

بررسی عددی عوامل مؤثر بر توزیع فشار در ناحیه تماس دیسک و سنگ در فرآیند برش خطی سنگ

رضا محمدی^{۱*}؛ جعفر خادمی حمیدی^۲؛ فرهاد صمیمی نمین^۳

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ

۲- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس تهران

۳- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالوژی، دانشگاه زنجان

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۰۸/۱۱؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2017.4979.1288

واژگان کلیدی	چکیده
برش خطی سنگ برش‌دهنده دیسکی توزیع فشار ناحیه تماس ماشین حفر تونل مدل‌سازی عددی	برآورد نیروهای برش وارد بر یک تیغه دیسکی منفرد در فرآیند برش سنگ برای طراحی و پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفر تونل (TBM) مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرفی، نیروهای برش نتیجه فشار در ناحیه تماس بین برش‌دهنده دیسکی و سطح سنگ است. در این مطالعه، مدل‌سازی عددی فرآیند برش خطی سنگ به وسیله برش‌دهنده دیسکی با استفاده از کد تجاری المان محدود ABAQUS مطرح شده است و برای راستی‌آزمایی مدل، فشار ناحیه تماس دیسک و سنگ در مقایسه با رابطه نیمه نظری رستمی (۱۹۹۷) مورد بررسی قرار گرفته است و با حصول درصد خطای کمتر از ۱۴ درصد، مطابقت بسیار خوبی بین مدل و رابطه نیمه نظری در ناحیه توزیع فشار زیر دیسک حاصل شده است. از دیگر نتایج شبیه‌سازی عددی انجام‌شده، تأثیر پارامترهای هندسی دیسک بر توزیع فشار در ناحیه تماس دیسک و سنگ در فرآیند برش خطی سنگ است.

۱- مقدمه

سنگ سخت ارائه شده است. این مدل‌ها را می‌توان به دو گروه اصلی تجربی و نیمه‌نظری تقسیم کرد. مدل‌های تجربی بر اساس بانک اطلاعاتی حاصل از داده‌های تاریخی از پروژه‌های قبلی و تحلیل‌های آماری ارائه می‌شود. این مدل‌ها پارامترهای توده‌سنگ و مقیاس واقعی ماشین-زمین را در نظر می‌گیرد اما دقت آن‌ها تا حد زیادی به حجم و دامنه داده‌های موجود از شرایط زمین و ماشین در بانک اطلاعاتی محدود می‌شود. در مدل‌های نیمه‌نظری، نیروهای برش دیسک بر اساس روابط تعادل نیرو و گشتاور از یک سو و آزمون‌های آزمایشگاهی برای وارد کردن پارامترهای ماده‌سنگ، هندسه برش و دیسک از سوی دیگر تخمین زده می‌شود. این مدل‌ها مستقل از شرایط ماشین برای هر پروژه جدیدی قابل استفاده است اما به خاطر مقیاس آزمایشگاهی

امروزه حفاری مکانیزه، جنبه رایجی از حفاری‌های زیرزمینی را در برمی‌گیرد و نقش آن در توسعه فضاهای زیرزمینی، از جمله تونل‌ها، چاه‌ها، و دیگر کاربردهای معدنی اهمیت بسزایی را به خود گرفته است. از مهم‌ترین مسائل موجود در کاربرد موفقیت‌آمیز حفارهای مکانیزه، بهینه‌سازی طراحی و برآورد دقیق عملکرد این ماشین‌ها بوده است. موضوع پیش-بینی عملکرد یک ماشین تونل‌زنی اگرچه با توجه به ابعاد آن ممکن است بزرگ‌مقیاس فرض شود، اما به همان اندازه کوچک‌مقیاس و در حد اندرکنش لبه نازک یک دیسک برنده با سنگ و در نتیجه شکست سنگ و نفوذ دیسک است. مدل‌های زیادی طی سال‌ها برای پیش‌بینی عملکرد TBM های

* زنجان - بلوار دانشگاه - دانشگاه زنجان، دانشکده فنی، گروه مهندسی معدن، کد پستی ۳۸۷۹۱-۴۵۳۷۱، تلفن همراه: ۰۹۱۷۳۸۷۷۵۳۰، رایانامه:

RezaM808M@Yahoo.co.uk

بودن، ناپیوستگی‌های توده‌سنگ را در نظر نمی‌گیرد. تمرکز پژوهش از فروروی (*Indentation*) یک گوه در سنگ برای برآورد شکنندگی سنگ تا برآورد نیروهای برش در فرآیند برش سنگ با خصوصیات مشخص مکانیکی بوده است. مثال خوبی از فرآیند فروروی گوه در سنگ به تلاش محققان پیشین از جمله بنجاما (*Benjamuea*) برمی‌گردد (*Benjumea, 1968*). این آزمایش توسط پانگ (*Pang*) و کوک (*Cook*) نیز انجام گرفت و فرآیند فروروی، گسترش ناحیه خردشده و شروع و گسترش ترک‌های شعاعی اطراف ناحیه خردشده بررسی شد (*Cook, Hood, & Tsai, 1989*). همچنین، مطالعات برش سنگ با برش‌دهنده دیسکی به سیله آزمایش-های تمام مقیاس در آزمایشگاه انجام گرفت. در یکی از این مطالعه‌ها، اوزدمیر (*Ozedmir*) و همکارانش به ارائه روابط نظری برای پیش‌بینی نیروی وارد بر دیسک در حین برش سنگ پرداختند که در آن اثر فاصله‌داری در نظر گرفته نشده بود، اما در عوض هندسه برش به همراه مقاومت فشاری تک-محوری و مقاومت کششی ماده‌سنگ لحاظ شده بود (*Ozdemir, 1977*). راکس بورو (*Roxborough*) و فیلیپس (*Philips*)، روابطی را برای نیروهای برش وارد بر یک دیسک مقطع *V*-شکل ارائه کردند که پارامترهایی نظیر مقاومت فشاری تک‌محوری، قطر دیسک و زاویه لبه دیسک را در نظر می‌گرفت (*Roxborough & Phillips, 1975*). سانئو (*Sanio*) نیز مدلی برای برآورد نیروهای وارد بر برش‌دهنده دیسکی با در نظر گرفتن چقرمگی شکست و وجود درزه در توده سنگ، ارائه کرد (*Sanio, 1985*). ساتو (*Sato*) و همکارانش، پژوهش سانئو را برای یک ماشین حفار چرخشی ادامه دادند و روابط جدیدی برای برآورد نیروی برش ارائه کردند. رستمی (*Rostami*) در سال‌های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۷، روابطی را برای برآورد نیروهای وارد بر دیسک‌های مقطع ثابت (*CCS*) ارائه کرد. رابطه اصلی وی برپایه توزیع فشارهای مختلف در ناحیه تماس بین دیسک و سنگ برای مقاطع مختلف برش‌دهنده است. این پژوهش با آزمون‌های آزمایشگاهی بیشتر ادامه یافت تا رابطه‌ای با تطابق دیمانسیون جهت برآورد نیروهای برش توسعه یابد (*Rostami & Ozdemir, 1993*). این مدل تحت عنوان مدرسه معدن کلرادو (*CSM*) شناخته می‌شود.

گرچ (*Gertsch*)، رستمی (*Rostami, 1997*) و همکارانش در سال ۲۰۰۷ آزمون‌های آزمایشگاهی مقیاس کامل برش خطی متعددی را به وسیله یک دیسک مقطع ثابت انجام دادند تا پارامترهای بسترش را بهینه‌سازی کنند (*Gertsch, Gertsch, & Rostami, 2007*). چو (*Cho*) و همکارانش در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۳، فرآیند شکست سنگ را با استفاده از کد صریح المان محدود، *AUTODYN-3D*، بررسی کردند که در آن مطالعه، حجم برش خورده سنگ با استفاده از معیار *Erosion* که در کد شبیه‌سازی موجود است، انجام گرفته است به قسمی که المان‌هایی از سنگ که به آستانه شکست کششی می‌رسند از مدل حذف می‌شوند (*Cho, Jeon, Yu, & Chang, 2010*). مسأله توزیع فشار زیر دیسک یکی از موضوع‌های جذاب و در عین حال پیچیده و غیرخطی است. بسیاری از محققان با ساده‌سازی و معادل‌سازی این تنش به عنوان مثال با مقاومت فشاری سنگ به تخمین نیروهای برش از حاصلضرب فشار در سطح تماس دیسک-سنگ پرداختند. در مطالعه انجام شده از سوی رستمی (*Rostami, 1997*) برای اولین بار به بررسی نظری توزیع فشار در این ناحیه در آزمون‌های آزمایشگاهی برش سنگ پرداخته شده است. پس از آن و تاکنون در هیچ مطالعه‌ای به این موضوع پرداخته نشده است. از این‌رو، در موضوع اندرکنش تیغه-سنگ و نیز رفتار ناحیه زیر دیسک هنوز هم سوال‌های بی‌پاسخ زیادی وجود دارد. با توجه به پیچیدگی‌های مسأله و عدم امکان بررسی تمامی مجهول‌ها و نیز پدیده‌شناسی مسأله در روش‌های آزمایشگاهی، هزینه‌های بالای انجام و نیز در دسترس نبودن تجهیزات آزمایشگاهی این آزمون، شبیه‌سازی عددی فرآیند برش سنگ شرایط مناسبی برای شناخت مسأله و بررسی پارامترهای تأثیرگذار فراهم می‌سازد. در این مطالعه با شبیه-سازی عددی آزمون برش خطی، برای اولین بار به بررسی توزیع فشار در ناحیه تماس دیسک و سنگ و تأثیر پارامترهای مختلف هندسه تیغه بر آن پرداخته می‌شود.

