

مدل سازی شیروانی های سنگی در برابر شکست واژگونی خمشی در شرایط استاتیکی و دینامیکی (تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی)

مهدی امینی*، استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران
 محمدحسین خسروی، استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران
 علی بهارلو، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
 دریافت: ۱۳۹۲/۰۷/۳۰ - پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۰۵

چکیده

شکست واژگونی خمشی، یکی از انواع شکست های محتمل در شیروانی های سنگی می باشد. این نوع شکست در اثر تنش کششی ناشی از خمش ستون سنگ ها رخ می دهد. در این تحقیق، ابتدا شکست واژگونی خمشی به صورت آزمایشگاهی (در شرایط استاتیکی و دینامیکی) مدل سازی شد. سپس با استفاده از نرم افزار UDEC-DM تمامی مدل های آزمایشگاهی به صورت عددی مورد تحلیل قرار گرفت. برای مدل سازی آزمایشگاهی در شرایط استاتیکی بلوک هایی به طول ۱۰ تا ۳۵ سانتی متر ساخته و انتهای آنها را روی دستگاه میز لغزان محکم کرده و شیب میز را افزایش داده تا بلوک ها بشکنند. برای مدل سازی در شرایط دینامیکی بلوک ها را روی دستگاه میز لرزان نصب کرده و شتاب میز را افزایش داده تا شکست رخ دهد. در مدل سازی عددی جهت شبیه سازی از مدل درزه های voronoi استفاده شد. در این مدل سازی مدل رفتاری درزه ها مدل لغزشی کولمب و مدل رفتاری سنگ بکر مدل موهر است. در پایان نتایج مدل های آزمایشگاهی، عددی و روش تحلیلی موجود با یکدیگر مقایسه گردید. مقایسه این نتایج نشان می دهند نرم افزار عددی فوق ابزاری قدرتمند برای تحلیل شکست واژگونی خمشی و پیش بینی این نوع شکست در شرایط استاتیکی و دینامیکی می باشد.

واژه های کلیدی: شکست واژگونی خمشی، شیروانی سنگی، مدل سازی آزمایشگاهی، مدل سازی عددی، تحلیل استاتیکی و دینامیکی

۱- مقدمه

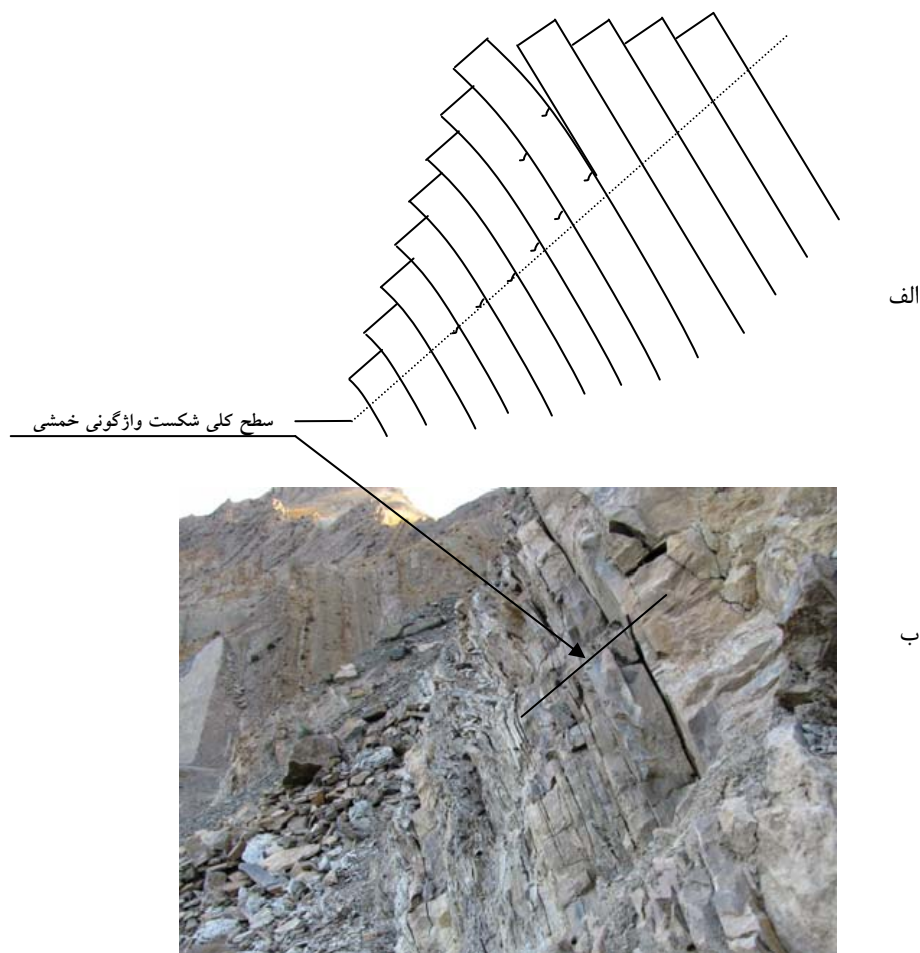
شکست واژگونی خمشی یکی از شکست های مهم در شیروانی های سنگی و شیب های طبیعی می باشد. اگر در توده سنگ تنها یک دسته ناپیوستگی با شیب تند وجود داشته باشد به طوری که جهت شیب آنها به طرف داخل شیروانی باشد، توده سنگ شبیه به ستون هایی عمل می کند که با شیب ملایم روی یکدیگر قرار گرفته اند. در این حالت ستون سنگ ها در اثر نیروی وزنشان تحت خمش قرار دارند. در شرایطی که تنش کششی حاصل از خمش ستون سنگ ها از مقاومت کششی توده سنگ تجاوز کند، آنها شکسته شده و واژگون می شوند. به این نوع ناپایداری واژگونی خمشی می گویند (شکل ۱). در این مقاله این نوع شکست به صورت آزمایشگاهی و عددی مدل سازی شده و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه می شود.

۲- مروری بر تحقیقات انجام شده

Müller، در سال ۱۹۶۸ برای نخستین بار با بررسی ناپایداری های مشرف به دریاچه سد معروف Voint ایتالیا چرخش بلوک های سنگی طبیعی را مطرح نمود (1968, Müller). در سال ۱۹۷۱، Ashby بر مبنای مدل سازی های آزمایشگاهی و تئوری، معیار ساده ای برای ارزیابی این نوع شکست ارائه کرد (Ashby, 1971). این محقق برای نخستین بار نام واژگونی را برای این نوع ناپایداری پیشنهاد نمود. از سال ۱۹۷۱ تا ۱۹۷۶، تحقیقات پراکنده ای در زمینه مثال های موردی، مدل سازی های عددی و آزمایشگاهی روی این نوع شکست به چاپ رسید (Cundall, 1971; Erguvanli and Goodman, 1972; de de Fritas and Watters, 1973; Bukovansky

سال ۱۹۹۲، Aydan and Kawamoto برای نخستین بار روشی تحلیلی برای ارزیابی شکست واژگونی خمشی ارائه نمودند. با استفاده از روش ارایه شده توسط این دو محقق، فاکتور ایمنی شیروانی در برابر شکست فوق به صورت گام به گام و آزمون و خطا قابل محاسبه می‌باشد. بنابراین، تحلیل توده سنگ با این روش بسیار زمان بر است. بین سال‌های ۱۹۷۷ تا ۲۰۰۲، Adhikary این شکست را با استفاده از دستگاه سانتیفریوژ در دانشگاه وسترن استرالیا مدل‌سازی نمود. در سال ۲۰۱۰، امینی و همکارانش روش تحلیلی جدیدی برای ارزیابی این ناپایداری توصیه نمودند که نسبت به روش تحلیلی Aydan and Kawamoto ساده‌تر می‌باشد. تطابق خوبی بین نتایج این روش با مدل‌سازی‌های Adhikary و Aydan and Kawamoto وجود داشت (Amini et al., 2009).

