



بررسی اثر رس بر قدرت سایندهی خاک‌ها به‌وسیله آزمایش LCPC

نعیمه حسینی توانا؛ محمدتقی همزبان قراملکی*

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۵-۱۸
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۶-۱۶
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۶-۲۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۶-۳۱

کلمات کلیدی:

سایندهی
حفاری مکانیزه
آزمایش LCPC
رس
خواص خمیری.

خلاصه: آزمون LCPC یکی از آزمایش‌های مرسوم جهت تعیین میزان سایندهی دانه‌های سنگی و محیط‌های خاکی است. با توجه به عدم توسعه آزمایشی استاندارد برای تعیین سایندهی خاک‌ها، استفاده از این آزمون برای تعیین سایندهی محیط‌های خاکی، گسترش زیادی در سال‌های اخیر یافته‌است. در مطالعه حاضر، اثر ترکیب‌های رسی با مقادیر مختلف ذرات درشت‌دانه بر سایندهی خاک‌ها، با استفاده از آزمایش LCPC مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام آزمایش‌ها از ترکیب‌های مختلفی از نمونه‌های سیلیس خرد شده و کانی رسی تالک استفاده گردید. با اندازه‌گیری و ثبت توان مصرفی موتور الکتریکی دستگاه، در هر لحظه از اجرای آزمون LCPC، انرژی مصرف‌شده در هر آزمایش نیز محاسبه شد. در طول آزمایش‌ها، رطوبت و تنش‌های مختلفی اعمال شدند. نتایج نشان دادند که با افزایش رطوبت، ضریب سایندهی LCPC ابتدا کاهش یافته و با گذر از محدوده رطوبتی خاص، افزایش می‌یابد. در شرایطی که نمونه ساینده مورد آزمایش، کاملاً رسی (تالک) است؛ ضریب سایندهی تقریباً صفر به‌دست آمد. مشخص گردید، محدوده درصد‌های رطوبت میان حدود خمیری و روانی، منطبق با کمترین میزان سایندهی است. هم‌چنین با تغییر تنش‌های اعمالی، مشاهده شد که با افزایش مقدار رس در ترکیب، روند افزایش خطی ضریب سایندهی، با افزایش تنش موثر کاهش یافته و در نهایت از بین می‌رود. نتایج به‌دست آمده، نشان دادند که جزء رسی مورد‌استفاده، به تنهایی سایندهی چندانی ندارد. ولی ترکیب آن با ذرات درشت‌دانه، به‌ویژه در حضور رطوبت، می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر رفتار ساینده نمونه و به‌ویژه تغییرات آن تحت رطوبت‌ها و سطوح تنش‌های مختلف داشته‌باشد.

۱- مقدمه

برنده نصب‌شده روی کله برنده TBM است. برای تخمین این پارامتر، آگاهی از ویژگی‌های ساینده زمین ضروری است. روش‌های نسبتاً زیادی برای تعیین قدرت سایندهی سنگ‌های سخت وجود دارد. اما روش‌هایی که بتوان از آن‌ها در محیط‌های خاکی استفاده کرد، بسیار محدودند. تا به حال، استاندارد^۱ ISRM یا هیچ استاندارد بین‌المللی دیگری برای آزمایش سایندهی خاک ارائه نشده‌است. آزمون LCPC به‌وسیله آزمایشگاه مرکزی پل‌ها و راه‌ها^۲ در فرانسه و در دهه ۱۹۸۰ توسعه یافته‌است. این آزمایش، روشی است

با توسعه شهرها و نیاز روزافزون به حفاری‌های زیرزمینی، کاربرد حفاری مکانیزه، به‌ویژه ماشین‌های حفر تونل^۱ (TBM)، در صنایع معدنی و عمرانی، روزبه‌روز در حال افزایش است. زمان و هزینه دو عامل مهم در تونل‌کاری به روش حفاری مکانیزه می‌باشند. بنابراین، تخمین زمان لازم برای اتمام پروژه و هزینه اجرای آن، همواره موضوعی مهم و مورد توجه بوده‌است. پارامترها و فاکتورهای زیادی در دو عامل یادشده دخیل‌اند. یکی از این پارامترها، سایش ابزارهای

