مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
بهار و تابستان ۱۳۹۳، جلد هفتم، شماره ۱ و۲، صفحه ۹۳ تا ۹۹

یادداشت فنی

طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری چسبناکی خاک رسی به سطح فلز و بررسی تکرارپذیری نتایج آن

امیر خبازی [۱*]، محمد غفوری [۲] ، اکبر چشمی [۳]، یونس کرمی ازندریانی [٤]

دریافت مقاله: ۹۲/۰۹/۰٦ پذیرش مقاله: ۹۳/۰۵/۱٦

چکیده

کلاگینگ (Clogging) یا انسداد یکی از مشکلاتی است که در حفاری تونل با دستگاه TBM به دلیل چسبیدن زمین‌های رسی به پیشانی برشی و ابزار تخلیه دستگاه‌ها در سطوح مختلف رخ می‌دهد. مرور طرح‌های ارزیابی ارائه شده و ابزار ابداعی به کار گرفته شده جهت اندازه‌گیری چسبناکی خاک و برآورد پتانسیل کلاگینگ، دستگاه جدایش پیستون را از میان روش‌های پیشنهادی کارا و مستعد توسعه نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر دستگاه جدایش پیستون برای اندازه‌گیری چسبناکی خاک رسی به سطح فلز و تعیین وقوع یا عدم وقوع انسداد طراحی و ساخته شد. سپس به منظور بررسی عملکرد دستگاه و اطمینان از نتایج به دست آمده از خروجی‌های دستگاه، مقدارچسبناکی (Adhesion) بین سطوح فلزی و ماده‌های طبیعی و مصنوعی (آب، عسل، چسب‌آهن و خاک رس) اندازه‌گیری گردید. نمودارهای رفتار جمعی و روش‌های آماری دقت و تکرارپذیری نتایج آزمایش‌ها را تأیید نمود.

کلید واژه‌ها: *خاک رس، چسبناکی، کلاگینگ، TBM*

۱. دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، amirkhabbazi@gmail.com
۲. استاد گروه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
۳. استاد یار زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تهران
٤. کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانش آموخته دانشگاه تهران
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

در حفاری مکانیزه تونل در خاک‌های رسی، چسبناکی (Adhesion) باعث وقوع کلاگینگ(Clogging) در سطوح مختلف شده و در بالاترین سطح آن منجر به گیر افتادن TBM و توقف کامل پروژه می‌شود(Thewes and Burger, 2005). تونل آنریوارپ (Anrewarp) کشور هلند و تونل هینرود دوم (Second Heineroord) در خاک‌های رسی و تونل آبیسور(Abey Sewer) در انگلستان در تشکیلات گلسنگی، مثال‌هایی از تجربه وقوع مشکل کلاگینگ می‌باشند (Kooistra, 1998; Atkinson, 2003). شناسایی احتمال وقوع کلاگینگ توسط متخصصین زمین‌شناسی و ژئوتکنیک این امکان را میسر می‌سازد که برخی پیش‌بینی‌های لازم جهت مقابله با آن فراهم گردد (Thewes and Burger, 2005). رخداد کلاگینگ حاصل چهار مکانیسم، چسبناکی ذرات رسی به سطح ماده، ایجاد انسداد پل مانند در محل حفرات، چسبندگی ذرات رسی به هم دیگر و تمایل کم ذرات رسی به حل شدن در آب می‌باشد(Thewes, 1999). کویزیسترا (Kooistra, 1999) معتقد است که نیروی چسبناکی حاصل دو بخش چسبناکی قائم و مماسی است. اولین مشکل حاصل از چسبناکی در صنعت کشاورزی و عمل شخم‌زنی با خیش رخ داده و مطالعه آن از سال ۱۸۳۸ آغاز شده است. اولین مطالعات مرتبط با صنعت ساخت نیز در سال ۱۹٦۰ وقوع یافته و مطالعات جامع‌تر در ارتباط با تونل‌سازی از سال ۱۹۹۰ آغاز شده است (Sass and Barbaum, 2008). Thewes (1999) با استفاده از داده‌های تونل‌هایی که کلاگینگ در آنها رخ داده، معیاری بر اساس شاخص خمیری و شاخص غلظت(I_c) ارائه کرده است. شاخص غلظت طبق رابطه(۱) نمایانگر وضعیت خمیری خاک در شرایط رطوبتی تعریف شده است. همچنین Geodata (1995) نیز تقسیم‌بندی مشابهی را بر اساس شاخص خمیری و درصد رطوبت خاک‌ها ارائه نموده است.

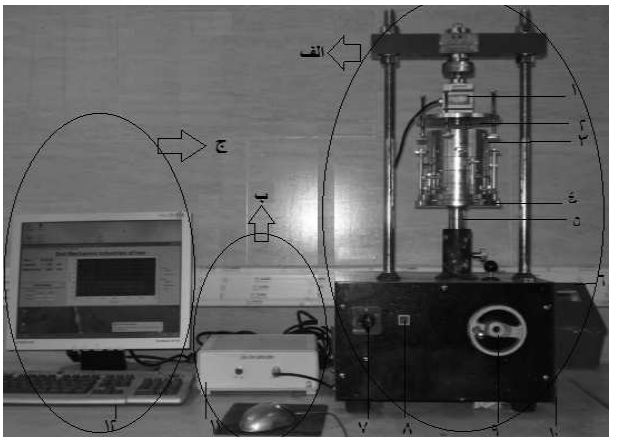
(۱) (ω_l حد روانی، ω_p حد خمیری و ω_n درصد رطوبت خاک)

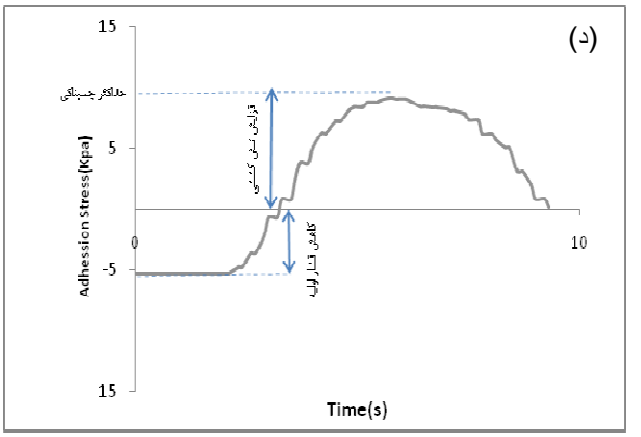
$$I_c = \omega_l - \omega_n / \omega_l - \omega_p$$

آزمایش‌های به کار گرفته شده جهت اندازه‌گیری مستقیم عبارتند از آزمایش برش مستقیم تغییر یافته، (Kooistra, 1998; Suba et al., 2002)، تست گوی (Ball test)، (Spangoli, 2009)، لغزش (Sliding)، (Spangoli, 2009)، آزمون پرّه (Blade test)، (Spangoli, 2009)، آزمون خروج مخروط (Cone pull out)، (Spangoli, 2009)، آزمون تیلت (Tilt Plate)، چسبناکی به تیغه میکسر(Mixing Test)، آزمون صفحه برشی(Shear Plate Apparatus)،(Zumusteg and Puzrin, 2012). لزوم پیدایش و استانداردسازی آزمون اندازه‌گیری چسبناکی خاک‌ها و عدم اثبات کارایی برای روش‌های موجود به علل مختلف از جمله عدم تعریف دقیق پارامترها، عدم سادگی و قابلیت انجام در آزمایشگاه‌های ژئوتکنیک به صورت ساده و سریع، دارا نبودن قابلیت ارجاع به پارامترهای استاندارد خاک و عدم شفافیت بالا مسیر مطالعات را به ترجیح ابزاری که شرایط بیشتری را تأمین کرده باشد سوق می‌دهد. دستگاه جدایش پیستون به علت بیشترین تطابق با ملزومات مدنظر از قبیل اندازه‌گیری چسبناکی قائم، قابلیت نمایش وقوع کلاگینگ در صورت رخ دادن آن و ارائه اعداد مناسب در ادبیات فنی به عنوان ابزار مناسب تشخیص داده شده و تحقیق حاضر با هدف طراحی و ساخت دستگاه مذکور برنامه‌ریزی شد. بر این اساس پس از طراحی و ساخت دستگاه به منظور اثبات کارایی و تکرارپذیری نتایج آزمایش‌هایی بر روی مواد مختلف (آب، عسل، چسب و خاک) انجام گردید.

۲. طراحی و ساخت دستگاه جدایش پیستون

اساس کار دستگاه عبارت از اتصال یک سطح فلزی به سطح خاک چسبنده و اندازه‌گیری نیروی لازم برای جدایش سطح فلز از سطح خاک می‌باشد. بر این اساس دستگاه از سه بخش اصلی، واحد اعمال نیرو، واحد ثبت داده‌ها و واحد ذخیره و پردازش داده‌ها تشکیل شده است. بخش‌های اصلی دستگاه در شکل۱ نشان داده شده است. پارامتر اندازه‌گیری شونده توسط دستگاه مذکور نیروی چسبناکی قائم و یا در واقع نیروی کششی لازم برای جدا کردن دو ماده از هم در سطح عمود می‌باشد. سطح چسبنده به خاک عبارت از یک استوانه فولادی با زبری سطح ۲ میکرومتر است که با عنوان پیستون چسبنده از آن یاد می‌شود.





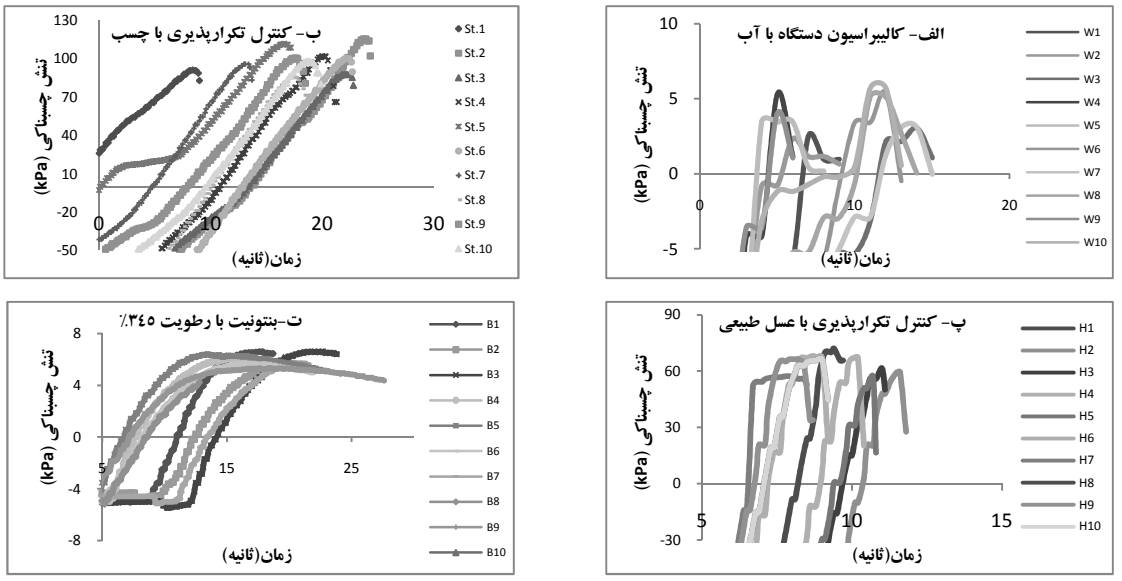
شکل ۱ . دستگاه اندازه‌گیری چسبناکی: الف- واحد اعمال نیرو، ب- واحد ثبت داده‌ها و ج- واحد ذخیره و پردازش د- نمونه‌ای از خروجی دستگاه (نمودار تغییرات چسبناکی در مقابل زمان (خاک بنتونیت ω=80%) است. واحد اعمال نیرو خود شامل ۱- سلول فشارسنج، ۲- پیستون، ۳- سیلندر نمونه، ٤- صفحه متحرک، ٥ - شفت انتقال نیرو، ٦- تنظیم سرعت، ۷- کلید نیرو، ۸- تنظیم جهت حرکت، ۹- اهرم دستی حرکت، ۱۰- قاب فلزی موتور

دستگاه شامل سه بخش اصلی است: الف) واحد اعمال نیرو: عبارت از یک چهارچوب دربردارنده موتور و گیربکس بوده که نیروی لازم برای حرکت پیستون چسبنده را تأمین می‌کند، این سیستم قابلیت اعمال نیرو تا ۱۰۰ کیلوگرم را داراست که در ابعاد آزمایشگاهی امکان اندازه‌گیری تنش تا ۲۰۰ کیلوپاسکال را با دقت ۰/۱ کیلوپاسکال میسر می‌سازد. یک تبدیل‌کننده (Inverter) قابلیت تغییر سرعت اعمال نیرو بین ۱ تا ۹ میلی‌متر بر دقیقه را فراهم می‌نماید. ب) واحد تبدیل داده: یک دیتالاگر برای قرائت داده‌های فشارسنج و جابجایی قائم در نظر گرفته شده که داده‌ها را از طریق کابل به واحد ذخیره و پردازش داده‌ها منتقل می‌کند. ج) واحد ذخیره داده: یک سیستم رایانه به منظور ذخیره داده‌ها از طریق کابل به دیتالاگر متصل شده است. نرم‌افزار مربوط به دیتالاگر بر روی این سیستم نصب شده و از این طریق کنترل دیتالاگر از قبیل کالیبراسیون، تغییرات میزان قرائت، شروع و پایان قرائت داده امکان‌پذیر شده است. علاوه بر آن نرم‌افزار مذکور به نوعی طراحی شده است که امکان نمایش نمودار تغییرات نیرو با زمان در حین انجام آزمایش را فراهم می‌نماید. تغییرات نیروی کششی(برای جدایش پیستون از سطح ماده) در مقابل زمان در فواصل ۰.۱ ثانیه‌ای اندازه‌گیری شده و نمودار تنش کششی (که از تقسیم نیرو بر سطح پیستون قابل حصول است) در مقابل زمان ترسیم میگردد. نمودار مذکور دارای یک نقطه پیک است که بعنوان حداکثر تنش لازم برای جدایش پیستون از خاک یا همان چسبناکی در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۱-د یک نمونه از نمودارهای به دست آمده از این آزمایش نشان داده شده است.

۳. عملکرد دستگاه و تکرارپذیری آزمایش‌ها

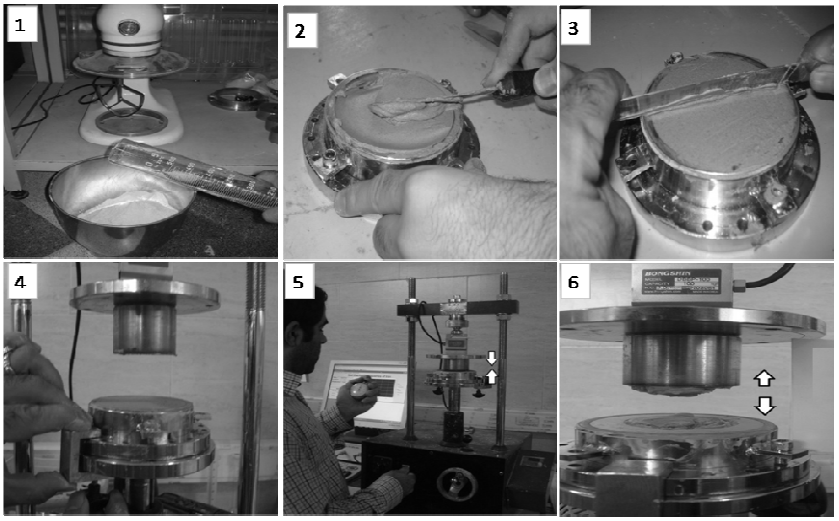
برای کنترل عملکرد دستگاه و بررسی تکرارپذیری نتایج آن، آزمایش با استفاده از چهار ماده با خصوصیات چسبناکی متفاوت شامل آب به عنوان یک مایع کم چسبناک، چسب مایع (چسب آهن رازی) و عسل (عسل فروشگاهی خوانسار) به عنوان دو ماده چسبناک به ترتیب مصنوعی و طبیعی با چسبناکی متفاوت و خاک رس خمیری (بنتونیت فرآوری شده) به عنوان ماده چسبناک هدف آزمون مورد استفاده قرار گرفتند. در آزمایش‌های آب، چسب و عسل طبیعی نمودار تغییرات چسبناکی با زمان برای جدایش دو سطح فلزی که لایه‌ای نازک از ماده چسبناک با ضخامت تقریبی ۳ میلی‌متر

(به علت حالت مایع و مقاومت برشی پایین ضخامت کم به کار گرفته شد) بین آنها قرار گرفته، ترسیم گردید. این آزمایش‌ها با شرایط یکسان ۱۰ مرتبه تکرار و نمودارهای چسبناکی- زمان مربوط به این آزمایش‌ها در شکل ۲ ارائه شده است. علاوه بر آن خلاصه نتایج به دست آمده از این آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. میانگین چسبناکی اندازه‌گیری شده برای آب برابر ٤.٥ کیلو پاسکال می‌باشد، که با مقادیر گزارش شده توسط ساس و باربام (Sass and Barbaum, 2008) تناسب خوبی دارد. مطابق با میانگین نتایج ارائه شده در جدول ۱ چسبناکی برای چسب آهن و عسل به ترتیب حدود ۹۵ و ٦٥ کیلوپاسکال اندازه‌گیری گردیده است. پس از کنترل عملکرد دستگاه توسط مواد یکنواخت، با توجه به تفاوت رفتار خاک با مواد مصنوعی و همچنین ملاحظه این امر که دستگاه ساخته شده بایستی برای اندازه‌گیری چسبناکی در خاک به کار گرفته شود، آزمایش بر روی نمونه بنتونیت فرآوری شده با حد روانی LL=٪٤٧٠ و حد خمیری PL=٪۷۰ انجام شد. بر اساس ظاهر نمونه به نحوی‌که نمونه تهیه شده شکل چسبنده و خمیری داشته باشد، نمونه‌ای با درصد رطوبت ۳٤٥ ٪ انتخاب گردید.آزمایش‌ها در دمای محیط آزمایشگاه انجام گرفتند. نمونه‌ها پس از اضافه کردن آب مقطر برای رسیدن به درصد رطوبت مدنظر در میکسر به مدت ۱۵ دقیقه مخلوط شده و سپس بازسازی نمونه در داخل استوانه نمونه با دانسیته مورد نظر انجام گرفت. دانسیته به نحوی انتخاب شد که بازسازی نمونه و انجام آزمایش آسانتر انجام گیرد و بدین منظور از طریق سعی و خطا مقدار دانسیته ۱/٦ گرم بر سانتی‌متر مربع برای بازسازی نمونه‌ها در نظر گرفته شد. نمونه در لایه‌های کم ضخامت اضافه شده و از به دام افتادن هوا در داخل نمونه جلوگیری به عمل آمد. به علت تغییر رطوبت سریع در سطح نمونه انجام آزمایش بلافاصله پس از ساخت نمونه انجام گردید. سطح نمونه به صورت صاف و مسطح درآمده و نمونه در دستگاه قرار داده شد. ظرف نمونه توسط گیره به سطح نگهدارنده متصل شده و با حرکت رو به بالای سطح نگهدارنده‌ی نمونه اتصال بین خاک و سطح پیستون برقرار گردید. در نهایت بعد از سپری شدن زمان مشخص (زمان اتصال) با حرکت رو به پایین سطح نگهدارنده نمونه از پیستون جدا شده و نیروی لازم برای این جدایش به صورت ممتد توسط دیتالاگر ثبت گردید.



شکل۲. نمودارهای مربوط به تغییرات چسبناکی- زمان: (الف) لایه نازک آب، (ب) چسب آهن، (پ)عسل طبیعی، (ت)بنتونیت فرآوری شده

مراحل انجام آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. از جمله شرایط متغیر آزمایش سرعت جدایش، فشار وارده بر سطح اتصال و زمان اتصال می‌باشد. سرعت جدایش پیستون مطابق با توصیه توز (Thewes, 2005)، ۵ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. فشاری که ابتدا از طریق پیستون چسبنده بر سطح خاک به منظور برقراری اتصال بین خاک و سطح پیستون اعمال می‌شود فشار اولیه نام‌گذاری شده است. این فشار در آزمون‌های انجام شده طوری انتخاب شد تا بتواند بر روی تمام نمونه‌ها به صورت یکسان وارد شود و مشکل فرو روی پیستون در خاک رخ ندهد بدین منظور پس از سعی و خطا فشار اولیه در تمام آزمون‌ها ۷ کیلوپاسکال منظور شد. زمان اتصال فاصله‌ای است که بین برقراری اتصال تا شروع جدایش سپری می‌شود. در آزمون‌های انجام شده زمان اتصال ۱ دقیقه منظور شده است. در حین جدایش دو حالت ممکن است رخ دهد، چسبیدن حجمی از خاک به پیستون جدا شونده که به عنوان وقوع کلاگینگ آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است و عدم چسبیدن خاک که به عنوان عدم وقوع کلاگینگ منظور شده است.



شکل۳ . مراحل انجام آزمایش اندازه‌گیری چسبناکی خاک رسی، (۱- اضافه کردن آب به خاک و مخلوط کردن آن توسط میکسر، ۲- جای‌گیری نمونه در استوانه نمونه، ۳- تسطیح سطح نمونه، ٤- قرارگیری نمونه در محل صفحه نگهدارنده و اتصال آن به صفحه، ٥- اعمال بار به نمونه طی زمان مشخص، ٦- جدایش پیستون از سطح خاک)

۳-۱. بررسی تکرارپذیری نتایج

هر چند نمودارهای رفتار جمعی ارائه شده برای آزمایش‌های انجام شده روی مواد مختلف تأیید کننده تکرارپذیر بودن نتایج می‌باشد لیکن به منظور بررسی دقیق از روش‌های آماری استفاده شده است. در روش اول ضریب تغییرات برای آزمایش‌های انجام شده محاسبه و در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج به دست آمده برای عسل با ضریب تغییرات۷.۹ یکنواختی بیشتری نسبت به نتایج به دست آمده برای آب و چسب نشان می‌دهد. همچنین یکنواختی نتایج به دست آمده برای بنتونیت که هدف اصلی آزمون می‌باشد، با ضریب یکنواختی ۷.۹ قابل توجه است. این مقدار در مقایسه با ضریب تغییرات قابل قبول برای اندزه‌گیری مقاومت برشی زهکش نشده خاک‌های رسی که بین ۱۳٪ تا ٤۰٪ توصیه شده (Duncan, 2000) مقدار مناسبی بوده و مؤید کارایی دستگاه و آزمون اندازه‌گیری چسبناکی است. در روش دوم از شاخص دقت استفاده شده است (Gill et al., 2005). شاخص دقت (P) از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$p = \frac{M + t_{\beta}\frac{S}{\sqrt{n-1}}}{M - t_{\beta}\frac{S}{\sqrt{n-1}}} \qquad (۲)$$

M میانگین داده‌ها،S انحراف معیار و n تعداد نمونه‌ها می‌باشد.t_β ضریب اطمینان مورد نیاز را بر اساس تعداد نمونه و ضریب تغییرات(C_v) برای سطح اعتماد ۹۵٪ معین می‌سازد. گیل و همکاران برای فعالیت‌های عمرانی ۱.۳۵ ≤P و برای فعالیت‌های پژوهشی ۱.۲≤P را مورد قبول دانسته‌اند (Gill et al., 2005) طبق شاخص دقت‌های ارائه شده در جدول۱، شاخص دقت برای هر ٤ ماده آزمایش شده در حد فعالیت‌های پژوهشی میباشد.

جدول ۱. پارامترهای آماری نتایج آزمایش‌های کنترل تکرارپذیری

نمونه	تنش کششی (kPa)			S			N	P
	حداکثر	حداقل	میانگین					
آب	۵/۷	٤	٤/۹	۰/٦	۱۱/۷	۲/۲٦	۱۰	۱/۲۰
عسل	۷۲/۲	٥٦/۸	٦٤/۸	۵/۱	۷/۹	۲/۲٦	۱۰	۱/۱۳
چسب	۱۱۵/٦	۷٦/۹	۹۵/۵	۱۱/۷	۱۲/۲۹	۲/۲٦	۱۰	۱/۲۰
بنتونیت(ω=345%)	٦/٦	۵/۳	۵/۹	۰/۵	۷/۹۲	۲/۲٦	۱۰	۱/۱۳

N تعدادنمونه- M میانه- S انحراف‌معیار - C_v ضریب تغییرات- t_β ضریب اطمینان – p شاخص دقت

٤. نتیجه‌گیری

عامل ایجاد کلاگینگ چسبناکی بین سطح فلز و خاک‌های رسی است که در حفاری‌های مکانیزه تونل در زمین‌های رسی باعث انسداد می‌گردد. در این تحقیق با توجه به مطالعات قبلی، ابزار ساده آزمایشگاهی تحت عنوان دستگاه جدایش پیستون جهت کمی نمودن و بررسی این پدیده طراحی و ساخته شد. دقت و تکرارپذیری نتایج به دست آمده از آن، با اندازه‌گیری چسبناکی بین سطح فلز با مواد مختلف و تحلیل آماری نتایج بررسی و تأیید گردید.

تشکر و قدردانی

از مهندسین مشاور ساحل، آقایان دکتر محمدرضا نیکودل، مهندس علی برهانی، مهندس هدایت اسدی و مهندس صادق طریق‌ازلی بابت حمایت و مشاوره در خصوص ساخت دستگاه و همکاری تهیه خاک رسی قدردانی می‌شود.

منابع

Atkinson, J.H., Fookes P.G., Miglio B.F., 2003., Destructuring and disaggregation of Mercia Mudstone during full-face tunneling, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 36: 293-303.

Duncan, J.M., 2000. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(4): 307-316.

Fernández-Steeger, T.M., Post, C., Feinendegen, M., Bäppler, K., Zwick, O., Azzam, R., Ziegler, M., Stanjek, H., Peschard, A., Pralle, N., 2008. Interfacial processes between mineral and tool surfaces – causes, problems and solution in mechanical tunnel driving. Geotechnologien Science Report 12: 46-57.

GEODATA, S.P.A., 1995. Review of alternative construction methods and feasibility of proposed methods for constructing Attiko Metro Extension of Line 3 to Egaleo: Attiko Metro S.A., 191–193.

Gill, D.E., Corthesy, R., Leite, M.H., 2005.Determining the minimal number of specimens for laboratory testing of rock properties. Engineering Geology, 78: 29–51.

Kooistra, A., 1998. Verkleving van klei in tunnel boor machines.Memoirs of the Centre of Engineering Geology in the Netherlands, 165, Delft.

Sass, I., Burbaum, U., 2008. A method for assessing adhesion of clays to tunneling machines. Bulletin of Engneering Geology and the Environment, 68:27-34.

Spagnoli, G., Stanjek, H., Fernández-Steeger, T., Feinendegen, M. Azzam, R. 2009. Modification of mechanical behavior of clays for improving TBM tunnel driving. Get Underground, Proceeding of Rock Engineering Seminar, Helsinki, pp. 217-224.

SubbaRao, K. S., Allam, M. M., and Robinson, R. G., 2002. An Apparatus for Evaluating Adhesion Between Soils and Solid Surfaces. Journal of Testing and Evaluation, 30(1): 27–36.

Thewes, M., Burger, W., 2005. Clogging of TBM drives in clay- identification and mitigation of risks, Underground space use: Analysis of the past and lessons for the future, Volume: 1-2. London.

Zumsteg, A., Puzrin, A.M., 2012. Stickiness and adhesion of conditioned clay pastes, Tunnelling and Underground Space Technology, 31: 86–96.