(et al., 1976; Hoffmann, 1974; Goodman and Bray ۱۹۷۶، در سال ۱۹۷۶، مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی، شکست واژگونی را به دو دسته اولیه و ثانویه تقسیم‌بندی نمودند (Goodman and Bray, 1976). در شکست‌های واژگونی اولیه (واژگونی خمشی، بلوکی - خمشی و بلوکی) عامل اصلی ناپایداری، نیروی وزن توده سنگ می‌باشد. در صورتی که در شکست‌های واژگونی ثانویه، عوامل خارجی دیگری به غیر از نیروی وزن، باعث شکست می‌شود. Goodman and Bray، در مقاله فوق راهکار تحلیلی مناسبی برای تحلیل شکست واژگونی بلوکی پیشنهاد نمودند. راهکار مذکور چندین بار به صورت نمودار و کد کامپیوتری برای تحلیل شکست واژگونی بلوکی ارایه شده است (Heok and Bray, 1977; Zambak, 1984; Choquet and Tanon, 1985).



شکل ۱. شکست واژگونی خمشی در شیروانی‌های سنگی، الف) تصویر شماتیک، ب) نمای واقعی

سال ۱۹۸۷، Lorig and cundall مدل Voronoi joint در UDEC را برای مدل‌سازی تیرهای بتونی به‌کار بردند. این مدل با نام مدل تخریبی یا به‌طور خلاصه UDEC-DM شناخته می‌شود. در سال ۲۰۰۹ Alzo'ubi با مدل‌سازی شکست کششی سنگ بکر با استفاده از UDEC-DM نشان داد که این مدل برای آنالیز شکست کششی مناسب است (Alzo'ubi, 2009). از آنجایی که شکست‌های واژگونی خمشی تحت تأثیر تنش کششی می‌شکنند، در این مقاله از این مدل برای آنالیز این شکست استفاده شده است. برای صحت‌سنجی نتایج چند مدل فیزیکی ساخته و آزمایش شد. سپس نتایج این مدل‌ها با روش تحلیلی موجود و UDEC-DM آنالیز و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. لازم به ذکر است تمامی مدل‌های فیزیکی به‌عنوان بخشی از پایان‌نامه دکترای نویسنده اول مقاله در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه توکای ژاپن انجام و در پایان‌نامه فوق به چاپ رسیده است. در این تحقیق نتایج این مدل‌سازی‌ها با نتایج روش‌های تحلیلی و عددی مقایسه شده و استفاده از آنها برای تحلیل شکست واژگونی خمشی تأیید می‌گردد.

۳- مدل‌سازی شکست واژگونی خمشی در

شرایط استاتیکی

۳-۱- آزمایش مصالح مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی

برای مدل‌سازی آزمایشگاهی شکست واژگونی خمشی ابتدا بلوک‌ها آزمایش شده و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آنها به‌دست آمد. در این آزمایشات به روش سه و چهار نقطه‌ای و تیر طره مقاومت کششی مواد مدل اندازه‌گیری شد (شکل ۲). همچنین مقاومت فشاری تک محوری، زاویه اصطکاک داخلی و دانسیته بلوک‌ها به صورت مستقیم تعیین گردید. در جدول ۱ برخی از خصوصیات بلوک‌های مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بلوک‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی

زاویه اصطکاک داخلی (°)	دانسیته (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	مقاومت کششی (کیلو پاسکال)	مقاومت فشاری تک محوره (کیلو پاسکال)	پارامترها
۳۵-۴۰	۱۷-۲۲/۳	۱۵-۳۵	۵۰-۱۱۰	مقادیر

در این روش با استفاده از اصول سازگاری حاکم بر رفتار ستون سنگ‌های مجاور، فاکتور ایمنی شیروانی سنگی در برابر شکست واژگونی خمشی به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$F_s = \frac{t \cdot \sigma_t}{3\Psi^2 \cdot \rho \cdot \cos \delta} \quad (1)$$

$$\Psi = \frac{b - (b^2 - 4ac)^{0.5}}{2a} \cdot H$$

$$a = \frac{\tan(\delta - \gamma) \cos^2 \gamma}{\tan(\delta - \gamma) + \tan(\theta - \delta + \gamma)}$$

$$b = \frac{2 \cos(\theta - \delta + \gamma) - \cos \gamma}{\sin(\theta)}$$

$$c = \left[\frac{\cos(\theta - \delta + \gamma)}{\sin(\theta)} \right]^2$$

پارامترهای به‌کار رفته در این رابطه عبارتند از:

Ψ : زاویه بین صفحه کلی شکست و صفحه عمود بر

ناپوستگی‌های توده سنگ؛

θ : زاویه صفحه شیروانی نسبت به افق؛

H: ارتفاع شیروانی؛

δ : زاویه شیب لایه‌بندی توده سنگ؛

ρ : وزن واحد حجم سنگ بکر؛

σ_t : مقاومت کششی ستون سنگ؛

t: عرض ستون سنگ؛

Ψ : طول معادل ستون سنگ‌های دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی.

در سال ۱۹۸۹، Pritchard شکست واژگونی خمشی را با استفاده از نرم‌افزار عددی UDEC مورد بررسی قرار داد (Pritchard, M. A., 1989). این محقق به این نتیجه رسید که با استفاده از نرم‌افزار UDEC می‌توان تغییر شکل ستون سنگ‌ها را با دقت مطلوبی مدل‌سازی نمود ولی مدل‌سازی و پیش‌بینی شکست کششی بسیار مشکل است. در سال ۱۹۹۰، Pritchard and savigny بررسی گسترده‌ای درباره شکست واژگونی به روش عددی انجام داده و نتیجه گرفتند که نرم‌افزار UDEC برای شبیه‌سازی شکست واژگونی خمشی مناسب نیست. زیرا مدل‌سازی سطح شکست در UDEC بسیار مشکل و حتی غیرممکن است. اصولاً UDEC برای درزه‌های مجزا یا درزه‌های محدود در سنگ بکر طراحی نشده است (Alzo'ubi, 2009).

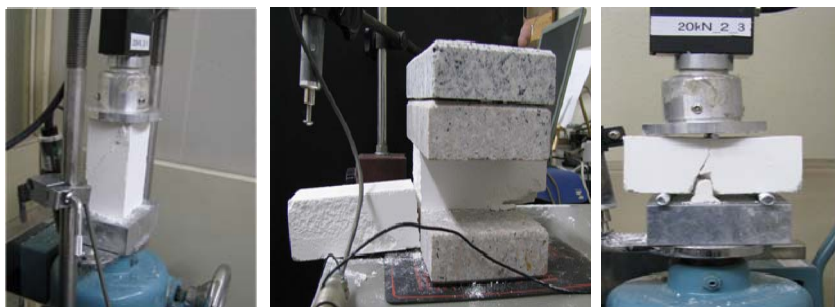
۲-۳- مدل سازی تک بلوک

۱-۲-۳- مدل سازی آزمایشگاهی

به منظور کنترل بهتر آزمایش، ابتدا تک بلوک دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی با استفاده از میز شیب دار لغزان آزمایش شد. برای انجام آزمایش، بلوک‌هایی با طول تقریبی ۱۰ تا ۳۵ انتخاب و انتهای آنها روی میز محکم شد. سپس شیب میز افزایش یافت تا بلوک به صورت واژگونی خمشی بشکند (شکل ۳).

۲-۲-۳- مدل سازی عددی

تمامی این مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار UDEC-DM مدل سازی و شیب میز برای شکست واژگونی خمشی پیش‌بینی شد. جدول ۲ پارامترهای ژئومکانیکی به کار رفته در مدل سازی عددی را نشان می‌دهد. در شکل ۴ یک نمونه از مدل سازی عددی نشان داده شده است. در این مدل سازی‌ها پارامترهای ژئومکانیکی درزه‌ها یا Flaws که توسط دستور Voronoi ایجاد شده مشابه پارامترهای ژئومکانیکی مربوط به سنگ بکر می‌باشد.



