکست ناشی از کشش مناسب بوده و با توجه به اینکه این مدل فاقد پیچیدگی‌های مرتبط با شکست برشی است، بنابراین می‌تواند برای شرایطی که تنش کششی غالب بوده کاربرد داشته باشد. مدل FJM برای شبیه‌سازی رفتار سنگ‌های واقعی مناسب بوده چرا که هر دو نوع ترک برشی و کششی را به خوبی بازتاب داده است. این مدل بیشتر برای مطالعه شکست‌های پیچیده در شرایط طبیعی مناسب می‌باشد. جدول ۵ خلاصه مقایسه هر دو مدل رفتاری را در این بخش نشان می‌دهد.

گسیختگی در مدل FJM ناشی از ترک برشی و در مدل LPBM ناشی از ترک‌های کششی است. این الگوی شکست نیز ترد و شکننده بودن مدل FJM را ثابت می‌کند (شکل ۸). در مدل FJM زاویه بین نوارهای برشی نسبت به افق کمتر از این زاویه در مدل LPBM می‌باشد (شکل ۸). حضور ۱۱۲۱۵ ترک برشی و ۱۱۱۳۹ ترک کششی در مدل FJM نشان دهنده تأثیر تقریباً یکسان و به یک اندازه تنش‌های برشی و کششی است. در خصوص توزیع ترک‌های برشی در مدل FJM باید گفت که این ترک‌ها عموماً در مناطقی با تمرکز بالای تنش برشی، همانند صفحات ضعف یا نواحی نزدیک به سطح بارگذاری ظاهر شده‌اند که در این شبیه‌سازی به دلیل عدم ایجاد سطوح ضعف می‌تواند تنها عامل دوم را مؤثر دانست. این در حالی است ترک‌های کششی در مناطقی ایجاد شده‌اند که تنش کششی غالب است. الگوی شکستی که در مدل FJM مشاهده می‌شود نشان‌دهنده یک شکست مرکب از هر دو نوع ترک کششی و برشی است که می‌توان آن را شکست ترکیبی نامید. این بدین معناست که هر دو نوع ترک کششی و برشی در یک فرآیند متقابل به گسترش شکست منجر شده‌اند. شکل شکست به صورت زنجیره‌ای بوده که نشان می‌دهد گسیختگی از نواحی با تمرکز بالای تنش ایجاد شده و به صورت زنجیره‌ای به سایر نمونه گسترش یافته است. در مدل



LPBM



FJM

شکل ۸. رشد و گسترش ترک‌های کششی و برشی در هر دو مدل LPB و FJM

Fig. 8. Growth and propagation of tensile and shear cracks in both FJM and LPBM models

جدول ۵. خلاصه مقایسه دو مدل FJM و LPBM در الگوی شکست

Table 5. Summary of comparison of the two models FJM and LPBM in failure pattern

ویژگی	FJM	LPBM
نوع ترک غالب	ترک‌های کششی و برشی (تقریباً مساوی)	ترک کششی (غالب)
توزیع ترک‌ها	تمرکز ترک‌های زنجیره‌ای در نواحی خاص	پراکندگی ترک‌ها یکنواخت
الگوی شکست	شکست ترکیبی، مناسب برای سنگ‌های واقعی	شکست شکننده، مناسب برای مواد با رفتار شکننده
کاربرد	شبیه‌سازی شکست‌های پیچیده در شرایط طبیعی	مطالعه رفتار کششی مصالح شکننده

نتیجه‌گیری

در میان مدل‌های تماسی موجود در PFC، دو مدل FJM و LPBM از محبوبیت به‌سزایی برخوردارند که علت آن را می‌توان ویژگی‌های منحصر به فرد هر کدام عنوان کرد. مدل FJM دارای قابلیت مدل‌سازی رفتاری است که سطوح ناهموار از خود بروز می‌دهند. مدل تماسی FJM به دلیل آنکه می‌تواند عدم پیوستگی در مواد را مدل‌سازی کند، می‌تواند در مواردی که شکست و ترک‌خوردگی دارای نقش مهمی است، مانند ماسه‌سنگ یا سنگ دگرگونی مناسب باشد همچنین کمانش در مرزهای این مدل اتفاق نمی‌افتد. این در حالی است که در مدل LPBM کمانش در مرزهای نمونه ایجاد می‌شود. با توجه به بیشتر بودن میزان اعوجاج در نمودار تنش-کرنش مدل FJM نسبت به مدل LPBM می‌توان این انتظار را داشت که در نرخ‌های بارگذاری زیاد این پدیده شدت گرفته و نتایج مدل FJM را تحت تأثیر قرار دهد. مدل FJM توانایی شبیه‌سازی رخداد ترک‌های کششی و ترک‌های برشی را دارد. لازم به ذکر است که ترک‌های برشی در نزدیکی نقطه تنش فشاری بیشینه ایجاد می‌شود، این در حالی است که با استفاده از مدل LPBM تا لحظه تنش حداکثری هیچ‌گونه ترک برشی در مدل ایجاد نمی‌شود. از منظر دیگر می‌توان اینگونه استدلال کرد که به دلیل ظاهر شدن ترک‌های برشی در مدل FJM و فعال شدن زاویه اصطکاک در محل این ترک‌های برشی، این مدل پتانسیل بالایی در تعیین زاویه اصطکاک داخلی باقی‌مانده مدل دارد.

