

Studying and investigating the effect of cross joints on the overturning rupture of rock slopes with inverted layers

Ali Ghahramani¹, Jahangir Khazaei^{2*}

1- Ph.D. Student of Geotechnic, Civil eng department. Razi university, Kermanshah, Iran

2- Associate Professor, Civil eng department. Razi university, Kermanshah, Iran

ABSTRACT

Toppling failure is a common failure mode in natural and artificial rock slopes, which has always been associated with serious injuries to humans in road trenches, tunnels, dams, and mines. In this research, it has been tried to investigate the effect of cross joints with inverted layers on the toppling failure of rock slopes and horizontal displacements on the slope surface, in this regard numerical modeling using discrete element software. (UDEC) has been carried out in the rock to study the toppling failure mechanism, surface displacements, investigation of yield levels and the formation of tensile cracks, and parametric studies for cross joints with inverted layers and with different numbers in the rock slope. A total of six rock slope models were analyzed (three different models for the case of one cross-joint and three other models for the number of cross-joints). The results of this research show that the mechanism of failure in this type of slopes is stepped, unlike soil slopes, and when the first tensile crack reaches the surface, the toppling area is formed. The presence of cross joints causes more instability, which will increase the surface displacements much more compared to the model without cross joints. The length of the rock layers and the number of joints can simultaneously have their effects on toppling failure; The speed of movement of the layers also confirms this. The sliding zone is also formed in these models, which resists the toppling failure to a certain extent, so it is necessary to know these zones to stabilize the inverted rock slopes.

ARTICLE INFO

Receive Date: 10 June 2023

Revise Date: 16 September 2023

Accept Date: 03 October 2023

Keywords:

Rocky slope

Toppling failure

Layered slope

Cross joint

Tensile crack

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.400059.3131>

*Corresponding author: Jahangir Khazaei.

Email address: j.khazaie@razi.ac.ir

مطالعه عددی تاثیر وجود درزه‌های متقاطع بر گسیختگی واژگونی شیب‌های سنگی با لایه‌های معکوس

علی قهرمانی^۱، جهانگیر خزائی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۲- دانشیار مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

چکیده

گسیختگی واژگونی یک حالت شکست رایج در شیب‌های سنگ طبیعی و مصنوعی است که همواره با آسیب‌های جدی برای بشر در ترانشه‌های جاده‌ای، تونل‌ها، سدها و معادن همراه بوده است. در این تحقیق سعی شده است که اثر درزه‌های متقاطع با لایه‌های معکوس بر روی گسیختگی واژگونی شیب‌های سنگی و جابه‌جایی‌های افقی روی سطح شیب بررسی شود. در این راستا مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار المان گسسته (UDEEC) در محیط سنگ برای مطالعه مکانیسم گسیختگی واژگونی، جابه‌جایی‌های سطحی، بررسی سطوح تسلیم و نحوه شکل‌گیری ترک‌های کششی انجام شده است و مطالعات پارامتریک برای درزه‌های متقاطع با لایه‌های معکوس و با تعداد مختلف در شیب سنگی انجام شد. در مجموع شش مدل شیب سنگی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (سه مدل مختلف برای حالت یک درزه متقاطع و سه مدل دیگر برای تعداد درزه‌های متقاطع بیشتر). نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مکانیسم گسیختگی در این نوع شیب‌ها برخلاف شیب‌های خاکی، پلکانی است و با رسیدن اولین ترک کششی به سطح، ناحیه واژگونی شکل خواهد گرفت. وجود درزه‌های متقاطع سبب بروز ناپایداری بیشتر شده که در مقایسه با مدل بدون درزه متقاطع مقادیر جابه‌جایی‌های سطحی بسیار بزرگتر خواهد شد. هرچه تعداد درزه‌ها بیشتر شود، گسیختگی واژگونی با سرعت بالاتری انجام شده و ماکزیمم جابه‌جایی کاهش می‌یابد. همچنین محل قرارگیری درزه نیز در وقوع گسیختگی بسیار مهم است.

کلمات کلیدی: شیب سنگی، گسیختگی واژگونی، شیب لایه‌لایه، درزه متقاطع، ترک کششی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2023.400059.3131	۱۴۰۳/۰۳/۳۱	۱۴۰۲/۰۷/۱۱	۱۴۰۲/۰۷/۱۱	۱۴۰۲/۰۶/۲۵	۱۴۰۲/۰۳/۲۰
10.22065/jsce.2023.400059.3131					
جهانگیر خزائی			*نویسنده مسئول:		
j.khazaie@razi.ac.ir			پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

واژگونی بلوک‌های سنگی اولین بار توسط مولر^۱، ۱۹۶۸ ذکر شد [۱]. بین سال‌های ۱۹۶۸ و ۱۹۷۶، برخی از مقالات پراکنده در این زمینه با استفاده از آزمون‌های مدل فیزیکی، مدل‌سازی عددی و تاریخچه موارد منتشر شد [۲]. در سال ۱۹۷۶، گودمن و بری^۲ خرابی‌های واژگونی را به انواع اصلی (خمشی، بلوکی و بلوکی خمشی) و ثانویه طبقه بندی کردند و یک رویکرد تحلیلی گام به گام جدید برای تجزیه و تحلیل شکست واژگونی بلوکی ارائه دادند [۳]. گسیختگی واژگونی شکل اولیه گسیختگی برای شیب‌های لایه‌ای معکوس است که یک موضوع علمی مهم در ارزیابی پایداری شیب معکوس را تشکیل می‌دهد. شیب‌های معکوس، شیب‌های سنگی هستند که در آن‌ها لایه‌های موازی (یا با زاویه کمی قطع می‌شود) و دارای شیب مخالف با سطح اصلی شیب می‌باشند. عموماً اعتقاد بر این است که به دلیل شیب مخالف بین لایه‌های سنگ و سطح اصلی شیب، شیب‌های معکوس پایداری نسبتاً بالایی دارند و تشکیل صفحات لغزشی نافذ یا تجربه رانش زمین برای آن‌ها دشوار است.

گسیختگی واژگونی اغلب در شیب‌های طبیعی سنگی با لایه‌های معکوس در چندین دهه اخیر شناسایی و مطالعه شده است [۴]. شیب‌های سنگی با لایه بندی معکوس یک نوع شیب بسیار رایج در طبیعت است که ۳۳ درصد از کل زمین لغزش‌ها را تشکیل می‌دهد [۵]. اشبی^۳ [۲] مفهوم "واژگونی" را پیشنهاد کرد، و دی فریتاس و واترز^۴ [۶] این پدیده را از طریق مشاهدات میدانی تأیید کردند، سپس شکست واژگونی به عنوان یک نوع شکست مهم از شکست لغزشی در نظر گرفته شد. برای تجزیه و تحلیل بهتر آن، گودمن^۵ [۳] یک طبقه‌بندی انحصاری برای ناپایداری‌های واژگونی پیشنهاد کرد که واژگونی خمشی یکی از آن‌هاست. از زمان کشف پدیده گسیختگی واژگونی، تحلیل شیب‌های لایه‌ای معکوس به طور گسترده در معدن، ترانشه‌های جاده، نواحی حفاظت از منابع آب و سدها، حمل‌ونقل و تونل مورد بررسی قرار می‌گیرند. آیدان و کاوا موتو^۶ [۷] بیان کردند که مشکلات مهندسی مکرراً منجر به بسیاری از موارد گسیختگی ناشی از تغییر شکل واژگونی در مقیاس بزرگ شده است که قبلاً موارد نادری بودند. گسیختگی ناشی از تغییر شکل واژگونی به خم شدن و شکستن توده سنگی بالایی یک شیب در جهت آزاد اشاره دارد. یک نمونه بارز، شیب شمال شرقی معدن روباز مس دارالو در استان کرمان می‌باشد [۸]. تغییر شکل‌های واژگونی شیب‌های معکوس نتیجه ترکیبی بسیاری از عوامل داخلی و خارجی می‌باشد و مکانیسم‌های تغییر شکل مدت‌ها است که محل بحث بوده است [۹-۱۲].

ژیگانگ تاو^۷ و همکاران [۱۳-۱۵]؛ چوان ژو^۸ و همکاران [۱۶]، بر اساس منحنی تکامل تنش کابل انکر^۹ NPR، یک پدیده علمی "کاهش نیروی نیوتنی و وقوع زمین لغزش" را کشف کردند، حالت‌ها و معیارهای هشدار اولیه را برای پیش‌بینی طولانی‌مدت و آزمایشی زمین لغزش پیشنهاد کرده و ۱۲ فاجعه زمین لغزش را با موفقیت پیش‌بینی کردند. با این حال، شکست خمشی یک شیب معکوس لایه‌ای، کل فرآیند واژگونی توده سنگ؛ خمش لایه، نفوذ گسیختگی، و فرورفتن توده سنگ را در بر خواهد گرفت و باعث ایجاد بلایای زمین لغزش پس از توسعه سطح گسیختگی خواهد شد. امینی و اردستانی^{۱۰} [۸] در مطالعه ای تحت عنوان تحلیل پایداری شیب شمال شرقی معدن روباز مس دارالو در برابر گسیختگی واژگونی ثانویه که در سال ۱۳۹۴ چنین گسیختگی ای رخ داد، ابتدا مکانیسم این ناپایداری با بررسی-

¹ Müller

² Goodman

³ Ashby

⁴ De Freitas and Watters

⁵ Goodman

⁶ Aydan, Kawamoto

⁷ Zhigang Tao

⁸ Chun Zhou

⁹ Negative Poisson's Ratio (NPR) anchor

¹⁰ Amini, Ardestani

های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی سطحی و زیرسطحی روشن شد. سپس راه حل تحلیلی موجود که برای تجزیه و تحلیل گسیختگی استاتیکی لغزشی و واژگونی در پنجه شیب ارائه شده بود، اصلاح شد و معادلات جدیدی برای تحلیل شکست در شرایط دینامیکی به دست آمد. سپس یک کد کامپیوتری بر اساس معادلات جدید برای ارزیابی ناپایداری ایجاد شد. در مرحله بعد، شیب گسیخته شده با استفاده از روش کد نویسی و اجزای محدود مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و نتایج این تحلیل‌ها با شرایط واقعی مقایسه شد. مقایسه نشان داد که بین نتایج تحلیلی، عددی و واقعی توافق رضایت بخشی وجود دارد. بنابراین از این روش‌ها برای پیش بینی رفتار شیب نهایی در شرایط استاتیکی و دینامیکی استفاده شد. این ارزیابی‌ها نشان داد که اگر مصالح جابه‌جا شده به طور کامل حفاری شده و از معدن خارج شوند و عمق کلی شیب کاهش یابد، شیب نهایی در برابر گسیختگی واژگونی در پنجه لغزش پایدار خواهد بود. تحقیق آن‌ها نشان داد که هر دو روش تحلیلی اصلاح شده و روش اجزای محدود قادر به تجزیه و تحلیل شیب در برابر حالت واژگونی ثانویه هستند. خرابی‌های واژگونی طبیعی بیشتر ترکیبی از خرابی‌های واژگونی بلوکی و خمشی هستند که به حالت خم شدن بلوکی معروفند.

