

## بررسی پایداری شیب‌های سنگی پایدار شده توسط سیستم میخ کوبی

### مقاله پژوهشی

سید نوید میرهاشمی\*، دانش آموخته کارشناسی، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی مولانا، قزوین، ایران  
داود کامرانی مقصود، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mirhashemi76@gmail.com

دریافت: ۹۹/۰۴/۲۸ - پذیرش: ۹۹/۰۷/۱۵

صفحه ۱۱۸-۱۰۷

### چکیده

مطالعات پایداری شیروانی‌های سنگی به عنوان نمونه‌ای از سازه‌های ژئوتکنیکی یکی از مهمترین و حساس‌ترین زمینه‌های مهندسی برای طراحان می‌باشد. به گونه‌ای که هر گونه اختلال در عملکرد این سازه‌ها باعث بروز خسارات جبران ناپذیری می‌شود. وجود نامعینی و تغییرپذیری خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها و سنگ‌ها و همچنین بروز خطا در اندازه‌گیری‌ها موجب شده که کاربرد تحلیل‌های مبتنی بر قابلیت اعتماد در مهندسی ژئوتکنیک مورد توجه قرار بگیرد. در این پژوهش، شیروانی‌های سنگی، مدلسازی شده و پایداری آنها تحت اثر بار دینامیکی بررسی خواهد شد و در صورت ناپایدار بودن، روش مناسب و بهینه برای پایدارسازی آنها با استفاده از تور طراحی و ارائه خواهد شد. شیروانی سنگی با زاویه‌های شیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه در نظر گرفته شد و با کمک روش‌های دستی ارزیابی پایداری آن صورت می‌گیرد. سپس با استفاده از نرم افزار phase 2 در حالت دو بعدی مدل المان محدود آن ساخته شده و ارزیابی پایداری شیب تحت شرایط استاتیکی و دینامیکی انجام می‌گردد. در ادامه با قرار دادن تور به همراه راک بولت‌ها، پایداری شیروانی سنگی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که در این تحقیق، نحوه آرایش بولت‌ها نیز در ارزیابی پایداری شیروانی‌های سنگی تحت اثر بارگذاری‌های دینامیکی و استاتیکی صورت می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل دینامیکی، شیب سنگی، فاکتور اطمینان، phase 2

### ۱- مقدمه

بنابراین بحث پایدارسازی شیب‌های سنگی با توجه به مباحث مطرح شده می‌تواند دارای اهمیت زیادی باشد. تاکنون پیشنهاد مناسبی برای بهینه‌سازی در تسلیح شیب‌های سنگی به طوری که بتوان از آن در سایر پروژه‌های تسلیح سنگی استفاده کرد ارائه نشده است. بنابراین، با توجه به مطالب ذکر شده بررسی بهینه‌سازی در تسلیح شیب‌های سنگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است در این تحقیق سعی گردیده است تا موضوع فوق بررسی گردیده و راهکاری مناسب برای پایدارسازی بهینه‌ی شیب‌های سنگی با استفاده از تور ارائه گردد. نحوه استفاده از مواد ژئوستتیک در شیروانی‌های سنگی متفاوت با نحوه استفاده آنها در شیروانی‌های خاکی است (غیاثیان، ۱۳۹۵).

از جمله حساس‌ترین و مهم‌ترین مسائل در پروژه‌های عمرانی می‌توان به احداث ساختمان‌های بزرگ، سدها، انتخاب مسیر احداث بزرگراه‌ها، راههای اصلی و فرعی، مسیرهای راه آهن و تونل‌های عبور و مرور و هر گونه توسعه معدنی اشاره کرد که همه‌ی آنها در گرو پایدار سازی شیب‌ها هستند. (توسلی و همکاران، ۱۳۹۷) لغزش و ناپایداری شیب‌های سنگی همواره یکی از عوامل تهدیدکننده ایست که ایمنی سازه‌ها و شریان‌های حیاتی نظیر بزرگراه‌ها، خطوط راه آهن و خطوط انتقال نیرو را که از نواحی کوهستانی عبور می‌کنند به مخاطره می‌اندازد. از این رو ناپایداری شیب‌های سنگی می‌تواند دارای اثرات منفی زیادی باشد. (حداد، ۱۳۸۹) (حاجی‌عزیزی، ۱۳۹۶).

حسینی در سال ۲۰۱۳ میلادی پژوهشی با موضوع بررسی اثر در نظر گرفتن مدل رفتاری هوک-براون و موهر-کلمب در آنالیز پایداری شیب‌های سنگی درزه دار انجام داد. لازم به ذکر است که این آنالیز به وسیله‌ی مدل‌سازی عددی انجام گرفت. این پژوهش به بررسی شیب‌های کناری یک راه پرداخته است. مطالعات میدانی و همچنین مطالعات آزمایشگاهی در انجام این پژوهش تماماً در دسترس قرار داشت. در مطالعات میدانی نقشه دقیق گسستگی‌ها مشخص گردید. همچنین تست‌های آزمایشگاهی به منظور تعیین مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری تک محوری، وزن واحد و پارامترهای مقاومت برشی درزه‌ی موجود انجام گردید. در این پژوهش، آنالیز پایداری شیب سنگی به صورت دو بعدی با استفاده از المان‌های ترکیبی توسط نرم‌افزار المان محدود Phase2 صورت گرفته است. (حسینی، ۲۰۱۳)

حسینی و کیالها در سال ۲۰۱۴ میلادی پژوهشی با عنوان تاثیر فشار آب حفره‌ای بر پایداری شیب‌های سنگی انجام داده‌اند. در این پژوهش شیب‌های صفر، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه از درزه سنگ‌ها با استفاده از نرم‌افزار phase2 به صورت مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که از عنوان پژوهش نیز مشخص می‌گردد اصلی‌ترین پارامتری که مورد بررسی قرار گرفت تاثیر پارامتر فشار آب حفره‌ای بر روی درزه سنگ‌ها بوده است. در این پژوهش مشخص گردید که با افزایش فشار آب حفره‌ای در درزه، فاکتور کاهش مقاومت کاهش پیدا کرده است. (حسینی و کیالها، ۲۰۱۴)