به عکس، مدل LPBM که فاقد ترک برشی تا لحظه شکست است نمی‌تواند زاویه اصطکاک باقی‌مانده مدل را شناسایی کند، زیرا زاویه اصطکاک در مدل عددی تابع ترک‌های برشی ایجاد شده می‌باشد. از طرفی دیگر مدل تماسی LPBM دارای توانایی شبیه‌سازی رفتار پیوسته و الاستیک بین ذرات است. بنابراین، برای موادی با پیوستگی بالا، ساختار یکنواخت‌تر و همچنین رفتار پلاستیک مانند خاک‌ها و سنگ‌های نرم می‌تواند مفید باشد. در نتیجه می‌توان عنوان کرد انتخاب نوع مدل تماسی در PFC2D بستگی به نوع رفتار ماده مورد نظر دارد. بدین منظور، اگر هدف بررسی رفتار سنگ‌هایی با ساختار پیچیده و همچنین ترک‌های موضعی باشد مدل FJM از توانایی بهتری برخوردار است. این مدل بر خلاف مدل اتصال موازی خطی قابلیت کالیبره کردن دانه‌های سنگ با اتصال ناقص به یکدیگر را دارد. از طرفی، اگر محیط مدنظر جهت شبیه‌سازی دارای رفتار الاستیک و پیوسته است، مدل LPBM گزینه مناسبی خواهد بود. این مقایسه می‌تواند به درک بهتر از ویژگی‌های مدل‌های تماسی PFC و انتخاب آن‌ها برای یک پژوهش کمک شایانی باشد. از سوی دیگر، نوع فرآیند زمین‌شناسی مدنظر می‌تواند بر انتخاب نوع مدل تماسی تأثیرگذار؛ به عبارت دیگر یک مادهٔ یکسان برای مثال ماسه‌سنگ تحت شرایط متفاوت زمین‌شناسی می‌تواند به صورت پیوسته یا ناپیوسته مورد ارزیابی قرار گیرد. این مقاله می‌تواند به محققان و مهندسين در درک بهتر رفتار مکانیکی ماسه‌سنگ

شود. این اطلاعات می‌تواند در طراحی سازه‌های مقاوم‌تر و با عمر طولانی‌تر تأثیرگذار باشد. این یافته‌ها به افزایش دانش عملی و نظری در زمینه شبیه‌سازی‌های عددی کمک خواهد کرد.