2 International Society for Rock Mechanics
3 Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

1 Tunnel boring machines
* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hamzaban@sut.ac.ir



روش آزمایشگاهی به کار رفته برای برآورد رفتار ساینده خاک و تاثیر عوامل مختلف بر آن، باید بتواند عوامل یادشده را کنترل کرده و تغییرات هر کدام بر سایش‌های پدیدآمده را برآورده نماید. تاثیر ترکیبی این عوامل، در هیچ یک از روش‌های آزمایشی، که تاکنون توسعه یافته‌است، موردبررسی قرار نگرفته‌است [۵].

در پژوهش حاضر با توجه به حضور ذرات ریزدانه و رس در اغلب نهشته‌های طبیعی خاک، اثر ترکیب‌هایی با مقادیر مختلف رس بر ساینده‌های خاک‌ها، با استفاده از آزمایش LCPC موردبررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه حفاری مکانیزه در محیط‌های شهری و مسافت‌های طولانی به کار می‌رود، احتمال تغییر رطوبت زمین مورد حفر در طول مسیر، بسیار زیاد است. به‌گونه‌ای که ممکن است حفاری در برخی از بخش‌های پروژه، در زیر سطح ایستایی و در بخش‌های دیگر، در بالای سطح ایستایی انجام گردد. هم‌چنین با توجه به تغییرات احتمالی روباره و بارهای اعمال شده از سوی سازه‌های سطحی، تنش حاکم در محیط حفاری نیز ممکن است تغییر نماید. در نتیجه، احتمال تغییر هر دو عامل رطوبت و تنش در یک پروژه حفاری مکانیزه، چندان بعید نیست. مطالعات انجام شده قبلی، تنها به بررسی اثر رطوبت بر رفتار ساینده خاک‌های درشت‌دانه پرداخته‌اند و تاکنون، بررسی چندان در مورد تاثیر رطوبت و رفتار خمیری خاک‌های حاوی مواد ریزدانه، بر قدرت ساینده‌گری آن‌ها و هم‌چنین اثر تنش‌های حاکم در محیط بر سایش‌های پدید آمده، صورت نگرفته‌است.

در مطالعه حاضر، ساینده‌گری ترکیب‌های مختلفی از مواد خاکی، که دربرگیرنده نسبت‌های معین و مختلفی از مواد درشت‌دانه و ریزدانه بودند، موردآزمایش قرار گرفت. آزمون‌ها با درصد‌های رطوبت و تحت تنش‌های متفاوت انجام یافت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که حضور ذرات ریزدانه رسی، باعث ایجاد تغییرات قابل توجهی در رفتار ساینده نمونه‌های مرطوب می‌شود. در محدوده میان حد خمیری^۳ (PL) و حد روانی^۴ (LL) بخش رسی، کمترین مقادیر سایش‌ها به‌دست آمدند. هم‌چنین نتایج نشان دادند که در نمونه‌های رسی خالص، افزایش تنش‌های اعمالی، تاثیری بر میزان سایش‌های پدید آمده ندارد. در نهایت، انرژی ویژه سایش^۵ محاسبه و ارتباط آن با سایر متغیرها مورد بررسی قرار گرفت.

که اجازه بررسی ساینده‌گری مخلوط‌هایی با محدوده ابعادی معین را روی نمونه‌های معرف از خاک، فراهم می‌سازد. تورو^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ آزمایش‌های LCPC را برای تعیین ویژگی‌های ساینده خاک، روی نمونه‌های خاک طبیعی و مصنوعی، بر اساس قطر متوسط دانه‌ها، انجام داده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ساینده‌گری نمونه‌های طبیعی، شامل ماسه، سیلت و رس، پایین است (طبقه‌بندی ساینده تا نه چندان ساینده) با اینکه ممکن است در ترکیب خاک مقادیر کوارتز زیادی نیز حضور داشته‌باشند [۱].

