



بهینه‌سازی طرح جانمایی ابزار حفاری در کاترهای ماشین‌های تونل‌زنی زمین‌های سخت

ابراهیم فرخ*

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک)، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۰۳
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹

کلمات کلیدی:

ماشین تونل‌زنی در سنگ،
کاترهد
طرح جانمایی
دیسک کاتر
بهینه‌سازی

خلاصه: یکی از اهداف مهم در فرایند طراحی کاترهد، افزایش کارکرد ماشین حفاری و کاهش نیروها و گشتاورهای نامتقارن اعمال شده به آن است. از مهم‌ترین اقدامات لازم در این فرایند، بهینه‌سازی طرح جانمایی موقعیت‌های ابزار حفاری، موقعیت‌های تخلیه مصالح حفاری (باکت‌ها)، و موقعیت‌های دسترسی به سینه کار است. این نیروها و گشتاورهای نامتقارن، باعث ایجاد چرخش یا انحراف ناخواسته در حین عملیات راهبری ماشین حفاری می‌شود. برای کاترهای ماشین‌های تونل‌زنی زمین‌های سخت، عموماً دو طرح جانمایی ابزار حفاری به کار گرفته می‌شود که شامل طرح شعاعی و مارپیچ است. هر کدام از این روش‌ها دارای معایبی هستند که طراحی جانمایی را با مشکل مواجه می‌کند. در این مقاله برای استفاده حداکثری از مزایای هر دو روش و رفع معایب آن‌ها، یک طرح ترکیبی شعاعی-مارپیچ با عنوان "طرح توزیع یکنواخت" ارائه شده است. در این طرح، هم شرایط مرزی مرتبط با متعادل کردن نیروها و گشتاورها و هم فضای کافی برای جانمایی باکت‌ها و دریچه‌های دسترسی در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور، اصول طراحی جانمایی، مراحل دستیابی به یک طرح بهینه توزیع یکنواخت، و پارامترهای مورد نیاز برای طرح جانمایی (بر اساس مطالعات آماری وسیع بر روی خصوصیات طراحی کاترهای زمین‌های سخت) ارائه شده است. در انتها، با به کارگیری یک مثال، نتایج حاصله از طرح توزیع یکنواخت با نتایج طرح‌های شعاعی و مارپیچ مقایسه شده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که به کارگیری روش جدید ارائه شده می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی طرح جانمایی ابزار حفاری بسیار مؤثر باشد.

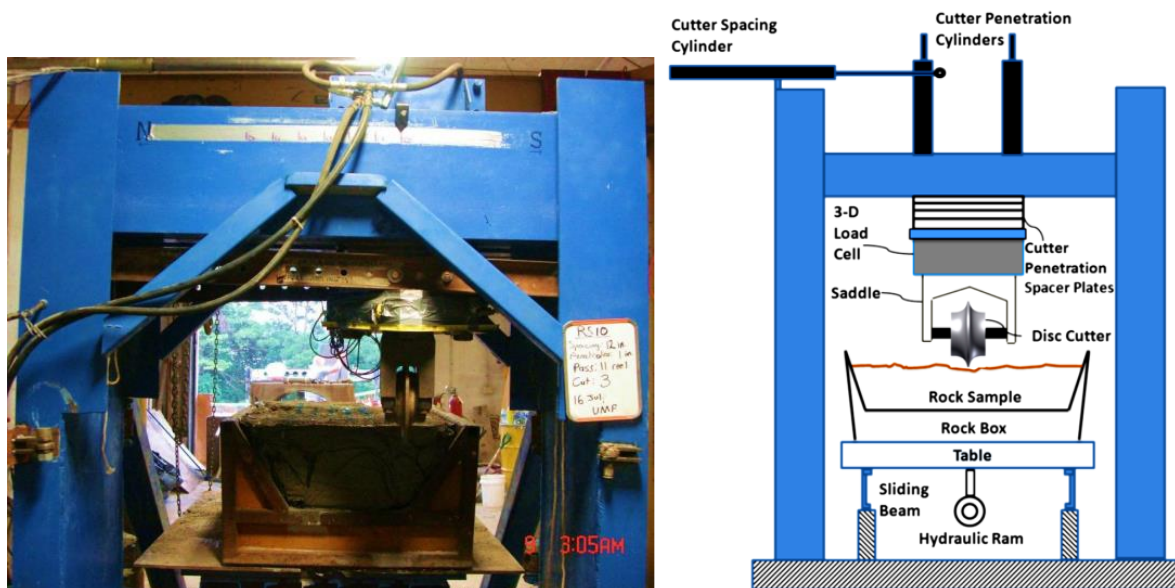
۱- مقدمه

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 در ماشین‌های تونل‌زنی در زمین‌های سخت، طرح جانمایی ابزار حفاری، موقعیت‌های تخلیه مصالح حفاری (باکت‌ها)، و دریچه‌های دسترسی به سینه کار است. این بهینه‌سازی می‌تواند اثر خود را بر روی پارامترهایی همچون عملکرد ماشین حفاری (نرخ پیشروی)، عمر کاری یا تاقان اصلی، و لرزش و انحراف کاترهد بگذارد. اولین قدم در طراحی نحوه جانمایی ابزار حفاری بر روی سطح کاترهد، تعیین پارامترهای هندسه برش (فاصله داری و نرخ نفوذ) ابزار حفاری است. در این زمینه، هدف اصلی، ایجاد تراشه‌های سنگی با حداقل انرژی ویژه حفاری است. پارامترهای هندسه برش عموماً بر اساس نتایج آزمایش‌های بزرگ مقیاس دیسک کاتر (که از این به بعد با

نام دیسک یاد می‌شود) با استفاده از ماشین‌های برش خطی [۱۲-۱] (شکل ۱) یا دورانی [۱۳-۱۵] (شکل ۲) به دست می‌آید. در ادامه، پروفیل عرضی کاترهد با جانمایی دیسک‌های ناحیه مرکزی، ناحیه میانی، و ناحیه پیرامونی، تعیین می‌شود. در انتها، با در نظر گرفتن فاصله داری تعیین شده برای زوج دیسک‌های متوالی، موقعیت آن‌ها بر روی سطح کاترهد با تعیین فاصله زاویه‌ای، مشخص می‌شود. در ارتباط با طراحی جانمایی ابزار حفاری، تعداد کارهای تحقیقاتی انجام شده بسیار اندک است. از جمله دلایلی که رستمی و چنگ [۱۶] برای این موضوع بیان کرده‌اند این است که طراحی کله حفار عموماً توسط سازنده‌های ماشین‌های حفاری انجام می‌شود و محیط‌های آکادمیک معمولاً در این زمینه امکان انجام کارهای تحقیقاتی را کمتر دارند. شاید یکی از دلایل این موضوع عدم امکان مقایسه ماشین‌های حفاری مختلف در شرایط زمین شناسی کاملاً مشابه باشد. لیزرود [۵] و رستمی و چنگ [۱۶] در کارهای تحقیقاتی خود، روش‌های مختلف جانمایی ابزار

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: e.farrokh@aut.ac.ir





شکل ۱. آزمایش بزرگ مقیاس برش خطی برای تعیین پارامترهای بهینه هندسه برش [۱]

Fig. 1. Large-scale linear cutting test to determine the optimal cut geometry parameters



شکل ۲. آزمایش بزرگ مقیاس برش دورانی برای تعیین پارامترهای بهینه هندسه برش [۱۳]

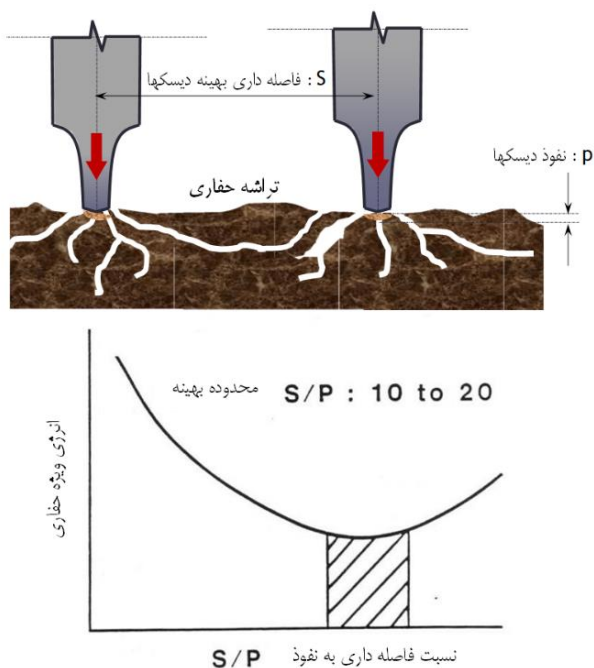
Fig. 2. Large-scale rotary cutting test to determine the optimal cut geometry parameters

نتایج تحقیقات پیشین انجام شده برای طراحی جانمائی ابزارهای حفاری به دست آمده است، عمدتاً شامل توضیح مراحل به کارگیری دو طرح شعاعی و ماریچج است. این طرح‌ها هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند و در برخی شرایط لازم است از یک طرح ترکیبی که شامل حداقل معایب دو روش و حداکثر مزایای این روش‌ها است استفاده نمود. تاکنون روش معینی برای به کارگیری چنین روش ترکیبی‌ای ارائه نشده است.

حفاری و فاکتورهای موثر بر تعادل نیروها و گشتاورها را توضیح داده‌اند. در تعدادی از تحقیقات انجام شده در سالیان اخیر [۱۷ و ۱۸]، کارکرد بعضی از سیستم‌های مکانیکی و هیدرولیکی TBM مورد بررسی قرار گرفته است. سایر تحقیقات انجام شده در زمینه TBM های زمین‌های سخت عمدتاً مرتبط با بهینه‌سازی پارامترهای عملکرد (همانند نرخ نفوذ، نرخ پیشروی، و نیروهای اعمال شده به دیسک‌های برشی) بوده است [۱۹-۲۳]. آنچه که از

[۲۴-۲۶]، 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 فاصله داری به نرخ نفوذ، مقدار فاصله داری بهینه تعیین می‌شود. فاصله داری بهینه، فاصله‌ای است که در آن ترک‌های توسعه یافته در زیر لبه دیسک‌ها، به یکدیگر متصل شوند 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 کاهش می‌یابد و به طبع آن، انرژی ویژه حفاری کم می‌شود. نسبت بهینه فاصله داری به نرخ نفوذ، عموماً برای سنگ‌های مختلف بین ۱۰ تا ۲۰ تغییر می‌کند [۱۱-۴] (شکل ۳).

در سنگ‌های نرم با رفتار شکست ترد، این نسبت به عدد ۱۰ نزدیک‌تر است، در حالی که برای سنگ‌های سخت با رفتار ترد، این نسبت نزدیک به عدد ۲۰ است. هر چه رفتار سنگ از رفتار ترد به رفتار تغییر شکل‌پذیر، متمایل‌تر می‌شود، ایجاد تراشه در فاصله داری‌های بیشتر، دچار مشکل می‌شود. از این رو، نسبت‌های کمتر برای سنگ‌های تغییر شکل‌پذیر، مناسب‌تر است. پس از تعیین پارامترهای هندسه برش و هندسه دیسک، طرح جانمایی دیسک‌ها در مقطع عرضی کاترهد می‌بایست تهیه شود (شکل ۴).



شکل ۳. پارامترهای هندسه برش و هندسه کاتر و نسبت بهینه فاصله داری به نرخ نفوذ [۶]

Fig. 3. Cutting geometry and cutter geometry parameters and the optimal spacing-to-penetration ratio

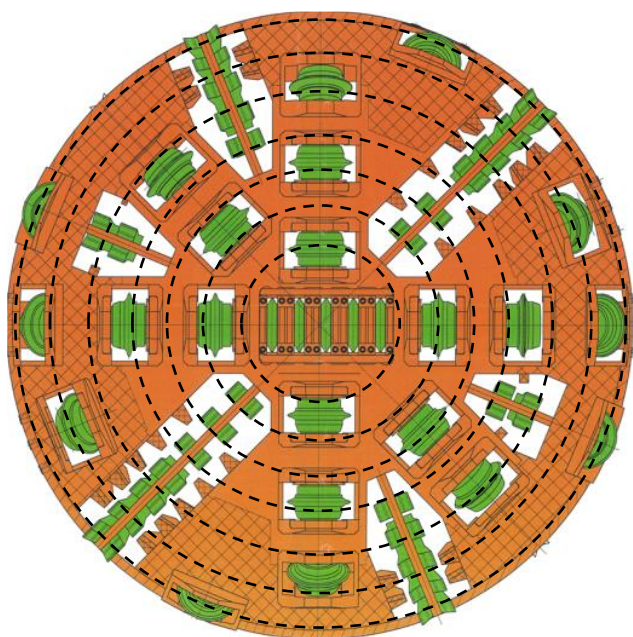
در این مقاله بر اساس تجربیات نویسنده، اصول جانمایی ابزار حفاری تشریح شده است و یک مدل استاتیکی جدید برای محاسبه نیروها و گشتاورها ارائه شده است. در ادامه به تفصیل، یک طرح جدید جانمایی با عنوان طرح توزیع یکنواخت برای به کارگیری مزایای دو طرح شعاعی و ماریپج ارائه شده است. در این روش، موقعیت زاویه‌ای ابزار برشی بر پایه یک فرایند سعی و خطا که در آن هدف اصلی کمینه کردن نیروها و گشتاورهای خارج از محور است، تعیین می‌شود. طبیعی است که تعیین تمامی پارامترهای طراحی در محدوده یک کار تحقیقاتی امکان‌پذیر نیست، از این رو برخی پارامترهای پایه طراحی بر اساس یک سری روابط تجربی توسعه یافته از تحلیل پارامترهای کله حفاری تعدادی از ماشین‌های تونل‌زنی زمین‌های سخت به دست آورده شده است. در انتها، مراحل بهینه‌سازی طرح جانمایی توزیع یکنواخت به همراه یک مثال تشریح شده است و نتایج آن با دو طرح شعاعی و ماریپج مقایسه شده است.

۲- اصول طراحی کاترهد

در فرایند طراحی کاترهد، اولین مرحله، شناسایی پارامترهای زمین شناسی تأثیرگذار بر انتخاب نوع ابزار برشی و عملکرد نفوذ آن‌ها است. با توجه به گستره وسیع کاربرد ابزار دیسک کاتر در سنگ‌های با مقاومت بیشتر از ۱۰-۲۰ مگاپاسکال، در بیشتر پروژه‌های تونل‌زنی با TBM‌های زمین‌های سخت از این نوع ابزار استفاده می‌شود. در این مطالعه نیز، فقط بر روی کاربرد این نوع ابزار تکیه خواهد شد. طبیعی است که پس از انتخاب نوع ابزار برشی، می‌بایست پارامترهای طراحی آن نیز تعیین شود که شامل قطر دیسک و عرض لبه آن است. قطر دیسک بر اساس قطر کاترهد و امکان به کارگیری بزرگ‌ترین دیسک ممکن بر روی کاترهد تعیین می‌شود. عرض لبه، عموماً بر اساس میزان ساینده‌گی سنگ تعیین می‌شود. هر چه سنگ ساینده‌تر باشد، عرض لبه دیسک کاتر بیشتر است. پس از تعیین این دو پارامتر، پارامترهای بهینه هندسه برش شامل نرخ نفوذ و فاصله داری دیسک‌ها تعیین می‌شود. این پارامترها وابسته به خصوصیات مقاومتی سنگ و پارامترهای هندسی کاترهد (عرض لبه و قطر دیسک) است. بر اساس نتایج مطالعات گسترده انجام شده توسط محققین مختلف دنیا و نتایج آزمایش‌های بزرگ مقیاس انجام شده بر روی ماده سنگ، مهم‌ترین خصوصیات مقاومتی سنگ شامل مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، و شاخص سرشار (CAI) است [۱۳ و ۱۱-۴ و ۱]. البته، پارامترهای مقاومتی و درزه داری توده سنگ نیز اثر قابل توجهی بر روی میزان نفوذ دیسک‌ها دارند

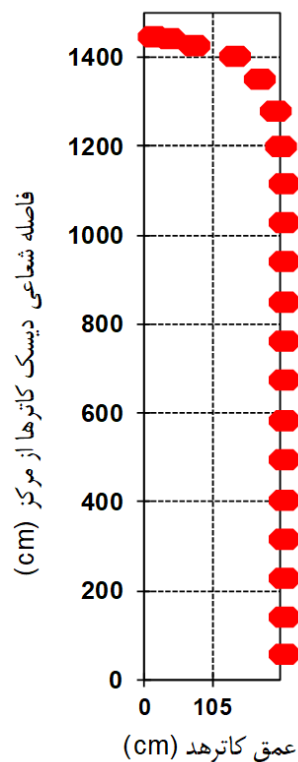
می‌گیرد. هدف ایده‌آل، داشتن یک طرح با نیروها و گشتاورهای خارج از محور نزدیک به صفر است. طبیعی است که با این طرح اولیه، ممکن است مقادیر این نیروها و گشتاورها در حد مورد انتظار نباشد. در این صورت، نیاز است که موقعیت دیسک‌ها بر روی مسیر دایره‌ای تعیین شده برای آن جابجا شود تا زمانی که شروط مورد انتظار برای نیروها و گشتاورها، برآورده شود. در حین انجام این تغییرات، لازم است که محدودیت‌های هندسی طرح کاترهد نیز در نظر گرفته شود. این محدودیت‌ها شامل عدم تداخل جعبه دیسک‌ها با هم یا با دریچه‌های دسترسی به سینه کار یا باکت‌های جمع‌آوری مصالح است. پس از رسیدن به یک طرح بهینه جانمائی، لازم است با در نظر گرفتن پارامترهای مقاومتی سازه کاترهد، امکان‌پذیری اجرای طرح مورد نظر مورد بررسی قرار گیرد. فلوچارت شکل ۶، مراحل توضیح داده شده در بالا را به صورت خلاصه نشان می‌دهد. هدف این مقاله بررسی تمام جزئیات مراحل ذکر شده نمی‌باشد و فقط به بررسی و بهینه‌سازی طرح جانمائی دیسک‌ها بر روی صفحه کاترهد پرداخته می‌شود.

فاصله داری دیسک‌های مرکزی و دیسک‌های ناحیه میانی کاترهد (قسمت صاف کاترهد)، برابر با فاصله داری بهینه در نظر گرفته می‌شود. در قسمت منحنی کاترهد که دیسک‌های محیطی قرار دارند، فاصله داری به تدریج کاهش می‌یابد. این به دلیل تصویر شدن نیروهای افقی اعمال شده به این دیسک‌ها و کاهش عملکرد آن‌ها است. اعمال نیروهای جانبی و ضربات دینامیکی به این دیسک‌ها هم باعث می‌شود که فاصله داری دیسک‌های محیطی کمتر انتخاب شود. پس از تعیین طرح جانمائی مقطع عرضی، می‌بایست طرح جانمائی دیسک‌ها بر روی سطح کاترهد، تعیین شود. شکل ۵ نمونه‌ای از طرح جانمائی دیسک‌ها را بر روی سطح یک کاترهد با قطر ۳/۵ متر نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، دیسک‌ها هر کدام بر روی یک مسیر دایره‌ای حرکت می‌کنند و بر اثر اندرکنش ترک‌های ایجاد شده در زیر لبه دیسک‌های مجاور هم، تراشه‌های حفاری ایجاد می‌شود. این طرح عموماً بر اساس طرح‌های متقارن شعاعی یا ماریچج، به صورت اولیه تعیین می‌شود. پس از تعیین طرح اولیه جانمائی دیسک‌ها، تعادل کاترهد در برابر نیروها و گشتاورهای خارج از محور مورد بررسی قرار



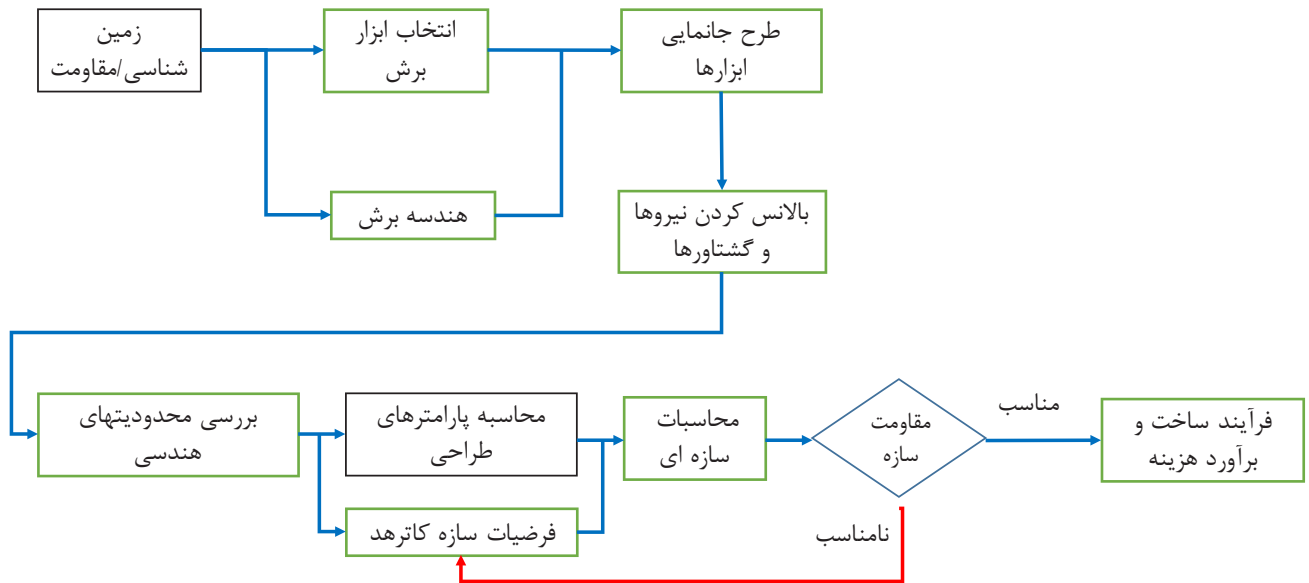
شکل ۵. طرح جانمائی دیسک‌ها بر روی صفحه کاترهد [۲۷]

Fig. 5. Layout of discs on the head surface



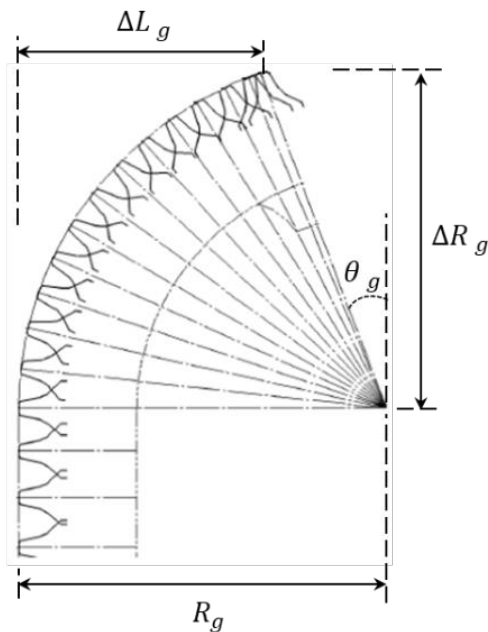
شکل ۴. طرح جانمائی دیسک‌ها در مقطع عرضی

Fig. 4. Layout of discs on the head profile



شکل ۶.فلوچارت طراحی کاترهد

Fig. 6. Cutterhead design flowchart



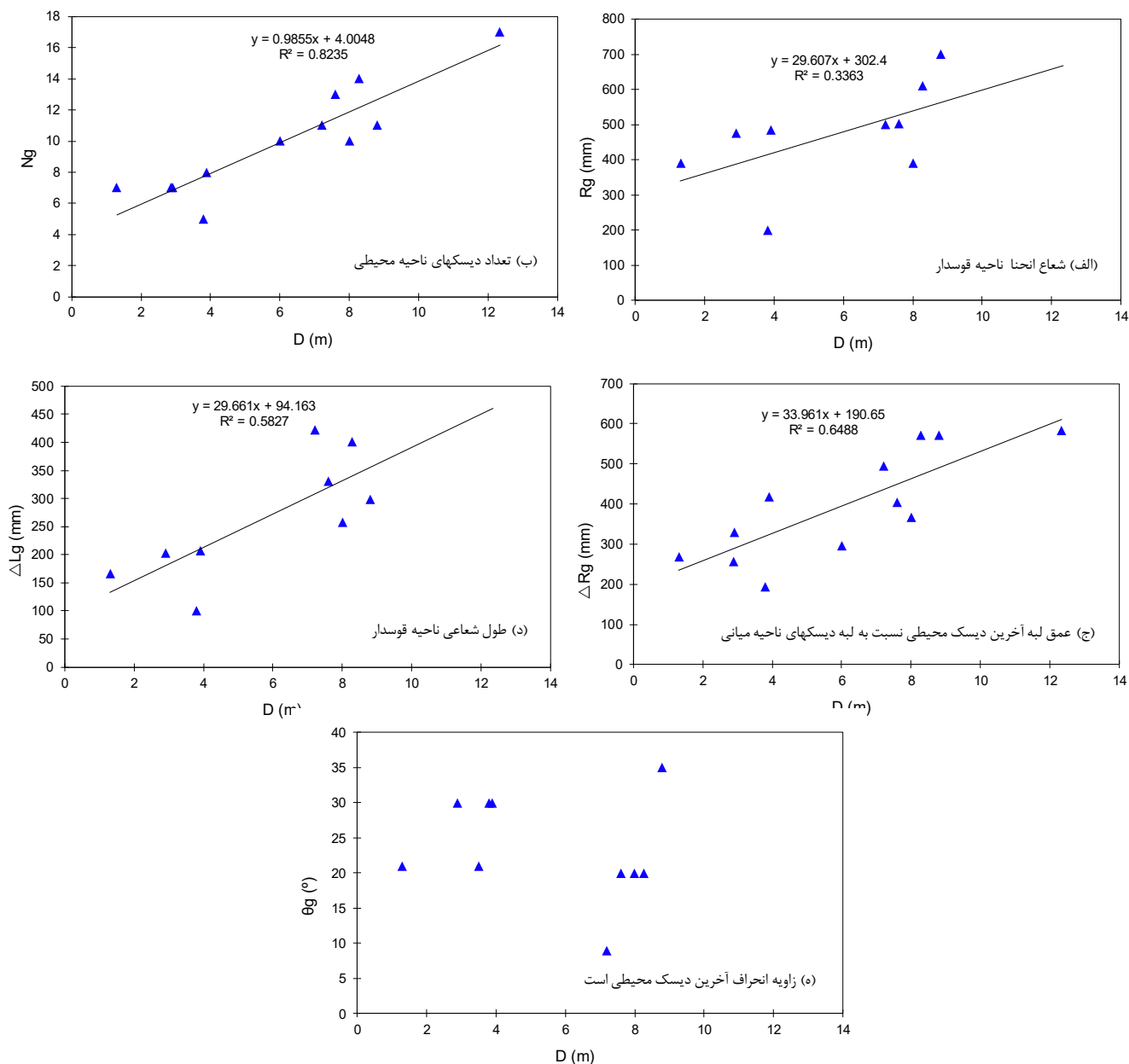
شکل ۷. مشخصات محدوده دیسکهای محیطی

Fig. 7. Peripheral cutters' specifications

۳- طرح جانمایی دیسکها

شکل کاترهد TBM به دو دسته گنبدی و تخت تقسیم بندی می شود. در شکل گنبدی که عموماً در طرحهای قدیمی تر ماشینهای حفار استفاده می شود، کل مقطع کاترهد دارای انحنا است. این در حالی است که در شکل تخت، عمده مقطع کاترهد تخت یا صاف است و تنها قسمت‌های پیرامونی

آن دارای انحنا است. مهم‌ترین مشخصات محدوده دیسکهای محیطی شامل شعاع انحنا (R_g)، عمق لبه آخرین دیسک محیطی نسبت به لبه دیسکهای میانی (ΔL_g)، و (ΔR_g) طول شعاعی آن است (شکل ۷). گرافهای شکل ۸، روابط بین مهم‌ترین مشخصات محدوده دیسکهای محیطی و قطر تونل (D) را نشان می‌دهد.



شکل ۸. پارامترهای محدوده دیسکهای محیطی بر اساس تحلیل‌های آماری اطلاعات طراحی کاترهدهای زمین‌های سخت

Fig. 8. Peripheral cutters' parameters based on statistical analysis

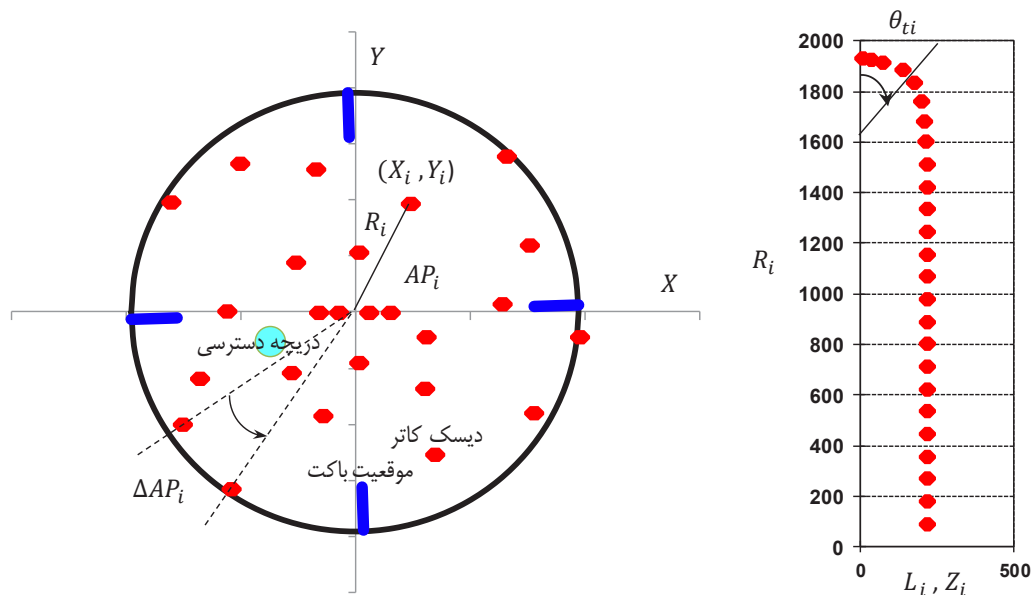
استفاده نمود. لازم به ذکر است که جزئیات مربوط به فاصله داری دیسک‌های محیطی نیاز به بررسی دقیق دارد که در این مقاله به آن پرداخته نمی‌شود. پس از تعیین پارامترهای نیم رخ عرضی کاترهد، می‌بایست پارامترهای طرح جانمایی دیسک‌ها بر روی سطح کاترهد مشخص شود. این پارامترها به شرح زیر هستند (شکل ۹):

این روابط بر اساس تحلیل آماری اطلاعات طراحی کاترهد ۱۲ TBM استخراج شده است (جدول ۱). در این گراف‌ها N_g تعداد دیسک‌های ناحیه محیطی و θ_g زاویه انحراف آخرین دیسک محیطی است. همان گونه 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

جدول ۱. اطلاعات طراحی کله حفار ۱۲ ماشین تونل‌زنی در زمین سخت

Table 1. Design information of 12 hard rock cutterheads

θ_g	Ng	ΔR_g	ΔL_g	R_g	قطر کله حفار
(°)		(mm)	(mm)	(mm)	(m)
۳۵	۱۱	۵۷۳	۲۹۸	۷۰۰	۸/۸
۳۰	۵	۱۹۵	۱۰۰	۲۰۰	۳/۸
۲۰	۱۰	۳۶۸	۲۵۷	۳۹۱	۸
۲۰	۱۳	۴۰۶	۳۳۰	۵۰۲	۷/۶
۲۰	۱۴	۵۷۲	۴۰۱	۶۱۰	۸/۲۸
۹	۱۱	۴۹۵	۴۲۲	۵۰۱	۷/۲۱
-	۷	۲۵۸	-	-	۲/۸۷
-	۱۰	۲۹۷	-	-	۶
-	۱۷	۵۸۵	-	-	۱۲/۳۴
۳۰	۷	۳۳۰	۲۰۳	۴۷۶	۲/۹
۲۱	۷	۲۶۹	۱۶۶	۳۹۰	۱/۳
۲۱	۸	-	-	۷۰۶	۳/۵



شکل ۹. پارامترهای طرح جانمایی دیسک‌ها بر روی سطح کاترهد

Fig. 9. Disc layout parameters on the cutterhead surface

ΔR_i : فاصله داری شعاعی دو دیسک متوالی،

L_i : عمق لبه دیسک‌ها از سطح صاف کاترهد،

ΔL_i : فاصله داری محوری (فاصله بین دو لبه دیسک‌های متوالی در

جهت محور کاترهد)،

X_i, Y_i, Z_i : مختصات موقعیت لبه دیسک‌ها،

θ_{ti} : زاویه نحراف دیسک‌ها نسبت سطح کاترهد،

R_i : موقعیت شعاعی لبه دیسک‌ها،

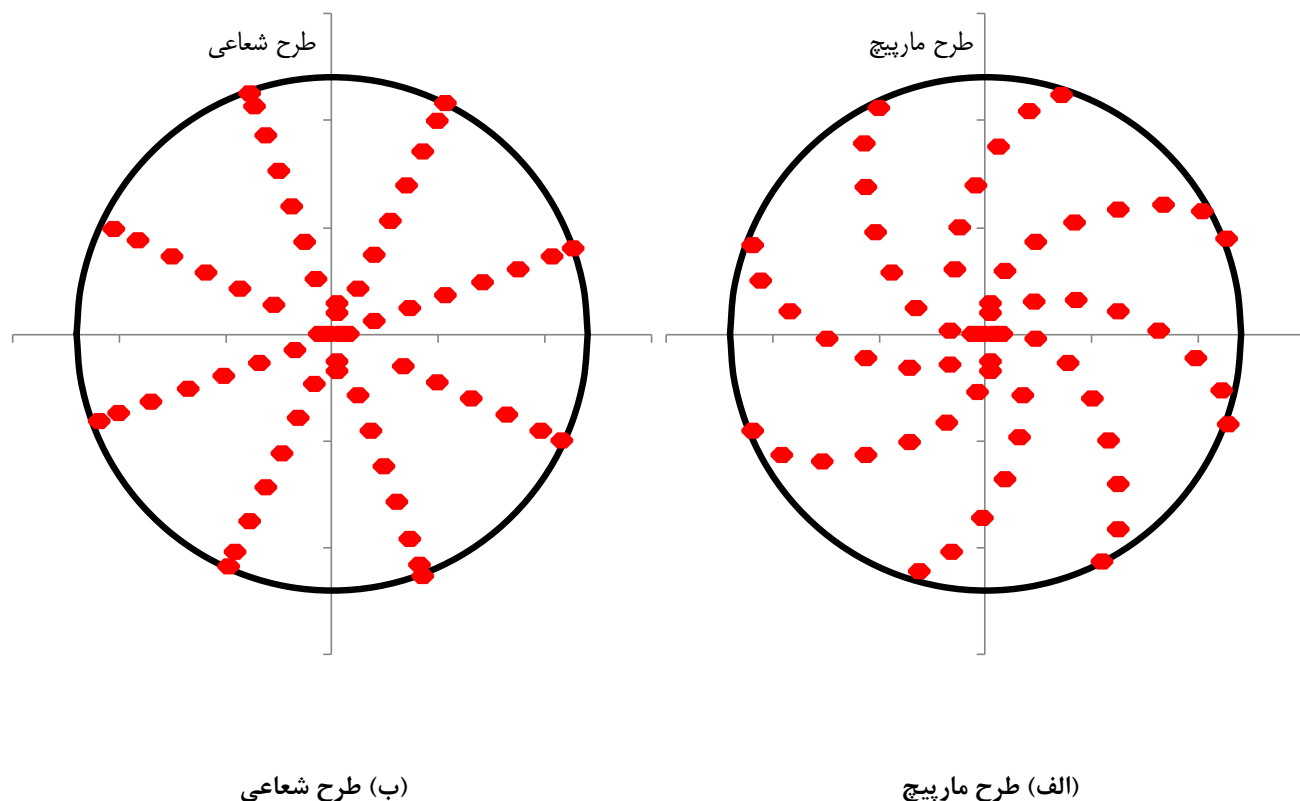
AP_i : زاویه موقعیت لبه دیسک‌ها،

ΔAP_i : فاصله داری زاویه‌ای دو دیسک متوالی،

از مزایای مهم هر دو طرح یاد شده، عدم وجود گشتاورهای خارج از محور، به دلیل رعایت اصل تقارن است. در این طرح‌ها، همچنین نقطه مرکز جرم مجموعه دیسک‌ها نیز به مرکز کاترهد بسیار نزدیک است. از معایب طرح شعاعی، اعمال نیروهای برشی دیسک‌ها (نیروهای عمودی و غلتشی) به صورت متمرکز بر روی خطوط معین شعاعی بر سازه کاترهد است. این امر می‌تواند منجر به تمرکز تنش شود. در طرح مارپیچ، این عیب با چرخش زاویه‌ای تدریجی دیسک‌های مجاور، بر طرف شده است. یکی دیگر از معایب مهم طرح شعاعی، ایجاد فضاهای خالی بزرگ بین خطوط شعاعی است که زمینه ورود بلوک‌های سنگی آزاد را فراهم می‌کند. این بلوک‌های سنگی در تماس مستقیم با سطح کاترهد قرار می‌گیرند و در طی فرایند چرخش کاترهد، باعث ایجاد سایبش زیاد و افزایش گشتاورهای محوری و خارج از محور می‌شوند. این مشکل به صورت اساسی در پروژه Halandsas اتفاق افتاد [۲۸]. سازنده TBM برای رفع این عیب، طرح جانمایی کاترهد را به یک طرح جانمایی با توزیع غیرشعاعی تغییر داد (شکل ۱۱).

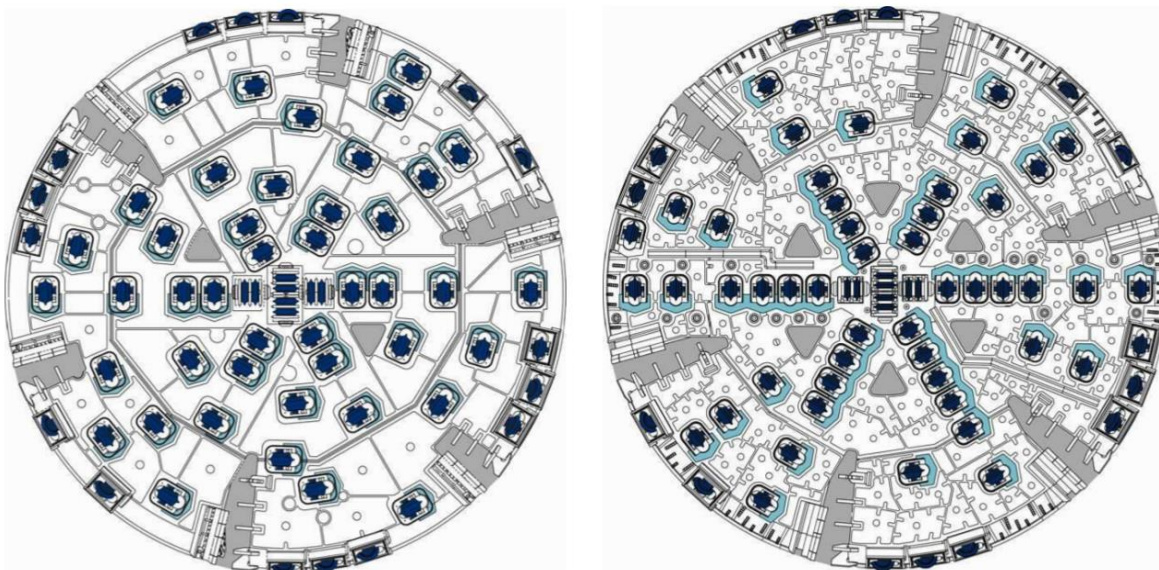
برای جانمایی دیسک‌ها بر روی کاترهد، می‌توان از دو طرح شعاعی و مارپیچ استفاده کرد. در طرح شعاعی، ابزار حفاری بر روی تعدادی خطوط شعاعی با فاصله زاویه‌ای یکسان توزیع می‌شوند. در طرح مارپیچ فاصله زاویه‌ای دیسک‌های متوالی یکسان نیست. از این رو دیسک‌ها بر روی خطوط شعاعی توزیع نمی‌شوند و توزیع آن‌ها بر روی سطح کاترهد یکنواخت‌تر است (شکل ۱۰).

در هر دو طرح شعاعی و مارپیچ، برای رعایت تقارن کاترهد، هر دیسک می‌بایست یک دیسک متناظر با فاصله داری زاویه‌ای ۱۸۰ درجه داشته باشد. به عنوان مثال، اگر دیسک شماره ۱ در زاویه صفر درجه قرار گیرد، دیسک شماره ۲ حتماً باید در زاویه ۱۸۰ درجه قرار بگیرد. فاصله داری زاویه‌ای دیسک شماره ۲ با ۳، بر اساس فاصله داری زاویه‌ای در نظر گرفته شده برای طرح جانمایی، اعمال می‌شود. در طرح شعاعی، این فاصله داری زاویه‌ای برابر است با حاصل تقسیم ۳۶۰ درجه به تعداد قطاع‌های در نظر گرفته شده (مثلاً ۴۵ درجه برای طرح شعاعی شکل ۱۰) است.



شکل ۱۰. طرح‌های معمول به کار گرفته شده برای جانمایی دیسک‌ها

Fig. 10.



طرح اصلاح شده کاترهد
طرح جانمایی با توزیع یکنواخت

طرح اولیه کاترهد
طرح جانمایی شعاعی

شکل ۱۱. طرح‌های جانمایی ابزار برشی در کاترهد پروژه Hallandsas [۲۸]

Fig. 11. Layout designs used in Hallandsas projects

هوشمند انجام داد [۲۹]. شکل ۱۲، روند کلی بررسی تعادل استاتیکی طرح جانمایی کاترهد را نشان می‌دهد.



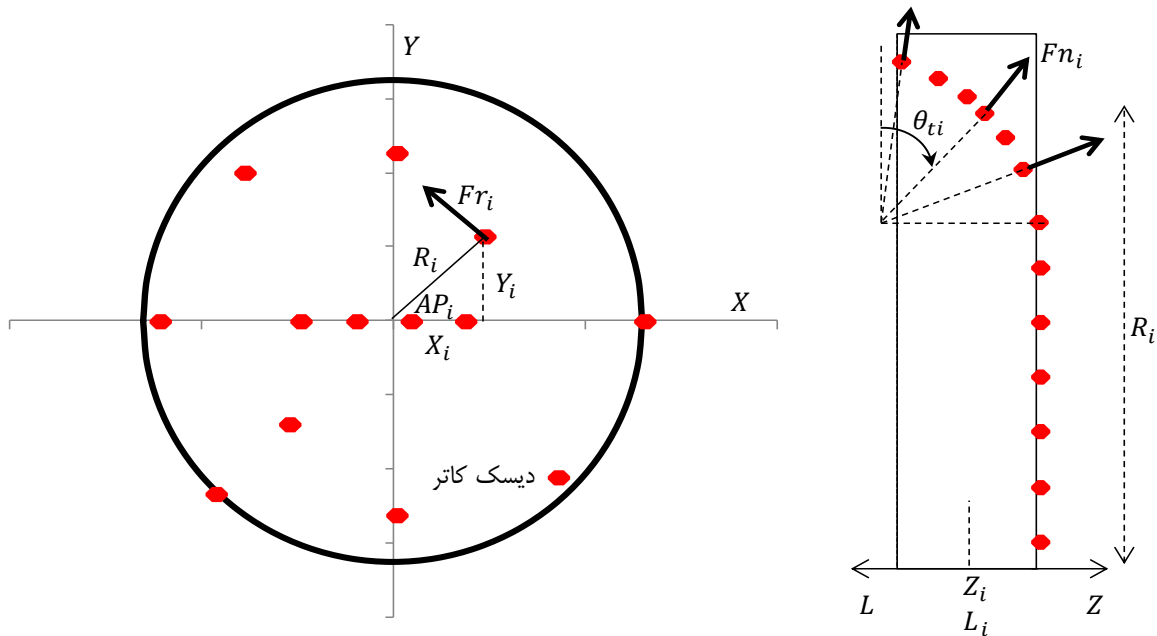
شکل ۱۲. مراحل کلی بررسی تعادل استاتیکی کاترهد

Fig. 12. Cutterhead static balance steps

از مهم‌ترین مزایای طرح شعاعی، وجود فضای کافی برای تعبیه باکت‌ها و دریچه‌های دسترسی به سینه کار است. جانمایی باکت‌ها و دریچه‌های دسترسی به سینه کار در طرح مارپیچ به سهولت انجام نمی‌شود و ممکن است در برخی مواقع، طراح مجبور به تغییر موقعیت دیسک‌ها، بدون در نظر گرفتن تقارن آن‌ها شود. برای استفاده حداکثری از مزایای هر دو طرح، می‌توان از طرح ترکیبی جانمایی (ترکیبی از طرح شعاعی و طرح مارپیچ) استفاده نمود. جزئیات این طرح در قسمت‌های بعدی به عنوان یک طرح جدید ارائه می‌شود.

۴- اصول بررسی تعادل استاتیکی

پس از انتخاب طرح جانمایی اولیه، نیروها و گشتاورهای خارج از محور، محاسبه می‌شوند و در عین حال، تداخل جعبه دیسک‌ها با باکت‌ها و دریچه‌ها، مورد بررسی قرار می‌گیرد و در صورت وجود تداخل یا وجود نیروها و گشتاورهای خارج از محور زیاد، نیاز به توزیع مجدد موقعیت‌های دیسک‌ها و محاسبه مجدد این نیروها و گشتاورها است. این فرایند تا رسیدن به یک راه حل بهینه، تکرار می‌شود. این کار را می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های



شکل ۱۳. پارامترهای مورد نیاز برای بررسی تعادل استاتیکی
Fig. 13. . Cutterhead static balance parameters

هدف از بررسی تعادل استاتیکی، رسیدن به شروط $M_y \approx M_x \approx 0$ و $F_s \approx 0$ است.

شکل ۱۴، دو طرح شعاعی و ماریپیج را برای فاصله زاویه‌ای ۳۰ درجه برای یک کاترهد با قطر ۹/۶ متر و ۶۲ دیسک نشان می‌دهد. بر اساس تجربیات موجود برای این قطر از کاترهد، به ۱۲ باکت و ۲ درجه دسترسی نیاز است که در طرح‌های نشان داده شده، جانمایی شده است. جدول ۲، نتایج حاصل از بررسی نیروها و گشتاورها را برای این دو طرح نشان می‌دهد. همان گونه که مورد انتظار هم بود، نیروهای خارج از محور (F_x, F_y, F_s) و گشتاورهای خارج از محور (M_x, M_y)، مقادیر بسیار کمی دارند که حاکی از تعادل استاتیکی کاترهد است. همچنین مختصات نقطه مرکز سطح موقعیت دیسک‌ها (X_c, Y_c)، نیز مقادیری نزدیک به صفر دارند. نکته قابل توجه در مقایسه این دو طرح، این است که جانمایی باکت‌ها و درجه‌ها در طرح شعاعی به مراتب ساده‌تر است و تلاقی‌ای بین باکت‌ها و دیسک‌ها وجود ندارد. این در حالی است که برای طرح ماریپیج در نظر گرفته شده، در بهترین وضعیت، ۵ باکت با موقعیت دیسک‌ها تلاقی دارند. در قسمت بعد، با تکیه بر مثال یاد شده، مراحل به کارگیری یک طرح جانمایی ترکیبی ارائه می‌شود.

شکل ۱۳ و روابط (۱۰-۱)، پارامترها به کار گرفته شده در بررسی تعادل استاتیکی را نشان می‌دهد. نیروهای برشی Fr_i, Fn_i اساس مدل CSM (مدل تجربی مدرسه معدن کلرادو آمریکا برای برآورد نیروهای اعمال شده به دیسک‌های برشی) به دست می‌آید [۹-۶].

$$X_i = R_i \cos(AP_i) \quad (1)$$

$$Y_i = R_i \sin(AP_i) \quad (2)$$

$$Z_i = -L_i \quad (3)$$

$$F_x = \sum (Fn_i \cos(\theta_{ti}) \cos(AP_i) - Fr_i \sin(AP_i)) \quad (4)$$

$$F_y = \sum (Fn_i \cos(\theta_{ti}) \sin(AP_i) + Fr_i \cos(AP_i)) \quad (5)$$

$$F_z = \sum (Fn_i \sin(\theta_{ti})) \quad (6)$$

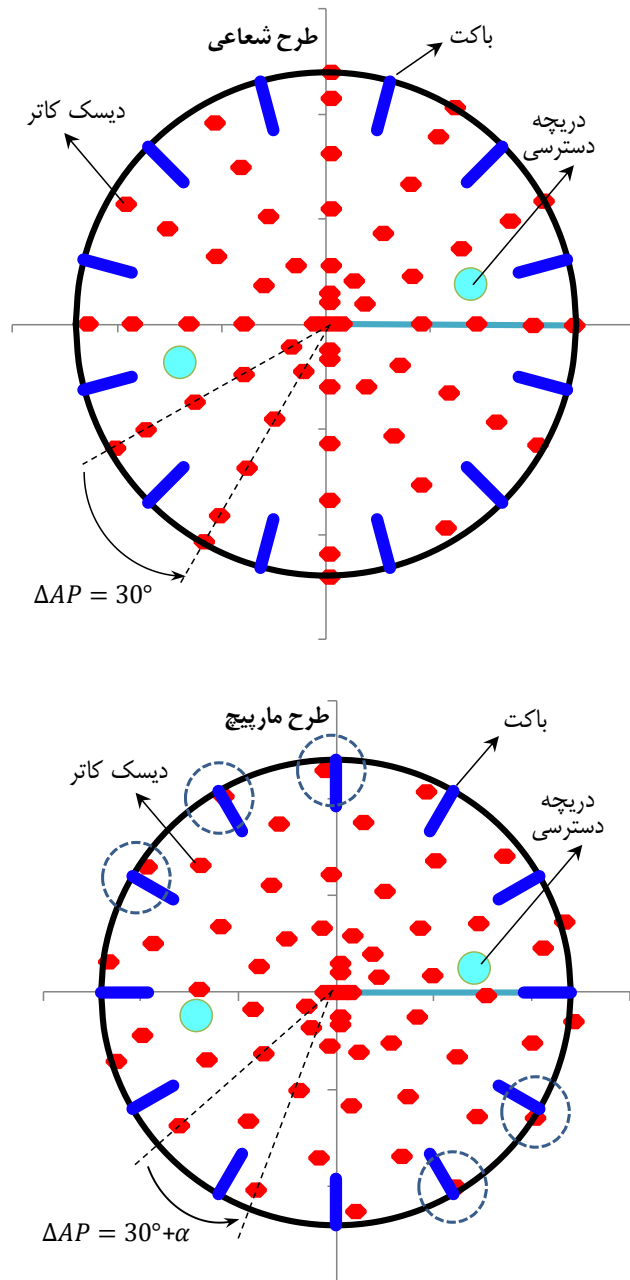
$$F_s = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (7)$$

$$M_x = \sum (Fy_i Z_i - Fz_i Y_i) \quad (8)$$

$$M_y = \sum (Fx_i Z_i - Fz_i X_i) \quad (9)$$

$$M_z = \sum (Fx_i Y_i - Fy_i X_i) \quad (10)$$

F_z, F_y, F_x : نیروهای کل در جهت محورهای مختصات M_y, M_x ،
 M_z : گشتاورهای کل حول محورهای مختصات.



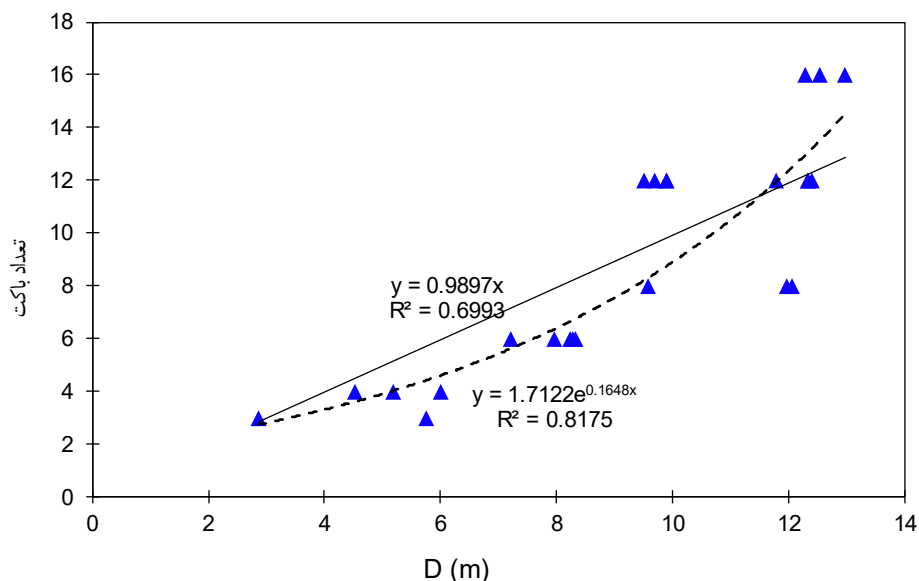
شکل ۱۴. مقایسه دو طرح شعاعی و مارپیچ با فاصله زاویه‌ای 30° درجه در یک کاترهد با قطر $9/6$ متر با 62 دیسک

Fig. 14. Comparison of radial and spiral designs with an angular spacing of 30 degrees for a 9.6 m cutterhead

جدول ۲. نتایج محاسبات تعدل استاتیکی دو طرح شعاعی و مارپیچ نشان داده شده در شکل ۱۴

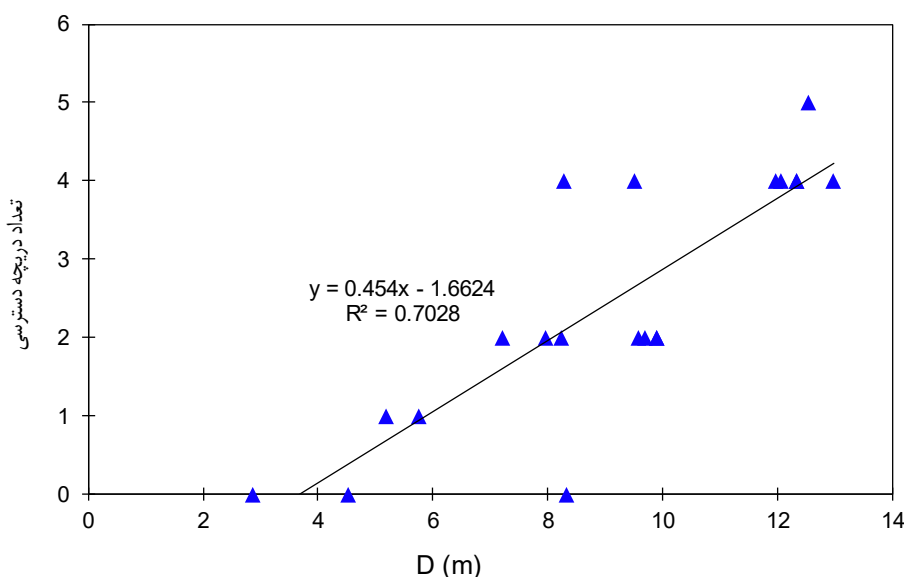
Table 2. Results of static balance calculations for radial and spiral designs shown in Figure 14

Y_c	X_c	M_z	M_y	M_x	F_s	F_z	F_y	F_x	طرح
mm	mm	kN-m	kN-m	kN-m	kN	kN	kN	kN	شعاعی
۲۴	۰/۸	۱۶۴۷	۲۰	۲۶	۲۱	۶۷۶۰	۱۵	۱۵	شعاعی
۱۷	۴/۴	۱۶۴۷	۹۱	۵۱	۳۱	۶۷۶۰	۱۲	۲۹	مارپیچ



شکل ۱۵. تعداد باکت‌ها به عنوان تابعی از قطر کاترهد

Fig. 15. Number of buckets as a function of cutterhead diameter



شکل ۱۶. تعداد دریچه‌های دسترسی به عنوان تابعی از قطر کاترهد

Fig. 16. Number of manholes as a function of cutterhead diameter

۵- طرح جانمایی توزیع یکنواخت

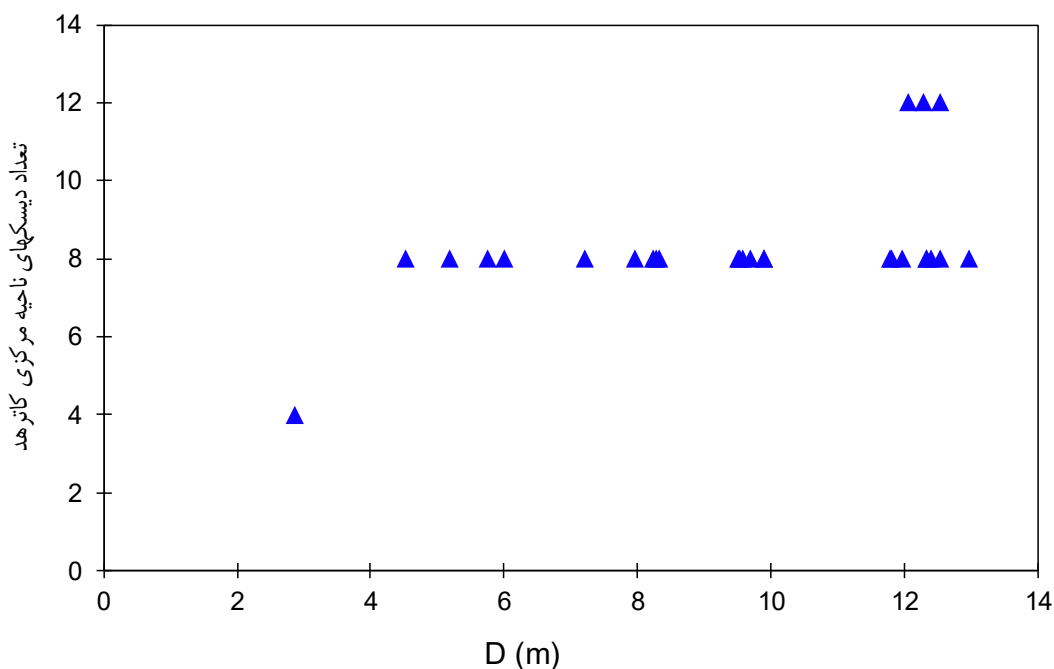
در این قسمت به معرفی یک طرح جدید جانمایی دیسک‌ها با عنوان طرح جانمایی توزیع یکنواخت پرداخته می‌شود. مراحل انجام طراحی جانمایی در این روش به صورت زیر است:

مرحله ۱: تعیین تعداد باکت‌ها و تعداد دریچه‌های دسترسی مورد نیاز.

برای این منظور می‌توان از نتایج مطالعات تجربی استفاده کرد. شکل ۱۵ نتایج یک مطالعه آماری انجام شده بر روی اطلاعات طراحی ۲۴ کاترهد در

زمین‌های سخت را برای تعیین تعداد باکت، نشان می‌دهد.

بر اساس نمودار خطی نشان داده شده در این شکل، به ازای هر متر قطر کاترهد، به طور متوسط، یک باکت نیاز است. در مورد قطرهای بزرگ کاترهد (بالای ۱۰ متر)، در شرایط زمین شناسی سنگ‌های نرم مثل مارن، به دلیل حجم بالای ورودی سنگ حفاری شده، تعداد باکت‌ها ممکن است تا ۱۶ عدد افزایش یابد. شکل ۱۶ نیز تعداد دریچه‌های دسترسی به سینه کار را در برابر قطر کاترهد نشان می‌دهد.



شکل ۱۷. تعداد دیسکهای ناحیه مرکزی کاترهد به عنوان تابعی از قطر کاترهد

Fig. 17. Number of center cutters as a function of cutterhead diameter

فاصله ۴۰ تا ۵۰ سانتی‌متر بین دیسک‌های مجاور، حداکثر فاصله زاویه‌ای بین دو دیسک متوالی می‌بایست ۴۵ تا ۶۰ درجه باشد. این فاصله زاویه‌ای باید با تعداد باکت‌ها نیز متناسب باشد.

مرحله ۶: جانمایی دیسک‌های میانی و پیرامونی سطح کاترهد با در نظر گرفتن فاصله زاویه‌ای و موقعیت‌های باکت‌ها و دریچه‌های دسترسی.

برای توزیع دیسک‌ها با تعداد یکسان بر روی هر چهار ربع سطح کاترهد، دیسک‌های میانی و پیرامونی به دسته‌های ۴ تایی تقسیم می‌شود و دیسک‌های هر دسته با مراحل زیر جانمایی می‌شود (شکل ۱۸).

–جانمایی اولین دیسک ناحیه میانی با زاویه $\alpha + (n-1)\Delta AP$ ،

–جانمایی دیسک دوم با زاویه $\alpha + \pi + (n-1)\Delta AP$ برای رعایت اصل تقارن،

–جانمایی دیسک سوم با زاویه $\alpha \pm \pi/2 + (n-1)\Delta AP$ برای

رعایت اصل توزیع یکنواخت دیسک‌ها در هر چهار ربع سطح کاترهد،

–جانمایی دیسک چهارم با زاویه $\alpha \pm \pi/2 + \pi + (n-1)\Delta AP$

برای رعایت اصل تقارن،

در فرمول‌های یاد شده، α زاویه ماریج و n شماره دسته‌های ۴ تایی

دیسک‌ها است.

نکته مهم در مورد تعداد دریچه‌های دسترسی این است که معمولاً در قطرهای بیشتر از ۶ متر، تعداد دریچه‌ها برای رعایت اصل تقارن طرح جانمایی، برابر با یک عدد زوج در نظر گرفته می‌شود (۲ یا ۴).

مرحله ۲: فاصله مجاز بین جعبه‌های دیسک‌های مجاور یا جعبه دیسک با باکت یا دریچه دسترسی، تعیین می‌شود.

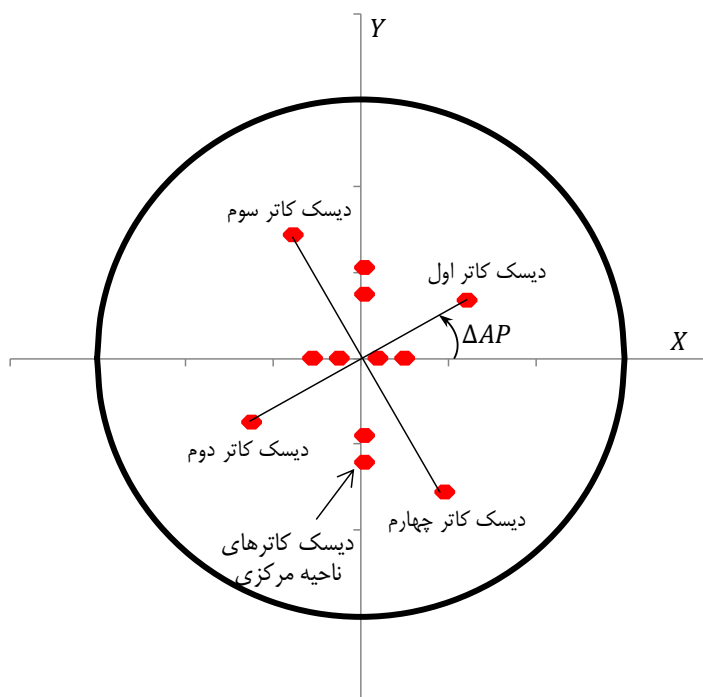
عرض جعبه دیسک (برای دیسک‌های ۱۷ اینچی در حدود ۴۰ تا ۵۰ سانتی‌متر است. بنابراین فاصله حداقل دو دیسک مجاور می‌تواند ۴۰ الی ۵۰ سانتی‌متر باشد. عرض حداقل باکت‌ها نیز حدود ۵۰ سانتی‌متر است.

مرحله ۳: در نظر گرفتن طرح دیسک‌های ناحیه مرکزی کاترهد. با توجه به محدودیت فضای نصب در قسمت مرکز کاترهد، دیسک‌های این ناحیه به صورت دو قلو یا ۴ قلو یا ترکیبی از این دو استفاده می‌شوند.

شکل ۱۷، تعداد دیسک‌های ناحیه مرکزی کاترهد که به صورت دو قلو یا چهار قلو نصب می‌شوند را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، تعداد این دیسک‌ها عموماً ۸ در نظر گرفته می‌شود.

مرحله ۴: بر اساس تعداد دریچه‌های انتخاب شده و تعداد باکت‌ها، طرح اولیه جانمایی آن‌ها با در نظر گرفتن اصل تقارن، ترسیم می‌شود.

مرحله ۵: فاصله زاویه‌ای بین دیسک‌های متوالی بر اساس تعداد باکت‌ها و فاصله مجاز بین دو دیسک مجاور هم تعیین می‌شود. برای رعایت حداقل



شکل ۱۸. نحوه جانمایی چهار دیسک اول ناحیه میانی کاترهد

Fig. 18. Positioning the first four discs in the face area of the cutterhead

مرحله ۷: بهینه‌سازی نهایی طرح جانمایی.

در انتها، با توجه به اینکه اصول تقارن و توزیع یکنواخت در ربع‌های مختلف سطح کاترهد، رعایت شده است، کاترهد به لحاظ استاتیکی تا حد زیادی متعادل است. اقدام بیشتر برای کاهش حداکثری نیروها و گشتاورهای خارج از محور را می‌توان با استفاده از روش کمینه‌سازی این نیروها از طریق تکنیک‌های عددی که در آن‌ها روش سعی و خطا به کار گرفته می‌شود، انجام داد. به عنوان مثال، می‌توان با هدف کمینه کردن سه پارامتر M_x و M_y و F_s ، زوایای قرارگیری دیسک‌ها را بهینه‌سازی نمود. البته برای دستیابی به یک طرح، بدون عدم تداخل دیسک‌ها با باکت‌ها و دریچه‌های دسترسی، زوایای دیسک‌های مجاور این نواحی (نواحی باکت‌ها و دریچه‌ها)، بدون تغییر باقی می‌مانند. تغییر زوایای قرارگیری سایر دیسک‌ها هم در حد حداکثر چند درجه محدود می‌شود تا تغییرات اساسی در طرح جانمایی ایجاد نشود. در این زمینه می‌توان از ابزار Solver نرم افزار Excel استفاده نمود. بر اساس تجربه نویسنده، مقادیر نهایی پارامترهای M_x و M_y می‌بایست کمتر از ۵ درصد مقدار M_z باشد. علاوه بر این، مقدار نهایی پارامتر F_s نیز باید کمتر از ۵ درصد مقدار نیروی تراست (F_z) باشد.

۶- مثال

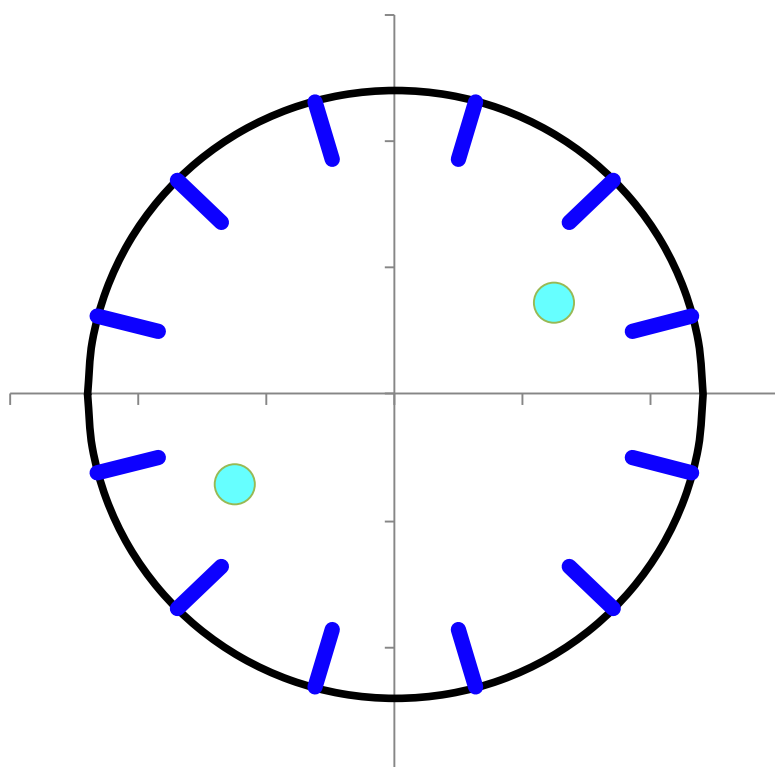
در این مثال، مراحل طرح جانمایی توزیع یکنواخت دیسک‌ها بر روی سطح یک کاترهد با قطر ۹/۶ متر با ۶۲ دیسک، توضیح داده می‌شود. جدول ۳، مراحل انجام طرح جانمایی و پارامترهای طراحی مورد نیاز را نشان می‌دهد.

همان گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، نتایج حاکی از تعادل نسبتاً خوب طرح جانمایی (حتی بدون انجام عملیات بهینه‌سازی بیشتر یاد شده در مرحله ۷ است). در مقایسه طرح جانمایی با توزیع یکنواخت و طرح‌های شعاعی و ماریپیچ (شکل ۱۴ و جدول ۲)، طرح جانمایی با توزیع یکنواخت مزایای طرح شعاعی برای ایجاد فضای مناسب برای نصب باکت‌ها و دریچه‌های دسترسی را دارد. در عین حال، به دلیل توزیع یکنواخت‌تر موقعیت دیسک‌ها بر روی سطح کاترهد، از تمرکز تنش خطی بر روی سازه کاترهد جلوگیری می‌شود. همچنین به دلایلی توزیع غیرخطی دیسک‌ها بر روی کاترهد، از ایجاد فضای خالی نسبتاً بزرگ در قسمت میانی کاترهد که می‌تواند فضای مناسب برای ورود بلوک‌های آزاد را فراهم کند، جلوگیری می‌شود. به کارگیری عملیات بهینه‌سازی در مراحل مختلف این طرح نیز، مقادیر گشتاورهای خارج از محور کاترهد را به طور چشمگیری کاهش داده است.

جدول ۳. مراحل انجام طرح جانمایی و پارامترهای طراحی مثال

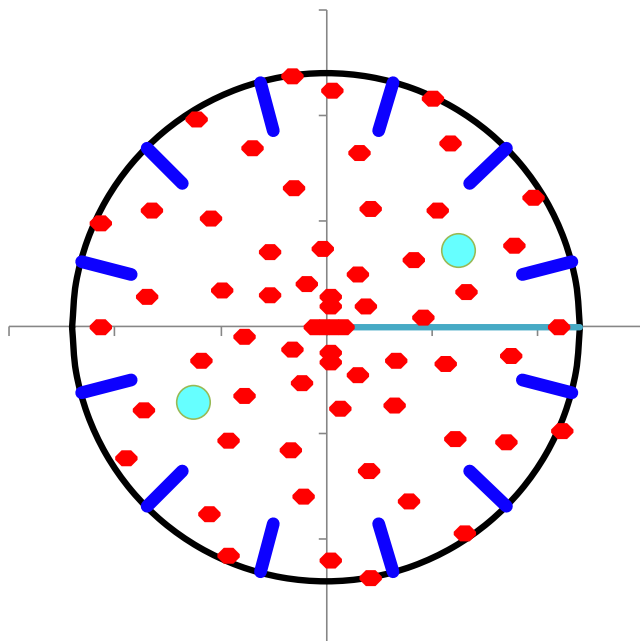
Table 3. Design steps and parameters for the example

مرحله	توضیحات
۱	تعداد باکت‌ها و دریچه‌های دسترسی، بر اساس شکل‌های ۱۵ و ۱۶، به ترتیب ۱۲ و ۲ در نظر گرفته شده است.
۲	حداقل فاصله مجاز دیسک‌ها، ۵۰ سانتی متر در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن فاصله داری متوسط ۹۰ میلی متر برای دیسک‌ها، حداقل فاصله دو دیسک مجاور هم، ۶ برابر فاصله داری متوسط دیسک‌ها است. بنابراین با احتساب نسبت ۳۶۰/۶، حداکثر فاصله داری زاویه‌ای ۶۰ درجه است. در این مثال فاصله داری زاویه‌ای ۳۰ درجه در نظر گرفته شده است.
۳	بر اساس شکل ۱۷، تعداد دیسک‌های ناحیه مرکزی، ۸ عدد انتخاب می‌شود که شامل ۱ مجموعه دیسک کاتر چهار قلو و دو مجموعه دیسک کاتر دو قلو می‌شود.
۴	طرح اولیه باکت‌ها و دریچه‌های دسترسی با احتساب فاصله داری زاویه‌ای ۳۶۰/۱۲ (۳۰ درجه)، تعیین می‌شود (شکل ۱۹).
۵	فاصله داری زاویه‌ای انتخاب شده در مرحله ۲، با فاصله داری زاویه‌ای باکت‌ها (مرحله ۴) متناسب است.
۶	شکل ۲۰، جانمایی دیسک‌ها را بر اساس توضیحات ارائه شده برای این مرحله نشان می‌دهد.
۷	با توجه به وجود مقادیر بسیار کم برای نیروها و گشتاورهای خارج از محور برای طرح جانمایی به دست آمده از مرحله ۶، نیازی به انجام عملیات بیشتر وجود ندارد. جدول ۳ مشخصات نهائی طرح جانمایی به دست آمده از مرحله ۶ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹. طرح جانمایی باکت‌ها و دریچه‌های دسترسی

Fig. 19. Buckets and manholes' positioning for the example



شکل ۲۰. طرح جانمایی نهایی دیسک‌ها، باکت‌ها، و دریچه‌های دسترسی

Fig. 20. Cutters' positioning for the example

جدول ۴. مشخصات نهائی طرح بهینه جانمایی دیسک‌ها

Table 4. Results of static balance calculations for the optimized scheme

Y_c	X_c	M_z	M_y	M_x	F_s	F_z	F_y	F_x	پارامتر
mm	mm	kN-m	kN-m	kN-m	kN	kN	kN	kN	
۱۰	۴	۱۶۴۷	۷	۶	۵۳	۶۷۶۰	۳۳	۴۱	

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله ضمن تشریح اصول طراحی جانمایی دیسک‌ها بر روی کاترهدهای TBM های زمین‌های سخت، به بررسی مزایا و معایب دو روش معمول به کار گرفته شده در صنعت برای جانمایی دیسک‌ها پرداخته شده است. این روش‌ها شامل طرح جانمایی شعاعی و طرح جانمایی مارپیچ است.

از مزایای مهم هر دو طرح یاد شده، عدم وجود گشتاورهای خارج از محور به دلیل رعایت اصل تقارن است. از معایب طرح شعاعی، اعمال نیروهای برشی دیسک‌ها (نیروهای عمودی و غلتشی) به صورت متمرکز بر روی خطوط معین شعاعی بر سازه کاترهد است. این امر می‌تواند منجر به تمرکز تنش شود. در طرح مارپیچ، این عیب با چرخش زاویه‌ای تدریجی

دیسک‌های مجاور، بر طرف شده است. یکی دیگر از معایب مهم طرح شعاعی، ایجاد فضاهای خالی بزرگ بین خطوط شعاعی است که زمینه ورود بلوک‌های سنگی آزاد را فراهم می‌کند. جانمایی باکت‌ها و دریچه‌های دسترسی به سینه کار در طرح مارپیچ به سهولت انجام نمی‌شود و ممکن است در برخی مواقع، طراح مجبور به تغییر موقعیت دیسک‌ها، بدون در نظر گرفتن تقارن آن‌ها شود. برای استفاده حداکثری از مزایای هر دو طرح، طرح جانمایی با توزیع یکنواخت با در نظر گرفتن شرایط تعادل استاتیکی کاترهد، شرایط هندسی جعبه دیسک‌ها، باکت‌ها، و دریچه‌های دسترسی معرفی شده است. علاوه بر این، پارامترهای اساسی مورد نیاز برای تعیین تعداد باکت‌ها، تعداد دریچه‌های دسترسی، تعداد دیسک‌های ناحیه مرکزی، و پارامترهای اساسی مورد نیاز برای دیسک‌های ناحیه پیرامونی، به صورت تجربی بر

- [7] 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.
- [8] 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". Ph.D. Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA, p. 249.
- [9] Rostami, J., 2008. "Hard Rock TBM cutterhead modeling for design and performance". *Geomechanics and Tunneling*, 1 (1), pp. 18–28.
- [10] Roxborough, FF., Phillips, HR., 1975. "Rock excavation by disc cutter". *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 1975, 12(12), pp. 361–366.
- [11] Sanio, H.P., 1985. "Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 22 (3), pp. 152-163.
- [12] 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), pp. 278-288.
- [13] Farrokh, E., Kim, D.Y., Kyung, S.B., 2015. "Rotary Cutting Test for Hard Rock TBM Performance Evaluation". World tunneling conference, Dubrovnik, Croatia.
- [14] 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, pp. 182–191.
- [15] 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, pp. 179–186
- [16] Rostami, J., & Chang, S.H., 2017. "A Closer Look at the Design of Cutterheads for Hard-rock Tunnel-Boring Machines". *Engineering*.
- [17] Geng, Q., Wei, Z., Meng, H., Maciasb, F.J., 2016. "Mechanical performance of TBM cutterhead in mixed

اساس بررسی آماری جزئیات طراحی تعداد زیادی از کاترهدهای زمین‌های سخت ارائه شده است. همچنین نتایج به کارگیری طرح شعاعی، ماریج، و توزیع یکنواخت در قالب یک مثال مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. از مزایای مهم روش جانمایی با توزیع یکنواخت، تعادل استاتیکی کاترهد، توزیع یکنواخت تعداد دیسک‌ها در ربع‌های مختلف سطح کاترهد، و عدم توزیع شعاعی دیسک‌ها است. برای بهبود بیشتر روش‌های طراحی توزیع جانمایی دیسک‌های برشی، پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی، با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای طراحی یاد شده در این مقاله، با استفاده از شبیه سازی‌های سه بعدی، اندرکنش زمین و دیسک‌های برشی در نواحی مختلف کله حفار مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

- [1] Abu Bakar, M.Z., 2012. "Saturation effects on mechanical excavability of sandstone under selected rock cutting tools". Ph.D. Thesis, Missouri University of Science and Technology, USA, p. 245.
- [2] 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". *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 35, pp. 37-54.
- [3] 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, pp. 435-441.
- [4] 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), pp. 238-246.
- [5] Lislerud, A., 1997. *Principles of Mechanical Excavation*. Tamrock Corp, POSIVA 97-12.
- [6] Ozdemir, L., Miller, R., Wang, F.D., 1978. "Mechanical Tunnel Boring Prediction and Machine Design". NSF APR73- 07776-A03. Colorado School of Mines. Golden, Colorado, USA.

- cutter spacing on pre-set penetration depth in sandstone fragmentation”. *Rock Mech. Rock Eng.*
- [24] Bruland, A., 1998. “Hard rock tunnel boring”. Ph.D. Dissertation, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- [25] Cheema, S., 1999. “Development of a rock mass boreability index for the performance of tunnel boring machines”. Doctoral dissertation, Department of Mining Engineering, Colorado School of Mines, Golden, CO, USA.
- [26] Farrokh, Ebrahim; Rostami, Jamal; Laughton, Chris., 2012. “Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs”. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology*, vol. 30, pp. 110-123.
- [27] Kim, D.Y., Farrokh, E., Hyun, K.Ch., Lee, J.H., 2016. “Jinhae Geoje Subsea Tunnel TBM Design and Performance Evaluation”. World tunneling conference, San Francisco, USA.
- [28] Burger, W., Dudouit, F., 2009. “The Hallandsås dual mode TBM”. *Rapid Excavation and Tunneling Conference 2009*, Las Vegas, USA.
- [29] Huo, J., Sun, W., Chen, J., Su, P., Deng, L., 2010. “Optimal disc cutters plane layout design of the full-face rock tunnel boring machine (TBM) based on a multi-objective genetic algorithm”. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24 (2), pp. 521-528
- rock ground conditions”. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 57, pp.76–84.
- [18] Liu, T., Gong, G.F., Yang, H.Y., Ouyang, X.P., Shi, Z., 2016. “Design and simulation of electro-hydraulic hybrid driving system for TBM cutterhead”. *ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA) - Auckland, New Zealand.*
- [19] Pan, Y.C., Liu, Q.S., Liu, J.P., Huang, X., Liu, Q., Peng, X.X., 2018a. “Comparison between experimental and semi-theoretical disc cutter cutting forces: Implications for frame stiffness of the linear cutting machine”. *Arab J. Geosci.*
- [20] Pan, Y.C., Liu, Q.S., Liu, J.P., Liu, Q., Kong, X.X., 2018b. “Full-scale linear cutting tests in Chongqing Sandstone to study the influence of confining stress on rock cutting efficiency by TBM disc cutter”. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 80, pp. 197–210.
- [21] Pan, Y.C., Liu, Q.S., Peng, X.X., Liu, Q., Liu, J.P., Huang, X., Cui, X., Cai, T., 2019. “Full-scale linear cutting tests to propose some empirical formulas for tbm disc cutter performance prediction”. *Rock Mech. Rock Eng.*
- [22] Thyagarajan, M.V., 2018. “The comparison of cutting forces on disc cutters in constant vs variable penetration modes”. MS thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.
- [23] Han, D.Y., Cao, P., Liu, J., Zhu, J.B., 2017. “An experimental study of dependence of optimum TBM

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Farrokh , H. Ramzani, Lacey Design Optimization for Hard Rock TBMs , Amirkabir J. Civil Eng., 53(12) (2022) 5517-5534.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18890.6992

