

## بهینه‌سازی عملکرد ماشین حفاری EPB خط ۲ مترو اصفهان در برابر سایش و انتقال مصالح بر

### اساس تطبیق پذیری ماشین با زمین پروژه به کمک مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار EDEM

عرفان راسخ؛ داوود لطفی

#### چکیده

در این مقاله برای اولین بار در ایران با بررسی مطالعات پیشین با استفاده از تحلیل عددی المان مجزا نقاط ضعف اساسی و گلوگاه‌های موجود در حفاری خط ۲ مترو اصفهان با استفاده از ماشین حفاری EPB شناسایی و راهکارهای عملی برای حل آن اندیشیده شد. مدلسازی هندسه دستگاه در نرم‌افزار SOLIDWORKS صورت گرفت؛ سپس مدل نهایی و اسمبل شده برای قسمت دوم تحلیل به نرم‌افزار المان مجزای EDEM وارد شد. کالیبراسیون پارامترهای خاک سینه‌کار تونل و خاک عمل‌آوری شده با استفاده از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی دانه‌بندی، برش مستقیم و تست اسلامپ صورت گرفت. نتایج نشان داد که ناحیه‌ی یک‌سوم پایینی چمبر و ناحیه محصورشده بین بازویی‌های دستگاه دارای پتانسیل بالای کلاگینگ است و ذرات از میدان سرعت ضعیفی در این ناحیه برخوردارند. برای حل این گلوگاه اساسی دو طرح بهینه‌سازی به کمک نصب میکسینگ بار جدید بر روی کاترهد ارائه شد و برای ارزیابی میزان کارایی آن مدل جدیدی از هر دو طرح ران شد و نتایج نشان داد که طرح دوم که میکسینگ بار بر روی بازویی کاترهد نصب می‌شود بهبود چشمگیری در افزایش میدان سرعت ذرات اتفاق می‌افتد و متوسط سرعت ذرات در ناحیه‌ی مرکزی تا ۵ برابر نیز گاهاً بهبود می‌یابد. طرح شماره یک کارایی مطلوبی نداشت و تنها به صورت جزئی میدان سرعت ذرات را بهبود بخشید. به‌عنوان راه‌حلی دیگر برای بهینه‌سازی و بهبود میدان سرعت ذرات در یک‌سوم پایین فضای چمبر استفاده از ردیف واترجت پیشنهاد شد و به کمک نرم‌افزار ناحیه‌ی بحرانی تشخیص و بهترین مکان برای نصب لاین‌های واترجت مشخص شد.

کلید واژه‌ها: سایش ابزار، کلاگینگ، مدل عددی المان مجزا، ماشین حفاری EPB، خط ۲ مترو اصفهان

## Optimizing the performance of the EPB Tunnel Boring Machine of Isfahan metro line 2 against wear and material transfer based on the adaptability of the machine to the project ground with the help of the numerical modeling in EDEM software

#### Abstract

*In this article, for the first time in Iran, by using discrete element Method analysis, the main weaknesses in the excavation of Isfahan metro line 2 using EPB drilling machine were identified and practical solutions were proposed to solve it. The machine geometry was modeled and imported into the EDEM discrete element software for the second part of the analysis. The parameters of the tunnel lining, soil and conditioned soil were calibrated using the laboratory data set of sieve analysis test, direct shear test and slump. The results showed that the lower third of the chamber and the enclosed area between the arms of the device have a high clogging potential and the particles have a weak velocity field in this area. Two optimization plans were presented with the help of installing a new mixing bar on the cutterhead, and the results showed that the second plan, where the mixing bar is installed on the arm of the cutterhead, a significant improvement in the speed of the particles happens, and the average speed of the particles in the central region sometimes improves up to 5 times. First optimization plan one did not work well and only partially improved the particle velocity field. As another solution to optimize and improve the particle velocity field in the lower third of the chamber space, the use of waterjet rows was suggested, and with the help of software, the critical area was identified and the best place to install waterjet lines was determined.*

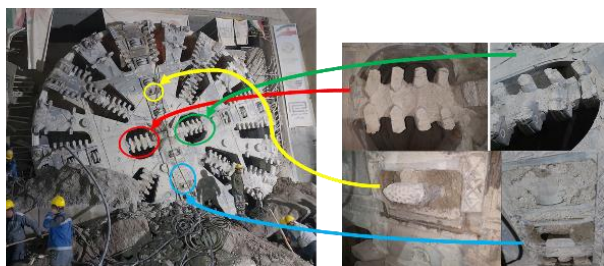
**Keywords:** wear, clogging, discrete element method, numerical model, EPB, Isfahan metro line 2

محل اتصال آن‌ها خورده شده و ورق‌های ضد سایش کاهش ضخامت دادند و از بین رفتند و عملاً این ماشین کاربری خود را از دست داد.



شکل (۱). ماشین EPB شرکت مهندسی سابیر بین‌الملل توسعه جنوبی خط ۶ مترو تهران

اطلاعات تعویض ابزار در پروژه مورد مطالعه در این مقاله در حدفاصل ایستگاه کهنده تا خرازی و جمع‌آوری اطلاعات از کارگاه مشاهده نشان داد که در دیسک‌های مرکزی پدیده کلاگینگ باعث فلت شدن، جام شدن، تیز شدن لبه تیغه و حتی شکستن تیغه می‌شود. در مواردی مشاهده شده که پشت تیغه کاملاً سالم است اما جلوی تیغه فلت شده و یا شکسته شده است و این نشان‌دهنده این موضوع است که کلاگینگ در همان ابتدا مانع چرخش دیسک شده است مشاهده شده است. عدم کارایی دیسک‌ها عمدتاً به خاطر قفل‌شدگی آن‌ها در زمین‌های حاوی رس نیز می‌باشد که منجر به سایش یکطرفه و در نتیجه کاهش شدید عمر آن‌ها می‌شود. از طرف دیگر محدوده کاربرد ماشین‌های EPB به گونه‌ای است که معمولاً لایه‌های ریزدانه در آنها غالب است و یا لایه‌های درشت‌دانه احتمالی نیز دارای مقداری محتوای ریزدانه و رسی هستند. همچنین، ماشین‌های EPB برخلاف ماشین‌های سینه کار باز و دوغایی، به خاطر وجود مصالح خمیری شده در پشت دیسک‌ها، مقاومت غلطشی بسیار زیاد می‌باشد و در نتیجه چرخش و عملکرد عادی آن‌ها با مشکل روبرو می‌شود [۱].



شکل (۲). کلاگینگ ناحیه مرکزی دستگاه EPB خط ۲ مترو اصفهان و سایش ناشی از آن

## ۱. مقدمه (B Nazanin 13 Bold)

با گسترش روزافزون استفاده از ماشین‌های فشار تعادلی زمین EPB در انواع زمین‌ها با شرایط ژئوتکنیکی پیچیده، چالش‌برانگیز و سخت و همچنین موفقیت این نوع سیستم حفاری در پروژه‌های مختلف دنیا با هر قطری سبب شده است که مطالعات در مورد شرایط حفاری، اصول طراحی مکانیکی، اصول عمل‌آوری خاک جهت افزایش راندمان و عملکرد ماشین‌های EPB در دهه‌ی دوم قرن ۲۱ به شدت افزایش یابد. یکی از حیاتی‌ترین چالش‌هایی که ماشین‌های حفار EPB در زمین‌های خاکی با آن مواجه هستند، نحوه‌ی انتقال مصالح از محدوده جبهه‌کار تونل به محفظه چمبر ماشین و پس از آن انتقال از طریق نقاله ماریپیچ و نوار نقاله به خارج از تونل است که خود مسئله‌ی مهم انتقال مصالح و سایش کله حفار و نقاله ماریپیچ را در پی دارد.