۲- توزیع فشار ناحیه تماس دیسک و سنگ

فرآیند نفوذ یک ابزار برش به درون سنگ با شروع حبابی از فشار بلافاصله در زیر ابزار شروع می‌شود. این ناحیه نیروهای برش را به سنگ هدایت می‌کند و

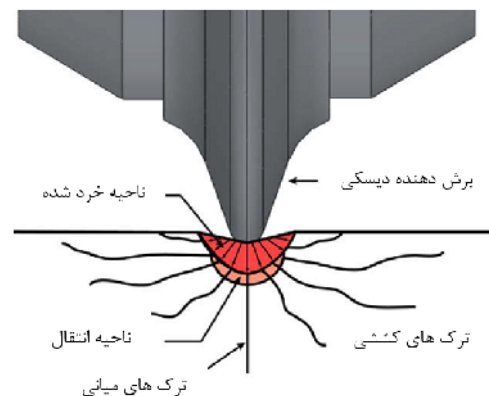
محققان بر این باور بودند که توزیع فشار در ناحیه تماس سنگ و دیسک به‌صورت یکنواخت است و از نقطه شروع تا پایان لبه در تماس با سنگ این مقدار به‌صورت خطی تغییر می‌کند (شکل ۲-الف). اما در سال ۱۹۹۷، رستمی با کالیبراسیون دقیق دیسک در آزمایش‌های برش خطی متعدد، این فرضیه را رد کرد و توزیع فشار در ناحیه تماس را معادل با نمودار زنگوله‌ای شکلی ارائه داد به‌قسمی که ابتدا و انتهای لبه در تماس قرار گرفته بارگذاری وجود ندارد (Rostami, 1997). در این ناحیه، فشار تماسی از صفر شروع می‌شود و در قسمتی در مجاورت مرکز تماس به نهایت مقدار خود در زیر لبه دیسک می‌رسد. بنابراین، توزیع فشار وارد بر برش‌دهنده دیسکی به‌صورت همه‌جانبه نخواهد بود، بلکه در عوض، به‌دلیل فرآیند تشکیل تراشه در جلو و عقب ناحیه تماس برش‌دهنده دیسکی حین برش خطی، مناطق فاقد بارگذاری در این نواحی تشکیل می‌شود. رستمی با ابزاربندی دیسک و قرار دادن کرنش‌سنج‌هایی در ناحیه لبه دیسک در حین انجام آزمایش برش خطی دریافت که تنش تنها بر ناحیه محدودی از برش‌دهنده دیسکی اعمال می‌شود (شکل ۲-ب).

مقدار میانگین این توزیع در حالت برش هم‌جوار (relieved) طبق رابطه تجربی شماره ۱ محاسبه می‌شود:

$$P_r = C \cdot \sqrt[3]{\frac{\sigma_c^2 \sigma_t S}{\varphi \sqrt{RT}}} \quad (1)$$

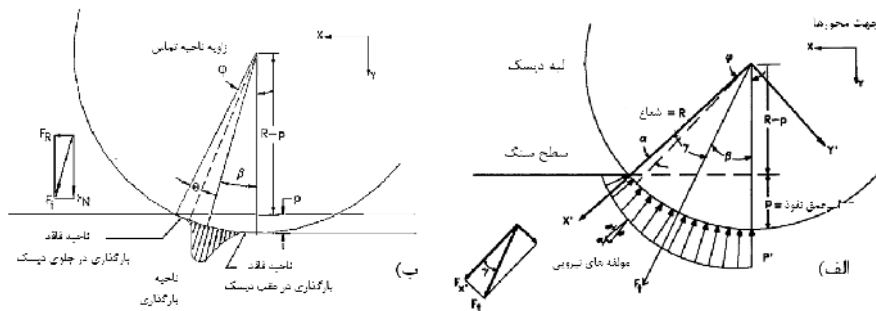
در رابطه فوق، σ_c و σ_t به ترتیب مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی ماده‌سنگ برحسب مگاپاسگال است. R و T به ترتیب ضخامت و شعاع دیسک برحسب میلی‌متر است. φ زاویه تماس بین سنگ و دیسک است که از ضابطه $\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{R-P}{p}\right)$ برحسب رادیان تعیین می‌شود و C نیز ثابتی معادل ۲٫۱۲، در نظر گرفته می‌شود (Rostami, 2013).

نهایتاً پودر نرمی در مجاورت ابزار برش تشکیل می‌شود که به‌سرعت به دانه‌های درشت تبدیل می‌شوند و ناحیه خردشده‌ای اطراف ابزار تشکیل داده و نهایتاً به‌کل بدنه سنگ انتقال می‌یابد (شکل ۱). مطالعه ناحیه توزیع فشار بسیار مهم است چراکه ذرات تشکیل‌شده در فرآیند برش سنگ مقدمه‌ای بر تشکیل ناحیه خردشده است. بنابراین، در ناحیه تماس کوچک‌تر، نرمه بیشتری تشکیل می‌شود. بدیهی است که تشکیل ذرات کوچک‌تر، انرژی بیشتری را صرف می‌کند، از این‌رو، کاهش حجم ناحیه خردشده از دید بازدهی برش ترجیح داده می‌شود. علاوه بر این، ناحیه شکست و توزیع فشار در مجاورت ناحیه خردشده، اندازه و جهت نیروهای برش را مشخص می‌کند. محدوده این ناحیه تابعی از هندسه نوک دیسک و خصوصیات سنگ است. کاهش اندازه این ناحیه به چندین علت کاهش نرمه تولیدشده، افزایش بازدهی برش و کاهش انرژی ویژه برش (ذرات ریز انرژی بیشتری را صرف می‌کنند)، ترجیح داده می‌شود (Rostami, 2013).



شکل ۱ - نمایشی از ناحیه تماس بین برش دهنده دیسکی و سنگ در فرآیند برش سنگ (Cho, Jeon, Yu & Chang, 2010)

توابع زیادی برای نمایش توزیع تنش در ناحیه تماس لحاظ می‌شوند. تا قبل از سال ۱۹۹۳ میلادی



شکل ۲- توزیع فشار ناحیه تماس بین برش دهنده دیسکی و سنگ؛ (الف) توزیع یکنواخت فشار (ب) توزیع زنگوله‌ای شکل فشار و مناطق فاقد بارگذاری (Rostami, 1997)

جدول ۱- مشخصات مکانیکی سنگ آهک ایندیانا (Mattar, 2009) (Schmidt, 1976)

مقدار	مشخصات
۳۲٫۵	مدول الاستیسته (GPa)
۰٫۱۴	ضریب پواسون
۷۰	مقاومت فشاری تک محوری (Mpa)
۴٫۹	مقاومت کششی (Mpa)
۲۳۰۰	دانسیته (kg/m^3)
۰٫۸۵	چقرمگی شکست ($Mpa.m^{0.5}$)
۵۰٫۸۰	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۵۰٫۸۰	زاویه اتساع (درجه)
۱	نسبت تنش جریان

جدول ۲ پارامترهای ورودی به نرم افزار ABAQUS برای مدل سنگ به ابعاد ساخته شده $50 \times 20 \times 200$ را در مدل سازی عددی نشان می دهد. تابع تسلیم دراگر-پراگر برای شبیه سازی رفتار الاستوپلاستیک سنگ بکار برده شده است. برای شبیه سازی اثر ضربه دیسک به سنگ حین برش، از معادله حالت خطی استفاده شده است. شبیه سازی جرم برش خورده از سنگ به واسطه حذف المان از مدل سنگ در شبیه سازی انجام خواهد شد و با قرار دادن گزینه حذف المان (Element deletion) در نرم افزار به صورت Yes، از صحت نتیجه آن اطمینان حاصل خواهد شد. برای شبیه سازی شروع آسیب، معیار آسیب شکل پذیر (ductile damage) در نرم افزار بکار برده شد و برای پیاده سازی گسترش آسیب (Damage Evaloution)، مقدار انرژی شکست در گزینه های این معیار وارد شد. مدل دیسک مشابه کار

۳- مدل سازی عددی فرآیند برش خطی سنگ

برای مدل سازی عددی آزمون برش خطی و بررسی رفتار ناحیه تماس و نیز به منظور راستی آزمایی نتایج، از شرایط آزمایشگاهی در تحقیق رستمی (Rostami, 1997) استفاده شده است. در این آزمایش، تحلیل تنش ها در یک مکان معلوم در لبه دیسک که باعث توسعه تغییرات کرنش خواهد شد، انجام می شود. برای شبیه سازی مکانیزم شکست در آزمایش برش خطی، از کد سه بعدی ABAQUS/CAE استفاده شده است. این کد، برپایه المان محدود بوده و قادر به شبیه سازی دینامیکی و غیرخطی شکست است.

