

مدل سازی تحلیلی عملکرد سنگ دوزهای تزریقی فعال و غیرفعال در شیروانی های سنگی

میرمهدی راشدی، مسعود رنجبرنیا*

دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۹-۱۷
بازنگری: ۱۳۹۷-۱۰-۱۹
پذیرش: ۱۳۹۷-۱۰-۱۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷

کلمات کلیدی:

شیروانی های سنگی
سنگ دوزهای پیش تنیده و غیرفعال
نیروی پیش تنیدگی
لایه های سنگی
مدل سازی تحلیلی

خلاصه: از راه های جلوگیری از شکست صفحه ای در شیروانی های سنگی، استفاده از سنگ دوزها است. سنگ دوزهای تزریقی غیرفعال با لغزش کوچک بلوک سنگ فعال شده و از سست شدگی و کاهش اتصال بین قطعات سنگی جلوگیری می کنند. در نوع پیش تنیده، نیروی کششی مطلوبی به سنگ دوز اعمال شده و انتهای آن بر صفحه بلوک سنگی پیچ و مهار می شوند. این مکانیزم موجب می شود تا لایه های سنگی بهم فشرده شده و اصطکاک بین آن ها بیشتر فعال شود و احتمالاً هیچ جابه جایی بین لایه ها ایجاد نشود. اگر نیروی پیش تنیدگی کافی نباشد، امکان لغزش در لایه های سنگی بعد از نصب سنگ دوز پیش تنیده نیز به وجود می آید. در این مطالعه، عملکرد سنگ دوزهای تمام تزریقی در حالت غیر فعال و پیش تنیده در شیروانی های سنگی بصورت تحلیلی مدل می شوند و اثرات پارامترهای مختلف همچون زاویه قرارگیری سنگ دوز نسبت به صفحه لغزش، زاویه اصطکاک ناپیوستگی و زاویه زبری آن، مقاومت سنگ اطراف سنگ دوز، نیروی پیش تنیدگی و ویژگی های مکانیکی سنگ دوز را بر روی نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز، بصورت کمی مطالعه می شوند. جهت مدل سازی تحلیلی، فرض می شود که لغزش سنگ موجب اعمال لنگر خمشی به سنگ دوز و تشکیل دو مفصل خمشی در آن می شود. فاصله بین دو مفصل خمشی که در طرفین ناپیوستگی قرار دارند بصورت تیر دو سرگردار در نظر گرفته شده و بار وارد بر آن که همان عکس العمل محیط اطراف سنگ دوز است بصورت یکنواخت فرض می شود. نتایج نشان می دهند پیش تنیده کردن بطور موثری موجب پایداری بیشتر شیروانی ها می شود، بویژه اگر مقاومت سنگ اطراف سنگ دوز زیاد باشد و نتوان سنگ دوز را به صورت زاویه دار نسبت به ناپیوستگی قرار داد.

۱- مقدمه

یا بدون تزریق باقی گذاشت. لیکن، سنگ دوز غیرفعال بصورت تمام تزریقی نصب شده و هیچ کشش اولیه ای به آن اعمال نمی شود (حالت Passive). در واقع، سنگ دوزهای غیرفعال هنگامی تحت نیرو (کشش و خمش) قرار می گیرند که لغزشی در امتداد سطح ناپیوستگی به وجود آید؛ درحالیکه در سنگ دوزهای فعال، قبل از لغزش، تحت کشش قرار می گیرند و تا حد زیادی نیز مانع از هر گونه لغزش توده سنگ بر سطح ناپیوستگی می شود. به عبارتی، پیش تنیده کردن سنگ دوز عبارت از بالفعل کردن ظرفیت آن قبل از هرگونه تغییر شکل برشی در ناپیوستگی های توده سنگ است. در صورتیکه در توده سنگ جابه جایی های برشی اولیه رخ داده باشد،

سنگ دوزها یکی از پرکاربردترین سیستم های پایدارسازی شیروانی های سنگی، تونل ها و سایر سازه های زیرزمینی هستند. سرعت اجرای بالا، کارایی، سطح اشغال کم و اقتصادی بودن از مزایای استفاده از سنگ دوزها در پایدارسازی شیروانی سنگی به ویژه در جلوگیری از لغزش گوه های سنگی است. در سنگ دوز پیش تنیده، انتهای بولت با دوغاب به توده سنگ گیردار شده و بلافاصله تحت نیروی پیش تنیدگی قرار می گیرند (حالت Pre-tensioned or Active). سپس باقی مانده طول سنگ دوز را می توان تزریق نمود

* نویسنده عهده دار مکاتبات: m.ranjbarnia@Tabrizu.ac.ir



پیش تنیده ایجاد می شود که عکس العمل این تغییرشکل ها، باعث ایجاد نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی در سنگ دوز خواهند شد. عکس العمل این نیروهای ایجاد شده در سنگ دوز، همانند حالت غیرفعال، نیروهای مقاوم دیگری علاوه بر نیروی مقاوم پیش تنیدگی، در محل ناپیوستگی ایجاد خواهد کرد. در این مکانیزم، دوغاب نقش مهمی را در نیروهای مقاوم ایجاد شده توسط تغییرشکل سنگ دوز پیش تنیده، خواهد داشت [۱].

مسأله تقویت مقاومت برشی ناپیوستگی های توده سنگ در شیروانی ها به روش مسلح سازی بویژه نوع غیرفعال با روش های متفاوتی چون آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی اسپن و ایگر^۱ نشان داد که در اثر جابه جایی جزئی سنگ، تغییر شکلی در سنگ دوز تمام تزریق ایجاد می شود. بر اساس تغییر شکل سنگ دوز در محل ناپیوستگی، دو نقطه منحصر به فرد را بر روی سنگ دوز پیشنهاد کردند که یک نقطه در فصل مشترک بین ناپیوستگی و بولت می باشد که انحنا در بولت صفر شده که به معنی صفر بودن لنگر خمشی است و دیگری نقطه ای است که بیشترین انحنا در بولت ایجاد می شود که به معنی صفر بودن برش و ماکزیمم بودن لنگر خمشی است و مفصل پلاستیک در این نقطه ایجاد می شود [۲]. با استفاده از نتایج این آزمایشات، پلت و ایگر^۲ مدل تحلیلی برای سنگ دوزهایی که در معرض بارهای عرضی و محوری قرار دارند، ارائه کردند که این بارها در اثر جابه جایی برشی سنگ در فصل مشترک ناپیوستگی و سنگ دوز ایجاد می گردد. در این مدل، سنگ دوز به صورت یک تیر نیمه بینهایت در نظر گرفته شد و رفتار آن در دو مرحله، یکی در محدوده الاستیک تا حد تسلیم تحت لنگر خمشی و دیگری پس از تسلیم تا شکست سنگ دوز مدل سازی شد. نتایج نشان دادند که بیشترین مقاومت برشی، در ماکزیمم جابه جایی سنگ دوز غیر فعال ایجاد می شود. این مدل تحلیلی برای سنگ دوزهایی که به صورت کاملا عمود بر ناپیوستگی نصب می شوند، جواب های قابل قبولی بدست نمی دهد [۳]. لی و استیلبرگ^۳ بیان کردند که مقاومت برشی ایجاد شده توسط سنگدوز در محل ناپیوستگی به چسبندگی، چفت و بست شدگی و زاویه اصطکاک بین دوغاب و سنگ و بین

قفل شدگی بین صفحات لغزش ممکن است تا حدی از بین رفته باشد یا اگر اصطکاک بین سطوح لغزش بدلیل هوازگی سنگ کم باشد یا بطور کلی، نیروی مقاوم لغزش حاصل از بکارگیری سنگ دوزهای غیرفعال برای پایدارسازی لغزش گوه های سنگی کافی نباشد، در این موارد استفاده از سنگ دوز های تحت کشش (پیش تنیده) توصیه می شود. زیرا این سنگ دوزهای فعال برخلاف نوع غیرفعال، به طور همزمان نیروهای برشی مقاوم و نرمال قابل توجهی به سطح لغزش وارد می کنند [۱].

مکانیزم عملکرد سنگ دوز تمام تزریق غیرفعال به این صورت است که با جابه جایی جزئی توده سنگ فعال می شوند و نیروهای مقاومی به سطح لغزش وارد می کنند. توده سنگ های لایه ای دارای پتانسیل حرکت در دو راستا هستند؛ یکی حرکت عمود بر سطح لغزش (به دلیل بازشدگی و زبری) و دیگری حرکت موازی با سطح لغزش (به دلیل وزن توده سنگ). زمانی که سنگ دوزهای تمام تزریق غیرفعال در توده سنگ لایه ای نصب می شوند با جابه جایی کوچک سنگ، فعال می شوند و این جابه جایی سنگ باعث تغییرشکل های برشی و محوری در سنگ دوز تمام تزریق می شوند و عکس العمل این تغییر شکل های ایجاد شده در سنگ دوز، باعث ایجاد نیروی های محوری و برشی مقاوم در محل ناپیوستگی خواهد شد [۱].

مکانیزم عملکرد سنگ دوز تزریقی پیش تنیده به دو صورت به وجود می آید. مکانیزم اول؛ زمانی که نیروی پیش تنیدگی وارد شده به توده سنگ، به اندازه ای باشد که مانع از هرگونه لغزش توده سنگ شود، در این حالت نیروهای موجود در سنگ دوز، فقط ناشی از نیروی پیش تنیدگی می باشد و سنگ دوز فقط تحت کشش اولیه قرار دارد؛ به عبارت دیگر نیروی سنگ دوز ثابت باقی می ماند و دوغاب نیز در این حالت تأثیری بر نیروهای مقاوم ایجاد شده نخواهد داشت و فقط مانع از خوردگی سنگ دوز خواهد شد. در این مکانیزم، با نوشتن معادلات تعادل حدی بر روی سطح لغزش می توان ضریب اطمینان در برابر لغزش را برای شیروانی به دست آورد. مکانیزم دوم زمانی ایجاد می شود که در اثر عواملی همچون افزایش بارهای قائم، کم بودن مقاومت سنگی که انتهای پیچ به آن گیردار می شود، افزایش فشار آب حفره ای، خزش و... سنگ دوزهای پیش تنیده نمی توانند از لغزش کامل توده سنگ جلوگیری کنند، در این حالت با جابه جایی جزئی توده سنگ، تغییرشکل های برشی و محوری در سنگ دوز

1 span and egger
2 pellet and egger
3 Li and Stillborg

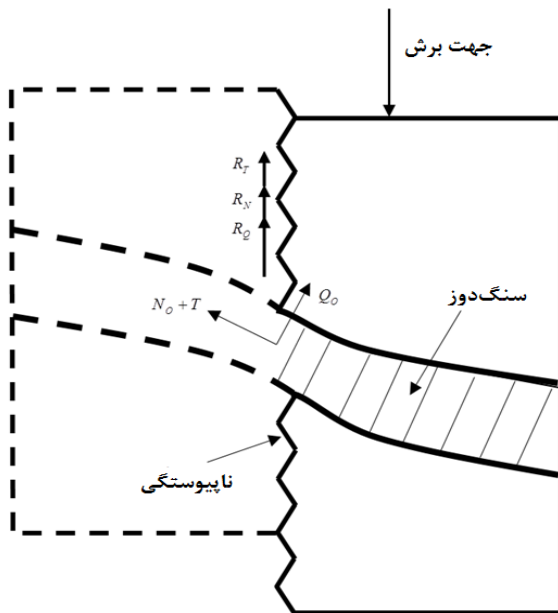
نیروی محوری وابسته است به طوری که فاصله مفصل پلاستیک از صفحه برش در بارهای محوری زیاد، کوچکتر از حالتی است که بار محوری کم به سنگ دوز اعمال می شود [۸]. بعدها ونگ^۴ و همکاران یک مدل مکانیکی بر اساس طول جدایشی که بین بولت و دوغاب اطراف آن در اثر جابجایی برشی سنگ ایجاد می شود، ارائه کردند. در این مطالعه، سنگ دوز به صورت تیر نامعین استاتیکی در نظر گرفته شد و بر روی تنش های برشی و محوری ایجاد شده روی سنگ دوزها و روابط بین آن ها بحث کردند [۹]. مطالعه آزمایشگاهی مایولینو^۵ نشان داد که بین قطر سنگ دوز و نیروی مقاوم ایجاد شده توسط آن، رابطه خطی وجود دارد؛ به این صورت که با افزایش قطر سنگ دوز، مقدار نیروی مقاوم ایجاد شده در محل ناپیوستگی، افزایش می یابد [۱۰]. لیو و لی^۶ مدل سازی تحلیلی و مطالعات آزمایشگاهی بر روی سنگ دوزهای تمام تزریقی در شیروانی های سنگی انجام دادند و در آن سنگ دوز را در محل جدا شدن بولت و دوغاب، به صورت تیر نامعین استاتیکی در نظر گرفتند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، طول جدایشی بین بولت و دوغاب در محل ناپیوستگی را دو تا سه برابر قطر پیچ در نظر گرفتند. نتایج نشان دادند که زاویه قرارگیری سنگ دوز نسبت به ناپیوستگی، زاویه اتساع و زاویه اصطکاک ناپیوستگی، نقش مهمی را در مقاومت برشی ناپیوستگی های تقویت شده ایفا می کنند [۱۱]. در این مطالعه در جهت ساده سازی به مقاومت سنگ اطراف سنگ دوز توجهی نشده است. علاوه بر مطالعات بالا می توان به مطالعات قدیمی دالاکاسکا^۷ [۱۲]، بجوستورم^۸ [۱۳]، دایت^۹ [۱۴] و فریرو^{۱۰} [۱۵] و قی و لیو^{۱۱} [۱۶] بر روی سنگ دوزها اشاره کرد که در هر یک از آن ها به یافتن مقاومت برشی توده سنگ های مسلح شده پرداخته شده است.

همچنین مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی زیادی بر روی رفتار سنگ دوزها تمام تزریقی صورت گرفته است که در این مطالعات، فقط نیروی محوری ایجاد شده در سنگ دوز تمام تزریق مورد بررسی قرار گرفته است که می توان به مطالعات مارتین^{۱۲} و همکاران [۱۷]،

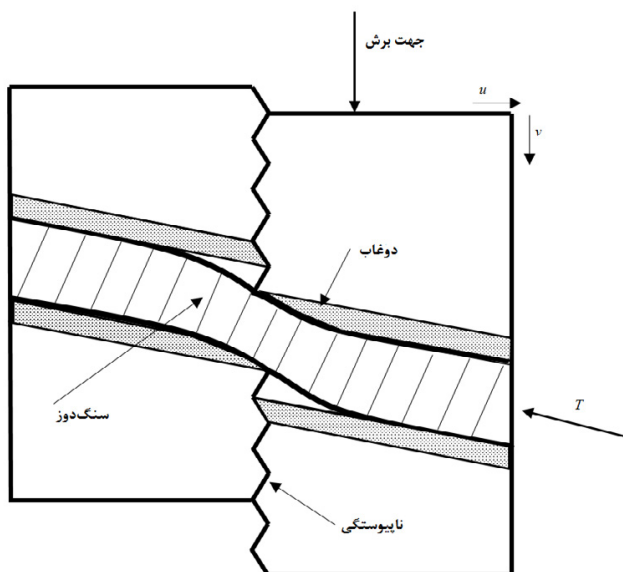
دوغاب و سنگدوز بستگی خواهد داشت [۴]. گراسلی^۱ با استفاده از آزمایش های بزرگ مقیاس، رفتار سنگ دوزهای تحت برش را مطالعه کرد. این آزمایشات، مدل واقع بینانه ای از حالت مسلح سازی به روش غیرفعال بود، لیکن در آن به زبری ناپیوستگی توجهی نشده بود. این آزمایشات روی سنگ دوزهای مختلف صورت گرفت و نتایج نشان دادند که در سنگ دوزهای تمام تزریق دو مفصل پلاستیک به صورت متقارن نسبت به صفحه ناپیوستگی ایجاد می شود و حداکثر مقاومت برشی ناپیوستگی، به نوع سنگ دوز وابسته است. آن ها همچنین مدل سازی عددی ناپیوستگی های تقویت شده با سنگ دوزهای مختلف غیرفعال را به روش المان محدود انجام دادند و تفاوت رفتاری بین سنگ دوزهای غیرفعال را مطالعه کردند [۵]. اورسته و کراورو^۲ روش تحلیلی با نام روش مسلح سازی بلوکی^۳ برای سنگ دوزها ارائه کردند که در آن ابتدا ضریب اطمینان برای سنگ ناپایدار مسلح نشده محاسبه می شود. در این روش، مؤلفه های جابه جایی ایجاد شده بر روی سنگ دوز غیرفعال در اثر جابه جایی سنگ تعیین می شوند و سپس تنش های ایجاد شده در سنگ دوز محاسبه می شوند [۶]. جلالی فر و عزیز به مطالعه آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی بلوک های بتنی با مقاومت های متفاوت که توسط سنگ دوزهای مختلف مسلح شده بودند، پرداختند تا عملکرد آن ها را تحت نیروهای برشی که به بلوک ها وارد می شود، مشاهده کنند. نتایج نشان دادند که شکست سنگ دوزها در اثر ترکیب نیروی برشی و نیروی محوری، در فصل مشترک پیچ و ناپیوستگی به وجود می آید. همچنین نشان دادند که حداکثر مقدار تنش برشی در صفحه برش در محل ناپیوستگی ایجاد می شود و تغییر زیادی در فاصله نقطه پلاستیک از صفحه برش با افزایش بار محوری ایجاد نمی شود و با افزایش نیروی محوری در سنگ دوز، معمولاً بار برشی روی سنگ دوز افزایش می یابد [۷]. جلالیفر و عزیز همچنین به مدل سازی تحلیلی رفتار سنگ دوزهایی که تحت بار عرضی و محوری قرار دارند، پرداختند و محل مفصل پلاستیک بر روی سنگ دوزها را در شرایط مختلف بارگذاری پیش بینی کردند. در این مدل تحلیلی نیز فرض شد که سنگ دوزها بصورت عمود بر سطح ناپیوستگی قرار دارند. نتایج نشان دادند که فاصله مفصل پلاستیک از صفحه برش به مقاومت سنگ و

4 Wang
5 Maiolino
6 Liu and Li
7 Dulacska
8 Bjustrom
9 Dight
10 Ferrero
11 Ge and Liu
12 Martin

1 Grasselli
2 Oreste and cravero
3 Block Reinforcement Procedure



شکل ۱. نیروی مقاوم ناشی از نیروی پیش تنیدگی و نیروی های مقاوم ناشی از تغییر شکل مقطع سنگ دوز
Fig. 1. Resistant forces due to pretensioned force and deformation of rock bolt



شکل ۲. جابه جایی توده سنگ لایه دار در دو راستا و نحوه تغییر شکل سنگ دوز
Fig. 2. Movement of rock block in two directions and deflection of bolt

مقاوم ایجاد شده توسط مقطع سنگ دوز پیش تنیده (R_Q, R_N) خواهیم پرداخت.

برای یافتن نیروی برشی و نیروی محوری در سنگ دوز در محل ناپیوستگی، فرضیات زیر در نظر گرفته می شوند (شکل ۲):

کای و همکاران^۱ [۱۸]، تان^۲ [۱۹] و اولیویرا و دیدریچ^۳ [۲۰] اشاره کرد.

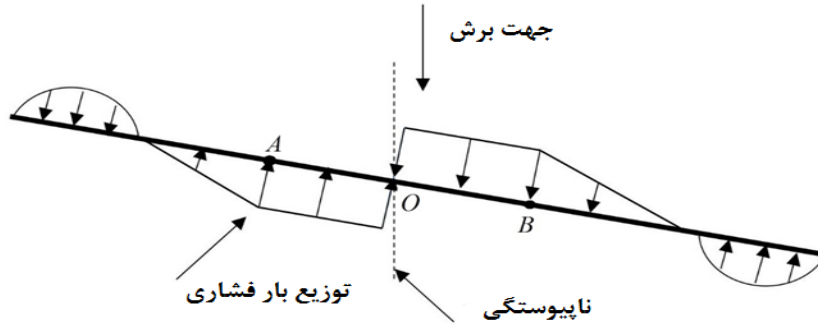
تمامی مطالعات مورد اشاره، برای سنگ دوزهای تمام تزریق غیرفعال انجام گرفته اند که در هر کدام سعی بر این بوده است که حداکثر نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز غیرفعال، بدست آید. در بیشتر مدل سازی ها، بویژه تحلیلی، در جهت ساده سازی از برخی فاکتورها نظیر اثرات زاویه قرارگیری سنگ دوز نسبت به ناپیوستگی صرف نظر شده و فقط زاویه قرارگیری ۹۰ درجه، مدل سازی شده است و یا از اثرات زاویه زبری و مقاومت سنگ اطراف، صرف نظر شده است. که بنظر می رسد این ساده سازی ها بیش از حد ساده انگارانه است. از طرفی، مرور تحقیقات گذشته نشان می دهند که مطالعه ای در خصوص سنگ دوزهای پیش تنیده تزریقی که در معرض جابه جایی جزئی برشی توده سنگ قرار می گیرند (مکانیزم دوم)، صورت نگرفته است تا اثر نیروی پیش تنیدگی بر مقاومت اصطکاکی ناپیوستگی و میزان بسیج نمودن اثر زبری آن، ملاحظه شود. بر این اساس، در این مقاله، به مدل سازی تحلیلی سنگ دوزهای تزریقی پیش تنیده و غیرفعال، با رفع ساده سازی های انجام گرفته، پرداخته می شود.

۲- مدل سازی تحلیلی

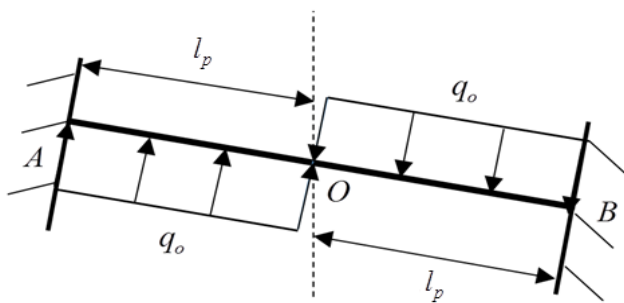
۲-۱- کلیات و فرضیات

مطابق شکل ۱ در سنگ دوزهای تمام تزریق پیش تنیده، در اثر وجود نیروی لغزشی در امتداد ناپیوستگی، قسمتی از نیروی مقاوم توسط نیروی پیش تنیدگی (T) ایجاد می شود که این نیرو به دو مؤلفه مماس بر سطح لغزش و عمود بر سطح لغزش تجزیه می شود. نیروی مماس بر سطح لغزش به صورت مستقیم باعث جلوگیری از لغزش و نیروی عمود بر سطح لغزش با تأثیر بر روی اصطکاک ناپیوستگی بطور غیر مستقیم باعث جلوگیری از لغزش می شود. در اثر افزایش بار قائم، احتمالاً جابه جایی جزئی در توده سنگ ایجاد خواهد شد و این جابه جایی باعث تغییر شکل سنگ دوز و به سبب آن باعث ایجاد نیروهای داخلی در سنگ دوز خواهد شد که عکس العمل این نیروها، به صورت نیروهای مقاوم در محل ناپیوستگی اعمال خواهند شد (همانند حالت غیرفعال). در ادامه به محاسبه نیروهای

1 Cai
2 Tan
3 Oliveira and Diederichs



شکل ۳. تشکیل مفاصل پلاستیک A و B در اثر تغییر شکل سنگ دوز [۳ و ۸ و ۱۱]
Fig. 3. Plastic joints formation at points A and B due to shear displacement



شکل ۴. مدل تیر دوسرگردار برای سنگ دوز در فاصله مفاصل پلاستیک
Fig. 4. Beam model for deflecting length of bolt

در رابطه ۱، A مساحت مقطع سنگ دوز، f_y تنش تسلیم سنگ دوز، $T + N_o$ نیروی محوری ایجاد شده در سنگ دوز، در محل ناپیوستگی است که به زاویه قرارگیری سنگ دوز نسبت به ناپیوستگی بستگی خواهد داشت، σ_c مقاومت فشاری تک محوری سنگ یا دوغاب اطراف سنگ دوز است. مطابق شکل ۴ می توان فاصله بین دو مفصل پلاستیک را به صورت تیر دو سرگردار در نظر گرفت [۹ و ۱۱]:

۲-۲- تحلیل تیر دو سرگردار

برای تحلیل تیر دو سرگردار با روش نیرو، ابتدا یکی از تکیه گاه ها آزاد می شود تا تیر بصورت معین استاتیکی شود (شکل ۵). سپس نیروی محوری (X_1)، نیروی برشی (X_2) و لنگر خمشی (X_3) را در تکیه گاه حذف شده B وارد می شود و برای تحلیل از معادلات روش نیرو و سازگاری تغییر شکل استفاده می گردد. اگر تغییر شکل محوری، تغییر شکل برشی و دوران زاویه ای تکیه گاه B به ترتیب

- در اثر باز شدن محل ناپیوستگی (در اثر زبری) که به صورت عمود بر صفحه ناپیوستگی است، نیروی محوری در بولت ایجاد می شود. عکس العمل این نیرو باعث ایجاد مؤلفه ای مقاوم در راستای عمود بر صفحه لغزش می شود که این نیروی مقاوم باعث افزایش مقاومت اصطکاکی ($\sigma \tan \phi$) خواهد شد (u).

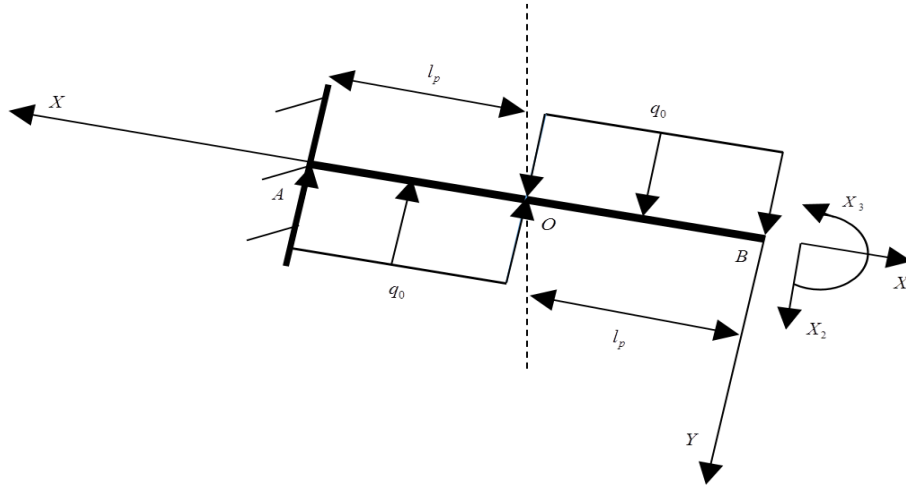
- نیروی محوری ایجاد شده در بولت، یک مؤلفه مقاوم در راستای موازی با صفحه لغزش ایجاد خواهد کرد که این نیرو نیز به طور مستقیم باعث افزایش مقاومت خواهد شد.

- در اثر تغییر شکل برشی در توده سنگ تقویت شده با سنگ دوز، تغییر شکل هایی عمود بر محور بولت ایجاد خواهند شد که این تغییر شکل های ایجاد شده باعث به وجود آمدن نیروهای مقاوم در راستای موازی و عمود بر سطح لغزش می گردند (۱۷).

بر اساس مطالعات پیشین، زمانی که سنگ دوز به مقاومت تسلیم می رسد، دو مفصل پلاستیک در سنگ دوز ایجاد خواهند شد (شکل ۳) که فاصله آن ها در حدود یک تا چهار برابر قطر سنگ دوز است. از طرفی، جلالیفر و عزیز نشان دادند که فاصله تشکیل مفصل پلاستیک از محل ناپیوستگی به قطر سنگ دوز، نیروی محوری ایجاد شده در سنگ دوز و مقاومت سنگ اطراف بستگی خواهند داشت [۳ و ۵ و ۸ و ۱۱]. همچنین می توان از وجود اصطکاک بین سنگ دوز و دوغاب در فاصله تشکیل دو مفصل پلاستیک صرف نظر کرد [۱۱].

جلالیفر و عزیز رابطه ۱ را برای یافتن فاصله مفصل پلاستیک از محل ناپیوستگی را ارائه کردند [۸]:

$$l_p = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{A f_y - (T + N_o)}{\sigma_c}} \quad (1)$$



شکل ۵. مدل تیر استاتیکی معین برای سنگ دوز
Fig. 5. Determinate static beam model for rockbolt

$$\Delta_{iq} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{q_0 l_p^2}{GA_s} + \frac{17 q_0 l_p^4}{12 EI} & \frac{q_0 l_p^3}{EI} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

در روابط ۳ و ۴، E و G به ترتیب مدول الاستیسیته و مدول برشی بولت می باشد و A و I نیز به ترتیب مساحت و ممان اینرسی مقطع است. q_0 نیز بیشترین مقدار بار فشاری بوده که در طول تغییر شکل یافته سنگ دوز ($2l_p$) وارد می شود. A_s نیز مساحت مؤثر برشی مقطع عضو است که برای مقطع دایروی شکل به صورت رابطه ۵ پیشنهاد می شود [۲۱]:

$$A_s = \frac{9}{10} A \quad (۵)$$

با توجه به اینکه نقطه B محل تشکیل مفصل پلاستیک است، بنابراین $X_2 = 0$. از طرفی، به دلیل وجود تکیه گاه گیردار در نقطه B منطقی است که داشته باشیم $\Delta_3 = 0$. با جایگذاری روابط ۳ و ۴ در رابطه ۲ داریم:

$$\left. \begin{aligned} \frac{2l_p}{EA} X_1 &= \Delta_1 \\ -\frac{2l_p^2}{EI} X_3 + \frac{kq_0 l_p^2}{GA} + \frac{17 q_0 l_p^4}{12 EI} &= \Delta_2 \\ \frac{2l_p}{EI} X_3 &= \frac{q_0 l_p^3}{EI} \end{aligned} \right\} \quad (۶)$$

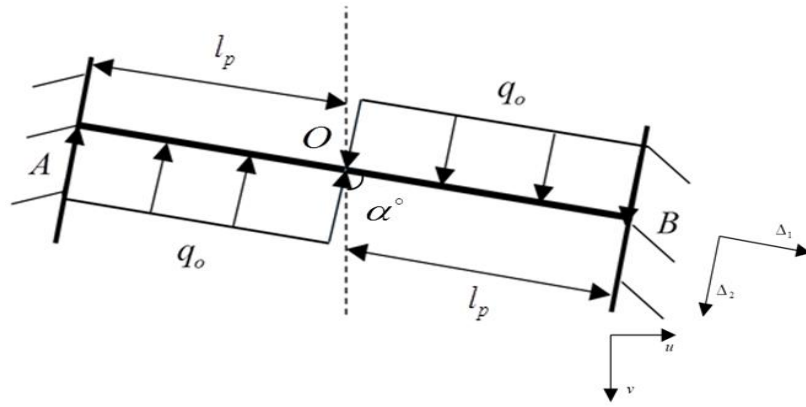
با ساده سازی رابطه ۶ رابطه ۷ به دست خواهد آمد:

Δ_1 ، Δ_2 و Δ_3 باشند، بر اساس معادلات روش نیرو و سازگاری تغییر شکل، داریم:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11} X_1 + \delta_{12} X_2 + \delta_{13} X_3 + \Delta_{1q} &= \Delta_1 \\ \delta_{21} X_1 + \delta_{22} X_2 + \delta_{23} X_3 + \Delta_{2q} &= \Delta_2 \\ \delta_{31} X_1 + \delta_{32} X_2 + \delta_{33} X_3 + \Delta_{3q} &= \Delta_3 \end{aligned} \right\} \quad (۲)$$

در رابطه ۲، δ_{ij} تغییر مکان الاستیک نقطه i در سازه j اولیه به علت وارد کردن بار واحد مجازی به جای نیروهای مجهول ($X_j = 1$) و همچنین Δ_{iq} تغییر مکان الاستیک نقطه i در حالت $X = 0$ (یعنی تغییر مکان الاستیک نقطه i فقط به علت نیروهای خارجی مؤثر به سازه j اولیه با حذف نیروهای مجهول اضافه) است. بر این اساس، δ_{ij} و Δ_{iq} برای تیر شکل ۵ به صورت زیر به دست می آید:

$$\delta_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{2l_p}{EA} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{8l_p^3}{3EI} & \frac{2l_p^2}{EI} \\ 0 & \frac{2l_p^2}{EI} & \frac{2l_p}{EI} \end{bmatrix} \quad (۳)$$



شکل ۶. شرایط سازگاری تغییرشکل سنگ دوز
Fig. 6. Deformation compatibility condition

$$Q_0 = q_0 l_p = \frac{\Delta_2}{\frac{5 l_p^3}{12 EI} + \frac{10 l_p}{9 GA}} \quad (11)$$

$$N_0 = \frac{EA}{2l_p} \Delta_1 \quad (12)$$

با توجه به شکل ۶، معادلات سازگاری تغییرشکل به صورت روابط ۱۳ به دست می آیند.

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= u \sin \alpha + v \cos \alpha \\ \Delta_2 &= v \sin \alpha - u \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

که u میزان بازشدگی توده سنگ، v جابه جایی قائم (برشی) توده سنگ و α زاویه قرارگیری بولت نسبت به صفحه لغزش است. اگر i زاویه زبری صفحه ناپیوستگی باشد، در این صورت رابطه ۱۴ را خواهیم داشت:

$$u = v \tan i \quad (14)$$

با ترکیب روابط ۱۳ و ۱۴، رابطه ۱۵ به دست می آید:

$$\frac{\Delta_2}{\Delta_1} = \tan(\alpha - i) \quad (14)$$

در نهایت با توجه به روابط ۱۱ و ۱۲ و ۱۴، رابطه بین نیروی برشی و محوری به صورت رابطه ۱۵ می شود:

$$\frac{Q_0}{N_0} = K \tan(\alpha - i) \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{EA}{2l_p} \Delta_1 \\ q_0 &= \frac{\Delta_2}{\frac{5 l_p^4}{12 EI} + \frac{10 l_p^2}{9 GA}} \\ X_3 &= \frac{1}{2} q_0 l_p^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

در نهایت، معادله کلی نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی به ترتیب به صورت روابط ۸ و ۹ و ۱۰ خواهند بود:

$$N_q(x) = \frac{EA}{2l_p} \Delta_1 \quad (8)$$

$$Q_q(x) = \begin{cases} q_0 x & 0 \leq x \leq l_p \\ -q_0 x + 2q_0 l_p & l_p \leq x \leq 2l_p \end{cases} \quad (9)$$

$$M_q(x) = \begin{cases} -\frac{1}{2} q_0 x^2 + \frac{1}{2} q_0 l_p^2 & 0 \leq x \leq l_p \\ \frac{1}{2} q_0 x^2 - 2q_0 l_p x + \frac{3}{2} q_0 l_p^2 & l_p \leq x \leq 2l_p \end{cases} \quad (10)$$

با توجه به معادلات به دست آمده، نیروی برشی و نیروی محوری ایجاد شده در سنگ دوز و در محل ناپیوستگی، با توجه به رابطه ۷، به صورت روابط ۱۱ و ۱۲ خواهند بود ($x = l_p$):

$$4(X-T)^2 \tan^2(\alpha-i) + X^2 \left[\frac{5}{24r^2} \left(\frac{Af_y - X}{\sigma_c} \right) + \frac{5E}{9G} \right]^2 = \quad (19)$$

$$(Af_y)^2 \left[\frac{5}{24r^2} \left(\frac{Af_y - X}{\sigma_c} \right) + \frac{5E}{9G} \right]^2$$

که در آن

$$N_o = X - T \quad (20)$$

بنابراین برای یافتن حداکثر نیروی محوری ایجاد شده در سنگ دوز در اثر تغییر شکل سنگ دوز (N_o)، در حالت الاستیک، ابتدا طبق رابطه ۱۹ باید معادله درجه چهارم حل شود و سپس از طریق رابطه ۲۰ مقدار نیروی محوری محاسبه گردد. بعد از محاسبه ی نیروی محوری، می توان ضریب سنگ دوز (K) و حداکثر نیروی برشی ایجاد شده در سنگ دوز را (Q_o) در حالت الاستیک پیدا کرد. مطابق شکل ۱، نیروهای مقاوم ایجاد شده در محل ناپیوستگی عبارت انداز:

$$R_Q = Q_o \sin \alpha - Q_o \cos \alpha \tan(\phi_r + i) \quad (21)$$

$$R_{(N+T)} = (N_o + T) \cos \alpha + (N_o + T) \sin \alpha \tan(\phi_r + i)$$

که زاویه اصطکاک ماندگار صفحه ناپیوستگی است.

در نهایت، کل نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز در محل

ناپیوستگی برابر است با:

$$R = T(\sin \alpha \tan(\phi_r + i) + \cos \alpha) + N_o[(\cos \alpha + \sin \alpha \tan(\phi_r + i)) + K \tan(\alpha - i)(\sin \alpha - \cos \alpha \tan(\phi_r + i))] \quad (22)$$

در رابطه ۲۲ اگر نیروی پیش تنیدگی را برابر صفر قرار دهیم، حداکثر نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز غیرفعال، در محل ناپیوستگی و در حالت الاستیک، به دست می آید [۱۱]. مطابق روابط به دست آمده، در سنگ دوز غیرفعال، در صورتی که در سطح ناپیوستگی زبری وجود نداشته باشد، اگر زاویه قرارگیری سنگ دوز برابر صفر درجه باشد، سنگ دوز تحت کشش خالص قرار خواهد گرفت و نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز در محل ناپیوستگی، برابر $R = Af_y$ خواهد شد و اگر زاویه قرارگیری سنگ دوز برابر ۹۰ درجه باشد، فقط نیروی برشی در سنگ دوز، در محل ناپیوستگی، ایجاد خواهد شد و نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز، برابر $R = \frac{Af_y}{2}$ خواهد شد.

که

$$K = \frac{1}{\frac{5}{24} \frac{l_p^2 A}{I} + \frac{5E}{9G}} \quad (16)$$

در رابطه ۱۵، K ضریب سنگ دوز می باشد که به مدول الاستیسیته سنگ دوز (E)، مدول برشی سنگ دوز (G)، ممان اینرسی مقطع (I)، مساحت مقطع سنگ دوز (A) و محل تشکیل مفصل پلاستیک (l_p) بستگی خواهد داشت.

۳-۲- حداکثر نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز پیش تنیده در محل ناپیوستگی

یکی از معیارهای تسلیم برای پیش بینی تسلیم (یا خرابی) مواد شکل پذیر همچون فولاد، معیار تسلیم ترسکا است. بر این اساس، در محل ناپیوستگی، تنش های برشی علاوه بر تنش محوری در سنگ دوز بوجود می آید که برای پیش خرابی آن تحت اثر این تنش ها از معیار خرابی ترسکا استفاده می شود. بر اساس فرض گسیختگی بولت در نقطه O و نوشتن معیار ترسکا در این نقطه بر حسب نیروی محوری (نیروی محوری ایجاد شده توسط تغییر شکل بولت و نیروی پیش تنیدگی) و نیروی برشی، داریم [۳ و ۸ و ۱۱]:

$$Q_o^2 + \frac{1}{4}(N_o + T)^2 = \frac{1}{4}(Af_y)^2 \quad (17)$$

که T نیروی پیش تنیدگی است.

بر اساس رابطه ۱ برای یافتن محل تشکیل مفصل پلاستیک، بایستی مقدار حداکثر نیروی محوری ایجاد شده در سنگ دوز، در محل ناپیوستگی، مشخص باشد. همچنین طبق رابطه ۱۵ برای یافتن حداکثر نیروی محوری ایجاد شده در سنگ دوز، بایستی محل تشکیل مفصل پلاستیک مشخص شود. بنابراین l_p و N_o دو پارامتر وابسته به هم می باشند. با ترکیب روابط ۱ و ۱۶، ضریب سنگ دوز از رابطه ۱۸ تعیین می شود:

$$K = \frac{1}{\frac{5}{24r^2} \left(\frac{Af_y - (T + N_o)}{\sigma_c} \right) + \frac{5E}{9G}} \quad (18)$$

که شعاع سنگ دوز است. با ترکیب روابط ۱۵ و ۱۷ و ۱۸ داریم:

جدول ۱. ویژگی سنگ دوز به کار برده شده در آزمایشگاه [۱۱]
Table 1.Characteristics of rock bolt used in the laboratory

$E(GPa)$	μ	$f_y(MPa)$	$d_b(mm)$
۱۸۶	۰/۲۸	۵۰۵	۸

جدول ۲. مقایسه نتایج مدل سازی آزمایشگاهی [۱۱] با مدل سازی تحلیلی
Table 2.Comparison between experimental and analytical results

زاویه قرارگیری سنگ دوز با زوایای اصطکاک ناپیوستگی	مدل سازی آزمایشگاهی $R_s(KN)$	مدل سازی تحلیلی $R_s(KN)$
$\alpha = 90^\circ, \phi = 36.4^\circ$	۱۳/۸	۱۲/۸۹
$\alpha = 75^\circ, \phi = 42.5^\circ$	۲۴/۸	۲۴/۱۴
$\alpha = 60^\circ, \phi = 38.7^\circ$	۲۹/۱	۲۶/۲۴
$\alpha = 45^\circ, \phi = 42.1^\circ$	۳۱/۲	۲۸/۷۵

در جهت اطمینان از نیروهای مقاوم ایجاد شده توسط دوغاب در محل ناپیوستگی صرف نظر شده است، این عامل می تواند یکی از دلایل اختلاف بین نتایج باشد. مطابق جدول ۲، در چهار زاویه قرارگیری سنگ دوز، کمترین نیروی مقاوم در زاویه قرارگیری ۹۰ درجه و بیشترین نیروی مقاوم در زاویه ۴۵ درجه ایجاد می شود.

لازم به ذکر است که در این مطالعه مقاومت فشاری تک محوری دوغاب در آزمایشگاه $\sigma_c = 45.5MPa$ به دست آمد و زاویه زبری نیز حدود ۱ درجه اندازه گیری شده بود.

۴- مطالعه پارامتریک نیروی های مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوزها در محل ناپیوستگی

مطابق روابط ۱۹ و ۲۲ مشاهده می شود که زاویه قرارگیری سنگ دوز نسبت به ناپیوستگی، زاویه زبری ناپیوستگی، زاویه اصطکاک ناپیوستگی، مقاومت سنگ یا دوغاب اطراف سنگ دوز، نیروی پیش تنیدگی و ویژگی های مکانیکی سنگ دوز از عوامل مؤثر بر روی نیروی های مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز هستند. از بین این عوامل، زاویه قرارگیری سنگ دوز، نیروی پیش تنیدگی و ویژگی های مکانیکی سنگ دوز، قابل تغییر هستند. برای مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف و وزن هر یک از آن ها، ویژگی های سنگ دوز به

با توجه هدف تحقیق حاضر، مطالعه عملکرد مکانیکی سنگ دوز در مواجهه با ناپیوستگی است، لذا تنها وجود یک دسته ناپیوستگی در نظر گرفته شده است. در واقع، در صورت وجود چند ناپیوستگی، اگر فاصله ناپیوستگی ها از هم به اندازه کافی دور باشند تا تداخلی بین نیروهای وارده به سنگ دوز ایجاد نشود، سنگ دوز در هر ناپیوستگی، می تواند رفتاری مشابه با مدل تحلیلی ارائه شده داشته باشد.

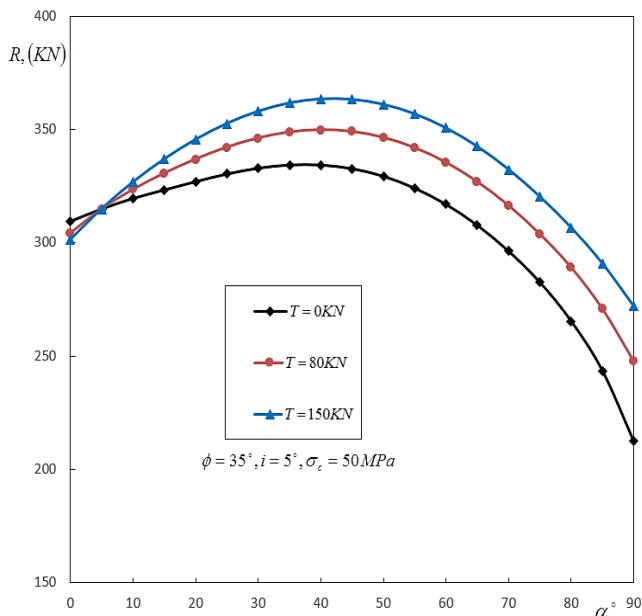
۳- مقایسه نتایج مدل تحلیلی با آزمایشگاهی

برای ارزیابی صحت و دقت مدل تحلیلی ارائه شده، می توان نتایج مدل را با نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی، مقایسه کرد. لیو و لی، برای بدست آوردن نیروی های مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز غیرفعال در برابر لغزش، از مطالعه آزمایشگاهی استفاده کردند [۱۱] که ویژگی سنگ دوز به کار برده شده مطابق جدول ۱ است و نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. آن ها سنگ دوز را در چهار زاویه ۹۰، ۷۵، ۶۰ و ۴۵ درجه نسبت به ناپیوستگی قرار دادند و مقدار نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز غیرفعال را در محل ناپیوستگی، بدست آوردند. در جدول ۲، نتایج این مطالعه آزمایشگاهی به همراه نتایج حاصل از مدل سازی تحلیلی ارائه شده، آورده شده است.

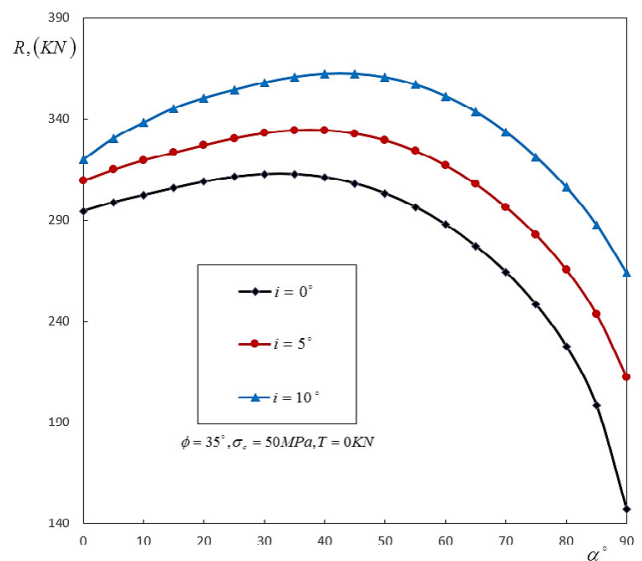
ملاحظه می شود که اختلاف بین نتایج مدل آزمایشگاهی با تحلیلی کمتر از ۱۰ درصد هستند. با توجه به اینکه در مدل تحلیلی

جدول ۳. خصوصیات مکانیکی سنگ دوز
Table 3. Mechanical properties of rock bolt

مدول الاستیسیته $E(GPa)$	مدول برشی $G(GPa)$	قطر $d_b(mm)$	تنش تسلیم $f_y(MPa)$
۲۰۶	۷۹	۲۵	۶۰۰



شکل ۷. تأثیر نیروی پیش تنیدگی بر روی نیروی مقاوم ایجاد شده به ازای زاویه های قرارگیری مختلف سنگ دوز
Fig. 7. Influence of pre-tensioned load on the contribution of pre-tensioned bolt for different inclination



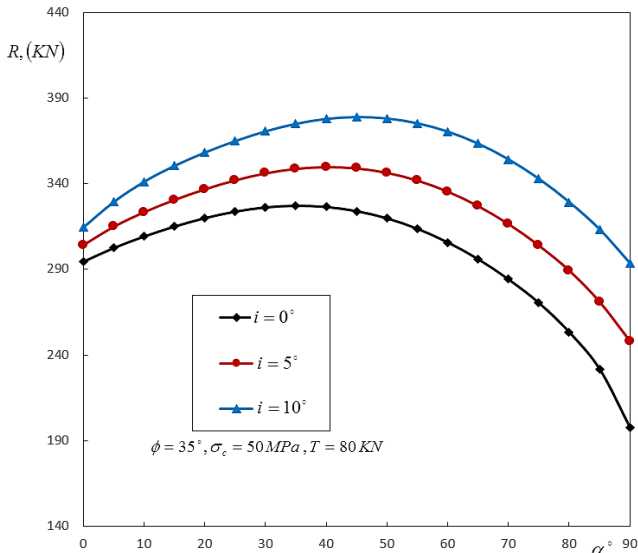
شکل ۸. تأثیر زاویه زبری سطح ناپیوستگی بر نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز غیرفعال به ازای زوایای مختلف قرارگیری آن
Fig. 8. Influence of roughness angle on the contribution of passive bolt for different inclination

صورت ثابت مطابق با جدول ۳ فرض می شوند:

همچنین مقادیر پایه مربوط به ناپیوستگی بصورت $\phi_r = 35^\circ, i = 5^\circ, \sigma_c = 50 MPa$ در نظر گرفته شده و در مطالعه پارامتریک، مقادیر آن ها تغییر داده می شوند.

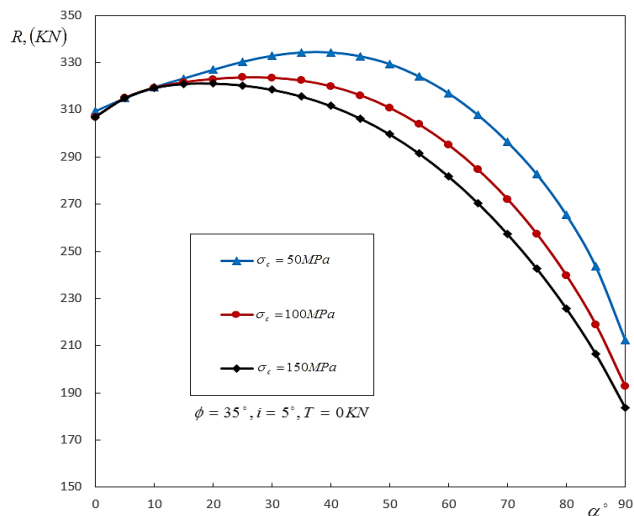
شکل ۷ نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز را در اثر اعمال نیروهای مختلف پیش تنیدگی در سنگ دوز و برای زوایای مختلف قرارگیری آن، نشان می دهد. همانطور که مطابق با روابط تحلیلی انتظار می رفت، با افزایش نیروی پیش تنیدگی، مقدار نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز نیز افزایش پیدا می کند. بطور کلی با مقایسه سه نمودار و فاصله آن ها از یکدیگر ملاحظه می شود که بیشترین تأثیر نیروی پیش تنیدگی بر روی افزایش نیروی مقاوم، در زاویه قرارگیری ۹۰ درجه می باشد. به طور کلی، طبق معیار تسلیم ترسکا، ظرفیت محوری سنگ دوز از ظرفیت برشی آن بیشتر است؛ بنابراین زمانی که سنگ دوز در زوایای بالاتری قرار می گیرند (به عنوان مثال بالاتر از ۷۰ درجه)، نیروی برشی زیادی در سنگ دوز ایجاد می شود که موجب تسلیم سریع تر سنگ دوز می شود. بنابراین نیروی مقاوم کمتری توسط سنگ دوز، در زوایای بالاتر قرارگیری، ایجاد خواهد شد. پیش تنیده کردن سنگ دوز موجب می شود که از ظرفیت محوری سنگ دوز به جای ظرفیت برشی آن استفاده شود، در نهایت این عمل، باعث افزایش نیروی مقاوم می شود. همچنین ملاحظه می شود که اگر زاویه قرارگیری سنگ دوز برابر ۹۰ درجه باشد، حداقل نیروی مقاوم ایجاد می شود و از طرفی، بیشترین نیروی مقاوم هنگامی بوجود می آید که ترکیبی از نیروی برشی و محوری در سنگ دوز ایجاد شود. در شکل ۷ در زاویه قرارگیری ۴۰ درجه بیشترین نیروی مقاوم ایجاد می شود که این زاویه، برابر مجموع زاویه اصطکاک و زاویه زبری است.

شکل های ۸ و ۹ تأثیر زاویه زبری را در زوایای مختلف قرارگیری سنگ دوز، بر روی نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز غیرفعال



شکل ۹. تأثیر زاویه زبری سطح ناپیوستگی بر نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز فعال با نیروی پیش تنیدگی ۸۰ کیلونیوتن به ازای زوایای مختلف قرارگیری آن

Fig. 9. Influence of roughness angle on the contribution of active bolt for different inclination and $T=80KN$



شکل ۱۰. تأثیر مقاومت سنگ یا دوغاب اطراف آن بر نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز غیر فعال به ازای زوایای مختلف قرارگیری آن

Fig. 10. Influence of σ_c on the contribution of passive bolts for different inclination

مقاوم، در زاویه قرارگیری کمتری از مجموع زوایای اصطکاک و زبری، ایجاد می شود.

تأثیر مقاومت سنگ یا دوغاب اطراف برای سنگ دوز فعال، کمتر از سنگ دوز غیرفعال است، زیرا مقاومت سنگ یا دوغاب اطراف

و فعال را، به ترتیب، نشان می دهند.

مطابق شکل ۸، با افزایش زاویه زبری، مقدار نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز غیرفعال در زوایای مختلف قرارگیری افزایش پیدا خواهد کرد. بطور کلی با مقایسه سه نمودار و فاصله آن ها از یکدیگر ملاحظه می شود که بیشترین تأثیر زبری بر روی افزایش نیروی مقاوم، در زاویه قرارگیری ۹۰ درجه می باشد. زمانی که سنگ دوز در زوایای بالاتر قرار می گیرند، (به عنوان مثال زوایای بالاتر از ۷۰ درجه) افزایش زبری باعث می شود که در سنگ دوزها، در محل ناپیوستگی، نیروی محوری ایجاد شود و از ظرفیت محوری سنگ دوز به جای ظرفیت برشی آن استفاده شود. در شکل ۸ نیز، بیشترین نیروی مقاوم زمانی ایجاد می شود که زاویه قرارگیری سنگ دوز برابر، مجموع زوایای اصطکاک و زبری باشد.

مطابق شکل ۹، با افزایش زاویه زبری، مقدار نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز فعال نیز در زوایای مختلف قرارگیری افزایش پیدا خواهد کرد ولی نسبت به سنگ دوزهای غیرفعال از اثرات زبری بر روی افزایش نیروی مقاوم کاسته خواهد شد. به عنوان مثال در شکل ۸، با تغییر زاویه زبری از ۰ تا ۱۰ درجه، میزان افزایش نیروی مقاوم سنگ دوز غیرفعال در زاویه قرارگیری ۹۰ درجه، برابر ۱۱۶ کیلونیوتن و در شکل ۹ میزان افزایش نیروی مقاوم سنگ دوز فعال، برابر ۹۵ کیلونیوتن می باشد.

لازم به توضیح است که بر اساس مطالعه بارتون [۲۲]، با افزایش نیروی عمودی بر سطح ناپیوستگی از اثرات زبری بدلیل خرد شدگی آن ها کاسته می شود. در این مطالعه از این تغییرات زبری، صرف نظر شده است.

در رابطه با تأثیر مقاومت سنگ یا دوغاب اطراف سنگ دوز، مطابق شکل های ۱۰ و ۱۱ ملاحظه می شود که مقدار نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز در محل ناپیوستگی، رابطه عکس با این پارامتر دارد. زیرا با افزایش مقاومت سنگ یا دوغاب اطراف، فاصله تشکیل مفاصل پلاستیک از محل ناپیوستگی کاهش پیدا می کنند و در نتیجه طول تیر دوسرگیردار مربوط به مدل سازی سنگ دوز کاهش یافته و نیروی کمتری توسط سنگ دوز غیرفعال، تحمل می شود. در این شکل ها، بیشترین نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز غیرفعال، با تغییر مقاومت سنگ یا دوغاب اطراف سنگ دوز تغییر می کند. همچنین با افزایش مقاومت سنگ یا دوغاب اطراف، بیشترین نیروی

ناپیوستگی شود؛ بنابراین در این نوع سنگ دوزها، نیروهای بیشتری علاوه بر نیروی پیش تنیدگی در سنگ دوز، ایجاد می شوند. با مدل سازی تحلیلی صورت گرفته، می توان تأثیر پارامترهایی همچون: زاویه قرارگیری سنگ دوز نسبت به ناپیوستگی، زبری یا زاویه اتساع، زاویه اصطکاک محل ناپیوستگی، نیروی پیش تنیدگی، مقاومت سنگ یا دوغاب اطراف سنگ دوز را بر روی نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز، بررسی کرد.

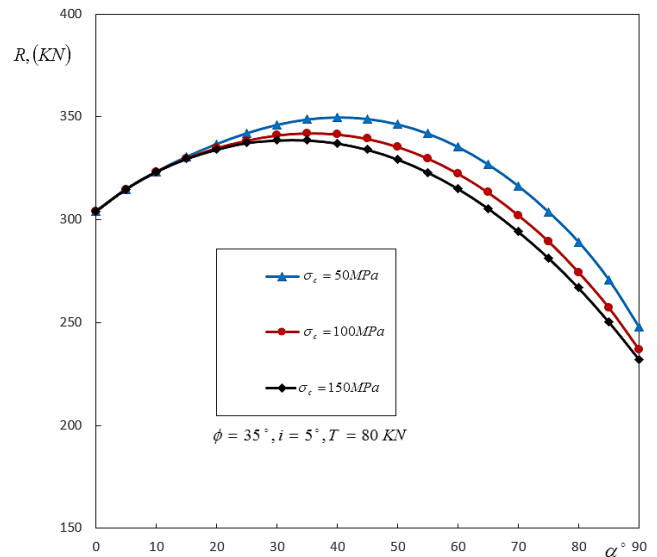
طبق نتایج به دست آمده، زمانی که سنگ دوز در زوایای کمتری قرار می گیرد (به عنوان مثال در زوایای کمتر از زاویه اصطکاک سطح ناپیوستگی)، به دلیل افزایش نیروی محوری نسبت به نیروی برشی در سنگ دوز، در محل ناپیوستگی، مقدار نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز، افزایش پیدا خواهد کرد؛ زیرا ظرفیت محوری سنگ دوز از ظرفیت برشی آن بیشتر می باشد. همچنین در این حالت از اثرات پیش تنیدگی بر روی افزایش نیروی مقاوم کاسته می شود زیرا سنگ دوز غیرفعال نیز از ظرفیت محوری اش استفاده خواهد کرد. نیروی پیش تنیدگی زمانی بیشترین اثر را خواهد داشت که:

- سنگ دوز در زوایای نزدیک به ۹۰ درجه نسبت به ناپیوستگی قرار داشته باشد.

- مقاومت سنگ یا دوغاب اطراف سنگ دوز بالا باشد.

- سطح ناپیوستگی زبری کمتری داشته باشد.

برای سنگ دوزهای فعال و غیرفعال حداقل نیروی مقاوم زمانی ایجاد می شود که سنگ دوز به صورت کاملاً عمود بر سطح ناپیوستگی قرار داشته باشد، زیرا نیروی برشی زیادی در سنگ دوز ایجاد می شود. در صورتی که سطح ناپیوستگی زبری نداشته باشد، سنگ دوز غیرفعال تحت برش خالص در محل ناپیوستگی قرار خواهد گرفت و با اعمال نیروی پیش تنیدگی می توان از ظرفیت محوری سنگ دوز که بیشتر از ظرفیت برشی آن است، استفاده کرد و باعث افزایش نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز، شد. با افزایش زبری سطح ناپیوستگی، به دلیل ایجاد نیروی محوری در سنگ دوز در محل ناپیوستگی و استفاده از ظرفیت محوری سنگ دوز، نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز در محل ناپیوستگی، افزایش پیدا می کند. از طرفی، بیشترین نیروی مقاوم توسط سنگ دوز فعال و غیرفعال زمانی ایجاد می شود که ترکیبی



شکل ۱۱. تأثیر مقاومت سنگ یا دوغاب اطراف آن بر نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز فعال با ۸۰ کیلو نیوتن به ازای زوایای مختلف قرارگیری آن

Fig. 11. Influence of σ_c on the contribution of active bolts for different inclination and $T=80KN$

بر روی نیروهای مقاوم ایجاد شده توسط مقطع سنگ دوز (نیروی محوری و برشی ایجاد شده در سنگ دوز در اثر جابه جایی جزئی توده سنگ) اثر دارد و بر روی نیروهای مقاوم ایجاد شده توسط نیروی پیش تنیدگی، تأثیری نخواهند داشت. بنابراین بیشترین اثر مقاومت سنگ یا دوغاب اطراف سنگ دوز، بر روی سنگ دوز غیرفعال است که باعث کاهش نیروهای مقاوم ایجاد شده توسط مقطع سنگ دوز، می شود. در واقع، در سنگ دوزهای فعال، بدلیل وجود نیروی پیش تنیدگی، لغزش کمتری در ناپیوستگی اتفاق می افتد و نقش مقطع سنگ دوز در ایجاد نیروی مقاوم در حالت الاستیک، کمتر می شود.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه یک روش تحلیلی جدیدی برای ارزیابی عملکرد سنگ دوزهای تزریقی فعال و غیرفعال در پایدارسازی شیروانی های سنگی ارائه شد. در این مدل سازی، سنگ دوز را در طول تغییر شکل یافته اش در محل ناپیوستگی، به صورت تیر نامعین استاتیکی در نظر گرفته و از معادلات روش نیرو و سازگاری تغییرشکل برای تحلیل این تیر استفاده کردیم.

در مدل سازی سنگ دوزهای فعال نیز، فرض شد که نیروی پیش تنیدگی بتنهایی نمی تواند مانع از لغزش بلوک سنگی در محل

نیروی مقاوم محوری ایجاد شده توسط سنگ دوز،
شامل نیروی محوری داخلی و نیروی پیش تنیدگی، N
نیروی مقاوم ایجاد شده توسط نیروی برشی سنگ دوز،
 N
کل نیروی مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز، N

علائم یونانی

α°

زاویه قرارگیری سنگ دوز نسبت به ناپیوستگی، درجه

φ_r

زاویه اصطکاک ماندگار ناپیوستگی، درجه

δ_{ij}

تغییر مکان الاستیک نقطه i در سازه j اولیه به علت

$$X_j = 1$$

Δ_{iq}

تغییر مکان الاستیک نقطه i فقط به علت نیروهای خارجی مؤثر
به سازه j اولیه با حذف نیروهای مجهول اضافه

σ_c

مقاومت سنگ یا دوغاب اطراف سنگ دوز، N/m^2

مراجع

- [1] D.C. Wyllie, C. Mah, Rock slope engineering, CRC Press, 2014
- [2] K. Spang, P. Egger, Action of fully-grouted bolts in jointed rock and factors of influence, Rock Mechanics and Rock Engineering, 23(3) (1990) 201-229.
- [3] F. Pellet, P. Egger, Analytical model for the mechanical behaviour of bolted rock joints subjected to shearing, Rock mechanics and rock engineering, 29(2) (1996) 73-97.
- [4] C. Li, B. Stillborg, Analytical models for rock bolts, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36(8) (1999) 1013-1029.
- [5] G. Grasselli, 3D behaviour of bolted rock joints: experimental and numerical study, International journal of rock mechanics and mining sciences, 42(1) (2005) 13-24.
- [6] P. Oreste, M. Cravero, An analysis of the action of dowels on the stabilization of rock blocks on underground excavation walls, Rock mechanics and rock engineering,

از نیروی های محوری و برشی در سنگ دوز ایجاد شود، به نحوی که برای سنگ دوز فعال در زاویه نزدیک به مجموع زاویه اصطکاک و زبری رخ می دهد و برای سنگ دوز غیرفعال با تغییر مقاومت سنگ یا دوغاب اطراف سنگ دوز در زوایای مساوی و یا کمتر از مجموع زاویه اصطکاک و زبری رخ خواهد داد.

در صورتی که مقاومت سنگ یا دوغاب اطراف سنگ دوز افزایش پیدا کند به دلیل کاهش فاصله مفاصل پلاستیک از هم، مقدار نیروهای مقاوم ایجاد شده توسط تغییرشکل مقطع سنگ دوز، کاهش پیدا می کنند و در نتیجه این پارامتر، تأثیر مهمی بر روی نیروهای مقاوم ایجاد شده توسط سنگ دوز غیرفعال، در محل ناپیوستگی، خواهد داشت.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	مساحت مقطع سنگ دوز، m^2
A_s	مساحت مؤثر برشی سنگ دوز، m^2
d_b	قطر سنگ دوز، m
r	شعاع سنگ دوز، m
f_y	تنش تسلیم سنگ دوز، N/m^2
E	مدول الاستیسیته، N/m^2
G	مدول برشی، N/m^2
N_0	نیروی محوری ایجاد شده در سنگ دوز در محل ناپیوستگی، N
Q_0	نیروی برشی ایجاد شده در سنگ دوز در محل ناپیوستگی، N
T	نیروی پیش تنیدگی، N
l_p	فاصله تشکیل مفصل پلاستیک از ناپیوستگی، m
I	ممان اینرسی مقطع سنگ دوز، m^4
q_0	حداکثر بار فشاری وارد شده به سنگ دوز، N/m
X_1	نیروی محوری ایجاد شده در تکیه گاه، N
X_2	نیروی برشی ایجاد شده در تکیه گاه، N
X_3	لنگر خمشی ایجاد شده در تکیه گاه، $N.m$
u	جابجایی توده سنگ در راستای عمود بر ناپیوستگی
v	جابجایی برشی توده سنگ
i	زبری سطح ناپیوستگی، درجه
K	ضریب سنگ دوز

- [15] A.M. Ferrero, The shear strength of reinforced rock joints, in: International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, Elsevier, 1995, pp. 595-605.
- [16] G. Xiurun, L. Jianwu, Study on the shear Resistance Behaviour of Bolted Rock Joints [J], Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1 (1988) 001
- [17] L.B. Martín, M. Tijani, F. Hadj-Hassen, A. Noiret, Assessment of the bolt-grout interface behaviour of fully grouted rockbolts from laboratory experiments under axial loads, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 63 (2013) 50-61.
- [18] Y. Cai, Y. Jiang, I. Djameluddin, T. Iura, T. Esaki, An analytical model considering interaction behavior of grouted rock bolts for convergence–confinement method in tunneling design, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 76 (2015) 112-126.
- [19] C.H. Tan, Difference solution of passive bolts reinforcement around a circular opening in elastoplastic rock mass, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 81 (2016) 28-38.
- [20] D. Oliveira, M.S. Diederichs, Tunnel support for stress induced failures in Hawkesbury Sandstone, Tunnelling and Underground Space Technology, 64 (2017) 10-23.
- [21] Hibbeler RC (ed) Structural analysis, 8th edn. Pearson Prentice Hall, New Jersey, (2012) p 375.
- [22] N. Barton, Review of a new shear-strength criterion for rock joints, Engineering geology, 7(4) (1973) 287-332.
- 41(6) (2008) 835-868.
- [7] H. Jalalifar, N. Aziz, Experimental and 3D numerical simulation of reinforced shear joints, Rock Mechanics and Rock Engineering, 43(1) (2010) 95-103.
- [8] H. Jalalifar, N. Aziz, Analytical behaviour of bolt–joint intersection under lateral loading conditions, Rock mechanics and rock engineering, 43(1) (2010) 89-94.
- [9] F. Wang, C. Liu, Z. Gong, Mechanisms of bolt support for bedding rock slopes, Chin J Rock Mech Eng, 33(7) (2014) 1465-1470.
- [10] S. Maiolino, Full scale lab testing for the determination of rock bolt contribution to reinforced joint shear strength, in: 13th ISRM international congress of rock mechanics, International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015.
- [11] C. Liu, Y. Li, Analytical Study of the Mechanical Behavior of Fully Grouted Bolts in Bedding Rock Slopes, Rock Mechanics and Rock Engineering, 50(9) (2017) 2413-2423.
- [12] H. Dulacska, Dowel action of reinforcement crossing cracks in concrete, in: Journal Proceedings, 1972, pp. 754-757.
- [13] S. Bjurstrom, Shear strength of hard rock joints reinforced by grouted untensioned bolts, Proc. 3rd Cong. ISRM, Denver, 2 (1974) 1194-1199.
- [14] P.M. Dight, Improvements to the Stability of Rock Walls in Open Pit Mines: By Phillip M. Dight, Monash University, 1982

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.M. Rashedi, M. Ranjbarnia, Analytical simulation of passive and pre-tensioned grouted rockbolts performances in bedding rock slopes, Amirkabir J. Civil Eng., 52(6) (2020)1485-1498.

DOI:10.22060/ceej.2019.15415.5914

