

برآورد مشخصات و بهینه‌سازی موقعیت قرارگیری دیسک‌های محیطی در ماشین‌های تونل‌زنی سنگ‌های سخت

پژوهشی

ابراهیم فرخ^{*۱}

۱- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک)، e.farrokhi@aut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۰۱/۱۰؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۰۹/۲۹

شماره صفحات: ۲۰۷ تا ۲۲۸

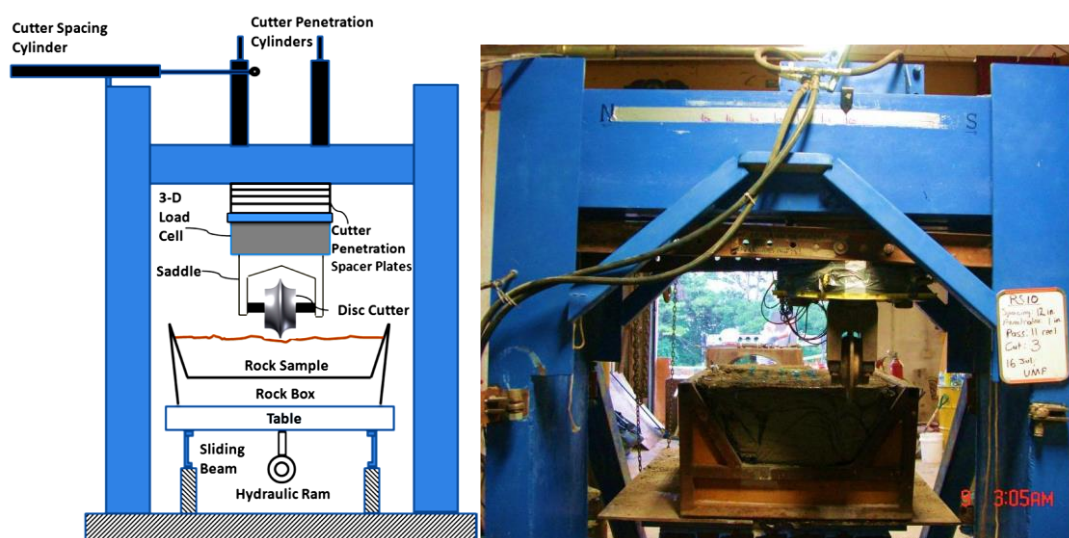
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2020.9509.1392

واژگان کلیدی	چکیده
ماشین تونل‌زنی کله‌حفار طرح جانمایی دیسک محیطی	<p>یکی از اهداف مهم در فرایند طراحی کله‌حفار، جانمایی صحیح دیسک‌های ناحیه محیطی است. با توجه به اینکه سطح مقطع نفوذ دیسک‌های محیطی در سینه کار، کمتر از مقدار مشابه دیسک‌های ناحیه میانی است، نیروی عمودی اعمال شده از طرف آن‌ها به سینه کار کمتر است. برای جلوگیری از ایجاد پله بین این دیسک‌ها و در نتیجه اعمال نیروهای نامتقارن به دیسک‌ها و سازه کله‌حفار، لازم است که فاصله‌داری دیسک‌های ناحیه محیطی به تدریج از ناحیه میانی به سمت محیط کله‌حفار کم شود تا شرایط حفاری بهینه برای این دیسک‌ها فراهم شود. طراحی فاصله‌داری و زوایای قرارگیری دیسک‌های محیطی به صورت تجربی انجام می‌شود، از این رو در برخی موارد مشاهده شده است که عدم رعایت کاهش فاصله‌داری، منجر به وارد شدن آسیب به سازه کله‌حفار شده است. در این مقاله با استفاده از اصول حفاری بهینه (بر اساس نسبت فاصله‌داری به نرخ نفوذ (S/p)) و با به‌کارگیری نسبت سطح مقطع نفوذ (نسبت سطح مقطع نفوذ دیسک ناحیه محیطی به سطح مقطع نفوذ دیسک ناحیه میانی) و سطح تماس واقعی دیسک برشی (که به صورت ترسیمی برای حالات مختلف نرخ نفوذ محاسبه شده است)، یک روش برای برآورد فاصله‌داری بهینه دیسک‌های برشی، نیروی عمودی اعمال شده به آن‌ها و همچنین زوایای قرارگیری آن‌ها ارائه شده است. این روش بر اساس یک فرایند سعی و خطا پایه ریزی شده است و مقادیر اولیه مورد نیاز در این فرایند برای پارامترهای زاویه انحراف آخرین دیسک ناحیه محیطی و زاویه بین آخرین دیسک ناحیه میانی و اولین دیسک ناحیه محیطی، بر اساس تحلیل آماری خصوصیات طراحی کله‌حفار تعدادی از ماشین‌های تونل‌زنی زمین‌های سخت تعیین شده است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌ها نشان می‌دهد که اختلاف سطح مقطع واقعی نفوذ با سطح مقطع تئوری نفوذ برای دیسک‌های میانی در مقادیر نفوذ کم در حد چند درصد است، اما در نفوذهای بیشتر از ۱۰ میلی‌متر، این اختلاف به بیشتر از ۱۰ درصد می‌رسد. نتایج تحلیل‌ها برای مقادیر نسبت سطح مقطع نفوذ نیز بیانگر این است که این نسبت در زوایای انحراف کمتر از ۳۰ درجه به کمتر از ۴۰ درصد می‌رسد. برای تشریح مراحل ارائه شده در روش بهینه‌سازی خصوصیات طراحی دیسک‌های محیطی، یک مثال با ذکر جزئیات طراحی و نتایج نهایی آن ارائه شده است. نتایج روش ارائه شده می‌تواند نقش مهمی در ارتقاء روش‌های تجربی طراحی جانمایی دیسک‌های محیطی و بهینه‌سازی طراحی ماشین‌های تونل‌زنی داشته باشد.</p>

۱- مقدمه

جمله می‌توان به توزیع نیروهای دیسک‌های برشی در ناحیه مرکزی و ناحیه محیطی کله‌حفار اشاره کرد. البته از دهه های گذشته محققان مختلفی، سعی بر انجام مطالعات آزمایشگاهی و میدانی برای اندازه‌گیری این نیروها انجام داده اند که از آن جمله می‌توان به تحقیقات انجام شده با آزمایش های بزرگ مقیاس دیسک برشی (که از این به بعد با نام دیسک یاد می‌شود) با استفاده از ماشین‌های برش خطی (Abu Bakar, 2012), (Eskikaya, et al., 2005), (Gertsch, et al., 2007), (Lislerud, 1997), (Ozdemir, et al., 1978), (Rostami, 1997), (Tuncdemir, et al., 2008), (Roxborough & Phillips, 1975), (Farrokh, et al., 2015) یا دورانی (شکل ۱) (Geng, et al., 2016), (Geng, et al., 2017) (شکل ۲) اشاره کرد.

با توسعه روز افزون کاربرد ماشین‌های تونل‌زنی در اجرای تونل‌های مختلف دنیا، بهینه‌سازی خصوصیات طراحی آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار شده است. در این میان، یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی و بهینه‌سازی عملکرد ماشین‌های تونل‌زنی در زمین‌های سخت، طرح جانمایی ابزار حفاری در ناحیه محیطی کله‌حفار است. این بهینه‌سازی می‌تواند اثر خود را روی پارامترهایی همچون عملکرد ماشین حفاری (نرخ پیشروی) نشان دهد و از آسیب‌های احتمالی وارده به سازه کله‌حفار یا ابزار حفاری جلوگیری کند. غالباً، اصول طراحی ماشین‌های حفاری از تجربیات پروژه‌های مشابه گرفته می‌شود و در این زمینه مجهولات فراوانی وجود دارد که توضیح واضحی در مورد آن‌ها وجود ندارد. از آن



شکل ۱-آزمایش بزرگ مقیاس برش خطی برای تعیین پارامترهای بهینه هندسه برش (Abu Bakar, 2012)

در مورد دیسک‌های ناحیه محیطی، ویژگی مهمی که طراحی جانمایی آن‌ها را متفاوت از طراحی جانمایی سایر دیسک‌ها می‌کند، زاویه انحراف متفاوت آن‌ها نسبت به سطح کله‌حفار است. موضوع مهم این است که دیسک محیطی که زاویه انحراف آن کمتر از ۹۰ درجه است، بر خلاف دیسک‌های ناحیه میانی کله‌حفار، در جهتی متفاوت از محورش در سینه کار نفوذ می‌کند و این ویژگی باعث تفاوت عملکرد حفاری آن می‌شود. علاوه بر این، با توجه به زاویه دار بودن دیسک‌های ناحیه محیطی، نیروهای اعمال شده به

نتایج این آزمایشات می‌تواند برای دیسک‌های ناحیه میانی بسیار مفید باشد، اما برای دیسک‌های ناحیه مرکزی و محیطی به صورت مستقیم قابل استفاده نیست. از این رو طراحان کله‌حفار از یکسری ضرایب تجربی برای محاسبات خود استفاده می‌کنند. به عنوان مثال (Rostami & Chang, 2017) در مقاله خود ذکر کرده‌اند که برای محاسبه فاصله‌داری دیسک‌های محیطی، می‌توان فاصله‌داری به دست آمده برای دیسک‌های ناحیه میانی را به تدریج و به اندازه ۴ الی ۵ میلی‌متر برای دیسک‌های ناحیه محیطی کاهش داد.

آزمایش برش دورانی انجام شده توسط (Geng, et al., 2017)، برش دورانی روی یک مسیر دایره‌ای ثابت تا حداکثر نفوذ ممکن (۳۰ میلی‌متر میلی‌متر) به صورت پیوسته انجام شده است که منطبق با شرایط واقعی نیست. آنچه که از نتایج تحقیقات پیشین انجام شده برای دیسک‌های محیطی به دست آمده است، تایید این موضوع است که پارامترهای طراحی این دیسک‌ها متفاوت از پارامترهای طراحی دیسک‌های میانی است، اما نتایج این تحقیقات هنوز منجر به ارائه روشی برای به کارگیری نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی برای طراحی جانمایی این دیسک‌ها نشده است.

لبه این دیسک‌ها باعث ایجاد گشتاورهای خارج از محور کله‌حفار می‌شوند. با توجه به فاصله بیشتر این دیسک‌ها از مرکز کله‌حفار، گشتاورهای ایجاد شده به مراتب بیشتر از سایر دیسک‌های نصب شده روی کله‌حفار است. از این رو طراحی خصوصیات دیسک‌های ناحیه محیطی، از اهمیت بیشتری برخوردار است. در تحقیقات اخیر انجام شده توسط (Geng, et al., 2016) با ماشین برش دورانی ذکر شده است که نیروهای عمودی اعمال شده به دیسک‌های محیطی کمتر است. نکته قابل توجه این است که در روش انجام



شکل ۲- آزمایش بزرگ مقیاس برش دورانی برای تعیین پارامترهای بهینه هندسه برش (Farrokh, et al., 2015)

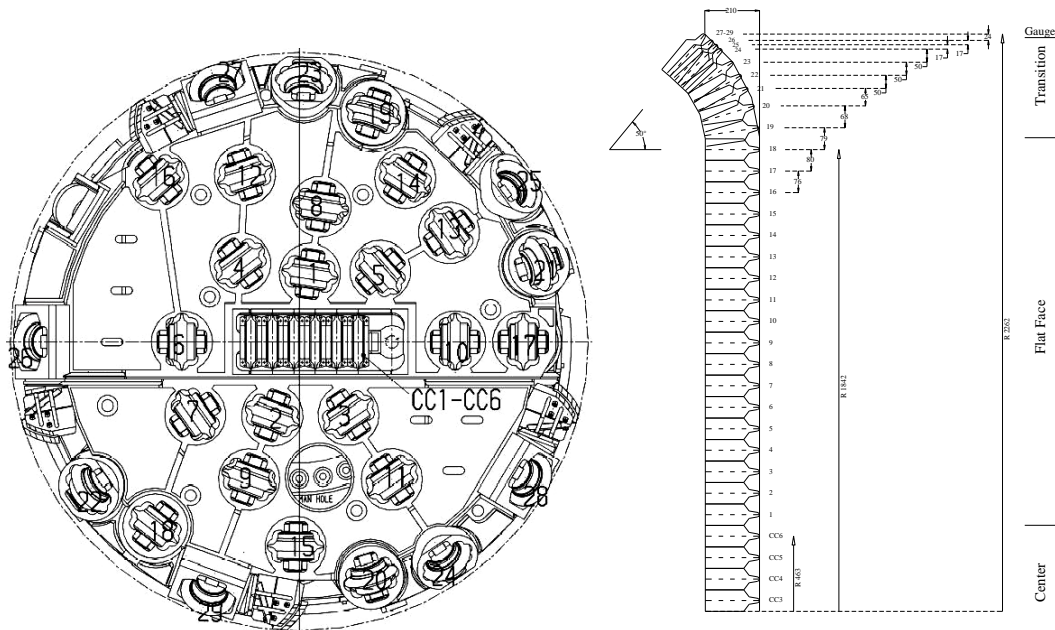
۲- دسته‌بندی دیسک‌های کله‌حفار

دیسک‌های برشی روی کله‌حفار را می‌توان به لحاظ موقعیت و عملکرد به سه گروه تقسیم بندی شود.

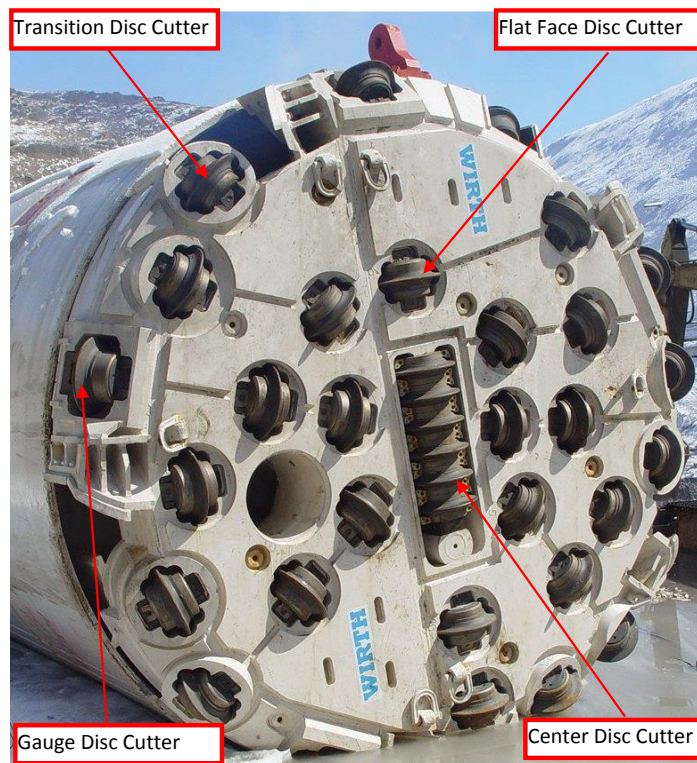
- دیسک‌های برشی ناحیه مرکزی،
- دیسک‌های برشی ناحیه میانی،
- دیسک‌های برشی ناحیه محیطی.

در شکل ۳ و شکل ۴ موقعیت و نمای دیسک‌های برشی گروه‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۳، نشان داده شده است، فاصله‌داری شعاعی دیسک‌های برشی ناحیه محیطی به تدریج از ناحیه میانی به سمت پیرامون کله‌حفار کم شده است. علاوه بر این در شکل ۴، مشاهده می‌شود که نوع جانمایی دیسک‌های برشی گروه مرکزی به دلیل محدودیت فضای لازم برای نصب آن‌ها، کاملاً با گروه‌های دیگر متفاوت است.

در این مقاله یک روش جدید بر مبنای استفاده از سطح نفوذ و سطح تماس واقعی دیسک برشی و نسبت بهینه فاصله‌داری به نرخ نفوذ برای بهینه‌سازی طرح جانمایی دیسک‌های ناحیه محیطی ارائه شده است. این روش بر پایه یک فرایند سعی و خطا استوار است، از این رو نیاز به یکسری اعداد اولیه برای شروع فرایند بهینه‌سازی است. این اعداد بر اساس روابط تجربی به دست آمده از تحلیل پارامترهای طراحی کله‌حفاری تعدادی از ماشین‌های تونل‌زنی زمین‌های سخت به دست آورده شده است. در طی این فرایند، روابطی برای محاسبه سطح مقطع واقعی نفوذ، نسبت سطح مقطع نفوذ، سطح تماس و نیروی عمودی اعمال شده به دیسک‌ها ارائه شده است. در انتها، مراحل بهینه‌سازی مشخصات طراحی دیسک‌های ناحیه محیطی به همراه یک مثال تشریح شده است.



شکل ۳- طرح موقعیت‌های مختلف دیسک‌های برشی روی کله‌حفار (Farrokh, 2013)



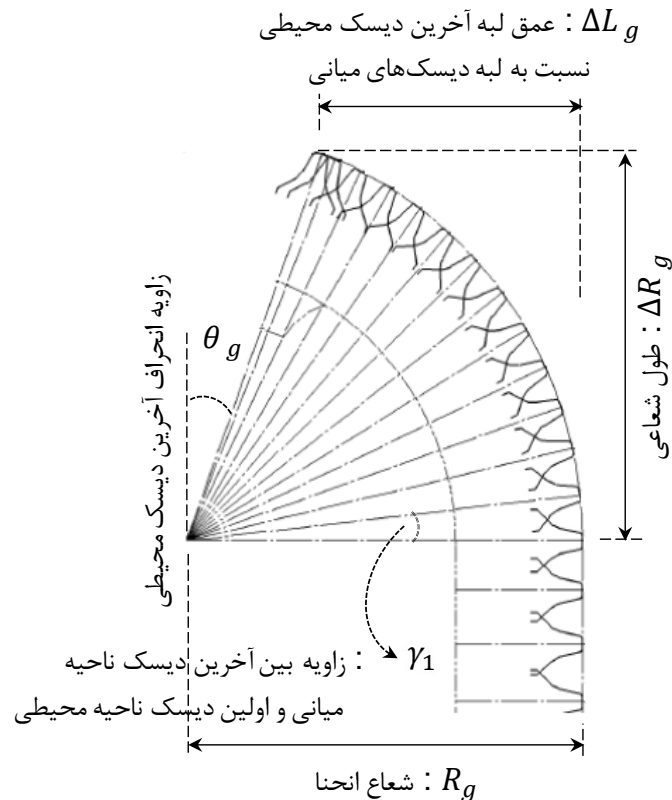
شکل ۴- انواع مختلف دیسک‌های برشی روی کله‌حفار (Farrokh, 2013)

هستند. زوایه انحراف (زوایه لبه دیسک برشی است (ΔR_g) که در شکل ۵، نشان داده شده است. در شکل ۶، روابط بین قطر تونل (D) و دو پارامتر اصلی دیسک‌های ناحیه محیطی ارائه شده است. این روابط بر اساس تحلیل آماری اطلاعات طراحی کله‌حفار ۱۲ TBM استخراج شده است که در جدول ۱، آورده شده است. در این گراف‌ها، θ_g زاویه انحراف آخرین دیسک محیطی، γ_1 زاویه بین آخرین دیسک ناحیه میانی و اولین دیسک ناحیه محیطی و S مقدار فاصله‌داری دیسک‌های ناحیه میانی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقدار θ_g عموماً بین ۲۰ تا ۳۰ درجه متغیر است. از این روابط می‌توان به عنوان یک راهنمای اولیه برای طراحی جانمایی دیسک‌ها استفاده کرد. البته همان‌گونه که در ادامه نیز تشریح می‌شود، مقادیر به‌دست آمده از این نمودارهای مقادیر اولیه‌ای هستند که در طی یک فرایند سعی و خطا برای طراحی بهینه، اصلاح می‌شوند.

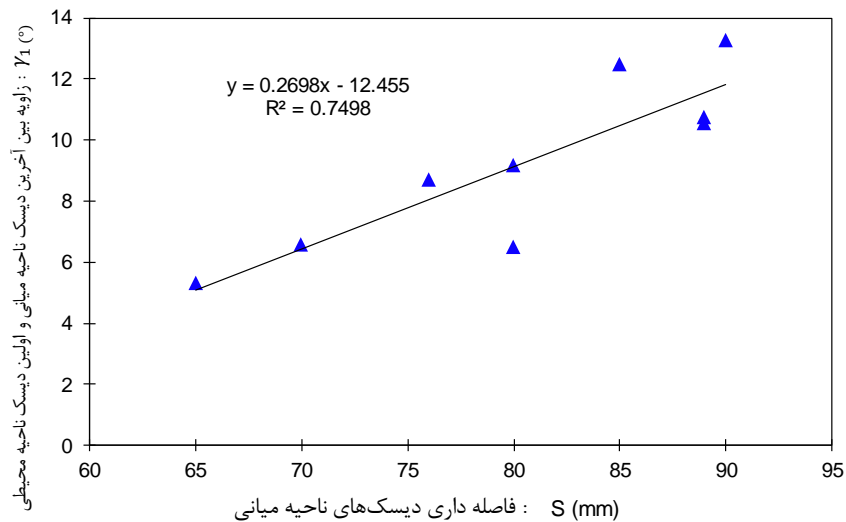
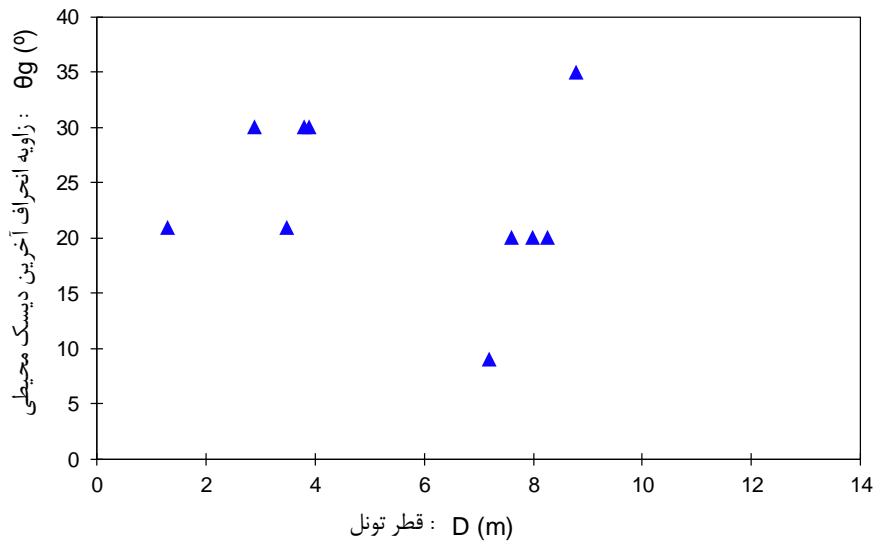
دیسک‌های برشی گروه ناحیه میانی، کاملاً عمود بر کله‌حفار نسبت به سطح کله‌حفار) دیسک‌های برشی گروه ناحیه محیطی (که شامل دیسک‌های ناحیه قوس‌دار و پیرامونی کله‌حفار است) در مثال نشان داده شده، به تدریج از ۹۰ درجه به حدود ۴۰ درجه تغییر پیدا می‌کند. لازم به ذکر است، با توجه به اینکه اصول عملکرد دیسک‌های نواحی قوس‌دار و پیرامونی مشابه هم هستند، در این مطالعه، این دو گروه با عنوان دیسک‌های ناحیه محیطی با هم ترکیب شده‌اند.

۳- مشخصات طرح جانمایی دیسک‌های محیطی

مهم‌ترین مشخصات طرح جانمایی دیسک‌های محیطی شامل شعاع انحنا (R_g) ، عمق لبه آخرین دیسک محیطی نسبت به لبه دیسک‌های میانی (ΔL_g) و طول شعاعی آن



شکل ۵- مشخصات محدوده دیسک‌های محیطی



شکل ۶- پارامترهای محدوده دیسک‌های محیطی بر اساس تحلیل‌های آماری اطلاعات طراحی کله‌حفرهای زمین‌های سخت

شکل ۷ و روابط (۱) و (۲)، مشخصات هندسی موقعیت قرارگیری اولین دیسک ناحیه محیطی را نشان می‌دهد.

شکل ۸ و روابط ۴ تا ۷ نیز پارامترهای کلی دیسک‌های برشی را در ناحیه محیطی نشان می‌دهد.

$$R_g = \frac{S}{2 \sin \frac{\gamma_1}{2}} \quad (3)$$

شکل ۷ و روابط (۱) و (۲)، مشخصات هندسی موقعیت قرارگیری اولین دیسک ناحیه محیطی را نشان می‌دهد.

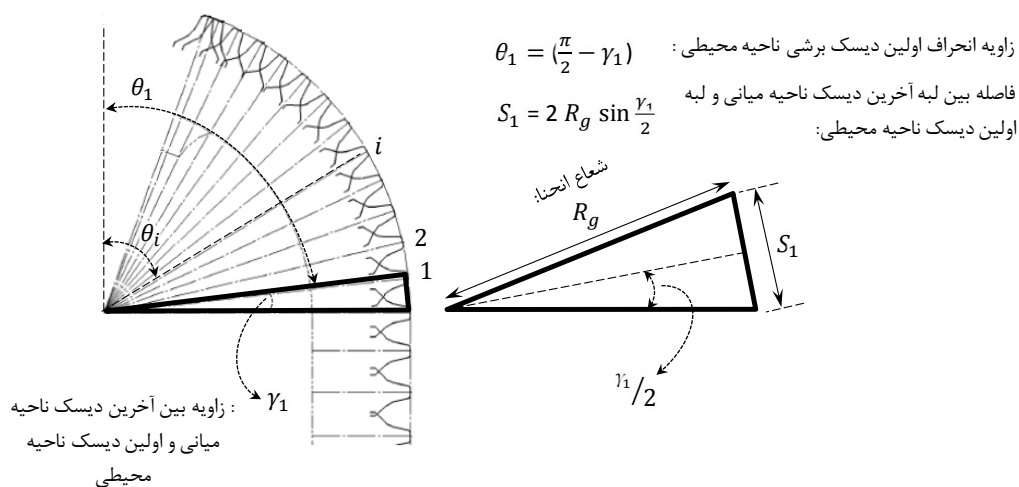
$$\theta_1 = \left(\frac{\pi}{2} - \gamma_1 \right) \quad (1)$$

$$S_1 = 2 R_g \sin \frac{\gamma_1}{2} \quad (2)$$

شکل ۸ و روابط ۴ تا ۷ نیز پارامترهای کلی دیسک‌های برشی را در ناحیه محیطی نشان می‌دهد.

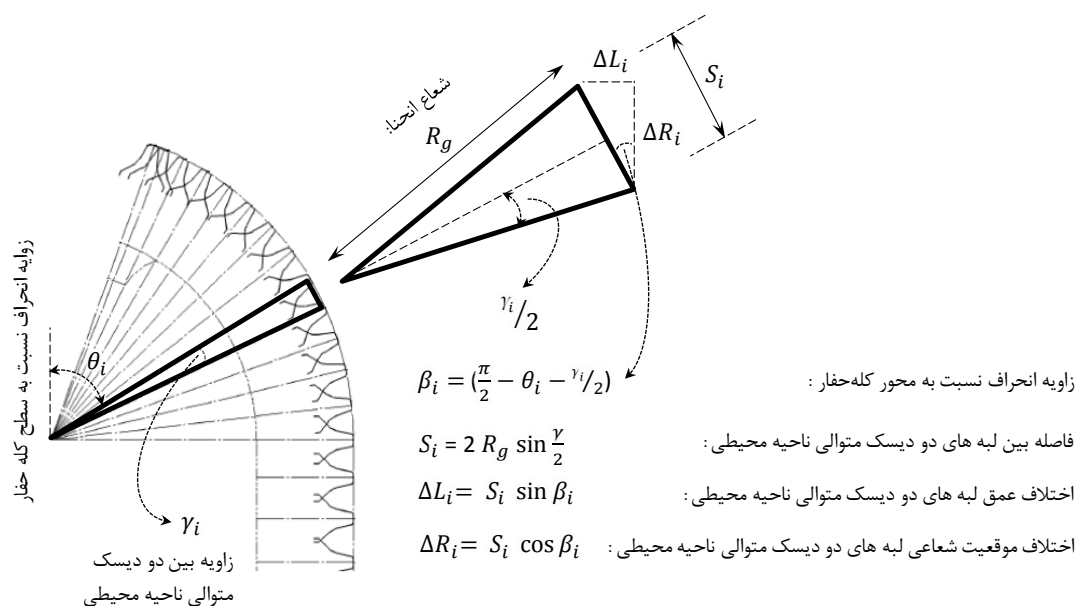
جدول ۱- اطلاعات طراحی کله‌حفار ۱۲ ماشین تونل‌زنی در زمین سخت

θ_g	γ_1	ΔR_g	ΔL_g	R_g	تعداد دیسک‌ها در ناحیه محیطی	فاصله‌داری دیسک‌ها - ناحیه میان	قطر دیسک	قطر کله‌حفار
(°)	(°)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	(m)
۳۵	۵/۳	۵۷۳	۲۹۸	۷۰۰	۱۱	۶۵	۴۳۲	۸/۸
۳۰	-	۱۹۵	۱۰۰	۲۰۰	۵	۹۰	۴۳۲	۳/۸
۲۰	۱۲/۵	۳۶۸	۲۵۷	۳۹۱	۱۰	۸۵	۴۳۲	۸
۲۰	۸/۷	۴۰۶	۳۳۰	۵۰۲	۱۳	۷۶	۴۸۲	۷/۶
۲۰	۶/۶	۵۷۲	۴۰۱	۶۱۰	۱۴	۷۰	۴۳۲	۸/۲۸
۹	۹/۲	۴۹۵	۴۲۲	۵۰۱	۱۱	۸۰	۴۳۲	۷/۲۱
-	-	۲۵۸	-	-	۷	۸۵	۲۶۰	۲/۸۷
-	-	۲۹۷	-	-	۱۰	۹۰	۴۸۲	۶
-	-	۵۸۵	-	-	۱۷	۹۰	۴۸۲	۱۲/۳۴
۳۰	۱۰/۷	۳۳۰	۲۰۳	۴۷۶	۷	۸۹	۳۶۸	۲/۹
۳۰	۱۰/۵	۴۱۹	۲۰۷	۴۸۵	۸	۸۹	۴۳۲	۳/۹
۲۱	۱۳/۳	۲۶۹	۱۶۶	۳۹۰	۷	۹۰	۲۷۹	۱/۳
۲۱	۶/۵	-	-	۷۰۶	۱۳	۸۰	۳۵۰	۳/۵



شکل ۷- پارامترهای فاصله‌داری و زاویه انحراف اولین دیسک برشی ناحیه قوس‌دار

- γ_i : زاویه بین دو دیسک متوالی ناحیه محیطی (۴)
- S_i : فاصله بین لبه‌های دو دیسک متوالی ناحیه محیطی (۵)
- ΔL_i : اختلاف عمق لبه‌های دو دیسک متوالی ناحیه محیطی (۶)
- ΔR_i : اختلاف موقعیت شعاعی لبه‌های دو دیسک متوالی ناحیه محیطی (۷)
- β_i : زاویه انحراف نسبت به محور کله‌حفار.
- θ_i : زاویه انحراف دیسک برشی ناحیه محیطی نسبت به سطح کله‌حفار



شکل ۸- پارامترهای هندسی موقعیت دیسک‌های برشی ناحیه قوس‌دار

مقادیر بهینه پارامترهای هندسه برش (شامل نرخ نفوذ و فاصله‌داری دیسک‌ها) وابسته به خصوصیات مقاومتی سنگ و پارامترهای هندسی کله‌حفار (عرض لبه و قطر دیسک) است. بر اساس نتایج مطالعات گسترده انجام شده توسط محققان مختلف دنیا و نتایج آزمایش‌های بزرگ مقیاس انجام شده روی ماده سنگ، مهم‌ترین خصوصیات مقاومتی سنگ در این زمینه شامل، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، و شاخص سرشار است (Gertsch, et al., 2007)، (Lislerud, 1997)، (Ozdemir, et al., 1978)، (Rostami, 1997)، (Farrokh, et al., 2015). البته، پارامترهای مقاومتی و درزه داری توده سنگ نیز اثر قابل توجهی روی میزان نفوذ دیسک‌ها دارند (Farrokh, et al., 2012) و (Bruland, 1998)، ولی در تعیین پارامترهای هندسه برش، عموماً از پارامترهای ماده سنگ استفاده می‌شود. میزان نرخ نفوذ دیسک بر اساس تجربیات پروژه‌های مشابه برآورد می‌شود. سپس بر اساس نسبت بهینه فاصله‌داری به نرخ نفوذ، مقدار فاصله‌داری بهینه تعیین می‌شود. فاصله‌داری بهینه، فاصله‌ای است که در آن ترک‌های توسعه یافته در زیر لبه دیسک‌ها، به یکدیگر متصل بشوند، به گونه‌ای که پله‌ای مابین دیسک‌ها ایجاد نشود و در عین حال تراشه‌های نسبتاً بزرگی به وجود آید. هر چه حجم تراشه‌ها بیشتر باشد، سطح ترک‌های ایجاد شده در سنگ

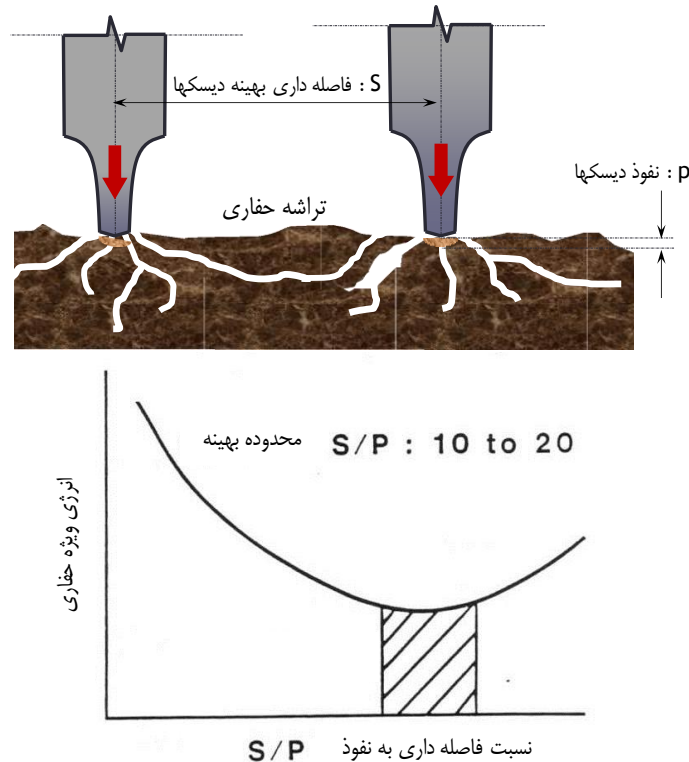
۴- فاصله‌داری بهینه در ناحیه محیطی کله‌حفار

در طراحی جانمایی دیسک‌های برشی روی سطح کله‌حفار، تعیین فاصله‌داری بهینه در ناحیه قوس‌دار محیطی بسیار مهم است. این به لحاظ اعمال نیروهای قابل توجه به سازه کله‌حفار در صورت عدم رعایت اصول طراحی کله‌حفار است. یکی از مهم‌ترین اصول طراحی کله‌حفار، کاهش تدریجی فاصله‌داری دیسک‌های محیطی در ناحیه قوس‌دار است. علت کاهش این فاصله‌داری به دلیل جلوگیری از اعمال نیروهای بیش از انتظار به دیسک‌های برشی و در نتیجه به سازه کله‌حفار است. در این زمینه، مطالعه‌ای برای تحلیل عوامل تأثیرگذار بر این موضوع و میزان افزایش نیروها انجام نشده است و عموماً طراحی موقعیت جانمایی دیسک‌های برشی در ناحیه محیطی به صورت تجربی و بر اساس عملکرد ماشین‌های مختلف در شرایط زمین شناسی گوناگون انجام می‌شود. در قسمت‌های بعد، به بررسی تفاوت عملکرد نفوذ دیسک‌های ناحیه میانی و محیطی پرداخته شده است و سپس بر اساس یک مطالعه دقیق در مورد فاکتورهای تأثیرگذار، فاصله‌داری دیسک‌های برشی در ناحیه محیطی بهینه‌سازی شده است.

۴-۱- نسبت بهینه فاصله‌داری به نرخ نفوذ

رفتار ترد، این نسبت نزدیک به عدد ۲۰ است (به‌عنوان مثال ۲۵ برای گرانیب بر اساس (Zhang, et al., 2020). هرچه رفتار سنگ از رفتار ترد به رفتار تغییر شکل پذیر، متمایل تر می‌شود، ایجاد تراشه در فاصله‌داری‌های بیشتر، دچار مشکل می‌شود. از این رو، نسبت‌های کمتر برای سنگ‌های تغییر شکل پذیر، مناسب‌تر است.

کاهش می‌یابد و به طبع آن، انرژی ویژه حفاری کم می‌شود. نسبت بهینه فاصله‌داری به نرخ نفوذ، عموماً برای سنگ‌های مختلف بین ۱۰ تا ۲۰ تغییر می‌کند (Ozdemir, et al., 1978)، (Rostami, 1997)، (Gertsch, et al., 2007)، (Farrokh, et al., 2015) که در شکل ۹، نشان داده شده است. در سنگ‌های نرم با رفتار شکست ترد، این نسبت به عدد ۱۰ نزدیک‌تر است، در حالیکه برای سنگ‌های سخت با



شکل ۹- پارامترهای هندسه برش و هندسه کاتر و نسبت بهینه فاصله‌داری به نرخ نفوذ (Ozdemir & Phillips, 1978) (Zhang, et al., 2020)، (Farrokh, et al., 2015)، (Gertsch, et al., 2007)، (Rostami, 1993)

p_i تصویر نفوذ کله‌حفار در جهت محور دیسک برشی ناحیه محیطی.

۴-۲- نفوذ لبه دیسک‌های برشی در ناحیه میانی

برای مقایسه عملکرد نفوذ دیسک‌های برشی ناحیه میانی و محیطی، از یک مثال واقعی طرح کله‌حفار با قطر ۳/۵ متر استفاده شده است. به این منظور، سطح مقطع نفوذ یک دیسک برشی با قطر ۴۳۲ میلی‌متر (۱۷ اینچ) در شرایط مختلف نفوذ کله‌حفار و با حالت‌های مختلف زاویه انحراف، به‌دست آورده شده است. در این قسمت، به بررسی سطح مقطع تئوری نفوذ و سطح مقطع واقعی نفوذ دیسک‌های

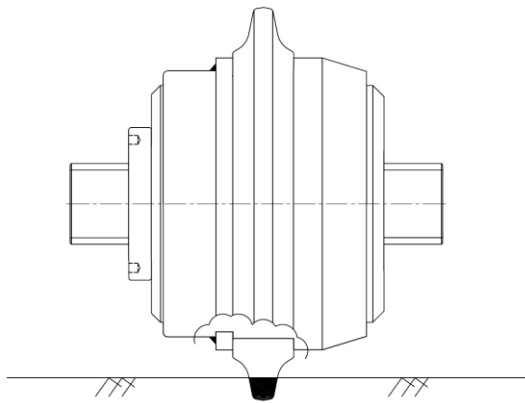
اعداد یاد شده برای نسبت فاصله‌داری به نرخ نفوذ را می‌توان هم برای دیسک‌های ناحیه مرکزی و میانی و هم برای دیسک‌های ناحیه محیطی استفاده کرد. البته با توجه به اینکه نرخ نفوذ در نسبت S/p در جهت محور دیسک‌های برشی است، برای دیسک‌های ناحیه محیطی، باید از نرخ نفوذ تصویر شده در جهت محور دیسک استفاده کرد (شکل ۱۰ و رابطه ۸).

$$p_i = p \sin \theta_i \quad (8)$$

θ_i : زاویه انحراف دیسک برشی ناحیه محیطی

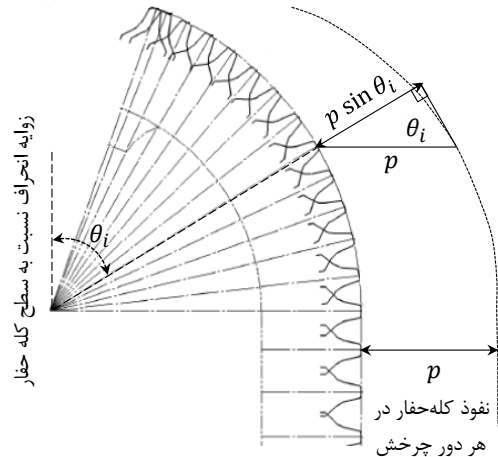
p : نفوذ کله‌حفار در هر دور چرخش آن

کم در حد ۱۰ الی ۱۵ درجه نسبت به محور آن است که سبب می‌شود، عرض لبه دیسک از محیط پیرامونی به سمت مرکز دیسک، افزایش پیدا کند. علاوه بر این، لبه دیسک مسطح نیست و معمولاً کمی قوس‌دار است و این سبب می‌شود که سطح تماس دیسک با سنگ نیز به صورت قوس‌دار شود. این موضوع در حین آزمایش‌های بزرگ مقیاس ماشین برش دورانی مورد بررسی قرار گرفته و تأیید شده است (Farrokh, et al., 2016)، (Farrokh & Kim, 2018). از این رو سطح مقطع نفوذ دیسک با سنگ به صورت هلالی در می‌آید. جدول ۲، حالت‌های مختلف سطح مقطع نفوذ دیسک را در مقادیر مختلف نفوذ نشان می‌دهد



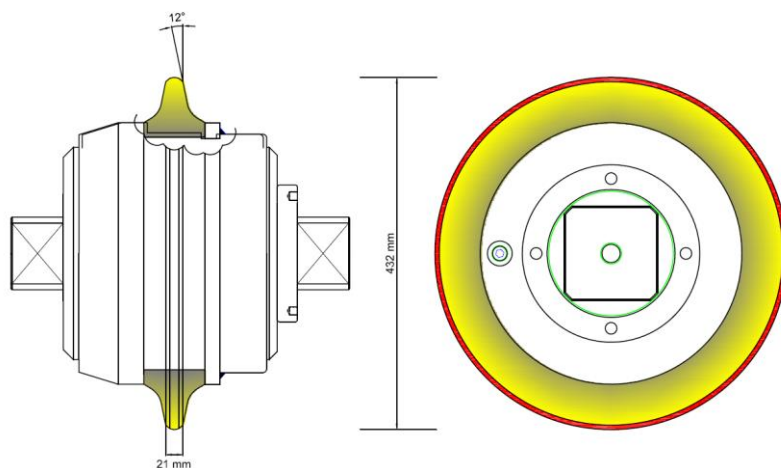
شکل ۱۱- سطح مقطع نفوذ دیسک برشی

ناحیه میانی پرداخته می‌شود. منظور از سطح مقطع نفوذ، سطح در تماس دیسک برشی در صفحه گذرنده از محور دیسک، عمود بر سطح سینه کار است (شکل ۱۱).













شکل ۱۰- نرخ نفوذ تصویر شده در جهت محور دیسک برشی

شکل ۱۲، مقطع یک دیسک برشی با قطر ۴۳۲ میلی‌متر و عرض لبه ۲۱ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقطع دیسک برشی یکنواخت نیست و دیواره‌های دیسک دارای یک زاویه



شکل ۱۲- نماهای مختلف از یک دیسک برشی با قطر ۴۳۲ میلی‌متر

جدول ۲- حالات مختلف نفوذ لبه دیسک برشی و سطح مقطع نفوذ آن‌ها

حالات مختلف نفوذ لبه دیسک		
 <p>۲۱</p>	 <p>۱۳۳</p>	مقطع و مقدار نفوذ بر حسب میلی‌متر
 <p>۴۳</p>	 <p>۱۸۱</p>	مقطع و مقدار نفوذ بر حسب میلی‌متر
 <p>۶۵</p>	 <p>۲۳۱</p>	مقطع و مقدار نفوذ بر حسب میلی‌متر
 <p>۸۷</p>	 <p>۲۸۲</p>	مقطع و مقدار نفوذ بر حسب میلی‌متر
 <p>۱۱۰</p>	 <p>۳۶۱</p>	مقطع و مقدار نفوذ بر حسب میلی‌متر

رابطه ۱۰). با توجه به اینکه شکل لبه‌های دیسک‌های مختلف به لحاظ زاویه سطوح جانبی دیسک با محور آن تقریباً ثابت است، این رابطه را می‌توان به‌صورت تقریبی برای قطرهای مختلف دیسک‌های برشی مورد استفاده قرار داد. مقایسه نتایج سطح مقطع واقعی نفوذ با سطح مقطع تئوری نفوذ (شکل ۱۳) نشان می‌دهد که اختلاف این دو در مقادیر نفوذ کم در حد چند درصد است، اما در نفوذهای بیشتر از

طبیعی است که به‌دست آوردن سطح مقطع واقعی نفوذ با استفاده از روش ترسیمی، کاری زمان بر است و نیاز است که برای تسهیل انجام محاسبات در حالات مختلف نفوذ دیسک، یک رابطه تجربی توسعه داده شود. در اینجا رابطه بین سطح مقطع تئوری نفوذ که حاصل ضرب عرض لبه دیسک و عمق نفوذ است (رابطه ۹)، با سطح مقطع واقعی نفوذ (جدول ۲) مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۳ و

۱۰ میلی‌متر، این اختلاف به بیشتر از ۱۰ درصد می‌رسد. (۹)

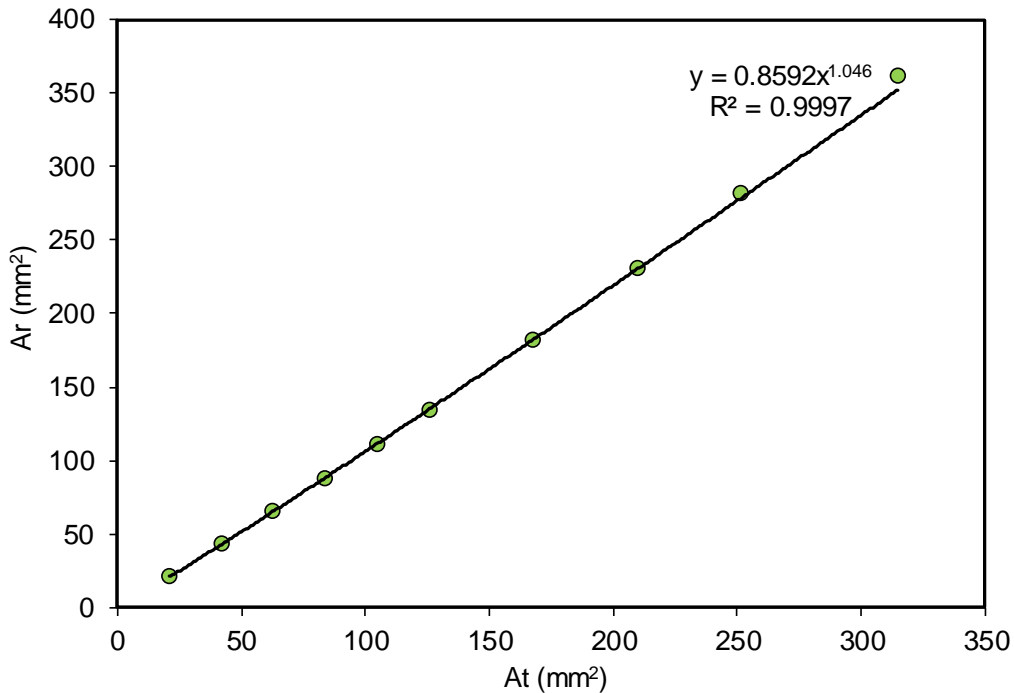
$$A_t = T \cdot p$$

عرض لبه دیسک T :
 سطح مقطع تئوری نفوذ A_t :
 نفوذ دیسک p :

(۱۰)

$$A_r = 0.8592 \cdot A_t^{1.046}$$

سطح مقطع واقعی نفوذ A_r :



شکل ۱۳- رابطه بین سطح مقطع تئوری نفوذ (A_t) و سطح مقطع واقعی نفوذ (A_r)

نرم‌افزار اتوکد)، محاسبه شد و بر اساس نتایج به‌دست آمده، یک بانک اطلاعاتی توسعه داده شد. جدول ۳، نمونه‌ای از اطلاعات استخراج شده از روش ترسیمی را برای به‌دست آوردن نسبت سطح مقطع نفوذ در مقدار نفوذ ۲ میلی‌متر نشان می‌دهد. بانک اطلاعاتی یاد شده شامل اطلاعات مشابه برای مقادیر نفوذ مختلف از ۲ تا ۱۴ میلی‌متر است. در این بانک اطلاعاتی، یک نسبت سطح مقطع نفوذ R_i تعریف شده است که بر اساس رابطه ۱۱ تعریف می‌شود.

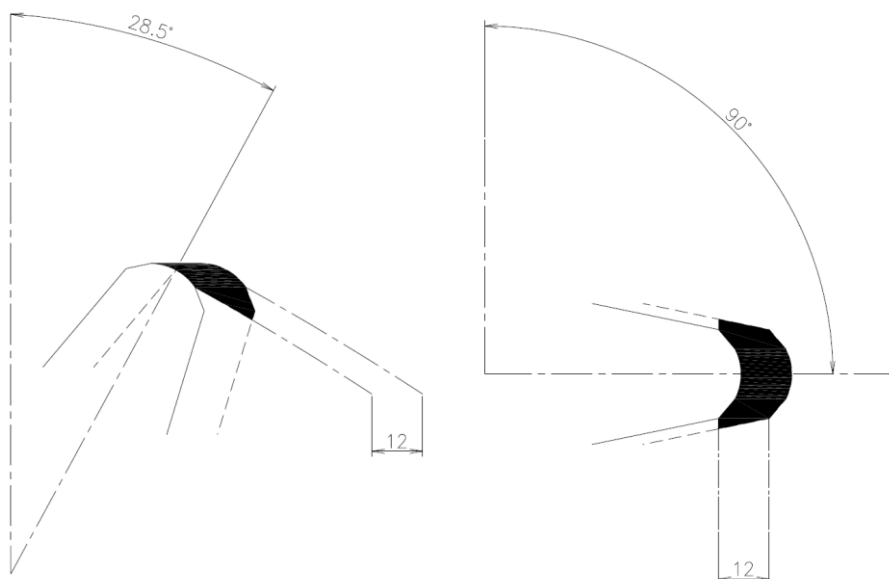
$$R_i = \frac{A_r(\theta_i)}{A_r} \quad (11)$$

سطح مقطع نفوذ لبه دیسک برشی با زاویه انحراف θ_i

A_r : سطح مقطع نفوذ لبه دیسک برشی با زاویه انحراف ۹۰ درجه (دیسک‌های ناحیه میانی)
 R_i : نسبت سطح مقطع نفوذ.

۳-۴- نفوذ لبه دیسک‌های برشی در ناحیه محیطی و تأثیر زاویه انحراف

شکل ۱۴، نمونه‌ای از سطح مقطع نفوذ دیسک برشی با قطر ۴۳۲ میلی‌متر میلی‌متر را در دو حالت زاویه انحراف ۹۰ درجه و ۲۸/۵ درجه و در شرایط نفوذ ۱۲ میلی‌متر برای یک کله‌حفار با قطر ۳/۵ متر، نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سطح مقطع نفوذ دیسک‌های ناحیه محیطی بسیار کمتر از سطح مقطع نفوذ دیسک‌های ناحیه میانی است (در مثال شکل ۱۴، نسبت سطح مقطع نفوذ دیسک ناحیه محیطی به سطح مقطع نفوذ دیسک ناحیه میانی، ۳۸ درصد است). برای اینکه اثرات توأمان زاویه انحراف و نرخ نفوذ را به‌دست آوریم، سطح مقطع نفوذ دیسک یاد شده را در حالات مختلف زاویه انحراف و در نرخ نفوذهای مختلف، از طریق روش ترسیمی (با استفاده از



شکل ۱۴- مقایسه سطح مقطع نفوذ دیسک‌های ناحیه میانی و قوس‌دار در حالت نفوذ ۱۲ میلی‌متر

جدول ۳- اطلاعات مقادیر نسبت سطح مقطع نفوذ در زوایای انحراف مختلف در نرخ نفوذ ۲ میلی‌متر

R_i	A_r (mm ²)	$A_r(\theta_i)$ (mm ²)	θ_i (°)	P (mm)
۱	۱۸/۵۵	۱۸/۵۵	۹۰	۲
۰/۹۵	۱۸/۵۵	۱۷/۶۷	۷۴	۲
۰/۶	۱۸/۵۵	۱۱/۱۹	۳۹/۸	۲
۰/۳۴	۱۸/۵۵	۶/۳۵	۲۸/۵۲	۲

بر اساس مدل *CSM* یا مدل لیزلرود به‌دست می‌آید (Rostami, 1997). نکته قابل توجه این است که این مدل‌ها بر پایه نتایج آزمایش‌های برش خطی استوار است که در آن‌ها زاویه انحراف نسبت به سطح سنگ برش داده شده ۹۰ درجه است؛ بنابراین نتایج چنین آزمایش‌هایی برای دیسک‌های ناحیه مرکزی و میانی مناسب هستند. برای دیسک‌های ناحیه محیطی، نیاز به انجام یکسری اصلاحات است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. لیزلرود (Lislerud, 1997) برای به‌دست آوردن روابط نیروهای اعمال شده به دیسک برشی از یک تجزیه و تحلیل ابعادی استفاده کرده است و در ادامه، ثابت‌های روابط پیشنهادی خود را از تجزیه و تحلیل آماری نتایج آزمایش‌های برش خطی به‌دست آورده است. روابط ۱۳ تا ۱۵ نتایج نهایی به‌دست آمده را نشان می‌دهد.

با استفاده از اطلاعات نسبت سطح مقطع نفوذ (R_i)، سینوس زاویه انحراف ($\sin \theta_i$) و نرخ نفوذ (p) بر اساس تحلیل رگرسیون چند جمله‌ای با نرم افزار *Minitab*، رابطه ۱۲ برای برآورد نسبت سطح مقطع نفوذ، به‌دست آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با این رابطه می‌توان با دقت نسبتاً بالایی، مقدار نسبت سطح مقطع نفوذ را به‌دست آورد.

$$R_i = 0.845 p^{0.0883} \sin \theta_i^{1.4565} R^2 = 97\% \quad (12)$$

۴-۴- نیروی عمودی اعمال شده به دیسک‌های

برشی

نیروهای اعمال شده به دیسک برشی شامل نیروی عمودی F_n ، نیروی برشی F_r و نیروی جانبی F_s است. نیروی عمودی

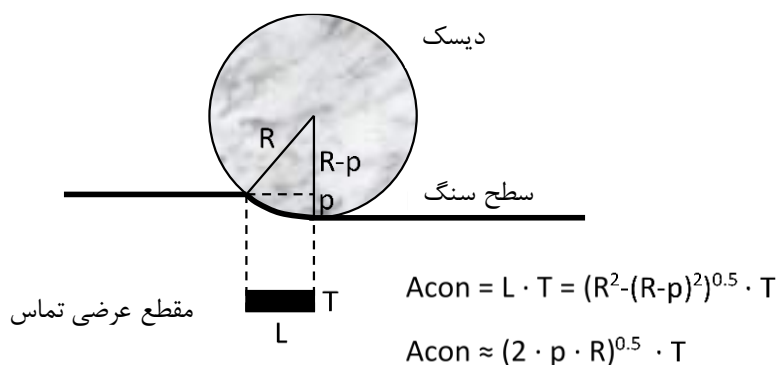
T عرض لبه دیسک و R شعاع دیسک برشی است. یکی از فاکتورهای مهم مورد استفاده در این تحلیل ابعادی، سطح تماس دیسک برشی با سنگ (A_{con}) است. شکل ۱۵، نحوه محاسبه این سطح تماس را نشان می‌دهد. بر این اساس، با در نظر گرفتن مولفه‌های A_{con} ، رابطه ۱۳ به صورت رابطه ۱۶، ساده سازی می‌شود.

$$Fn = 0.00195 \cdot UCS \cdot T \cdot (2 \cdot R \cdot S / 76.2)^{0.5} \cdot p^{0.5} \quad (13)$$

$$Fr/Fn = k \quad (14)$$

$$k = 0.0433 \cdot (216/R)^{0.5} \cdot p^{0.5} \quad (15)$$

در این روابط UCS مقاومت تک محوری سنگ، k ثابت دیسک برشی، p نفوذ دیسک، S فاصله‌داری دیسک‌ها،

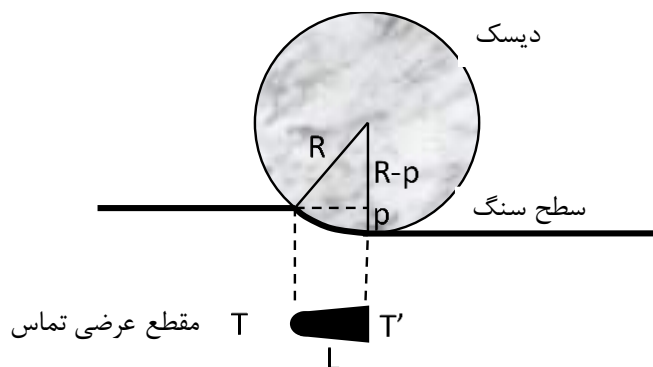


شکل ۱۵- هندسه تماس دیسک برشی با سطح سنگ و نحوه محاسبه سطح تماس

دیسک نیز کاملاً مسطح نیست و معمولاً کمی قوس دار است. از این رو فرمول‌بندی سطح تماس واقعی (شکل ۱۶) کمی پیچیده می‌شود. برای محاسبه دقیق سطح تماس واقعی در مقادیر نفوذ مختلف دیسک، می‌توان از روش ترسیمی استفاده کرد. جدول ۴، نمونه‌ای از نتایج محاسبات انجام شده را نشان می‌دهد.

$$Fn = 0.00195 \cdot UCS \cdot A_{con} \cdot (S/76.2)^{0.5} \quad (16)$$

نکته قابل توجه این است که همان‌گونه که در قسمت قبل توضیح داده شد، در عمل، مقطع دیسک برشی یکنواخت نیست و دیواره‌های دیسک، زاویه‌دار هستند که این خود باعث می‌شود، عرض لبه دیسک از محیط پیرامونی به سمت مرکز دیسک، افزایش پیدا کند. علاوه بر این، لبه



شکل ۱۶- هندسه تماس دیسک برشی با سطح سنگ و سطح تماس واقعی



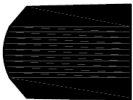



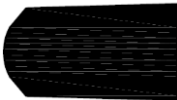



$$A_{con} = 74.456 \cdot A_r^{0.5514} \quad (17)$$

A_r : سطح مقطع واقعی نفوذ،

A_{con} : سطح تماس.

برای تسهیل انجام محاسبات در حالات مختلف نفوذ دیسک، رابطه ۱۷ بر اساس سطح مقطع واقعی نفوذ دیسک، توسعه داده شده است (شکل ۱۷).

جدول ۴- حالات مختلف سطح تماس دیسک برشی با سطح سنگ

حالات مختلف سطح تماس دیسک برشی	
	
۱	۶
۴۰۴	۱۱۰۰/۷
مقطع عرضی تماس	
نفوذ (mm)	
سطح تماس (mm ²)	
	
۲	۸
۵۹۲/۹	۱۳۰۵/۲
مقطع عرضی تماس	
نفوذ (mm)	
سطح تماس (mm ²)	
	
۳	۱۰
۷۴۲/۵	۱۴۹۴
مقطع عرضی تماس	
نفوذ (mm)	
سطح تماس (mm ²)	
	
۴	۱۲
۸۷۳/۳	۱۶۷۵/۴
مقطع عرضی تماس	
نفوذ (mm)	
سطح تماس (mm ²)	
	
۵	۱۵
۹۸۳/۶	۱۹۳۵/۷
مقطع عرضی تماس	
نفوذ (mm)	
سطح تماس (mm ²)	

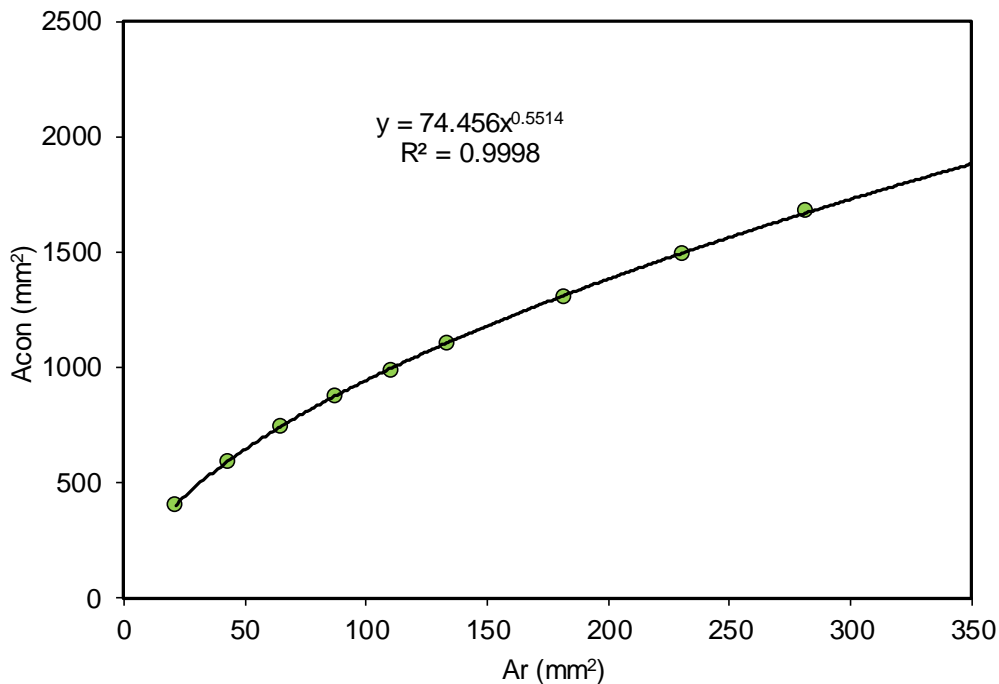
مرحله ۳: زاویه انحراف تقریبی دیسک ناحیه محیطی بر اساس رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود. در این رابطه \vec{i} بیان‌گر شماره دیسک ناحیه محیطی است، به‌گونه‌ای که شماره ۱ مربوط به اولین دیسک ناحیه محیطی در مجاورت ناحیه میانی است و آخرین شماره مربوط به آخرین دیسک در ناحیه محیطی کله‌حفار است. $\sum_1^i \gamma_j$ نیز مجموع زوایای بین دیسک‌های متوالی ناحیه محیطی از آخرین دیسک ناحیه میانی تا دیسک شماره \vec{i} ناحیه محیطی است.

$$\theta_i = 90 - \sum_1^i \gamma_j \quad (18)$$

۴-۵- روش محاسبه فاصله‌داری بهینه در ناحیه محیطی کله‌حفار

در این قسمت، خلاصه روش محاسبه فاصله‌داری بهینه در ناحیه محیطی کله‌حفار، به‌صورت مرحله به مرحله توضیح داده می‌شود.

مرحله ۱: تعیین پارامترهای نرخ نفوذ، نسبت بهینه S/p و فاصله‌داری دیسک‌های ناحیه میانی (S) بر اساس تجربیات پروژه‌های مختلف در شرایط زمین‌شناسی مشابه
مرحله ۲: پارامترهای کلی ناحیه قوس‌دار شامل γ_1 ، θ_g ، R_g بر اساس نمودارهای شکل ۶ و روابط ۱ تا ۳ محاسبه می‌شود.



شکل ۱۷- رابطه بین سطح مقطع واقعی نفوذ (A_r) و سطح تماس (A_{con})

می‌شود تا شرط $S_i \leq S_o$ برقرار شود. اگر $S_i \ll S_o$ ، زاویه بین دو دیسک (γ_i) به اندازه ۰/۵ درجه اضافه می‌شود و مراحل ۴ تا ۱۱ آنقدر تکرار می‌شود تا مقدار S_i نزدیک به مقدار S_o شود و در عین حال شرط $S_i \leq S_o$ نیز برقرار باشد.

مرحله ۱۳: برای سایر دیسک‌های قوس‌دار، با در نظر گرفتن $\gamma_{i+1} = \gamma_i$ ، مراحل ۴ تا ۱۲ تکرار می‌شود.

مرحله ۱۴: فاصله محوری و شعاعی دیسک‌های ناحیه قوس‌دار بر اساس زوایای نهایی شده γ_i و θ_i محاسبه می‌شوند (روابط ۶ و ۷).

مرحله ۱۵: بر اساس مقادیر نهایی به‌دست آمده برای سطح تماس دیسک (مرحله ۹) و با استفاده از فرمول ۱۶، نیروی عمودی دیسک‌ها محاسبه می‌شوند.

مرحله ۱۶: نیمرخ زوایای قرارگیری دیسک‌ها به همراه بردارهای نیروی عمودی دیسک‌ها برای کله‌حفار ترسیم می‌شود.

۵- مثال

در این قسمت یک مثال طراحی واقعی از یک کله‌حفار با

مرحله ۴: فاصله‌داری بر اساس رابطه ۴ محاسبه می‌شود (S_i).

مرحله ۵: با توجه به نرخ نفوذ انتخاب شده، سطح مقطع تئوری نفوذ دیسک بر اساس رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

مرحله ۶: سطح مقطع واقعی نفوذ دیسک برشی بر اساس رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

مرحله ۷: نسبت سطح مقطع نفوذ از رابطه ۱۲ و بر اساس نرخ نفوذ و زاویه انحراف، محاسبه می‌شود.

مرحله ۸: سطح مقطع واقعی نفوذ دیسک‌های ناحیه قوس‌دار بر اساس نسبت سطح مقطع نفوذ (مرحله ۷) و سطح مقطع واقعی نفوذ (مرحله ۶)، محاسبه می‌شود.

مرحله ۹: سطح تماس دیسک بر اساس مقدار به‌دست آمده از مرحله ۸ و رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود.

مرحله ۱۰: نرخ نفوذ تصویر شده در جهت محور دیسک برشی بر اساس رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

مرحله ۱۱: بر اساس مقادیر مراحل ۱ و ۱۰، فاصله‌داری بهینه بین دیسک‌ها محاسبه می‌شود (S_o).

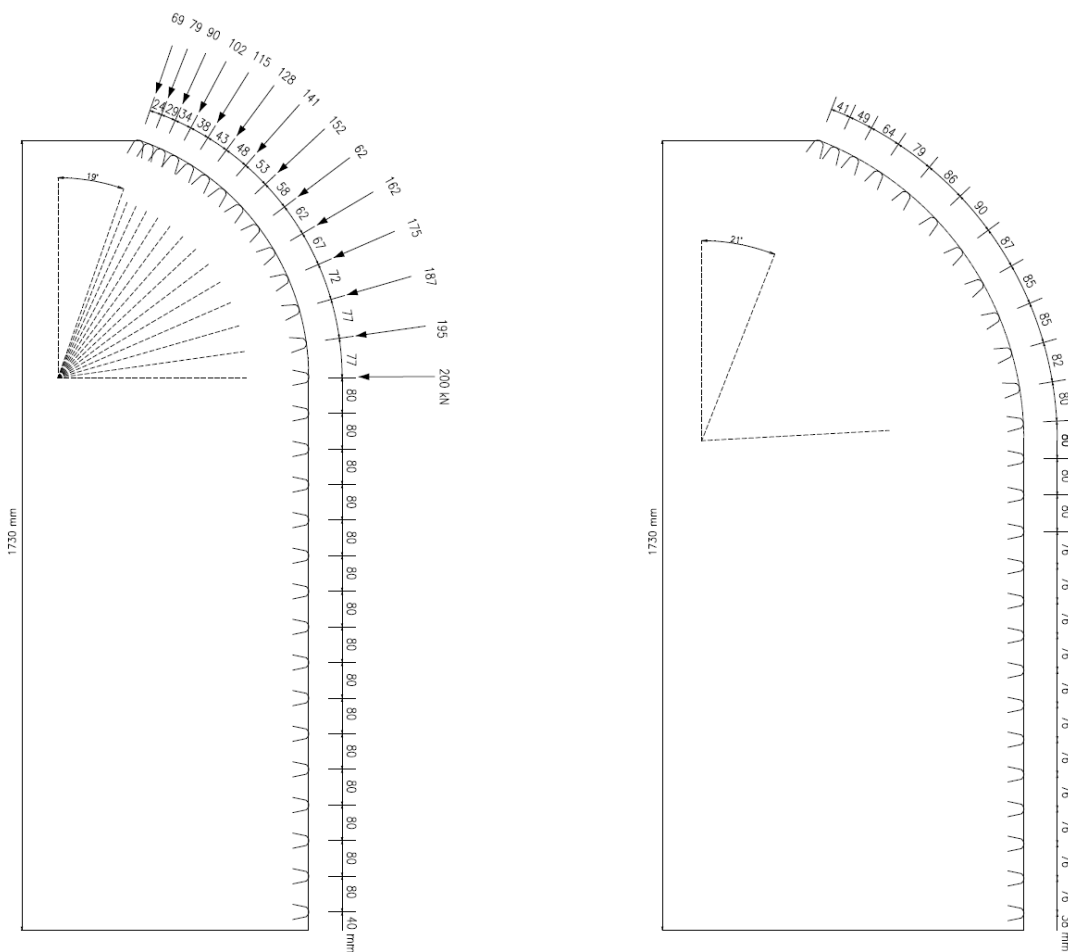
مرحله ۱۲، اگر $S_i > S_o$ ، زاویه بین دو دیسک (γ_i) به اندازه ۰/۵ درجه کم می‌شود و مراحل ۴ تا ۱۳ آنقدر تکرار

در این شکل قسمت پایین نیمرخ مربوط به مرکز کله‌حفار و قسمت بالایی مربوط به محیط پیرامونی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مشکل طرح اصلی، وجود فاصله‌داری زیاد و نامنظم در ناحیه قوس‌دار است که این موضوع بر اساس اصول بهینه‌سازی تشریح شده در قسمت‌های قبل در طرح اصلاح شده کاهش پیدا کرده است. نکته قابل ذکر این است که به کارگیری طرح اصلی یادشده در یک پروژه تونل زیردریایی، باعث ایجاد آسیب به ناحیه قوس‌دار کله‌حفار شده است که خود بیانگر نیاز اساسی به اصلاح طرح نیمرخ عرضی فواصل دیسک‌ها است.

