

# بررسی پایداری شیروانی سنگی تحت اثر ناهمسانگردی ساختاری و فشار آب حفره‌ای به روش المان مجزا (مطالعه موردی)

مقاله پژوهشی - کاربردی

بهرام نادی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران  
امید توسلی\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
عادل عساکره، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان، ایران  
علی تدین، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: o.tavasoli@iauet.ac.ir

دریافت: ۹۸/۰۲/۲۲ - پذیرش: ۹۸/۰۷/۲۵

صفحه ۳۱-۱۱

## چکیده

امروزه با افزایش جمعیت و کمبود شدید فضا برای احداث ساختمان‌ها و معابر از جمله راه‌ها در مجاورت یکدیگر، ترحیح عمومی به سمت ساخت ساختمان‌هایی است که احداث آن‌ها با گودبرداری‌های عمیق و نیمه عمیق همراه است. ولی تغییر مصالح یک شیروانی از خاک به سنگ، شرایط پایداری و تحلیل آن‌ها به صورت بارزی تحت اثر قرار می‌دهد. در یک شیروانی سنگی، سطوح ضعیفی وجود دارند که جهت‌داری و چکالی آن‌ها الگوهای متنوعی از ریزش را تشکیل می‌دهند. در این تحقیق، به بررسی و تحلیل پایداری استاتیکی و دینامیکی دیواره‌ی سنگی ناشی از گودبرداری به عمق ۱۵ متر در لایه سنگی شیل واقع در شهرک شهید کشوری - اصفهان با در نظر گرفتن اثرات ناهمسانگردی ساختاری ناشی از حضور بلوک‌ها و درزه‌های سنگی و فشار آب حفره‌ای و همچنین بررسی جوانب این ناپایداری‌ها پرداخته شده است. چالش اساسی موجود در این نوع شیروانی‌ها، حضور مصالح سنگی و روی دادن ریزش‌های بلوکی همزمان با تراوش آب از میان درزه‌ها است. برداشت اطلاعات از طریق روش خط برداشت و تحلیل‌های آماری در نرم‌افزار DIPS انجام گردیده و در نهایت تحلیل استاتیکی، دینامیکی و هیدرواستاتیکی با استفاده از نرم‌افزار UDEC صورت پذیرفته است. نتایج نشان می‌دهند که دیواره مورد مطالعه در حالت استاتیکی و دینامیکی پایدار، ولی با اعمال جریان هیدرولیکی دچار ناپایداری شده است.

واژه‌های کلیدی: شیروانی سنگی، پایداری شیروانی، فشار آب حفره‌ای، ناهمسانگردی ساختاری، روش المان مجزا

## ۱- مقدمه

سعی در تحلیل شیروانی مورد مطالعه دارند. از جمله روش‌هایی که در صورت تعریف دقیق پارامترهای رفتاری توده و مدل‌سازی مناسب، می‌تواند تحلیلی درست از شیروانی در اختیار قرار دهد، مدل‌سازی عددی می‌باشد (Hudson and Harrison, 2000). وجود سنگ و ساختارهای ناپیوسته درزه‌های سنگی در یک شیروانی با تغییر الگوی محیط از حالت همسانگرد به ناهمسانگرد، بر الگوی ریزش تاثیرگذار است. در چنین شرایطی درزه‌های سنگی با تشکیل سطوح ضعیف، ناپایداری‌های

امروزه مهندسين با محدوده وسیعی از روش‌ها به منظور تحلیل پایداری شیب‌های سنگی و سنگی-خاکی مواجه هستند. روش‌های مختلفی جهت مطالعه پایداری شیب در شیروانی‌ها ارائه شده است، که از جمله آن‌ها می‌توان به تئوری بلوکی، استفاده از تصاویر استریوگرافیک، معادلات تعادل حدی، مدل‌سازی فیزیکی و مدل‌سازی عددی اشاره نمود. تمامی این روش‌ها با در نظر گرفتن ژئومتری شیب و ساختارهای موجود در آن و پارامترهای اختصاصی دیگر،

آن هنگامی روی می‌دهد که فشار منفذی برابر با ۰/۱ مگاپاسکال باشد و همچنین فشار منفذی بحرانی که منجر به ناپایداری شیروانی می‌شود، در درزه‌هایی با شیب ۴۵ درجه دارای بیشترین مقدار است. ملکی‌جوان و همکاران (Maleki Javan et al., 2015) تحلیل پایداری شیروانی سنگی را به روش المان مجزا انجام دادند. در این بررسی، نمونه سنگ به عنوان بلوک‌هایی در نظر گرفته شده، که توسط فنرهای الاستوپلاستیک به هم متصل گردیده است. آن‌ها چند مدل شیروانی مختلف از جمله شیروانی سنگی با لایه‌های شیب‌دار و شیروانی سنگی با دو مجموعه درزه عمودی را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و در پایان نتیجه گردید که این روش به بهینه سازی پایداری شیروانی سنگی کمک می‌کند. همچنین روش پیشنهادی از لحاظ نظری دقیق و ساده بوده و به راحتی می‌توان مسایل بسیار پیچیده در مورد ویژگی‌های ناهمگن و نیروهای وارده و یا پایه‌های استراحت روی شیروانی را با این روش حل نمود. همچنین دونگ و همکاران (Dong et al., 2006) مقاله‌ای را با موضوع اثر ناهمسانی و فشار آب حفره‌ای بر پایداری شیروانی‌های سنگی، به نگارش درآورده و به بررسی این دو پارامتر در این نوع شیروانی‌ها پرداختند. ایشان یک محیط ناهمگن را با یک محیط ناهمسان معادل، برای تحلیل جریان آب زیرزمینی در شیروانی سنگی مدل‌سازی نمودند و نتیجه چنین حاصل شد که توزیع فشار آب حفره‌ای برای شیروانی سنگی با ناهمسانی و جهت اصلی تانسور مختلف، متفاوت بوده و ناهمسانی در نفوذپذیری بر روی ضریب اطمینان پایداری شیروانی تأثیر دارد. در این مقاله، تأثیر فشار هیدرولیکی در توسعه ناپایداری‌های ناهمسانگرد سنگی و همچنین دامنه گسترش ریزش‌های ناشی از آنها بررسی شده است. در ابتدا، شرایط درزه‌نگاری بستر سنگی موجود با کمک روش‌های آماری تحلیل گردیده و سپس، پایداری استاتیکی این‌گونه شیروانی‌ها در حین گودبرداری با بهره‌گیری از روش المان مجزا به کمک نرم‌افزار UDEC مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

محدوده گودبرداری مورد مطالعه در حاشیه جنوب شرقی شهر اصفهان جهت احداث مرکز همایش‌های بین‌المللی و ساختمان اجلاس سران بوده و در جنوب رودخانه زاینده رود قرار گرفته است. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه در بین ۵۱/۷۱ تا ۵۱/۷۵ درجه طول شرقی و ۳۲/۵۹ تا ۳۲/۶۲ درجه عرض شمالی می‌باشد. در شکل ۱، موقعیت گود با استفاده از تصاویر

سنگی را ایجاد می‌نمایند. بعلاوه، این ساختارها به عنوان کانال‌هایی برای جریان هیدرولیکی، آب را به سمت شیروانی هدایت و ناپایداری را تشدید می‌کنند. از این رو، شیروانی‌های سنگی دارای پیچیدگی خاصی در مقایسه با شیروانی‌های خاکی می‌باشند. دلیل عمده مشکلات مربوط به مدل‌سازی شیروانی‌های سنگی با هر روش عددی، این است که توده‌های سنگی تا حد زیادی ناپیوسته، ناهمگن، ناهمسانگرد و غیرالاستیک هستند (Doug et al., 2001). در روشی واقعی‌تر از روش شبه‌استاتیک، به منظور تحلیل اثر لرزه بر شیب‌های سنگی، پایداری بر مبنای جایجایی و بر اساس سرعت بلوک تحلیل می‌شود. در تحلیل نیومارک حرکت‌های رفت و برگشتی موج لرزه بر خلاف روش شبه‌استاتیک مورد توجه قرار گرفته است و میزان جایجایی بر اساس جداول ارائه شده توسط نیومارک بیان‌کننده‌ی پایداری یا ناپایداری می‌باشد (Newmark, 1961). پژوهش‌های زیادی به بررسی تأثیر ناهمسانی خاک، فشار آب حفره‌ای و استفاده از روش‌های مختلف تحلیل شامل تعادل حدی و یا اجزاء محدود روی پایداری شیروانی انجام و به نگارش درآمده‌اند (Pal, Jeen-Shang and Whitman, 1983, Shen and Abbas, et al., 2012). شن و عباس (2013) مطالعه‌ای با موضوع تحلیل پایداری و ضریب اطمینان شیروانی با استفاده از روش المان مجزا و تئوری مجموعه‌های تصادفی انجام دادند. در این بررسی به تأثیر ناپیوستگی در چسبندگی مواد سنگ روی پایداری شیب، با توجه به پارامترهای مختلف و نامشخص بودن پارامترهای مقاومتی در سنگ و بلوک و همچنین تأثیر ناپیوستگی‌های موجود در محل درزه در تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان مدل پرداخته شده است. تحلیل پایداری با استفاده از روش المان مجزا و نرم‌افزار UDEC و ضریب اطمینان با استفاده از روش کاهش مقاومت انجام گردیده و در نهایت پارامترهای ناپیوستگی درزه‌ها با روش المان مجزا مورد بررسی قرار گرفته است. حسینی‌تودشکی و کیالا (Hosseinitoudeshki and Kayalha, 2014) با ارائه گزارشی در مورد اثر فشار منفذی بر روی پایداری شیروانی سنگی، به تحلیل پایداری شیروانی سنگی با درزه‌هایی با شیب‌های مختلف صفر، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه پرداختند و اثر فشار منفذی را در شیب‌های مختلف بررسی نمودند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش فشار منفذی روی درزه‌ها، ضریب اطمینان پایداری بحرانی کاهش یافته و بیشترین کاهش مقدار

مطالعه در محدوده دیواره جنوبی گود، در شکل ۲ مشخص می- باشد. همچنین در محدوده مورد نظر رخنمونی از هیچ گسلی مشاهده نشده، لذا تاثیر تکنونیک به صورت گسل خوردگی نبوده و از نوع شیدار شدن لایه‌ها می‌باشد. این توده سنگ‌ها دارای لایه‌بندی با ضخامت متفاوت بوده و به هنگام چین خوردن، درز و شکاف فراوانی در آنها تشکیل شده است.