در کشورهای پیشرفته خارجی برای حفاری تونل به روش مکانیزه ابتدا تحقیقات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی گسترده‌ای صورت می‌گیرد و اطلاعات جمع‌آوری‌شده در اختیار شرکت سازنده ماشین حفاری TBM قرار می‌گیرد و شرکت مربوطه متناسب با ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و سطح آب زیرزمینی و ... اجزای ماشین حفاری از جمله کاترهد، چمبر و تسمه‌نقاله ماریپیچ را به‌طور خاص برای آن پروژه طراحی می‌کنند. در داخل کشور اما شرایط متفاوتی حاکم است و سفارش و واردات TBM جدید متناسب با شرایط ژئوتکنیکی مسیر تونل صورت نمی‌گیرد و TBM‌های دسته دوم که عمر مفید آن‌ها گذشته است پس از انجام تعمیراتی بدون طراحی اجزای ماشین حفاری متناسب با شرایط زمین، مجدداً مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. از طرفی تعداد ماشین‌های TBM موجود در کشور محدود است و هزینه‌ی بالای واردات آن، منابع ارزی محدود کشور و تحریم‌ها این دست از مشکلات را تشدید کرده است، نیاز به تحلیل عملکرد ماشین‌ها به لحاظ سایش، مقاومت سازه‌ای و نحوه انتقال مصالح پیش از انجام حفاری، به شدت احساس نیاز می‌شود تا چاره کار پیش از مواجه‌شدن با مشکل اندیشیده شود.

موارد متعددی از مشکلات مربوط به سایش و انتقال مصالح در پروژه‌های تونل‌زنی کشور به هنگام اجرا مشاهده شده است که می‌توان به متروی خط ۶، ۷ و ۳ متروی تهران، متروی قم و اصفهان اشاره کرد که به علت سایش بیش از حد پروژه برای مدت طولانی متوقف شد که این توقفات به عنوان مثال شکل (۱) ماشین EPB شرکت مهندسی سابیر بین‌الملل را نشان می‌دهد که در خط ۳ مترو تهران مورد استفاده قرار گرفت و ناحیه مرکزی کاترهد در اثر سایش از بین رفت و در توسعه جنوبی خط ۶ مترو تهران کل صفحه کاترهد درگیر سایش شد و ریپرها و نایف‌ها و

## ۲. روش تحقیق

### ۲-۱. انتخاب روش تحقیق

برآورد شدت ساینده‌گی خاک‌ها به صورت تجربی و آزمایشگاهی شده است. از مهم‌ترین این تحقیقات می‌توان به ساخت دستگاه برآورد ساینده‌گی LCPC، توسط مرکزی به همین نام در سال ۱۹۹۰، مطالعات سایر محققین اشاره کرد [۲ تا ۱۲].

همچنین آگاهی روشن در مورد ویژگی‌های جریان ذرات خاک داخل چمبر می‌تواند باعث بهبود بهتر محفظه شود تا خطر وقوع انسداد کمتر و راندمان کاری بالاتر رود؛ با این حال، مطالعات بسیار کمی به جریان خاک در داخل چمبر اختصاص داده شده است. در میان آن‌ها، در سال (۲۰۰۵) تکنولوژی تجسم برای جریان خاک در محفظه یک سپر بزرگ EPB در یک قالب بین‌المللی معرفی شد. همچنین با استفاده از RFLOW (یک بسته نرم‌افزار تجاری محاسباتی دینامیک سیالات)، سرعت و توزیع نرخ برش جریان داخلی خاک به دست آمد و تعدادی معیار بهینه‌سازی برای سازه چمبر ارائه شد. [۱۳].

در سال ۲۰۰۶ مدل‌هایی ریاضی با توجه به نیروی تراست، فشار خاک درون چمبر، سرعت چرخش نوارنقاله‌مارپیچ و سرعت پیشروی به کمک روابط تئوری ارائه شد و این مدل‌ها با نتایج آزمایش در محل صحت سنجی شد [۱۴].

در سال ۲۰۱۲ جریان پیوسته خاک از بازشوهای کاترهد به چمبر را به صورت جریان آرام<sup>۱</sup> ساده و راه‌حل تحلیلی ارائه شد. از طریق شبیه‌سازی DEM، می‌توان اطلاعات جریان را در داخل محفظه چمبر به دست آورد [۱۵].

در سال ۲۰۱۲ یک مدل مبتنی بر روش المان محدود برای شبیه‌سازی حفر تونل با استفاده از سپر EPB ایجاد شد. این در حالی است که FEM بر اساس نظریه کرنش کوچک و مکانیک پیوسته است، حال آنکه در این مسئله ما با تغییر شکل‌های بزرگ مصالح دانه‌ای روبرو هستیم از این رو المان محدود روش مناسبی به نظر نمی‌رسد. خوشبختانه، روش جدید توسعه یافته المان مجزا یک راه‌حل جدید برای اندرکنش بین مصالح زمین و ماشین حفاری ارائه می‌دهد. مطالعات کمی در مورد شبیه‌سازی حفاری مکانیزه به کمک DEM وجود دارد. چندین شبیه‌سازی DEM، فشار مخزن خاک، پایداری جبهه کار تونل و مکانیزم برش ابزارها مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل‌های DEM برای ارزیابی و بهینه‌سازی سیستم حفاری کاترهد دستگاه EPB در سال ۲۰۱۱ توسعه یافته‌اند اما در این مدل‌ها، از ذرات نسبت کمی استفاده شده است و هندسه‌ها بسیار ساده شده بودند [۱۶ تا ۲۳].

در سال ۲۰۱۳ با هدف بررسی تئوری طراحی کاترهد دستگاه فشار تعادلی زمین (EPB)، ابتدا پارامترهای نشان دهنده عملکرد

ارزیابی سایش ابزارهای برش اغلب از محاسبه فاکتورهای عملکرد ماشین سخت‌تر و مشکل‌تر است و دلیل آن این است که از یک سو سایش و خوردگی توسط قابلیت ساینده‌گی مصالح تشکیل‌دهنده جبهه کار کنترل می‌شود و از سوی دیگر این پدیده به پیچیدگی اندرکنش بین زمین، چیدمان و جنس ابزارهای برش نیز مربوط می‌شود. اندرکنش بین سپر حفاری و لایه‌های خاک اطراف، رفتار غیرخطی و وابسته به زمان و تصادفی از خود نشان می‌دهد؛ بنابراین، به سختی می‌توان یک راه‌حل تحلیلی برای اندرکنش آن‌ها ارائه داد. در مورد مدل آزمایشی، فقط یک مورد ساختار و مجموعه‌ای از پارامترهای عملکردی سیستم محفظه حفاری می‌تواند در یک زمان خاص شبیه‌سازی شود. آزمایشات متعدد برای استخراج نتایج ارزشمند ضروری هزینه زیادی را به دنبال خواهد داشت. علاوه بر این، تکنیک‌های تست‌های کنونی هنوز قادر به بررسی و آزمایش کامل حرکات سطح میانی و رفتار مکانیکی خاک در داخل محفظه نیستند. همچنین به دست آوردن دقیق و کامل اطلاعاتی مانند بار وارد بر دستگاه، میزان سایش و میدان تنش و کرنش آسان نیست و گاهی غیرممکن است. از طرفی مدل‌های آزمایشگاهی، تجهیز آزمایشگاه‌ها، ابزارگذاری و پایش هزینه بسیار زیادی در مقایسه با مدل‌های عددی دارد. به این ترتیب، ارزیابی جامع و درک عملکرد سیستم محفظه حفاری توسط مدل‌های آزمایشی دشوار است.