رستمی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به منظور توسعه روشی دقیق‌تر برای شبیه‌سازی برهم کنش میان خاک - ابزار برنده در TBM‌های زمین نرم، روشی جدید برای اندازه‌گیری ساینده‌گری خاک ارائه کردند. آن‌ها ماسه سیلیسی، ماسه آهکی و یک نمونه خاک ریزدانه غنی از کوارتز، را آزمایش کرده و اثر زاویه انحراف پره‌های سایشی، محتوای رطوبت، سختی مواد، فشار محیطی، سختی نسبی کانی‌ها و اثر روباره خاک، بر سایش‌های پدید آمده را موردبررسی قرار دادند [۲].

دالمان^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ بیان کردند که آزمون LCPC در بهترین شرایط، می‌تواند تقریبی از کارایی مکانیزم حفاری را برآورد نماید. با این حال، باید خاطر نشان کرد که تجهیزات و مواد آزمایشی غیراستاندارد، می‌توانند سبب کاهش دقت نتایج سنجش‌های کمی گشته و مقایسه مقادیر به‌دست آمده به‌وسیله انیستیتوهای مختلف را با مشکل روبرو سازند [۳].

میرمحرابی و همکارانش در سال ۲۰۱۶ با انجام آزمایش‌های LCPC در محدوده ذرات ریز، تاثیر سختی نسبی کانی‌ها و حضور ذرات ریز را بررسی کرده و ارتباط خطی مستقیمی میان سختی دانه‌ها و ساینده‌گری آن‌ها به‌دست آوردند [۴]. نجفی در سال ۲۰۱۷ با بررسی اثر رطوبت و تنش موثر بر رفتار سایشی مواد دانه‌ای در آزمایش LCPC نتیجه گرفت، درصد رطوبت و تاثیر آن بر رفتار تراکمی خاک، نقش مهمی در کنترل رفتار ساینده خاک‌های مرطوب دارد. عواملی که در یک پروژه واقعی تونل‌زنی می‌توانند رفتار تراکمی زمین را تغییر دهند عبارتند از مقدار رطوبت، سطح تنش‌های موثر، درصد رس موجود در خاک و هم‌چنین نوع مواد افزودنی مورد استفاده در فرآیند حفاری مکانیزه. احتمالاً می‌توان اثر سرعت دوران کله برشی را، به‌دلیل دامنه تغییرات کم، نادیده گرفت. بنابراین، هر

3 Plastic Limit

4 Liquid Limit

5 Wear Specific Energy

1 Thuro

2 Düllmann



شکل ۱. دستگاه آزمایش LCPC ساخته شده در دانشگاه صنعتی سهند به همراه تجهیزات جانبی
 Fig. 1. The LCPC testing device and its accessories manufactured at Sahand University of Technology

۲- روش‌ها و مواد مورد آزمایش

هر لحظه از آزمایش، فراهم گردید. از پنج وزنه بارگذاری نیز جهت اعمال تنش سطحی بر نمونه‌ها، به هنگام اجرای آزمایش، استفاده شد. وزنه‌های مورد استفاده دیسک‌هایی فولادی هستند که در شکل ۲ مشاهده می‌شوند. قطر خارجی وزنه‌ها به میزان یک میلی‌متر کمتر از قطر داخلی محفظه نمونه انتخاب شد. در هنگام اجرای آزمایش، وزنه‌های فولادی روی به صورت آزاد روی سطح نمونه خاک قرار می‌گیرند و در حالی که پروانه فولادی در داخل نمونه دوران می‌کند، موجب افزایش تنش در توده ساینده می‌شوند [۵].

به‌منظور کنترل کالیبراسیون دستگاه، آزمون‌های اولیه‌ای روی نمونه سیلیس گوشه‌دار، با محدوده ابعادی $۶/۳ - ۴$ میلی‌متر، در شرایط خشک، انجام گردید. مقادیر ضریب LAC در این آزمایش‌ها، در حدود ۲۰۰۰ g/t حاصل شد که با محدوده گزارش شده توسط مولفین قبلی در مواد ساینده مشابه، مطابقت دارد [۱].