ماهواره‌ای مشخص شده است. سازندی که در محدوده پروژه وجود دارد، شامل واحدهای شیلی و ماسه سنگی بوده و این مجموعه، تناوبی از شیل‌های خاکستری و ماسه‌سنگ به همراه میان لایه‌های شیل و شیل آهکی می‌باشد. این ماسه سنگ‌ها از لحاظ فشردگی دارای فشردگی متوسط و جوشدگی ضعیف هستند. تصویری از سازند منطقه مورد



شکل ۱. تصویر ماهواره‌ای موقعیت شیروانی مورد مطالعه در پژوهش



شکل ۲. تصویر سازند منطقه در دیواره جنوبی

شیروانی مورد تحلیل و الگوی تحلیل متفاوت سنگ با محیط‌های خاکی، لازم است ضمن بررسی درزه‌های احتمالی موجود در دیواره، فرآیند درزه‌نگاری در محل دیواره مذکور و مناطق همگن مرتبط با آنها انجام شود. شکل ۳، نمایی از گود و دیواره جنوبی که دچار ریزش شده را نشان می‌دهد.

به منظور تحلیل پایداری شیروانی سنگی موردنظر، بازدیدهای میدانی مستمری از محل پروژه انجام گردیده است. ارتفاع شیروانی ۱۵ متر بوده و در دیواره مذکور، تراوش آب که به طور عمده از طریق درزه‌ها صورت می‌گیرد، مشاهده شده است. به دلیل حضور سنگ در دیواره



شکل ۳. نمایی از گود مورد مطالعه و دیواره جنوبی آن

### ۳- انجام فرآیند درزه‌نگاری در منطقه مورد مطالعه

درزه عبارت است از ناپیوستگی‌هایی که هیچ‌گونه جابجایی نسبی قابل مشاهده‌ای در آن‌ها وجود ندارد. عملیات برداشت درزه‌ها در این پژوهش، در خط برداشت‌هایی به موازات دیواره جنوبی و با استفاده از کمپاس

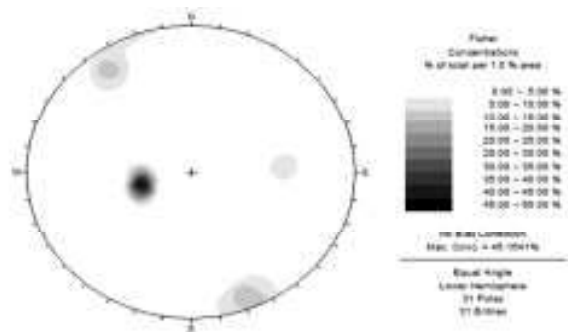
و متر صورت گرفته است. تصویر مربوط به عملیات درزه‌نگاری در محل دیواره جنوبی، در شکل ۴ نمایش داده شده است.



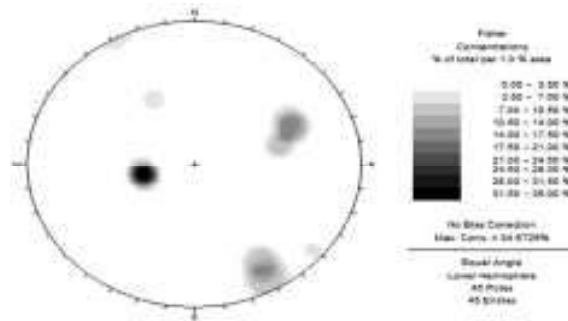
شکل ۴. عملیات درزه‌نگاری در محل دیواره جنوبی گود مورد مطالعه

به منظور انجام تحلیل پایداری، دیواره مورد بررسی به دلیل حضور احتمالی یک گسل فعال در منطقه، به دو ناحیه کلی فوقانی و تحتانی در دو سمت گسل (منطقه همگن آماری) تقسیم گردیده و خطوط برداشت در هر یک از این دو ناحیه توسعه یافته و این موضوع، به سبب اطمینان پیدا کردن در مورد وجود گسل یا تاثیر گسل در ناپایداری انجام شده است. حدود ۸۰ قرائت در دو ناحیه فوقانی و تحتانی به

منظور شناسایی ویژگی‌های موثر در این مطالعه نظیر شیب، جهت شیب، فاصله‌داری، بازشدگی و گسترش آن صورت گرفته است. در گام بعدی، اطلاعات برداشت شده در محل توسط راهبرد شبکه استریونت در داخل نرم‌افزار DIPS پیاده گردیده، که در شکل ۵ نگاره استریونت ناپیوستگی‌ها و خطوط همتراز تجمع درزه‌های برداشت شده در دو ناحیه فوقانی و تحتانی مشاهده می‌شود.



(الف)

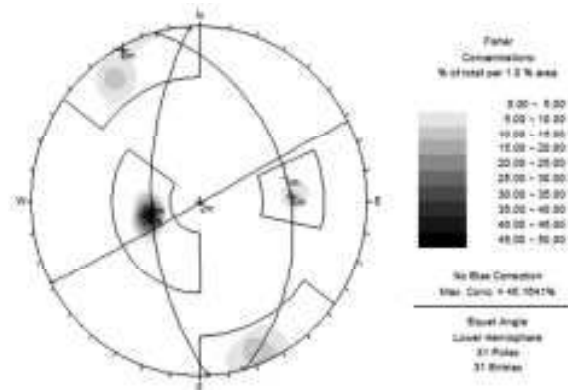


(ب)

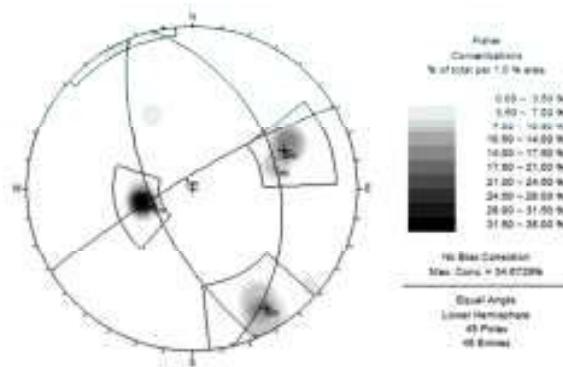
شکل ۵. نگاره استریونت ناپوستگی‌های برداشت شده در ناحیه (الف) فوقانی (ب) تحتانی

دارای شیب و جهت شیب نزدیک به یکدیگر، به عنوان یک دسته درزه تلقی گردیده است. در شکل ۶، به ترتیب نگاره استریونت و پنجره‌های میانگین‌گیری به همراه صفحات متناظر با هر دسته درزه در دو ناحیه فوقانی و تحتانی دیده می‌شوند.

جهت دسته‌بندی و تفکیک دسته درزه‌ها و همچنین تعیین مشخصات هر کدام از آن‌ها، اطلاعات برداشت شده هر قسمت توسط نرم‌افزار DIPS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. روش کار بدین صورت است که درزه‌های



(الف)



(ب)

شکل ۶. نگاره استریونوت پنجره‌های میانگین‌گیری و صفحات دسته‌درزه‌ها در رابطه با ناحیه (الف) فوقانی (ب) تحتانی

همان‌گونه که در شکل ۶ مشخص است، سه دسته درزه در هر یک از نواحی دیده می‌شود، که در آن‌ها، دسته‌درزه شماره ۱ با فراوانی بیشتری مشخص می‌باشد. در جدول ۱، اطلاعات مربوط

جدول ۱. اطلاعات شیب و جهت شیب دسته درزه‌های دو ناحیه فوقانی و تحتانی بر حسب درجه

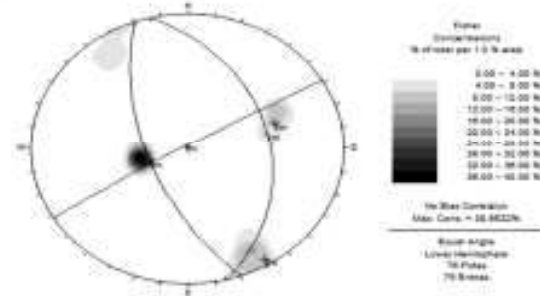
ناحیه	دسته درزه		
	۱	۲	۳
	شیب	جهت شیب	شیب
فوقانی	۳۴/۴۸	۷۴/۹	۸۸/۸۸
تحتانی	۳۴/۷	۷۶/۲۸	۸۱/۱۸