### ۲-۲. ادبیات پیشین

در حال حاضر، اکثر محققان روش را ساده کرده‌اند و بار روی کاترهد ثابت بوده و به طور منظم توزیع می‌شود. برخی از محققان بر روی بار اعمال شده بر روی ابزار واحد متمرکز شده و ابزار بر روی کاترهد را با نیروهای متمرکز مربوطه جایگزین کردند. محققان دیگر بار تصادفی مونت کارلو را به منظور تجسم تصادفی بودن اندرکنش‌ها به کاترهد وارد کردند. همه آن مدل‌ها به اندازه کافی دقیق نیستند و نمی‌توانند اندرکنش واقعی بین سپر و خاک را تجسم کنند. خوشبختانه، شبیه‌سازی DEM می‌تواند تعامل واقعی و بار واقعی در کاترهد در طی زمان را به دست آورد.

به طور کلی مطالعات گسترده‌ای درباره حساسیت و پیش‌بینی سایش و خوردگی ابزار در TBM‌های سنگ سخت وجود دارد؛ اما در زمین‌های نرم و خاکی، روش یا استاندارد برای تخمین عمر ابزار برشی و شدت ساینده‌گی وجود ندارد. با این حال، تلاش‌های بسیاری برای ارائه روش و الگویی برای تخمین عمر ابزار برشی و

<sup>1</sup> Laminar flow

نظیر نیروهای داخلی در کله حفار و نقاله مارپیچ و همچنین میزان تغییر شکل و سایش ماشین حفاری که در پروژه‌ای در چین مورد استفاده قرار گرفت، بررسی شد. به کمک نرم‌افزار EDEM نقاط ضعف در برابر سایش را تشخیص داده شد و کاترهد و محفظه حفاری را با اضافه کردن ابزارهایی بهبود یافت و نتایج تحلیل مجدد کاهش میزان سایش در کاترهد و تسمه‌نقاله مارپیچ و بهبود سرعت خروج مواد و میکس شدن مصالح را به دنبال داشت [۳۰].

در سال ۲۰۲۱ محققین با استفاده از تجزیه و تحلیل المان مجزا عملکرد حفاری دستگاه حفاری تونل EPB با قطر ۷٫۷۳ متر را پیش‌بینی کردند. شبیه‌سازی به‌طور عمده چندین شاخص عملکرد حفاری را برای دستگاه، تحت شرایط عملکردی مختلف پیش‌بینی می‌کرد. تعداد ذرات در چمبر و فشار چمبر با تغییر شرایط عملکردی در طول شبیه‌سازی حفاری TBM تغییر کرد. نتایج نشان داد که نیروی فشاری، گشتاور و قدرت محرکه بر روی کاترهد TBM با تغییر سرعت چرخش آن تغییر می‌کند و با افزایش سرعت چرخش کاترهد، افزایش می‌یابد. نیروی فشاری کلی بر روی تمام دیسک‌ها عمل می‌کند و سایش آن‌ها به‌صورت خطی با شتاب گرفتن چرخش کاترهد افزایش می‌یابد. موقعیت یک دیسک بر روی کاترهد تأثیر بسیار قوی بر روی نیروهای فشاری بیشتر متحمل شده توسط کاترهد نزدیک به مرکز دارد. در مقابل، گنج دیسک‌ها در ناحیه انتقالی کاترهد، سایش بیشتری را نسبت به سایر موقعیت‌ها نشان دادند. نرخ تخلیه گل و نیروی محرک نوار نقاله مارپیچ با افزایش سرعت چرخش نوار نقاله مارپیچ سرعت چرخش کاترهد افزایش یافت و در نهایت، مطالعه آن‌ها شرایط عملیاتی بهینه را بر اساس فشار تعادلی و مدیریت عملیاتی TBM تعیین کرد [۳۱].

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. مدلسازی هندسه

گام اول مدلسازی، مدلسازی ماشین حفاری S525 شامل دیسک کاتر، نایف، اسکرپیر، کاترهد، نوارنقاله مارپیچ به همراه پوسته آن، میکسینگ بارهای ثابت و متحرک و چمبر می‌باشد. در گام بعدی هندسه ابزار و قطعات مدل شده در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. مدلسازی هندسه به کمک نرم‌افزار SOLIDWORKS و مطابق با نقشه‌های دستگاه صورت گرفت. شکل (۳) مدلسازی هندسه را نشان می‌دهد.

سیستم محاسبه شد. سپس یک مدل سه بعدی برای کاترهد دستگاه EPB با نرم افزار PFC3D بر پایه روش المان گسسته ارائه شد که قادر به شبیه سازی زمین در محل حفاری تونل، ساختار دستگاه و عملیات حفاری است. پارامترهای عملکردی نشان‌دهنده پایداری سطح حفاری، سرعت تخلیه خاک، گشتاور سیستم کاترهد و سایش ابزار برشی با اجرای کد DEM اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست‌آمده با مدل DEM با داده‌های درجا مطابقت داشت که این نشان می‌دهد که مدل DEM یک روش امیدوارکننده است که می‌تواند جایگزین آزمایش میدانی برای تجزیه و تحلیل تأثیرات پارامترهای ساختاری بر عملکرد دستگاه که برای طراحی بهینه کاترهد دستگاه EPB ضروری است، شود [۲۴].

در سال ۲۰۱۴ از روش ۲ بعدی DEM برای بررسی اثر عمل‌آوری خاک بر تغییر شکل زمین در مسیر تونل زنی استفاده شد [۲۵].

در سال ۲۰۱۷ عملکرد ماشین حفاری TBM فشار تعادلی زمین EPB از نوع پره‌ای و صفحه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی روش المان مجزا بررسی شد. تجزیه و تحلیل TBM در حین حفاری با توجه به دو شرایط حفاری از پیش تعریف شده با سرعت چرخش متفاوت یک نوع کاترهد انجام شد. در طول تجزیه و تحلیل، گشتاور مقاوم در سطح کاترهد، نیروی فشاری در کاترهد و سطح سپر، نرخ تخلیه گل در نوار نقاله مارپیچ اندازه‌گیری و مقایسه شد [۲۶].

در سال ۲۰۱۹ مطالعه‌ای برای بررسی تأثیر جهت نصب اسکرپیر بر حفاری TBM با استفاده از روش المان مجزا صورت دادند و مشاهده شد که وقتی جهت نصب اسکرپیر به سمت بیرون بود، مقدار جریان ذرات در واحد زمان که به داخل بازشوی کاترهد جریان می‌یافت از زمانی که جهت نصب اسکرپیر به سمت داخل بود، کمتر بود و بار بیشتری به کاترهد اعمال شد [۲۷].

در همین سال با ترکیب کدهای المان مجزا و تفاضل محدود و با انجام آزمایش اسلامپ و سه محوره پارامترهای زمین به دست آمد و پس از آن نرخ خروج مصالح، توزیع تنش درون چمبر و نشست سطح زمین مورد بررسی قرار گرفت [۲۸].

در سال ۲۰۲۰ تحقیقات کاملی در مورد پروسه‌ی حفاری در سیستم EPB ارائه شد. در این تحقیق، پایداری جبهه‌کار، نیروی تراست، گشتاور پیچشی، فشار درون چمبر و همچنین نشست سطحی بررسی شده است [۲۹].

در سال ۲۰۲۰ به کمک مدلسازی عددی المان مجزا فشار چمبر، سرعت و نحوه جابجایی مصالح عمل‌آوری شده درون چمبر و نرخ خروج مصالح از چمبر از طریق نقاله مارپیچ و مسائل سازه‌ای

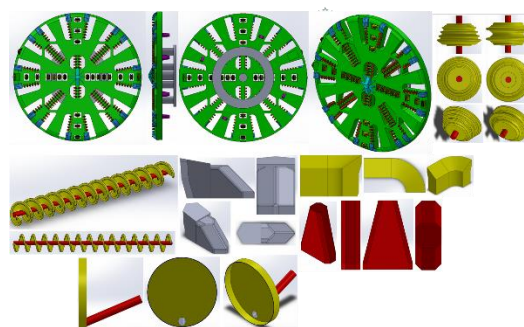
دانه‌های درشت به‌عنوان وسیله اصلی انتقال نیرو در توده خاک عمل می‌کنند، درحالی‌که بیشتر دانه‌های کوچک فقط به‌عنوان پرکننده عمل می‌کنند تا فضای متخلخل را پر کنند. می‌توان نتیجه گرفت که حذف ذرات ریز تأثیر جزئی بر واکنش مکانیکی حاصل دارد؛ بنابراین اندازه ذرات اصلی نه‌تنها بزرگ می‌شوند و گسسته در نظر گرفته می‌شوند، بلکه تعداد آن‌ها کمتر می‌شود [۳۲].

ظرفیت توان عملیاتی کاترهد و نوار نقاله ماریچ در تعیین ضریب بزرگنمایی باید لحاظ شود. با توجه به قطر داخلی نوار نقاله ماریچ (۱۰۰۰ میلی‌متر)، اندازه ذرات نمی‌تواند خیلی بزرگ باشد؛ بنابراین برای برآوردن دو الزام فوق و مدل‌سازی مصالح تا حد امکان واقعی، تصمیم گرفته شد که ذرات را ۸ برابر بزرگ کنیم و ترکیب اندازه‌های ۱۸،۷۵ میلی‌متر، ۲۳،۷۵ میلی‌متر و ۲۹ میلی‌متر انتخاب شد. ذرات با قطر ۱۵۰ میلی‌متر، ۱۹۵ میلی‌متر و ۲۳۲ میلی‌متر و درصد جرمی به ترتیب ۸۹،۵۵، ۵،۶۵ و ۴،۸ درصد از جرم کل مدل‌سازی شد.

برای مدل تماسی ذرات از مدل تماسی هرتز-ماینلین (بدون لغزش) و مدل استاندارد اصطکاک غلتشی استاندارد استفاده شده است که مدلی مناسب در زمینه مدل‌سازی رفتار خاک می‌باشد و محققین بسیاری از این مدل تماسی استفاده کرده‌اند. پارامترهای معلوم خاک مطابق ادبیات فنی در جدول (۱) و محدوده پارامترهای مجهول در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۱). پارامترهای معلوم

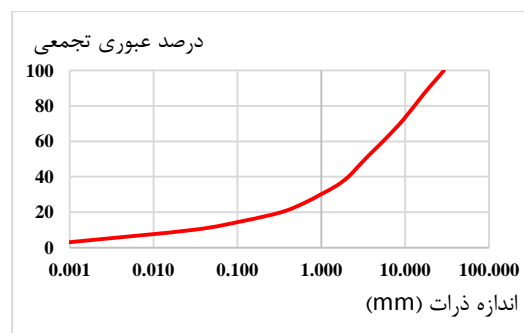
نام پارامتر	مقدار	واحد	توضیحات
چگالی ذرات ( $\rho$ )	۲۷۰۰	$Kg/m^3$	[۳۲]
ضریب پواسن ذرات ( $\nu$ )	۰،۱۵	-	[۲۹]
مدول یانگ ذرات ( $E$ )	۵۰	GPa	[۲۹]
مدول برشی ذرات ( $G$ )	۲۱،۷	GPa	[۲۹]
زاویه اصطکاک خاک	۳۴	درجه	میانگین‌گیری از زاویه‌ی اصطکاک خاک در سینه‌کار تونل
ضریب اصطکاک ایستایی خاک ( $\mu_s$ )	۰،۶۷۴۵	-	[۲۹]
چگالی هندسه ( $\rho$ )	۷۸۰۰	$Kg/m^3$	[۲۹]
ضریب پواسن	۰،۳	-	[۲۹]



شکل (۳). مدل‌سازی هندسه مدل

### ۳-۲. کالیبراسیون پارامترهای ذرات

شکل (۴) نمودار دانه بندی خاک در محدوده حفاری را در گمانه‌های موجود در مسیر حفاری نشان می‌دهد. به‌منظور تعریف یک خاک واحد که نماینده مناسبی از خاک‌های موجود باشد، از نمودارهای دانه‌بندی خاک در محدوده‌های اشاره شده، میانگین‌گیری صورت گرفته که نمودار آن در شکل زیر مشاهده می‌شود. بخش عمده حفاری درون خاک ماسه و شن صورت می‌گیرد.

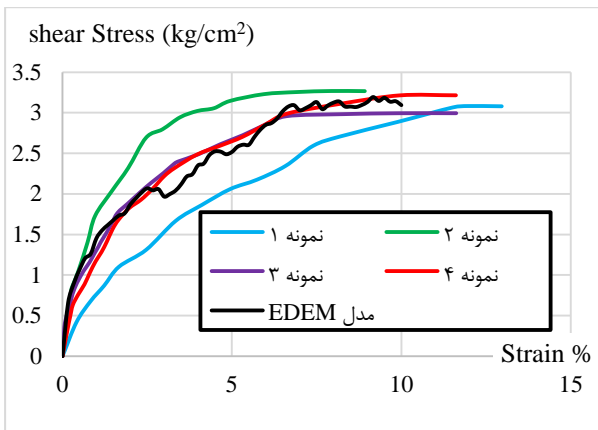


شکل (۴). نمودار دانه بندی خاک

برای شبیه‌سازی بستر خاکی حفاری از ذرات کروی منفرد استفاده می‌شود. با توجه به ابعاد بزرگ مدل و همچنین زمان زیاد شبیه‌سازی و وابسته بودن شدید زمان شبیه‌سازی به تعداد ذرات نیاز به یک ضریب بزرگ‌سازی می‌باشد. توزیع اندازه ذرات تأثیر خاصی بر تغییر شکل ماکروسکوپی و مقاومت حجم مواد ذره‌ای ندارد. به طور کلی پذیرفته شده است که شبیه‌سازی با هدف بررسی ماکروسکوپی رفتار مواد دانه‌ای به جای برهمکنش‌های دقیق بین ذرات انجام می‌شود؛ بنابراین، ذرات خاک را می‌توان به‌منظور کاهش هزینه محاسباتی تا زمانی که بتوان یک مدل جایگزین مناسب پیدا کرد و آن را با ذراتی که بسیار بزرگ‌تر از اندازه‌های فیزیکی دانه‌های واقعی هستند جایگزین نمود [۳۲].

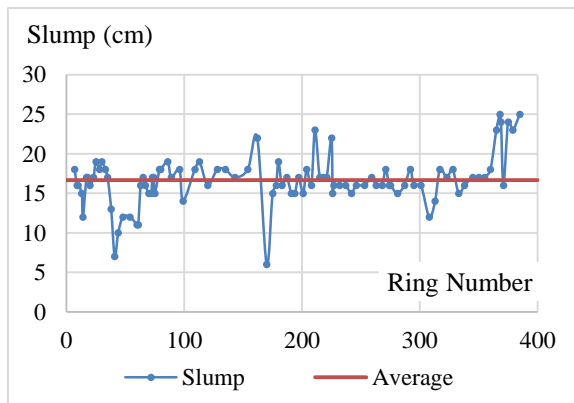
علاوه بر این، از آنجایی که به‌سختی می‌توان همه اندازه ذرات را مداخله داد، تنها چند اندازه معرف انتخاب شده‌اند و علاوه بر این،

مناسبی با نتایج تست برش مستقیم نمونه‌های آزمایشگاهی در محدوده حفاری دارد. شکل (۶) نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی برش مستقیم را نشان می‌دهد. بنابراین پارامتر  $e = 0.6$  و  $\mu_r = 0.2$  برای مدل‌سازی خاک مجاور سینه‌کار تونل در نظر گرفته می‌شود و مقاومت برشی مطابق با واقعیت را شبیه‌سازی می‌کند.



شکل (۶). نتایج برش مستقیم عددی و آزمایشگاهی

در حدفاصل ایستگاه کهنده و خرازی مقادیر اسلامپ در رینگ‌های مختلف اندازه‌گیری برحسب شماره رینگ در شکل (۷) نشان داده شده است. با میانگین‌گیری از مقادیر اسلامپ، مقدار اسلامپ هدف به‌منظور کالیبراسیون خاک درون چمبر ۱۶،۶۵۶ سانتیمتر در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۷). مقادیر اسلامپ خاک عمل‌آوری شده

به‌منظور شبیه‌سازی خصوصیات روانی خاک درون چمبر آزمایش اسلامپ در نرم‌افزار EDEM شبیه‌سازی می‌شود. مخروط اسلامپ دارای ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر، قطر ابتدای ۲۰ سانتی‌متر و قطر انتهای ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. با توجه به اندازه بزرگ شده ذرات خاک ابعاد مخروط اسلامپ ۱۲ برابر می‌شود. بدین ترتیب مخروط اسلامپ شبیه‌سازی شده دارای ارتفاع ۳۶۰ سانتی‌متر، قطر ابتدای ۲۴۰ سانتی‌متر و قطر انتهای ۱۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. یک Plate نیز با ابعاد  $1500 \times 1500 \times 10$  سانتی‌متر در

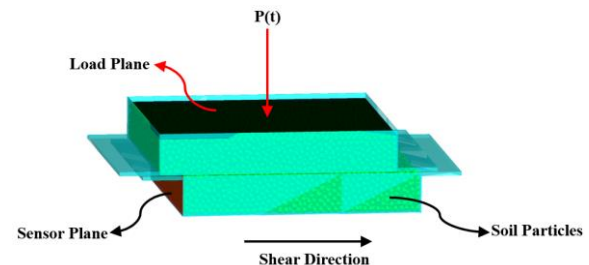
هندسه ( $\theta$ )			
مدول یانگ هندسه ( $E$ )	۱۸۲	GPa	[۲۹]
مدول برشی هندسه ( $G$ )	۷۰	GPa	[۲۹]
ضریب بازگشت هندسه ( $e$ )	۰،۲۵	-	[۳۳]
ضریب اصطکاک غلطشی هندسه ( $\mu_r$ )	۰،۰۰۱	-	[۳۳]
ضریب اصطکاک ایستایی هندسه ( $\mu_s$ )	۰،۷	-	[۳۳]

جدول (۲). پارامترهای مجهول

نام پارامتر	محدوده	واحد	توضیحات
ضریب اصطکاک غلطشی ذرات ( $\mu_r$ )	(۰،۰۱ و ۰،۵)	-	[۳۲]
ضریب بازگشت ذرات ( $e$ )	(۰ و ۰،۶)	-	[۳۲]

به‌منظور یافتن پارامترهای مناسب برای شبیه‌سازی خصوصیات زمین باید نتیجه شبیه‌سازی با نتایج تست برش مستقیم نمونه واقعی سازگاری مناسبی داشته باشد و به‌اصطلاح خصوصیات مقاومتی خاک را اقلان کند. ابعاد جعبه برش ۶ متر در ۶ متر با ضخامت ۲ متر انتخاب شده است (شکل (۵)).

برای یافتن پارامترهای سازگار با نتایج برش مستقیم آزمایشگاهی سه مقدار ۰،۱، ۰،۳، ۰،۶ و برای ضریب  $e$  مقدار ۰،۰۵، ۰،۱۰، ۰،۱۵، ۰،۲ و برای ضریب  $\mu_r$  لحاظ شده است. این ۱۵ مجموعه نمونه از آزمایش برش مستقیم درون نرم‌افزار EDEM شبیه‌سازی می‌شود.

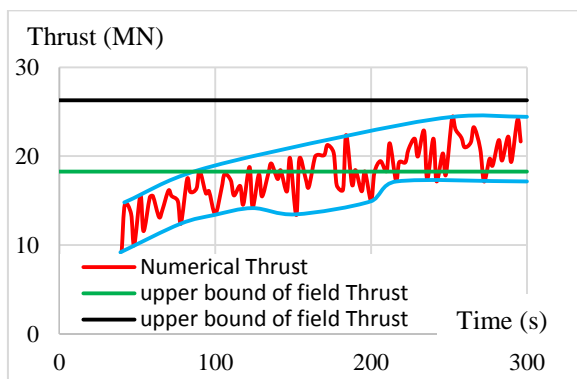


شکل (۵). مدل‌سازی برش مستقیم

با توجه به نمودار آزمایشگاهی تست برش مستقیم و نتایج شبیه‌سازی تست برش مستقیم در نرم‌افزار EDEM با زوج پارامترهای ( $e, \mu_r$ ) زوج پارامتر (۰،۲ و ۰،۶) سازگاری بسیار

### ۴-۳. صحت سنجی

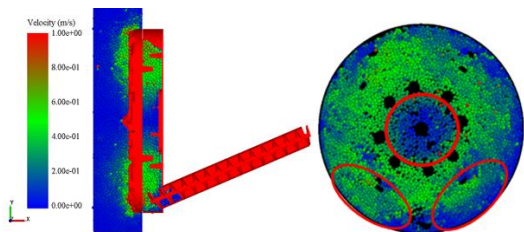
به منظور صحت سنجی تکمیلی مدل نتایج تراست میدانی و مدل عددی در زیر ارائه شده است. همانطور که از شکل (۹) مشخص است نتایج مدل عددی و میدانی سازگاری خوبی را نشان می‌دهند.



شکل (۹). نتایج تراست میدانی و عددی

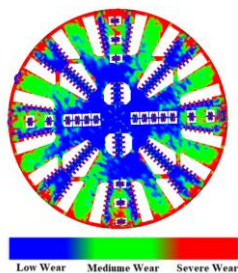
### ۵-۳. تحلیل نتایج

شکل (۱۰) میدان سرعت ذرات را در مقطع طولی و عرضی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ذرات در ناحیه محصور شده بین بازویی‌ها و یک‌سوم پایینی جمبر از رکود قابل ملاحظه‌ای برخوردارند لذا راهکارهای بهینه‌سازی با در نظر گرفتن این نواحی باید ارائه شوند.



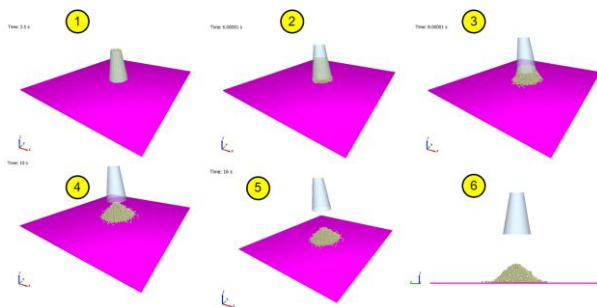
شکل (۱۰). میدان سرعت ذرات

شکل (۱۱) الگوی سایش کاترهد را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است سایش با افزایش فاصله شعاعی از مرکز افزایش می‌یابد و حاشیه کاترهد در مقایسه با نواحی مرکزی سایش بیشتری را تجربه می‌کند.



شکل (۱۱). الگوی سایش کاترهد

زیر مخروط اسلامپ تعریف می‌شود تا با حرکت مخروط اسلامپ ذرات بر روی آن ریزش کند. مخروط اسلامپ با سرعت ۰٫۳۶ متر بر ثانیه به سمت بالا حرکت می‌کند و بعد از طی ۳۶۰ سانتی‌متر شبیه‌سازی به پایان می‌رسد و ارتفاع افت ذرات خاک از بالای مخروط به‌عنوان عدد اسلامپ شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود شکل (۸) روند شبیه‌سازی و اندازه‌گیری اسلامپ را نشان می‌دهد.



شکل (۸). مدل‌سازی اسلامپ

انتخاب پارامتر  $\mu_r$  برابر با ۰٫۲۱ و پارامتر  $e$  برابر با ۰٫۳ مقدار اسلامپ ۱۶٫۶۵۶ را محقق می‌سازد.

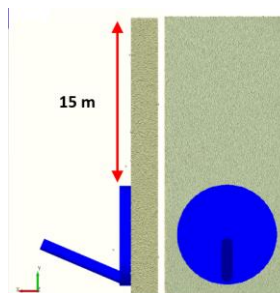
### ۳-۳. پارامترهای راهبری دستگاه

جدول (۳) پروتوکل حفاری تونل را در مدل‌سازی نشان می‌دهد که از میانگین‌گیری و تحلیل آماری پروتوکل حفاری در حداقل ایستگاه خرازی تا کهنه‌دژ بدست آمده است.

جدول (۳). پارامترهای راهبری دستگاه در مدل‌سازی

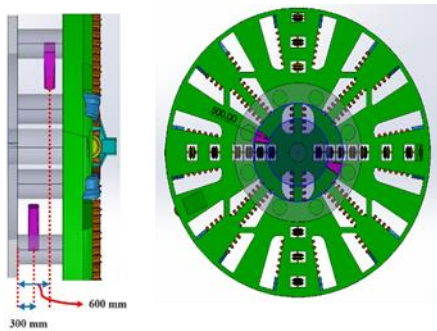
پارامتر	مقدار	واحد
سرعت دوران کاترهد	۲	دور بر دقیقه
سرعت دوران نوارنقاله ماریج	۴٫۷	دور بر دقیقه
سرعت پیشروی	۲۴	میلی‌متر بر دقیقه

پس از اختصاص پارامترهای مدل اولیه آماده ران می‌باشد. سربار تونل ۱۵ متر در نظر گرفته شده است (شکل (۸)).



شکل (۸). اختصاص سربار به مدل EDEM

گرفته می‌شود و با چرخش کاترهد به برهم زدن سکون مصالح در ناحیه محصورشده توسط بازویی‌ها می‌تواند کمک کند. فاصله کاترپلیت تا پشت کاترهد ۸۴۷٫۵ میلی‌متر می‌باشد. به‌منظور پوشش مناسب این ناحیه دو عدد میکسینگ‌بار در فواصل عرضی متفاوت ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌متر از کاترپلیت نصب می‌شوند (شکل (۱۴)) ۵۴۰ میلی‌متر از لبه بازویی ارتفاع دارند و همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است انتهای مداری که دور می‌زند به اندازه ۵۰۰ میلی‌متر از قطر داخلی فلنج فاصله دارد. موقعیت و ابعاد این میکسینگ‌بار به‌گونه‌ای لحاظ شده است که ماکزیمم مدار ممکن را پوشش دهد و درعین‌حال ممانعتی برای تعویض ابزار و ورود مصالح از بازوها و باکس دیسک‌ها به داخل فضای چمبر ایجاد نکند. همچنین به‌منظور حفظ تقارن کاترهد دو میکسینگ‌بار کاملاً روبروی هم و قرینه هم می‌باشند و خط واصل آن‌ها دقیقاً از مرکز کاترهد عبور می‌کند.

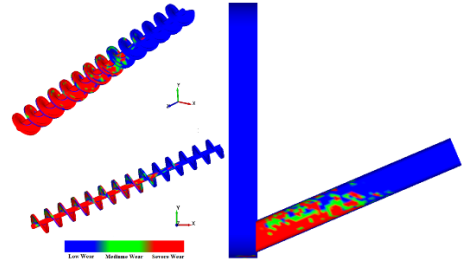


شکل (۱۴). طرح دوم میکسینگ بار

برای سنجش میزان کارایی میکسینگ‌بارهای طراحی شده باید وضعیت سرعت ذرات را در ناحیه محصورشده بین بازویی‌ها و در کل چمبر مورد بررسی قرار داد.

شکل (۱۵) نمودار متوسط سرعت ذرات را در ناحیه‌ی محصورشده بین بازویی‌ها برای حالت عادی و طرح اول بهینه‌شده نشان می‌دهد و شکل (۱۶) نمودار متوسط سرعت ذرات را در ناحیه‌ی محصورشده بین بازویی‌ها برای حالت عادی و طرح دوم بهینه‌شده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در طرح اول با وجود این که در بیشتر مدت‌زمان حفاری نمودار متوسط سرعت ذرات در ناحیه‌ی محصورشده بین بازویی‌ها بالاتر از نمودار متوسط سرعت ذرات در ناحیه‌ی محصورشده بین بازویی‌ها برای حالت بهینه نشده قرار دارد اما در مقایسه با طرح دوم که بهبود چشمگیری در افزایش متوسط سرعت ذرات تا ۵ الی ۶ برابر مشاهده می‌شود، عملکرد ضعیف‌تری را نشان می‌دهد که این نوع تفاوت عملکرد را می‌توان به سرعت خطی کمتر محل نصب میکسینگ‌بار طرح اول بهینه‌شده نسبت به طرح دوم و مدار و ناحیه تأثیر متفاوت در دو حالت بهینه‌سازی شده نسبت داد. شکل (۱۷) به‌صورت مجزا متوسط سرعت ذرات در ناحیه‌ی

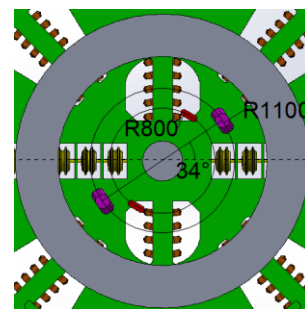
شکل (۱۲) الگوی سایش نوارنقاله ماریچج و پوسته آن را نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود که در نواحی نزدیک به چمبر سایش بیشتر و با فاصله گرفتن از آن از سایش کاسته می‌شود.



شکل (۱۲). الگوی سایش نوارنقاله ماریچج

### ۳-۶. راهکارهای بهینه‌سازی

در طرح اول با توجه به این که میدان سرعت ذرات همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است با حرکت به سمت مرکز دستگاه سرعت ذرات کاهش می‌یابد بنابراین هرچه میکسینگ‌بار جدید به ناحیه مرکزی نزدیک‌تر باشد برهم‌زدن سکون و راکد بودن مصالح بهتر صورت می‌گیرد. در شکل (۱۳) میکسینگ‌بار واقع بر روی کاترپلیت که با رنگ قرمز نشان داده شده است بر روی مدار شعاعی ۸۰۰ میلی‌متر و میکسینگ‌بار جدید مدار شعاعی ۱۱۰۰ میلی‌متر را دور می‌زند. با انتخاب این مدار میکسینگ‌بار واقع بر روی کاترپلیت و میکسینگ‌بارهای متحرک جدید با فاصله ۱۵ سانتی‌متر از مجاورت یکدیگر عبور می‌کنند که عدد مناسبی می‌باشد و انتخاب مداری نزدیک‌تر عبور مصالح از بین دو میکسینگ‌بار را مشکل‌ساز می‌کند. اضافه کردن عضوی به کاترهد باید به‌گونه‌ای باشد که تقارن و مرکز ثقل کاترهد را تا حد امکان برهم نزند، از این رو تعداد دو میکسینگ‌بار به‌صورت کاملاً متقارن و روبروی هم در قسمتی از کاترهد که فضای خالی بیشتری وجود دارد و ممانعتی برای تعویض ابزار و ورود مصالح از بازوها به داخل فضای چمبر ایجاد نمی‌کند نصب می‌شود. زاویه ۳۴ درجه نشان داده شده در شکل (۱۳) با لحاظ این موارد انتخاب شده است.

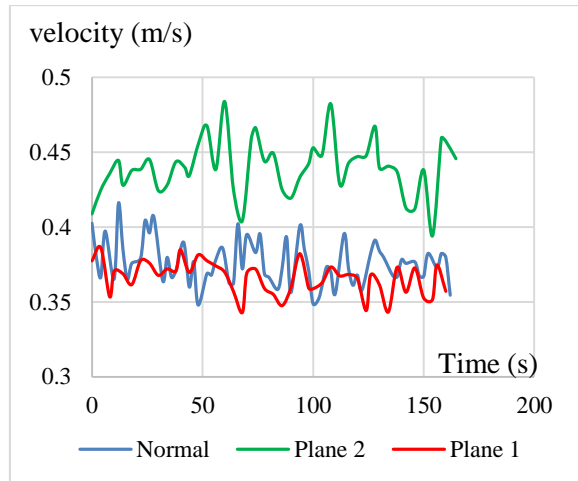


شکل (۱۳). مدلسازی اسلامپ

در طرح دوم محل نصب میکسینگ‌بار روی بازویی‌ها در نظر



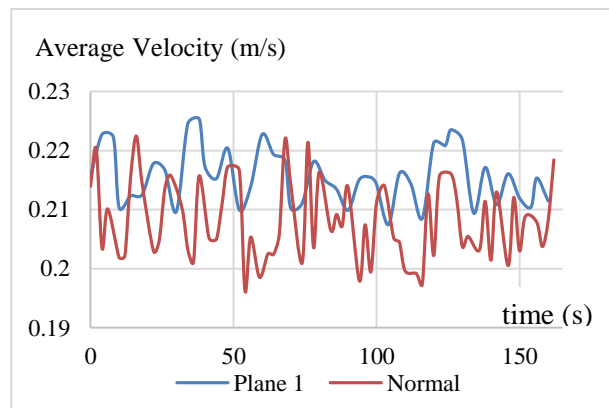
طرح دوم بهبود قابل توجهی را نشان می‌دهد حال آنکه طرح اول میدان سرعت ذرات تفاوت قابل ملاحظه‌ای را با حالت بهینه‌سازی نشده نشان نمی‌دهد.



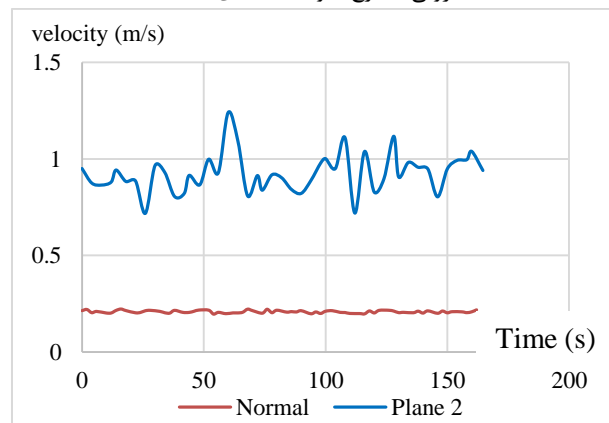
شکل (۱۸). نمودار سرعت متوسط ذرات در کل چمبر طرح ۱ و ۲ و حالت عادی

به منظور برطرف کردن سکون مصالح در یک سوم پایینی فضای چمبر استفاده از واترجت پیشنهاد می‌شود. موقعیت نصب واترجت‌ها در شکل (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است تعداد ۵ عدد واترجت با فاصله مرکز تا مرکز ۲۵ سانتی‌متر از هم در موقعیت مشخص شده در شکل (۱۹) با زاویه‌ی ۵۶ درجه نسبت به امتداد قائم که مانعی برای نصب شلنگ ایجاد نمی‌کند به صورت متقارن در دو طرف چمبر نصب می‌شود. جهت پاشش فوم و آب باید تا حد امکان به گونه‌ای لحاظ شود تا هم نواحی مرکزی که درگیر کلاگینگ هستند را پوشش دهد و هم بازشوهای کاترهد را به هنگام عبور از مسیر واترجت تمیز کند و خاک و مصالح را برای عمل‌آوری و انتقال مناسب پودر کند. شکل (۲۰) جهت پیشنهادی پاشش واترجت را نشان می‌دهد. با چرخش کاترهد و عبور باکس دیسک‌ها از مقابل واترجت کلاگینگ خاک اطراف تیغه دیسک تا حدود بسیار زیادی کاهش خواهد یافت.

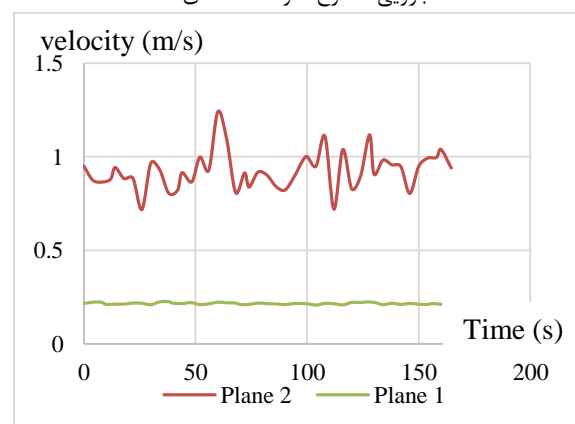
محصور شده بین بازویی برای دو طرح را با هم مقایسه می‌کند.



شکل (۱۵). نمودار سرعت متوسط ذرات در ناحیه محصور شده بین بازویی‌ها طرح ۱ و حالت عادی



شکل (۱۶). نمودار سرعت متوسط ذرات در ناحیه محصور شده بین بازویی‌ها طرح ۲ و حالت عادی



شکل (۱۷). نمودار سرعت متوسط ذرات در ناحیه محصور شده بین بازویی‌ها طرح ۱ و ۲

شکل (۱۸) متوسط سرعت ذرات در کل فضای چمبر را برای حالات مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود به طریقی مشابه متوسط سرعت ذرات درون چمبر در

[۲] LCPC, (1990). LCPC Abrasivimeter Standard. Normalisation Francaise P18-579. NILSEN, B., Dahl, F., Holzhäuser, J., & Raleigh, P. (2006b). Abrasivity testing for rock and soils. T & T international, (AVR), 47-49.

[۳] LCPC, (1990). LCPC Abrasivimeter Standard. Normalisation Francaise P18-579. NILSEN, B., Dahl, F., Holzhäuser, J., & Raleigh, P. (2006b). Abrasivity testing for rock and soils. T & T international, (AVR), 47-49.

[۴] Nilsen, B., Dahl, F. E., Holzhauser, J., & Raleigh, P. (2006a). Abrasivity of soils in TBM tunnelling. Tunnels & Tunnelling International.

[۵] Thuro, K., Singer, J., Kasling, H., & Bauer, M. (2007, January). Determining abrasivity with the LCPC test. In 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.

[۶] Thuro, K., & Käsling, H. (2009). Classification of the abrasiveness of soil and rock. Klassifikation der Abrasivität von Boden und Fels. Geomechanics and Tunnelling, 2(2), 179-188.

[۷] Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P. D., Nilsen, B., & Grøv, E. (2012). Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method. Tunnelling and Underground Space Technology, 28, 150-158.

[۸] Gharahbagh, E. A., Rostami, J., & Talebi, K. (2014). Experimental study of the effect of conditioning on abrasive wear and torque requirement of full face tunneling machines. Tunnelling and Underground Space Technology, 41, 127-136.

[۹] Rostami, J., Gharahbagh, E. A., Palomino, A. M., & Mosleh, M. (2012). Development of soil abrasivity testing for soft ground tunneling using shield machines. Tunnelling and Underground Space Technology, 28, 245-256.

[۱۰] Jakobsen, P. D., Langmaack, L., Dahl, F. E. B., & Breivik, T. (2012). Predicting the abrasivity of in-situ like soils. Tunnels and Tunnelling International, 6, 41-46.

[۱۱] Jakobsen, P. D., & Lohne, J. (2013). Challenges of methods and approaches for estimating soil abrasivity in soft ground TBM tunnelling. Wear, 308(1), 166-173.

[۱۲] Barzegari, G., Uromeihy, A., & Zhao, J. (2013). A newly developed soil abrasion testing method for tunnelling using shield machines. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 46(1), 63-74.

[۱۳] Tanaka, J., 2005. Visualizing excavated soil flow in the cutter chamber of a large earth pressure balanced shield. International Forum on Tunneling, Shanghai.

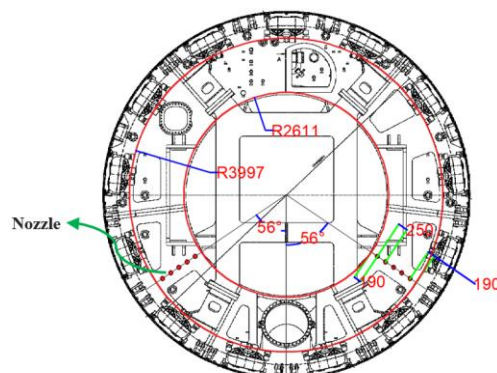
[۱۴] Wang, H.X., Fu, D.M., 2006. Mathematical model and the related parameters for EPB shield tunnelling. Tumu Gongcheng Xuebao 39, 86-90.

[۱۵] Wang, H.X., 2012. Influence of aperture ratio of cutterhead of EPB shield on earth pressure in the chamber. Chinese J. Undergr. Space Eng. 8 (1), 89-93.

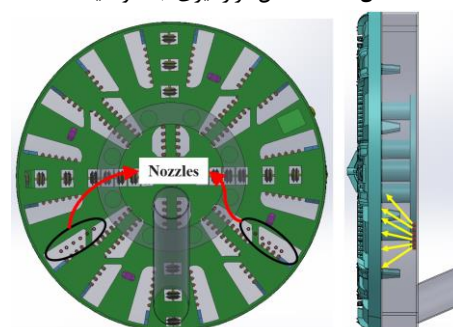
[۱۶] Lamborghini, A., Rodriguez, M.L., Castellanza, R., 2012. Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanised excavations. Comput. Geotech. 40, 97-113.

[۱۷] Manuel, J.M.M., Rodriguez, L.E.M., 2005. Discrete numerical model for analysis of earth pressure balance tunnel excavation. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 131 (10), 1234-1242.

[۱۸] Wu, L., Guan, T.M., 2010. Discrete element model for analysis of chamber pressure of earth pressure balance shield machine. Int. Conference Mech. Automat. Control Eng. 671-674.



شکل (۱۹). محل قرارگیری جت واشینگ



شکل (۲۰). نحوه پوشش دهی جت واشینگ

#### ۴. نتیجه گیری

۱- نتایج مدل عددی ضعف دستگاه در میدان سرعت ذرات در ناحیه محصورشده بین بازویی‌ها و یک سوم پایینی چمبر را نشان می‌داد که این محدوده از پتانسیل بالای کلاکینگ برخوردار است و تأثیر خود را بر روی سایش ابزار مرکزی شامل دیسک‌کاتر، نایف گذاشته بود.

۲- دو طرح اضافه کردن میکسینگ بار ارائه و در نرم افزار EDEM مدل‌سازی شد و نتایج نشان داد که در طرح دوم که میکسینگ‌بار بر روی بازویی‌های دستگاه نصب شدند، سرعت متوسط ذرات را در ناحیه بحرانی گاه‌ها تا ۵ برابر بهبود یافت و طرح اول بهبود قابل توجهی را در بهبود میدان سرعت ذرات در این ناحیه نشان نداد.

۳- الگوی سایش کاترهد در مدل نشان داد که سایش با افزایش فاصله شعاعی از مرکز افزایش می‌یابد و حاشیه کاترهد در مقایسه با نواحی مرکزی سایش بیشتری را تجربه می‌کند و نیاز به تقویت در برابر سایش در نواحی محیطی بیش‌تر احساس می‌شود.

#### ۵. مراجع

[۱] Zaveh, R., Mir Mehrabi, H., Masoumi, G., & Shamsi, H. (2022). Investigation of Durability Increasing of the Ripper in Dealing with Hard Boulders. Construction Sciences and Techniques, 3(2), 31-39. (In Persian)

- [۱۹] Chen, R.P., Tang, L.J., Ling, D.S., et al., 2011. Face stability analysis of shallow shield tunnels in dry sandy ground using the discrete element method. *Comput. Geotech.* 38 (2), 187–195.
- [۲۰] Zhang, Z.X., Hu, X.Y., Scott, K.D., 2011. A discrete numerical approach for modeling face stability in slurry shield tunneling in soft soils. *Comput. Geotech.* 38, 94–104.
- [۲۱] Xu, Z.J., 2012. Numerical simulation and experimental study of rock breaking mechanism by shield machine cutters. Ph.D. thesis. Central South University, pp. 25–80 (in Chinese).
- [۲۲] Wu, L., Guan, T.M., Lei, L., 2013. Discrete element model for performance analysis of cutterhead excavation system of EPB machine. *Tunnel. Undergr. Space Technol.* 37, 37–44.
- [۲۳] Glenn, M., Mustafa, A., 2011. Discrete element method to predict soft ground cutterhead performance. In: *2011 Rapid Excavation and Tunneling Conference*, pp. 1058–1067.
- [۲۴] Wu, L., Guan, T., & Lei, L. (2013). Discrete element model for performance analysis of cutterhead excavation system of EPB machine. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37, 37-44.
- [۲۵] Jiang, M., & Yin, Z. Y. (2014). Influence of soil conditioning on ground deformation during longitudinal tunneling. *Comptes Rendus Mecanique*, 342(3), 189-197.
- [۲۶] Lee, C., Chang, S. H., Choi, S. W., Park, B., Kang, T. H., & Sim, J. K. (2017). Preliminary study on a spoke-type EPB shield TBM by discrete element method. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 19(6), 1029-1044.
- [۲۷] Lee, G. J., Kwon, T. H., & Kim, H. (2019). DEM-based numerical study on discharge behavior of EPB-TBM screw conveyor for rock. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 21(1), 127-136.
- [۲۸] Qu, T., Wang, S.H., Fu, J., Hu, Q., Zhang, X.; Numerical Examination of EPB Shield Tunneling–Induced Responses at Various Discharge Ratios, *J. Perform. Constr. Facil.* 33(3), 2019.
- [۲۹] Hu, X., He, C., Lai, X., Walton, G., Fu, W., Fang, Y.; DEM-based study of the disturbance in dry sandy ground caused by EPB shield tunneling, *Tunnelling and Underground Space Technology* (101), 2020.
- [۳۰] Zhu, H., Panpan, C., Xiaoying, Z., Yuanhai, L., Peinan, L.; Assessment and structural improvement on the performance of soil chamber system of EPB shield assisted with DEM modeling, *Tunnelling and Underground Space Technology* (96), 2020.
- [۳۱] Park, B., Lee, C., Choi, S. W., Kang, T. H., & Chang, S. H. (2021). Discrete-Element Analysis of the Excavation Performance of an EPB Shield TBM under Different Operating Conditions. *Applied Sciences*, 11(11), 5119.
- [۳۲] Cheng, P.P., Zhuang, X.Y., Zhu, H.H., et al., 2019. The construction of equivalent particle element models for conditioned sandy pebble. *Appl. Sci* 9 (6), 1137.
- [۳۳] Ma, T., 2016. Study on particle flow and ground settlement control of earth pressure balance shield tunneling in sandy pebble stratum based on the DEM. Master thesis. Jiaotong University, Beijing, pp. 46 (in Chinese).