

مدل‌سازی گسیختگی واژگونی بلوکی - خمشی پیشرونده با استفاده از روش عددی المان مجزا (مطالعه موردی: دامنه‌ای در منطقه ویژه پارس جنوبی)

محمد آذرافزا^۱، اکبر قاضی‌فرد^{۲*}، ابراهیم اصغری کلجاهی^۳

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۳ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۳۱

چکیده

واژگونی بلوکی - خمشی به دلیل درگیر کردن مکانیسم‌های گسیختگی چندگانه (لغزش، دوران، خمش و برش) در بلوک‌های سنگی همواره تنها به صورت رویکردهای کینماتیک تحلیل شده و مکانیسم ناپایدارساز آن کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله سعی گردیده تا با بکارگیری روش المان مجزا (DEM) توسط نرم‌افزار UDEC، مکانیسم گسیختگی واژگونی بلوکی - خمشی که پیچیده‌ترین نوع ناپایداری در دامنه‌های سنگی درزه‌دار است، بررسی شود. بدین منظور یک دامنه سنگی درزه‌دار واقع در بزرگراه عسلویه - کنگان (منطقه ویژه پارس جنوبی) که به لحاظ مواصلاتی در منطقه دارای اهمیت بالایی می‌باشد، به عنوان مطالعه موردی انتخاب گردیده است. این دامنه از آهک‌های مارنی درزه‌دار سازند آغاچاری تشکیل شده است. بر پایه نتایج حاصل از مدل‌سازی، رویکرد عددی بکارگرفته شده، به صورت موفقیت‌آمیزی سناریو لغزش پیش‌رونده در دامنه را شبیه‌سازی نموده و سطح لغزش نهایی بحرانی برای گسیختگی دامنه تحت مکانیسم واژگونی بلوکی - خمشی برآورد شده است. همچنین مکانیسم‌های گسیختگی چندگانه نیز به صورت کاملاً مشخص شناسایی گردیده است. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، گسترش سطح گسیختگی به هر دو حالت بین بلوکی و درون بلوکی مشاهده می‌گردد که از ویژگی‌های مهم واژگونی بلوکی - خمشی است. وقوع دوران در زمان گسیختگی برای ستون‌های شکسته شده نیز مشاهده می‌گردد.

کلید واژه‌ها: واژگونی بلوکی - خمشی، روش المان مجزا (DEM)، شبیه‌سازی کامپیوتری، تحلیل پایداری، عسلویه.

۱. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۲. دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان a.ghazifard@sci.ui.ac.ir

۳. دانشیار گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

بررسی ناپایداری در دامنه‌های سنگی درزه‌دار یکی از مهمترین رویکردهای مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد که همواره به عنوان یک مسئله برای پروژه‌های عمرانی مطرح است. این دامنه‌های سنگی درزه‌دار تحت شرایط مختلف ساختگاهی تحت حالات مختلف گسیختگی مانند سقوط، واژگونی، لغزش، جریان، ریزش و... می‌باشند (Wyllie and Mah, 2004). در این میان گسیختگی‌های واژگونی به دلیل تفاوت اساسی در مکانیسم ناپایداری کمتر مورد توجه بوده، به طوری که عمده تحلیل‌های صورت گرفته محدود به تحلیل‌های کینماتیک و برآورد احتمال رخداد آن می‌باشد (Amini et al., 2017). اولین تحقیقات ارزیابی ناپایداری واژگونی در دامنه‌های سنگی، مربوط به بررسی گسیختگی واژگونی مولر می‌باشد (Müller, 1968). بعد از ایشان اشبی (Ashby, 1971) و کوندال (Cundall, 1971) در سال ۱۹۷۱ مطالعاتی بر روی این نوع گسیختگی دامنه داشته‌اند. ایشان با بکارگیری رویکردهای کامپیوتری سعی بر تحلیل پایه‌ای گسیختگی واژگونی بلوکی نمودند. بعد از آن گسیختگی واژگونی بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. گودمن و بری (Goodman and Bray, 1976) محققینی هستند که به صورت جامع بر روی گسیختگی واژگونی مطالعات انجام دادند. آنها با طبقه‌بندی گسیختگی‌های واژگونی، مکانیسم‌های مختلفی را برای این گروه‌بندی‌ها ارائه نمودند. آنها پیشنهاد کردند که پدیده واژگونی در دو گروه واژگونی‌های اصلی و ثانویه طبقه‌بندی شود. گروه واژگونی‌های اصلی شامل سه دسته به نام‌های واژگونی بلوکی^۱، واژگونی خمشی^۲ و واژگونی بلوکی-خمشی^۳ است. واژگونی‌های ثانویه حالات مختلف واژگونی مرکب (مانند لغزش پای شیب، لغزش ستونی، ریزش ستونی، سایش زیر اساس، تخریب پنجه و...) را شامل می‌شود. لغزش‌های ثانویه بیشتر به دلیل پیچیدگی در شرایط زمین‌شناسی و ژئومکانیکی در پوسته زمین رخ می‌دهند و

حالات خاص و نقطه‌ای می‌باشند. اما لغزش‌های اصلی مکانیسمی مشابه را دنبال می‌کنند. شکل (۱) انواع گسیختگی‌های واژگونی را نشان می‌دهد. با ورود کامپیوتر به علوم مهندسی به خصوص مهندسی ژئوتکنیک انجام تحلیل‌های پیچیده و حل معادلات گسترده دیفرانسیلی ممکن گردیده است. از این رو بکارگیری رویکردهای مختلف مانند روش‌های تعادل حدی^۴، روش‌های عددی^۵، رویکردهای هیبریدی^۶ و حل رده بالا^۷ به منظور بررسی و تحلیل پایداری مربوط به ساختارهای ژئومکانیکی به خصوص دامنه‌های خاکی و سنگی به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (Jing and Hudson, 2002). به هر حال در گسیختگی‌های واژگونی اصلی، لغزش واژگونی نوع بلوکی-خمشی به عنوان پیچیده‌ترین حالت لغزش در توده‌های سنگی درزه‌دار معرفی می‌شود. در این مطالعه به ارزیابی مکانیسم این نوع گسیختگی با یک مطالعه موردی پرداخته شده است.

۲. واژگونی بلوکی-خمشی

گسیختگی بلوکی-خمشی حالت ویژه‌ای از گسیختگی با مکانیسم ترکیبی از ریزش و دوران بلوکی ستون‌های سنگی و برش حاصل از خمش بلوک‌های میانی می‌باشد. مکانیسم گسیختگی بلوکی و گسیختگی خمشی توسط محققین مختلف با بکارگیری رویکردهای گوناگون تحلیل شده است (Amini et al., 2009; Brideau and Stead, 2010; Azarafza et al., 2017b). اما مطالعه مربوط به مکانیسم گسیختگی بلوکی-خمشی بسیار محدود می‌باشد (Alejano et al., 2010). امینی و همکاران توصیف مبسوطی مربوط به این نوع گسیختگی به صورت حدی برای دو حالت ارائه نموده است (Amini et al., 2012). این مکانیسم در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است. این محققین معتقدند که مجموعه نیروهای اعمالی برای هر حالت، در بیشترین مقدار برابر با

⁴ Limit equilibrium methods

⁵ Numerical methods

⁶ Hybrid approaches

⁷ High order solutions

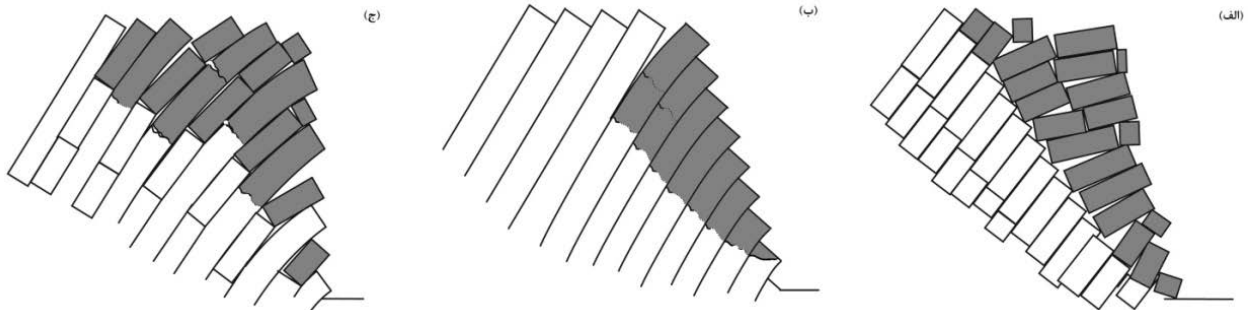
¹ Block toppling

² Flexural toppling

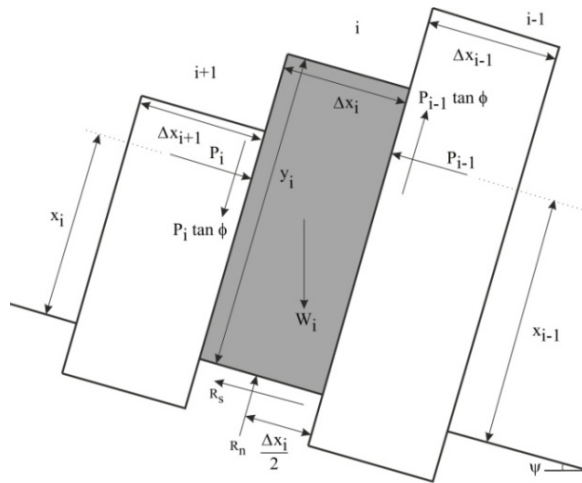
³ Block-flexural toppling

برآورد پارامتریک ورودی‌های مطرح شده توسط این محققین بسیار دشوار بوده و امکان ارزیابی سناریو لغزش وجود ندارد.

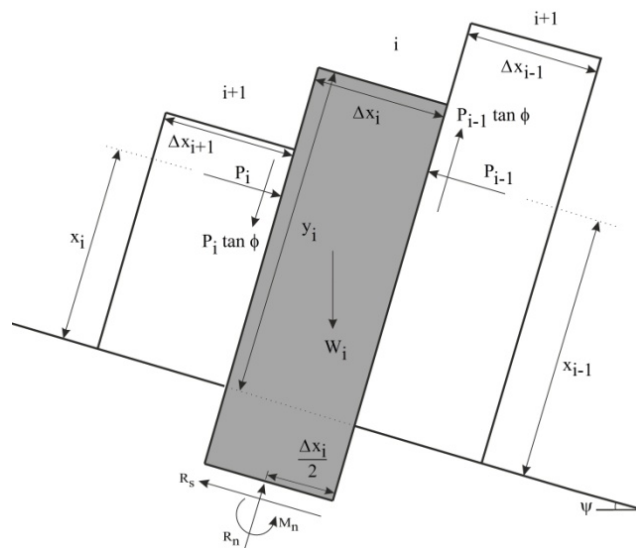
میزان برآیند نیروهای وارده می‌باشد. اگرچه رویکرد ارائه شده توسط این محققین یک روش جامع، پایه و بسیار مناسب برای تحلیل گسیختگی بلوکی - خمشی به شمار می‌آید، عملاً



شکل ۱. انواع گسیختگی‌های واژگونی: (الف) بلوکی، (ب) خمشی، (ج) بلوکی - خمشی (Goodman and Bray, 1976).



شکل ۲. مکانیسم گسیختگی بلوکی - خمشی (حالت اول) در تحلیل امینی و همکاران (Amini et al., 2012).



شکل ۳. مکانیسم گسیختگی بلوکی - خمشی (حالت دوم) در تحلیل امینی و همکاران (Amini et al., 2012).

مکانیسم پیش‌رونده آن سبب می‌گردد تا با مشاهده شرایط اولیه لغزش، دامنه در کمترین زمان ممکن پایدار گردیده و مشکلات ناشی از آن پیش از وقوع کنترل گردد (Azarafza et al., 2017ba). به طور کلی دو مکانیسم اصلی در رخداد گسیختگی بلوکی - خمشی وجود دارد. مکانیسم لغزش بلوکی که بر روی سطوح ناپیوستگی رخ می‌دهد. مکانیسم برش خمشی که در ستون‌های سنگی سالم بین بلوک‌های اطراف وجود دارد. بدین منظور از رویکرد عددی المان مجزا^۸ (DEM) برای تحلیل لغزش‌های محدود شده بر روی ناپیوستگی‌ها و الگوریتم ورونوی دیاگرام^۹ برای مدل‌سازی و تحلیل گسترش سطح لغزش در محدوده داخلی ستون سنگی که سبب ایجاد برش در بین ذرات^{۱۰} در ستون سنگ می‌شود، استفاده شده است. روش المان مجزا به بررسی تغییرات گسسته در محیط ناهمسانگرد و ناپیوسته (Itasca, 2008) می‌پردازد. در مورد مسئله مربوط به گسیختگی بلوکی - خمشی تغییرات در محیط گسسته و احتمال گسترش ترک در بدنه پیوسته ستون‌های سنگی مطرح بوده و همچنین مسئله مربوط به تغییر شرایط محیطی پیوسته به گسسته و برعکس نیز وجود دارد. به منظور پوشش تغییر شرایط به صورت گذر از پیوسته به گسسته و گسیختگی بین ذرات در ستون‌های سنگی، بهترین رویکرد مطرح ورونوی دیاگرام می‌باشد که بکار گرفته شده است.

۳. مطالعه موردی

دامنه سنگی درزه‌دار مورد بررسی در کنار بزرگراه عسلویه - کنگان در منطقه ویژه پارس جنوبی^{۱۱} واقع شده است. این منطقه به لحاظ اقتصادی و صنایع بالادستی کشور بسیار مهم بوده و به عنوان پایه اصلی اقتصاد ملی مطرح می‌باشد. این نقطه نظر سبب گردیده تا حساسیت در تامین پایداری‌ها ساختگاه پروژه‌های عمرانی بیش از پیش مشخص گردد. در

برای حالت اول داریم (Amini et al., 2012):

$$P_{i-1}^A = \max[P_{i-1}^I, P_{i-1}^II, P_{i-1}^III, P_{i-1}^IV, 0] \quad (1)$$

$$P_{i-1}^I = P_i \frac{\left(x_i - \tan \phi \cdot \frac{1}{FOS} \Delta x_n\right)}{y_i} \quad (2)$$

$$P_{i-1}^{II} = P_i + \frac{\frac{1}{2} W_i [y_i \sin \psi - \Delta x_i \cos \psi]}{y_i} + \frac{W_i \left[\sin \psi - \cos \psi \tan \frac{1}{FOS} \phi \right]}{1 - \tan \phi \tan \frac{1}{FOS} \phi} \quad (3)$$

$$P_{i-1}^{III} = P_i \frac{\left[\frac{1}{2} y_i \left(1 + \tan \phi \tan \frac{1}{FOS} \phi \right) - \Delta x_i \tan \phi \right]}{y_{i-1} - \frac{1}{2} y_i \left[1 - \tan \phi \tan \frac{1}{FOS} \phi \right]} + \frac{\frac{1}{2} W_i \cos \psi \left[y_i \tan \frac{1}{FOS} \phi - \Delta x_i \right]}{y_{i-1} - \frac{1}{2} y_i \left[1 - \tan \phi \tan \frac{1}{FOS} \phi \right]} \quad (4)$$

$$P_{i-1}^{IV} = P_i \frac{\left[\frac{4 \Delta x_i^2 - 2 y_i^2 - 6 y_i \Delta x_i \tan \phi}{4 (\Delta x_i^2 - y_i^2) - 6 y_i y_{i-1}} + \frac{\left(\tan \phi \left(\frac{2 \Delta x_i^2 - 4 y_i^2}{FOS} \right) + 6 y_i \Delta x_i \right)}{FOS} \right]}{\tan \phi \left[6 y_{i-1} \Delta x_i + 4 \tan \phi \frac{1}{FOS} x_i^2 + y_i^2 \right]} + \frac{W_i \left\{ \sin \psi (4 \Delta x_i^2 + y_i^2 - 3 y_i \Delta x_i \tan \phi) - [4 (\Delta x_i^2 + y_i^2) - 6 y_i y_{i-1}] - \cos \psi [(\Delta x_i^2 + 4 y_i^2) \tan \phi - 3 y_i \Delta x_i] \right\}}{\tan \phi (6 y_{i-1} \Delta x_i + 4 \tan \phi \frac{1}{FOS} x_i^2 + y_i^2)} \quad (5)$$

و برای حالت دوم داریم (Amini et al., 2012):

$$P_{i-1}^B = P_i \frac{\left[x_i - \frac{1}{2} \Delta x \tan \phi \right] + W_i \left[\frac{1}{2} y_i \sin \psi \right] - M_i}{x_{i-1} + \frac{1}{2} \Delta x \tan \phi} \quad (6)$$

پارامترهای بیان شده در روابط فوق، در شکل‌های (۲) و (۳) معرفی شده است. به هر حال، در مورد بررسی ناپایداری در دامنه‌های سنگی درزه‌دار، تعیین سطح لغزش محتمل اهمیت بالایی دارد، به طوری که بر پایه تعیین سطح لغزش بحرانی امکان پیاده‌سازی مناسب‌ترین روش پایدارسازی ایجاد خواهد شد. از سویی دیگر فهم مکانیسم رخداد گسیختگی و

⁸ Distinct element method

⁹ Voronoi diagrams algorithm

¹⁰ Particles

¹¹ South Pars Special Zone



شکل ۵. تصویری از توده سنگ دامنه مورد مطالعه

۳-۱. مدل‌سازی هندسی

به منظور برآورد پارامتریک ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها اقدام به بازدید و مطالعات ژئومکانیکی و درزه‌نگاریشده است جهت تعیین ویژگی‌های هندسی^{۱۲} ناپیوستگی‌ها، از رویکرد خط برداشت^{۱۳} و درزه برداری خطی^{۱۴} استفاده گردیده است. این دستورالعمل‌ها به صورت جامع توسط هادسون و هریسون (Hudson and Harrison, 1997). نتایج حاصل از برداشت ناپیوستگی‌های مربوط به دامنه مورد بررسی به صورت کانتور دیاگرام در شکل (۶) آورده شده است. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل کینماتیک نشان داده شده در شکل مذکور، رخداد گسیختگی واژگونی در توده محتمل می‌باشد. همچنین در جدول (۱) خلاصه‌ای از برداشت‌های هندسی درزه‌داری آورده شده است.

۳-۲. تعیین خصوصیات توده سنگ و مدل رفتاری

بعد از پیاده‌سازی خصوصیات هندسی و ساخت مدل هندسی دامنه مورد بررسی، مدل رفتاری و خصوصیات ژئومکانیکی برای توده باید لحاظ گردد. مدل رفتاری عاملی برای شناسایی عملکرد مقاومتی توده می‌باشد که به وسیله روابط تجربی پارامتریک مقاومتی (به ویژه مقاومت فشاری و برشی) بیان می‌گردد (Goodman, 1989).

شکل (۴) موقعیت جغرافیایی منطقه ویژه پارس جنوبی (عسلویه) و در شکل (۵) نمایی از دامنه مورد مطالعه نشان داده شده است. این دامنه به لحاظ زمین‌شناسی متشکل از سنگ‌های آهک مارنی درزه‌دار سازند آغاچاری است. سازند آغاچاری جزو سازندهای نئوژن محسوب می‌شود (آقناباتی، ۱۳۸۵). این دامنه به لحاظ ساختاری تحت شرایط گسیختگی واژگونی از نوع بلوکی - خمشی می‌باشد. ناپایداری‌های حاصل از ریزش بلوکی این دامنه سبب گردیده تا مشکلاتی برای بزرگراه ایجاد شود. به منظور تحلیل پایداری و مطالعه عددی مکانیسم و سناریو گسیختگی اقدام به شبیه‌سازی توده-سنگی میزبان گردیده است. در این راستا شبیه‌سازی در سه مرحله به صورت، مدل‌سازی هندسی، تخصیص خصوصیات مصالح و مدل رفتاری و مدل‌سازی مکانیکی صورت پذیرفته است.



شکل ۴. موقعیت جغرافیایی منطقه ویژه پارس جنوبی و دامنه

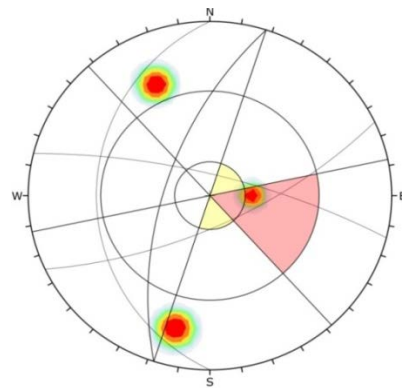
مورد مطالعه روی نقشه ایران و عکس ماهواره‌ای

¹² Geometrical properties

¹³ Scan-line survey

¹⁴ Linear mapping

در این مطالعه به منظور بررسی رفتار توده سنگ از معیار گسیختگی مور- کولمب استفاده شده است. انتخاب این معیار به عنوان پایه برای تحلیل پایداری در محیط پوسته با واقعیت مرتبط با توده های سنگی و خاکی نزدیک می باشد. شایان ذکر است که این معیار رفتارهای خطی و غیرخطی توده سنگ را در برآورد پارامترهای مقاومتی لحاظ می کند. از سوی دیگر با آزمایش چکش اشمیت (ASTM D5873) و نمونه برداری و انجام آزمایشات ژئوتکنیکی شامل تعیین وزن مخصوص (ASTM D4914)، آزمون فشاری تک محوری (ASTM D7012)، آزمون بارگذاری نقطه ای (ASTM D5731) و برش مستقیم (ASTM D3080) پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ میزبان دامنه تعیین گردیده است. نتایج حاصل از آزمون های مذکور در جدول (۲) خلاصه گردیده است.



Symbol	Feature		
=	Critical Intersection		
Color	Density Concentrations		
	0.00 - 3.40		
	3.40 - 6.80		
	6.80 - 10.20		
	10.20 - 13.60		
	13.60 - 17.00		
	17.00 - 20.40		
	20.40 - 23.80		
	23.80 - 27.20		
	27.20 - 30.60		
	30.60 - 34.00		
Maximum Density 33.19%			
Contour Data Pole Vectors			
Contour Distribution Fisher			
Counting Circle Size 1.0%			
Kinematic Analysis Direct Toppling			
Slope Dip 62			
Slope Dip Direction 288			
Friction Angle 22°			
Lateral Limits 30°			
	Critical	Total	%
Direct Toppling (Intersection)	1	3	33.33%
Oblique Toppling (Intersection)	0	3	0.00%
Base Plane (All)	1	3	33.33%
Plot Mode Pole Vectors			
Vector Count 3 (3 Entries)			
Intersection Mode Grid Data Planes			
Intersections Count 3			
Hemisphere Lower			
Projection Equal Angle			

شکل ۶. کانتور دیاگرام هندسی ناپیوستگی ها

جدول ۱. ویژگی های هندسی و ناپیوستگی توده سنگ دامنه

پارامتر	توضیحات
ارتفاع دامنه (m)	۱۵
شیب دامنه (°)	۸۶
توپوگرافی	پرتگاهی
هندسه	دامنه طبیعی
تعداد دسته درزه ها	۳
توصیف درزه نگاری	۲۶/۲۷۰ دسته درزه ۱
(جهت شیب / شیب)	۷۶/۰۱۴ دسته درزه ۲
	۷۰/۱۵۵ دسته درزه ۳
	۰/۷۲ دسته درزه ۱
فاصله داری درزه ها (m)	۱/۰ دسته درزه ۲
	۱/۶۷ دسته درزه ۳
سنگ شناسی	آهک مارنی قهوه ای

جدول ۲. خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ دامنه

پارامتر	واحد	ارزش (مقدار)
چسبندگی	MPa	۱۲
زاویه اصطکاک داخلی	deg.	۲۸
وزن مخصوص	kN/m ³	۲۲/۲۰
مدول الاستیسیته	GPa	۲/۳۷
مدول برشی	GPa	۰/۹۱
مدول بالک	GPa	۱/۹۷
نسبت پواسون	-	۰/۳۰
ضریب سختی نرمال درزه	GPa	۱/۳۰
ضریب سختی برشی درزه	GPa	۲/۱۰

۳-۳. مدل سازی مکانیکی

شبه سازی مکانیکی صورت گرفته در این مطالعه بر پایه رویکردهای عددی المان مجزا و الگوریتم ورونوی می باشد. در این زمینه معروف ترین و پرکاربردترین نرم افزار المان مجزا در زمینه مهندسی عمران یعنی UDEC بکار گرفته شده است. نرم افزار UDEC نرم افزار المان مجزا برای تحلیل دو بعدی ساختارهای ناپیوسته در مهندسی ژئوتکنیک می باشد که توسط شرکت آیتسکا (Itasca, 2008) توسعه داده شده است. توانایی

تصادفی هندسی مصالح زمینی هموزن و پیوسته (محیط پیوسته^{۱۷}) می‌باشد (Gallier, 2012). این الگوریتم با تولید ذرات هندسی تصادفی امکان ایجاد مکانیسم‌های لغزش و دوران ذرات به صورت صلب- پیوسته را فراهم می‌کند. در نتیجه امکان تحلیل پیچیدگی و سناریو لغزش برای این مصالح با دقت کافی ممکن خواهد بود. به طور کلی هر عدد صحیح مثبت در فضای n بُعدی دارای n بُعد از ورونوی دیاگرام می‌باشند. با توجه به این که مطالعه حاضر مبتنی بر تحلیل دو بُعدی می‌باشد، بُعد ورونوی دیاگرام برای این فضا به صورت زیر قابل تعریف است (Sukumar and Bolander, 2009):

$$A = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_i\} \in \mathbb{R}^2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} n_{i,j} &\in \{P, Q: P_i \rightarrow i \neq j\} \\ P &= \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_i\} \\ Q &= \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_i\} \end{aligned} \quad (8)$$

این روابط سبب تولید نقاط تولید تصادفی در محدوده لحاظ شده می‌گردد که بسته به نوع رده بُعد محاسبات دارد. بدین ترتیب برای تحلیل دو بُعدی داریم (Sukumar and Bolander, 2009):

$$1^{st} \text{ order: } V_i = \{x \in \mathbb{R}^1: \partial(x, x_i) < \partial(x, x_j), \forall i \neq j\} \quad (9)$$

$$2^{nd} \text{ order: } V_{i,j} = \{x \in \mathbb{R}^2: \partial(x, x_i) < \partial(x, x_j) < \partial(x, x_k), \forall k \neq i, j\} \quad (10)$$

اگر $p_i(x_{i1}, x_{i2})$ نشان دهنده موقعیت فضایی بردار باشد $\forall i, j = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ و $(2 \leq x < \infty)$ بنابراین:

$$V(p_i) = \{\bar{x} \mid \|\bar{x} - \bar{x}_i\| \leq \|\bar{x} - \bar{x}_j\|, i \neq j \in \forall j\} \quad (11)$$

$$V_{i,j} = V_i \cap V_j = e(p_i, p_j) \quad (12)$$

این روابط V به نام هندسه ورونوی معرفی می‌شود. این الگوریتم امکان شبیه‌سازی انتشار ترک را در بدنه مصالح صلب و جامد هموزن و ایزوتروپ را فراهم می‌کند. این نقطه نظر در مورد ستون‌های سنگی مطرح شده در این مطالعه صدق می‌کند. بدین ترتیب امکان مدل‌سازی مکانیسم گسترش ترک به صورت پیوسته با دو مکانیسم مرتبط با لغزش و دوران (که در گسیختگی واژگونی بلوکی - خمشی نقش مهمی ایفا می‌کنند) وجود خواهد داشت. همان طور که بیان

این نرم‌افزار در تحلیل محیط‌های ناپیوسته، سبب گردیده است که به صورت گسترده در زمینه‌های مختلف مهندسی ژئوتکنیک در مباحث مکانیک جامدات گسسته (مانند سنگ و بتن) بکارگرفته شوند. مزایای استفاده از این نرم‌افزار در تحلیل پایداری سنگهای درزه‌دار به شرح زیر است:

- توصیف هندسی و مکانیکی سناریو گسیختگی پیشرونده،
- تقریب مناسب سطح گسیختگی و گسترش شکست برشی در توده سنگ میزبان،
- لحاظ نمودن اثرات مربوط به وضعیت و آرایش تنش در ناحیه درون ستون‌های سنگی،
- تشخیص مکانیسم لغزش در نواحی مختلف به صورت شکست پیوسته،
- تدقیق وضعیت مربوط به سطح گسیختگی بحرانی مربوط به گسیختگی‌های پیچیده،
- امکان ایجاد همپوشانی مشخص برای دست یابی به هندسه نهایی در لغزش بحرانی توده،
- امکان پیشنهاد بهینه و بررسی عملکرد سیستم‌های نگهدارنده موقت و دائم.

۴. نتایج مدل‌سازی عددی

این بخش به ارائه مدل‌های تهیه شده توسط رویکرد عددی المان مجزا (DEM) و الگوریتم توسعه هندسی ورونوی (Aurenhammer et al., 2013) پرداخته و سناریو گسیختگی پیشرونده مربوط به گسیختگی دامنه مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار می‌گردد. شکل (۷) مدل هندسی تهیه شده از دامنه مورد مطالعه را توسط روش المان مجزا نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشخص است به منظور پوشش گسیختگی بین ذرات مصالح سنگی مربوط به داخل ستون‌های سنگی از الگوریتم ورونوی بهره گرفته شده است. الگوریتم ورونوی به عنوان قوی‌ترین الگوریتم مطرح در تولید شبکه هندسی مصالح صلب^{۱۵} (محیط گسسته^{۱۶}) برای تقسیم‌بندی

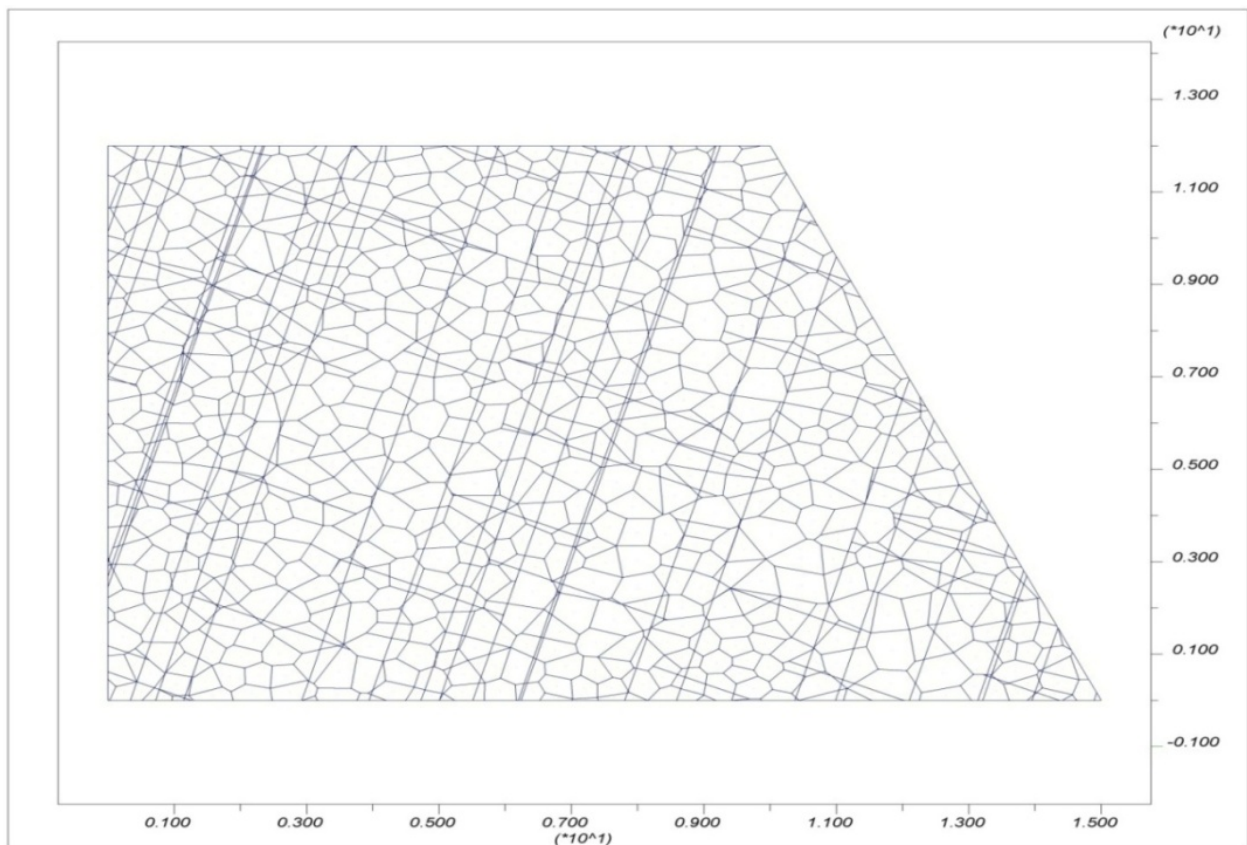
¹⁵ Rigid-body geometry networks generators

¹⁶ Discrete media

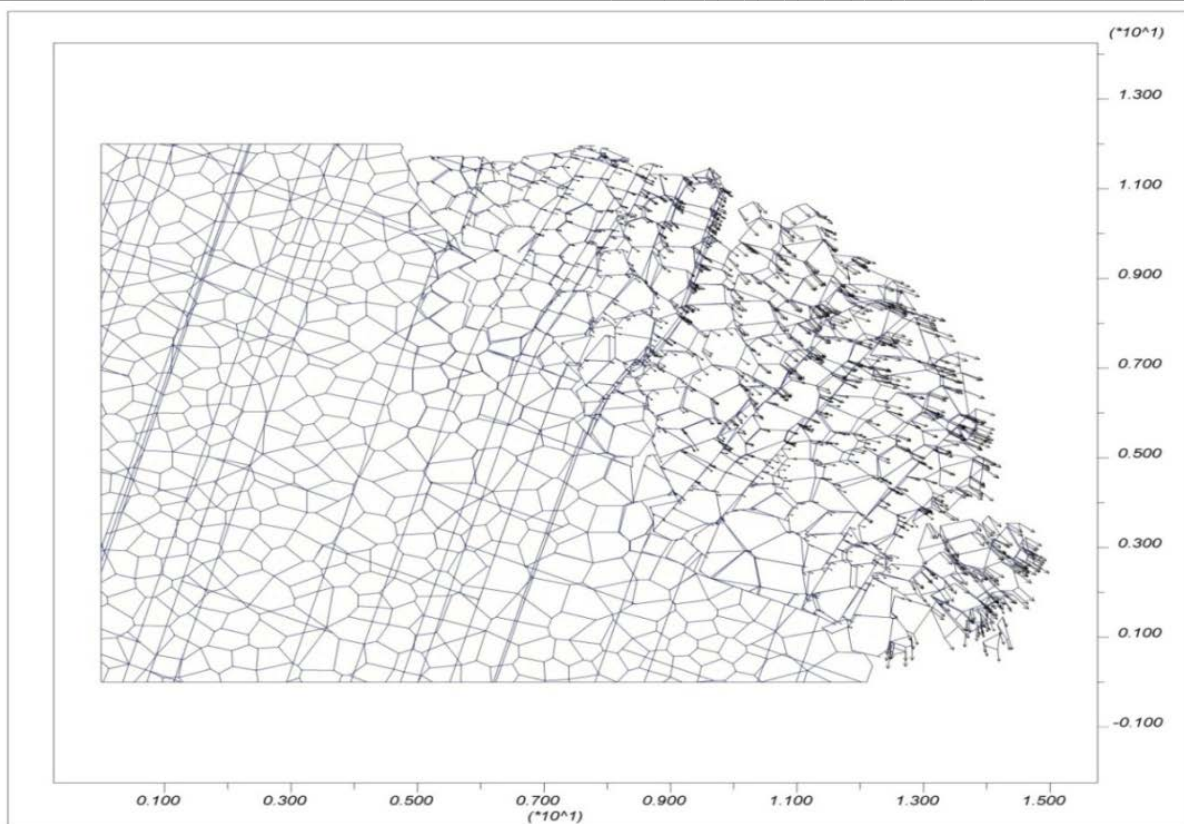
¹⁷ Contiguous media

لحاظ نمودن حداکثر جابجایی تحت آرایش تنش‌های برجا در کل توده ممکن است. همچنین نیروهای نامتعادل کننده مربوط به واژگونی پیشرونده در شکل (۱۲) و تاریخچه جابجایی افقی در بلوک اولیه و ناحیه گذر در مرز سلول‌های ورنوی تا شکست نهایی ستون سنگی در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۲)، ناپایداری (عدم تعادل نیرویی) کل توده قابل بیان می‌باشد. این مسئله نیز در واقعیت نیز مشاهده می‌شود. به طوری که مشکل ریزش و واژگونی بلوک‌های سنگی در محدوده جاده همواره وجود دارد. از سویی دیگر در شکل (۱۳) وجود ۲ اوج آنومالی در میان مسیر جابجایی نشان دهنده اعمال فشار شکننده و تعادل میان دو اوج آنومالی بیانگر تغییر در مکانیسم لغزش به دوران به لحاظ اعمال خمش در ستون سنگی تفسیر می‌گردد.

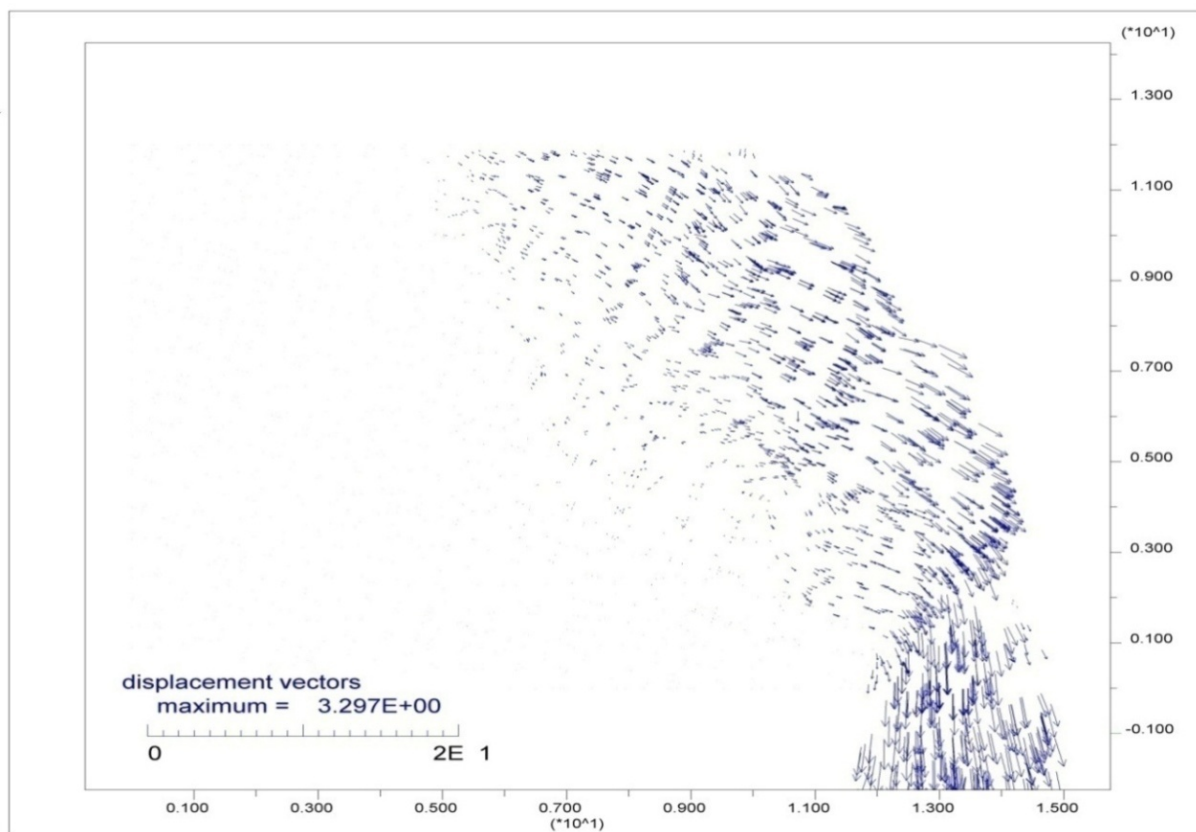
شد مدل رفتاری مد نظر برای تعیین رفتار مکانیکی توده سنگ، معیار گسیختگی مور-کولمب می‌باشد (Hudson and Harrison, 1997). با استفاده از مدل رفتاری فوق و خصوصیات برآورد شده توسط آزمون‌های ژئوتکنیکی (جدول ۲)، مدل مکانیکی دامنه مورد مطالعه تهیه گردیده است. این مدل در شکل (۸) آورده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، واژگونی رخ داده در دامنه سنگی درزه‌دار بر پایه مکانیسم‌های لغزش و دوران به صورت ترکیبی مشهود است. همچنین به صورت واضح سطح لغزش بحرانی نهایی برای دامنه قابل اندازه‌گیری می‌باشد. در شکل‌های (۹) تا (۱۱) وضعیت جابجایی، سرعت گسیختگی و وضعیت شکست در مصالح به صورت پیشرونده آورده شده است. همان طور که از این شکل‌ها مشخص می‌باشد، امکان



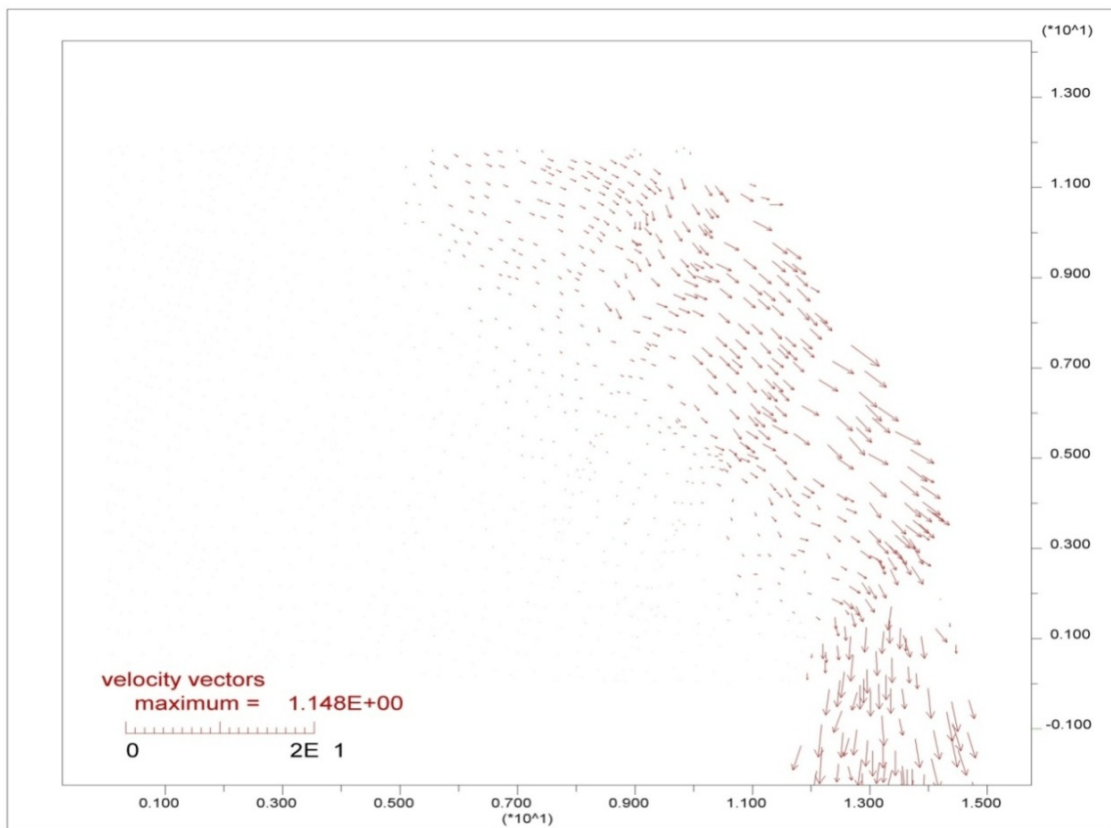
شکل ۷. مدل هندسی تهیه شده از دامنه مورد مطالعه (m)



شکل ۸. مدل مکانیکی تهیه شده از دامنه مورد مطالعه



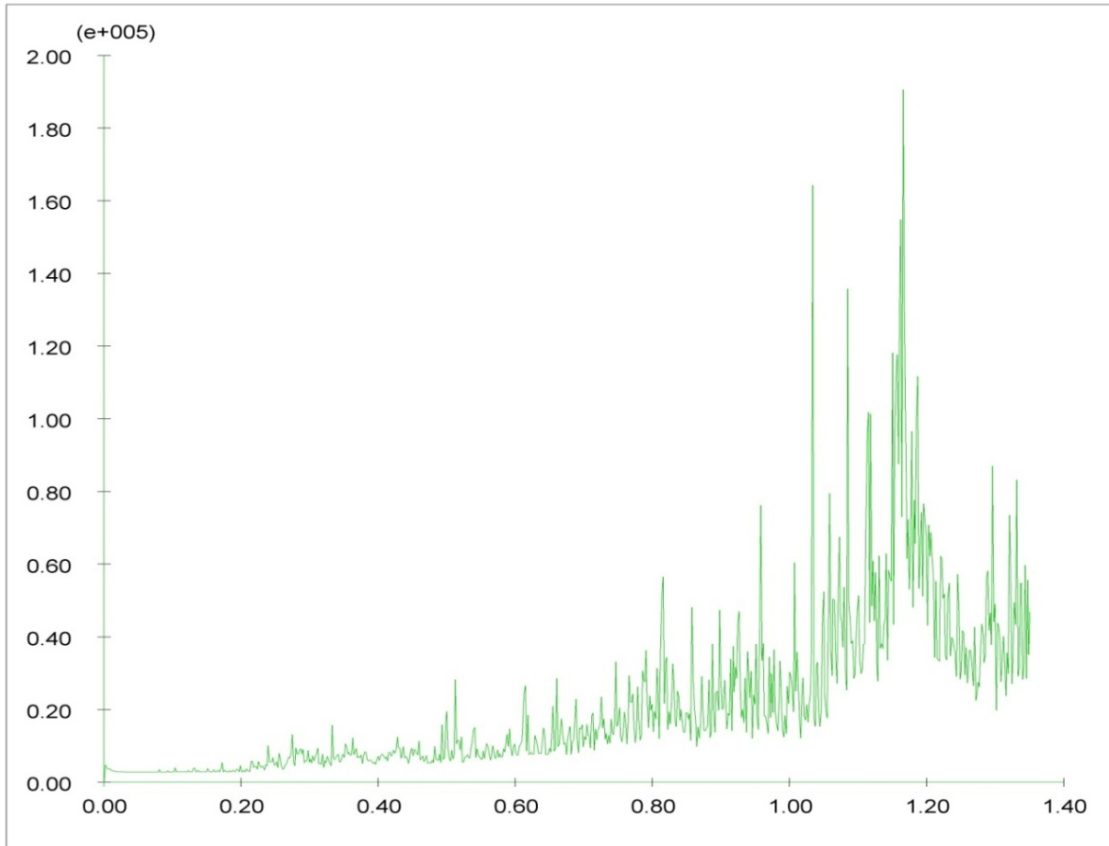
شکل ۹. وضعیت جابجایی کل در دامنه مورد بررسی



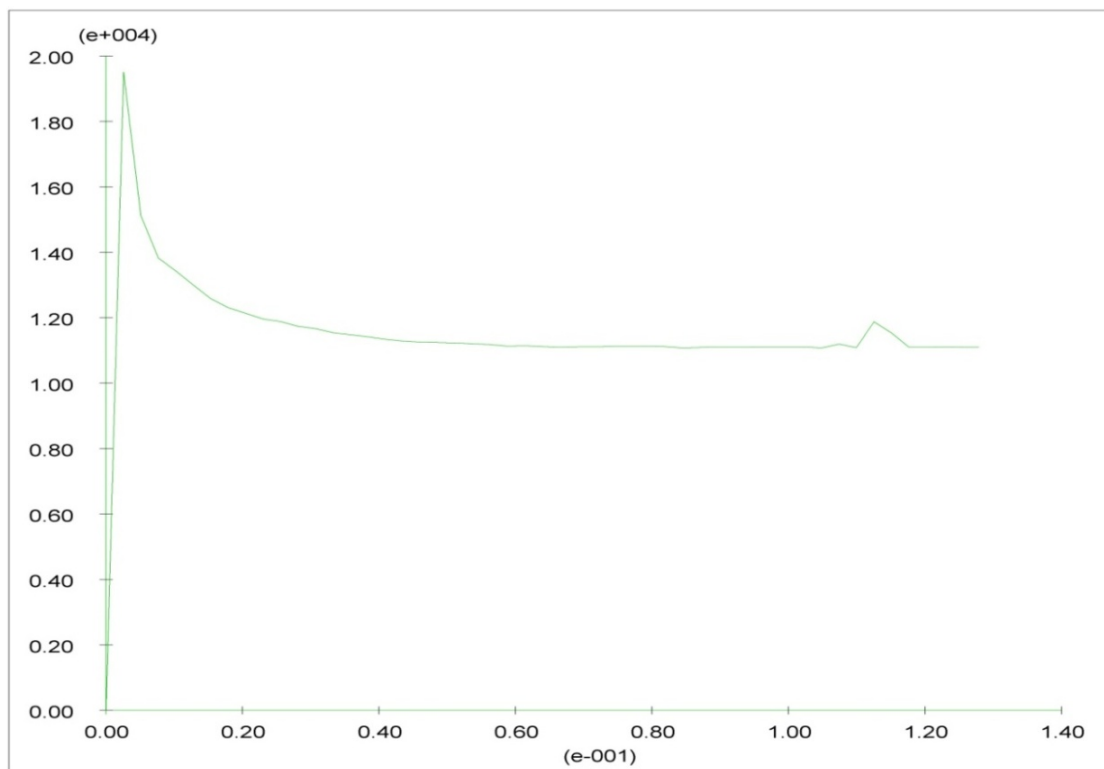
شکل ۱۰. وضعیت سرعت لغزش در گسیختگی نهایی دامنه



شکل ۱۱. وضعیت شکست نهایی توده سنگ دامنه



شکل ۱۲. وضعیت نیروهای نامتعادل کننده در دامنه حین ناپایداری



شکل ۱۳. وضعیت جابجایی در مراحل اولیه لغزش و ناحیه گذر از ستون سنگی

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

گسیختگی واژگونی را می‌توان نوع ویژه‌ای از انواع گسیختگی در دامنه‌ها دانست که به لحاظ مکانیسم ناپایداری خیلی متفاوت‌تر از سایر گسیختگی‌ها است. این گسیختگی‌ها به دلیل پیچیده‌گی در گسترش و ایجاد ناپایداری در دامنه‌های سنگی درزه‌دار توسط محققین معدودی مطالعه شده است. به طوری که عمده مطالعات موجود به صورت کینماتیک و احتمال وقوع رخداد پدیده می‌باشد. به طور کلی دو گروه مادر شامل رده اصلی و رده ثانویه، شاخصه‌های طبقه‌بندی گسیختگی واژگونی شمرده می‌شوند که به زیرگروه‌های مختلفی قابل تقسیم هستند. نوع ویژه‌ای از واژگونی‌ها به نام واژگونی بلوکی - خمشی که به عنوان پیچیده‌ترین گروه اصلی در این نوع گسیختگی‌ها به لحاظ ساختمان زمین‌شناسی و مکانیسم لغزش است که در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است. این نوع گسیختگی به دلیل نیاز به تحلیل ناپایداری و شناسایی سطح گسیختگی بحرانی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. چندانکه بودن مکانیسم عامل در ایجاد

گسیختگی‌های پیش‌رونده در این نوع واژگونی سبب پیچیدگی آن‌ها می‌باشد. بنابر این همواره به تحلیل‌های کینماتیک اکتفا شده است. در این مطالعه به ارزیابی و تحلیل پایداری مربوط به دامنه سنگی درزه‌دار واقع در حاشیه بزرگراه عسلویه - کنگان پرداخته شده است. بر اساس مطالعات میدانی صورت گرفته، این دامنه از سنگ آهک مارنی قهوه‌ای متعلق به سازند آجاجاری می‌باشد که به دلیل فعالیت تکتونیکی درزه‌دار شده است. عامل اصلی ناپایداری دامنه، گسیختگی واژگونی بلوکی - خمشی پیش‌رونده می‌باشد. به منظور تحلیل پایداری مربوط به این نوع گسیختگی از روش عددی المان مجزا (DEM) و نرم‌افزار UDEC استفاده گردیده و به منظور ارزیابی پیچیدگی گسترش سطح لغزش بحرانی در داخل بدنه ستون‌های سنگی از الگوریتم هندسی ورونوی بهره گرفته شده است. بر پایه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، روش المان مجزا به صورت امکان شناسایی سطح نهایی گسیختگی و مکانیسم‌های درگیر در رخداد ناپایداری موضعی و کلی را دارا می‌باشد.

منابع

- آقانباتی ع، ۱۳۸۵. زمین‌شناسی ایران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.
- Alejano, L.R., Gómez-Márquez, I., Martínez-Alegría, R., 2010. Analysis of a complex toppling-circular slope failure. *Engineering Geology*, 114(1): 93-104.
- Amini, M., Ardestani, A., Khosravi, M.H., 2017. Stability analysis of slide-toe-toppling failure. *Engineering Geology*, 228: 82-96.
- Amini, M., Majdi, A., Aydan, Ö., 2009. Stability analysis and the stabilisation of flexural toppling failure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42(5): 751-782.
- Amini, M., Majdi, A., Veshadi, M.A., 2012. Stability analysis of rock slopes against block flexure toppling failure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(4): 519-532.
- Ashby, J., 1971. Sliding and toppling modes of failure in models and jointed rock slopes. M.Sc. thesis, Imperial College, University of London.
- ASTM D3080., 2011. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D7012., 2014. Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D5873., 2014. Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D5731., 2016. Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

- ASTM D4914., 2016. Standard Test Methods for Density of Soil and Rock in Place by the Sand Replacement Method in a Test Pit. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Aurenhammer, F., Klein, R., Lee, D., 2013. Voronoi Diagrams and Delaunay Triangulations. World Scientific Publication, New Jersey, USA.
- Azarafza, M., Asghari-Kaljahi, E., Akgün, H., 2017. Assessment of Discontinuous Rock Slope Stability with Block Theory and Numerical Modeling: A Case Study for the South Pars Gas Complex, Assalouyeh, Iran. Environmental Earth Science, 76(1): 397.
- Brideau, M.A., Stead, D., 2010. Controls on block toppling using a three dimensional distinct element approach. Rock Mechanics and Rock Engineering, 43: 241-260.
- Cundall, P., 1971. A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems. Proceedings of the International Symposium on Rock Fracture, Nancy, France.
- Gallier, J., 2012. Notes on Convex Sets, Polytopes, Polyhedra, Combinatorial Topology, Voronoi Diagrams and Delaunay Triangulations. Department of Computer and Information Science, University of Pennsylvania, Philadelphia USA.
- Goodman, R.E., 1989. Introduction to Rock Mechanics. Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Goodman, R.E., Bray, J.W., 1976. Toppling of rock slopes. Rock Engineering for Foundations and Slopes (ASCE), 2: 201-234.
- Hudson, J.A., Harrison, J.P., 1997. Engineering rock mechanics: an introduction to the principles. Pergamon Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Hudson, J.A., Priest, S.D., 1979. Discontinuous and rock mass geometry. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 16: 336-362.
- Itasca., 2008. UDEC - Universal distinct element code. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis. UDEC Version 4.00, USA, 2008.
- Jing, L., Hudson, J.A., 2002. Numerical Methods in Rock Mechanics. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39(4): 409-427.
- Müller, L., 1968. New considerations on the Vaiont slide. Rock Mechanics & Engineering Geology, 6: 1-91.
- Nikoobakht, S., Azarafza, M., 2016. Stability analysis and numerical modelling of toppling failure of discontinuous rock slope (A Case study). Journal of Geotechnical Geology, 12(2): 169-178.
- Sukumar, N., Bolander, J.E., 2009. Voronoi-based Interpolants for Fracture Modelling. Tessellations in the Sciences, 1-27.
- Wyllie, D.C., Mah, C.W., 2004. Rock Slope Engineering. 4th Edition, Spon Press, London, UK.