مقایسه دسته درزه‌های دو ناحیه فوقانی و تحتانی موجود در دو طرف گسل احتمالی دیواره مورد مطالعه، نشان می‌دهد که دسته درزه‌ها در هر دو ناحیه تا حدود زیادی با یکدیگر منطبق‌اند، لذا می‌توان نتیجه گرفت که گسل احتمالی در صورت وجود، تاثیر چندانی بر تغییر جهت‌گیری آن‌ها نداشته است. لازم به توضیح است که با توجه به اینکه مقادیر تا حدودی با هم منطبق بوده‌اند، تجمیع صورت گرفته است. با وجود خطاهای انسانی و دستگاهی ناشی از فرآیند درزه‌نگاری و وجود اندک درزه‌هایی با شیب‌های پرت و همچنین با توجه به مکان نامناسب محل برداشت درزه‌ها، این اختلاف ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی می‌باشد. بنابراین می‌توان تمامی داده‌ها را با یکدیگر به صورت تجمعی و یکپارچه در نظر گرفته و تحلیل را در یک ناحیه ادامه داد. نگاره استریونوت و خطوط هم‌تراز تجمع درزه‌ها در کل دیواره در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، دیواره سنگی مورد مطالعه دارای سه دسته‌درزه بوده، که تحت عنوان دسته درزه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ نام‌گذاری شده، که اطلاعات مربوط به شیب و جهت شیب این سه دسته درزه در جدول ۲ آمده است. براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی تصاویر ماهواره‌ای گود، جهت شیب دیواره جنوبی با افق برابر با ۲۸/۵ درجه محاسبه گردید. نکته قابل توجه این است که جهت‌گیری دیواره نسبت به دسته درزه‌ها، می‌تواند تاثیر به سزایی در پایداری یا ناپایداری دیواره سنگی داشته و همچنین می‌توان نوع ریزش را نیز تعیین نمود. با تفکیک درزه‌های منطقه و تمرکز آنها در سه دسته درزه، لازم است که در مرحله دوم خواص آماری هر دسته در رابطه با هر پارامتر، مورد محاسبه قرار گیرد. محاسبه ویژگی‌های آماری، اطلاعات منحصر به فردی را از درزه‌های یک منطقه فراهم می‌آورد. این مساله موجب گردیده که در نرم‌افزارهای ناپیوسته مرتبط با محیط‌های درزه‌دار، این اطلاعات به عنوان

مقایسه دسته درزه‌های دو ناحیه فوقانی و تحتانی موجود در دو طرف گسل احتمالی دیواره مورد مطالعه، نشان می‌دهد که دسته درزه‌ها در هر دو ناحیه تا حدود زیادی با یکدیگر منطبق‌اند، لذا می‌توان نتیجه گرفت که گسل احتمالی در صورت وجود، تاثیر چندانی بر تغییر جهت‌گیری آن‌ها نداشته است. لازم به توضیح است که با توجه به اینکه مقادیر تا حدودی با هم منطبق بوده‌اند، تجمیع صورت گرفته است. با وجود خطاهای انسانی و دستگاهی ناشی از فرآیند درزه‌نگاری و وجود اندک درزه‌هایی با شیب‌های پرت و همچنین با توجه به مکان نامناسب محل برداشت درزه‌ها، این اختلاف ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی می‌باشد. بنابراین می‌توان تمامی داده‌ها را با یکدیگر به صورت تجمعی و یکپارچه در نظر گرفته و تحلیل را در یک ناحیه ادامه داد. نگاره استریونوت و خطوط هم‌تراز تجمع درزه‌ها در کل دیواره در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، دیواره سنگی مورد مطالعه دارای سه

تخمین زده شده با استفاده از تابع توزیع نرمال در دسته درزه شماره ۱ را نشان می‌دهد. به‌طور مشابه، تمامی اطلاعات مربوط به دسته درزه‌های شماره ۲ و ۳ نیز شامل پارامترهای شیب، جهت شیب، فاصله‌داری، بازشدگی و گسترش بررسی گردیده و پارامترهای آماری تخمین زده شده برای این دو دسته درزه نیز پس از بررسی هیستوگرام فراوانی مربوط به آن‌ها با استفاده از تابع توزیع نرمال، در جدول ۳ آورده شده است.

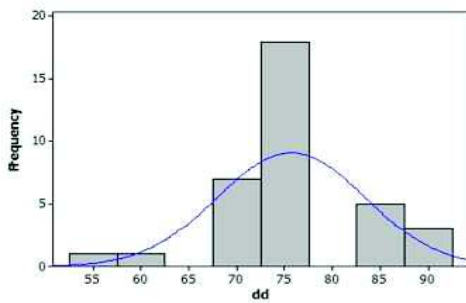
ورودی دریافت شده و برای تحقق این موضوع، از نرم‌افزار آماری MINITAB استفاده گردیده است. روش کار بدین صورت است که داده‌های حاصل از تفکیک دسته درزه‌ها، مطابق محاسبات انجام شده در مرحله قبل به‌وسیله برنامه DIPS، وارد نرم‌افزار MINITAB گردیده و نمودارهای تجمعی فراوانی شامل مشخصات شیب، جهت شیب، فاصله‌داری، بازشدگی و گسترش مربوط به هر دسته درزه، مطابق شکل ۸، استخراج شده است. جدول ۳، پارامترهای آماری



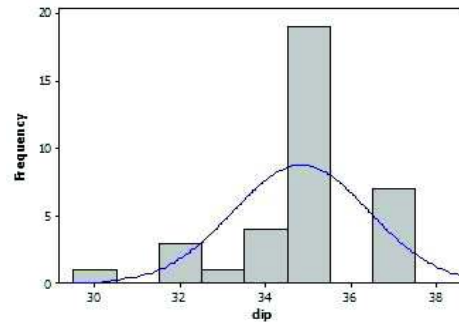
شکل ۷. نگاره استریونت تجمع درزه‌ها در کل دیواره مورد مطالعه (یک منطقه همگن)

جدول ۲. اطلاعات شیب و جهت شیب دسته‌دازه‌های دیواره مورد مطالعه بر حسب درجه

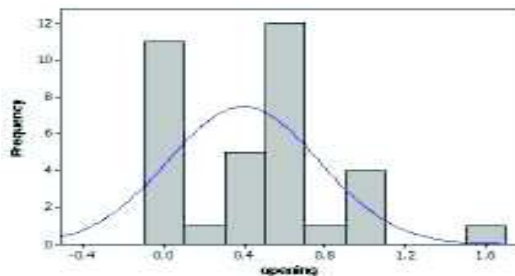
دسته درزه					
۳		۲		۱	
شیب	جهت شیب	شیب	جهت شیب	شیب	جهت شیب
۲۵۰	۶۱	۳۳۰	۸۸	۷۵	۳۵



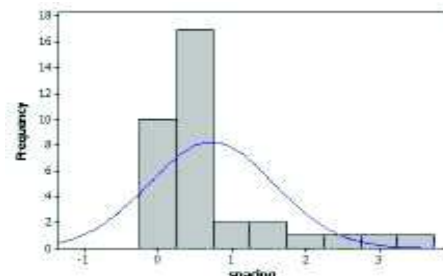
(ب)



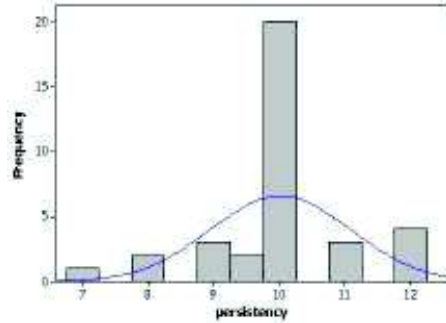
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۸. نمودار تجمعی فراوانی مقادیر (الف) شیب (ب) جهت شیب (ج) فاصله داری (د) بازشدگی (ه) گسترش دسته درزه شماره ۱ و انطباق آن نسبت به تابع توزیع نرمال جدول ۳. پارامترهای آماری تخمین زده شده در دسته درزه‌ها

دسته درزه	پارامتر	۱	۲	۳
شیب (°)	میانگین	۳۴/۸۳	۴/۰۰۶	۴/۸۰
	انحراف استاندارد	۱/۵۹	۸۱/۹۵	۶۰/۹۳
جهت شیب (°)	میانگین	۷۵/۷۱	۸۹/۰۱	۲۵۰/۷۰
	انحراف استاندارد	۷/۶۶	۲۷۶	۹/۹۳
فاصله داری (mm)	میانگین	۷۲۸	۱۲۲۰	۱۲۷۰
	انحراف استاندارد	۸۵۶	۱۲۲۰	۱۱۸۹
بازشدگی (mm)	میانگین	۳/۹	۳/۳۳	۲
	انحراف استاندارد	۲/۷	۳/۳۳	۳
گسترش (mm)	میانگین	۱۰۰۰۰	۲۷۵۰	۳۷۳۰
	انحراف استاندارد	۱۰۶۰	۲۰۷۴	۷۰۳

به دلیل اینکه فاصله‌داری‌ها در امتداد خط برداشت مماس بر دیواره اندازه‌گیری شده و این مقادیر، عمود بر دسته‌دازه‌ها نمی‌باشند، لذا لازم است که آن‌ها به راستای عمود بر صفحه میانگین هر دسته‌دازه تصحیح و به فاصله‌داری واقعی تبدیل گردند. این تصحیح با استفاده از رابطه (۱) انجام شده و مقادیر تصحیح شده آن‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است.

$$S = s'' \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \quad (1)$$

که در آن،  $S$ : فاصله‌داری واقعی،  $s''$ : فاصله‌داری اندازه‌گیری شده،  $\theta_1$ : زاویه متمم شیب و  $\theta_2$ : تفاضل جهت شیب با امتداد صفحه است.