الف

ب

ج

شکل ۲. اندازه‌گیری خواص مقاومتی بلوک‌های مورد استفاده در مدل فیزیکی الف) مقاومت فشاری تک محوره، ب) مقاومت کششی نمونه‌ها با استفاده از روش تیر طره، ج) مقاومت کششی نمونه‌ها با استفاده از تست خمش



الف

ب

شکل ۳. مدل سازی فیزیکی تک بلوک دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی با استفاده از سطح شیب دار لغزان، الف) قبل از شکست، ب) بعد از شکست جدول ۲. پارامترهای ژئومکانیکی به کار رفته در مدل سازی عددی تک بلوک

پارامترهای ژئومکانیکی	مقادیر
ضریب پواسن	۰/۲۵
مدول یانگ (مگاپاسکال)	۷
دانسیته (کیلوگرم بر متر مکعب)	۱۹۰۶/۲۱۸
زاویه اصطکاک ترک‌های درونی (درجه)	۳۹/۵
مقاومت کششی (کیلوپاسکال)	۲۰
چسبندگی (کیلوپاسکال)	۱۸
سختی نرمال (گیگاپاسکال)	۲۰
سختی برشی (گیگا پاسکال)	۱۰

تعیین می‌شود. شکل ۵ مدل نظری ارایه شده برای تک بلوک دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی را نشان می‌دهد.

۳-۲-۴- مقایسه نتایج

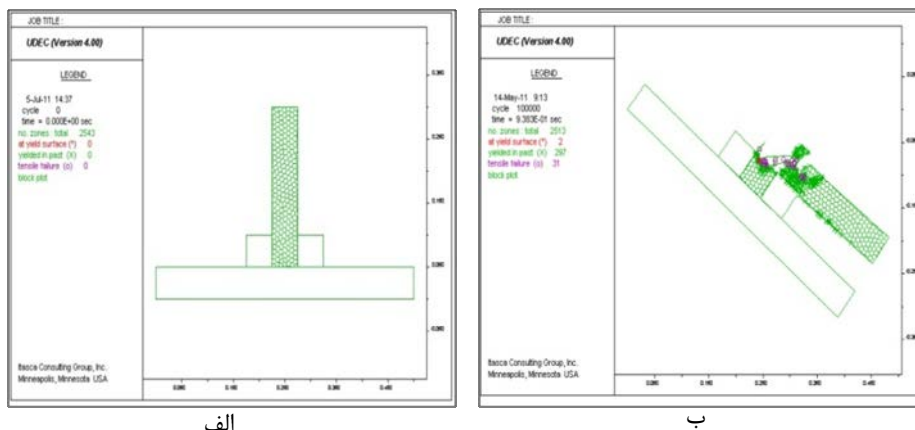
در شکل ۶، مقایسه نتایج مدلسازی‌های عددی، آزمایشگاهی و نظری نشان داده شده است. در این شکل محور عمودی طول مؤثر بلوک و محور افقی شیب میز لغزان را نشان می‌دهند. همان‌طوری‌که ملاحظه می‌گردد تطابق مطلوبی بین پیش‌بینی‌های عددی، آزمایشگاهی و نظری وجود دارد.

۳-۲-۳- مدلسازی تحلیلی

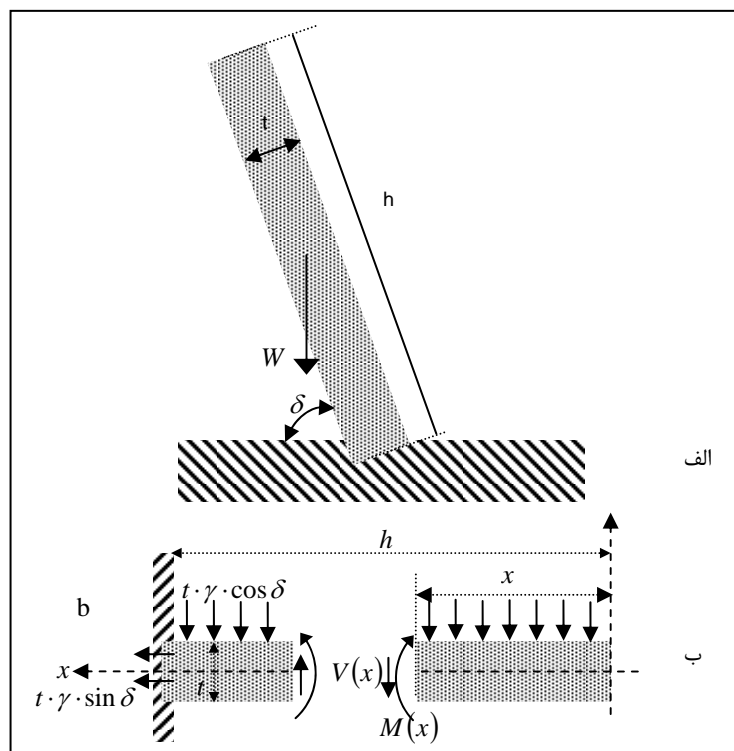
برای آنالیز تحلیلی تک بلوک دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی می‌توان تک بلوک را با یک تیر یک‌سرگیردار تحت بارگسترده یکنواخت نیز مدل کرده و فاکتور ایمنی شکست آن را به صورت زیر تعیین نمود:

$$F_s = \frac{t^2 \cdot \sigma_t}{W \cdot (3 \cdot \cos \delta \cdot h - t \cdot \sin \delta)} \quad (2)$$

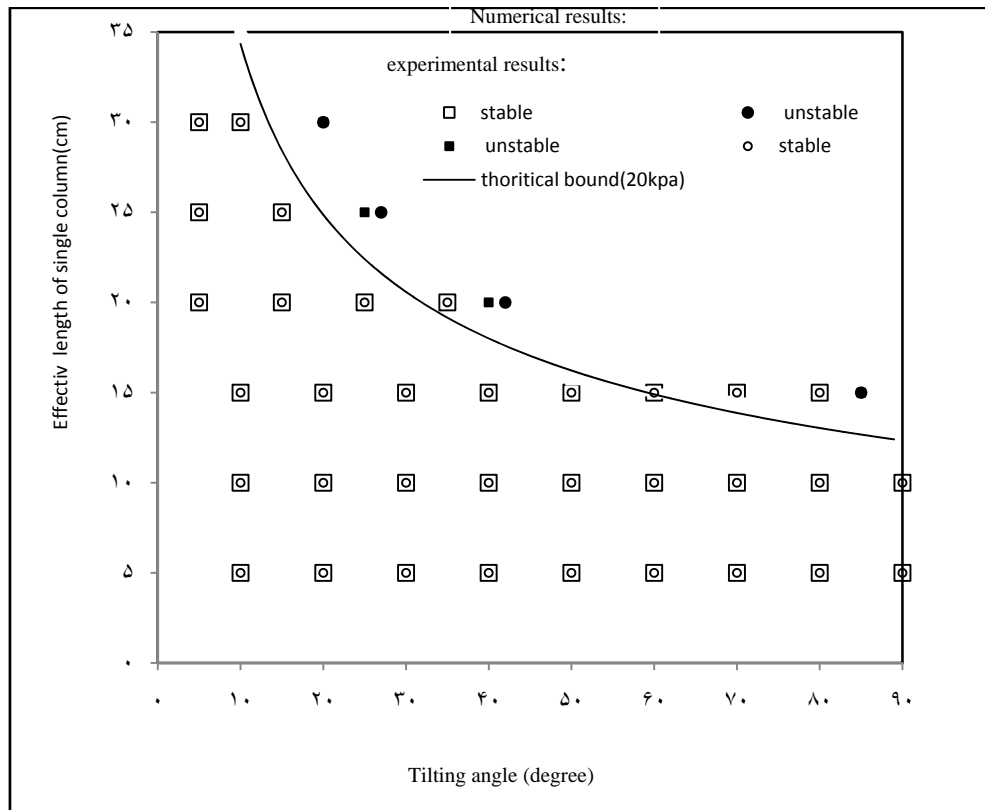
در این رابطه δ ، h ، t و σ_t به ترتیب شیب بلوک، طول بلوک، عرض بلوک و مقاومت کششی بلوک می‌باشند. با استفاده از این رابطه، در شرایط $FS=1$ ، مرز تئوری شکست و ناپایداری