۳-۱- مدل سنگ

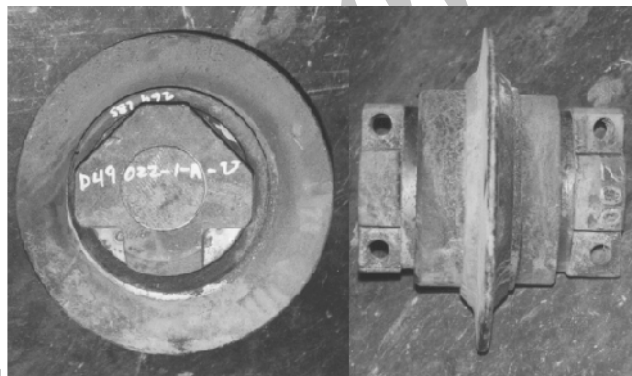
سه نوع سنگ آهک ایندیانا (Indiana Limestone)، گرانیت قرمز کلرادو (Colorado red granite)، و بازالت آمیتلا (Umittela Basalt) برای انجام آزمایش برش سنگ و مطالعه توزیع فشار در ناحیه تماس توسط رستمی (۱۹۹۷) در نظر گرفته شده است و با توجه به اندازه گیری اکثر پارامترهای مقاومتی سنگ آهک ایندیانا توسط محققان پیشین (Mattar, Schmidt, 1976) (2009) و دسترسی بهتر به اطلاعات آن ها، این سنگ در این مطالعه برای مدل سازی عددی ناحیه تماس انتخاب شده است. مشخصات مقاومتی سنگ آهک ایندیانا در جدول ۱ آورده شده است.

آزمایشگاهی رستمی، تیغه نوع B-49225 ساخت شرکت رابینز (Robbins)، در مدل‌سازی دیسک در نظر گرفته شده است (شکل ۳). قطر این دیسک ۴۳۲ میلی‌متر، ضخامت لبه رینگ آن حدوداً ۱۱/۵ میلی‌متر (۰/۴۵ اینچ) و زاویه لبه آن ۵ درجه است. برای تولید المان‌های دیسک، از المان‌های

در ABAQUS استفاده شده است که به صورت شش‌وجهی با هشت نود محدود می‌شود. خصوصیات مقاومتی دیسک با فولاد نوع AISI-4340 تنظیم شده است به قسمی که توابع شکست برای در نظر گرفتن سایش برش دهنده دیسکی لحاظ نشده است (جدول ۳).

جدول ۲- مقادیر ورودی به نرم افزار

مقدار ورودی	پارامتر	مدل	گروه
$B = \frac{E}{3(1-2\nu)}$	مدول حجمی	خطی	معادله حالت
Associative	قانون جریان	دراکر-پراگر	مقاومت
$\psi = \beta$	زاویه اتساع		
$\varepsilon = \frac{\sigma_t}{E}$	کرنش تسلیم	شروع آسیب	
$G_f = \frac{k_f^2}{E}$	انرژی شکست	گسترش آسیب	شکست
Yes	حذف المان	سایش	



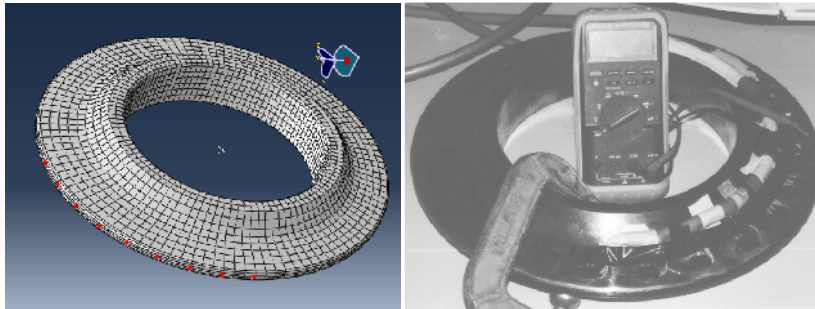
شکل ۳- نمایشی از برش‌دهنده دیسکی ۱۷ اینچ نوع B-۴۹۲۲۵ انتخابی از شرکت رابینز

سنگ‌هایی در دیسک و تا اندازه ممکن نزدیک به لبه برنده، تغییرات تنش در دیسک به هنگام تماس با سنگ در حین برش اندازه‌گیری شد. نمایشی از دیسک ابزاربندی شده پس از کالیبره کردن، در شکل ۴ آورده شده است. برای شبیه‌سازی کرنش سنگ‌های اطراف دیسک در مدل عددی، از نودهایی که دقیقاً در لبه دیسک و برای برآورد تنش در آن‌ها در نظر گرفته شده‌اند استفاده شده است.

جدول ۳- مشخصات فولاد AISI-4340

مقدار	مشخصات
۲۰۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۲۹	ضریب پواسون
۷۷۸۰	دانسیتته (kg/m ³)

برای اندازه‌گیری توزیع فشار در ناحیه تماس، دیسک مورد آزمایش ابزاربندی شده است. با قرار دادن کرنش

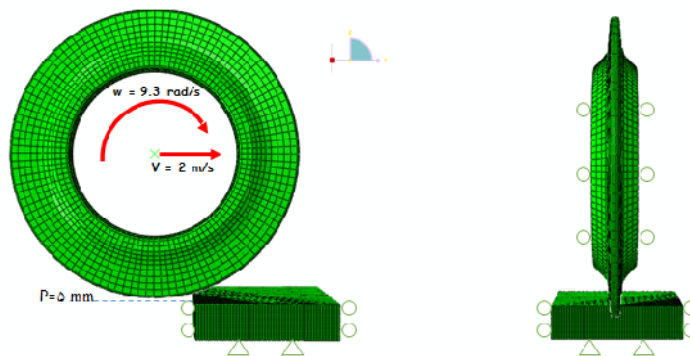


شکل ۴-الف) نصب کرنش‌سنج‌های اندازه‌گیری بر سطح دیسک در آزمایشگاه (Rostami, 1997). ب) نودهای در نظر گرفته‌شده شبیه‌سازی کرنش‌سنج‌های آزمایشگاهی در مدل عددی

برش‌دهنده دیسکی به‌صورت افقی با سرعت خطی ۲ متر بر ثانیه محدود شد تا نمایانگر برش خطی باشد. هم‌زمان با آن، سرعت زاویه‌ای مشخص ۹٫۳ رادیان بر ثانیه برای لبه بیرونی دیسک قرار داده شد (Cho, Jeon, Yu, & Chang, 2010). عمق نفوذ دیسک در سنگ برابر با ۵ میلی‌متر همانند آزمایش قرار داده شد (Rostami, 1997).

۳-۲- شرایط مرزی مدل

برای حصول اطمینان از ایجاد شرایط برابر در آزمون آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، شرایط مرزی متعددی به برش‌دهنده دیسکی و مدل سنگ اعمال شد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، برای سنگ حرکت تمامی مرزها به غیر از سطح فوقانی آن، در مدل محدود شده است. حرکت



شکل ۵- نمایش شرایط مرزی اعمال‌شده در مدل برش خطی

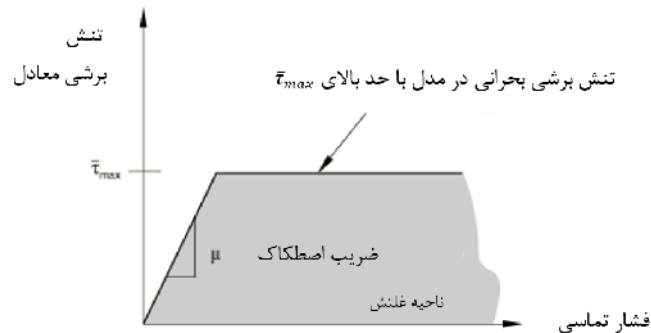
حرکت تحمل می‌کنند. در مدل کولمب، فشار تماس با مقدار تنش برشی بحرانی پیش از حرکت τ_{crit} با رابطه ۲ تعریف می‌شود (شکل ۶):

$$\tau_{crit} = \mu p \quad (2)$$

که در آن μ ضریب اصطکاک بین دو سطح خواهد بود. در این مدل، ضریب اصطکاک بین دیسک و سنگ ۰٫۵ در نظر گرفته شده است که حالت غلتش بین دو جسم برقرار شود (Zhang & Xiao, 2016).

۳-۳- مدل‌سازی تماس سنگ و برش‌دهنده

چون مدل از دو جزء متفاوت دیسک و سنگ ساخته شده است، لازم است که تماس میان آن‌ها تعریف شود. تماس عمومی (General contact) معرفی شده در ABAQUS می‌تواند در مدل‌سازی اندرکنش برش‌دهنده و سنگ راه‌گشا باشد. ABAQUS از مدل ساده موهر-کولمب جهت ارتباط فشار (ناشی از نیروی فنر فرضی) به وجود آمده بین دو سطح با تنش برشی در سطح، استفاده می‌کند. در واقع در حرکت دو جسم بر یکدیگر، مقدار مشخصی تنش برشی را پیش از شروع



شکل ۶ - ناحیه لغزش برای مدل تماس موهر-کولمب بر پایه تنش برشی بحرانی (ABAQUS Documentation, 2011)

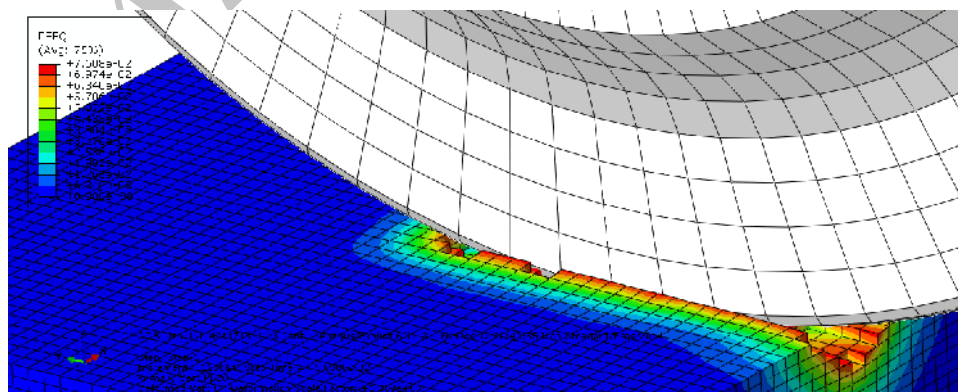
به‌واسطه بلبرینگ‌ها، عواملی مثل حرکت‌های جانبی و عمودی برش‌دهنده، ممکن است لرزه‌هایی در برش‌دهنده حین برش در آزمون برش خطی به وجود آورد و نتایج آن را تغییر دهد. اما چنین تأثیرهایی در مدل‌سازی حذف خواهد شد، چراکه حرکت‌های جانبی و عمودی برش‌دهنده با اعمال شرایط مرزی به مدل کاملاً حذف خواهد شد و در حرکت برش‌دهنده اثر نخواهد کرد. بنابراین، شبیه‌سازی عددی تأثیرات منفی از جمله خردشدگی سنگ در اثر انتشار انرژی کرنشی انباشته‌شده در قالب یا لرزه‌های دیسک حین برش سنگ را از نتایج حذف می‌کند (Balci & Bilgin, 2007). در نتیجه، سنگ برش خورده در مدل‌سازی عددی عرض و عمق تقریباً یکسان و منظمی را به خود می‌گیرد و زبری سطح برش خورده به‌ندرت در سطح مدل بعد از شبیه‌سازی نمایان می‌شود (شکل ۷).

۳-۴- انتخاب روش حل مدل

برای مدل‌های دینامیکی، روش حل صریح (Explicit Solving) بسیار ارجحیت دارد؛ چراکه نتایج حاصل در این آنالیز به‌صورت خودکار برای دقت آن‌ها کنترل نمی‌شود (برخلاف روش استاندارد). در مدل‌های استاتیکی که تعداد پیشرو زمانی (increment) بسیار اندک است دقت بیشتری در حل مدل اعمال می‌شود. بنابراین هنگامی که تعداد پیشرو زمانی در مدل‌های دینامیکی افزایش می‌یابد، حل صریح بر استاندارد ارجحیت خواهد یافت اما دقت حل کاهش می‌یابد (ABAQUS Documentation, 2011). در مطالعه حاضر، برای حل مدل که از دسته مدل‌های ماشین‌کاری و دینامیکی محسوب می‌شود از روش حل صریح استفاده شده است.

۴- تحلیل نتایج

به دلیل سختی قالب دستگاه و محدودشدگی برش‌دهنده



شکل ۷ - نمایی از مدل حل‌شده برش سنگ توسط برش‌دهنده دیسکی

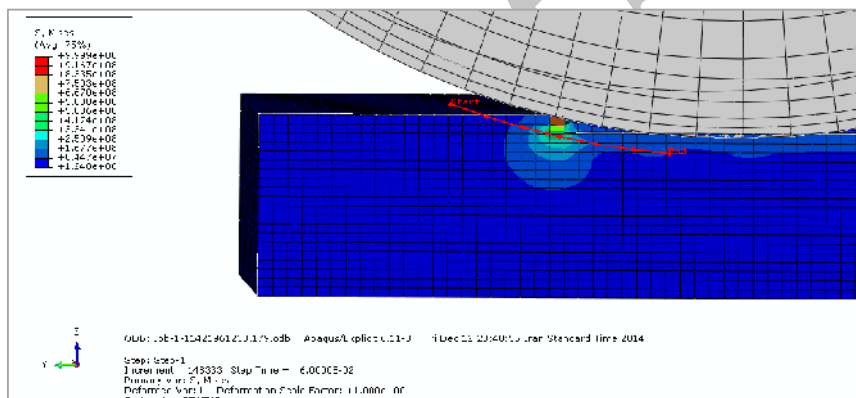
۴-۱- توزیع فشار در ناحیه تماس

با ایجاد مقطعی در گام زمانی ۰/۰۶ مدل حل شده، دقیقاً در مرکز ناحیه اندرکنشی دیسک و سنگ، توزیع فشار آشکار شده است و در شکل ۸ نمایش داده شده است. همچنین حالت توزیع فشار و نواحی فاقد بارگذاری در مدل سازی عددی مشابه با شکل ۲- ب حاصل شده است. مشخص است که ناحیه سبز کم‌رنجی اطراف محیط سبزرنگ در زون بندی تنش توسط *ABAQUS* وجود دارد. چنین ناحیه‌ای به تنش پسماند المان‌هایی اشاره می‌کند که هنوز به آستانه انرژی شکست نرسیده‌اند. همچنین در ناحیه تماس، گستره بسیار ناچیزی با رنگ زرد متمایل به نارنجی در هر سه گام زمانی بررسی شده دیده می‌شود که مقادیر تنش بسیار بالایی (بالتر از ۹۰۰ مگاپاسگال) را نشان می‌دهد. این ناحیه به تمرکز تنش بسیار زیادی که در ناحیه تماس دیسک و سنگ و در نوک لبه

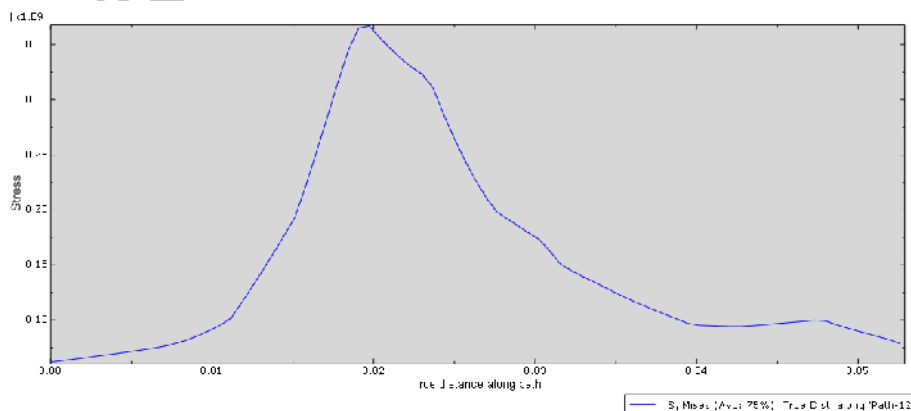
دیسک ایجاد می‌شود، اشاره می‌کند.

جهت برآورد میانگین توزیع فشار ناحیه تماس، مسیری کاملاً منطبق با لبه دیسک و در ۳ میلی‌متری زیر آن ایجاد شد (شکل ۸) و با گرفتن خروجی مقادیر تنش در این مسیر در مازول نتایج *ABAQUS/CAE*، نمودار حاصل از آن برحسب فاصله از ابتدا تا انتهای مسیر ترسیم شد.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، توزیع فشار زیر دیسک از اول مسیر به مقدار نزدیک صفر بوده و با پیشروی در راستای آن، مقادیر تنش بیشتر می‌شود و در ۳۵۰ مگاپاسگال مقدار حداکثر خود را در ۳۰ میلی‌متر از ابتدای مسیر حاصل می‌کند. با ادامه این مسیر فشار افت می‌کند و رفته‌رفته به مقدار ثابتی می‌رسد. این مقدار نشان‌دهنده تنش‌های پسماند موجود در المان بعد از غلتش دیسک روی سنگ است که رستمی (*Rostami, 2013*) به آن اشاره‌ای نکرده است.



شکل ۸ - نمایش مسیر ایجاد شده در مدل حل شده جهت بررسی پروفایل توزیع فشار



شکل ۹ - مقادیر تنش موجود در المان‌ها در راستای مسیر ایجاد شده در مدل حل شده

زمانی بصورت نموداری در شکل ۱۱ ترسیم شده است.

از مقایسه تغییرات فشار بر حسب زمان حاصل از حل مدل عددی و رابطه نیمه نظری رستمی در نمودار شکل ۱۱ در سه گام زمانی مذکور نتیجه گرفته می‌شود که مطابقت بسیار خوبی میان نتایج حاصل از مدل عددی و رابطه نیمه تجربی رستمی وجود دارد.

نتیجه گرفته‌شده از مقطع جناحی مدل، یکی از مهم‌ترین نتایج این آنالیز بشمار می‌رود و از اساسی‌ترین عوامل تأثیرگذار در برش سنگ و تشکیل تراشه است. چون تشکیل تراشه مهم‌ترین عامل در کاهش انرژی و ویژه در یک نیروی ثابت غلتشی برش‌دهنده است، بررسی این ناحیه و عوامل تأثیرگذار بر آن می‌تواند از فرآیند برش سنگ و نحوه تشکیل تراشه، دید بهتری دهد.

۵- بررسی عوامل مؤثر در توزیع فشار ناحیه تماس

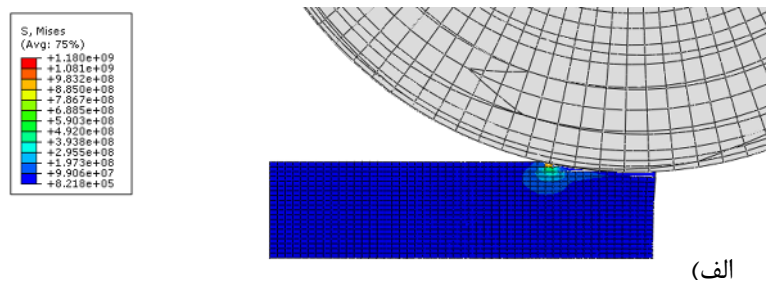
۵-۱- ضخامت لبه

با توجه به نتایج حاصل از حل مدل عددی می‌توان انتخاب بهترین پروفایل برای برش‌دهنده دیسکی را با توجه به توزیع فشار ناحیه تماس دیسک و سنگ انجام داد. شکل ۱۲ مقطعی جناحی از توزیع فشار ناحیه تماس برای دیسک‌های با ضخامت لبه ۷٫۶ و ۱۵٫۲۱ میلی‌متر در گام زمانی تقریباً برابر، نمایش می‌دهد. همان‌طور که از شکل نیز برمی‌آید، تمرکز تنش ایجادشده از دیسک با ضخامت لبه ۷٫۶ میلی‌متر بسیار بیشتر از تمرکز تنش دیسک با ضخامت لبه ۱۵٫۲۱ میلی‌متر است. این موضوع نشان می‌دهد که ضخامت لبه کمتر باعث تمرکز تنش بیشتر زیر دیسک در ناحیه تماس (۱۱۲۴ در مقابل ۴۰۹ مگاپاسکال) می‌شود. ارتباط معکوس فشار ناحیه تماس با ضخامت لبه دیسک در نتایج رستمی (رابطه شماره ۱) نیز دیده می‌شود.

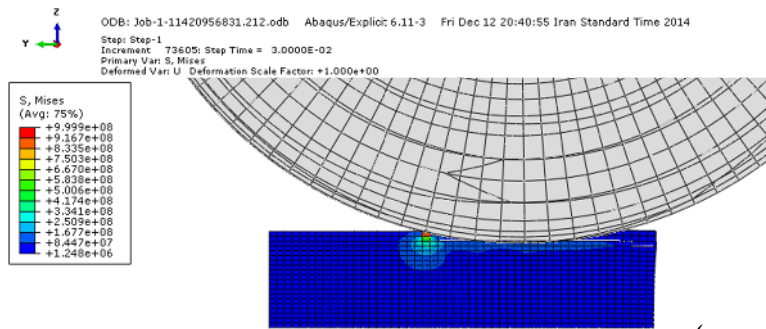
برای محاسبه تحلیلی فشار زیر دیسک از رابطه (۱) استفاده‌شده است که استفاده از آن در محاسبه فشار در حالت برش هم‌جوار توصیف شده است (Rostami, 2013). چون مدل‌سازی برای برش منفرد (unrelieved) انجام شده است، لازم است که اثر متقابل دو دیسک در این رابطه حذف شود. بنا به نظر بالچی و توماچ (۲۰۱۵)، با در نظر گرفتن نسبت فاصله‌داری به عمق نفوذ نزدیک به عدد ۲۰، اثر متقابل دو دیسک حذف‌شده و رابطه معادل با حالتی است که برش منفرد انجام گرفته است (Balci & Tumac, 2015). بنابراین در رابطه مذکور با جایگذاری فاصله‌داری ۱۰۰ میلی‌متر برای عمق نفوذ ۵ میلی‌متر، فشار معادل در برش منفرد نتیجه می‌شود. همچنین با جایگذاری مقادیر σ_c و σ_t مطابق با جدول ۱ و مقادیر T و R مطابق با مقادیر ذکرشده در بخش ۲ در رابطه (۱) میانگین فشار ناحیه تماس محاسبه می‌شود. زاویه ϕ نیز طبق معادله ذکرشده بر حسب رادیان محاسبه‌شده است و پارامتر C ثابتی معادل ۲٫۱۲، در نظر گرفته می‌شود. بنابراین مقدار عددی فشار در ناحیه تماس ۱۲۷ مگاپاسکال برآورد می‌شود.

مقدار میانگین مقادیر پروفایل ایجادشده ۱۵۱ مگاپاسکال محاسبه شد و در مقایسه با مقدار میانگین فشار از رابطه رستمی (۱۲۷ مگاپاسکال)، نتیجه قابل قبولی کسب شده است. با توجه به غلظت دیسک در طول سنگ لازم است که حداقل در دو گام زمانی دیگر توزیع تنش ناحیه تماس با سنگ بررسی شود. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود در سه گام زمانی ۰٫۰۳، ۰٫۰۶ و ۰٫۰۹ توزیع تنش خوبی قابل مشاهده است و با ایجاد مسیری همانند مسیر ایجاد شده در شکل ۸، پروفایل فشار ترسیم و میانگین آن برآورد شده است. مقادیر میانگین فشار محاسبه شده بر حسب گام

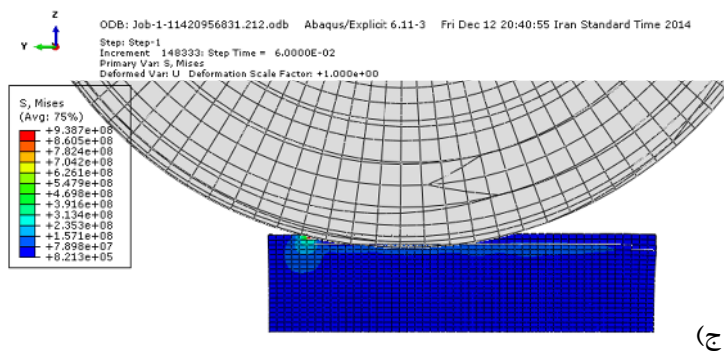
بررسی عددی عوامل مؤثر بر توزیع فشار در ناحیه تماس دیسک و سنگ در فرآیند برش خطی سنگ: ص ۲۷-۴۲



(الف)

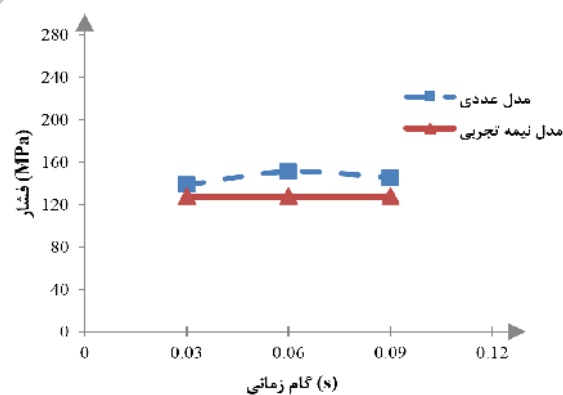


(ب)



(ج)

شکل ۱۰- نمایش ناحیه فشار زیر دیسک در گام‌های زمانی: (الف) ۰،۰۰۳، (ب) ۰،۰۰۶، (ج) ۰،۰۰۹.



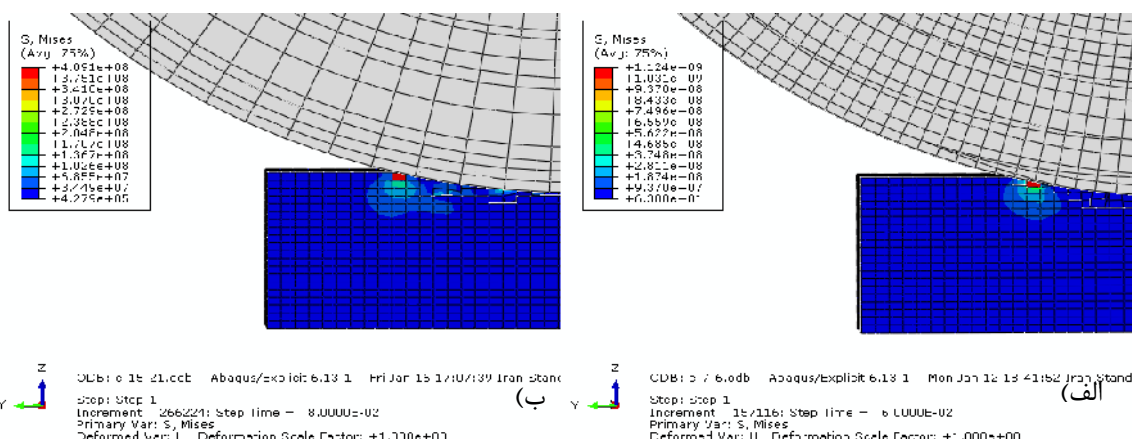
شکل ۱۱- نمودار تغییرات فشار بر حسب زمان در مدل حل شده برش سنگ

نمایش می‌دهد. همان‌طور که از شکل نیز برمی‌آید، تمرکز تنش ایجاد شده از دیسک با ضخامت لبه ۷/۶ میلی‌متر بسیار بیشتر از تمرکز تنش دیسک با ضخامت لبه ۱۵/۲۱ میلی‌متر است. این موضوع نشان می‌دهد که ضخامت لبه کمتر باعث تمرکز تنش بیشتر زیر دیسک در ناحیه تماس (۱۱۲۴) در مقابل ۴۰۹ مگاپاسکال) می‌شود. ارتباط معکوس فشار ناحیه تماس با ضخامت لبه دیسک در نتایج رستمی (رابطه شماره ۱) نیز دیده می‌شود.

۶- بررسی عوامل مؤثر در توزیع فشار ناحیه تماس

۱-۶- ضخامت لبه

با توجه به نتایج حاصل از حل مدل عددی می‌توان انتخاب بهترین پروفایل برای برش‌دهنده دیسکی را با توجه به توزیع فشار ناحیه تماس دیسک و سنگ انجام داد. شکل ۱۲ مقطعی جناحی از توزیع فشار ناحیه تماس برای دیسک‌های با ضخامت لبه ۷/۶ و ۱۵/۲۱ میلی‌متر در گام زمانی تقریباً برابر،



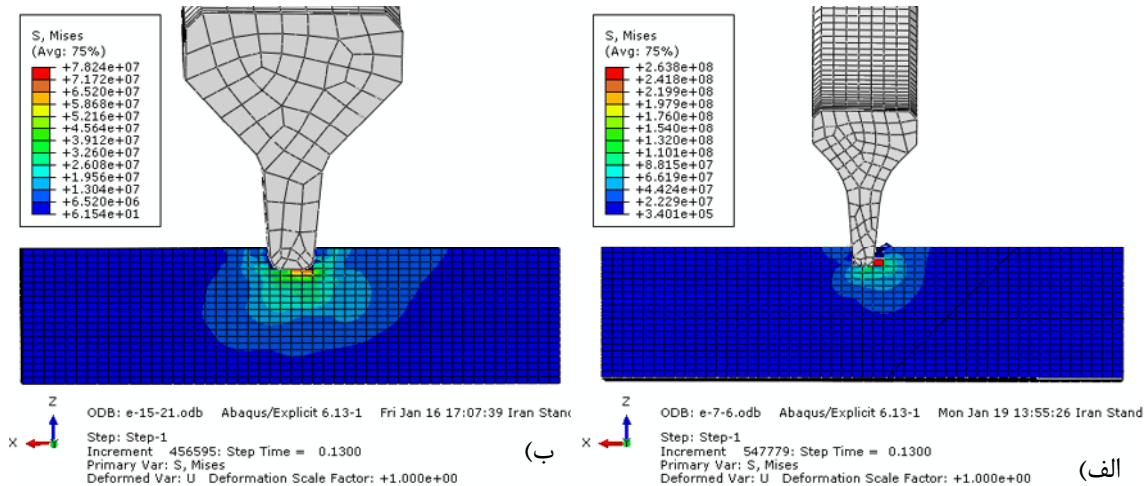
شکل ۱۲- مقطع طولی و نمایش کنتوری محدوده تنش برای برش‌دهنده‌های قطر ۱۷ اینچ، زاویه لبه ۵ درجه، عمق نفوذ ۵ میلی-متر و اندازه متفاوت ضخامت لبه: الف) ۷/۶ میلی‌متر ب) ۱۵/۲۱ میلی‌متر

نخواهد بود؛ چراکه اساس حل در این حلگر بر مبنای انتشار موج تنش در محیط است و از دقت پایین تری نسبت به حلگر استاندارد ABAQUS برخوردار است. همچنین شعاع تأثیر تنش زیر دیسک با لبه ضخیم‌تر بیشتر است که می‌تواند در تشکیل ریزترک‌ها و گسترش ترک‌ها نقش بسیار مهمی را ایفا کند. بنابراین اگر در فاصله‌ای یکسان از هر دو دیسک با ضخامت‌های لبه متفاوت، دیسک دومی عبور کند در صورت برهم‌نهی دو محدوده تنش ایجاد شده در زیر دو دیسک، و رسیدن مقدار تنش به شرایط شکست سنگ، امکان تشکیل تراشه در مجاورت دیسک با لبه ضخیم‌تر بیشتر است. از این رو، لبه ضخیم‌تر دیسک، امکان تشکیل ریزترک‌ها و شکل‌گیری تراشه در برش هم‌جوار را فراهم می‌کند. این موضوع در انتخاب آرایش و فاصله‌داری دیسک‌ها به هنگام طراحی کله‌حفار بایستی در نظر گرفته شود. همچنین برش-دهنده‌های با لبه ضخیم‌تر، دوام و نرخ سایش مقاوم‌تری نسبت

هرچند که توزیع فشار از نمای مقطع جناحی مدل چندان متفاوت به نظر نمی‌رسد اما با ایجاد مقطعی عمود بر مقطع فوق در مدل، نحوه توزیع تنش را می‌توان بهتر مشاهده کرد. با توجه به شکل ۹ که مقطعی از جلوی برش‌دهنده را در هر دو ضخامت ۷/۶ و ۱۵/۲۱ میلی‌متر در گام زمانی ۰/۱۳ نمایش می‌دهد، با وجود تمرکز تنش کمتر در زیر دیسک با لبه ضخیم‌تر نسبت به دیسک با لبه برنده‌تر (۷۸/۲ در مقابل ۲۶۳/۸ مگاپاسکال)، آشفتگی ناحیه تنش و انتشار آن در محیط سنگی بسیار بیشتر از دیسک با ضخامت لبه کمتر است. با کمی دقت در توزیع تنش شکل ۱۳، عدم تقارنی در این نواحی دیده می‌شود. علت این موضوع را می‌توان به نحوه تماس لبه دیسک با سطح برش خورده و نامنظم سنگ و تا حدی رهاشدگی نامتقارن تنش به خاطر حذف المان در جهت پیشروی نسبت داد که تغییراتی را در حل می‌دهد. همچنین حلگر صریح دینامیکی استفاده شده برای حل مدل بی‌تأثیر

ممکن است در نحوه شکل‌گیری ریزترک‌ها اثرگذار باشد. چون هرچقدر اختلاف تنش و تنش‌های تفاضلی در شعاع تأثیر بیشتر شود، امکان شکل‌گیری ترک و شکستن سنگ و بازشدگی بیشتر خواهد بود.

به دیسک با لبه نازک‌تر را دارد. با دقت بیشتر در خروجی تنش‌های حاصل از حل مدل با برش‌دهنده ضخیم، مقادیر تقریباً یکسانی در تنش‌های زیر دیسک دیده می‌شود. این موضوع حاکی از آن است که تنش‌های هیدروستاتیک در زیر دیسک شکل گرفته است. شکل‌گیری چنین ناحیه‌ای از تنش



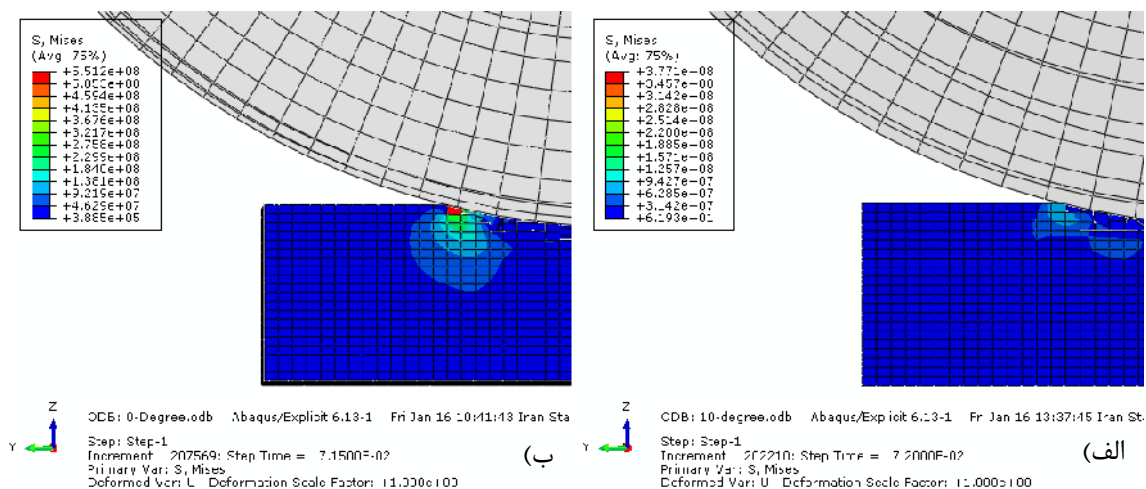
شکل ۱۳- مقطع عرضی و نمایش کننتوری محدوده تنش برای برش‌دهنده‌های قطر ۱۷ اینچ، زاویه لبه ۵ درجه، عمق نفوذ ۵ میلی‌متر و اندازه متفاوت ضخامت لبه: الف) ۷/۶ میلی‌متر. ب) ۱۵/۲۱ میلی‌متر

کند. شکل ۱۵ مقطعی از انتهای مدل سنگ و محدوده تنش در زیر دیسک با زوایای لبه صفر و ۱۰ درجه، در گام زمانی تقریبی ۰/۱ را نشان می‌دهد. به‌خوبی مشخص است که با وجود آنکه تنش ماکزیمم آفاده شده در زیر دیسک در زاویه لبه ۱۰ درجه کمتر اتفاق افتاده است (۷۹ در برابر ۶۷۰ مگاپاسگال) اما رشد تنش و جهت شکل‌گیری ترک و تشکیل تراشه بسیار بیشتر است.

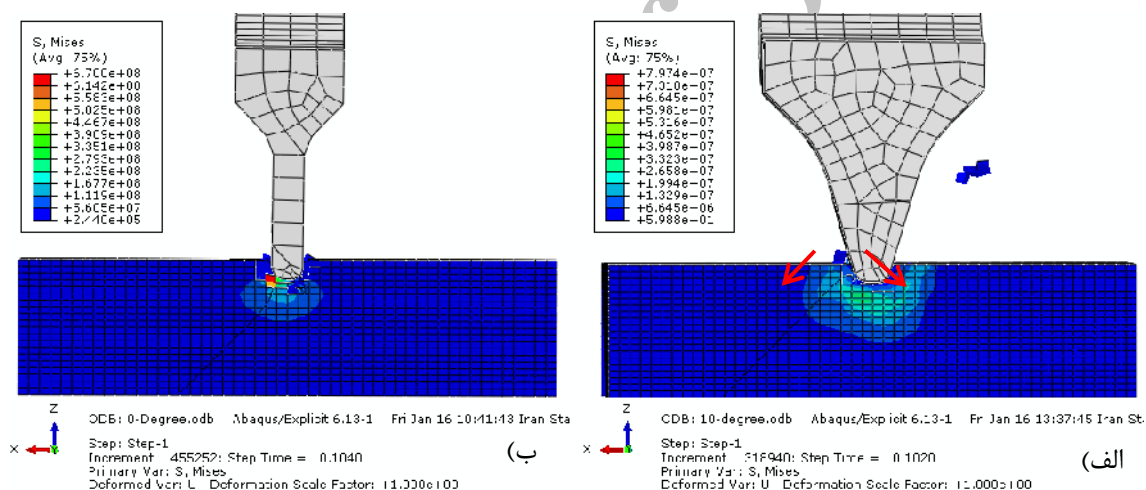
در واقع زاویه‌دار شدن لبه دیسک باعث تغییرات در تنش‌های زیر دیسک می‌شود و از تشکیل ناحیه هیدروستاتیک جلوگیری می‌کند. چنانچه در طراحی دیسک، زاویه لبه به‌عنوان پارامتری اساسی انتخاب شود، لازم است که دوام و سایش آن موردبررسی قرار گیرد. از آنجایی‌که برش‌دهنده‌های نوع CCS برای کاهش اثر سایش حین برش سنگ طراحی شده است، بنابراین زاویه لبه از نظر سایش نسبت به ناحیه فشار، پارامتری بسیار حیاتی مدنظر قرار می‌گیرد.

۲-۶- زاویه لبه

در ضخامت‌های کمتر لبه دیسک، تمرکز تنش بیشتری در ناحیه اندرکنش دیسک و سنگ اتفاق می‌افتد. این موضوع برای زاویه لبه دیسک نیز صادق است. در شکل ۱۴-ب به‌خوبی مشاهده می‌شود که زاویه لبه صفر درجه، تمرکز تنش بیشتری را نسبت به زاویه لبه ۱۰ درجه ایجاد کرده است. همچنین محدوده تنش نمایش داده‌شده برای دیسک با زاویه لبه ۱۰ درجه، نوعی آشفتگی را نشان می‌دهد. این موضوع به ایجاد تنش‌های جانبی نسبت به تنش‌های زیر دیسک اشاره می‌کند. شاید چنین تصور شود که زاویه لبه بزرگ‌تر تمرکز تنش کمتری را زیر دیسک اعمال کند (۳۷۷ در برابر ۵۵۱ مگاپاسگال)، اما در اعمال تنش‌های جانبی و تشکیل تراشه بسیار اثرگذارتر است. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، نیروهای جانبی در تشکیل تراشه‌های سنگی نقش مهمی را ایفا می‌کند. از این رو ممکن است انتخاب زاویه لبه بزرگ‌تر دیسک بتواند در فرآیند خردایش، نقش بسیار مؤثرتری را ایفا



شکل ۱۴ - مقطع طولی و نمایش کننتوری محدوده تنش برای برش‌دهنده‌های قطر ۱۷ اینچ، عمق نفوذ ۵ میلی‌متر و ضخامت لبه ۱۱/۵ و زاویه لبه الف (۱۰ درجه ب) صفر درجه



شکل ۱۵ - مقطع عرضی و نمایش کننتوری محدوده تنش برای برش‌دهنده‌های قطر ۱۷ اینچ، عمق نفوذ ۵ میلی‌متر و ضخامت لبه ۱۱/۵ و زاویه لبه الف (۱۰ درجه ب) صفر درجه

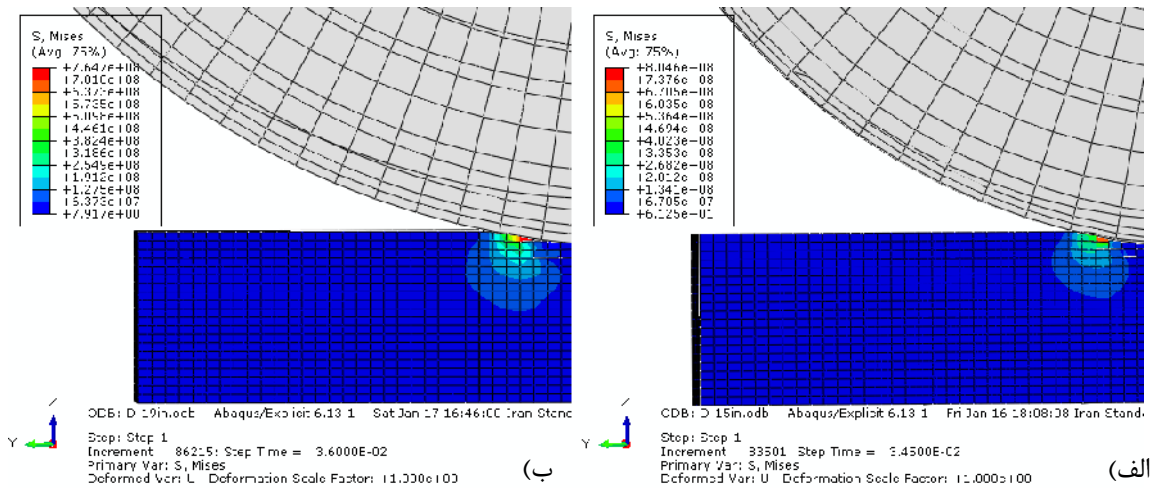
از نمای روبروی مدل در شکل ۱۷ آورده شده است. ناحیه کننتوری تنش به‌صورت تقریبی در هر دو مدل یکسان است بنابراین قطر برش‌دهنده اثری در تشکیل تراشه بیشتر و یا انرژی ویژه ندارد. اما با توجه به افزایش تنش در دیسک با قطر ۱۹ اینچ می‌توان چنین تصور کرد که افزایش قطر باعث ایجاد تنش بیشتری در سنگ می‌شود. چون با افزایش قطر دیسک وزن دیسک نیز افزایش می‌یابد، شاید بتوان چنین در نظر گرفت که وزن برش‌دهنده باعث انجام چنین تمرکز تنش بیشتری می‌شود. از طرفی با توجه به این

۳-۶ قطر برش‌دهنده حائز اهمیت است که کانتور تنش در مقاطعی از مدل سنگ با برش‌دهنده‌های با قطر متفاوت نیز بررسی شود. شکل ۱۶ مقطعی از جناحین مدل حل شده در گام زمانی تقریبی ۰.۰۵۵ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نیز دیده می‌شود تنش ۸۰۴ مگاپاسگال با دیسک قطر ۱۹ اینچ، به سنگ اعمال شده است. این مقدار در برش‌دهنده با قطر ۱۵ اینچ به ۷۶۴ مگاپاسگال کاهش یافته است. همچنین مقطعی