ژنگ^{۱۱} و همکاران [۴] در مطالعه‌ای تحت عنوان تجزیه و تحلیل شکست واژگونی خمشی در شیب‌های سنگی با استفاده از روش المان گسسته¹² DEM در مجموع، بیش از بیست مدل شیب ساخته و مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. دو پارامتر جدید (ناپیوستگی جابه‌جایی و ضریب انتقال سطح گسیختگی) را برای ارائه درک بیشتر از واژگونی خمشی معرفی کردند. نتایج نشان داد که ناحیه شکست شیب‌های سنگی در معرض واژگونی خمشی شامل دو بخش می‌باشد: قسمت ناپایداری اولیه (FOIP¹³) و منطقه واژگونی مستقل (ITZ¹⁴). FOIP را می‌توان به دو زیر ناحیه تقسیم کرد: ناحیه لغزشی (SZ¹⁵) و ناحیه واژگونی روی هم قرار گرفته (STZ¹⁶). وقوع ناپیوستگی‌های تغییر شکل سطحی، پیش‌آگهی برای گسیختگی واژگونی خمشی است. اولین ناپیوستگی جابه‌جایی در مرز بین FOIP و ITZ رخ خواهد داد. فاصله و زاویه درزه‌ها و زاویه شیب تأثیر قابل توجهی را بر پایداری شیب‌های سنگی معکوس دارد. با این حال، آن‌ها بر تغییر شکل و الگوی شکست شیب‌های خاکی معمولی تأثیری ندارند. به عنوان یک نرم افزار تجاری رایج در مهندسی ژئوتکنیک، کد المان گسسته جهانی (UDEC¹⁷) نیز توسط بسیاری از محققان مورد استفاده قرار گرفت. به عنوان مثال، الذوبی^{۱۸} و همکاران [۱۷] از آن برای تجزیه و تحلیل اثر مقاومت کششی بر پایداری شیب‌ها استفاده کردند. ژنگ^{۱۹} و همکاران [۱۸] از آن برای بررسی تأثیر راک بولت‌ها بر الگوهای شکست استفاده کردند. ونگ^{۲۰} و همکاران [۱۹] برای پیش بینی این شکست، معیار شکست جدیدی را در این نرم افزار پیاده سازی کردند.

نادی و همکاران [۲۰] در مقاله‌ای تحت عنوان بررسی پایداری شیب سنگ تحت فشار آب منفذی و ناهمسانگردی ساختاری به روش المان گسسته، پایداری استاتیکی یک شیب سنگی ناشی از حفاری تا عمق ۱۵ متری با در نظر گرفتن اثرات ناهمسانگردی ساختاری ناشی از وجود درزه‌های سنگ، بلوک‌ها و فشار آب منفذی مورد بررسی قرار دادند. چالش اصلی وجود مواد سنگی درز شده با نشت آب از طریق آن درزه‌ها می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که چالش اساسی در این نوع شیب، وجود مصالح سنگی و تأثیر انسداد شکست بر روی درزه‌ها توسط جریان آب از این درزه‌ها است. در نهایت با استفاده از نرم افزار UDEC تجزیه و تحلیل

¹¹ Zheng

¹² Discrete Element Method

¹³ First-Order Instability Part

¹⁴ Independent Toppling Zone

¹⁵ Sliding Zone

¹⁶ Superimposed Toppling Zone

¹⁷ Universal Distinct Element Code

¹⁸ Alzo'ubi

¹⁹ Zheng

²⁰ Weng

استاتیکی و هیدرواستاتیکی انجام شد. با بررسی و مقایسه نتایج بدست آمده می توان نتیجه گرفت که: ۱- در محیط سنگی، درزهای جهت دار نقش بسیار مهمی در پایداری یا ناپایداری دارند. - با فرض ثابت بودن تمامی خصوصیات توده سنگ و انجام مطالعات پارامتریک بر روی عوامل مؤثر بر پایداری شیب سنگ، مشاهده شد که مقدار زاویه اتساع در جابجایی و پایداری استاتیکی شیروانی معنی دار نبود. اما با تغییر زاویه اصطکاک داخلی ناپیوستگی ها، دیوار با زاویه اصطکاک داخلی اتصال بیش از ۳۰ درجه پایدار است و به مقادیر کمتر از ۳۰ درجه کاهش می یابد، ناپایدار می شود. همچنین با تغییر چسبندگی درز مشخص شد که شیب سنگ با چسبندگی اتصال بیش از ۱۰ کیلو پاسکال دارای شکل پایدار بوده و آن را به کمتر از ۱۰ کیلو پاسکال کاهش می دهد و ریزش و ناپایدار می باشد.

شین کو و دیائو^{۲۱} [۲۱] در تحقیقی تحت عنوان بهینه سازی روش تحلیلی برای تعیین صفحه خرابی واژگونی خمشی به این نتیجه رسیدند که از آنجایی که شکست برشی در نزدیکی نوک شیب رخ می دهد، اثرات چسبندگی ناپیوستگی ها بر پایداری شیب های سنگی لایه ای در برابر شکست خمشی واژگونی و سهم نیروی مماسی بر نیروی محوری مقطع در مطالعات قبلی نادیده گرفته شد. روش پیشنهادی که بر اساس تئوری تعادل حدی توسعه یافته است، برای تعیین صفحه شکست خمشی که توسط مطالعه تاریخچه مورد تأیید شد، امکان پذیر است. اگر پارامترهای هندسی یک شیب به جز ضخامت سنگ افزایش یابد، شیب ناپایدارتر خواهد بود. اگر پارامترهای مکانیکی توده سنگ به جز وزن واحد افزایش یابد، شیب پایدارتر خواهد بود. زاویه شیب، زاویه شیب لایه سنگ، و زاویه اصطکاک ناپیوستگی ها عوامل کنترل کننده شکست کلی شیب تخته سنگ می باشند. لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده در این مطالعه فقط برای شکست نهایی شیب های لایه ای اعمال می شود و می تواند برای ارزیابی اولیه پایداری مورد استفاده قرار گیرد.

شین کو و همکاران [۲۲] در مقاله مروری تحت عنوان مروری بر شیب های سنگ معکوس در معرض واژگونی خمشی دریافتند که، خواص سنگ می تواند به طور قابل توجهی بر مورفولوژی سطح شکست تأثیر بگذارد. شیب های سنگی معکوس متشکل از لایه های سنگ نرم معمولاً یک صفحه شکست خطی را نشان می دهند، در حالی که چنین شیب هایی متشکل از لایه های سنگ سخت یک سطح شکست نوع دوخطی را نشان می دهند. کشش خمشی و شکست لغزشی برشی الگوهای شکست اولیه طبقات سنگ هستند. لایه های سنگی باریک و کوچک بیشتر مستعد شکست لغزشی برشی هستند، در حالی که لایه های سنگی میانی و بزرگ بیشتر در معرض شکست کشش خمشی هستند. صفحه شکست لغزشی برشی صفحه ای از نوع خطی در بالای صفحه عمود بر اتصالات است، در حالی که صفحه شکست کششی خمشی موازی با صفحه عمود بر اتصالات است.

با توجه به شرایط ژئوتکنیکی ویژه و خاص کشور ایران و وجود دو رشته کوه البرز و زاگرس که در برگیرنده انواع شیب های طبیعی و مصنوعی خاکی و سنگی لایه ای با زوایای مختلف که نمونه های بارز آن در آزاد راه تهران شمال و در کوه های منطقه غرب کشور است که دره های عمیق با خاک مستعد ریزش، رانش و لغزش با شیب هایی دارای سنگ های لایه ای بسیار مشهود است، مطالعه رفتار شیب های سنگی لایه ای با زاویه معکوس می تواند جنبه های کاربردی مفیدی در عرصه مهندسی ژئوتکنیک داشته باشد. بدست آوردن شکل و الگوی گسیختگی برای شیب های لایه ای سنگی و جلوگیری از فروریزش و واژگونی لایه ها و همچنین ماکزیمم جابه جایی افقی و ایجاد ترک های کششی می تواند به پیش بینی وقوع این نوع گسیختگی ها کمک کند.

²¹ Xin Qu and F Diao

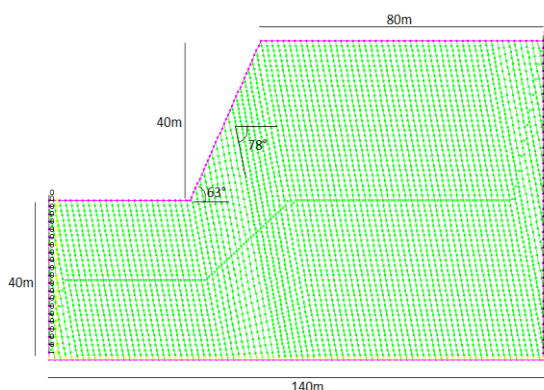
در این تحقیق با مطالعه دقیق پیشینه پژوهش می توان دریافت که اکثر محققین در این زمینه به بررسی اثر واژگونی در شیب‌های لایه‌ای سنگی پرداخته‌اند و با استفاده از نرم افزارهای مربوطه و مدل‌سازی‌های فیزیکی، شرایط و نحوه واژگونی لایه‌ها را بررسی کرده‌اند؛ اما در این میان تعداد کمی از محققین به تاثیر وجود درزه‌های متقاطع با لایه‌های معکوس و تاثیر آن‌ها بر وقوع گسیختگی واژگونی پرداخته‌اند. عموماً در تحلیل و بررسی شیب‌های سنگی معکوس وجود گسیختگی واژگونی به شکل متداول اتفاق می افتد. به این منظور در این تحقیق به بررسی اثرات درزه‌های متقاطع با لایه‌های معکوس در شیب‌های سنگی بر روی مکانیزم تشکیل گسیختگی واژگونی و نحوه شکل‌گیری ترک‌های کششی و تعیین مقدار جابه‌جایی‌های سطحی و تاثیر متقابل آن بر روی شکل و محدوده گسیختگی واژگونی و بررسی سطوح تسلیم می پردازد. همچنین نوع گسیختگی اعم از لغزشی، واژگونی و ناحیه طره ای در شیب معکوس مشخص خواهد شد. به این منظور در این تحقیق برای بررسی و مدل‌سازی عددی از نرم افزار المان گسسته UDEC در محیط سنگ استفاده خواهد شد.

۲- مدل تحلیلی

مسأله‌ی بررسی شده در این تحقیق، ترانشه سنگی لایه‌ای می‌باشد. به دلیل ماهیت مسأله در دست بررسی، نوع تحلیل‌ها و امکانات نرم افزاری عددی، تحلیل‌های عددی انجام شده در این تحقیق از نوع تحلیل دوبعدی و المان گسسته و همچنین برای مدل‌سازی دقیق درزه‌ها از نرم افزار UDEC استفاده شده‌است. در ادامه هندسه مدل، مدل رفتاری، مشخصات مصالح و شرایط مرزی شرح داده خواهد شد.

۲-۱- هندسه مدل و شرایط مرزی

هندسه مدل تحلیلی شامل یک شیب سنگی با زاویه لایه‌های (درزه‌ها) معکوس با شیب اصلی به ابعاد ۱۴۰ متر طول در ۸۰ متر عرض که ارتفاع شیب در پنجه به ۴۰ متر و در تاج شیب به ۸۰ متر می‌رسد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده‌است، زاویه اصلی شیب ۶۳ درجه می‌باشد. در شبیه‌سازی عددی، جابجایی‌های افقی و عمودی در بستر مدل محدود شدند در حالی که فقط جابه‌جایی‌های افقی در مرزهای جانبی محدود شد. مجموعه ای از نقاط نظارتی بر روی سطح شیب برای نظارت بر جابجایی افقی و عمودی گذاشته شد. تعداد نقاط اندازه‌گیری با شروع از نوک شیب تا بالای شیب به ترتیب از یک تا ۱۰ و از بالای شیب در سطح افق از ۱۰ تا ۱۶ به صورت شماره ۱ تا ۱۶ تخصیص داده خواهد شد. نقطه شماره ۱ در پنجه شیب، نقطه ۵ در وسط شیب و نقطه ۱۰ در تاج شیب قرار دارند.