شکل ۴: مدلسازی عددی تک بلوک دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی، الف) قبل از شکست، ب) بعد از شکست



شکل ۵: مدل نظری تک بلوک دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی



شکل ۶. مقایسه پیش‌بینی‌های نظری و نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی برای تک بلوک دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی

جدول ۳ پارامترهای ژئومکانیکی به‌کار رفته در مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد. در این مدل‌سازی برای درزه‌ها از مدل لغزشی کولمب (الاستیک - پلاستیک) و برای مواد از مدل موهر استفاده شده است. برای کالیبراسیون مدل، سختی نرمال ترک‌ها با توجه به رابطه ۳ محاسبه می‌شود (Alzo'ubi, 2009). برای این‌که سرعت انجام محاسبات کاهش نیابد لازم است، سختی هر ناپیوستگی حدود ۱۰ برابر سختی حداکثر زون‌های متصل به همان ناپیوستگی در نظر گرفته شود (شکل ۹).

$$k_n \text{ and } k_s < 10.0(\max(\frac{k+4/3G}{\Delta Z_{min}})) \quad (3)$$

در این رابطه k_n ، k_s ، G ، K و ΔZ_{min} به ترتیب سختی نرمال درزه‌ها، سختی برشی درزه‌ها، مدول بالک، مدول برشی و حداقل بعد زون‌های متصل به درزه‌ها هستند (Itasca Consulting, 2004).

۳-۳- مدل‌سازی شیروانی‌های سنگی دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی استاتیکی

۱-۳-۳- مدل‌سازی آزمایشگاهی

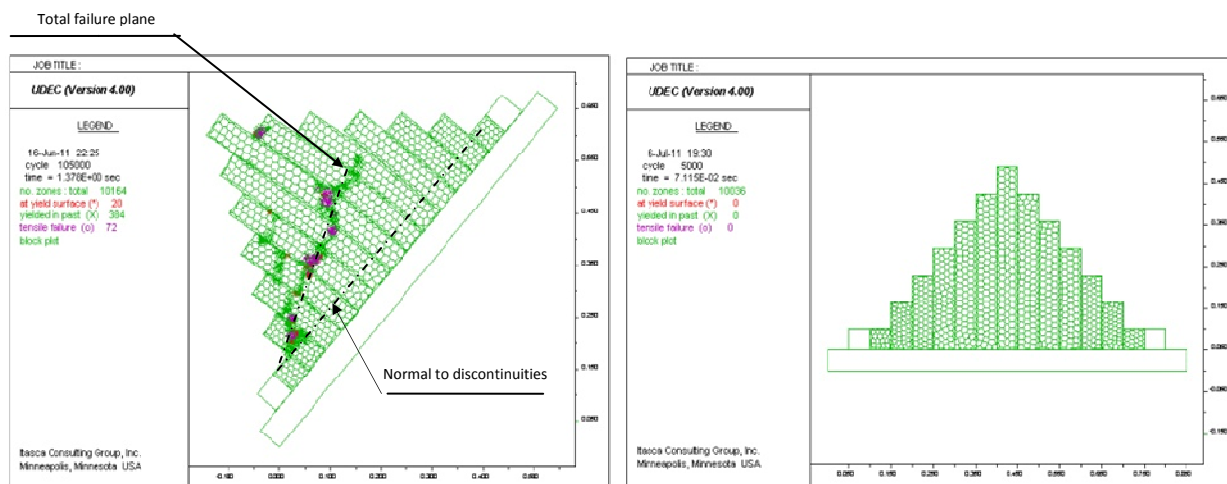
برای مدل‌سازی آزمایشگاهی شیروانی‌های سنگی دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی، ابتدا با استفاده از تعدادی بلوک، یک مدل مثلثی ساخته و سپس مدل روی دستگاه سطح شیب‌دار لغزان ثابت می‌شود. بعد از نصب تجهیزات پایش اطلاعات، شیب سطح افزایش یافته تا شکست رخ دهد (شکل ۷).

۲-۳-۳- مدل‌سازی عددی

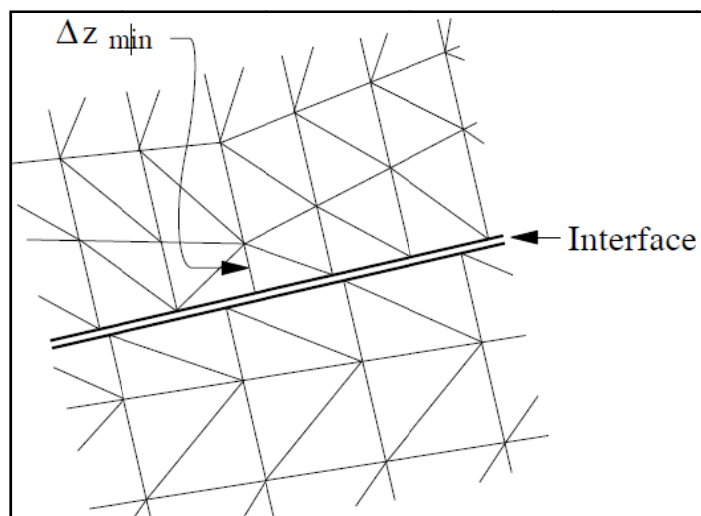
این مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار UDEC نیز مدل‌سازی شده و زاویه میز لغزان در لحظه شکست تعیین گردید (شکل ۸).



شکل ۷. مدل‌سازی فیزیکی شیروانی سنگی دارای پتانسیل شکست وازگونی خمشی استاتیکی



شکل ۸. مدل‌سازی عددی شیروانی سنگی دارای پتانسیل شکست وازگونی خمشی الف) قبل از شکست، ب) در حین ناپایداری



شکل ۹. ابعاد زون مورد استفاده در محاسبه سختی درز (Itasca Consulting Group, 2004)

جدول ۳. پارامترهای ژئومکانیکی مورد استفاده در مدلسازی عددی شیروانی‌های سنگی

پارامترها	چسبندگی (کیلو پاسکال)	مقاومت کششی (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک بین بلوک‌ها (°)	زاویه اصطکاک داخلی (°)	سختی نرمال (گیگاپاسکال)	سختی برشی (گیگاپاسکال)
مقادیر	۱۵	۲۰	۳۷	۳۵	۲۰	۱۰

فیزیکی استفاده می‌شود. شکست واژگونی خمشی دینامیکی تاکنون مدل‌سازی نشده است. برای اولین بار، این شکست در آزمایشگاه سازه دانشگاه توکای ژاپن توسط نویسندگان این مقاله در سال ۲۰۱۰ مدل شد. مواد مورد استفاده برای ساخت مدل‌های دینامیکی و مدل‌های استاتیکی یکسان بوده به طوری که خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این مواد مطابق جدول ۱ می‌باشد.

۴-۲- مدل‌سازی تک بلوک

۴-۲-۱- مدل‌سازی آزمایشگاهی

همانند حالت استاتیکی در شرایط دینامیکی نیز ابتدا تک بلوک دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی با استفاده از دستگاه میز لرزان آزمایش شد. برای انجام این آزمایشات بلوک‌هایی با طول تقریبی ۱۰ تا ۳۵ انتخاب و انتهای آنها روی دستگاه میز لرزان محکم شد. سپس شتاب میز افزایش یافت تا بلوک به صورت واژگونی خمشی بشکند (شکل ۱۱).

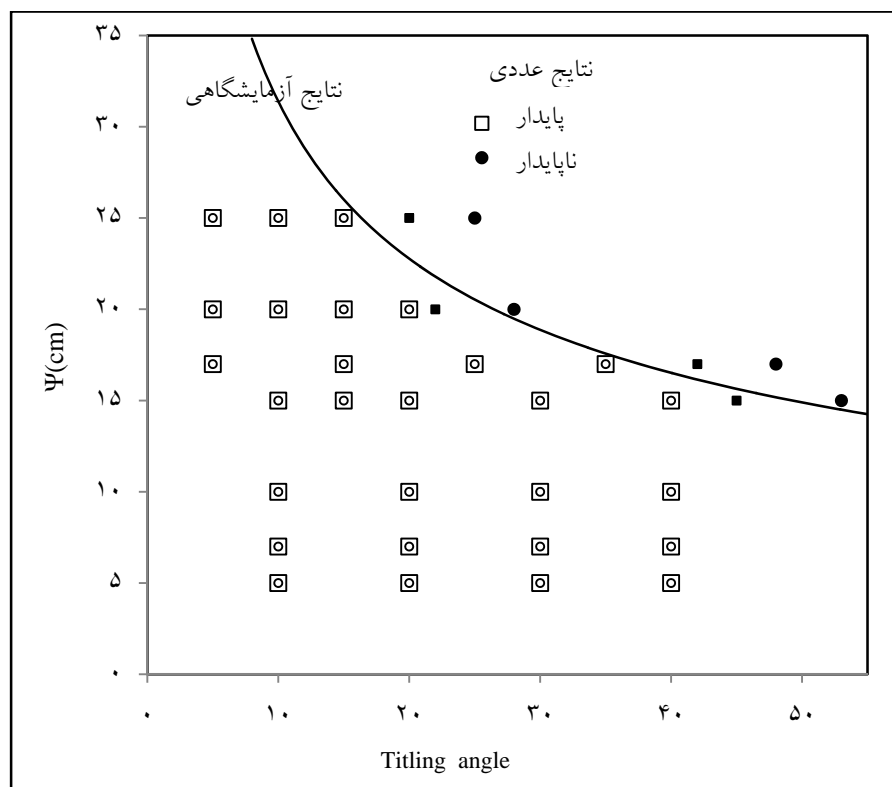
۳-۳-۳- مقایسه نتایج

برای ارزیابی بهتر نتایج، مرز شکست و پایداری به روش تحلیلی با استفاده از رابطه ۱ در شرایط $FS=1$ تعیین و نتیجه با پیش‌بینی‌های عددی و مقادیر آزمایشگاهی مقایسه گردید. در شکل ۱۰ این مقایسه نشان داده شده است. در این شکل محور عمودی، طول معادل ستون سنگ‌های دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی (Ψ) و محور افقی شیب میز لرزان را نشان می‌دهد. همان‌طوری که ملاحظه می‌گردد تطابق خوبی بین نتایج نظری، آزمایشگاهی و عددی وجود دارد.

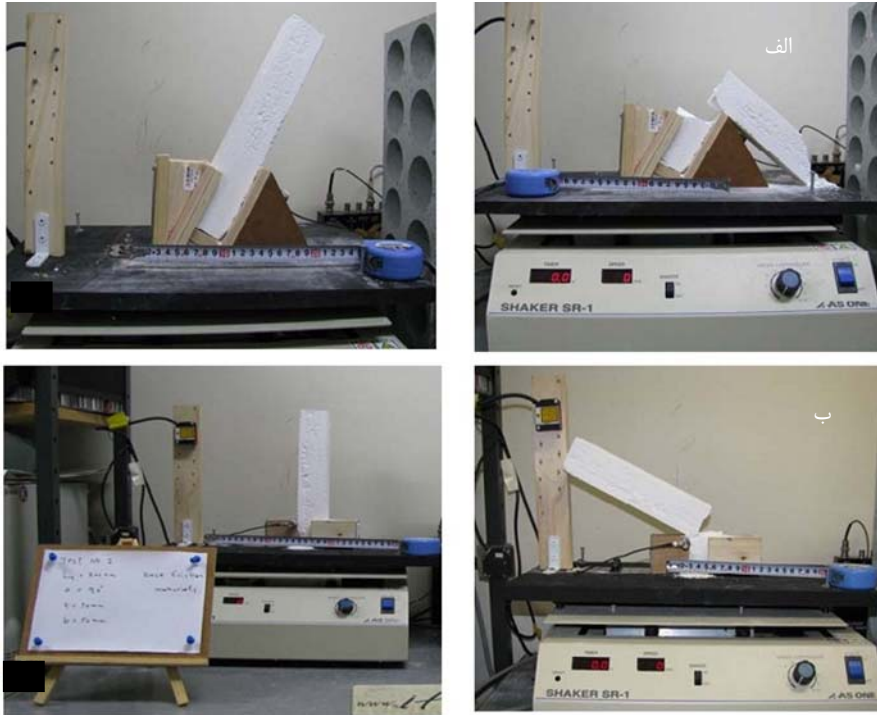
۴- مدل‌سازی دینامیکی شکست واژگونی خمشی

۴-۱- مدل‌سازی فیزیکی

پارامترهای مؤثر در تحلیل توده‌سنگ واقعی بسیار زیاد می‌باشند و کنترل تمامی پارامترها تقریباً غیرممکن است. بنابراین، معمولاً برای صحت‌سنجی مدل‌های نظری از مدل‌سازی‌های



شکل ۱۰. مقایسه بین پیش‌بینی‌های نظری و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و آزمایشگاه برای شیروانی‌های سنگی دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی



شکل ۱۱. مدلسازی فیزیکی تک ستون دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی الف) شیب ۱۲۰ درجه، ب) شیب ۹۰ درجه

چهار صورت داده‌های سرعت، تنش، نیرو و یا فشار سیال بین درزه‌ها در مدل قابل اعمال است.

در این مدلسازی از روش داده‌های سرعت جهت بارگذاری دینامیکی استفاده شده است. در تحلیل‌های ژئومکانیکی در حالت واقعی مرزهای جانبی نامحدود می‌باشند و امکان بازگشت موج به درون مدل اندک است، در حالی که در تحلیل‌های دینامیکی به روش عددی از یک فضای محدود برای چنین تحلیل‌هایی استفاده می‌شود. بنابراین، به منظور جلوگیری از انعکاس موج از مرزهای آرام و یا ویسکوز استفاده می‌شود (Itasca Consulting Group, 2004).

۴-۲-۲- مدل‌سازی عددی

تمامی این مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار UDEC-DM مدلسازی و شتاب میز برای شکست واژگونی خمشی پیش‌بینی شد. جدول ۵ پارامترهای ژئومکانیکی به کار رفته در مدلسازی عددی را نشان می‌دهد. براساس رابطه پیشنهادی Hayashi در سال ۱۹۷۳ رابطه زیر بین مدول یانگ استاتیکی و مدول یانگ دینامیکی وجود دارد:

$$E_d = (1/3 - 1/7) E_s \quad (۴)$$

در شکل ۱۲ یک نمونه از مدلسازی عددی در شرایط دینامیکی ارائه شده است. در UDEC-DM ورودی دینامیکی به

جدول ۴. پارامترهای ژئومکانیکی به کار رفته در مدلسازی عددی تک بلوک

پارامترهای ژئومکانیکی	مقادیر
زاویه اصطکاک ترک‌های درونی (درجه)	۳۷-۴۰
مقاومت کششی (کیلوپاسکال)	۱۵-۳۵
چسبندگی (کیلوپاسکال)	۱۳-۲۹
سختی نرمال (گیگاپاسکال)	۲۰۰
سختی برشی (گیگاپاسکال)	۱۰۰
مدول بالک (مگاپاسکال)	۸
مدول برشی (مگاپاسکال)	۵