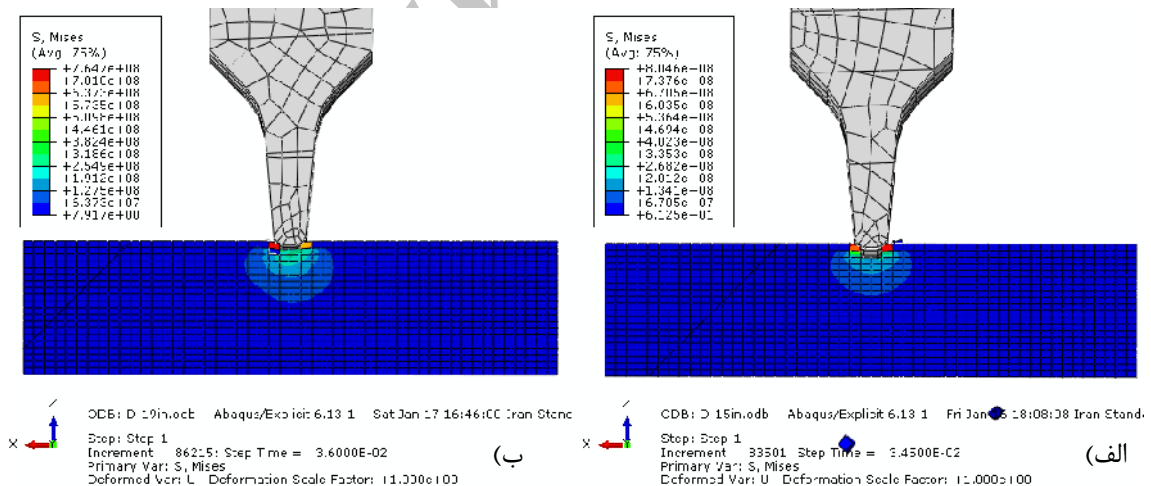
بنابراین تغییر قطر برش‌دهنده تأثیری در ایجاد اختلاف بین تنش‌ها و تشکیل ریزترک ندارد. هرچند که آشفته‌گی ناحیه برش‌دهنده با قطر ۱۹ اینچ گسترده‌تر به نظر می‌رسد، اما تنش‌های هیدروستاتیک شکل‌گرفته زیر لبه دیسک باعث کاهش اثر قطر دیسک در تشکیل تراشه خواهد شد.

که با افزایش قطر نیروی عمودی وارد بر دیسک افزایش می‌یابد (Rostami, 1997)، لازم است که دوام برش‌دهنده به دلیل افزایش قطر بررسی گردد.

بررسی مقادیر تنش‌های زیر دیسک‌های با قطر متفاوت نیز نشان می‌دهد که در هر دو حالت تغییرات تنش نسبت به هم از مقادیر کمی برخوردار است (شکل ۱۶ و شکل ۱۷).



شکل ۱۶- مقطع طولی و نمایش کنتوری محدوده تنش برای برش‌دهنده‌های با ضخامت لبه ۱۱/۵، عمق نفوذ ۵ میلی‌متر و زاویه لبه ۵ درجه با قطر الف) ۱۵ اینچ. ب) ۱۹ اینچ.



شکل ۱۷- مقطع عرضی و نمایش کنتوری محدوده تنش برای برش‌دهنده‌های با ضخامت لبه ۱۱/۵، عمق نفوذ ۵ میلی‌متر و زاویه لبه ۵ درجه با قطر الف) ۱۵ اینچ. ب) ۱۹ اینچ.

۷- نتیجه‌گیری

بررسی شد. نتایج تحلیل نشان داد که افزایش یا کاهش قطر اثری بر توزیع فشار ندارد همچنان که نیروی عمودی وارد بر دیسک در دیسک‌های با قطر بیشتر افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی برش سنگ و توزیع فشار در ناحیه تماس تطابق خوبی با نتایج کار آزمایشگاهی نشان داد. با وجود این، برخی از یافته‌های این تحقیق جدید بوده و مطالعات عمیق‌تری برای حصول نتایج دقیق‌تر در حال انجام است.

۸- فهرست نمادها

جدول ۴- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
σ_c	Pa	مقاومت فشاری تک‌محوره
σ_t	Pa	مقاومت کششی تک‌محوره
T	mm	ضخامت لبه برش‌دهنده دیسکی
R	mm	شعاع برش‌دهنده دیسکی
P	mm	عمق نفوذ لبه برش‌دهنده دیسکی
S	mm	فاصله‌داری بین دو دیسک در برش هم‌جوار
φ	rad	زاویه تماس بین سنگ و دیسک در ناحیه تماس آن‌ها
C	-	ثابتی معادل با مقدار ۲/۱۲

۹- قدردانی

در این تحقیق، مدل‌سازی عددی و اعتبارسنجی نتایج در حضور داده‌های آزمایشگاهی میسر بوده است. از این‌رو، نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از دکتر جمال رستمی دانشیار مدرسه معدن کلرادو به خاطر دراختیار قرار دادن داده‌های موردنیاز اعلام می‌دارند.

در این تحقیق، آزمون برش خطی تمام مقیاس به روش عددی شبیه‌سازی شد. مدل عددی دیسک و سنگ مطابق با شرایط آزمایشگاهی در کار رستمی (۱۹۹۷ و ۲۰۱۳) ساخته و در نهایت با آن راستی‌آزمایی شد. توزیع فشار ناحیه تماس دیسک و سنگ همراه با مطالعه مناطق فاقد بارگذاری در مدل‌سازی عددی بررسی و با روابط نیمه‌نظری رستمی (۱۹۹۷) مقایسه شد. با توجه به مقدار خطای حاصل (کمتر از ۱۴٪)، نتایج مقایسه نشان می‌دهد که رابطه خوبی میان نتایج مدل‌سازی و رابطه نیمه‌نظری برقرار است.

همچنین، پارامترهای مؤثر در انتخاب پروفایل دیسک شامل ضخامت و زاویه لبه و قطر دیسک در نظر گرفته شد. با تغییر پارامترهای مذکور در پروفایل دیسک و حل مدل، ناحیه فشار در ناحیه تماس دیسک و سنگ در یک گام زمانی مشابه در مدل‌های تغییر یافته بررسی شد. با عبور مقطعی عرضی از میان مدل حل‌شده برش سنگ، چنین نتیجه‌گیری شد که علیرغم تمرکز تنش بیشتر از سوی ضخامت و زاویه لبه کمتر، افزایش ضخامت و زاویه لبه شعاع تأثیر ناحیه فشار را افزایش می‌دهد و باعث شکل‌گیری ریزترک‌های بیشتری در محیط سنگی می‌شود. افزایش ضخامت به تنهایی باعث تشکیل ناحیه تنش هیدروستاتیک در ناحیه تماس می‌شود که جهت تشکیل ریز ترک‌ها و رشد ترک مناسب نیست. با افزایش زاویه لبه زون تنش زیر دیسک آشفته‌تر می‌شود و تنش‌های تفاضلی بروز می‌کند. چون تنش تفاضلی عامل اصلی رشد ترک در سنگ محسوب می‌شود، هر دو عامل ضخامت و زاویه لبه بیشتر می‌بایست باهم مورد لحاظ واقع شود. بنابراین در برش هم‌جوار تراشه‌های بیشتری با مقاطع ضخیم‌تر و زاویه لبه بیشتر تشکیل خواهد شد. قطر دیسک نیز به‌عنوان پارامتری مجزا

۱۰- مراجع

- Benjumea, R. &. (1968). A note on the penetration of a rigid wedge into a nonisotropic brittle material. technical report.
- Cook, N., Hood, M., & Tsai, F. (1984). In Observations of crack growth in hard rock loaded by an indenter. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, 97-107.
- Pang, S., Goldsmith, W., & Hood, M. (1989). A force-indentation model for brittle rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 127-148.

- Roxborough, F. F., & Phillips, H. R. (1975). In Rock excavation by disc cutter. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 361-366.
- Ozdemir, L. (1977). Development of theoretical equations for predicting tunnel boreability. Colorado School of Mines.
- Sanio, H. (1985). In Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 153-161.
- Sato, K., Gong, F., & Itakura, K. (1991). In Prediction of disc cutter performance using a circular rock cutting rig. *Proceedings 1st international mine mechanization and automation symposium*.
- Gertsch, R., Gertsch, L., & Rostami, J. (2007). Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction. *International Journal of rock mechanics and mining sciences*, 44 (2), 238-246.
- Rostami, J., & Ozdemir, L. (1993). In A new model for performance prediction of hard rock TBMs. *Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference, SOCIETY FOR MINING, METALLOGY & EXPLORATION, INC*, (pp. 793-793).
- Rostami. (1997). Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure. Colorado School of Mines.
- Rostami. (2013). Study of pressure distribution within the crushed zone in the contact area between rock and disc cutters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 57, 172-186.
- Cho, J.-W., Jeon, S., Jeong, H.-Y., & Chang, S.-H. (2013). Evaluation of cutting efficiency during TBM disc cutter excavation within a Korean granitic rock using linear-cutting-machine testing and photogrammetric measurement. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 37-54.
- Cho, J.-W., Jeon, S., Yu, S.-H., & Chang, S.-H. (2010). Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25 (3), 230-244.
- ABAQUS Documentation. (2011). RI, USA: Dassault Systemes Simulia Corp.
- Zhang, G. &. (n.d.). Experimental Researches on Friction Coefficient for Disc Cutters.
- Mattar, P. (2009). In Permeability of intact and fractured Indiana Limestone. *Masters Abstracts International*.
- Schmidt, R. A. (1976). *Fracture-toughness testing of limestone*. Experimental Mechanics.
- Balci, C., & Bilgin, N. (2007). Correlative study of linear small and full-scale rock cutting tests to select mechanized excavation machines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, 468-476.
- Balci, C., & Tumas, D. (2015). Investigations into the cutting characteristics of CCS type disc cutters and the comparison between experimental, theoretical and empirical force estimations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 45, 84-98.