جدول ۴. مقادیر تصحیح شده فاصله‌داری‌ها دسته درزه‌ها

دسته درزه	شیب (°)	جهت شیب (°)	فاصله داری اندازه‌گیری شده (mm)	انحراف فاصله‌داری استاندارد اندازه‌گیری شده (mm)	فاصله داری واقعی (mm)	انحراف فاصله داری واقعی (mm)
۱	۳۴/۸۳	۷۵/۷۱	۷۷۳	۸۶۰	۳۳۰	۴۰۰
۲	۸۱/۹۵	۲۷۶	۱۲۲۲	۱۲۲۰	۱۱۳۰	۱۱۲۰
۳	۶۰/۹۳	۲۵۰/۷	۱۱۲۷	۱۱۸۹	۶۷۰	۹۶۰

زاویه فوق در جهت غیرعمود بر امتداد سطح اندازه‌گیری گردد، شیب با زاویه‌ای متفاوت ظاهر شده، که زاویه شیب ظاهری نامیده می‌شود. شیب ظاهری در شکل ۹ با  $\alpha$  نمایش

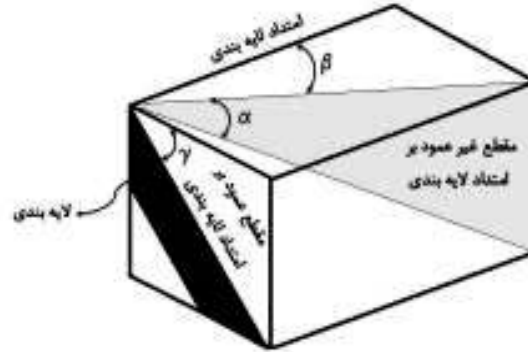
شیب حقیقی یک ساختار سطحی، زاویه شیب اندازه‌گیری شده در یک مقطع عمود بر امتداد سطح می‌باشد، که مطابق شکل ۹، شیب واقعی با  $\gamma$  مشخص می‌شود. در صورتی که



شیب حقیقی و شیب ظاهری به صورت رابطه (۲) بیان می شود.

$$\text{tg } \alpha = \sin \beta \times \text{tg } \gamma$$

که در آن،  $\alpha$ : شیب ظاهری،  $\beta$ : زاویه بین جهت شیب ظاهری با امتداد صفحه و  $\gamma$ : شیب واقعی است.



شکل ۹. تصویر شماتیک شیب حقیقی و شیب ظاهری لایه بندی (Ajalloian and Zamani, 2014)

جدول ۵. نتایج تبدیل شیب واقعی به شیب ظاهری بر حسب درجه

دسته درزه	شیب واقعی	شیب ظاهری
۱	۳۴/۸۳	۲۵/۸۹
۲	۸۱/۹۵	۶۹/۳۱
۳	۶۰/۹۳	۵۳/۲۰

برای تعریف دسته درزه‌ها در نرم‌افزار UDEC، لازم است که پارامترهایی از جمله اطلاعات مربوط به شیب و فاصله‌داری ظاهری هر دسته درزه، به عنوان داده ورودی اولیه استفاده شوند. جدول ۶، فاصله‌داری‌های ظاهری بدست آمده با استفاده از رابطه (۳) را نشان می‌دهد.

$$S' = \frac{S}{\cos \gamma} \times \cos \alpha \quad (3)$$

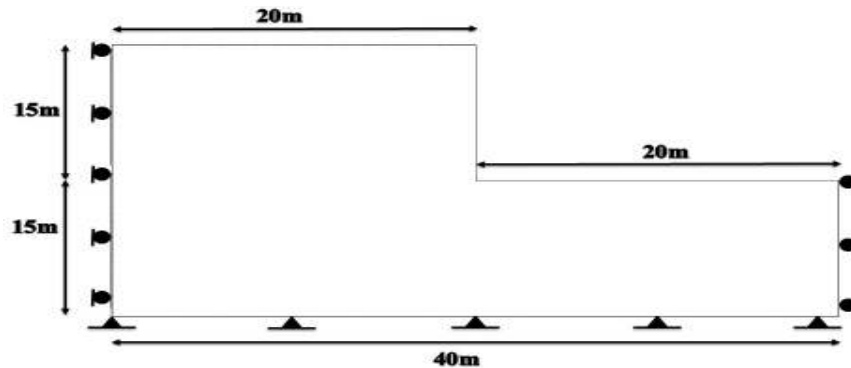
که در آن،  $S'$ : فاصله‌داری ظاهری،  $S$ : فاصله‌داری واقعی،  $\gamma$ : شیب واقعی و  $\alpha$ : شیب ظاهری است.

جدول ۶. مقادیر فاصله‌داری ظاهری

دسته درزه	فاصله‌داری واقعی (mm)	فاصله‌داری ظاهری (mm)
۱	۳۳۰	۳۹۰
۲	۱۱۳۰	۲۸۵۰
۳	۶۷۰	۸۴۰

#### ۴- بررسی پایداری استاتیکی و هیدرواستاتیکی شیروانی سنگی مورد مطالعه با روش المان مجزا

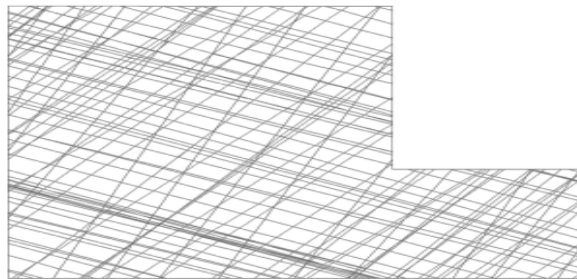
برای تحلیل و مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها در دیواره سنگی موردنظر از نرم‌افزار دوبعدی UDEC بر پایه روش المان مجزا استفاده شده است. روش عددی المان مجزا با المان بندی مجزای بلوک‌ها، امکان توسعه رفتارهای داخل بلوکی، لغزشی، چرخشی و به صورت کلی جابجایی‌های بزرگ مقیاس بین بلوکی را فراهم می‌کند ( Morris et al., 2003). روش المان مجزا توسط کاندال ( Cundall, 1971) معرفی گردید و توسط هارت (Hart, 1993) توسعه یافت. برنامه‌های دوبعدی UDEC و سه‌بعدی 3DEC برای اولین بار در سال ۱۹۸۰ در غالب کدی جهت فرمولسازی بلوک‌های صلب و تغییرشکل پذیر واقع در بین ناپیوستگی‌ها ارائه شد. برنامه‌های مذکور در مدل‌سازی رفتار توده‌های سنگی مورد استفاده قرار گرفته است، که از جمله آن‌ها می‌توان به مطالعات صورت گرفته توسط کاندال (Cundall, 1980 and 1982) و لموس و همکاران است.



شکل ۱۰. مشخصات هندسی شیروانی سنگی در این پژوهش

شیروانی به همراه دسته درزه‌ها و محل قرارگیری آنها در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد. با توجه به ترسیم درزه‌های با فاصله‌داری یکسان در نرم‌افزار مورد استفاده، اندازه فاصله‌داری‌ها در تمامی نقاط یکسان می‌باشند و به دلیل تمرکز بیشتر درزه‌ها در بعضی نقاط ناشی از حفاری، این خطوط در مقطع مدل‌سازی شیروانی سنگی به صورت نامنظم دیده می‌شوند.

یکی از مهمترین فاکتورهای موثر بر تخریب توده‌های سنگی، تعداد و محل قرارگیری درزه‌ها در مدل‌سازی می‌باشد. با توجه به آنالیزهای انجام شده، دسته‌درزه شماره ۱ به سمت گود و دسته‌درزه‌های شماره ۲ و ۳ در جهت عکس گود مدل‌سازی شده‌اند، که با توجه به بازدیدهای صورت گرفته از محل و تطبیق و کنترل نتایج حاصل با مشاهدات عینی، این انتخاب‌ها صحیح می‌باشند. مقطع مدل هندسی



شکل ۱۱. مقطع مدل هندسی شیروانی به همراه دسته درزه‌ها

پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک درزه‌ها با میانگین‌گیری از داده‌های مندرج در جدول ۷ و همچنین گزارش ژئوتکنیک پروژه مرکز همایش‌های بین‌المللی اصفهان تهیه شده توسط شرکت مهندسی مشاور ایران خاک (Iran Khak Consulting Co., 2010) بدست آمده است.

نتایج آزمایش‌های برش مستقیم برجا بر روی ناپیوستگی‌ها در عمق‌های مختلف با در نظر گرفتن شرایط تکرارپذیری آنها، در جدول ۷ آورده شده است. جدول ۸ نیز مشخصات مقاومتی و مکانیکی درزه‌ها و سنگ بکر استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که اعداد انتخابی جهت

جدول ۷. نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم بر روی ناپیوستگی‌ها

شماره نمونه	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک (°)
۱	۲۰	۳۶
۲	۱	۳۴/۸
۳	۰	۳۵/۵
۴	۴	۳۵
۵	۲۲	۳۷
۶	۰	۳۵/۴
۷	۵	۳۳/۶
۸	۳۶	۳۶
۹	۴۴	۳۷/۸

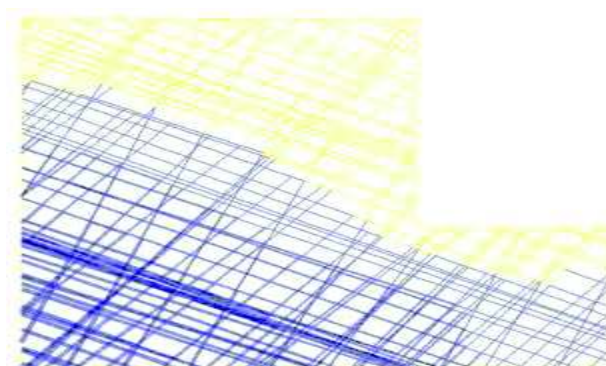
جدول ۸. خواص مکانیکی درزه‌ها و سنگ بکر مورد استفاده در پژوهش

مصالح	دانسیته (Kg/m <sup>3</sup> )	چسبندگی (KPa)	زاویه اصطکاک داخلی (°)	سختی نرمال (GPa/m)	سختی برشی (GPa/m)
درزه‌ها	-	۱۵	۳۵	۱۰	۴
سنگ بکر	۲۵۰۰	-	-	-	-