شکل ۱- الف) ابعاد مدل و زوایای درزه‌ها و زاویه اصلی شیب

۲-۲- پارامترهای مقاومتی و مدل رفتاری

تغییر شکل و گسیختگی شیب‌های سنگی معکوس هم شامل سنگ و هم درزهای دست نخورده می‌شود. در این تحقیق، از دو مدل رفتاری سازنده متداول (طبق مقاله مرجع [۴]) استفاده می‌شود، یعنی مدل موهر-کلمب برای سنگ دست نخورده و مدل لغزش کلمب برای توصیف رفتار مکانیکی درزهای دست نخورده. گسیختگی واژگونی بیشتر در شیب‌هایی با سنگ شناسی یا ترکیب سنگ شناسی شامل سنگ لایه نازک، شیست، تخته سنگ، ماسه سنگ و سنگ آهک گلی رخ می‌دهد. ([۹, ۱۱, ۲۳, ۲۴]). جنس لایه‌های سنگی در مدل تحلیلی در این تحقیق از نوع سنگ آهک با مقاومت کم در نظر گرفته شده‌است. پارامترهای مورد استفاده در محاسبات در جدول ۱ (طبق مقاله مرجع [۴]) خلاصه شده‌است. در جدول ۱ مشخصات مقاومتی لایه‌های سنگی و در جدول ۲ مشخصات درزها در این مطالعه آورده شده‌است.

جدول ۱: مشخصات شیب و لایه سنگی [۴]

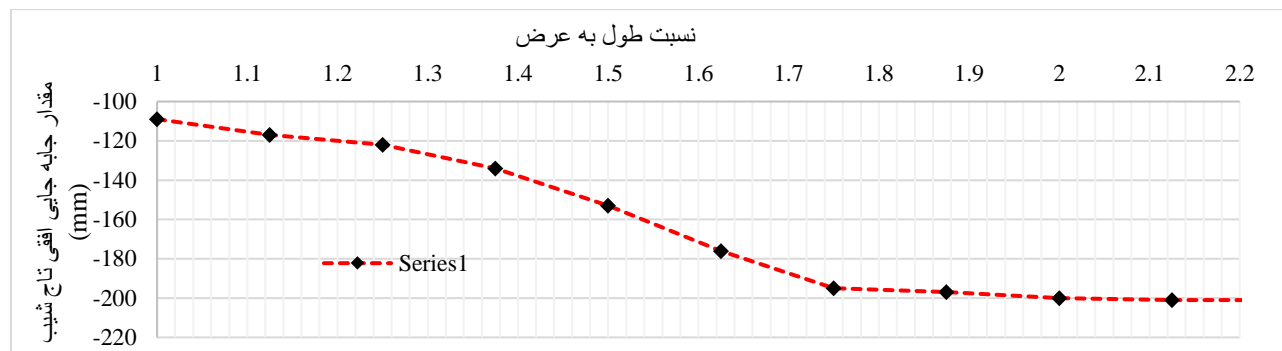
۴۰	H_s (m)	ارتفاع شیب
۶۳	β_c ($^\circ$)	زاویه شیب اصلی
۲۶۶۰	ρ (kg/m ³)	چگالی سنگ دست نخورده
۱۵/۰۶	E (GPa)	مدول الاستیسیته سنگ دست نخورده
۰/۲	ν	ضریب پواسون
۰/۱۵	C (MPa)	چسبندگی سنگ دست نخورده
۳۹	f ($^\circ$)	زاویه اصطکاک سنگ دست نخورده
۲/۲	S_t (MPa)	مقاومت کششی سنگ دست نخورده

جدول ۲: مشخصات درزها [۴]

۷۸	h ($^\circ$)	زاویه درزها
۱/۶	t (m)	فاصله بین درزها
۰	C_j (MPa)	چسبندگی درزها
۳۷	f_j ($^\circ$)	زاویه اصطکاک درزها
۱/۰۶۴	K_n (Gpa/m)	سختی نرمال درزها
۰/۴۸	K_s (Gpa/m)	سختی برشی درزها

۲-۳- آنالیز حساسیت نسبت به انتخاب مرزها

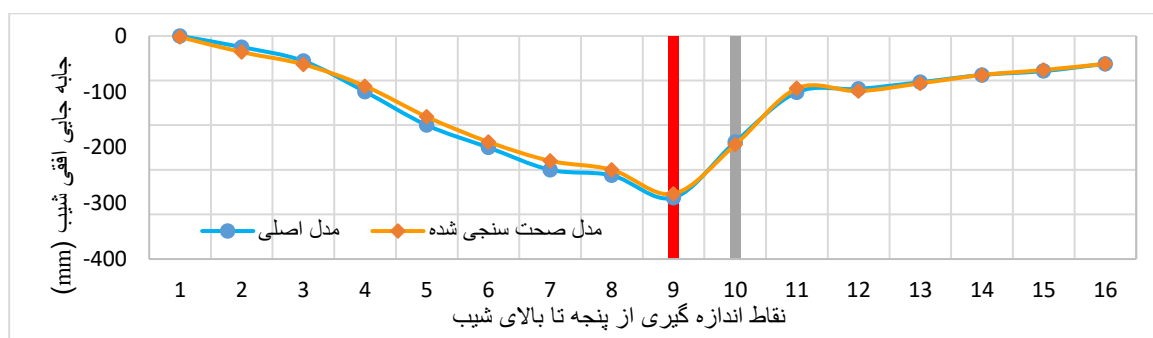
ابعاد این مدل تحلیلی در این تحقیق مشابه مقاله مرجع [4] در نظر گرفته شده‌است. ابعاد مدل دارای طول ۱۴۰ متر و عرض ۸۰ متر می‌باشد. لذا برای کنترل دقیق تر آنالیز حساسیت نسبت به مکان انتخاب مرزها انجام شده‌است. بدین منظور مدل با ابعاد مختلف تحلیل شد و نتایج حاصل از آن در قالب نمودار زیر آورده‌شد. قسمت افقی نمودار "نسبت طول به عرض شیب" و قسمت قائم نمودار "مقدار جابه‌جایی افقی تاج شیب" را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌کنید جابه‌جایی افقی در تاج شیب تا نسبت طول به عرض ۱.۷۵ دارای مقدار افزایش می‌باشد و بعد از آن با افزایش نسبت طول به عرض، این مقدار تقریباً ثابت می‌ماند.



شکل ۲- نمودار تحلیل ابعادی مدل

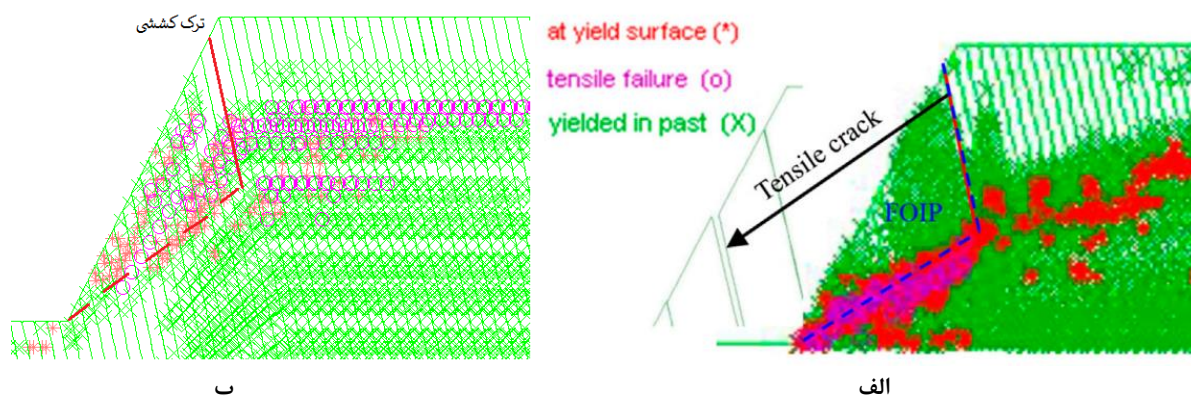
۳- صحت‌سنجی

مدل‌سازی شیب سنگی معکوس در این تحقیق با نرم افزار المان گسسته UDEC7 انجام گرفته است. لذا در گام نخست باید روند تحلیل و نتایج حاصل صحت‌سنجی شوند. بدین منظور مساله شیب سنگی معکوس مورد مطالعه در تحقیق ژنگ و همکاران [۴] در سال ۲۰۲۱ که با استفاده از این نرم افزار انجام پذیرفته است، مورد بررسی و مقایسه قرار خواهد گرفت. در بخش قبل؛ هندسه، مدل رفتاری و ابعاد این مدل‌سازی شرح داده شد. با توجه به اینکه از سنگ آهک با مقاومت کم در این تحقیق استفاده شده است؛ لذا جهت کنترل دقیق-تر، مدل رفتاری هوک-براون نیز برای این مدل‌سازی تحلیل شده و با مدل موجود مقایسه گردید، نتایج نشان می‌دهد که تفاوت چندانی برای این نوع مدل‌سازی با این مشخصات مشاهده نشد. لذا تحلیل‌های آتی در این تحقیق نیز با استفاده از همان مشخصات و شرایط در مقاله مرجع انجام خواهد شد.



شکل ۳- مقایسه جابه‌جایی‌های افقی سطح شیب سنگی معکوس در مدل صحت‌سنجی شده و مدل اصلی در سنگ آهکی با مقاومت کم

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود (خط قائم قرمز رنگ حداکثر جابه‌جایی و خط قائم خاکستری نوک شیب را نشان می‌دهد). درصد خطا در صحت‌سنجی مدل با نرم افزار یودک بسیار پایین بوده است و تطابق خوبی با مدل اصلی در مقاله مرجع دارد.

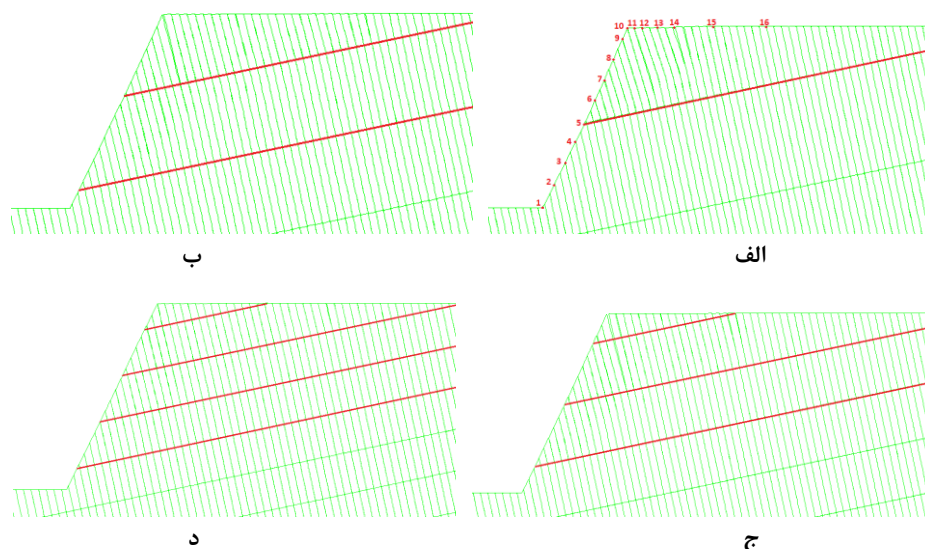


شکل ۴- سطح تسلیم و امتداد ترک کششی و ناحیه واژگون شده؛ الف) مدل اصلی ب) مدل صحت‌سنجی شده

با توجه به گوه‌های گسیختگی واژگونی در شیب معکوس سنگی در مدل اصلی مقاله ژانگ و همکاران و مدل صحت‌سنجی شده می‌توان مشاهده نمود که هر دو قبل از رسیدن به تاج شیب، ترک کششی رخ داده و ناحیه پایین تر از ترک واژگون خواهد شد. همچنین وسعت گوه نیز با تقریب بسیار خوب شبیه به هم می‌باشد. بدیهی است که دقت نتایج بدست آمده از نرم افزار UDEC7 در مساله فوق، صحت محاسبات آتی را اثبات خواهد کرد.