قطر ۳/۵ متر ارائه می‌شود. دیسک‌های مورد استفاده دارای قطر ۴۳۲ میلی‌متر، عرض لبه ۲۱ میلی‌متر و حداکثر ظرفیت نیروی عمودی حدود ۲۰۰ کیلو نیوتن هستند. سنگ حفاری شده از نوع سنگ گرانودیوریتی با مقاومت تک محوری حدود ۱۰۰ مگاپاسکال است. حداکثر نرخ نفوذ، حدود ۵ میلی‌متر در دور کله‌حفار در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۵، مراحل بهینه‌سازی فاصله‌داری دیسک‌های ناحیه محیطی برای این مثال، تشریح شده است. شکل ۱۸، مقایسه‌ای را بین نیمرخ طراحی اصلی این مثال و طرح اصلاح شده آن (بر اساس روابط ارائه شده در این مقاله)، نشان می‌دهد.

جدول ۵- مراحل بهینه‌سازی فاصله‌داری دیسک‌های ناحیه محیطی برای یک کله‌حفار با قطر ۳/۵ متر

مرحله	توضیح
۱	$p = 5 \text{ mm}$ $\frac{S}{p} = 16$ $S = 80 \text{ mm}$
۲	بر اساس $D=3.5 \text{ m}$ ، $R_g = 550 \text{ mm}$ و $\theta_g = 20^\circ$ و $\gamma_1 = 9^\circ$
۳	$\theta_1 = 81^\circ$
۴	$S_1 = 86 \text{ mm}$
۵	$A_t = 105 \text{ mm}^2$
۶	$A_r = 112 \text{ mm}^2$
۷	$R_1 = 0.96$
۸	$A_r = 107 \text{ mm}^2$
۹	$A_{con} = 979 \text{ mm}^2$
۱۱	$p_1 = 4.94 \text{ mm}$
۱۲	$S_o = 79 \text{ mm}$
۱۲	$S_i > S_o$ ، از این رو $\gamma_1 = 8.5^\circ$ و مراحل قبلی تکرار می‌شود. مقدار قابل قبول در نهایت $\gamma_1 = 8^\circ$ است.
۱۳	برای سایر دیسک‌های قوس‌دار، مراحل ۴ تا ۱۲ تکرار می‌شود.
۱۴	فاصله محوری و شعاعی دیسک‌های ناحیه قوس‌دار محاسبه می‌شوند.
۱۵	نیروی عمودی دیسک‌ها محاسبه می‌شوند.
۱۶	نیمرخ زوایای قرارگیری دیسک‌ها به همراه بردارهای نیروی عمودی برای کله‌حفار ترسیم می‌شود (شکل ۱۸).



شکل ۱۸- نیم‌رخ زوایای قرارگیری و فاصله‌داری دیسک‌ها در طرح اصلی و طرح اصلاح شده برای مثال تشریح شده

و سطح تماس واقعی با روش ترسیمی محاسبه شده است و نسبت مقادیر واقعی به تئوری به‌دست آورده شده است. مقادیر سطح نفوذ دیسک‌های ناحیه محیطی نیز با روش ترسیمی محاسبه شده است و با به کارگیری روش تحلیل آماری، نسبت سطح مقطع نفوذ برای این دیسک‌ها با روش رگرسیون چند جمله‌ای محاسبه شده است. در انتها، اصول روش برآورد فاصله‌داری و نیروهای عمودی در ناحیه محیطی به‌صورت مرحله به مرحله و با به کارگیری یک مثال تشریح شده است. با توجه به فقدان وجود روش معینی برای طراحی جانمایی دیسک‌های محیطی، روش ارائه شده می‌تواند راهگشای بسیار مفیدی برای بهینه‌سازی طراحی ماشین‌های زمین‌های سخت باشد.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله به تشریح اصول طراحی جانمایی دیسک‌های محیطی روی کله‌حفار *TBM* های زمین‌های سخت پرداخته شده است. در این زمینه، ابتدا با به کارگیری اطلاعات طراحی تعدادی از ماشین‌های حفاری زمین‌های سخت، پارامترهای شعاع انحنا ناحیه محیطی و زاویه بین آخرین دیسک ناحیه میانی و اولین دیسک ناحیه محیطی به‌صورت تجربی برآورد شده است. در ادامه با استفاده از اصول طراحی بهینه فاصله‌داری برای دیسک‌های برشی و بر اساس نسبت بهینه فاصله‌داری به نرخ نفوذ، فاصله‌داری و نیروهای عمودی در ناحیه محیطی برآورد شده است. مقادیر سطح مقطع نفوذ

۷- مراجع

- Abu Bakar, M. (2012). *Saturation effects on mechanical excavatability of sandrock under selected rock cutting tools*. Ph.D. Thesis, Missouri University of Science and Technology, USA.
- Bruland, A. (1998). *Hard rock tunnel boring*. Ph.D. Thesis, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Eskikaya, S., Bilgin, N., Balci, C., & Tuncdemir, H. (2005). *From research to practice: Development of Rapid Excavation Technologies*. Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future – Erdem & Solak (eds), Taylor & Francis Group, London, 435-441.
- Farrokh, E. (2013). *Study of utilization factor and advance rate of hard-rock TBMs*. PhD Dissertation, The Pennsylvania State University, USA.
- Farrokh, E., & Kim, D.Y. (2018). A discussion on hard rock TBM cutter wear and cutterhead intervention interval length evaluation. *Tunn Undergr Space Technol*, 81, 336-357.
- Farrokh, E., Kim, D.Y., & Kyung, S.B. (2015). Rotary cutting test for hard rock TBM Performance Evaluation. *World tunneling conference*, Dubrovnik, Croatia.
- Farrokh, E., Rostami, J. & Laughton, C. (2012). Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 30, 110-123.
- Geng, Q., Wei, Z.Y., Meng, H. (2016). An experimental research on the rock cutting process of the gage cutters for rock tunnel boring machine (TBM). *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 52, 182–191.
- Geng, Q., Wei, Z.Y., Ren, J.H. (2017). New rock material definition strategy for FEM simulation of the rock cutting process by TBM disc cutters. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 65, 179–186
- Gertsch, R., Gertsch L., & Rostami, J. (2007). Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 44(2), 238-246.
- Lislerud, A. (1997). *Principles of mechanical excavation*. Tamrock Corp, POSIVA 97-12.
- Ozdemir, L., Miller, R., & Wang, F.D. (1978). *Mechanical tunnel boring prediction and machine design*. NSF APR73- 07776-A03. Colorado School of Mines. Golden.
- Rostami, J. (1993). *Design optimization, performance prediction and economic analysis of tunnel boring machine for the construction of the proposed Yucca Mountain nuclear waste repository*. Ms. Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.
- Rostami, J. (1997). *Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure*. Dissertation, Colorado School of Mines.

- Rostami, J., & Chang, S.H. (2017). A Closer Look at the Design of Cutterheads for Hard-rock Tunnel-Boring Machines, *Engineering*.
- Roxborough, FF., & Phillips, H.R. (1975). Rock excavation by disc cutter. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 12(12), 361-366.
- Tuncdemir, H., Bilgin, N., Copur, H., Balci, C. (2008). Control of rock cutting efficiency by muck size. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 45 (2), 278-288.
- Zhang, Z., Zhang, K., Dong, W., Zhang, B. (2020). Study of rock - cutting process by disc cutters in mixed ground based on three- dimensional particle flow model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.

Positioning the Peripheral Cutters in Hard Rock TBMs

E. Farrokh*

1- Assistant Professor; Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, e.farrokh@aut.ac.ir

Received: 29 Mar 2020; Accepted: 19 Dec 2020
DOI: 10.22044/tuse.2020.9509.1392

Keywords

TBM
Cutterhead
Lace design
Gage cutter

Extended Abstract

Summary

One of the most important goals in the design process of the TBMs is to determine the proper positions of the peripheral cutters. Since the actual penetration of the peripheral cutters in the tunnel face is lower, the normal force applied by them to the tunnel face is also lower. To avoid ridge

formation between these cutters and to avoid asymmetric forces applied to the flanks of the cutters, it is necessary to gradually reduce the cutter spacing in the peripheral area of the cutterhead. The design of the peripheral cutters' parameters (spacing and tilt angle) is usually performed experimentally, and there is no theoretical background for this subject in the literature. In this paper, an empirical model is introduced to determine the optimum configuration of the peripheral cutters on the cutterhead profile. This model is developed based on the principles of the optimal excavation using the optimal ratio of spacing to penetration rate as well as the information of design details of a number of hard rock TBMs from around the world. The results of this model provide the optimum spacing of disc cutters and their corresponding tilt angles and normal forces for the peripheral cutters.

Introduction

With the increasing development of the use of tunneling machines in the construction of various tunnels around the world, the optimization of their design features has become very important. Among these, one of the most important parameters of design and optimization of tunneling machines in hard rocks is the location of cutting tools in the peripheral area of the cutterhead. This optimization can show its effect on the parameters such as machine performance (advance rate) and prevent possible damage to the head structure or cutting tools. The principles of TBM design are usually taken from the experiences of similar projects. In this regard, there are many unknowns that are not clearly explained. In this paper, based on the use of the contact area and the indentation area of a cutter. and also, the optimal ratio of spacing to the penetration rate, a new method is presented to optimize the location of the peripheral cutters. This method is based on a trial and error process, so a set of primary numbers is needed to start the optimization process. These numbers are obtained based on the experimental relationships obtained from the analysis of head design parameters of a number of hard rock TBMs.

Methodology and Approaches

A database of indentation area and indentation area ratio when the influential parameters are varied is set up for a 17-inch cutter. This database includes the parameters of tilt angle, penetration rate, indentation area, indentation area ratio, and cutterhead curvature radius. The major methodologies used in this paper include simple and multiple regression analysis using Minitab software.

Results and Conclusions

In this paper, the principles of peripheral cutters' layout design for hard rock TBMs are described. In this regard, first, using the design information of a number of hard rock TBMs, the parameters of the radius of curvature of the peripheral area, and the angle between the last cutter of the face area and the first cutter of the peripheral area have been experimentally estimated. Then, using the principles of optimal distance design for disc cutters and based on the

optimal ratio of spacing to penetration rate, spacing, and normal forces in the peripheral area are estimated. The values of the cutter indentation area and the actual contact area are calculated using graphical methods, and then, the ratio of the indentation area is obtained. The values of the indentation area of the peripheral cutters have been calculated using graphical methods and using statistical analysis. Finally, using an example, the principles of spacing, and normal force estimation in the peripheral area are described in step by step manner. Due to the lack of a specific method for designing the layout of the peripheral cutters, the proposed method can be a very useful way to optimize the design of hard rock TBM.