صلب یا انعطاف پذیر در نظر گرفته شوند. این بررسی بر اساس تحلیل بلوکی صلب، صورت پذیرفته است. فرمول‌بندی اصلی برای بلوک‌های صلب توسط کاندال (Cundall, 1988) ارائه شده است. در این فرمول‌بندی محیط ناپیوسته به صورت یک مجموعه‌ای از بلوک‌های

در یک سیستم بلوکی برای استفاده از داده‌های ساختاری فقط به دو نوع تماس شامل تماس‌های گوشه به گوشه و تماس‌های لبه به گوشه نیاز بوده و مدل رفتاری اختصاص یافته برای این ناپیوستگی‌ها، مدل لغزشی سطحی کولمب می‌باشد. در روش المان مجزا بلوک‌ها ممکن است

را به سمت شیروانی هدایت و ناپایداری را تشدید می‌کنند. شرایط مرزی در تحلیل‌های هیدرومکانیکی به واسطه نفوذناپذیر کردن مرزها انجام می‌گیرد. در این مدل مرز افقی تحتانی و مرز قائم (پی) سمت راست شیروانی نفوذناپذیر شده‌اند. همچنین با توجه به موقعیت قرارگیری سطح تراز آب زیرزمینی، فشار آب حفره‌ای برابر با ۲۵۰ کیلوپاسکال به صورت یک ستون اشباع از پشت شیروانی و در محدوده صفر تا ۲۵ متری مدل اعمال شده است. نمایی از شیروانی سنگی به همراه جریان هیدرواستاتیکی اعمالی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲. اعمال جریان هیدرواستاتیکی در مدل‌سازی پایداری شیروانی سنگی

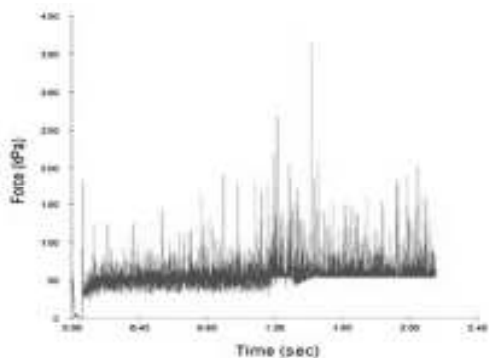
مجزا که ابعاد و اندازه آن‌ها در طول بارگذاری تغییر نمی‌کند، در نظر گرفته شده است. در نتیجه این فرمول بندی برای مسائلی کاربرد دارد، که رفتار سیستم بلوک‌ها توسط ناپیوستگی‌ها کنترل می‌شود. در چنین مسائلی خواص الاستیک مصالح ممکن است در نظر گرفته نشود، که چنین شرایطی در محیط‌های با تنش پایین و انعطاف پذیری بلوکی کم، وجود دارد (Itasca Consulting Group, 2004). وجود سنگ و ساختارهای ناپیوسته درزه‌های سنگی در یک شیروانی با تغییر الگوی محیط از حالت همسانگرد به ناهمسانگرد، بر الگوی ریزش تاثیرگذار است. در چنین شرایطی درزه‌های سنگی با تشکیل سطوح ضعیف ناپایداری‌های سنگی را ایجاد می‌نمایند. بعلاوه، این ساختارها به عنوان کانال‌هایی برای جریان هیدرولیکی، آب

درزه‌ها هدایت شده و پس از اعمال جریان، دیواره با حضور آب ناپایدار گردیده است. تحلیل‌ها بیانگر این موضوع می‌باشند که در گام ابتدایی، شیروانی موردنظر به تعادل رسیده و در گام دوم شامل حفاری مرحله‌ای و تعادل استاتیکی نیز مطابق شکل ۱۳ پایدار بوده، ولی همانطور که شکل ۱۴ نیروهای نامتعادل کننده در مرحله تحلیل هیدرومکانیکی را نمایش می‌دهد، در گام نهایی و با اعمال فشار آب حفره‌ای ناپایداری شدیدی در دیواره سنگی رخ داده است.

ناپایداری در دیواره سنگی نیز با ریزش‌هایی همراه بوده، که چگونگی شروع روی دادن این ریزش‌ها در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، مکانیسم گسیختگی بدست آمده از مدل‌سازی و تحلیل دیواره گود در نرم‌افزار با ریزش واقعی که شیروانی سنگی اتفاق افتاده، تطابق لازم را داشته و با مشاهدات و

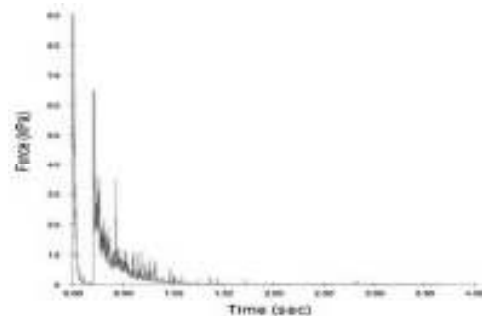
تحلیل استاتیکی لازم با اعمال سه دسته درزه و اطلاعات آماری مربوط به هر یک از دسته درزه‌ها، مطابق آنچه در قبل بدست آمد، صورت می‌گیرد. دیواره سنگی موردنظر در گام ابتدایی و قبل از حفاری به تعادل اولیه رسیده، که این بیانگر صحت مدل‌سازی می‌باشد. در گام بعدی، حفاری مرحله‌ای تا تراز موجود صورت گرفته و در نهایت مدل به تعادل نهایی خود رسیده و در نتیجه شیروانی در حالت استاتیکی پایدار خواهد بود. با توجه به پایدار بودن مدل در حالت استاتیکی، شیروانی دچار جابجایی بسیار ناچیزی می‌باشد، اما آنچه در واقعیت مشخص است، دیواره مورد بررسی ناپایدار گردیده و این ناپایداری با ریزش‌هایی همراه شده است. با توجه به حضور آب این امکان می‌رود که ناپایداری حاصله ناشی از فشار آب حفره‌ای موجود باشد. لازم به ذکر است که این فشار آب حفره‌ای عمدتاً از طریق

ریزش‌ها در دیواره بوده و موجب اتخاذ تمهیدات لازم برای پایدارسازی دیواره گود و افزایش ایمنی گردد.

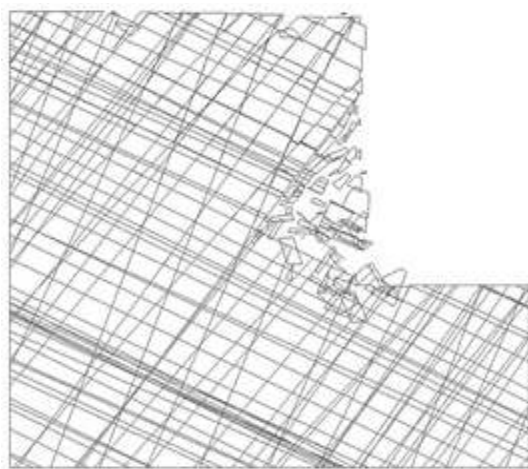


شکل ۱۴. نمودار تغییرات نیروهای نامتعادل کننده در مرحله اعمال فشار آب حفراهی

برداشت‌های در محل، همخوانی منطقی را دارد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که تحلیل پایداری شیروانی‌ها قبل از عملیات اجرایی گوبرداری با در نظر گرفتن فرضیات مناسب و صحیح و همچنین کلیه ملاحظات فنی و اجرایی، می‌تواند باعث شناخت دقیق مکانسیم گسیختگی و احتمال وقوع



شکل ۱۳. نمودار تغییرات نیروهای نامتعادل کننده در پایان حفراهی مرحله‌ای



(ب)



(الف)

شکل ۱۵. ناپایداری بلوک‌ها و ریزش‌های صورت گرفته در شیروانی مورد مطالعه (الف) ریزش واقعی (ب) ریزش محاسبه شده

### ۵- مطالعات پارامتریک عوامل موثر بر پایداری شیروانی سنگی مورد مطالعه

درزه، وزن مخصوص سنگ بکر و نیز اثرات فاصله‌داری درزه، جهت‌داری دسته درزه‌ها بر روی پایداری یا ناپایداری دیواره مورد نظر در حالت استاتیکی پرداخته شده است.

در این قسمت، به مطالعات پارامتریک انجام شده بر روی عوامل موثر بر پایداری شیروانی سنگی موردنظر و یا به عبارتی آنالیز حساسیت مدل بر روی پارامترهایی نظیر زاویه اصطکاک داخلی درزه، چسبندگی درزه، زاویه اتساع

### ۱-۵- بررسی تاثیر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی

#### درزه‌ها

برای بررسی اثرات زاویه اصطکاک داخلی درزه‌ها، با فرض ثابت بودن سایر پارامترها شش مورد آنالیز انجام شده است. وضعیت پایداری مدل نسبت به هر یک از مقادیر به همراه میزان جابجایی تاج شیروانی در جهت افقی وقائم در

جدول ۹ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که پایداری شیروانی سنگی نسبت به پارامتر زاویه اصطکاک داخلی حساس بوده، به‌گونه‌ای که با کم شدن مقدار آن، پایداری شیروانی نیز کاهش می‌یابد. در اینجا نیز مرز بین پایداری و ناپایداری برای پارامتر زاویه اصطکاک داخلی، برابر ۳۰ درجه تعیین می‌گردد.