References

- Alneasan, M., Behnia, M., & Bagherpour, R. (2019). Analytical and numerical investigations of dynamic crack propagation in brittle rocks under mixed mode loading. *Construction and Building Materials*, 222, 544-555.
- Bobet, A., Fakhimi, A., Johnson, S., Morris, J., Tonon, F., & Yeung, M. R. (2009). Numerical models in discontinuous media: review of advances for rock mechanics applications. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135(11), 1547-1561.
- Castro-Filgueira, U., Alejano, L. R., & Ivars, D. M. (2020). Particle flow code simulation of intact and fissured granitic rock samples. *J Rock Mech Geotech Eng* 12: 960-974.
- Fu, J., Haeri, H., Sarfarazi, V., Naderi, A. A., Marji, M. F., & Xu, L. (2023). Influence of arch shaped notch angle, length and opening on the failure mechanism of rock like material and acoustic emission properties: experimental test and numerical simulation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 125, 103879.
- Fu, J. W., Sarfarazi, V., Naderi, A. A., Haeri, H., Marji, M. F., & Li, T. (2022a). Physical test for analysis of failure behavior of embedded notches. *Strength of Materials*, 54(6), 1145-1154.
- Fu, J. W., Haeri, H., Sarfarazi, V., & Marji, M. F. (2022b). Modeling the ligament breakage mechanism in concrete specimens using a four-point bending test. *Strength of Materials*, 54(4), 671-680.
- Fu, J., Haeri, H., Yavari, M. D., Sarfarazi, V., Marji, M. F., & Guo, M. (2021). A linear elastic fracture mechanics analysis of the pre-cracked concrete failure mechanism under modes I, II, III, and IV loading conditions. *Strength of Materials*, 1-13.
- Gao, Y., & Sun, H. (2021). Influence of initial defects on crack propagation of concrete under uniaxial compression. *Construction and Building Materials*, 277, 122361.
- Gray, G. G., Morgan, J. K., & Sanz, P. F. (2014). Overview of continuum and particle dynamics methods for mechanical modeling of contractional geologic structures. *Journal of Structural Geology*, 59, 19-36.
- Haeri, H., & Sarfarazi, V. (2016). The deformable multilaminar for predicting the elasto-plastic behavior of rocks. *Computers and Concrete, an International Journal*, 18(2), 201-214.
- Holt, R. M., Kjølås, J., Larsen, I., Li, L., Pillitteri, A. G., & Sønstebo, E. F. (2005). Comparison between controlled laboratory experiments and discrete particle simulations of the mechanical behaviour of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(7-8), 985-995.
- Ijani, M. (2024). Analysis of fractures in the rock foundations of industrial structures in the Parsian Special Economic Zone and providing improvement methods. M.Sc. Thesis, Faculty of Sciences, Shiraz University, IR, 103p. (In Persian)
- Jenabidehkordi, A. (2019). Computational methods for fracture in rock: A review and recent advances. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13, 273-287.
- Jing, L. (2003). A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(3), 283-353.
- Li, P., Jiang, S., Tang, D., & Xu, B. (2017). A PFC3D-based numerical simulation of cutting load for lunar rock simulant and experimental validation. *Advances in Space Research*, 59(10), 2583-2599.

سازند آغاجاری تحت شرایط یکسان بارگذاری برای پیش‌بینی دقیق‌تر شکست و همچنین آسیب‌های احتمالی در سازه‌های مرتبط کمک کننده باشد. از سمتی نتایج حاصل از مقایسه این دو مدل این را توانایی دارد که به توسعه روش‌های طراحی و بهینه سازه‌هایی در محیطی مشابه منجر

- Nikolić, M., Roje-Bonacci, T., & Ibrahimbegović, A. (2016). Overview of the numerical methods for the modelling of rock mechanics problems. *Tehnički vjesnik*, 23(2), 627-637.
- Potyondy, D. (2019) Material-Modeling Support for PFC [fistPkg6.6], Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota, Technical Memorandum ICG7766-L (December 11, 2019). This memo includes three extensions named "Material-Modeling Support for PFC (Example Materials 1, 2 and 3)."
- Potyondy, D. (2016). Flat-Joint Contact Model [version 1], Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, MN, Technical Memorandum 5-8106:16TM47 (October 12, 2016).
- Potyondy, D. O. (2015). The Bonded-Particle Model as a Tool for Rock Mechanics Research and Application: Current Trends and Future Directions, *Geosystem Engineering*, 18(1), 1–28
- Potyondy, D. O., & Cundall, P. A. (2004). A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(8), 1329-1364.
- Sarfarazi, V., Haeri, H., & Shemirani, A. B. (2017). Direct and indirect methods for determination of mode I fracture toughness using PFC2D. *Computers and Concrete, An International Journal*, 20(1), 39-47.
- Shapka-Fels, T., & Elmo, D. (2022). Numerical modelling challenges in rock engineering with special consideration of open pit to underground mine interaction. *Geosciences*, 12(5), 199.
- Tsang, M., Clark, I., & Karlovšek, J. (2023). Automating the Calibration of Flat-Jointed Bonded Particle Model Microproperties for the Rewan Sandstone Case Study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56(9), 6459-6480.
- Wang, M., & Cao, P. (2017). Calibrating the micromechanical parameters of the PFC2D (3D) models using the improved simulated annealing algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017(1), 6401835.
- Yoon, J. (2007). Application of experimental design and optimization to PFC model calibration in uniaxial compression simulation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(6), 871-889.
- Zhang, Z., Gao, W., & Kou, Y. (2024). Calibration Method of PFC3D Micro-Parameters under Impact Load. *Applied Sciences*, 14(7), 3020. <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/7/3020>