## ۲- پیشینه تحقیق

مطالعات پایداری شیروانی‌های سنگی به عنوان نمونه‌ای از سازه‌های ژئوتکنیکی یکی از مهمترین و حساس‌ترین زمینه‌های مهندسی برای طراحان می‌باشد. این مطالعات نیز همچون عموم مطالعات حوزه‌ی مهندسی عمران از راه‌های مختلفی همچون مطالعات نمونه‌ی واقعی، آزمایشگاهی و همچنین مدل‌سازی عددی امکان‌پذیر است (حاجی عزیز، ۱۳۹۷). در میان موارد بیان شده مطالعات عددی از زمان و هزینه‌ی قابل قبولی برخوردار هستند لذا در صورتی که پاسخ‌های آن نزدیک که پاسخ‌های واقعی باشد مسلم است که انتخاب این شیوه درست خواهد بود. در تحقیق حاضر شیب‌های سنگی با زوایای ۱۰،

در بحث تسلیح شیروانی‌های خاکی با استفاده از این مواد، کارهای زیادی انجام شده است و روش‌های تحلیلی و طراحی بسیاری وجود دارد، (رضوی، ۱۳۹۷) در صورتی که تسلیح شیروانی سنگی بحثی است که تا به حال به طور خاص مورد بحث قرار نگرفته است و این بحث تفاوت‌های ملموسی با بحث تسلیح شیروانی‌های خاکی دارد. تاکنون مدرکی دال بر بررسی روش‌های پایداری‌سازی شیروانی‌های سنگی با استفاده از تور یافت نشده است. (مجیدی، ۲۰۱۱) (Cheng, 2007) (Eberhardt, 2004)

شمسی و کنگی در سال ۱۳۹۲ پژوهشی با عنوان "آنالیز پایداری لغزش گوه‌ای در ترانشه‌های سنگی جاده تنگه قیر در شرایط بارگذاری لرزه‌ای محور ایلام-کرمانشاه" انجام دادند. در این پژوهش به دلیل وقوع مکرر پدیده لغزش ترانشه‌ها در محور ارتباطی تنگه قیر با استفاده از نرم افزارهای Rockpack و Swedge به آنالیز پایداری ترانشه‌ها در شرایط بارگذاری لرزه‌ای پرداخته شده است، به منظور تعیین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی توده سنگ از تست‌های آزمایشگاهی و یا تحلیل‌های نرم‌افزاری استفاده شده است. بدین منظور کلیه پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ از جمله  $C$  و  $\phi$  را می‌توان از طریق نرم‌افزار Rocklab محاسبه نمود. برای محاسبه‌ی این پارامترها، از داده‌های ورودی GIS، D، MI استفاده گردید. (شمسی و کنگی، ۱۳۹۲)

فهیمی فر و همکاران (۱۳۹۱) پژوهشی با عنوان پایداری شیروانی‌های سنگی با استفاده از باکس‌های ژئوگریدی انجام دادند. در این مطالعه، پایداری‌سازی شیروانی‌های سنگی با استفاده از باکس‌های ژئوگریدی به عنوان روشی جدید مورد بررسی قرار گرفته و به عنوان مطالعه موردی پایداری‌سازی شیروانی سنگی مشرف به راه آهن میانه -اردبیل -پارس آباد (کیلومتر ۱۱+۰۶۰) در حالتهای خشک، نیمه اشباع و اشباع، در وضعیت‌های استاتیکی، شبه استاتیکی و دینامیکی با استفاده نرم افزارهای تعادل حدی slide و نرم افزار اجزای محدودی plaxis ارزیابی شده است. استفاده از طرح پایداری‌سازی بوسیله باکس‌های ژئوگریدی در این پروژه باعث کاهش هزینه‌های پایداری‌سازی، کاهش حجم خاکبرداری، کاهش نیروی متخصص، عدم لزوم استفاده از برخی ماشین آلات، کاهش زمان اجرای پروژه، افزایش ضریب اطمینان و تطابق مناسبی با شرایط زیست محیطی دارد. (فهیمی و همکاران، ۱۳۹۱)

و با توجه به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگهای بکر به دست آورده شده است. در این رابطه خصوصیات توده سنگ از قبیل مقاومت توده سنگ ( $\sigma_{cm}$ )، مدول تغییرشکل توده سنگ ( $E_m$ )، و ثابت های توده سنگ ( $m_p, s$  و  $a$ ) بوسیله نرم افزار RocLab که توسط هوک و همکاران ارائه شده محاسبه گردیده است و در جدول ۱ نشان داده شده است. (Hoek, 1998)

جدول ۱. پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگهای دولومیتی بدست

آمده توسط نرم افزار RocLab						
Hoek Brown Classification			Hoek Brown Criterion			
$\sigma_{ci}(Mpa)$	GSI	$m_i$	D	mb	s	a
30	50	10	0	1.67 7	0.00 39	0. 50 6
Mohr-Coulomb Fit		Rock Mass Parameters				
C (Mpa)	$\Phi$ (degr)	$\sigma_t$ (Mpa)	$\sigma_c$ (Mpa)	$\sigma_{cm}$ (Mpa)	$E_{rm}$ (Mpa)	
1.49	30.5	0.0	1.8	5.23	3686.23	
4	2	-69	07			

### ۲-۳-۳- اعتبارسنجی

با توجه به نوع مصالح، مختصات دامنه، نحوه مش بندی، وضعیت تنش های برجا در دامنه و سپس نوع مواد موجود در دامنه، مدل ساخته شده Run گردیده و پس از انجام محاسبات توسط نرم افزار، مقدار فاکتور کاهش مقاومت بحرانی به دست می آید.

### ۲-۳-۱- اعتبارسنجی با استفاده از تعریف نرم افزار

قبل از شروع مدلسازیها برای بررسی صحت عملکرد نرم افزار یک مثال از دامنه های مدلسازی شده توسط شرکت Rocscience (برگرفته شده از منوی نرم افزار) توسط نسخه موجود مدلسازی گردید که نتایج حاصل به صورت زیر است. در مثال ارائه شده توسط شرکت Rocscience یک دامنه با مختصات (۰-۰) و (۰-۱۳۰) و (۰-۵۰-۱۳۰) و (۵۰-۵۰) و (۰-۳۰) و (۰-۰) و با مصالح (تیل) مدلسازی گردیده است که پارامترهای ژئوتکنیکی این مصالح عبارتند از: پس از اجرای مدل ساخته شده، مقدار فاکتور کاهش مقاومت دامنه (SRF) برابر ۱/۱۶ بدست آمده است. به منظور بررسی

۲۰ و ۳۰ درجه مورد آنالیز و تحلیل قرار خواهد گرفت. این شیبها تحت بارگذاری دینامیکی و استاتیکی قرار گرفته و آنالیز خواهند شد. در شیبهایی که ناپایدار هستند سیستمهای پایدار کننده در نظر گرفته شده و شیبهای مسلح شده به وسیله انواع سیستمها مورد آنالیز قرار گرفتند. لازم به ذکر است که در این پژوهش ترکیبی از تقویت (راک بولت) و حفاظت (استفاده از تور) استفاده خواهد شد. در این پژوهش، آنالیز عددی تغییرشکل های شیروانی در توده های سنگی توف با استفاده از یک روش المان هیبرید دو بعدی به نام نرم افزار المان محدود Phase2 انجام شده است. (Rocksience, 2001) در این مدلسازی (المان محدود) که براساس آنالیز الاستوپلاستیک بنا شده است، تغییرشکل و تنشها محاسبه می گردند. این آنالیزها جهت ارزیابی پایداری دامنه های توده سنگهای توف درزه دار استفاده شده است. مدلسازی با استفاده از Phase2 شامل: تنظیم نمودن پروژ به توجه به ویژگیهایی از قبیل؛ واحد تنش، طول، نوع تحلیل، تعداد مراحل تحلیل، ترسیم و مش بندی و ویژگی مصالح می باشد.

### ۲-۱- معرفی نرم افزار phase.2

از جمله نرم افزارهای موجود پرکاربرد در حوضه ژئوتکنیک و مکانیک سنگ می توان به نرم افزار Phase2 اشاره نمود که توسط شرکت ROCSCIENCE تهیه شده است. Phase2 یک برنامه دو بعدی پی ریزی شده بر اساس المان محدود الاستو پلاستیک برای محاسبه تنشها و جابه جاییها در روی سطح دامنه می باشد و می تواند برای حل طیف گسترده ای از معادن و مهندسی ژئوتکنیک با بهره گیری از روش عددی المان محدود برای حل مسائل مختلف مورد استفاده قرار گیرد. بررسی پایداری سازه های مختلف، پایداری شیب، مقاومت فشاری تک محوره، ضریب پواسون، وزن واحد سنگ و پارامتر GSI، مدول تغییر شکل سنگ، زاویه اصطکاک، چسبندگی، موقعیت درزه ها استفاده از Rock Bolt و Shotcrete و تاثیرات آنها و تحلیل رفتار المانهای مختلف سازه از قابلیت های نرم افزار Phase2 می باشد.

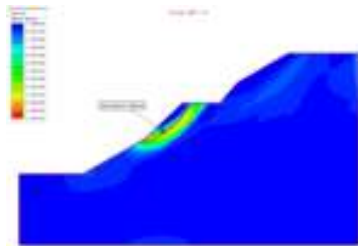
### ۲-۲- مدلسازی شیب سنگی

پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ دولومیت این پارامترها توسط نرم افزار Roclab بر اساس معیار شکست هوک-براون

توانایی نرم‌افزار در ساخت مدل عددی و همچنین نتایج نرم‌افزار Phase2 پوشیده نیست و در این قسمت سعی بر آن است تا از توانایی کاربر در انجام مدل‌سازی صحیح اطمینان حاصل شود. به منظور اعتبار سنجی پژوهش چنگ و همکاران تحت عنوان "تحلیل پایداری دو بعدی دامنه بوسیله روش‌های تعادل حدی و کاهش مقاومت" در نظر گرفته شد. دامنه‌های موجود در این پژوهش در نرم‌افزار مدل شده و پس از آن پایداری این دامنه‌ها بررسی شده تا از انطباق با نتایج پژوهش اطمینان حاصل گردد. هندسه این دامنه در شکل ۳ نشان داده شده است. خصوصیات ژئومکانیکی خاک‌های موجود در این دامنه در جدول ۲ آورده شده و برای تجزیه و تحلیل پایداری دامنه از معیار گسیختگی موهر کلمب استفاده شده است. در این مقاله پایداری دامنه مذکور، به روش تحلیلی و بر اساس روش تعادل حدی برابر با ۱/۳۲۷ به دست آمده است. همچنین ضریب اطمینان (FS) دامنه توسط نرم‌افزار Slide برابر ۱/۳۳۶ به محاسبه شد. (چنگ و همکاران، ۲۰۰۷). این دامنه توسط نرم‌افزار Phase2 مدل‌سازی شده و فاکتور کاهش مقاومت بحرانی دامنه (SRF) به روش کاهش مقاومت برشی (SSR) محاسبه گردید. با توجه به نتایج نمایش داده شده در شکل ۴ مقدار فاکتور کاهش مقاومت بحرانی دامنه (SRF) که برابر با ۱/۳۵ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این عدد از انطباق خوبی با مقادیر به دست آمده از روش تحلیلی و همچنین مدل‌سازی توسط نرم‌افزار Slide می‌باشد.



شکل ۳. هندسه و ابعاد دامنه چنگ و همکاران

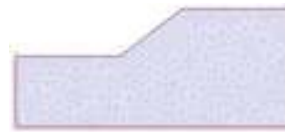


شکل ۴. فاکتور کاهش مقاومت بحرانی دامنه

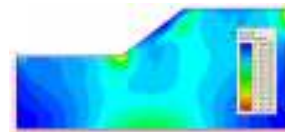
صحت عملکرد نرم‌افزار، دامنه مزبور توسط نسخه موجود phase 2 مدل‌سازی گردید. سپس توسط المانهای مثلثی ۶ گره‌ای (با نوع مش یکنواخت) مش بندی گردیده است. شکل ۱ نمایشی است از هندسه مدل عددی ساخته شده به همراه مش‌بندی اختصاص پیدا کرده به مدل عددی. در مرحله بعد وضعیت تنش‌های برجا در دامنه مشخص شده است که نوع میدان تنش به صورت ثقلی و با نسبت تنش ۱ در نظر گرفته شده است (شکل D). سپس نوع مواد موجود در دامنه مشخص گردیده که مقدار پارامترهای ژئوتکنیکی در نظر گرفته شده برای مصالح موجود در دامنه مطابق با جدول ۲ می‌باشد. در نهایت مدل ساخته شده Run گردیده و پس از انجام محاسبات توسط نرم‌افزار، مقدار فاکتور کاهش مقاومت بحرانی Critical SRF و وضعیت کرنش برشی در دامنه مدل‌سازی شده توسط نسخه موجود و مورد استفاده برابر با ۱/۱۶ به دست آمده است. (شکل ۲)

جدول ۲. مختصات دامنه مورد بررسی

Tensile resistance T (kPa)	Cohesion C (kPa)	Friction angle $\phi$	Unit weight $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Elastic Modulus E (MPa)	Poisson Ratio $\nu$
5	5	30	19	50	0.4



شکل ۱. مدل‌سازی دامنه



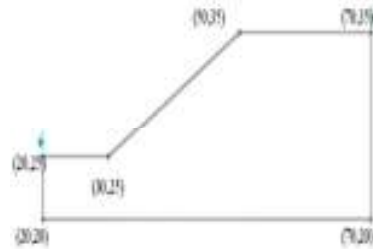
شکل ۲. مقدار فاکتور کاهش مقاومت بحرانی و وضعیت کرنش برشی

## ۲-۳-۲- مطالعات چنگ و همکاران

قبل از شروع بررسی و تحلیل مدل‌های عددی نیاز است تا از صحت نتایج مستخرج شده از نرم‌افزار اطمینان حاصل کرد.

### ۳-۳-۲- مطالعات جیام و دونالد

دیگر پژوهشی که به منظور صحت‌سنجی در نظر گرفته شد، مطالعات جیام و دونالد بود. برای این منظور یک مثال از دامنه‌های بررسی شده توسط جیام و دونالد در سال ۱۹۸۹ در نظر گرفته شد و توسط نسخه نرم‌افزاری موجود مدل‌سازی گردید. هندسه و ابعاد این دامنه در شکل ۵ نشان داده شده و خصوصیات ژئومکانیکی خاک‌های موجود در این دامنه در جدول ۳ آورده شده است. (Giam, 1989)

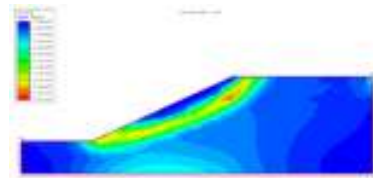


شکل ۵. پارامترهای ژئومکانیکی خاک های موجود در دامنه

جدول ۳. پارامترهای ژئومکانیکی خاک‌های موجود در دامنه

Cohesion C (kPa)	Friction angle $\phi$	Unit weight $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
3	19.6	20

این دامنه توسط نرم افزار Phase2 مدل‌سازی گردید و فاکتور کاهش مقاومت بحرانی دامنه (SRF) به روش کاهش مقاومت برشی (SSR) به دست آورده شد که برابر با ۰/۹۹ است. با توجه به شکل ۶ همان طور که مشاهده می‌گردد این عدد با مقادیر به دست آمده توسط نرم‌افزار Slide همخوانی نزدیکی دارد.



شکل ۶. فاکتور کاهش مقاومت بحرانی دامنه

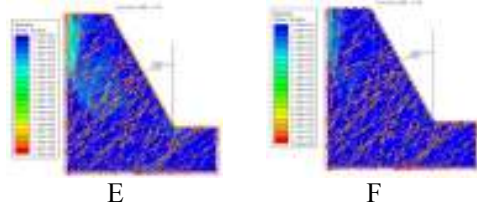
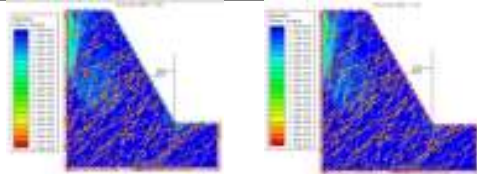
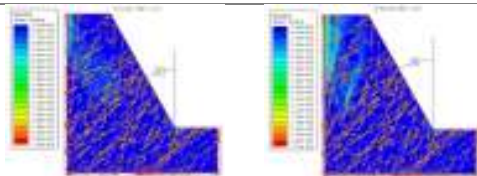
### ۳- پایدارسازی شیروانی‌های سنگی

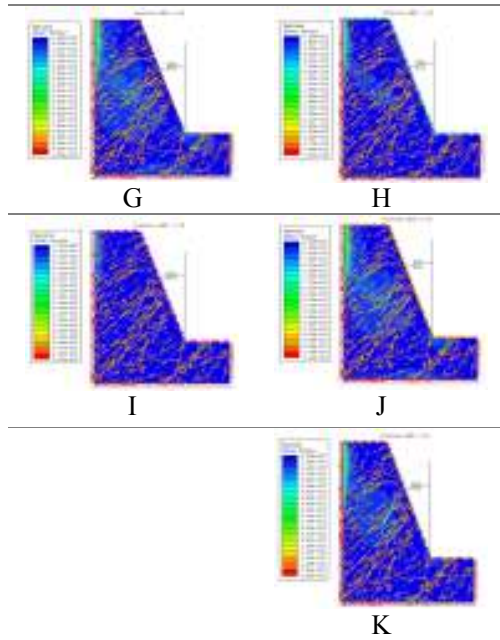
#### ۳-۱- پایدارسازی شیروانی سنگی ۳۰ درجه

اولین سری بررسی مدل‌های عددی ساخته شده مربوط به آنالیز شیروانی ۳۰ درجه در حالت استاتیکی پایدار می‌باشد. با توجه به نمودار گرافیکی کرنش‌های برشی نمایش داده شده در شکل A مشخص می‌گردد که شیروانی ۳۰ درجه در حالت استاتیکی دارای ضریبی برابر با ۱/۱۷ بوده که در نتیجه پایدار بوده و نیازی به مقاوم‌سازی ندارد. البته اندک تغییرات کرنش برشی در پشت تاج شیروانی مشاهده می‌شود که چندان زیاد نبوده و تاثیرگذار نخواهد بود. با توجه به بحث انجام شده مشخص می‌گردد که شیب ۳۰ درجه در حالت استاتیکی نیازی به پایدارسازی نخواهد داشت. پس از بررسی شیب ۳۰ درجه در حالت استاتیکی، به بررسی این شیب تحت بار دینامیکی با توجه به نمودار گرافیکی کرنش برشی پرداخته شد و بر اساس آن نتایج جدول زیر ارائه شده است.

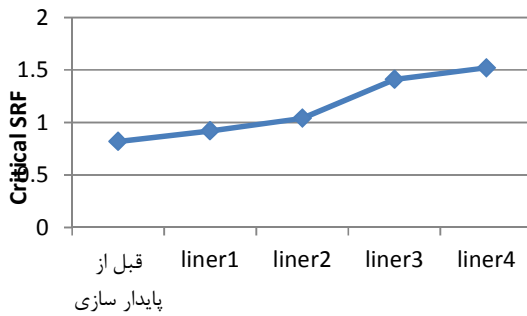
جدول ۴. نتایج تحلیل پایداری تحت شیب ۳۰ درجه

Stabilizing system	Invoice value SRF	Load type	Shape title
NOT	0.82	Dynamic	<b>B</b>
Liner1	0.96	Dynamic	<b>C</b>
Liner2	1.04	Dynamic	<b>D</b>
Liner3	1.41	Dynamic	<b>E</b>
Liner4	1.52	Dynamic	<b>F</b>



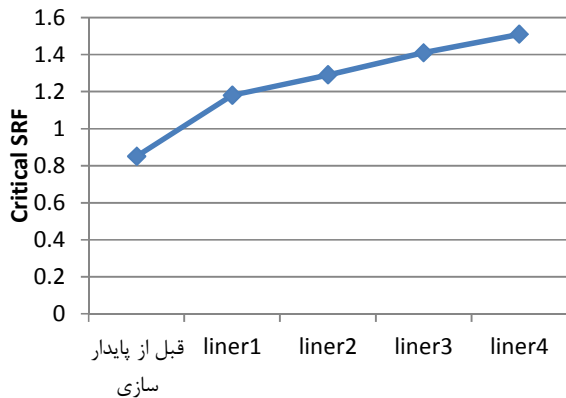


شکل ۷ که مقادیر آن به تفکیک ذکر شده است، نمودار مقادیر مختلف فاکتور SRF به ازای سیستم های مختلفی از پایدارکننده ها است. بر اساس این نمودار مشاهده می شود که سیستم Liner4 بیشترین ضریب اطمینان را برای شیب ۳۰ درجه در نتیجه تحلیل دینامیکی به ارمغان آورده است. مقدار این ضریب همانطور که بیان شد برای سیستم liner2 هرچند بیشتر از یک بوده ولی از حاشیه اطمینان قابل قبولی برخوردار نیست و ترجیح بر آن است که از سیستم قوی تری استفاده گردد. با توجه به مقادیر فاکتور SRF و همچنین با در نظر گرفتن موضوع اقتصادی بودن طرح مشخص می گردد که سیستم Liner3 بهینه ترین سیستمی است که می تواند به جهت پایدار سازی شیب مورد نظر به کار گرفته شود.



شکل ۷. نمودار مقادیر مختلف SRF برای آنالیز دینامیکی شیب ۳۰ درجه

شکل ۸ نمودار فاکتورهای SRF را برای حالات مختلف پایدار سازی شیب ۲۰ درجه و همچنین حالت بارگذاری استاتیکی نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد سیستم پایدار کننده Liner4 بیشترین مقدار فاکتور را سبب شده است. پس از بررسی شیب ۲۰ درجه در حالت استاتیکی، به بررسی این شیب تحت بار دینامیکی با توجه به نمودار گرافیکی کرنش برشی پرداخته شده است که نتایج تحلیل در جدول ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۸. نمودار مقادیر مختلف SRF برای آنالیز استاتیکی شیب ۲۰ درجه

### ۲-۳- پایدارسازی شیروانی سنگی ۲۰ درجه

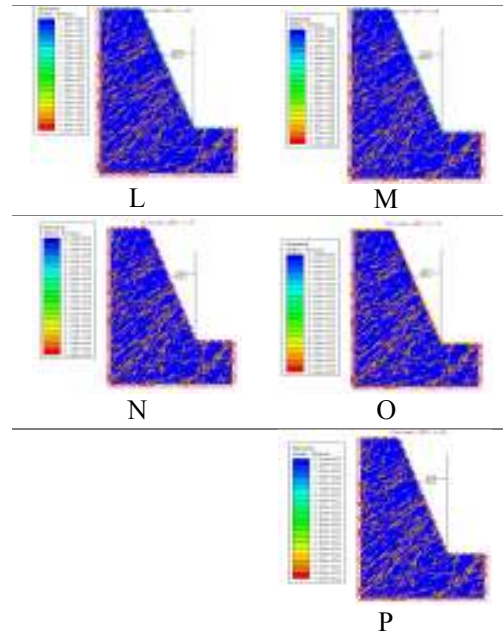
همانند سری مدل های ۳۰ درجه اولین مدل عددی برای زاویه شیب ۲۰ درجه اختصاص دارد به تحلیل استاتیکی این شیب که در جدول ۵ نمایش داده شده است.

جدول ۵. نتایج تحلیل آنالیز شیروانی ۲۰ درجه تحت بار استاتیکی

Stabilizing system	Invoice value SRF	Load type	Shape title
NOT	0.85	Static	<b>G</b>
Liner1	1.18	Static	<b>H</b>
Liner2	1.29	Static	<b>I</b>
Liner3	1.41	Static	<b>J</b>
Liner4	۱/۵۱	Static	<b>K</b>

جدول ۶. نتایج تحلیل آنالیز شیروانی ۲۰ درجه تحت بار دینامیکی

Stabilizing system	Invoice value SRF	Load type	Shape title
NOT	0.38	Dynamic	L
Liner1	0.38	Dynamic	M
Liner2	0.47	Dynamic	N
Liner3	0.74	Dynamic	O
Liner4	0.86	Dynamic	P



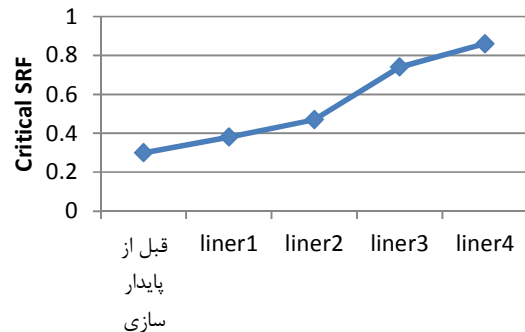
شکل ۹، نمودار مقادیر مختلف فاکتور SRF به ازای سیستم‌های مختلفی از پایدارکننده‌ها در آنالیز دینامیکی را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار مشاهده می‌شود که سیستم Liner4 بیشترین ضریب اطمینان را برای شیب ۲۰ درجه در نتیجه هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی به ارمغان آورده است. مقدار این ضریب در تحلیل استاتیکی برای سیستم liner1 هرچند بیشتر از یک بوده ولی از حاشیه اطمینان قابل قبولی برخوردار نیست و ترجیح بر آن است که از سیستم قوی‌تری استفاده گردد. سیستم‌های liner3 و liner4 از ضرایب بالاتری برخوردار هستند اما بهینه‌ترین حالت همان پایدار سازی به شیوهی سیستم Liner2 می‌باشد. نتایج برای تحلیل دینامیکی اما به گونه‌ای دیگر رقم خورده است و در هیچ یک از حالات این شیب تحت بار دینامیکی پایدار بودن شیب مشخص نمی‌گردد. سیستم‌های پایدارکننده تعیین شده نیز هیچ یک جوابگوی نیاز پایدار سازی این شیب تحت بار دینامیکی نمی‌باشند.

### ۳-۳- پایدارسازی شیروانی سنگی ۱۰ درجه

مطابق با روش بررسی شیب‌ها که قبلاً به آن اشاره نمودیم، این بار تحت زاویه ۱۰ درجه آنالیز و تحلیل می‌شود که نتایج آن در جدول زیر ارائه گردیده است.

جدول ۷. نتایج تحلیل آنالیز شیروانی ۱۰ درجه تحت بار استاتیکی

Stabilizing system	Invoice value SRF	Load type	Shape title
ندارد	۰/۴۹	Static	Q
Liner1	۰/۷۸	Static	R
Liner2	۰/۸۶	Static	S
Liner3	۰/۹۵	Static	T
Liner4	۱/۰۵	Static	U



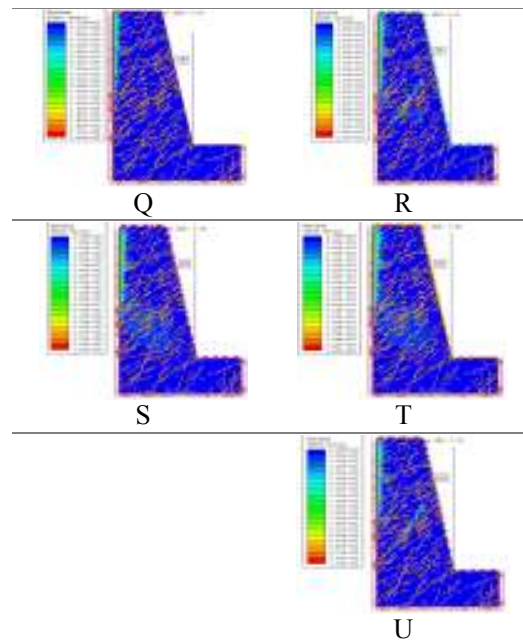
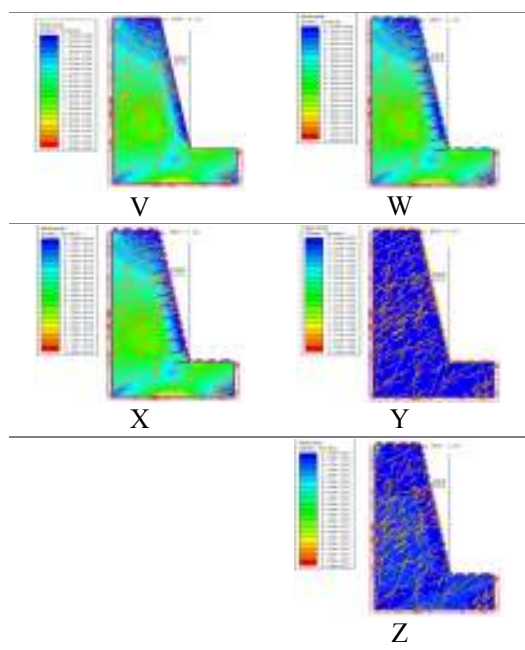
شکل ۹. نمودار مقادیر مختلف SRF برای آنالیز دینامیکی شیب ۲۰ درجه

جدول ۸. نتایج تحلیل آنالیز شیروانی ۱۰ درجه تحت بار

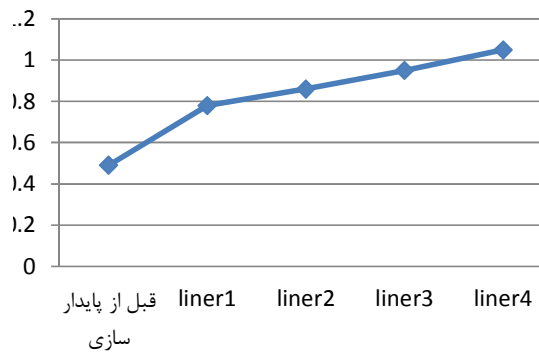
دینامیکی

Stabilizing system	Invoice value SRF	Load type	Shape title
NOT	0.15	Dynamic	V
Liner1	0.23	Dynamic	W
Liner2	0.32	Dynamic	X
Liner3	0.57	Dynamic	Y
Liner4	0.65	Dynamic	Z

با مشاهده نمودار گرافیکی V می‌توان دو نتیجه را مشاهده نمود. اول آنکه گسیختگی رخ داده خلاف حالات پیشین که در پشت تاج شیب بوده، این بار در مرکز و داخل شیب بوده و همچنین در کف شیب نیز مشاهده می‌شود؛ دومین موضوعی که مشاهده می‌شود فاکتور بسیار پایین SRF برای این حالت می‌باشد که مقدار بسیار اندکی است و به هیچ عنوان قابل پذیرش نمی‌باشد. همچنین با توجه به نواحی گسیخته شده می‌توان بیان کرد که نیاز به پایدار کننده نسبتاً قدرتمندی می‌باشد.



شکل ۱۰ نمودار فاکتورهای SRF را برای حالات مختلف پایدار سازی شیب ۱۰ درجه و همچنین حالت بارگذاری استاتیکی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد سیستم پایدار کننده Liner4 بیشترین مقدار فاکتور را سبب شده است. این سیستم پایدار کننده حد لازم را داشته و اندکی بالاتر از آن بوده ولی در عین حال مقدار مطلوب است که افزایش پیدا کند.



شکل ۱۰. نمودار مقادیر مختلف SRF برای آنالیز استاتیکی شیب ۱۰ درجه

پس از بررسی شیب ۱۰ درجه در حالت استاتیکی نوبت می‌رسد به بررسی این شیب تحت بار دینامیکی.



(۱) مدل‌های مختلف تحت بارگذاری دینامیکی شرایط متفاوتی را رقم زدند. نکته‌ی مشترک همگی این بود که هیچیک از شیب‌ها تحت بارگذاری دینامیکی پایدار نبوده و نیاز به سیستم نگهدارنده دارند. شیب ۳۰ درجه به ازای سیستم‌های Liner2, 3, 4 پایدار بوده و شرایط قابل قبولی را رقم می‌زند. این در حالی است که شیب‌های ۲۰ و ۱۰ درجه به ازای هیچیک از سیستم‌های نگهدارنده پایدار نخواهند بود. لذا سیستم‌های پایدار کننده قوی‌تری بایستی مورد استفاده قرار گیرد.

(۲) در عموم موارد شیب‌ها از ناحیه‌ی پشت تاج دچار گسیختگی می‌شوند این در حالی است که در شیب ۱۰ درجه گسیختگی‌ها مربوط به مرکز و کف مدل عددی می‌شوند. می‌توان بیان کرد که با کاهش زاویه‌ی شیب شرایط بسیار بحرانی‌تر شده و گسیختگی‌ها به سمت داخل شیب کشیده خواهند شد.

(۳) با توجه به تمامی موارد بررسی شده می‌توان بیان کرد که با کاهش زاویه‌ی شیب، مقدار گسیختگی‌ها افزایش پیدا می‌کند و فاکتور SRF کاهش پیدا خواهد کرد. این موضوع برای هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی صدق کرده ولی به مراتب برای حالت دینامیکی شدیدتر است.

پیشنهادات پژوهش به صورت زیر بیان می‌گردد:

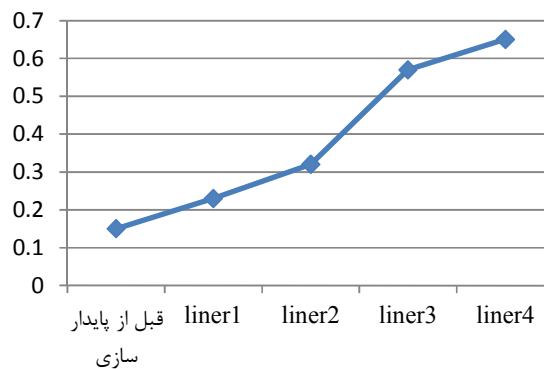
(۱) در انجام این مطالعه مشاهده شد که برشی از شیب‌ها در شرایط گوناگون پایدار نبوده است. لذا پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آتی سیستم‌های قوی‌تری مورد مطالعه قرار گیرد که توانایی پایدار سازی شیب‌های فوق را داشته باشد.

(۲) آنالیز انجام شده بر روی شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه صورت گرفته است. لذا پیشنهاد می‌شود شیب‌هایی با زوایای مختلف نیز مورد بررسی قرار گیرد.

(۳) پیشنهاد می‌گردد تا رفتار سیستم در بارگذاری‌های مختلف دینامیکی بررسی شده و نتایجی همچون اثر فرکانس تحرک دینامیکی و ماکزیمم شتاب تحرک دینامیکی مورد تحلیل و بررسی گردد. پیشنهاد می‌گردد شیب‌هایی با سایر مشخصات مصالح نیز مدل شده و رفتار آنها مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد.

## ۵-مراجع

-شمسی، م، کنگی، ع. (۱۳۹۳). آنالیز پایداری لغزش گوه‌ای در ترانشه‌های سنگی جاده تنگه قیر در شرایط بارگذاری لرزه‌ای محور ایلام-کرمانشاه. اولین کنفرانس ملی عمران و



شکل ۱۱. نمودار مقادیر مختلف SRF برای آنالیز دینامیکی شیب ۱۰ درجه

شکل ۱۱، نمودار مقادیر مختلف فاکتور SRF به ازای سیستم‌های مختلفی از پایدارکننده‌ها در آنالیز دینامیکی را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار مشاهده می‌شود که سیستم Liner4 بیشترین ضریب اطمینان را برای شیب ۱۰ درجه در نتیجه هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی به ارمغان آورده است. مقدار این ضریب در تحلیل استاتیکی برای سیستم‌های liner1 تا liner3 کمتر از ۱ بوده و ناپایدار می‌باشند. سیستم پایدار کننده Liner4 توانسته تا فاکتور SRF سیستم را به مرز قابل قبول برساند هرچند که این عدد بسیار به مرز نزدیک بوده و بهتر آن است که با قوی‌تر نمودن سیستم افزایش پیدا کند. نتایج برای تحلیل دینامیکی اما به گونه‌ای دیگر رقم خورده است و در هیچ یک از حالات این شیب تحت بار دینامیکی پایدار بودن شیب مشخص نمی‌گردد. سیستم‌های پایدارکننده تعیین شده نیز هیچ یک جوابگوی نیاز پایدار سازی این شیب تحت بار دینامیکی نمی‌باشند.

## ۴- نتیجه گیری

مدل‌های عددی مختلف ساخته شده و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند که اهم نتایج آن در ادامه ذکر گردیده است.

(۱) در بررسی مدل‌های استاتیکی مشخص گردید که تنها شیب ۳۰ درجه پایدار بوده و شیب‌های ۱۰ و ۲۰ درجه از پایداری لازم برخوردار نمی‌باشند. شیب ۱۰ درجه تنها با سیستم Liner4 توانسته که پایدار شود حال آنکه شیب ۲۰ درجه به ازای تمامی سیستم‌ای نگهدارنده از پایداری لازم برخوردار است.

- Eberhardt, E., D. Stead, and J. S. Coggan. (2001), "Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes—the 1991 Randa rockslide." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41.1, pp.69-87.
- Hosseinitoudeshki, V., and Kayalha, A., (2014), "The effect of pore pressure on the rock slope stability," *Journal of Novel Applied Sciences*, pp.5547-550.
- Giam, P.S.K. & I.B. Donald, (1989), "Example problems for testing soil slope stability Programs." *Civil Engineering Research Report No. 8/1989*, Monash University, ISBN 0867469218.
- Hoek, E., P. Marinos, and M. Benissi, (1998), "Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses", the case of the Athens Schist Formation. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 57 (2), pp.151-160.
- Hosseinitoudeshki, V., "Comparison of Hock–Brown and Mohr–Coulomb criteria in the stability analysis of jointed rock slopes." *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, (2013), Vol. 4 (9), pp. 2769-2774.
- Majdi Abbas & Amini Mehdi, (2011), "Flexural Toppling Failure in Rock Slopes: From Theory to Applications." *I.J.M.G.E.*, University of Tehran, Vol. 45, No. 1.
- Majdi, Abbas, and Mehdi Amini, (2011), "Flexural Toppling Failure in Rock Slopes: From Theory to Applications", *Int., Journal of Mining & Geo-Engineering* 46.1, pp.21-32.
- Rocksience Consulting Group, (2001), Phase 2.
- توسعه پایدار، کرج، ایران.
- فهمی فر، الف.، عبدالملکی، آ.، احمدوند، م.، قدمی، ح. (۱۳۹۱)، "پایدارسازی شیروانی‌های سنگی با استفاده از باکس‌های ژئوگریدی"، دومین کنفرانس ملی سازه، زلزله و ژئوتکنیک. مازندران، ایران.
- توسلی، ا. نادى، ب. اوصالی، ح. و نورایی کیا، ش.، (۱۳۹۷)، "مقایسه فنی و اقتصادی روش‌های مختلف پایدارسازی موقت و دائمی شیروانی‌های خاکی (مطالعه موردی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات). جاده، ۲۶(۹۴)، ص. ۶۹-۸۵.
- حداد، ع. ح.، دهستانی، ح.، (۱۳۸۹)، "بهبود سازی تسلیح در شیب‌های سنگی ناپایدار با استفاده از روش سطح تسلیح مورد نیاز. مدل‌سازی در مهندسی"، ۸(۲۱)، ص. ۱۵-۳۲.
- حاجی عزیزى، حیدریف، (۱۳۹۶)، "تعیین سطح لغزش بحرانی در شیروانی‌های خاکی با استفاده از روش تغییرات بیشترین شیب محلی، فصلنامه مهندسی عمران فردوسی، ۲۹(۲)، ص. ۱۳-۳۰.
- غیاثیان، ح.، رجبان، ا. و جعفری، س.، (۱۳۹۵)، "بررسی ضریب اطمینان روش اشمزمن در پایداری شیروانی‌های مسلح با ژئوتکتایل"، پژوهشنامه حمل و نقل، ۱۳(۲)، ص. ۹-۱.
- رضوی، س. ک.، حاجی‌علیلوی بناب، م. و رضایی فرعی، ا. ح.، (۱۳۹۷)، "بررسی عددی سه‌بعدی رفتار سیستم میخ‌گذاری خاک به روش تفاضل محدود"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۴۸، ۱(۹۰)، ص. ۲۳-۳۳.
- حاجی عزیزى، م. و نصیری، م.، (۱۳۹۷)، "تعیین عمق مؤثر نفوذ ستون سنگی در شیب‌های خاکی با استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۴۸، ۱(۹۰)، ص. ۱-۱۲.
- Cheng, Y.M., Lansivaara, T. and Wei, W.B., (2007), "Two-dimensional slope stability Analysis by limit equilibrium and strength reduction methods", *Computers and Geotechnics*. Vol. 34, pp. 137-150.

# Examining the Stability of Rock Slopes Stabilized by the Nailing System

*Seyed Navid Mirhashemi, Bachelor of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Molana Institute of Higher Education, Qazvin, Iran.*

*Davood Kamrani, M.Sc., Gard., Department of Civil Engineering Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.*

*E-mail: mirhashemi76@gmail.com*

Received: March 2020-Accepted: September 2020

## ABSTRACT

Stability studies on rocky slopes, which are an example of geotechnical structures, is regarded as one of the most decisive engineering fields for designers. The significance of this field is immense to the extent that any malfunction of these structures may generate irreparable damages. Unpredictability and variability of physical and mechanical properties of soils and rocks, as well as errors made in measurements, has brought forth the application of reliability-based analyzes in geotechnical engineering into further consideration. Accordingly, stone gables are modeled, and their respective rock slope stability under the force of the dynamic load is examined in this study. Moreover, if the slopes are determined to be unstable, an adequate and optimal method will be devised and proposed by means of using a net to ensure their stability. A stone gable with slope angles of 10, 20, and 30 degrees was subject to analysis, and the gable's stability was evaluated with the aid of manual methods. Subsequently, the stone gable's finite element model, in a two-dimensional state, is constructed via phase.2 software, and the rock slope stability assessment is conducted under static and dynamic conditions. Following, the stability of the stone gable is similarly examined and assessed by placing the net with the rock bolts. Remarkably, the arrangement analysis of bolts is also performed in the course of the rock slope stability evaluation of the stone gables under the force of dynamic and static loads.

**Keywords:** Dynamic Analysis, Rock Slope, Safety Factor, Phase 2