جدول ۹. نتایج تغییرات زاویه اصطکاک داخلی درزه‌ها بر پایداری شیروانی مورد مطالعه

نشست (mm)	تغییر مکان افقی (mm)	وضعیت پایداری	زاویه اصطکاک داخلی (°)
*	*	ناپایدار	۲۰
*	*	ناپایدار	۲۵
*	*	ناپایدار	۳۰
$2 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^{-1}$	پایدار	۴۰
$7 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-1}$	پایدار	۴۵
$6 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-1}$	پایدار	۵۰

### ۲-۵- بررسی تاثیر پارامتر چسبندگی درزه‌ها

در این حالت، شش آنالیز با مقادیر چسبندگی مختلف با فرض ثابت بودن سایر پارامترها جهت بررسی تاثیر چسبندگی درزه‌ها بر رفتار پایداری دیواره سنگی انجام شده است. وضعیت پایداری دیواره نسبت به هر یک از مقادیر به همراه میزان جابجایی راس بالای شیروانی در جهت افقی و قائم در جدول

۱۰ آمده است. با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان استنباط کرد که با کاهش مقدار چسبندگی، پایداری شیروانی نیز کاهش پیدا می‌کند. همچنین مرز بین پایداری و ناپایداری برای پارامتر چسبندگی برابر ۱۰ کیلو پاسکال محاسبه شده است.

جدول ۱۰. نتایج تغییرات چسبندگی درزه‌ها بر پایداری شیروانی مورد مطالعه

نشست (mm)	تغییر مکان افقی (mm)	وضعیت پایداری	چسبندگی (kPa)
*	*	ناپایدار	۵
*	*	ناپایدار	۱۰
$5 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^{-1}$	پایدار	۲۰
$1 \times 10^{-1}$	$9 \times 10^{-1}$	پایدار	۳۰
$6 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-1}$	پایدار	۴۰

### ۳-۵- بررسی تاثیر پارامتر زاویه اتساع درزه

برای این منظور، شیروانی سنگی با پنج زاویه اتساع مختلف با فرض ثابت بودن سایر پارامترها مورد تحلیل قرار گرفته و وضعیت پایداری آن نسبت به هر یک از مقادیر به همراه میزان جابجایی تاج شیروانی در جهت افقی وقائم در

جدول ۱۱ آمده است. نتایج حاصل بیانگر این موضوع است که مقدار زاویه اتساع در میزان جابجایی و پایداری استاتیکی شیروانی نقش به‌سزایی ندارد.

جدول ۱۱. نتایج تغییرات زاویه اتساع بر پایداری شیروانی مورد مطالعه

نشست (mm)	تغییر مکان افقی (mm)	وضعیت پایداری	زاویه اتساع (°)
$2/62 \times 10^{-1}$	$5/6 \times 10^{-1}$	پایدار	۰
$2/62 \times 10^{-1}$	$5/6 \times 10^{-1}$	پایدار	۵
$2/62 \times 10^{-1}$	$5/6 \times 10^{-1}$	پایدار	۱۰
$2/62 \times 10^{-1}$	$5/6 \times 10^{-1}$	پایدار	۲۰
$2/62 \times 10^{-1}$	$5/6 \times 10^{-1}$	پایدار	۳۰

#### ۴-۵- بررسی تاثیر پارامتر وزن مخصوص سنگ بکر

تغییرات این پارامتر را به همراه میزان جابجایی تاج شیروانی در جهت افقی و عمودی نشان می‌دهد. با بررسی و مقایسه نتایج محاسبه شده، می‌توان بیان نمود که با افزایش وزن مخصوص سنگ بکر، از پایداری شیروانی کاسته می‌شود.

به منظور بررسی اثر تغییرات وزن مخصوص سنگ بکر با فرض ثابت بودن سایر پارامترها بر پایداری دیواره‌های سنگی، پنج مدل با دانسیته‌های مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است. جدول ۱۲، وضعیت پایداری شیروانی نسبت به

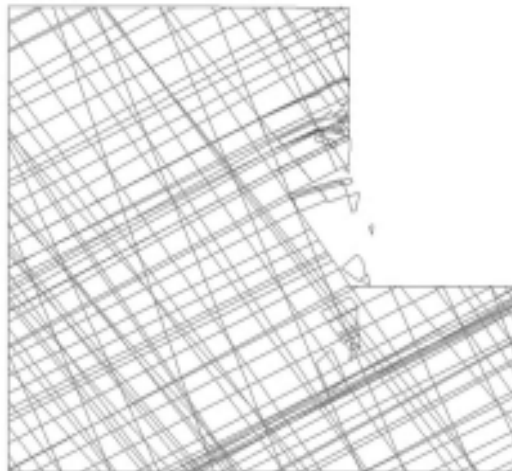
جدول ۱۲. نتایج تغییرات وزن مخصوص سنگ بکر بر پایداری شیروانی مورد مطالعه

نشست (mm)	تغییر مکان افقی (mm)	وضعیت پایداری	وزن مخصوص (Kg/m <sup>3</sup> )
$8 \times 10^{-2}$	$1/5 \times 10^{-1}$	پایدار	۱۵۰۰
$1/7 \times 10^{-1}$	$3/3 \times 10^{-1}$	پایدار	۲۰۰۰
*	*	ناپایدار	۳۰۰۰
*	*	ناپایدار	۳۵۰۰
*	*	ناپایدار	۴۰۰۰

#### ۵-۵- بررسی اثر جهت‌داری دسته درزه‌ها

شده‌اند. در این قسمت، جهت‌های انتخابی برای دسته درزه‌ها به صورت معکوس اعمال شده، به گونه‌ای که دو دسته درزه در جهت گودبرداری (شیب درزه‌ها به سمت گود) و یک دسته درزه در جهت عکس گودبرداری (شیب درزه‌ها پشت به گود) در نظر گرفته شده است. در این حالت نیز، مشاهده می‌گردد که شیروانی سنگی پس از تعادل اولیه، در گام نهایی و بعد از حفاری مرحله‌ای، دچار ناپایداری شده و این ناپایداری با ریزش‌هایی همراه شده است، که در شکل ۱۶ قابل مشاهده می‌باشند.

تعیین نوع جهت‌داری دسته درزه‌ها نسبت به دیواره ایجاد شده در اثر گودبرداری آن، امری بسیار مهم در مدل‌سازی عددی به‌شمار می‌رود. به گونه‌ای که انتخاب جهت نامناسب برای هر یک از دسته درزه‌ها، می‌تواند روند کلی تحلیل را تغییر دهد. در این تحقیق، سه دسته درزه غالب با در نظر گرفتن شرایط لایه بندی که در قبل توضیح داده شده، معرفی گردیده، که دو دسته درزه در جهت عکس گودبرداری (شیب درزه‌ها پشت به گود) و یک دسته درزه در جهت گودبرداری (شیب درزه‌ها به سمت گود) موثر و



شکل ۱۶. ریزش دیواره و ناپایداری گود در اثر معکوس کردن جهت داری دسته درزه‌ها

#### ۵-۶- بررسی اثر فاصله‌داری درزه‌ها

با توجه به اهمیت قابل توجه پارامتر فاصله‌داری در شیروانی‌های سنگی، این مطالعه در دو قسمت استاتیکی و هیدرواستاتیکی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی اثر فاصله‌داری درزه‌ها، تحلیل پایداری دیواره گود با در نظر گرفتن فواصل درزه‌داری مختلف انجام شده و نتایج

مربوطه به آن‌ها در جدول ۱۳ آمده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که با زیاد شدن فاصله‌داری در حالت استاتیکی، پایداری نیز افزایش یافته و در نتیجه از تغییر مکان‌ها و جابجایی‌ها تاج شیروانی نیز کاسته می‌شود.

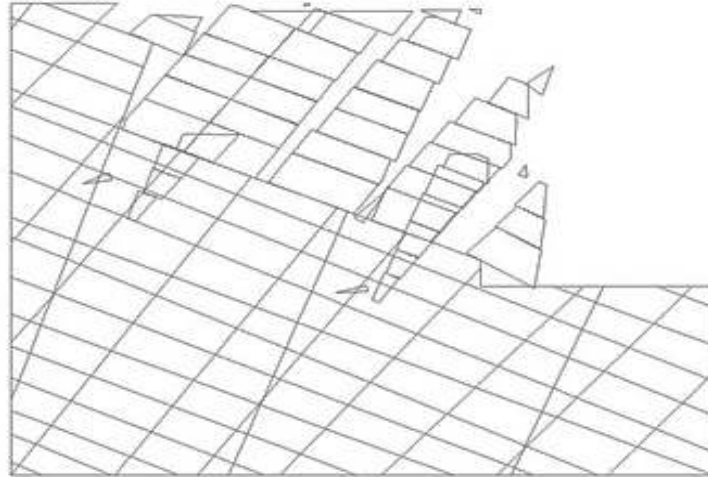
جدول ۱۳. نتایج تغییرات فاصله‌داری درزه‌ها بر پایداری شیروانی مورد مطالعه

فاصله‌داری	وضعیت پایداری	تغییر مکان افقی (mm)	نشست (mm)
نصف	ناپایدار	*	*
دو برابر	پایدار	$2 \times 10^{-1}$	$2 \times 10^{-1}$
چهار برابر	پایدار	$6 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-4}$

در این قسمت، تاثیر فاصله‌داری درزه‌ها در حالت هیدرواستاتیکی بر پایداری دیواره سنگی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. پس از تحلیل‌های صورت گرفته و نتایج بدست آمده، می‌توان استنتاج کرد که با افزایش فاصله‌داری در حالت هیدرواستاتیکی، پایداری به شدت کاهش می‌یابد. این نکته بسیار حائز اهمیت و قابل تامل بوده، به‌گونه‌ای که شیروانی در حین تحلیل با افزایش جابجایی به سمت ناپایداری متمایل گردیده است. لذا با افزایش میزان

تغییر مکان، ناپایداری به صورت ریزش‌هایی نیز همراه بوده، که در شکل ۱۷ نمایی از آن مشاهده می‌شود. به عبارتی، ناپایداری با افزایش فاصله‌داری در حالت هیدرواستاتیکی، به شدت افزایش یافته و این تغییرات به حدی است، که بعضاً موجب ریزش می‌گردد. در حقیقت، فاصله‌داری بیشتر باعث کم شدن اصطکاک بین بلوکی و افزایش فشار آب بر بلوک‌ها شده، که این مساله از دلایل بروز ناپایداری و ریزش می‌شود.