برای انجام آزمایش‌ها، از ترکیب‌های سیلیس - تالک با نسبت‌های مختلف استفاده شد. نمونه‌ای از سیلیس و تالک مورد استفاده در برنامه آزمایش‌ها، در شکل ۳ مشاهده می‌شود. نمونه‌های سیلیسی خالص، از ذرات شکسته و گوشه‌دار با محدوده ابعادی $۶/۳ - ۴$ میلی‌متر تشکیل شده‌اند. منحنی توزیع دانه‌بندی این ذرات را می‌توان در شکل ۴ مشاهده نمود. حدود اتربرگ^۳ کانی رسی مورد

دستگاه آزمایش LCPC مورد استفاده در این پژوهش، با استفاده از یک دریل ستونی ساخته شد (شکل ۱). محفظه انجام آزمایش نیز بر اساس استاندارد AFNOR، طراحی و ساخته شد [۶]. اجرای آزمون‌ها طبق استاندارد توصیه شده صورت گرفت [۷ و ۸]. پروانه‌های سایشی از جنس فولاد St37 با سختی $60 \sim 75 \text{ HRB}$ ساخته شدند که با سختی توصیه در استاندارد آزمایش مطابقت دارد. ضریب ساینده‌گی 'LCPC (LAC) حاصل از آزمایش‌ها، نیز با استفاده از رابطه زیر تعیین گردید [۱]:

$$LAC = \frac{m_0 - m}{M} \quad (1)$$

که در آن m_0 وزن اولیه پروانه، m وزن پروانه بعد از آزمایش و M وزن نمونه ساینده مورد استفاده در آزمایش‌ها (برابر ۵۰۰ گرم) می‌باشند. ضریب LAC معمولاً بر حسب گرم‌بتن نمونه آزمایشی، بیان می‌شود. بنابراین مقدار M در رابطه ۱ مساوی $t/۰/۰۰۵$ منظور می‌گردد [۹].

علاوه بر تجهیزات استاندارد یادشده، با نصب توان‌سنج، دیتالاگر^۲ و کامپیوتر در کنار دستگاه آزمایش، امکان ثبت توان مصرفی نیز در

1 LCPC Abrasivity Coefficient

2 Data Logger

3 Atterberg Limits



شکل ۲. (الف) وزنه‌های مورد استفاده، (ب) چگونگی نصب وزنه‌ها در دستگاه آزمایش LCPC
Fig. 2. a) the used loading weights, b) the installation of loading weights on the testing device



شکل ۳. نمونه سیلیس و تالک مورد آزمایش. (الف) ذرات سیلیس (با ابعاد ۴/۳ - ۶ میلی متر)، (ب) ذرات رسی (تالک)
Fig. 3 The tested silica and talc samples. a) silica particles (4.0 - 6.3 mm). b) clay particles (talc)

از ترکیب‌های مختلف سیلیس و تالک با نسبت‌های ۱۰۰:۰، ۸۰:۲۰، ۶۰:۴۰، ۴۰:۶۰ و ۲۰:۸۰ استفاده شد. آزمایش‌ها با استفاده

استفاده (تالک) نیز به روش چندنقطه‌ای تعیین شد و حدود خمیری و روانی آن به ترتیب ۲۲٪ و ۲۹٪ به دست آمد. برای انجام آزمایش‌ها



شکل ۴. نمودار دانه‌بندی ذرات سیلیس مورد آزمایش
 Fig. 4. Particle size distribution curve of the tested silica particles