۴- مطالعات پارامتریک

تمرکز این تحقیق بر روی درزه‌های متقاطع با درزه‌های معکوس در شیب‌های سنگی می‌باشد. به همین دلیل جابه‌جایی‌های افقی و قائم و همچنین شکل و الگوی گوه گسیختگی واژگون شده و ترک کششی رخ داده و نقاط تسلیم شده دارای اهمیت زیادی خواهند بود. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در این تحقیق درزه‌های ممتد متقاطع با درزه‌های معکوس (در محدوده شیب) مدل‌سازی شده‌اند. در این مطالعه از ۴ مدل برای درزه‌های متقاطع (یک درزه، دو درزه، سه درزه و چهار درزه متقاطع) استفاده شده است. مشخصات و زاویه لایه‌ها نیز در بخش‌های قبل توضیح داده شد.



شکل ۵- درزه‌های ممتد متقاطع با درزه‌های معکوس؛ الف) یک درزه ب) دو درزه ج) سه درزه د) چهار درزه

۵- تحلیل و تفسیر نتایج

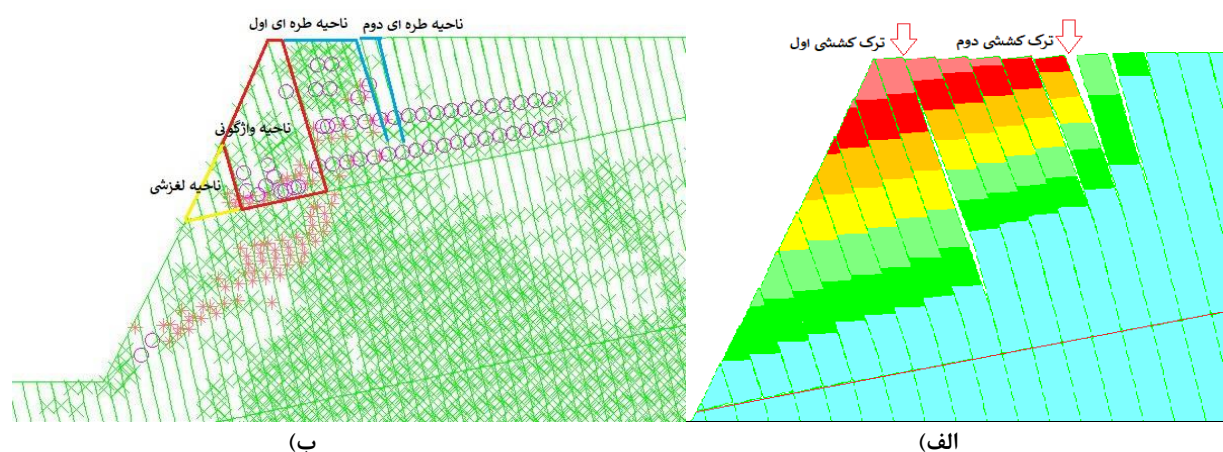
در این بخش نتایج بدست آمده از تحلیل‌های صورت گرفته با نرم افزار المان گسسته UDEC با هدف مقایسه و بررسی اثر درزه‌های متقاطع بر روی شکل گوه گسیختگی واژگون شده و اثرات ترک‌های کششی و جابه‌جایی‌های سطح شیب سنگی معکوس بررسی خواهد شد.

۵-۱- اثر درزه‌های متقاطع

در این تحقیق از ۴ مدل و درزه‌های متقاطع با درزه‌های معکوس استفاده می‌شود (فقط آن دسته درزه که در محدوده سطح شیب هستند لحاظ شده‌است). برای مدل اول درزه متقاطع در وسط شیب قرار دارد که نقطه اندازه‌گیری شماره ۵ بر روی مرز آن قرار گرفته‌است. در شکل ۶ سطح تسلیم برای حالت یک درزه متقاطع با درزه‌های معکوس نشان داده شده‌است. زاویه شیب اصلی ۶۳ درجه، زاویه لایه‌های معکوس ۷۸ درجه و زاویه درزه متقاطع با درزه معکوس ۹۰ درجه تقاطع دارد. در مدل اول نقطه اندازه‌گیری ۱ در پنجه شیب، نقطه اندازه‌گیری شماره ۵ در وسط شیب، نقطه اندازه‌گیری شماره ۱۰ در تاج شیب و بقیه نقاط اندازه‌گیری با تحلیل‌های متعدد تا جایی که اثرات جابه‌جایی و ترک مشاهده شود ادامه خواهد داشت.

۵-۱-۱- یک درزه متقاطع با لایه‌های معکوس

نقاط ضربداری شکل قرمز رنگ در تصویر سطح تسلیم و نقاط دایروی صورتی رنگ ترک‌های کششی متناظر را نشان می‌دهد. در پنجه سطح تسلیم شروع شده اما با رسیدن به درزه متقاطع شرایط عوض شده و بالاتر از درزه متقاطع با رسیدن ترک کششی به سطح مرز بین ناحیه واژگون شده و طره ای مشخص خواهد شد. ناحیه واژگون شده تمایل به فروریختن به شکل واژگونی دارد اما قسمت پایینی آن، ناحیه لغزشی شکل گرفته که در برابر واژگون شدن تاحدی مقاومت کرده سپس با فشار زیاد لایه واژگونی، لغزش در آن مشاهده شده و فروخواهد ریخت. ترک کششی اول که کمی بالاتر از تاج شیب رخ می‌دهد مرز بین دو ناحیه واژگونی و طره‌ای است که بالاتر از آن لایه‌های معکوس ابتدا کمی مقاومت کرده سپس با خالی شدن لایه زیرینش تمایل به فروریزش خواهند داشت. ترک کششی دیگری نیز رخ داده که ناحیه طره‌ای را به دویخش تقسیم می‌کند.



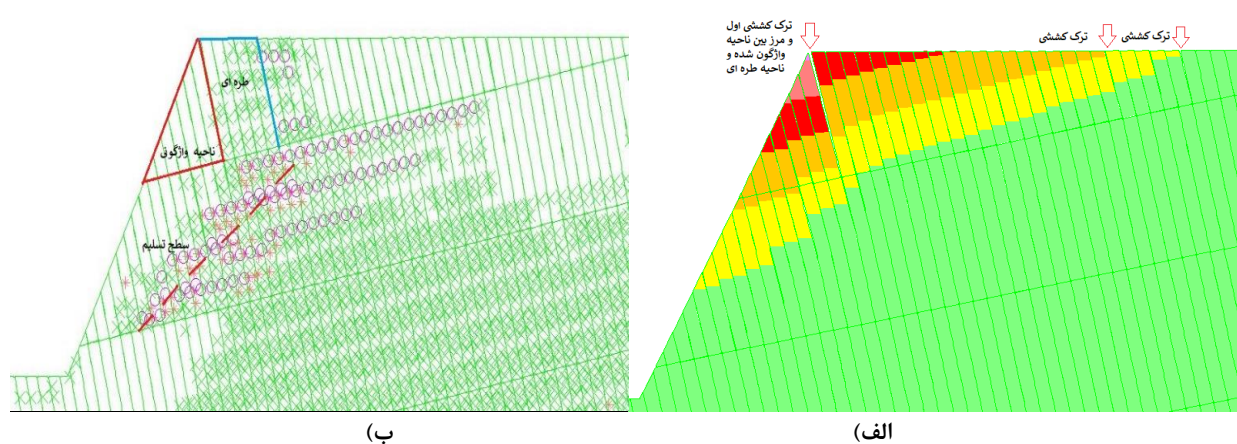
شکل ۶- حالت یک درزه متقاطع با درزه‌های معکوس؛ الف) کانتور جابه‌جایی افقی و وقوع ترک‌های کششی ب) سطح تسلیم، نقاط کششی و تقسیم بندی نواحی گسیختگی

شکل ۶- الف کانتور جابه‌جایی افقی و وقوع ترک‌های کششی در درزه‌ها مربوط به مدل یک درزه متقاطع را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است در قسمت پایینی درزه متقاطع جابه‌جایی‌ها نزدیک به صفر می‌باشد. ترک کششی اول و دوم به خوبی مشخص است. این

دوترک نقش موثری در شکل‌گیری گسیختگی‌ها دارند چون که ترک اول مرز گسیختگی واژگونی است و سبب تشکیل گوه خواهد شد. برخلاف شیب‌های خاکی، شیب سنگی معکوس با رسیدن ترک کثشی به سطح شکل گوه مشخص خواهد شد. ترک‌های بالاتر نیز هر کدام علت تقسیم‌بندی ناحیه طره‌ای می‌باشند.

۵-۱-۲- دو درزه متقاطع با لایه‌های معکوس

در شکل ۷ حالت دو درزه متقاطع با درزه‌های معکوس نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۷ ب مشخص است سطح تسلیم از درزه متقاطع پایینی شروع شده اما به سطح شیب نرسیده و با رسیدن به درزه متقاطع دوم مکانیزم آن عوض شده است. در بالاتر از درزه متقاطع دوم ترک کثشی در لایه تاج شیب رخ داده و مرز بین ناحیه واژگونی مشخص شده که ناحیه واژگون شده تمایل به فروریختن به شکل واژگونی را دارد. ناحیه لغزشی در این مدل بسیار کوچک بوده که قابل نظر کردن می‌باشد. ناحیه طره‌ای نیز بالاتر از ترک کثشی رخ داده و گسترش آن تا وقوع ریزترک‌های بعدی ادامه خواهد داشت ولی بعد از آن ریزترک‌ها نیز تا یک محدوده‌ای جابه‌جایی قابل توجه خواهیم داشت که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

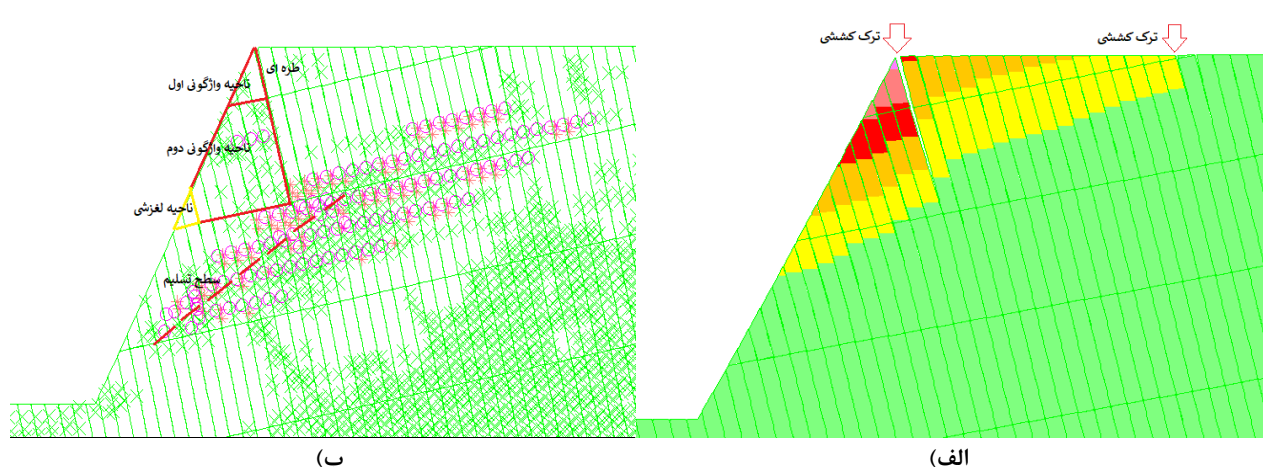


شکل ۷- حالت دو درزه متقاطع با درزه‌های معکوس؛ الف) کانتور جابه‌جایی افقی و وقوع ترک‌های کثشی ب) سطح تسلیم، نقاط کثشی و تقسیم بندی نواحی گسیختگی

شکل ۷- الف نیز کانتور جابه‌جایی افقی و وقوع ترک‌های کثشی در درزه‌ها را نشان می‌دهد. در این تصویر به وضوح وجود جابه‌جایی‌ها در بین دو درزه متقاطع قابل تشخیص است، اما در قبل دیدیم که این جابه‌جایی‌ها به تنهایی نمی‌توانند علت وقوع و تشکیل گسیختگی باشند. رسیدن ترک کثشی به سطح در ناحیه تاج شیب معکوس علت اصلی تشکیل ناحیه واژگونی می‌باشد و مرز آن را مشخص خواهد کرد. جابه‌جایی‌ها در بالای سطح شیب تا رخ دادن ریزترک‌ها ادامه خواهد داشت که وقوع متعدد این ترک‌ها باعث ناپایداری بیشتر شیب خواهد شد.

۵-۱-۳- سه درزه متقاطع با لایه‌های معکوس

در شکل ۸ حالت سه درزه متقاطع با درزه‌های معکوس نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۸ ب مشاهده می‌شود سطح تسلیم در بالای درزه متقاطع اول شروع شده اما با رسیدن به درزه بعدی این مکانیزم عوض شده و سطح تسلیم به بالای شیب نخواهد رسید. در بالاتر از آن ترک کثشی از تاج شیب تا درزه متقاطع دوم شکل گرفته و لایه‌های معکوس سمت چپ آن که مقدار طول قابل توجه لایه‌ها، میل به واژگونی در آن‌ها مشاهده شده، اما در لایه‌های معکوس با طول کوتاه‌تر مکانیزم لغزشی دیده می‌شود که در برابر واژگونی تا حدی مقاومت کرده اما با فشار زیاد لایه‌های واژگون شده بالایی ناحیه لغزشی نیز فرو خواهد ریخت. لایه بالاتر از درزه متقاطع سوم نیز به تبع قسمت واژگون شده، واژگون خواهد شد.

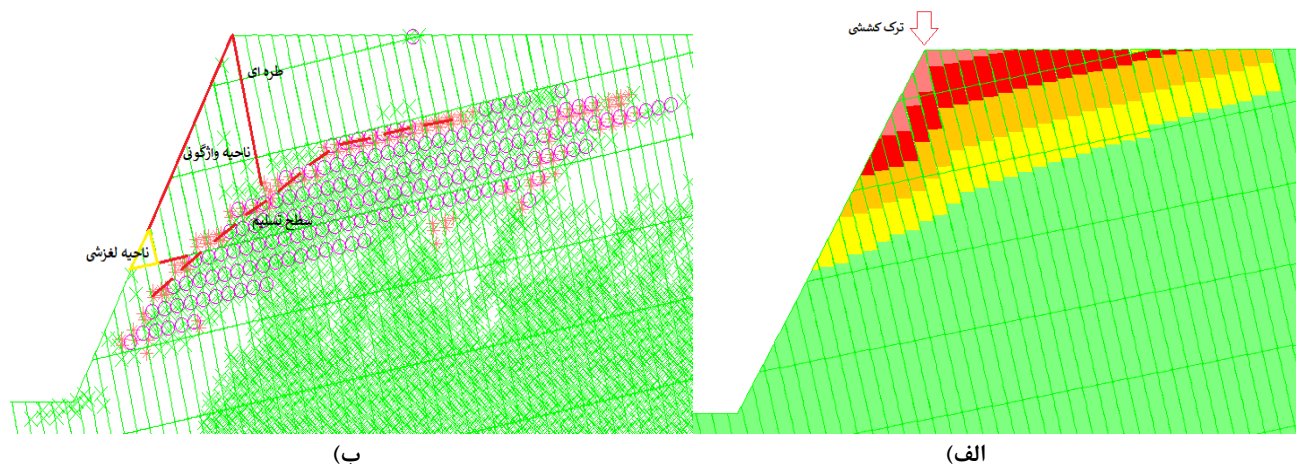


شکل ۸- حالت سه درزه متقاطع با درزه‌های معکوس؛ الف) کانتور جابه‌جایی افقی و وقوع ترک‌های کششی ب) سطح تسلیم، نقاط کششی و تقسیم بندی نواحی گسیختگی

در شکل ۸ الف به خوبی مشاهده می‌شود که در شیب‌های سنگی معکوس، سطح تشکیل گسیختگی برخلاف شیب‌های خاکی دایروی نبوده و بلکه پلکانی رخ می‌دهد. با وقوع ترک کششی این سطح پلکانی تا بالا ادامه نداشته و از بین لایه معکوس جدا شده، ناحیه واژگون شده مشخص خواهد شد. در بالاتر از ترک کششی در تاج باز هم سطح تسلیم پلکانی شکل گرفته که در لایه‌های نزدیک به ترک، لایه‌ها به شکل طره هستند و با خالی شدن لایه‌های زیرین در اثر واژگونی، میل به فروریزش دارند. این سطح پلکانی تا ریز ترک‌های بعدی بر روی سطح شیب ادامه خواهد داشت که خود وضعیت ناپایداری را رقم خواهد زد.

۵-۱-۴- چهار درزه متقاطع با لایه‌های معکوس

در شکل ۹ ب مشاهده می‌شود که سطح تسلیم با گسترش به سمت بالا ادامه دارد اما با رسیدن اولین ترک کششی بزرگ در محدوده تاج شیب سنگی، ناحیه واژگونی و وسعت آن مشخص شده و این لایه‌ها واژگون شده و فرو خواهند ریخت. در قسمت پایینی ناحیه واژگونی به علت ارتفاع بسیار کم و مقاومت خمشی لایه‌ها سطح لغزشی شکل گرفته که در ابتدا در برابر واژگون شدن مقاومت کرده اما با فشار زیاد همراه با لغزش فرو خواهد ریخت. چون ارتفاع لایه‌ها در این مدل به اندازه مدل‌های قبل نیست و کمتر می‌باشد لذا ناحیه واژگونی در سه لایه بالایی مشاهده شده است که گسترش قابل توجهی دارد، پس برای بررسی دقیق تر باید جابه‌جایی‌های سطحی آن نیز با مدل‌های دیگر مقایسه شود.



شکل ۹- حالت چهار درزه متقاطع با درزه‌های معکوس؛ الف) کانتور جابه‌جایی افقی و وقوع ترک‌های کششی ب) سطح تسلیم، نقاط کششی و تقسیم بندی نواحی گسیختگی

سطوح نشان داده شده در شکل ۹ الف سطح پلکانی تغییرات جابه‌جایی‌ها را در لایه‌های معکوس سنگی به خوبی نشان می‌دهد. این تغییرات با وقوع اولین ترک کششی عوض شده که در این شکل نفوذ جابه‌جایی‌ها با لایه‌های پایین‌تر نیز مشخص می‌باشد.

۶- مقایسه مقدار جابه‌جایی درزه‌های متقاطع با لایه‌های معکوس

در این بخش با مقایسه مقدار جابه‌جایی‌های سطحی در شیب‌های سنگی با لایه‌های معکوس در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که در حالت بدون درزه متقاطع، ترک کششی کمی پایین‌تر از تاج شیب رخ داد و علت آن نیز بخاطر طول بسیار زیاد لایه‌ها می‌باشد که ترک کششی با گسترش زود هنگام سطح تسلیم را به سطح شیب در این قسمت خواهد رساند. مقدار جابه‌جایی حداکثر ۲۹ سانتی متر بدست آمده است که در مقایسه با مدل‌های دیگر کمتر می‌باشد.

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود نمودار جابه‌جایی افقی در سطح شیب از پنجه تا بالای شیب نشان داده شده است. در حالت یک درزه متقاطع، نقطه اندازه‌گیری شماره ۵ محل درزه متقاطع می‌باشد که از پنجه تا قبل از آن جابه‌جایی‌ها نزدیک به صفر خواهد بود که با وقوع درزه متقاطع این روند تغییر کرده و جابه‌جایی‌ها شروع به افزایش خواهند کرد. این روند افزایش جابه‌جایی تا تاج شیب ادامه خواهد داشت و اوج آن در تاج به مقدار ۱۰۴ متر خواهد بود که متناظر با نقطه اندازه‌گیری شماره ۱۰ است. از ۱۰ تا ۱۳ مربوط به قسمت ترک کششی است که تقریباً جابه‌جایی مشابه تاج و زیاد می‌باشد. بعد از آن جابه‌جایی‌ها کاهش یافته تا به مقدار نزدیک به صفر برسد. ترک کششی کمی بالاتر از تاج شیب رخ داد (متناظر با نقطه اندازه‌گیری ۱۱) اما حداکثر جابه‌جایی در آن نقطه تقریباً مشابه جابه‌جایی در تاج شیب بوده (متناظر با نقطه اندازه‌گیری ۱۰) و مقدار آن ۱/۴ متر می‌باشد. بعد از آن تا نقطه اندازه‌گیری ۱۳ متناظر با وقوع ترک کششی دوم بر روی سطح بالاتر شیب همچنان به علت ترک کششی مقدار جابه‌جایی‌ها زیاد و حدود ۱/۲۵ متر می‌باشد.

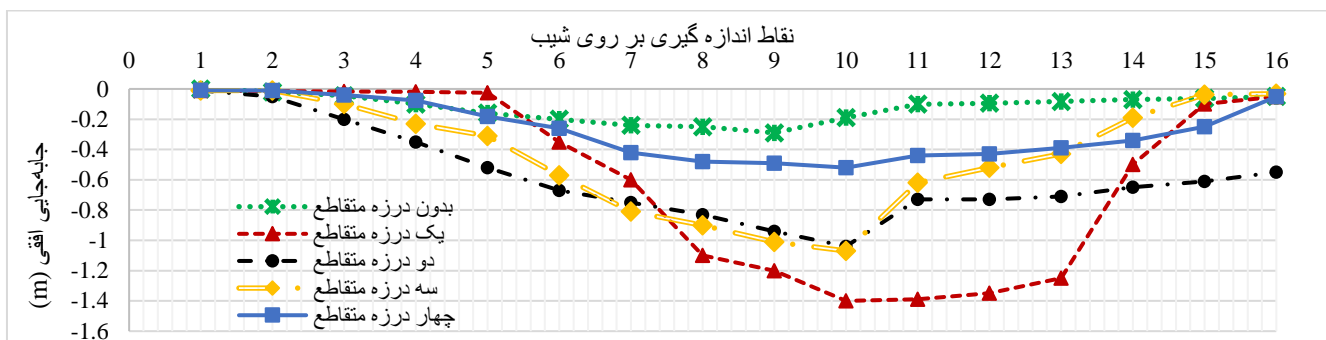
برای نمودار شیب دو درزه متقاطع، همانطور که بیان شد تا رسیدن به ترک کششی در تاج، جابه‌جایی‌ها افزایش خواهد یافت و به حدود ۱ متر و ۴ سانتی متر خواهد رسید. بعد از آن و با گذشت از ترک کششی، یک کاهش چشمگیر در مقدار جابه‌جایی‌ها رخ خواهد داد و به مقدار حدود ۷۳ سانتی متر می‌رسد. بالاتر از آن روند کاهش بسیار کند صورت گرفته و تا ناحیه بسیار زیادی این مقدار جابه‌جایی‌ها بزرگ خواهد ماند و با رسیدن ترک کششی ادامه خواهد داشت.

برای حالت سه درزه متقاطع، در این نوع مدل‌سازی نیز ماکزیمم جابه‌جایی در نقطه تاج شیب رخ خواهد داد. مقدار جابه‌جایی در زیر دو درزه متقاطع پایینی کم است و مقدار آن حدود ۲۰ سانتی متر است. بالاتر از آن و در دولا به بالایی این مقدار بسیار بزرگ شده و به مقدار ۱ متر و ۷ سانتی متر خواهد رسید. از پنجه شیب هرچه به سمت تاج می‌رویم جابه‌جایی‌ها افزایش می‌یابد تا به مقدار ماکزیمم خود در محل جداسازی لایه‌های معکوس یا همان محل رخداد ترک کششی بزرگ برسد. بعد از آن یک کاهش قابل توجه در مقدار جابه‌جایی‌ها مشاهده خواهد شد که مربوط به ناحیه طره‌ای است. بعد از ناحیه طره‌ای باز با کاهش جابه‌جایی‌ها مواجه خواهیم بود.

برای حالت مدل‌سازی دو و سه درزه متقاطع تقریباً روند جابه‌جایی‌ها قبل از وقوع ترک کششی و تاج شیب مشابه هم می‌باشد. این مقدار به ۱/۷ متر در حداکثر خود خواهد رسید. بعد از آن در مدل دو درزه متقاطع به علت طول زیاد لایه‌های معکوس نسبت به حالت سه درزه متقاطع، مقدار جابه‌جایی‌ها بیشتر می‌باشد که این خود علت تشکیل ناحیه طره‌ای و میل شدید این ناحیه به فروریختن بعد از خالی شدن فضای زیرینش به علت واژگونی لایه‌ها را خواهد داشت.

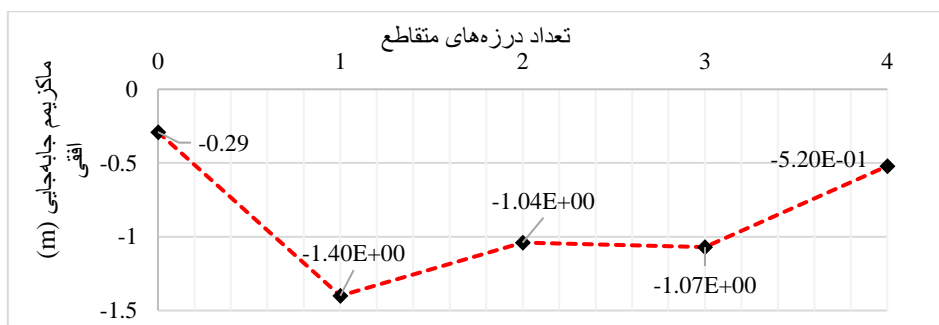
در حالت مدل‌سازی با چهار درزه متقاطع از پنجه شیب تا درزه متقاطع دوم (تقریباً نقطه اندازه‌گیری شماره ۴) در شکل ۱۳ همانطور که مشاهده می‌شود که مقدار جابه‌جایی کمتر از ۸ سانتی متر می‌باشد. با ورود به محدوده لغزشی واژگونی در بالای درزه متقاطع دوم این جابه‌جایی‌ها افزایش چشمگیری داشته است. در نقاط اندازه‌گیری ۸، ۹ و ۱۰ به حداکثر خود (حدود نیم متر) رسیده که علت آن وجود درزه متقاطع بالایی (چهارمی) می‌باشد که لایه‌های سنگی در محدوده تاج شیب را ناپایدار ساخته که به راحتی قابلیت واژگون شدن و فروریزش را خواهند داشت. در بالاتر از ترک کششی و در محدوده طره‌ای باز به علت ناپایداری آن‌ها میل زیادی به افتادن لایه‌ها به شکل طره دیده می‌شود که این مقدار حدود ۴۰ سانتی متر است و بعد از عبور از این ناحیه کم کم با کاهش جابه‌جایی‌ها روبه‌رو خواهیم بود. همچنین به علت کوتاه‌تر شدن لایه‌های معکوس مقدار جابه‌جایی‌ها بسیار کمتر از مدل‌های دیگر می‌باشد. اما به علت واژگونی در ناحیه وسیع در بالاتر

و پایین تر از تاج شیب این جابه‌جایی‌ها در نقطه اندازه‌گیری ۷ تا ۱۳ (محدوده حداکثر جابه‌جایی) تقریباً تفاوت زیادی نداشته و با محدوده ۴۰ تا ۵۲ سانتی متر متغیر می‌باشد.



شکل ۱۰- نمودار جابه‌جایی افقی در سطح شیب از پنجه تا بالای شیب

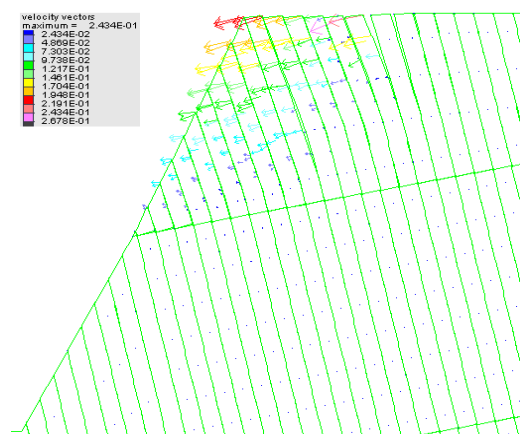
در شکل ۱۱ تعداد درزه‌های متقاطع در برابر ماکزیمم جابه‌جایی‌ها نشان داده شده‌است. این مقایسه نشانگر این مساله است که طول زیاد لایه‌ها و درزه‌های متقاطع، اثرات هم‌زمانی بر گسیختگی واژگونی و مقدار جابه‌جایی‌ها خواهند داشت. در حالت یک درزه متقاطع که طول نسبتاً زیاد است و درزه نیز وجود دارد این مقدار جابه‌جایی به حداکثر خود خواهد رسید که ناپایداری زیادی را ایجاد خواهد کرد. برای حالت دو و سه درزه متقاطع چون که تعدد درزه‌های متقاطع وجود دارد، این مقدار باز هم نسبتاً زیاد است و مشابه هم می‌باشد. برای حالت مدل‌سازی چهار درزه متقاطع، اثرات تعدد درزه‌ها نمی‌تواند بر اثر طول کوتاه لایه‌ها غلبه کند و مقدار جابه‌جایی‌ها را زیاد کند لذا با کاهش مقدار جابه‌جایی مواجه خواهیم بود. طول زیاد لایه‌های سالم و تعدد درزه‌ها دو پارامتر در ناپایداری شیب سنگی و وقوع گسیختگی واژگونی می‌باشند. همچنین به علت تعدد در درزه‌ها گسیختگی سریع‌تر اتفاق خواهد افتاد و این علت نیز باعث کاهش مقدار جابه‌جایی‌ها می‌باشد.



شکل ۱۱- نمودار ماکزیمم جابه‌جایی افقی در سطح شیب در برابر تعداد درزه‌های متقاطع

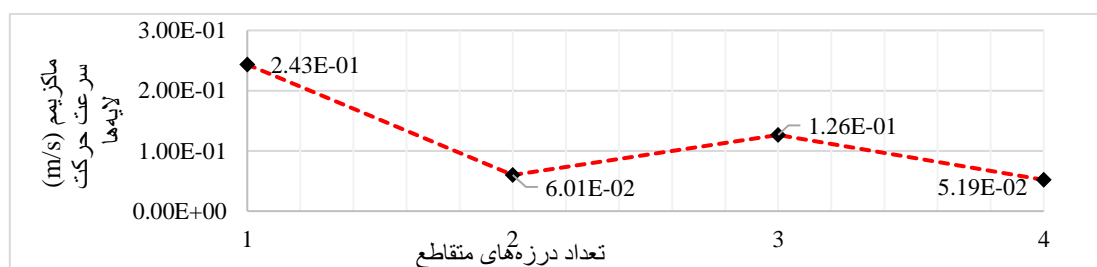
۷- بررسی کانتور سرعت ذرات و درزه‌های باز شده

در شکل ۱۲ کانتور سرعت حرکت لایه‌ها و جهت حرکت آن‌ها در مدل‌سازی را نشان می‌دهد. در این شکل به خوبی جهت فروریختن و میل به واژگونی لایه‌ها با فلش مشخص شده‌است. در این شکل برای حالت یک درزه متقاطع سرعت و جهت حرکت در کمی بالاتر از تاج شیب مشخص شده‌است که تمایل به واژگونی دارند. در کمی عقب‌تر در ناحیه طره‌ای، جهت حرکت لایه‌ها کمی به سمت پایین‌تر نشان دهنده این موضوع می‌باشد که این لایه‌ها به شکل طره بوده و میل به افتادن با سر را خواهند داشت. برای درزه‌های متقاطع بیشتر نیز این موضوع که ترک کششی باعث ایجاد ناحیه طره‌ای می‌شود اما کمی در عقب‌تر این اتفاق رخ خواهد داد. وجود درزه‌های متقاطع از یک پایین و ترک‌های کششی از سمت دیگر محدوده واژگونی را تحت تاثیر قرار می‌دهد.



شکل ۱۲- نمایش بردارهای سرعت لایه‌ها

در شکل ۱۳ برای حالت شیب سنگی معکوس دارای یک درزه متقاطع در محدوده شیب، سرعت حرکت لایه‌ها حدود ۲۴ cm/s است که در مقایسه با حالت های دو و چهار درزه متقاطع در مدل‌سازی حدود ۴ برابر بیشتر است و همچنین در بخش های قبل دیدیم که ماکزیمم جابه‌جایی آن نیز بیشتر است. اما برای حالت دو و سه درزه متقاطع که ماکزیمم جابه‌جایی تقریباً مشابه بود، سرعت حرکت لایه‌های مدل دارای سه درزه متقاطع بیشتر است و این امر مربوط به تعداد بیشتر درزه است که با بروز ناپایداری بیشتر سبب سرعت سریع تر لایه شده‌است. برای حالت مدل دارای چهار درزه متقاطع چون ماکزیمم جابه‌جایی کم نسبت به بقیه مدل‌ها کمتر است لذا اثر تعدد درزه در این مدل بر اثر ماکزیمم جابه‌جایی غلبه نکرده و سرعت حرکت لایه کم است و مشابه حالت مدل دارای دو درزه می‌باشد.