شکل ۱۷. ناپایداری و ریزش دیواره سنگی در اثر فاصله‌داری درزه‌ها در حالت هیدرومکانیکی

### ۶- بررسی پایداری دینامیکی شیروانی سنگی مورد مطالعه

استیله و پالمستروم ( Stille and Palmström, 2008) نظریه‌ایی را تحت عنوان محاسبه فاکتور پیوستگی ارائه نمودند و با طرح این ضریب، مسیر تحلیل شیروانی‌های سنگی را مشخص کرده و فاکتور پیوستگی بر اساس رابطه (۴) محاسبه می‌گردد. چنانچه عدد فاکتور پیوستگی در محدوده بزرگتر یا مساوی ۳۰ قرار گیرد، می‌توان تحلیل را به صورت پیوسته معادل سازی شده (شبه پیوسته) در نظر گرفته و برای محاسبه این ضریب، لازم است که میانگین ابعاد بلوک‌های منطقه به‌دست آورده شود، که با استفاده از رابطه (۵) این مهم تحقق می‌یابد. در رابطه با این پروژه با توجه به عمق گود و نیز ابعاد محاسبه شده بلوک‌ها، فاکتور پیوستگی برابر با ۸۲ بدست آمده است. لذا با توجه به این عدد برای فاکتور پیوستگی، تحلیل دینامیکی با الگوی محیط شبه‌پیوسته و استفاده از روش عددی صورت پذیرفته است.

$$CF = \frac{\text{Project Dimention}}{\text{Block Dimention}} \quad (4)$$

$$\frac{1}{S_d} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i} \quad (5)$$

که در آن،  $S_d$  فاصله‌داری میانگین توده یا ابعاد بلوک و  $S_i$  فاصله‌داری میانگین هر دسته درزه و  $i$  تعداد دسته درزه‌های تشخیص داده شده می‌باشد.

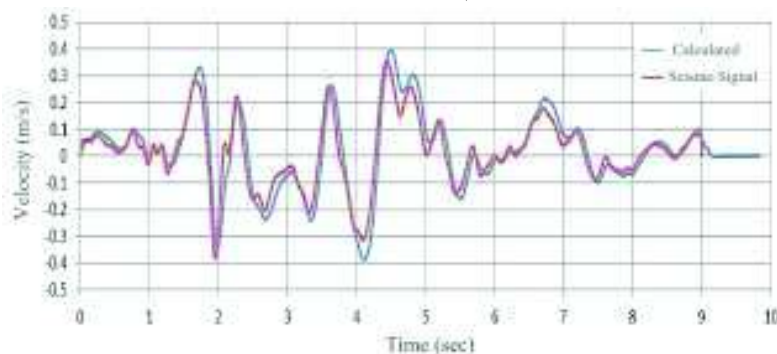
جهت تحلیل دینامیکی، اعمال بار به مدل به صورت تاریخچه تنش برشی بوده است. در این روش، ابتدا تاریخچه سرعت طبق رابطه (۶) به تاریخچه تنش برشی تبدیل شده و به کف مدل اعمال می‌گردد. در این روش هم‌زمان با اعمال بار به‌صورت تنش برشی، میراگر ویسکوز نیز به کف مدل اعمال می‌شود، تا از انعکاس موج از مرزها به داخل محیط جلوگیری نماید.

$$\sigma_s = 2(\rho C_s) v_s \quad (6)$$

که در آن  $\rho$  دانسیته خاک،  $C_s$  سرعت موج برشی در خاک،  $V_s$  سرعت ذره‌ای اعمالی به کف مدل و  $\sigma_s$  تنش برشی می‌باشند. از طرف دیگر، تاریخچه سرعت بایستی در ضریبی ضرب گردیده، تا میزان انرژی موجی که توسط میراگر جذب شده است، جبران شود. اما باید توجه داشت که این ضریب قابل‌تغییر بوده و با تغییر این ضریب سعی می‌گردد که تاریخچه سرعت حاصل پس از اعمال بار به‌صورت تنش برشی به کف مدل با تاریخچه سرعت اصلی همخوانی داشته باشد. از این روش در مواردی استفاده می‌گردد که خاک تا نیمه بی‌نهایت ادامه داشته و در مدل‌سازی عددی همه ارتفاع بستر شیروانی مدل نشده باشد ( Itasca Consulting Group, 2004). در این پژوهش پس از انجام فرآیند تکرارپذیری و کنترل، بهینه‌ترین مقدار این ضریب برابر ۱/۳ تخمین زده شده، که همخوانی تاریخچه سرعت حاصل از اعمال بار به صورت تنش برشی به کف

خارجی استفاده گردیده، که مشخصات رکوردهای آنها در جدول ۱۴ آورده شده است.

مدل در مقایسه با تاریخچه سرعت اصلی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همچنین جهت انجام تحلیل دینامیکی در این پژوهش، از چند زلزله داخلی ایران و نیز چند زلزله مهم



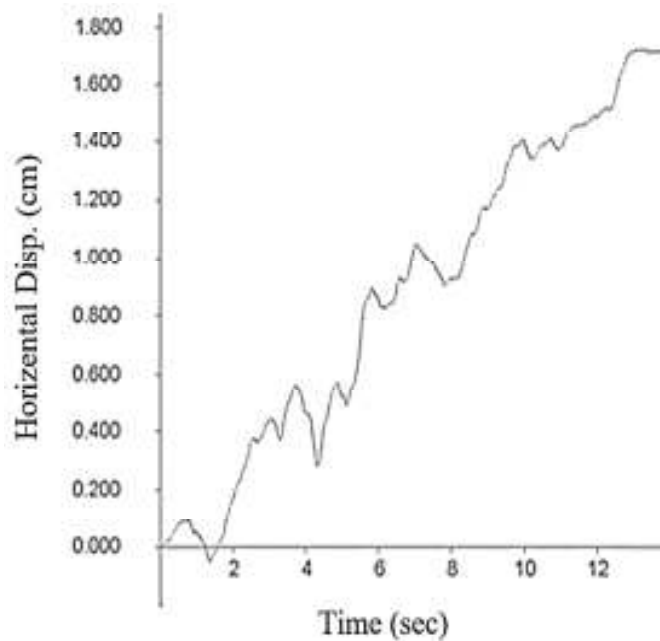
شکل ۱۸. تاریخچه تنش برشی اعمال شده به کف مدل در برابر تاریخچه سرعت برگرفته شده از نرم افزار Seismo signal

جدول ۱۴. مشخصات رکوردهای زلزله مورد استفاده در پژوهش

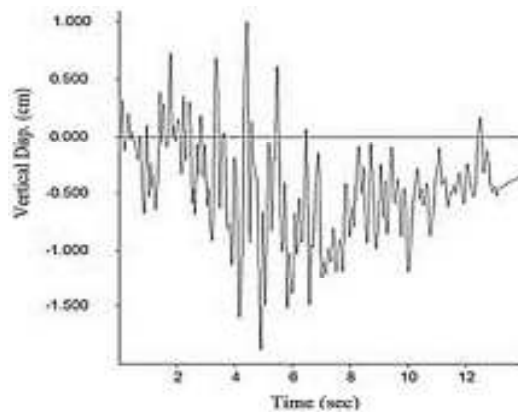
شماره	رکورد (محل وقوع-ایستگاه)	پارامتر PGA ( $m/s^2$ )	پارامتر $T_m$ (s)	پارامتر $T_p$ (s)	زمان مؤثر (s)
۱	بندرعباس	۱/۱۹	۰/۳۶۲	۰/۱۸	۱۳
۲	اسلام آباد	۴/۹۹	۰/۱۴۲	۰/۱۴	۹
۳	طیس	۷/۸۱	۰/۵۳۳	۰/۲۴	۲۵
۴	منجیل- رودبار	۵/۵۸	۰/۳۲۶	۰/۱۶	۳۵
۵	قائن	۱/۱۴	۰/۳۱۴	۰/۲۲۵	۱۴
۶	گلباف	۲/۷۱	۰/۵۵۳	۰/۴	۴۲
۷	زرنند	۳/۱۲	۰/۶۸۷	۰/۱۸	۲۵
۸	لوماپیریتا	۲/۴۶	۱/۰۶	۰/۸۲	۵۸
۹	نورتریچ	۴/۴۲	۰/۵۶۵	۰/۲۲	۹
۱۰	چی چی	۴/۴۱	۰/۴۷۱	۰/۴۴	۱۰

گرفت که در مجموع این شیروانی در مواجهه با زلزله‌های احتمالی متفاوت دارای پایداری نسبی بوده، به گونه‌ای که تحت اثر برخی از رکوردهای زلزله تغییر مکان کم و تحت اثر برخی از رکوردها تغییر مکان زیاد است و در هنگام وجود جریان آب در تحلیل‌های دینامیکی، ترانشه سنگی در اثر اعمال تمامی رکوردهای زلزله کاملاً ناپایدار می‌باشد.