۳-۲-۴- مدل سازی تحلیلی

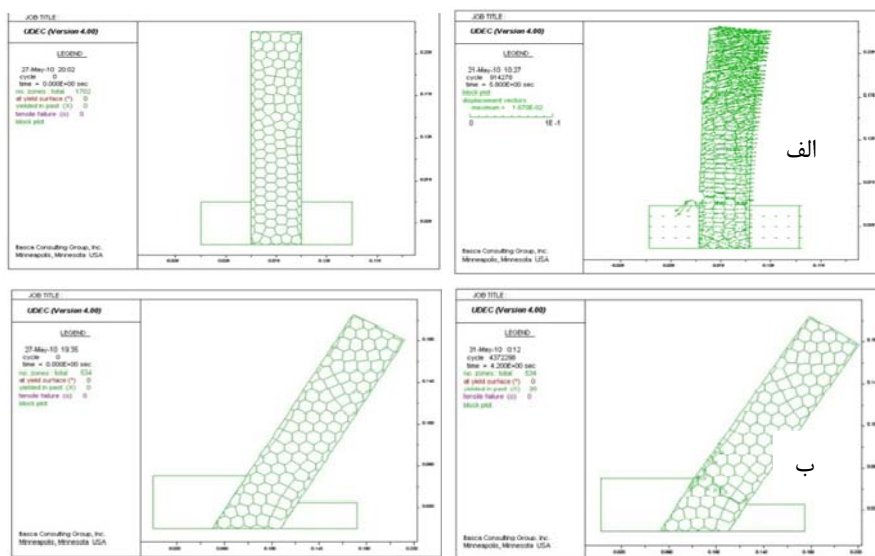
مشابه حالت استاتیک و به منظور صحت سنجی نتایج روابط شبه استاتیکی برای تحلیل لرزه ای شکست واژگونی خمشی، ستون سنگ با یک تیر یکسرگیردار تحت بارگسترده یکنواخت مدل سازی شد. رابطه ۵ نشان دهنده فاکتور ایمنی مدل تئوری ارایه شده در برابر شکست واژگونی خمشی دینامیکی است.

$$F_s = \frac{t^2 \cdot \sigma_t}{3E \cdot \sin(\delta + \epsilon) \cdot h - 3W \cdot \cos \delta \cdot h - t \cdot (W \cdot \sin \delta + E \cdot \cos(\delta + \epsilon))} \quad (5)$$

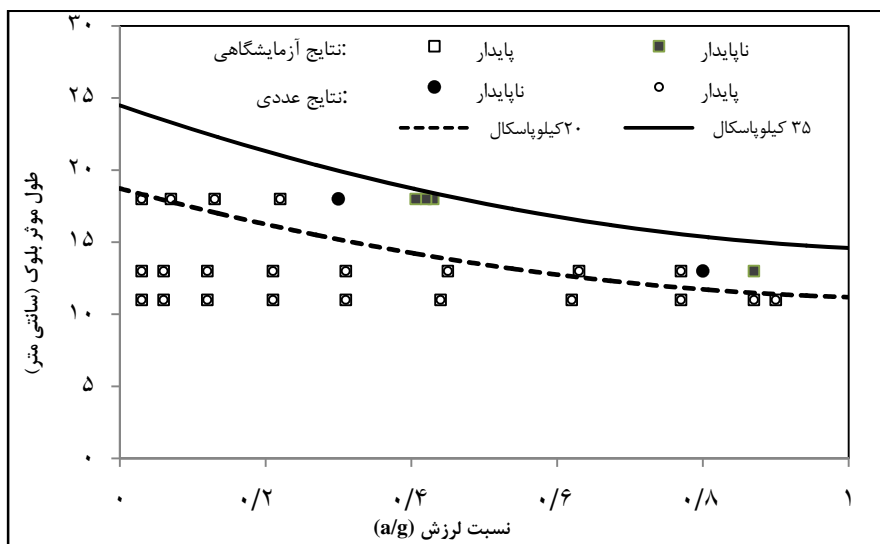
پارامترهای مورد استفاده در این مدل مشابه رابطه ۲ می باشند. با استفاده از این رابطه، در شرایط $FS=1$ ، مرز تئوری شکست و ناپایداری قابل تخمین است.

۴-۲-۴- مقایسه نتایج

در شکل ۱۳، نتایج مدل سازی های عددی، آزمایشگاهی و تئوری با یکدیگر مقایسه شده اند. در این شکل محور عمودی طول مؤثر بلوک و محور افقی شتاب میز در لحظه شکست می باشد. مقدار مقاومت کششی از ۱۵ تا ۳۵ درجه تغییر می کند، بنابراین، در این مدل سازی سعی شد تا یک مقدار متوسط از شتاب در لحظه شکست به دست آید. همان طوری که ملاحظه می گردد پیش بینی های عددی در مورد شکست واژگونی خمشی تک بلوک با نتایج آزمایشگاهی و نظری تطابق مطلوبی دارد.



شکل ۱۲. مدل سازی عددی تک ستون دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی الف) شیب ۹۰ درجه، ب) شیب ۱۲۰ درجه



شکل ۱۳. مقایسه پیش بینی های تئوری و نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی برای تک بلوک دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی دینامیکی

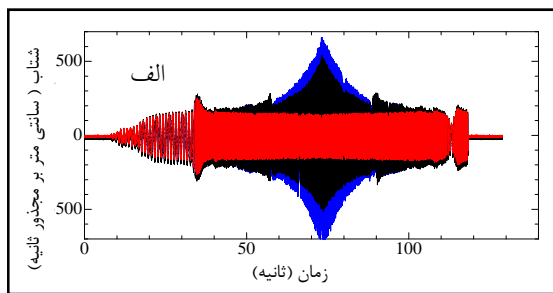
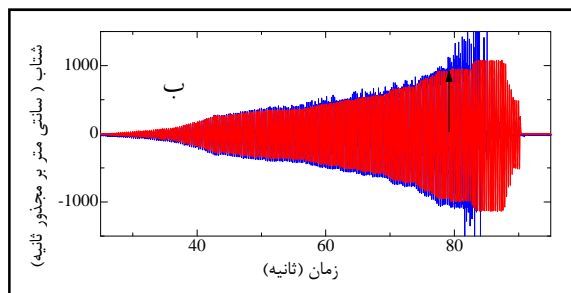
اطلاعات و قبل از انجام آزمون اصلی، پدیده تشدید مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۴). سپس شتاب میز افزایش یافته تا شکست رخ دهد (شکل ۱۵ و ۱۶).

در این مدلسازی‌ها با استفاده از سه لرزه‌نگار، شتاب میز و بخش‌های مختلف مدل ثبت گردید. البته برای مقایسه نتایج مدلسازی‌ها از داده‌های لرزه‌نگار متصل به میز لرزان استفاده شد. برای ساخت مدل‌های فوق از بلوک‌های مورد استفاده برای ساخت مدل‌های استاتیکی استفاده شد.

۳-۴- مدل‌سازی شیروانی‌های سنگی دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی دینامیکی

۳-۴-۱- مدل‌سازی آزمایشگاهی

برای مدل‌سازی آزمایشگاهی شیروانی‌های سنگی دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی، ابتدا با استفاده از تعدادی بلوک، یک مدل مثلثی ساخته و سپس مدل روی دستگاه میز لرزان نصب شد. در تمامی مدل‌ها، بعد از نصب تجهیزات پایش

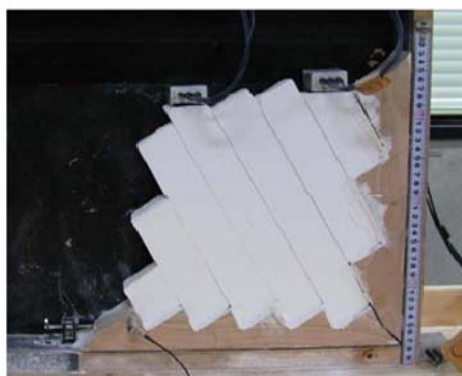


شکل ۱۴. ثبت داده‌های لرزه‌نگارها در یکی از مدلسازی‌ها

الف) بررسی پدیده تشدید و شتاب‌های القایی قبل از انجام آزمون اصلی، ب) افزایش شتاب میز تا شکست کامل



شکل ۱۵. مدل‌سازی فیزیکی شیروانی سنگی دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی (شیب لایه‌بندی ۹۰ درجه)



شکل ۱۶. مدل‌سازی فیزیکی شیروانی سنگی دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی (شیب لایه‌بندی ۴۵ درجه)

۴-۳-۲- مدل سازی عددی

این مدل ها با استفاده از نرم افزار UDEC-DM نیز مدل سازی شده و شتاب میز در لحظه شکست تعیین گردید (شکل ۱۷ و ۱۸). جدول ۵ پارامترهای ژئومکانیکی به کار رفته در مدل سازی عددی را نشان می دهد. در این مدل سازی برای درزه ها از مدل لغزشی کولمب (الاستیک - پلاستیک) و برای مواد از مدل موهر استفاده شده است. در این مدل سازی ها، موارد اعمال بار دینامیکی، شرایط مرزی و انتقال موج نیز مانند مدل سازی تک بلوک لحاظ شد.

در این روش فرض می شود که عامل لرزه، شتابی معادل \ddot{x}_g و تحت زاویه ε به توده سنگ وارد می کند. نیروی ناشی از شتاب مذکور را می توان به دو مؤلفه عمود و موازی با ستون سنگ ها تجزیه نمود. مطابق با رابطه ۱ اگر طول ستون سنگ معادل شیروانی Ψ فرض گردد، فاکتور ایمنی آن در برابر شکست واژگونی خمشی به صورت زیر به دست می آید:

$$F_s = \frac{t.\sigma_t}{3.\Psi^2.\rho(\cos \delta + \xi.\cos(\varepsilon - \delta + 90))} \quad (6)$$

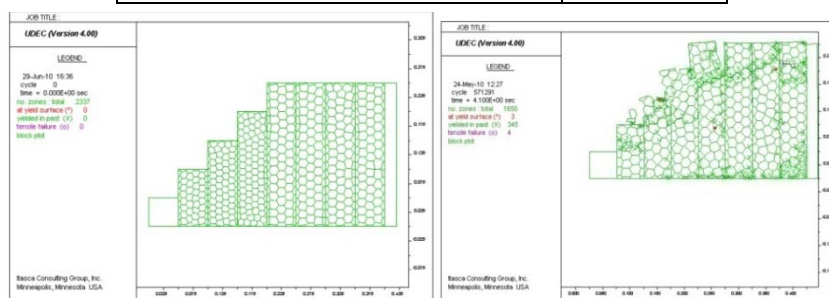
پارامترهای به کار رفته در این رابطه همان پارامترهای مربوط به شیروانی سنگی در حال استاتیکی است.

۴-۳-۳- مدل سازی تحلیلی

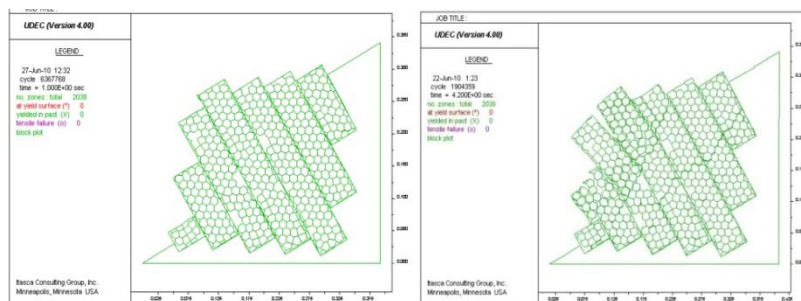
برای بررسی شکست واژگونی خمشی تحت بارهای دینامیکی از روش شبه استاتیکی استفاده شد.

جدول ۵. پارامترهای ژئومکانیکی مورد استفاده در مدل سازی عددی شیروانی های سنگی

پارامترهای ژئومکانیکی	مقادیر
زاویه اصطکاک ترک های درونی (درجه)	۳۷
زاویه اصطکاک بین بلوک ها	۳۷-۴۰
مقاومت کششی (کیلو پاسکال)	۱۵-۳۵
چسبندگی (کیلو پاسکال)	۱۴-۲۹
سختی نرمال (گیگا پاسکال)	۲۰۰
سختی برشی (گیگا پاسکال)	۱۰۰
مدول بالک (مگا پاسکال)	۷-۹
مدول برشی (مگا پاسکال)	۴-۶



شکل ۱۷. مدل سازی عددی شیروانی سنگی دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی (شیب لایه بندی ۹۰ درجه)



شکل ۱۸. مدل سازی عددی شیروانی سنگی دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی (شیب لایه بندی ۴۵ درجه)

۴-۳-۴- مقایسه نتایج

سعی شد هیچ ترک کششی در نمونه‌ها به وجود نیاید ولی با توجه به این‌که مقاومت کششی نمونه‌ها بسیار پایین می‌باشد ساخت و جابه‌جایی مدل بدون ترک بسیار مشکل است. به نظر می‌رسد در این مدل‌ها، ترک‌های ریزی در بلوک به‌وجود آمده است که موجب کاهش مقاومت مدل شده است. همچنین با توجه به پیچیدگی‌های خاص بارهای دینامیکی، پیش‌بینی‌های دینامیکی همیشه از پیش‌بینی‌های استاتیکی دشوارتر است. با توجه به نتایج جدول ۷، مدلسازی عددی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی و تئوریک دارد. در کل می‌توان نتیجه گرفت که مدل تئوریک و عددی به‌کار رفته روشی مناسب برای پیش‌بینی شکست دینامیکی و استاتیکی شکست واژگونی خمشی باشد.

نتایج حاصل از مدلسازی آزمایشگاهی شکست واژگونی خمشی و پیش‌بینی‌های حاصل از مدل نظری با مدلسازی عددی مقایسه گردید. با انتخاب مقاومت کششی نمونه‌ها بین ۳۵-۱۵ شتاب پیش‌بینی شده نظری دارای یک محدوده می‌باشد. پارامترهای مربوط به مدلسازی فیزیکی در جدول ۶ و مقایسه بین نتایج تئوری، آزمایشگاهی و عددی در جدول ۷ ارائه شده است. همان‌طوری‌که از این جدول مشخص است، در مدل‌های ۳، ۴ و ۱۰ نتایج حاصل از مدل‌های فیزیکی کمتر از پیش‌بینی‌های تئوری می‌باشد. در کل در این سه مدل نتایج حاصل از مدلسازی‌ها کمتر از انتظار بود. هر چند در زمان ساخت مدل،

جدول ۶. نتایج مدلسازی فیزیکی شیروانی‌های سنگی دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی

نتایج	نسبت لرزش تجربی (a/g)	زاویه سطح شکست کلی γ (°)	ارتفاع سطح شیبدار H(m)	زاویه سطح شیبدار a(°)	زاویه شیب لایه‌بندی δ (°)	پارامترها شماره آزمایش
پایدار	۱/۲	-	۲۲	۹۰	۱۳۵	۱
ناپایدار	۱/۳	۱۰	۲۵	۹۰	۱۲۰	۲
ناپایدار	۰/۲۹	۱۰	۲۰	۹۰	۹۰	۳
ناپایدار	۰/۹۴	۱۰	۲۰	۴۵	۹۰	۴
ناپایدار	۰/۲	۲۰	۲۵	۹۰	۹۰	۵
ناپایدار	۰/۷	۱۰	۲۵	۴۵	۹۰	۶
ناپایدار	۱/۱۵	۲۰	۱۵	۹۰	۹۰	۷
پایدار	۱/۶۴	۱۰	۱۵	۴۵	۹۰	۸

جدول ۷. نتایج مدلسازی عددی و پیش‌بینی‌های تئوریک و نتایج مدلسازی آزمایشگاهی شیروانی‌های سنگی دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی

شماره آزمایش	نسبت لرزش آزمایشگاهی	نسبت لرزش تئوریک	نسبت لرزش عددی	نتایج
۱	۱/۲	۱/۰۲-۳/۳۳	۱/۵	پایدار
۲	۱/۳	۰/۴۲۵-۱/۵۶	۱/۷۹	ناپایدار
۳	۰/۲۹	۰/۳۷-۰/۷۶	۰/۵	ناپایدار
۴	۰/۹۴	۱/۱۹-۲/۴۶	۱/۵	ناپایدار
۵	۰/۲	۰/۲۵-۰/۵	۰/۵	ناپایدار
۶	۰/۷	۰/۷۹-۱/۷	۱/۱	ناپایدار
۷	۱/۱۵	۰/۶۳-۱/۳۲	۰/۸	ناپایدار
۸	۱/۶۴	۵-۱۱	۲	پایدار

۵- نتایج

در این مقاله شکست واژگونی خمشی محتمل در شیروانی‌های سنگی با استفاده از میز شیب‌دار به صورت استاتیکی و با استفاده از میز لرزان در حالت دینامیکی مدل‌سازی شد. برای این مدل‌سازی‌ها نخست یک تک بلوک آزمایش گردید و سپس بر مبنای نتایج آن مدل‌سازی‌های اصلی صورت پذیرفت. تمامی مدل‌های آزمایشگاهی به‌وسیله نرم‌افزار UDEC-DM مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. مقایسه نتایج این تحلیل‌ها با نتایج مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی نشان داد که با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان شکست‌های کششی را مدل نمود. در نهایت نتایج مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی، عددی و پیش‌بینی روش‌های تحلیلی موجود با یکدیگر مقایسه گردید. این مقایسه نشان داد که تطابق مطلوبی این مدل‌سازی‌ها وجود دارد.

۶- مراجع

- Cundall, P. (1971) "A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems", Proc Int Symp on Rock Fracture Nancy, France, Paper 11-8.
- De Freitas, M.H. and Watters, R.J. (1973) "Some field examples of toppling failure." *Geotechnique* 23: pp. 495-514.
- Erguvanli, K. and Goodman, R.E. (1970) "Applications of models to engineering geology for rock excavations", *Bull. Assoc Eng Geologists* 9.
- Itasca Consulting Group (2004) "UDEC- Universal Distinct Element Code", Version 3.1.
- Goodman, R. E. and Bray, J. W. (1976) "Toppling of rock slopes", *ASCE Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes, Boulder Colorado, Vol. 2, pp. 201-234.*
- Hoek, E. and Bray, J. (1977) "Rock Slope Engineering", 1st, IMM, London.
- Hoffmann, H. (1974) "Zum Verformungs und Bruchverhalten regelmäßig geklüfteter Felsböschungen", *Rock Mech. Suppl.* 3, pp. 31-34.
- Lorig, L. and Cundall, P.A. (1987) "Modeling of reinforced concrete using the distinct element method", *Fracture of concrete and rock, New York, pp. 276-287.*
- Müller, L. (1968) "New considerations on the Vaiont slide", *Rock Mech Eng Geol* 6, pp. 1-91.
- Pritchard, M. A. (1989) "Numerical modeling of large scale toppling", M.Sc. Thesis, the University of British Columbia, Vancouver.
- Pritchard, M. A. and Savigny, K. W. (1990) "Numerical modeling of toppling", *Can. Geotech. J.*, 27, pp. 823-834.
- Zambak, C. (1984) "Design charts for rock slopes susceptible to toppling", *Journal of Geotechnical Engineering* 109: pp. 1039-1062.
- Adhikary, D.P. and Guo, H. (2002) "An orthotropic Cosserat elasto-plastic model for layered rocks", *Rock Mech Rock Eng* 35: pp. 161-170.
- Amini, M., Majidi, A. and Aydan, Ö. (2009) "Stability analysis and the stabilization of flexural toppling failure", *Rock Mech Rock Eng* 42: pp. 751-782.
- Ashby, J. (1971) "Sliding and toppling modes of failure in models and jointed rock slopes", M.Sc. thesis, Imperial College, University of London.
- Bukovansky, M., Rodriguez, M. A. and Cedrun, G. (1976) "Three rock slides in stratified and jointed rocks", *Proc 3rd Congress Int Soc of Rock Mech Denver, Colorado, Vol. IIB, pp. 854-858.*
- Choquet, P. and Tanonm D.D.B. (1985) "Nomograms for the assessment of toppling failure in rock slopes", 26th US Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, pp. 19-30.

Modeling of Rock Slopes Against Flexural Toppling Failure in Static and Dynamic Conditions (Physical, Numerical and Analytical Methods)

M. Amini, Assistant Professor, School of Mining, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

M. H. Khosravi, Assistant Professor, School of Mining, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

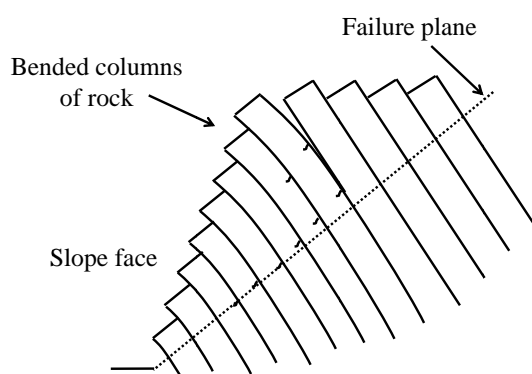
A. Baharlo, M.Sc. Grad., Department of Mining Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

E-mail: amini_ghermahini@yahoo.com

Received: October 2013 - Accepted: February 2014

ABSTRACT

Flexural toppling is a mode of failure that may occur in a wide range of layered rock strata in both natural and excavated rock slopes. As illustrated in Figure 1, a typical flexural toppling can be occurring in a rock slope when columns of rock are separated by steeply dipping discontinuities and bended forward. Typical geological conditions for this type of failure are thin layers of sedimentary rocks such as slate and shale in which orthogonal jointing is not completely developed.



(a) Schematic view



(b) Photo of a failed rock slope

Figure 1. Schematic view and photo of flexural toppling failure in rock slopes

In this study, the bending mode of flexural toppling is investigated analytically under both static and dynamic conditions and equations for factor of safety are developed. In order to

check the accuracy of the developed method, a series of physical models were conducted by means of laboratory scaled tilting and shaking tables. Furthermore, numerical models for all the physical models were reproduced in UDEC-DM software. Numerical models were run under the similar conditions corresponding to physical models and the results were compared with developed analytical equations as well as the results of the physical models.

The results of both physical and numerical models using a tilting table are summarized in Figure 2 and compared with developed analytical equation.

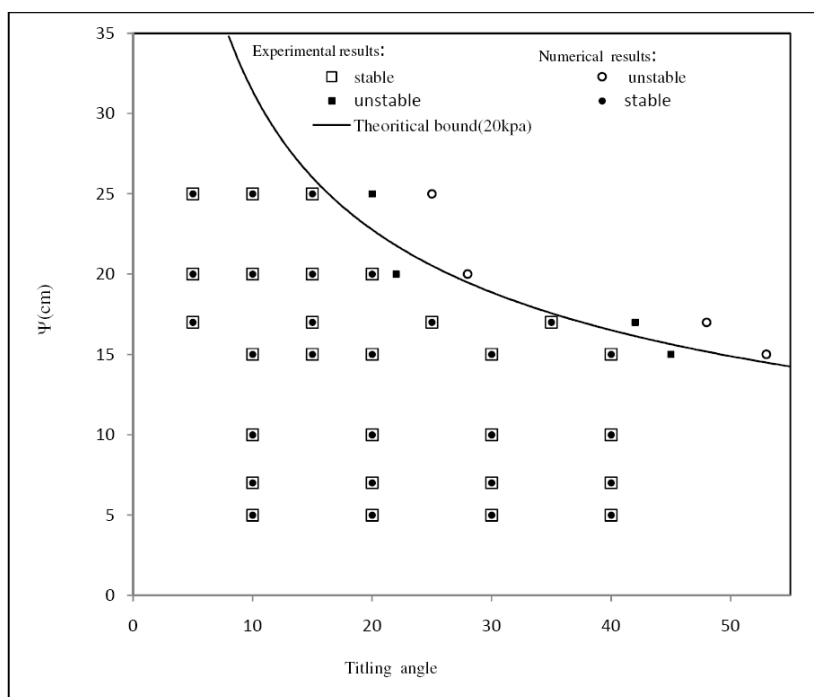


Figure 2. Results of physical and numerical models of rock slopes with potential of bending flexural toppling failure

The vertical axis in this figure is representing the average length of rock columns with potential of bending flexural toppling failure (Ψ) while the horizontal axis represents the tilting angle of the table on which the model is conducted. The developed analytical equation is plotted in this figure as a solid line which is separating the stable area (the area below the line) from the unstable area (the area above the line). The result points of physical and numerical models are shown in this figure where open and closed symbols refer to stable and unstable points respectively. It is obvious from this figure that there is good agreement between physical and numerical model results with developed analytical predictions.

Keywords: Rock Slope, Flexural Toppling Failure, Physical Modeling, Numerical Modeling