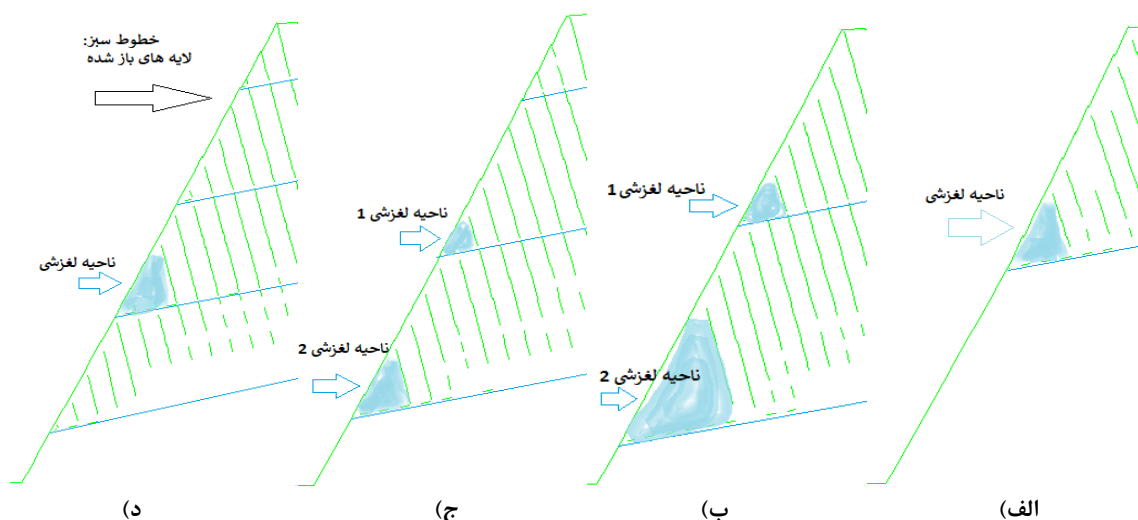


شکل ۱۳- ماکزیمم سرعت حرکت لایه‌ها

۸- تاثیر ناحیه لغزشی بر گسیختگی واژگونی

در شکل ۱۴ خطوط سبز رنگ وجود بازشدگی در لایه‌ها می‌باشد و ناحیه آبی کم رنگ نشان داده شده، ناحیه لغزشی را نشان می‌دهد که در آن محدوده بازشدگی وجود ندارد و مکانیزم آن متفاوت می‌باشد. در شکل ۱۴ الف، برای حالت یک درزه متقاطع ناحیه لغزشی تشکیل شده در محدوده پایینی ناحیه واژگونی قرار دارد. در شکل ۱۴ ب، برای حالت مدل دارای دو درزه متقاطع دو ناحیه لغزشی شکل گرفته که این نواحی به دلیل ارتفاع کم لایه‌ها در برابر ضخامتشان مقاومت قابل توجهی را در شروع گسیختگی در برابر واژگون شدن از خود نشان می‌دهند.

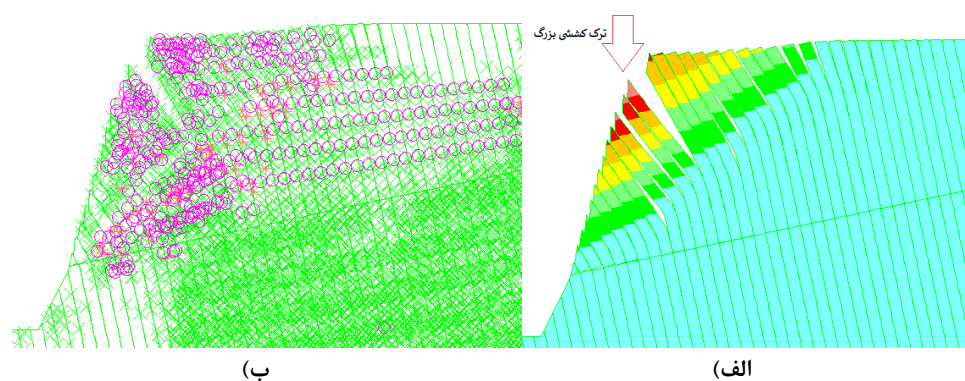
در ناحیه لغزشی پایینی چون وسعت آن زیاد است و مقاومت بیشتری را دارد لذا در محدوده بین دو درزه واژگونی رخ نداده و فقط واژگونی در قسمت بالاتر که ناحیه لغزشی کوچکتری دارد رخ می‌دهد، که می‌توان به علت کوچک بودن آن ناحیه از آن صرف نظر کرد. برای حالت مدل‌سازی در شکل ۱۴ ج نیز مشابه حالت ۱۴ ب می‌باشد و فقط لغزش در قسمت بالایی که ناحیه لغزشی در آن کوچکتر است رخ می‌دهد. در شکل ۱۴ د اگر چه مساحت ناحیه لغزشی بزرگ است اما به علت اینکه ناحیه واژگونی سه لایه بالایی را شامل می‌شود و محدوده وسیعی دارد لذا ناحیه لغزشی نمی‌تواند به خوبی در برابر گسیختگی مقابله کند و واژگونی رخ می‌دهد.



شکل ۱۴- ناحیه لغزشی (آبی کم رنگ) و لایه‌های باز شده حین گسیختگی (خطوط سبز)

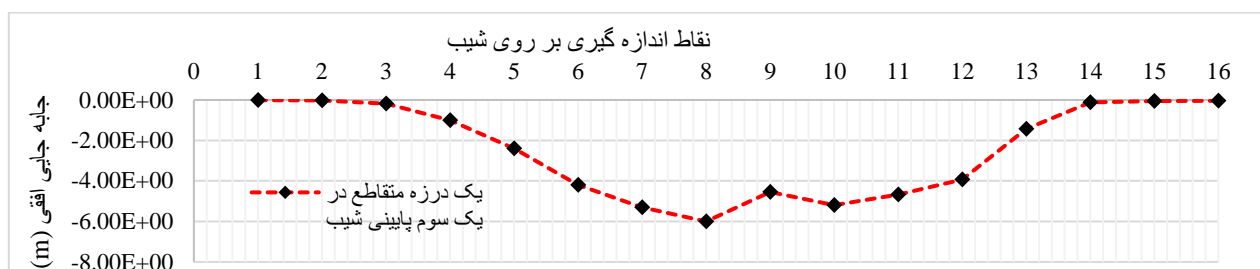
۹- تاثیر مکان قرارگیری درزه

در این بخش تاثیر مکان قرارگیری یک درزه در موقعیت شیب بررسی شده‌است. شیب به سه ناحیه پایین، وسط و بالا تقسیم بندی شده‌است؛ حالت درزه متقاطع در وسط شیب در بخش‌های قبل توضیح داده‌شد. در شکل ۱۵ حالت یک درزه متقاطع با درزه‌های معکوس در یک سوم پایینی شیب نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود وجود یک ترک کششی بزرگ قبل از رسیدن به تاج شیب سبب وجود ناحیه واژگونی بزرگ شده و شیب معکوس شروع به فروریختن خواهد کرد، این ترک کششی ناحیه طره‌ای را نیز به خوبی مشخص کرده که لایه‌های بالاتر از ترک با خالی شدن لایه‌های زیرین میل به افتادن خواهند داشت. وجود این درزه متقاطع در قسمت پایینی شیب به علت سنگینی و طول نسبتاً زیاد لایه‌ها، باعث ناپایداری شدیدی در شیب خواهد شد.



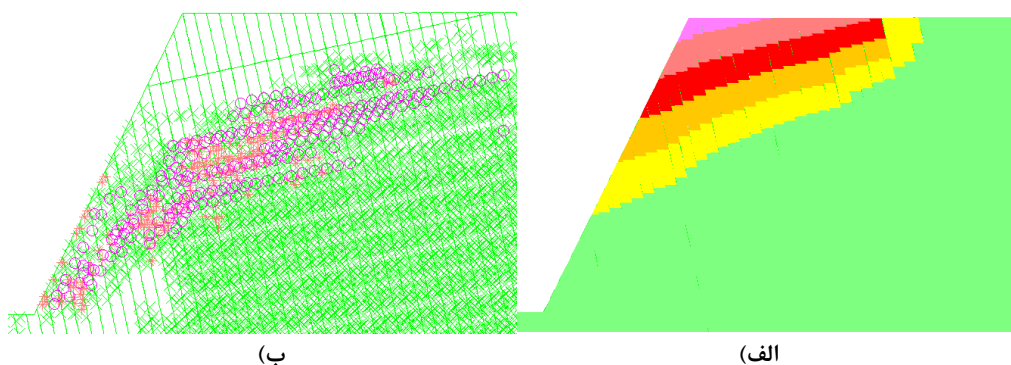
شکل ۱۵- حالت یک درزه متقاطع با درزه‌های معکوس در یک سوم پایینی شیب؛ الف) کانتور جابه‌جایی افقی و وقوع ترک‌های کششی ب) سطح تسلیم، نقاط کششی و تقسیم بندی نواحی گسیختگی

همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده‌است روند افزایش جابه‌جایی‌ها تقریباً مشابه حالت‌های دیگر می‌باشد اما حداکثر جابه‌جایی افقی در قسمت رخداد ترک کششی برابر با ۶ متر بدست آمده که نسبت مدل‌های تحلیلی دیگر بسیار بزرگتر می‌باشد. علت این تفاوت آشکار در مقدار ماکزیمم جابه‌جایی‌ها، وجود درزه متقاطع در قسمت پایینی شیب است که باعث ناپایداری شدیدی شده‌است.



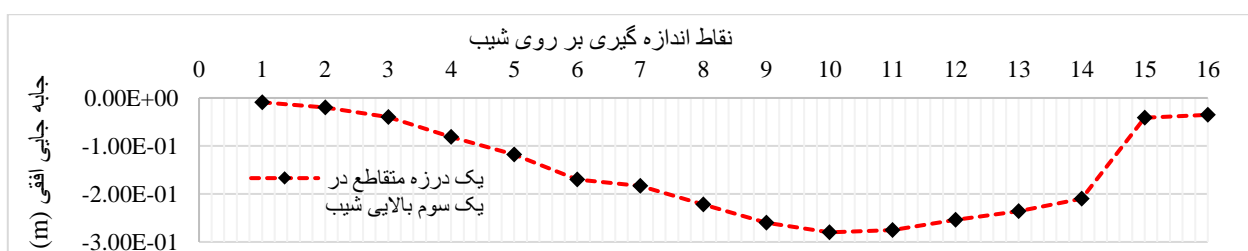
شکل ۱۶- نمودار جابه‌جایی افقی در سطح شیب از پنجه تا بالای شیب- یک درزه متقاطع در یک سوم پایینی شیب

در ادامه در شکل ۱۷ حالت یک درزه متقاطع با درزه‌های معکوس در قسمت یک سوم بالایی شیب بررسی شده‌است. این درزه نمی‌تواند تاثیر چندانی را بر شکل گسیختگی‌ها داشته باشد چون ترک کششی مشاهده نشده و مقدار ماکزیمم جابه‌جایی‌ها نیز کمتر از حالت وجود یک درزه در قسمت میانی و پایینی شیب می‌باشد.



شکل ۱۷- حالت یک درزه متقاطع با درزه‌های معکوس در یک سوم بالایی شیب؛ (الف) کانتور جابه‌جایی افقی و وقوع ترک‌های کششی (ب) سطح تسلیم، نقاط کششی و تقسیم بندی نواحی گسیختگی

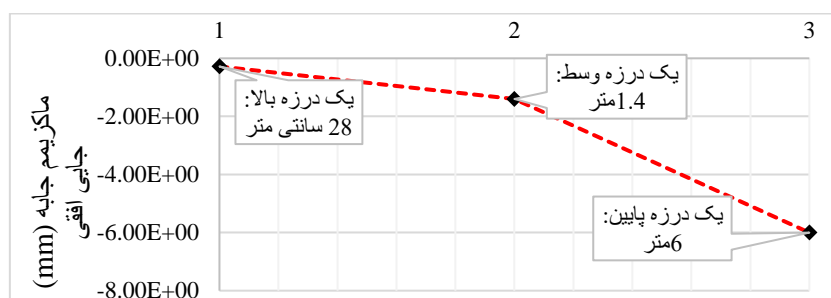
در شکل ۱۸ مقدار ماکزیمم جابه‌جایی افقی ۲۸ سانتی متر بدست آمده است که برای حالت بدون درزه نیز در مدل مربوط به صحت سنجی تقریباً همین مقدار بدست آمد. این خود نشان دهنده تاثیر بسیار ناچیز وجود درزه در قسمت بالایی شیب بر روی مقدار جابه‌جایی‌های افقی می‌باشد.



شکل ۱۸- نمودار جابه‌جایی افقی در سطح شیب از پنجه تا بالای شیب- یک درزه متقاطع در یک سوم بالایی شیب

در شکل ۱۹ ماکزیمم جابه‌جایی افقی را برای هر سه حالت مدل‌سازی، یعنی یک درزه در پایین، یک درزه در وسط و حالت یک درزه در بالای شیب نشان می‌دهد. در این حالت با مقایسه مکان قرارگیری درزه مشاهده می‌شود که هرچه درزه در قسمت بالاتر شیب قرار بگیرد تاثیر آن در مقدار جابه‌جایی‌ها کم است و با قرار گرفتن درزه در قسمت میانی این مقدار بیشتر شده و به حدود ۱.۴ متر خواهد رسید و با قرارگیری در قسمت پایینی شیب این مقدار به حدود ۶ متر رسیده که وضعیت بسیار ناپایداری را برای شیب ایجاد می‌کند. در

حالت درزه در بالا، گسیختگی سریع اتفاق خواهد افتاد و همین امر سبب کاهش مقدار جابه‌جایی‌ها خواهد شد. با تغییر مکان درزه به پایین‌تر، سرعت گسیختگی کاهش پیدا کرده و باعث بروز جابه‌جایی‌های به مراتب بزرگ‌تر خواهد شد.



شکل ۱۹- نمودار ماکزیمم جابه‌جایی افقی برای مکان قرارگیری درزه

۱۰- نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی اثرات درزه‌های مقاطع با لایه‌های معکوس در شیب‌های سنگی بر روی مکانیزم تشکیل گسیختگی واژگونی و وجود ترک‌های کششی و تعیین مقدار جابه‌جایی‌های سطحی و تاثیر متقابل آن بر روی شکل و محدوده گسیختگی واژگونی می‌پردازد. برای بررسی و مدل‌سازی از نرم افزار المان گسسته UDEC7 در محیط سنگ استفاده شده است. به این منظور ابتدا با صحت سنجی مقاله مرجع [۴] از صحت انجام تحلیل‌ها مطمئن شده با مدل‌سازی در نرم افزار مذکور و بررسی درزه‌های مختلف در آن‌ها، جابه‌جایی‌های سطحی و محل گسیختگی‌ها بررسی شده که مهمترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

۱- سطوح گسیختگی در شیب‌های سنگی با لایه‌های معکوس برخلاف شیب‌های خاکی که دارای سطح لغزش دایروی‌اند، دارای سطح گسیختگی پلکانی می‌باشد. سطح تسلیم شکل گرفته با رخ دادن بازشدگی در بین لایه و ایجاد ترک‌های کششی در سطح در محدوده تاج شیب به سطح شیب رسیده و محدوده گسیختگی واژگونی را ایجاد خواهد کرد، همچنین ناحیه گسیختگی در شیب‌های سنگی معکوس به سه بخش تقسیم بندی می‌شود: ناحیه لغزشی، ناحیه گسیختگی واژگونی و ناحیه طره‌ای. ترک‌های کششی متعدد در محدوده تاج شیب به علت طول زیاد لایه‌های معکوس می‌باشد. همچنین ناحیه لغزشی شکل گرفته در قسمت پایینی ناحیه واژگونی، تا حدی در برابر واژگون شدن لایه‌های سنگی مقاومت می‌کند.

۲- در مدل با یک درزه مقاطع بدلیل طول زیاد لایه‌ها و ناپایداری بوجود آمده به علت درزه، محدوده گسیختگی واژگونی بزرگ است. جابه‌جایی‌ها در این مدل، در ناحیه بالای درزه مقاطع بزرگتر خواهند بود، لذا باید برای پایدار سازی توجه بیشتری به بالاتر از درزه مقاطع داشت. در مدل با دو درزه مقاطع سطح تسلیم در پایین‌تر از درزه اول شکل نمی‌گیرد. در این مدل می‌توان از ناحیه لغزشی به دلیل کوچک بودن صرف نظر کرد. در این مدل نیز برای پایدارسازی باید توجه خود را به لایه بالایی جمع کرد. در مدل با سه درزه مقاطع، سطح تسلیم در بالای درزه مقاطع اول با رسیدن به درزه مقاطع دوم قطع خواهد شد. ناحیه واژگونی به دو بخش تبدیل شده؛ یک بخش بین درزه دوم و سوم و بخش دیگر بالای درزه سوم تا تاج. در این مدل به دلیل وجود درزه‌های متعدد محدوده واژگونی بزرگ بوده اما مقدار جابه‌جایی‌ها تا قبل از رسیدن به تاج تقریباً مشابه حالت قبل می‌باشد. در مدل با چهار درزه مقاطع سطح تسلیم در بالای درزه مقاطع اول پیش رفته و با رسیدن ترک کششی در بالای درزه دوم، این امتداد به تاج شیب رسیده و ناحیه واژگونی بزرگی را به دلیل درزه‌های متعدد ایجاد خواهد کرد. طول کوتاه لایه‌ها سبب شده که مقدار جابه‌جایی در این مدل نسبت به مدل‌های دیگر کمتر باشد.

۳- هرچه تعداد درزه‌ها بیشتر شود، گسیختگی واژگونی با سرعت بالاتری انجام شده و همین علت باعث کم شدن ماکزیمم جابه‌جایی‌ها خواهد شد. در حالت مدل‌سازی با یک درزه مقاطع، سرعت حرکت لایه‌ها بالاتر و مقدار جابه‌جایی نیز به تبع آن بزرگتر است که این دو اثر نسبت مستقیمی با هم دارند. در مدل با چهار درزه مقاطع، تعداد درزه‌ها بر ماکزیمم جابه‌جایی و سرعت لایه‌ها غلبه نکرده و این

مقادیر نسبت به مدل های دیگر کمتر می باشد. نواحی لغزشی نیز به علت طول کوتاه لایه ها و عدم تمایل به خمیدگی و واژگون شدن، تا حدی در برابر واژگونی مقاومت کرده اما با فشار زیاد لایه های واژگون شده، این ناحیه نیز دچار گسیختگی خواهد شد.

۴- قرار گرفتن درزه در قسمت یک سوم بالایی شیب تاثیر چندانی در تغییر جابه جایی ها نسبت به حالت مدل بدون درزه ندارد، در حالی که با قرارگیری مکان درزه در قسمت وسط درزه سبب افزایش در میزان ماکزیمم جابه جایی ها شده و ترک های کششی نیز در شیب رخ خواهد داد. با قرار گرفتن درزه در قسمت یک سوم پایینی شیب این مقدار بسیار زیاد شده و با ایجاد ترک کششی بسیار بزرگ شرایط ناپایداری را برای شیب رقم خواهد زد.

۵- در پروژه های عملی باید به ترک کششی رخ داده در بالاتر از تاج شیب توجه کرد و از آن برای پیش بینی وقوع گسیختگی واژگونی استفاده کرد. همچنین با پایش درزه های متقاطع و بررسی تعداد آن ها می توان نحوه شکل گیری سطوح گسیختگی را نشان داد. برای جلوگیری از گسیختگی واژگونی، تقویت شیب از جمله نیلینگ و انکراژ یا ترکیب این دو روش، در نواحی لغزشی پایین شیب می تواند کارساز باشد.

۶- مراجع

- [1] L. Müller, New considerations on the Vaiont slide, *Rock Mechanics & Engineering Geology*, (1968).
- [2] J. Ashby, Sliding and toppling modes of failure in models and jointed rock slopes, M. Sci. Thesis, London Univ., Imperial College., (1971).
- [3] R.E. Goodman, Toppling of Rock Slope, ASCE. Speciality Conf, Rock Engineering for Foundation and Slopes, 2 (1976) 201-234.
- [4] Y. Zheng, R. Wang, C. Chen, F. Meng, Analysis of Flexural Toppling Failure in Rock Slopes Using Discrete Element Method, *Frontiers in Earth Science*, (2021) 921.
- [5] R. Huang, W. Li, Formation, distribution and risk control of landslides in China, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 3(2) (2011) 97-116.
- [6] M. De Freitas, R. Watters, Some field examples of toppling failure, *Geotechnique*, 23(4) (1973) 495-513.
- [7] Ö. Aydan, T. Kawamoto, The stability of slopes and underground openings against flexural toppling and their stabilisation, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 25(3) (1992) 143-165.
- [8] M. Amini, A. Ardestani, Stability analysis of the north-eastern slope of Daralou copper open pit mine against a secondary toppling failure, *Engineering Geology*, 249 (2019) 89-101.
- [9] M. Amini, H. Sarfaraz, K. Esmaili, Stability analysis of slopes with a potential of slide-head-toppling failure, *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 112 (2018) 108-121.
- [10] G. Zhang, F. Wang, H. Zhang, H. Tang, X. Li, Y. Zhong, New stability calculation method for rock slopes subject to flexural toppling failure, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 106 (2018) 319-328.
- [11] S. García-Moya, J. González-Galindo, C. Olalla, Underdip toppling failure mechanism: Case study retrospective analysis and its most determinant parameters, *International Journal of Geomechanics*, 19(6) (2019) 05019005.
- [12] L.-q. Li, N.-p. Ju, S. Zhang, X.-x. Deng, D. Sheng, Seismic wave propagation characteristic and its effects on the failure of steep jointed anti-dip rock slope, *Landslides*, 16(1) (2019) 105-123.
- [13] Z. Tao, C. Zhu, X. Zheng, M. He, Slope stability evaluation and monitoring of Tonglushan ancient copper mine relics, *Advances in Mechanical Engineering*, 10(8) (2018) 1687814018791707.
- [14] Z. Tao, H. Zhang, C. Zhu, Z. Hao, X. Zhang, X. Hu, Design and operation of App-based intelligent landslide monitoring system: the case of Three Gorges Reservoir Region, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, (2019).
- [15] Z. Tao, Y. Wang, C. Zhu, H. Xu, G. Li, M. He, Mechanical evolution of constant resistance and large deformation anchor cables and their application in landslide monitoring, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(7) (2019) 4787-4803.
- [16] Z. Chun, P. Shihui, Z. Junzheng, T. Zhigang, H. Wenshuai, Y. Xuehan, Analysis of slope deformation caused by subsidence of Goaf on Tonglushan ancient mine relics, *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(4) (2019) 2861-2871.
- [17] A. Alzo'ubi, C. Martin, D. Cruden, Influence of tensile strength on toppling failure in centrifuge tests, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(6) (2010) 974-982.
- [18] Y. Zheng, C. Chen, T. Liu, D. Song, F. Meng, Stability analysis of anti-dip bedding rock slopes locally reinforced by rock bolts, *Engineering Geology*, 251 (2019) 228-240.

- [19] M.-C. Weng, C.-Y. Chang, F.-S. Jeng, H.-H. Li, Evaluating the stability of anti-dip slate slope using an innovative failure criterion for foliation, *Engineering Geology*, 275 (2020) 105737.
- [20] B. Nadi, O. Tavasoli, D.-P.N. Kontoni, A. Tadayon, Investigation of rock slope stability under pore-water pressure and structural anisotropy by the discrete element method, *Geomechanics and Geoengineering*, 16(6) (2021) 452-464.
- [21] X. Qu, F. Diao, An optimization of the analytical method for determining the flexural toppling failure plane, *Advances in Civil Engineering*, 2020 (2020) 1-12.
- [22] X. Qu, F. Diao, X. Xu, C. Li, A Review on Anti-Dip Bedding Rock Slopes Subjected to Flexural Toppling, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2023 (2023).
- [23] Y. Zheng, C. Chen, T. Liu, K. Xia, X. Liu, Stability analysis of rock slopes against sliding or flexural-toppling failure, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(4) (2018) 1383-1403.
- [24] Y. Ning, H. Tang, G. Zhang, J.V. Smith, B. Zhang, P. Shen, H. Chen, A complex rockslide developed from a deep-seated toppling failure in the upper Lancang River, Southwest China, *Engineering Geology*, 293 (2021) 106329.