شکل‌های ۱۹ و ۲۰ به ترتیب نمودار تغییرات جابجایی در تاج شیروانی در جهت افقی وعمودی در اثر اعمال رکورد زلزله بندرعباس را نشان می‌دهند. همچنین نتایج تحلیل‌های دینامیکی بر روی ترانشه سنگی مورد مطالعه حاصل از ده رکورد مختلف زلزله در جدول ۱۵ آورده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده حاصل از اعمال رکوردهای مختلف زلزله به شیروانی مورد مطالعه، می‌توان این چنین نتیجه



شکل ۱۸. نمودار تغییرات تغییر مکان تاج شیروانی در جهت افقی



شکل ۱۹. نمودار تغییرات تغییر مکان در تاج شیروانی در جهت عمودی

جدول ۱۵. نتایج تحلیل دینامیکی با رکوردهای زلزله مختلف

شماره	رکورد	حداکثر تغییر مکان تاج شیروانی	حداکثر تغییر مکان تاج شیروانی
		در جهت افقی (m)	در جهت قائم (m)
۱	بندرعباس	۰/۱۷	۰/۰۱۶
۲	اسلام آباد	۰/۱۰	۰/۰۱۰
۳	طیس	۰/۱۰	۰/۰۱۵
۴	منجیل-رودبار	۰/۴۰	۰/۰۳۰
۵	قائن	۰/۱۰	۰/۰۲۰
۶	گلباف	۰/۱۸	۰/۰۱۰
۷	زرند	۰/۲۰	۰/۰۰۸
۸	لومپیریتا	۰/۱۴	۰/۰۰۶

۹	نورتریج	۰/۵۰	۰/۰۳۰
۱۰	چی چی	۰/۳۰	۰/۰۱۶

## ۷- نتیجه گیری

۴- با فرض ثابت بودن تمامی خصوصیات توده سنگ و انجام مطالعات پارامتریک بر روی عوامل موثر بر پایداری شیروانی های سنگی، ملاحظه گردید که مقدار زاویه اتساع درزه در میزان جابجایی و پایداری استاتیکی شیروانی نقش به سزایی ندارد. ولی با تغییر زاویه اصطکاک داخلی درزه، دیواره گود با زاویه اصطکاک داخلی درزه بیش از ۳۰ درجه، پایدار و با کاهش آن به مقادیر کمتر از ۳۰ درجه، دچار ناپایداری می شود. همچنین با تغییر مقدار چسبندگی درزه، مشخص شد که شیروانی سنگی با چسبندگی درزه بیش از ۱۰ کیلوپاسکال، دارای پایدار لازم بوده و با کاهش آن به مقادیر کمتر از ۱۰ کیلوپاسکال دچار ریزش و ناپایداری می گردد. همچنین با بررسی اثر وزن مخصوص سنگ بکر و انجام آنالیز حساسیت بر روی این پارامتر، ملاحظه شد که این دیواره سنگی گود با وزن مخصوص سنگ بکر کمتر از ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب پایدار بوده و با افزایش آن به مقادیر بیشتر از ۳۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، دچار ناپایداری می شود. لازم به ذکر است که شرایط مرزی مشخص شده در این نتیجه گیری صرفاً برای این پروژه صدق می کند.

۵- در حالت تحلیل دینامیکی شیروانی سنگی و با توجه به اعمال رکوردهای مختلف زلزله به آن می توان این چنین استنباط کرد شیروانی مورد مطالعه در مواجهه با زلزله های احتمالی متفاوت دارای پایداری نسبی بوده، به گونه ای که تحت اثر برخی از رکوردهای زلزله تغییر مکان کم و برای سایر، دارای تغییر مکان زیاد است و در هنگام وجود جریان آب، ترانشه سنگی در اثر اعمال تمامی رکوردهای زلزله کاملاً ناپایدار می باشد.

## ۸- مراجع

-Ajalloian, R. and Zamani, S., (2014), "Applied Streonet", Isfahan University, Isfahan, Iran, (In Persian).

-Cundall, P. A., (1971), "A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems." Proc.

در این مقاله، پایداری استاتیکی و هیدرواستاتیکی شیروانی های سنگی با مطالعه رفتار یک دیواره گودبرداری شده به عمق ۱۵ متر در یک لایه سنگی شیل واقع در جنوب غرب اصفهان با در نظر گرفتن اثرات ناهمسانگردی ساختاری ناشی از حضور بلوکها و درزه های سنگی و فشار آب حفره ای تحلیل گردیده و عوامل موثر و جوانب مختلف آنها مورد بحث و بررسی قرار داده شده است. چالش اساسی موجود در این نوع شیروانی ها، حضور مصالح سنگی و روی دادن ریزش های بلوکی همزمان با تراوش آب از میان درزه ها است. برداشت اطلاعات تعداد شاخصی از درزه های منفرد و تحلیل ساختاری آنها توسط راهبرد مبتنی بر شبکه استریونت در برنامه DIPS و نرم افزارهای آماری انجام شده و در پایان، تحلیل استاتیکی و هیدرواستاتیکی و دینامیکی با استفاده از نرم افزار UDEC انجام گرفته است. با بررسی و مقایسه نمودارهای نتایج بدست آمده، می توان نتیجه گرفت:

۱- در محیط های سنگی درزه دار، جهت داری دسته درزه ها نقش بسیار مهمی را در پایداری یا ناپایداری ایفا می کند. انتخاب نامناسب جهت داری دسته درزه ها موجب ناپایداری در شیروانی شده است. همچنی فاصله داری تاثیر به سزایی در پایداری شیروانی دارد، به نحوی که با افزایش اندازه آن، ضریب اطمینان پایداری شیروانی افزایش و کاهش اندازه فاصله داری، باعث کاهش ضریب اطمینان به مقادیر کمتر از یک و ناپایداری گود گردیده است.

۲- با ورود جریان هیدرواستاتیکی، شیروانی سنگی دچار ناپایداری می گردد، به گونه ای که این ناپایداری همراه با ریزش بوده و می توان چنین بیان نمود که علت این ناپایداری دیواره، فشار آب حفره ای موجود در منطقه می باشد. لازم به ذکر است که نوع سنگ منطقه، وجود درزه ها و نوع جهت داری آنها همراه با پرشدگی ضعیف نیز عاملی بر تشدید ناپایداری بوده است.

۳- بر خلاف حالت تحلیل پایداری بدون حضور آب منفذی و وجود جریان آب، زیاد شدن فاصله داری در حالت هیدرومکانیکی باعث افزایش ناپایداری شیروانی و کاهش ضریب اطمینان به مقادیر کمتر از یک می گردد.

- illustrative workable examples, in: Sarkka P, Elornata P, editors. Oxford: Pergamon.
- Iran Khak Consulting Co., (2010), "Geotechnical Investigation of Isfahan International Conferences Center".
- Itasca Consulting Group Inc, (2004), "Manual of Universal Distinct Element Code (UDEC), Minneapolis", Minnesota, USA.
- Jeen-Shang, L., and Whitman, R. V. (1983), "Decoupling approximation to the evaluation of earthquake induced plastic slip in earth dams". *Earthquake engineering and structural dynamics*, 11(5), pp.667-678.
- Lemos, J. V., Hart, R. D. and Cundall, P. A., (1985), "A generalized distinct element program for modelling jointed rock mass". In *International Symposium on Fundamentals of Rock Joints*. Bjokliden: [Sn]. pp.335-343.
- Maleki Javan, M. R., Kilanehei, F., and Mahjoob, A., (2015), "Rock slope stability analysis using discrete element method". *International Journal of Transportation Engineering*, 2(3), pp.199-212.
- Morris, J., Glenn, L. and Blair, S., (2003), "The distinct element method—application to structures in jointed rock". In *Meshfree Methods for Partial Differential Equations*, (22), pp.291-306.
- Newmark, N. M., (1965), "Effects of Earthquakes on Dams and Embankments". *Geotechnique*, 15, pp.139-160.
- Pal, S., Kaynia, A. M., Bhasin, R. K. and Paul, D. K. (2012), "Earthquake stability analysis of rock slopes: a case study". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(2), pp.205-215.
- Shen, H. and Abbas, S. M. (2013), "Rock slope reliability analysis based on distinct element method and random set theory". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 61, pp.5-22.
- Stille, H., and Palmström, A., (2008), "Ground behaviour and rock mass composition in underground excavations", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol, 23.1, pp. 46-64.
- Symp. Rock Fracture (ISRM), Nancy, pp.2-8.
- Cundall, P. A., (1980), "A Generalized Distinct Element Programing for Modelling Jointed Rock". Peter Cundall Associates, Report PCAR-1-80, European Research Office, U.S. Army, Contract DAJA. (0548), pp.37-79.
- Cundall, P. A., (1982), "Adaptive density-scaling for time-explicit calculations." *Procs. 4th. International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*. Edmonton, Canada. (1), pp.23-26.
- Cundall, P. A., (1988), "Formulation of a three-dimensional distinct element model—Part I. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 25(3), pp.107-116.
- Dong, J. J., Tzeng, J. H., Wu, P. K., and Lin M. L., (2006), "Effects of anisotropic permeability on stabilization and pore water pressure distribution of poorly cemented stratified rock slopes". *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 30(15) pp.1579-1600.
- Doug, S., Eberhardt, E., Coggan, J. and Benko, B., (2001), "Advanced numerical techniques in rock slope stability analysis—applications and limitations". *International Conference on Landslides-Causes, Impacts and Countermeasures*, pp.615-624.
- Hart, R. D., (1993), "An introduction to distinct element modeling for rock engineering". In: Hudson (Ed.), *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects*, (2), pp. 245-261.
- Hosseinitoudeshki, V. and Kayalha, A., (2014), "The effect of pore pressure on the rock slope stability". *Journal of Novel Applied Sciences*, 3(5), pp.547-550.
- Hudson, J. A., and Harrison, J. P., (2000), "Engineering rock mechanics", part2: