

# بررسی و تحلیل نتایج آزمایش جدایش مخروط در چسبناکی خاک‌های ریزدانه

عاطفه قره شیخ نو (دانشجوی کارشناسی ارشد)

اکبر چشمی\* (دانشیار)

قاسم کاظمی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

جعفر حسن پور (دانشیار)

دانشکده‌ی زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، پردیس علوم

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۸ (درداشت نمی‌دردی ۲ - ۳۵، شماره ۳/۲، ص. ۱۲۹-۱۳۶، یادداشت نمی‌دردی)

زمانی که فلز با خاک در تماس است، احتمال چسبیدن خاک به سطح فلز وجود دارد. دستگاه جدایش مخروط با هدف اندازه‌گیری تنش لازم برای جدایش خاک از فلز طراحی شده است. در این دستگاه مخروطی داخل خاک نفوذ کرده و پس از توقف آن برای زمان مشخص نیروی لازم برای جدایش مخروط از خاک اندازه‌گیری می‌شود. در پژوهش حاضر، پس از ساخت دستگاه جدایش مخروط، با ایده گرفتن از نمونه‌های ساخته شده‌ی قبلی با انجام ۹۰ آزمایش روی یک نمونه خاک رس مونت‌موریلونیت، مقادیر بهینه برای زمان نگهداشت، ۵ دقیقه و سرعت جدایش، ۱۵ سانتی‌متر بر دقیقه تعیین شد. سپس با انجام ۶۰ آزمایش دیگر روی دو نمونه رس کاتولینیت، ضریب تغییرات  $(12.49 \leq C_v \leq 1.4)$  و شاخص دقت  $(1.22 \leq P \leq 1.1)$  محاسبه و مشخص شد که نتایج تکرارپذیر هستند. با افزایش درصد رطوبت، تنش کششی برای هر دو نوع رس کاهش یافت. شیب منحنی تنش کششی - درصد رطوبت برای رس مونت‌موریلونیت ۱/۲۵ و برای کاتولینیت ۰/۸۲ تعیین شد. برای خاک‌هایی با شاخص‌های خمیری متفاوت با افزایش شاخص خمیری، تنش کششی افزایش یافته است.

gharesheykhloo@gmail.com  
a.cheshomi@ut.ac.ir  
ghasemkazemi@ut.ac.ir  
hassanpour@ut.ac.ir

واژگان کلیدی: آزمایش جدایش مخروط، خاک ریزدانه، تنش کششی، درصد رطوبت.

## ۱. مقدمه

چسبناکی<sup>۱</sup> به تمایل اتصال بین دو ذره‌ی متفاوت به همدیگر اطلاق می‌شود. واژه‌ی چسبناکی در مقابل چسبندگی<sup>۲</sup> که به معنای اتصال بین ذرات یک ماده‌ی واحد است، تعریف می‌شود. چسبناکی بین خاک و جسم دیگر می‌تواند حاصل نیروی جذب بین خاک و جسم و اثر آب باشد.<sup>[۱]</sup> ساس و بوربام (۲۰۱۶)،<sup>۳</sup> معتقدند که چسبناکی خاک‌ها به نیروهای موین لایه‌ی نازک بین خاک و سطح جامد وابسته است.<sup>[۲]</sup> با توجه به تعریف ذکر شده، تنش چسبناکی<sup>۴</sup>، تنش لازم برای جداسازی دو ماده‌ی مختلف از سطح مشترک آن‌هاست؛ در حالی که تنش کششی<sup>۵</sup>، بیان‌کننده‌ی مقاومت یک ماده در برابر کشش است. زمانی که یک فلز در تماس با خاک قرار می‌گیرد، هنگام جدا شدن اگر گسیختگی به جای ایجاد در سطح مشترک بین فلز و خاک، درون خاک ایجاد شود، به این معناست که تنش چسبناکی از تنش کششی بزرگ‌تر است.<sup>[۳]</sup>

اولین بار چسبناکی در سال ۱۸۳۸ میلادی، به دلیل چسبیدن خاک به ابزار در کنار پژوهش‌های انجام شده بر روی پروژه‌هایی که با مشکل انسداد مواجه بودند، پژوهشگران زیادی به مطالعه‌ی آزمایشگاهی پدیده‌ی اشاره شده و کمی ساختن آن با ابزارهای طراحی شده‌ی مختلف پرداختند. ساس و بوربام (۲۰۰۹)، برای اندازه‌گیری تنش چسبناکی در مقیاس آزمایشگاهی، دستگاه جدایش پیستون را طراحی و تأثیر

کشاوری بررسی شد. در سال ۱۹۶۰، مطالعاتی در خصوص پدیده‌ی مذکور در صنعت ساختمان گزارش شد، لیکن پژوهش‌های منظم بر روی چسبناکی رس مرتبط با صنعت تونل‌زنی از سال ۱۹۹۰ آغاز شده است.<sup>[۴]</sup> با توجه به وقوع پدیده‌ی انسداد<sup>۶</sup> که محصول چسبیدن خاک به سطوح ابزار برش و انتقال در حفاری مکانیزه است، ژنودیتا (۱۹۹۵)،<sup>۷</sup> براساس شاخص خمیری، حدخمیری و درصد رطوبت، معیاری تجربی برای ارزیابی آن پیشنهاد کرده است.<sup>[۵]</sup> توز و بورگر (۲۰۰۵)،<sup>۸</sup> نیز معیاری براساس شاخص خمیری (PI) و شاخص استحکام (CI) برای ارزیابی خطر انسداد پیشنهاد کردند.<sup>[۶]</sup> با افزایش داده‌های مربوط به تونل‌هایی که به روش مکانیزه حفاری شدند و مشکل انسداد داشتند، هولمن و توز (طی سال‌های ۲۰۱۳ الی ۲۰۱۶)،<sup>۹</sup> معیارهایی تجربی برای ارزیابی خطر انسداد ارائه کردند.<sup>[۷-۹]</sup>

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۳/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۶/۷/۲۴، پذیرش ۱۳۹۶/۱۰/۱۰.

DOI:10.24200/J30.2017.2228.2140



۱ الف) مخروط؛ ۲ الف) چهارچوب در برگیرنده؛ ۳ الف) قالب نمونه؛  
۴ الف) موتور و گیربکس؛ ب) بخش اندازه گیری نیرو؛  
ج) سیستم ثبت و نمایش داده ها.

شکل ۱. بخش‌های مختلف دستگاه جدایش مخروط.



ب) زمان نگهداشت؛

الف) نفوذ کامل مخروط؛



د) اندازه گیری خاک چسبیده شده به مخروط.

ج) خروج مخروط؛

شکل ۲. مراحل انجام آزمایش.

### ۳. روش انجام آزمایش جدایش مخروط

آزمایش جدایش مخروط در چند مرحله به این شرح انجام می‌شود: مرحله اول، نفوذ کامل مخروط با سرعت معین به داخل خاک و ثبت تغییرات نیروی لازم برای فرورفتن مخروط به داخل خاک با زمان (شکل ۲الف). مرحله دوم، توقف مخروط برای مدت زمان معین (زمان نگهداشت) در داخل خاک فرورفته (شکل ۲ب). مرحله سوم، خروج مخروط با سرعت مشخص از خاک و ثبت تغییرات نیرو با زمان در مرحله جدایش (شکل ۲ج). مرحله چهارم، اندازه‌گیری مقدار خاک چسبیده شده به سطح فلز (شکل ۲د). در شکل ۳، نمودار رسم شده از نتایج یک آزمایش به همراه مراحل انجام آزمایش مشاهده می‌شود. با توجه به نمودار اخیر، می‌توان پیشینه‌ی تنش لازم برای نفوذ مخروط (تنش فشاری)، زمان نگهداشت، پیشینه‌ی تنش لازم برای خروج مخروط (تنش کششی یا تنش چسبناکی) را اندازه‌گیری کرد.

برخی پارامترها، مانند: رطوبت، زمان نگهداشت و فشار وارده بر پیستون بر مقدار تنش چسبناکی را بررسی کردند.<sup>[۴]</sup> برخی پژوهشگران نیز با استفاده از دستگاه جدایش پیستون به بررسی تأثیر ماسه در میزان تنش کششی در خاک رس و تأثیر نوع کانی رسی در میزان تنش چسبناکی پرداختند و نشان دادند که نوع کانی رسی، نقش اصلی در مقدار تنش چسبناکی دارد. همچنین یک روش تجربی برای ارزیابی پتانسیل انسداد با استفاده از داده‌های چسبناکی آزمایشگاهی پیشنهاد کردند.<sup>[۱۰-۱۲]</sup> اسپاگنولی و همکاران (۲۰۱۰)،<sup>۱۰</sup> نیز بیان کردند که در آزمایش جدایش پیستون، فقط امکان اندازه‌گیری مؤلفه‌ی نرمال تنش وجود دارد؛ در حالی که در بسیاری از ابزارهای برش، مؤلفه‌ی نرمال و برشی اثر کرده است، لذا آزمایش جدایش مخروط که قادر به اندازه‌گیری هم‌زمان دو مؤلفه‌ی مذکور تنش است، را پیشنهاد کردند. علاوه بر آن مقدار خاک چسبیده شده به سطح فلز را به‌عنوان میزان چسبناکی<sup>۱۱</sup> معرفی کردند.<sup>[۱۳]</sup> همچنین فینیندگان و همکاران (۲۰۱۱)،<sup>۱۲</sup> آزمایش جدایش مخروط را روشی جدید برای بررسی رفتار خاک‌های ریزدانه در رابطه با پدیده‌ی انسداد معرفی و تأثیر برخی محلول‌ها در کاهش چسبیدن خاک به سطح فلز را مطالعه کردند.<sup>[۱۴]</sup> در پژوهش حاضر، با الگو گرفتن از طرح اسپاگنولی و همکارانش، دستگاه جدایش مخروط با هدف اندازه‌گیری تنش کششی، تنش چسبناکی و ارزیابی تجربی وقوع یا عدم وقوع چسبیدن خاک به سطح فلز، طراحی و ساخته شده است. سپس با انجام آزمایش‌های مختلف، ضمن بررسی صحت و تکرارپذیری نتایج به دست آمده، تأثیر برخی عوامل در مقادیر اندازه‌گیری شده بررسی شده است. ضرورت پژوهش حاضر، ساده‌سازی پدیده‌ی چسبیدن خاک به ابزار برش در آزمایشگاه و بررسی برخی عوامل مؤثر در میزان تنش لازم برای جدایش خاک از سطح فلز با در نظر گرفتن مؤلفه‌های نرمال و برشی است.

## ۲. طراحی و ساخت دستگاه جدایش مخروط

دستگاه جدایش مخروط ساخته شده در پژوهش حاضر، شامل ۳ بخش اصلی است:

### ۱.۲. بخش اعمال نیرو

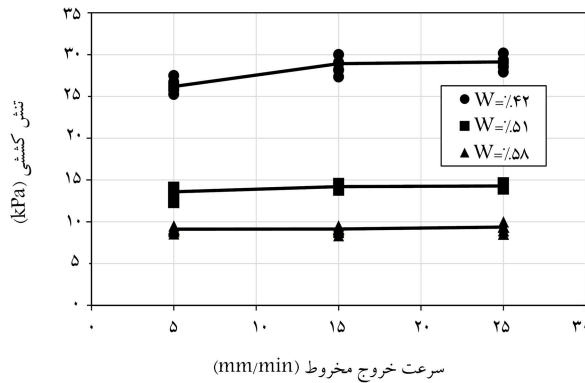
این بخش از یک چهارچوب در بردارنده‌ی موتور، گیربکس و مخروط فلزی تشکیل شده است. یک میبل نیز جهت فراهم کردن امکان تغییر سرعت نفوذ مخروط با ظرفیت ۰/۱ تا ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه در دستگاه تعبیه شده است. مخروط ساخته شده در پژوهش حاضر، زاویه‌ی رأس ۵۸ درجه طبق نظر فینیندگان و همکارانش دارد و از جنس فولاد CK۴۵ آّبکاری شده است.<sup>[۳]</sup>

### ۲.۲. بخش اندازه‌گیری نیرو

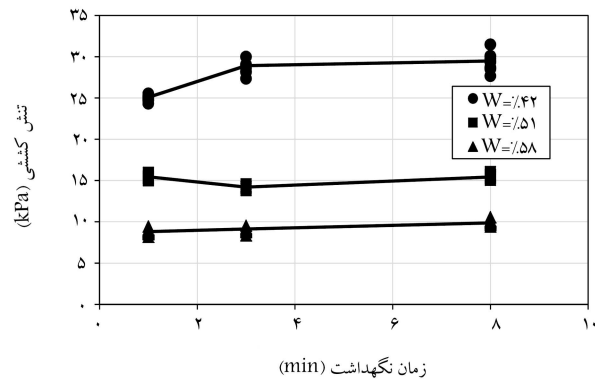
شامل یک سلول اندازه‌گیری نیرو با ظرفیت اندازه‌گیری ۱۰۰ کیلوگرم نیرو و با دقت ۱ گرم است. با سلول ذکر شده، امکان اندازه‌گیری نیروی فشار یا کشش حاصل از نفوذ یا خروج مخروط در خاک فراهم می‌شود.

### ۳.۲. بخش ثبت و نمایش داده‌ها

شامل یک دیتالاگر است که نیروی اندازه‌گیری شده توسط سلول نیرو را با دقت ۱ گرم نمایش می‌دهد. در شکل ۱، بخش‌های مختلف دستگاه ساخته شده در پژوهش حاضر نشان داده شده است.



شکل ۴. نمودار تغییر سرعت جدایش مخروط در برابر تنش کششی برای نمونه‌ی S۱ در درصد رطوبت‌های مختلف.



شکل ۵. نمودار تغییرات زمان نگهداشت در برابر تنش کششی برای نمونه‌ی S۱ در درصد رطوبت‌های مختلف.

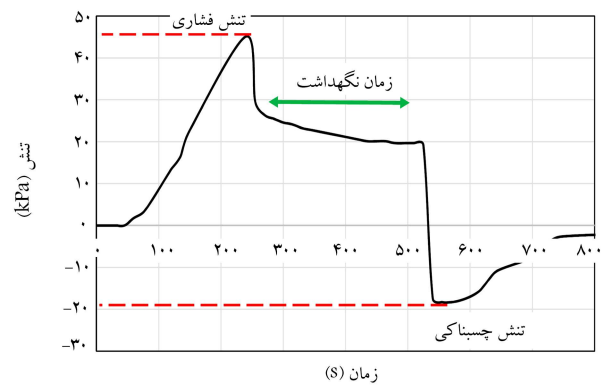
جدایش نیست و می‌تواند به‌عنوان مقدار بهینه برای انجام آزمایش جدایش مخروط در نظر گرفته شود.

#### ۲.۴. تأثیر زمان نگهداشت

هنگامی که مخروط کاملاً وارد خاک می‌شود، پس از گذشت مدت زمان معین، جدایش مخروط از خاک آغاز می‌شود؛ بازه‌ی زمانی مشخص مذکور، زمان نگهداشت نامیده می‌شود. برای بررسی تأثیر زمان نگهداشت در تنش کششی اندازه‌گیری شده آزمایش روی نمونه‌ی S۱ با زمان‌های نگهداشت ۱، ۳ و ۸ دقیقه انجام شد. نتایج آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، شکل ۵ که روند تغییرات تنش کششی در برابر زمان نگهداشت را نشان می‌دهد، ترسیم شده است. که مطابق آن، روند تغییرات تنش کششی با افزایش زمان نگهداشت، روند صعودی دارد؛ لیکن به ازاء زمان نگهداشت بیشتر از ۳ دقیقه، تغییرات آن جزئی است. بر این اساس برای انجام آزمایش‌های بعدی، زمان نگهداشت ۵ دقیقه به‌عنوان زمان بهینه در نظر گرفته شده است.

#### ۵. بررسی تکرارپذیری نتایج به‌دست آمده از آزمایش جدایش مخروط

بعد از تعیین مقادیر بهینه برای زمان نگهداشت و سرعت جدایش مخروط که به‌عنوان دو متغیر در مقادیر تنش کششی اندازه‌گیری شده تأثیرگذار هستند؛ به



شکل ۳. نمودار تنش فشاری و کششی در مقابل زمان برای رطوبت ۵۰٪ مربوط به نمونه‌ی S۲.

جدول ۱. ویژگی‌های نمونه‌های خاک استفاده شده در پژوهش حاضر.

نام نمونه	S۳	S۲	S۱
حد روانی	۴۸	۵۰	۸۳
حد خمیری	۲۹	۳۰	۳۵
شاخص خمیری	۱۹	۲۰	۴۸
طبقه‌بندی متحد	CL	MH	CH

#### ۴. تعیین بهینه‌ی زمان نگهداشت و سرعت جدایش مخروط

زمان نگهداشت و سرعت جدایش مخروط، دو پارامتر مربوط به دستگاه هستند و در مقادیر تنش کششی اندازه‌گیری شده در آزمایش تأثیرگذارند؛ بدین منظور جهت بررسی تأثیر دو متغیر ذکر شده و تعیین مقادیر بهینه برای آن‌ها، یک نمونه خاک رس چاقی (نمونه‌ی S۱) انتخاب شد. مشخصات نمونه‌ی S۱ در جدول ۱ ارائه شده است. با تغییر درصد رطوبت نمونه‌ی S۱، سه نمونه با رطوبت‌های ۴۲، ۵۱ و ۵۸ درصد از آن ساخته شد. سپس آزمایش جدایش مخروط با سه زمان نگهداشت و سه سرعت جدایش مختلف بر روی هر نمونه تولید شده انجام شد. به منظور بررسی تکرارپذیری بودن نتایج، هر آزمایش ۱۰ مرتبه تکرار شد.

#### ۱.۴. تأثیر سرعت جدایش مخروط

آزمایش جدایش مخروط با سه سرعت جدایش مختلف ۵، ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه، بر روی هر نمونه تولید شده از نمونه‌ی S۱ انجام شد. در جدول ۲، نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ی S۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، شکل ۴ ترسیم شده است که تأثیر سرعت جدایش را در مقدار نیروی لازم برای جدایش مخروط از خاک (تنش کششی) نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، هر چند تغییرات جزئی در مقدار تنش کششی در سرعت‌های کمتر از ۱۵ میلی‌متر بر دقیقه وجود دارد، ولی در محدوده‌ی سرعت جدایش بیشتر از ۱۵ تا ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه، تغییر قابل توجهی در مقدار تنش کششی اندازه‌گیری شده مشاهده نشده است. بنابراین می‌توان گفت تنش کششی برای سرعت‌های بیشتر از ۱۵ میلی‌متر بر دقیقه، تابعی از سرعت

جدول ۲. مقادیر تنش کششی به ازاء سرعت جدایش مخروط و درصد رطوبت‌های مختلف با پارامترهای آماری محاسبه شده برای نمونه‌های S۱.

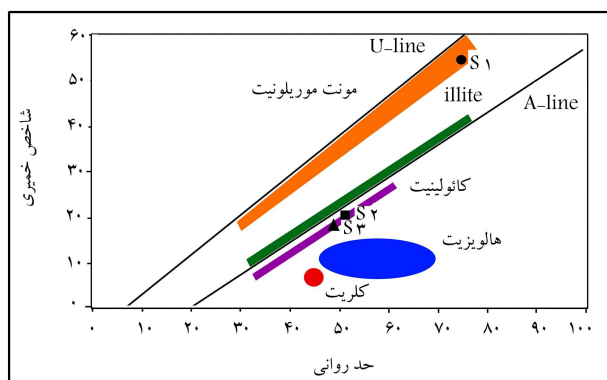
نام نمونه	درصد رطوبت	تنش کششی (kPa)			سرعت جدایش (mm/min)	زمان نگهداشت (min)	N	S	Cv%	t <sub>β</sub>	P
		بیشینه	کمینه	میانگین							
S۱-۱	۴۲	۲۷,۴۷	۲۵,۲۴	۲۶,۱۸		۱۰	۰,۹۲	۳,۵	۲,۲۶	۱,۰۱	
S۱-۲	۵۱	۱۴,۱۲	۱۳,۰۵	۱۳,۵۹	۵	۳	۰,۴۴	۳,۲۲	۲,۲۶	۱,۰۲	
S۱-۳	۵۸	۹,۵۲	۸,۵۸	۹,۱۲		۱۰	۰,۳۸	۴,۲۲	۲,۲۶	۱,۰۳	
S۱-۴	۴۲	۲۹,۹۸	۲۷,۳۴	۲۸,۹۱		۱۰	۰,۷۹	۲,۷۴	۲,۲۶	۱,۰۴	
S۱-۵	۵۱	۱۴,۵۶	۱۳,۰۸	۱۴,۲۰	۱۵	۳	۰,۲۶	۱,۸۰	۲,۲۶	۱,۰۳	
S۱-۶	۵۸	۹,۵۱۲	۸,۳۵	۹,۱۳		۱۰	۰,۲۹	۳,۲۲	۲,۲۶	۱,۰۵	
S۱-۷	۴۲	۳۰,۱۶	۲۷,۹۲	۲۹,۱۴		۱۰	۰,۹۱	۳,۱۳	۲,۲۶	۱,۰۱	
S۱-۸	۵۱	۱۴,۶۱	۱۳,۹۴	۱۴,۲۹	۲۵	۳	۰,۲۷	۱,۹۱	۲,۲۶	۱,۰۲	
S۱-۹	۵۸	۱۰,۰۱	۸,۵۳	۹,۳۷		۱۰	۰,۶۰	۶,۴۵	۲,۲۶	۱,۰۳	

P شاخص دقت، N تعداد آزمایش، t<sub>β</sub> ضریب اطمینان، C<sub>v</sub> ضریب تغییرات، S انحراف معیار

جدول ۳. مقادیر تنش کششی به ازاء زمان نگهداشت‌های مختلف با پارامترهای آماری محاسبه شده برای نمونه‌ی S۱.

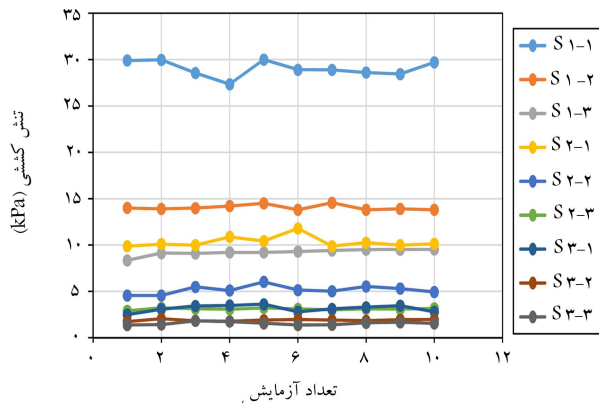
نام نمونه	درصد رطوبت	تنش کششی (kPa)			سرعت جدایش (mm/min)	زمان نگهداشت (min)	N	S	Cv%	t <sub>β</sub>	P
		بیشینه	کمینه	میانگین							
S۱-۱	۴۲	۲۵,۵۱	۲۴,۳	۲۵,۰۹۱		۱۰	۰,۳۵	۱,۴۰	۲,۲۶	۱,۰۲	
S۱-۲	۵۱	۱۵,۹۵	۱۵,۰	۱۵,۴۶	۱	۱	۰,۲۹	۱,۹۰	۲,۲۶	۱,۰۳	
S۱-۳	۵۸	۹,۴۳	۸,۱۷	۸,۸۱		۱۰	۰,۴۰	۴,۵۰	۲,۲۶	۱,۰۷	
S۱-۴	۴۲	۲۹,۹۸	۲۷,۳	۲۸,۹۱		۱۰	۰,۷۹	۳,۵۰	۲,۲۶	۱,۰۴	
S۱-۵	۵۱	۱۴,۵۷	۱۳,۸	۱۴,۲۰	۱۵	۳	۰,۲۶	۳,۲۲	۲,۲۶	۱,۰۳	
S۱-۶	۵۸	۹,۵۲	۸,۳۵	۹,۱۳		۱۰	۰,۲۹	۴,۲۲	۲,۲۶	۱,۰۵	
S۱-۷	۴۲	۳۱,۴۵	۲۷,۶	۲۹,۴۹		۱۰	۱,۲۵	۴,۲۰	۲,۲۶	۱,۰۷	
S۱-۸	۵۱	۱۶,۰۴	۱۵,۰	۱۵,۴۴	۸	۱	۰,۲۸	۱,۸۰	۲,۲۶	۱,۰۳	
S۱-۹	۵۸	۱۰,۵۴	۹,۴۲	۹,۸۶		۱۰	۰,۴۴	۴,۴۰	۲,۲۶	۱,۰۷	

P شاخص دقت، N تعداد آزمایش، t<sub>β</sub> ضریب اطمینان، C<sub>v</sub> ضریب تغییرات، S انحراف معیار



شکل ۶. محل قرارگیری ۳ نمونه‌ی آزمایش شده در پژوهش حاضر بر روی نمودار کاساگرانده. بر این اساس نمونه‌ی S۱ در محدوده‌ی مونت موریلونیت و نمونه‌های S۲ و S۳ در محدوده‌ی کائولینیت قرار می‌گیرند.

منظور بررسی تکرارپذیری نتایج به‌دست آمده از آزمایش جدایش مخلوط، علاوه بر نمونه‌ی S۱، دو نمونه‌ی خاک ریزدانه‌ی دیگر (S۲ و S۳) با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ آماده شدند. درصد فراوانی کانی‌های مختلف در ترکیب شیمیایی نمونه‌های آزمایش شده در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به شاخص خمیری و حد روانی ۳ نمونه که در جدول ۱ ارائه شده است، در شکل ۶ محل قرارگیری سه نمونه در نمودار کاساگرانده نشان داده شده است. با توجه به محل قرارگیری نمونه‌ها (نمونه‌ی S۱ در محدوده‌ی مونت موریلونیت و نمونه‌های S۲ و S۳ در محدوده‌ی کائولینیت قرار گرفته‌اند) و انطباق محل‌های مذکور با آنالیزهای شیمیایی انجام شده بر روی نمونه‌های S۱ و S۳ (که در جدول ۴ ارائه شده است)، می‌توان گفت ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌ی S۲ شبیه به نمونه‌ی S۳ است. از آنجا که ویژگی‌های مکانیکی خاک‌های ریزدانه متأثر از درصد رطوبت آن‌هاست؛ لذا آزمایش‌های بعدی روی نمونه‌های جدول ۱ با درصد رطوبت‌های مختلف انجام شد.



شکل ۷. بررسی تکرارپذیری نتایج به دست آمده از آزمایش جدایش مخروط با توجه به ۹۰ آزمایش انجام شده بر روی ۳ نمونه با رطوبت‌های مختلف.

ضریب تغییرات، ۱۳ با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شد:

$$Cv = S/M \quad (۱)$$

که در آن،  $Cv$  ضریب تغییرات،  $S$  انحراف معیار و  $M$  میانگین داده‌هاست. با توجه به جدول‌های ۲، ۳ و ۵، ضریب تغییرات برای آزمایش‌های انجام شده بین ۱/۴۰ تا ۱۲/۴۹ است. طبق نظر دانکن<sup>۱۴</sup>، دامنه‌ی تغییرات این ضریب برای پارامترهای مختلف خاک می‌تواند بین ۱۳ تا ۴۰ درصد باشد؛<sup>[۱۵]</sup> بر این اساس می‌توان گفت که ابزار مذکور قادر است مقادیر قابل قبولی از تنش کششی به دست دهد.

در روش دوم، شاخص دقت<sup>۱۵</sup>، از طریق رابطه‌ی ۲ محاسبه شد،<sup>[۱۶]</sup> که در آن،  $M$  میانگین داده‌ها،  $S$  انحراف معیار،  $n$  تعداد نمونه‌ها و  $t/\beta$  ضریب اطمینان است که با استفاده از توزیع تی - استیودنت<sup>۱۶</sup>، براساس تعداد نمونه و ضریب تغییرات برای سطح اعتماد ۹۵٪ به دست می‌آید:

جدول ۵. مقادیر تنش کششی به ازاء درصد رطوبت‌های مختلف با پارامترهای آماری محاسبه شده برای نمونه‌های S1، S2، S3.

نام نمونه	درصد رطوبت	تنش کششی (kPa)			سرعت جدایش (mm/min)	زمان نگهداشت (min)	N	S	Cv%	t <sub>β</sub>	P
		بیشینه	کمینه	میانگین							
S1-1	۴۲	۳۰/۰۰	۲۷/۵۰	۲۸/۹۵		۱۰	۰/۸۰	۲/۸۰	۲/۲۶	۱/۰۴	
S1-2 S1	۵۱	۱۴/۶۰	۱۳/۱۰	۱۴/۲۵	۱۵	۵	۰/۲۵	۱/۹۰	۲/۲۶	۱/۰۳	
S1-3	۵۸	۹/۵۱	۸/۴۰	۹/۲۰		۱۰	۰/۳۰	۳/۳۰	۲/۲۶	۱/۰۵	
S2-1	۳۰	۱۳/۶۷	۹/۸۷	۱۱/۷۸		۱۰	۱/۵۳	۱۳/۰۲	۲/۲۶	۱/۲۲	
S2-2 S2	۴۰	۶/۰۳	۴/۵۶	۵/۲۹	۱۵	۵	۰/۵۴	۱۰/۲۱	۲/۲۶	۱/۱۷	
S2-3	۵۰	۳/۲۲	۲/۹۰	۳/۱۱		۱۰	۰/۱۲	۳/۷۰	۲/۲۶	۱/۰۶	
S3-1	۳۰	۳/۶۲	۲/۵۰	۳/۲۳		۱۰	۰/۴۰	۱۲/۴۹	۲/۲۶	۱/۲۱	
S3-2 S3	۴۰	۲/۰۶	۱/۷۴	۱/۸۵	۱۵	۵	۰/۱۲	۶/۴۹	۲/۲۶	۱/۱۰	
S3-3	۵۰	۱/۸۳	۱/۳۸	۱/۶۰		۱۰	۰/۱۷	۱۰/۸۵	۲/۲۶	۱/۱۸	

P شاخص دقت، N تعداد آزمایش، t<sub>β</sub> ضریب اطمینان، Cv ضریب تغییرات، S انحراف معیار

جدول ۴. کانی‌های تشکیل دهنده‌ی نمونه‌های S1 و S3 براساس آنالیز XRD.

نام کانی	درصد فراوانی	
	S2	S1
کانولونیت	۶۱	۳
کریستالینیت	۰	۱۸
کلیئوپتیلولیت	۰	۳
مونت موریلونیت	۰	۳۱
کوارتز	۳۱	۱۲
فلدسپار	۰	۲۴
کلسیت	۳	۷

در جدول ۵، درصد رطوبت‌های مربوط به نمونه‌ی S1 که به ترتیب ۴۲، ۵۱ و ۵۸ است و درصد رطوبت‌های مربوط به نمونه‌های S2 و S3 که به ترتیب ۳۰، ۴۰ و ۵۰ است، ارائه شده است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ی S1، زمان نگهداشت ۵ دقیقه و سرعت جدایش ۱۵ میلی‌متر بر ثانیه برای انجام آزمایش‌های مذکور در نظر گرفته شد.

به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج به دست آمده، هر آزمایش ۱۰ بار تکرار شد. با توجه به تعداد نمونه‌ها (سه نمونه) و انجام آزمایش با سه رطوبت مختلف در مجموع ۹۰ آزمایش جدایش مخروط انجام شد. در شکل ۷، مقادیر تنش کششی اندازه‌گیری شده روی هر نمونه به همراه نتایج ۱۰ بار تکرار آن نشان داده شده است که مطابق آن، دامنه‌ی تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های با رطوبت‌های یکسان، بسیار کم است.

در مرحله‌ی بعد با استفاده از پارامترهای آماری تکرارپذیری نتایج بررسی شدند، که در آن، مقادیر تنش کششی کمینه، بیشینه، میانگین و سایر پارامترهای آماری مربوط به آزمایش‌های انجام شده استخراج شدند. مقادیر مذکور در جدول‌های ۲، ۳ و ۵ ارائه شده‌اند. تکرارپذیری نتایج از طریق دو روش بررسی شد. در روش اول،

$$P = \frac{M + t\beta \frac{S}{\sqrt{n-1}}}{M - t\beta \frac{S}{\sqrt{n-1}}} \quad (2)$$

با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول های ۲، ۳ و ۵ شاخص دقت در آزمایش های انجام شده بین ۱/۰۱ تا ۱/۲۲ است. شاخص دقت ضمن تأیید تکرارپذیر بودن نتایج نشان می دهد که دستگاه طراحی شده برای اندازه گیری پارامترهای مذکور در حد فعالیت های پژوهشی، دقت لازم را دارد.

## ۶. تأثیر درصد رطوبت

از آنجا که آزمایش های انجام شده بر روی سه نمونه خاک ریزدانه با درصد رطوبت های مختلف انجام شده است؛ لذا با توجه به داده های جدول های ۲ و ۵، امکان بررسی تأثیر رطوبت در میزان تنش کششی اندازه گیری شده در سه نمونه آزمایش شده فراهم شده است. در شکل ۸، منحنی تغییرات تنش کششی در مقابل درصد رطوبت برای سه نمونه خاک ریزدانه مشاهده می شود.

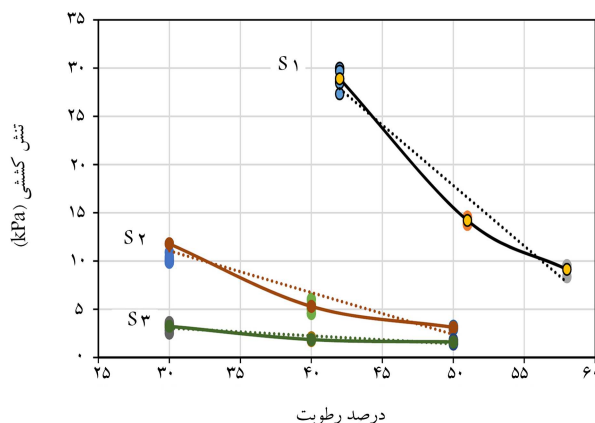
همان طور که در بخش قبل ذکر شد، هر آزمایش ۱۰ بار تکرار شده است. برای هر نمونه خاک ریزدانه، امکان پیشنهاد رابطه تجربی (روابط ۳ الی ۵) بین تنش کششی برای جدایش مخروط و درصد رطوبت طبیعی با ضریب تعیین بالاتر از ۰/۸۶ وجود دارد:

$$T(kPa) = -1,25\omega + 8,058 \quad R^2 = 0,96 \quad \text{نمونه ۱: S1} \quad (3)$$

$$T(kPa) = -0,43\omega + 24,07 \quad R^2 = 0,92 \quad \text{نمونه ۲: S2} \quad (4)$$

$$T(kPa) = -0,082\omega + 5,49 \quad R^2 = 0,86 \quad \text{نمونه ۳: S3} \quad (5)$$

که در آن ها،  $T$  تنش کششی بر حسب کیلو پاسکال و  $\omega$  درصد رطوبت است. روابط مذکور برای خاک مشخص و در محدوده رطوبت های ذکر شده معتبر است. شکل ۸ و روابط ۳ الی ۵، نشان می دهند که ارتباط تنش کششی با رطوبت رابطه عکس است؛ به طوری که با افزایش رطوبت، تنش کششی کاهش یافته است. از طرف دیگر، برای خاک های ریزدانه ای مختلف، مقادیر تنش کششی اندازه گیری شده متفاوت است.



شکل ۸. نمودار تغییرات درصد رطوبت در برابر تنش کششی در نمونه های S1، S2 و S3.

## ۷. بحث

چسبیدن خاک به سطح فلز یکی از مشکلاتی است که در ابزار برش به وجود می آید. لذا برای برطرف ساختن مشکل اشاره شده و بررسی عوامل مؤثر در آن، از دستگاه جدایش مخروط در آزمایشگاه استفاده شده است. با تغییر عوامل تأثیرگذار در نتایج آزمایش، شامل: سرعت جدایش، زمان نگهداشت، درصد رطوبت، نوع خاک و تکرار آزمایش ها، ضریب تغییرات بین ۱/۴ تا ۱۲/۴۹ و شاخص دقت بین ۱/۰۱ تا ۱/۲۲ به دست آمد که نشان می دهد نتایج به دست آمده تکرارپذیر هستند و دستگاه جدایش مخروط، به عنوان یک ابزار آزمایشگاهی جهت اندازه گیری تنش کششی، در محدوده فعالیت های عمرانی و پژوهشی قابل استفاده است.

سرعت جدا شدن مخروط از خاک بر تنش کششی اندازه گیری شده، تأثیر مستقیم دارد. در خاک های رسی با حد خمیری بالا (نظیر مونت موریلونیت) شیب این تغییرات بیشتر از رس های با حد خمیری پایین (نظیر کائولینیت) است. لیکن برای هر دو نوع خاک به ازاء سرعت جدایش بیشتر از ۱۵ میلی متر بر دقیقه، تغییری در تنش کششی اتفاق نمی افتد. با افزایش زمان نگهداشت، تنش کششی برای جدا شدن مخروط از خاک افزایش می یابد، لیکن در رس های با حد خمیری بالا، شیب تغییرات بیشتر از رس های با حد خمیری پایین است. زمان نگهداشت در تنش کششی اندازه گیری شده، مؤثر و تابع نوع رس نیز بوده است، به طوری که برای رس های با حد خمیری بالا، اثر تغییرات زمان نگهداشت در تنش کششی بیشتر از رس های با حد خمیری پایین تر است. برای زمان های نگهداشت بیشتر از ۳ دقیقه، برای هر دو نوع رس، زمان نگهداشت تأثیری در تنش کششی ندارد. این موضوع به خوبی روشن می کند که متغیرهای مربوط به دستگاه در مقادیر تنش کششی اندازه گیری شده تأثیر دارد. با توجه به تفاوت کانی شناسی رس های آزمایش شده در پژوهش حاضر روشن است که تفاوت در ترکیب شیمیایی، عامل اصلی وجود رفتارهای متفاوت است.

تغییر محتوای رطوبت خاک به عنوان یک عامل غیروابسته به دستگاه نشان داد که با افزایش محتوای رطوبت، تنش کششی کاهش می یابد. هر چند برای سادگی، روابط تجربی و خطی بین تنش کششی و درصد رطوبت طبیعی برای سه نوع خاک پیشنهاد شد، لیکن تغییرات آن ها خطی نیست و با افزایش درصد رطوبت، شیب تغییرات کم می شود. برای مثال در نمونه مونت موریلونیت در رطوبت ۵۰ درصد، شیب تغییرات تنش کششی با درصد رطوبت کاهش می یابد. این بدان معناست که با نرم شدن خاک تأثیرپذیری تنش کششی از رطوبت، کاهش می یابد. ترکیب شیمیایی و کانی شناسی به عنوان متغیر دیگر غیروابسته به دستگاه در مقادیر اندازه گیری شده تأثیر دارد. برای مونت موریلونیت با حد خمیری ۴۸، شیب منحنی تنش کششی به درصد رطوبت خیلی بیشتر از کائولینیت با حد خمیری ۱۹ است. رطوبت موجود در خاک از یک طرف باعث نرم شدن خاک می شود و از طرف دیگر با ایجاد لایه های نازک بین خاک و مخروط، نقش روانکاری را بازی می کند؛ لذا در کم شدن تنش کششی اندازه گیری شده تأثیر دارد. پرواضح است با انجام آزمایش های بیشتر در محدوده های رطوبتی متفاوت، امکان تدقیق نتایج وجود دارد.

## ۸. نتیجه گیری

دستگاه جدایش مخروط به منظور اندازه گیری تنش کششی و چسبناکی خاک به سطح فلز، طراحی و ساخته شده است. ویژگی بارز و نقطه ی قوت دستگاه جدایش

استفاده از روش‌های آماری مشخص شد که نتایج به دست آمده از آزمایش در حد فعالیت‌های پژوهشی، دقت لازم را دارد و تکرارپذیر هستند. با توجه به متفاوت بودن خصوصیات خمیری، سه نمونه خاک ریزدانه آزمایش شدند و با تغییر درصد رطوبت هر نمونه، تأثیر نوع خاک ریزدانه و درصد رطوبت در تنش کششی اندازه‌گیری شده بررسی و مشخص شد که برای سه نمونه‌ی آزمایش شده با افزایش درصد رطوبت، تنش کششی کاهش می‌یابد و تنش لازم برای جدایش برای نمونه‌های با حد روانی و شاخص خمیری بالا بیشتر است. شیب تغییرات تنش کششی در مقابل درصد رطوبت برای نمونه‌های با حد روانی و شاخص خمیری بالا بیشتر است. افزایش مقدار آب در سطح تماس بین ذرات خاک می‌تواند دلیلی برای کاهش تنش کششی اندازه‌گیری شده باشد.

مخروط در کنار سادگی، امکان اندازه‌گیری توأم مؤلفه‌ی مماسی و کششی در هنگام جدایش است. معمولاً در ابزار برش، مؤلفه‌های مذکور به صورت توأمان عمل می‌کنند؛ لیکن عدم تفکیک اینکه چه بخشی از تنش اندازه‌گیری شده متعلق به مؤلفه‌ی مماسی و چه بخشی متعلق به مؤلفه‌ی کششی است، محدودیت ابزار مذکور است. در پژوهش حاضر با انجام چند آزمایش روی یک نمونه خاک رس مشخص، تأثیر سرعت جدایش و زمان نگهداشت به عنوان دو متغیر وابسته به دستگاه در تنش کششی اندازه‌گیری شده بررسی شد و زمان نگهداشت ۵ دقیقه و سرعت جدایش ۱۵ میلی‌متر در دقیقه به عنوان مقادیر بهینه برای انجام آزمایش پیشنهاد شد. دقت و تکرارپذیر بودن نتایج به دست آمده از دستگاه جدایش مخروط با انجام بیش از ۹۰ آزمایش روی سه نمونه خاک ریزدانه با خصوصیات خمیری متفاوت بررسی شد و با

## پانویس‌ها

1. adhesion
2. cohesion
3. Sass & Burbaum
4. adhesion stress
5. tension stress
6. clogging
7. Geodata
8. Thewes & Burger
9. Hollman & Thewes
10. Spagnoli et al.
11. adherence
12. Feinendegen et al.
13. coefficient of variation
14. Duncan
15. accuracy index
16. T-student

## منابع (References)

1. Fountaine, G. "Investigations into the mechanisms of soil adhesion", *Journal of Soil Science*, **5**(2), pp. 251-263 (1954).
2. Burbaum, U. and Sass, I. "Physics of adhesion of soils to solid surfaces", *Bulletin of Engineering Geology & The Environment*, **76**(3), pp. 1097-1105 (Apr., 2016).
3. Feinendegen, M., Zeigler, M., Spagnoli, G. and et al. "A new laboratory test to evaluate the problem of clogging in mechanical tunnel driving with EPB-shields", *Rock Mechanics in Civil and Environment Engineering*, J. Zhao, Ed, Eurock, pp. 429-432 (2010).
4. Sass, I. and Burbaum, V. "A method for assessing adhesion of clays to tunneling machines", *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, **68**(1), pp. 27-34 (2009).
5. Geodata, S. "Review of alternative construction methods and feasibility of proposed methods for constructing Attiko metro extension of line 3 to egaleo", Attiko metro SA, pp. 191-193 (1995).
6. Thewes, M. and Burger, W. "Clogging of TBM drives in clay-identification and mitigation of risks", Edrem and Solak (eds) *Underground Space Uses*, pp. 737-742 (2005).
7. Hollmann, F. and Thewes, M. "Assessment method for clay Clogging and distintegration of fines in mechanised tunnelling", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **37**, pp. 96-106 (2013).
8. Hollmann, F., Thewes, M. and Weh, M. "Influence of clogging the muck transport in shield machines", *Hauptbeiträge*, **3**, pp. 10-19 (2014).
9. Hollmann, F. and Thewes, M. "Assessment of clay soils and clay-rich rock for Clogging of TBMs", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **57**, pp. 122-128 (2016).
10. Karami azandarani, Y., Cheshomi, A., Khabbazi Basmenj, A. and et al. "Influence of water and sand content on adhesion of clayey soils", *Journal of Geopersia*, **5**(1), pp. 55-92 (2015).
11. Khabbazi Basmenj, A., Ghafoori, M., Cheshomi, A. and Azandarani Y.K. "Adhesion of clay to metal surfaces; normal and tangential measurement", *Geomechanics Eng.*, **10**(2), pp. 125-135 (2016).
12. Khabbazi Basmenj, A., Ghafoori, M. and Cheshomi, Tarigh Azali, S., "Experimental and laboratory assessment of clogging potential based on adhesion", *Bulletin of Engineering Geology & The Environment*, **78**(1), pp. 605-616 (2017).
13. Spagnoli, G., Fernandez-steegeer, T., Azzam, R. and et al. "Investigation of adherence behaviour and related effects on different scales in mechanical tunnel driving" ,

- Proc. Underground Construction Prague 2010, Transport and City Tunnels, ITA-AITES, pp. 692-699 (2010).
14. Feinendegen, M., Ziegler, M., Spagnoli, G. and et al. "Evaluation of the clogging potential in mechanical tunnel driving with EPB-shields", *Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 1633-1638 (2011).
  15. Duncan, J.M. "Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **126**(4) pp. 307-316 (2000).
  16. Gill, D.E., Cortes, R. and Leite, M.H. "Determining minimal number of specimens for laboratory testing of rock properties", *Engineering Geology*, **78**(1-2), pp. 29-51 (2005).