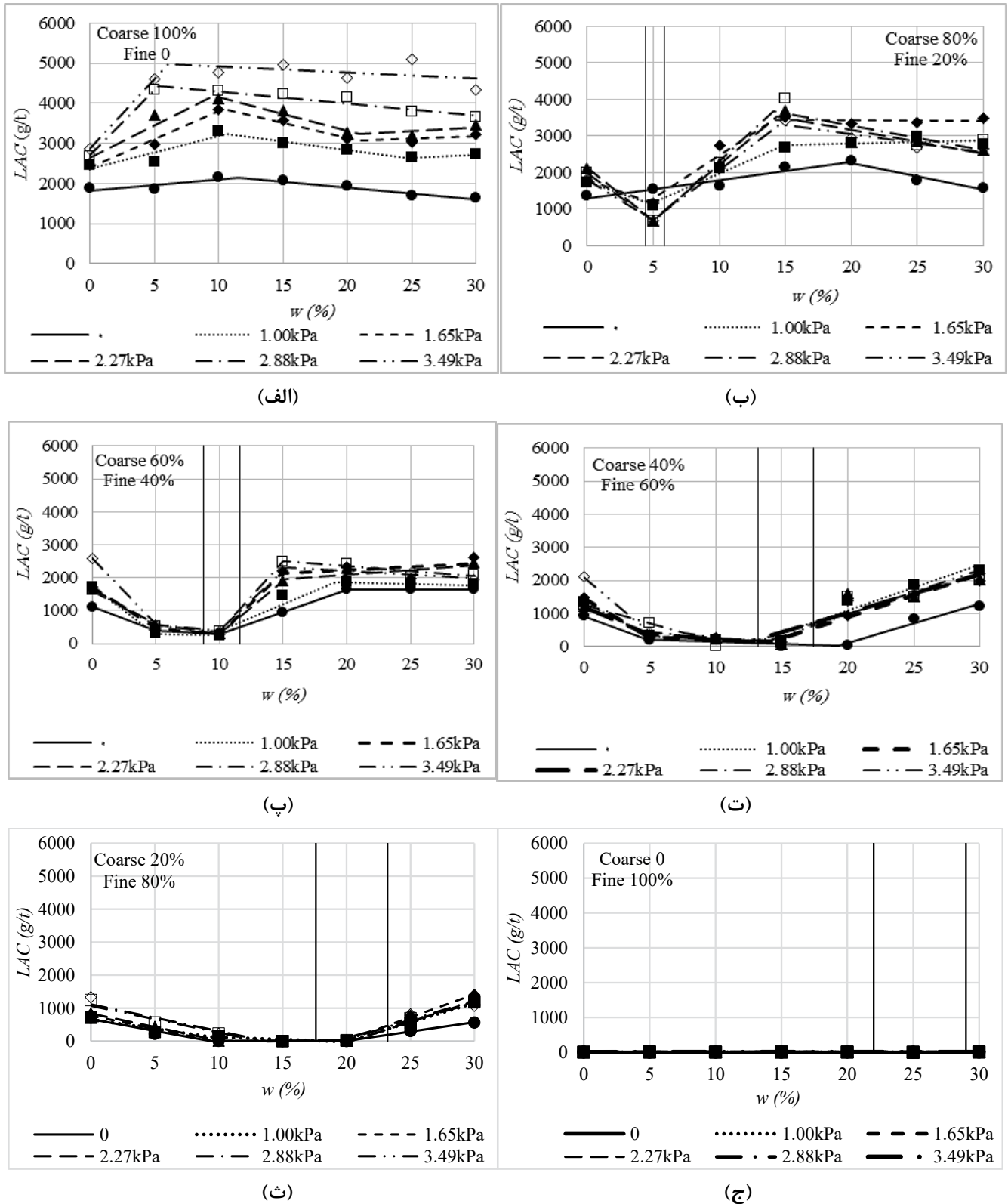
دارد [۲ و ۷]. افزایش ضریب سایندگی با افزایش رطوبت در بخش اول، ناشی از ایجاد خمیر چسبنده و افزایش مقاومت در برابر حرکت پروانه فولادی است. اما در بخش دوم، رطوبت زیاد سبب تسهیل حرکت ذرات و کاهش درگیری آن‌ها با پروانه فولادی می‌گردد. با این وجود، روند به‌دست آمده در گراف‌های مربوط به تنش ۲/۸۸ و ۳/۴۹ کیلوپاسکال شکل یاد شده، اندکی متفاوت است. به گونه‌ای که بعد از رسیدن به مقدار حداکثر LAC ، با افزایش رطوبت، کاهش کمی در ضرایب سایندگی مشاهده می‌شود و LAC مقدار نسبتاً ثابتی به خود می‌گیرد. در این شرایط، افزایش تنش اعمال شده به نمونه، موجب زه‌کشی حجم بزرگی از آب داخل آن می‌گردد و با اینکه مقادیر آب اضافی شده به نمونه، متفاوت است، اما وقوع زه‌کشی، سبب می‌شود که نمونه عملاً تحت درصد رطوبت‌های نسبتاً ثابتی مورد آزمایش قرار گیرد و بنابراین، تغییرات ضریب سایندگی کاهش می‌یابد. برای نشان دادن اثر رفتار پلاستیکی تالک بر روند تغییرات نمودارها در ترکیب‌های مختلف سیلیس - تالک، فرض شد رطوبت اضافه شده به مخلوط نمونه، تماماً جذب جزء تالک می‌شود. این فرض با توجه به مقدار تقریباً صفر، جذب آب به‌وسیله ذرات سیلیس، منطقی به نظر می‌رسد. درصدهای رطوبت به‌نمایش درآمده در محورهای افقی نمودارهای شکل ۵، بر حسب جرم خشک کل نمونه بیان شده‌اند (g) (۵۰۰). بر اساس فرض یاد شده، این درصدهای رطوبت را می‌توان تنها بر حسب وزن خشک بخش رسی نمونه و به‌صورت زیر محاسبه کرد:

از هفت مقدار رطوبت (صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد)، شش بار قائم (۰، ۱/۰۰، ۱/۶۵، ۲/۲۷، ۲/۸۸، ۳/۴۹ کیلوپاسکال)، سرعت دورانی ۴۵۰۰ دور بر دقیقه و فاصله زمانی ۵ دقیقه انجام شدند. در مجموع ۲۵۲ آزمایش LCPC در شرایط مختلف توصیف شده، روی نمونه‌های سیلیس و تالک انجام گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر رطوبت

شکل ۵ تغییرات ضریب سایندگی LAC را با درصد رطوبت نمونه‌ها، در نمونه‌هایی با نسبت‌های مختلف سیلیس و تالک و تحت تنش‌های مختلف نشان می‌دهد. محورهای افقی و قائم این شکل‌ها به ترتیب مقادیر درصد رطوبت و ضرایب LAC حاصل از آزمون‌ها را نشان می‌دهند. هریک از نمودارهای ۵ - الف تا ۵ - ج، نشان‌دهنده رفتار به‌دست آمده در یکی از ترکیب‌های سیلیس و رس مورد بررسی هستند و هر کدام از خطوط برازش‌یافته بر داده‌ها یک سطح تنش مشخص اعمال شده به‌وسیله وزنه‌های اعمال بار را نمایندگی می‌کنند. شکل ۵ - الف نشانگر تغییرات LAC در نمونه سیلیس خالص می‌باشد. مشاهده می‌شود که افزایش رطوبت، موجب افزایش سایش پروانه تا رسیدن به یک مقدار حداکثر در محدوده رطوبت معین می‌گردد. سپس میزان سایش، با افزایش مجدد درصد رطوبت کاهش می‌یابد. این روند دوگانه، با گزارش‌های منتشر شده قبلی در مورد تاثیر رطوبت بر سایندگی خاک‌های دانه‌ای مطابقت



شکل ۵. تغییرات ضریب سایندگی LAC با محتوی رطوبت در تنش‌های مختلف. الف) نبود ریزدانه، ب) ۲۰٪ ریزدانه، پ) ۴۰٪ ریزدانه، ت) ۶۰٪ ریزدانه، ث) ۸۰٪ ریزدانه، ج) ۱۰۰٪ ریزدانه.

Fig. 5. The variation of LAC with water contents under different stress levels. a) zero fine particles. b) 20% fine particles. c) 40% fine particles. d) 60% fine particles. e) 80% fine particles. f) 100% fine particles

جدول ۱. حدود خمیری و روانی اصلاح شده برای مقادیر مختلف تالک
 Table 1. The corrected values of plastic and liquid limits for different talc contents

W_{LL} (%)	W_{PL} (%)	سهم تالک (%)
۵/۸	۴/۴	۱۰۰
۱۱/۶	۸/۸	۲۰۰
۱۷/۴	۱۳/۲	۳۰۰
۲۳/۲	۱۷/۶	۴۰۰
۲۹	۲۲	۵۰۰

روانی قرار دارند. در جدول ۱ مقادیر W_{LL} و W_{PL} برای ترکیب‌های ساینده با مقادیر تالک ۲۰ تا ۸۰ درصد محاسبه شده‌اند. در شکل ۵ این مقادیر با خطوط قائم، روی نمودارهای LAC - w به نمایش در آمده‌اند.

نمودارهای مختلف شکل ۵، نشان می‌دهد محدوده‌ای که در آن کمترین مقادیر LAC به دست می‌آیند، در دامنه رطوبت میان LL و PL قرار گرفته‌است. این محدوده، بخشی است که در آن رس دارای رفتار خمیری است. می‌توان گفت علت این امر، عدم برخورد تمامی ذرات نمونه در طول آزمایش، با پروانه فولادی است. مشاهدات فیزیکی به هنگام اجرای آزمایش‌های LCPC در این محدوده نیز، نشان‌دهنده این واقعیت است. شکل ۶ وضعیت نمونه‌های ساینده بعد از اتمام آزمایش را برای نمودار شکل ۵ - ت، تحت تنش kPa ۲/۲۷ نشان می‌دهد. بر این اساس می‌توان گفت، در محدوده‌ای که رطوبت در دامنه میان حد خمیری و حد روانی قرار دارد، حضور تالک و افزودن رطوبت، سبب تشکیل خمیر چسبنده‌ای از مخلوط گشته و باعث بهم چسبیدگی قسمت اعظم نمونه خاک می‌گردد. هم‌چنین استوانه پیوسته‌ای از خاک، درون محفظه آزمایش تشکیل می‌شود که پروانه در درون آن محبوس بوده و در طول آزمایش، برهم کنش چندانی میان ذرات سیلیس و پروانه فولادی ایجاد نمی‌شود. به بیان دیگر، فشار وارده از سوی مخلوط خاکی خمیر مانند، به قدری نیست که توانایی ساییدن زیاد و زدودن قسمت‌هایی از قطعه فولادی را داشته‌باشد و اغلب، تنها باعث ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک در پروانه می‌گردد. بنابراین شاهد حداقل ضرایب LAC در این محدوده هستیم. تصاویر قطعه‌های فولادی بعد از انجام آزمایش نیز در این

$$W = \frac{M_w}{500} \times 100 \quad (2)$$

$$M_w = 5w$$

در رابطه بالا، w محتوای آب کل نمونه بر حسب درصد و M_w جرم آب اضافه شده به نمونه است. درصد رطوبت جذب شده به وسیله تالک را نیز می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$w_{TI} = \frac{M_w}{M_{S(TI)}} \times 100 \quad (3)$$

$$w_{TI} = \frac{500w}{M_{S(TI)}}$$

که در آن w_{TI} محتوای آب جذب شده بوسیله تالک بر حسب درصد و $M_{S(TI)}$ جرم تالک موجود در ترکیب ساینده است. رطوبت‌های مربوط به حدود خمیری و روانی تالک به ترتیب، ۲۲ و ۲۹ درصد تعیین شده‌اند. بنابراین، با استفاده از روابط زیر، می‌توان این حدود را بر حسب محتوای رطوبت در کل نمونه ساینده تعیین کرد:

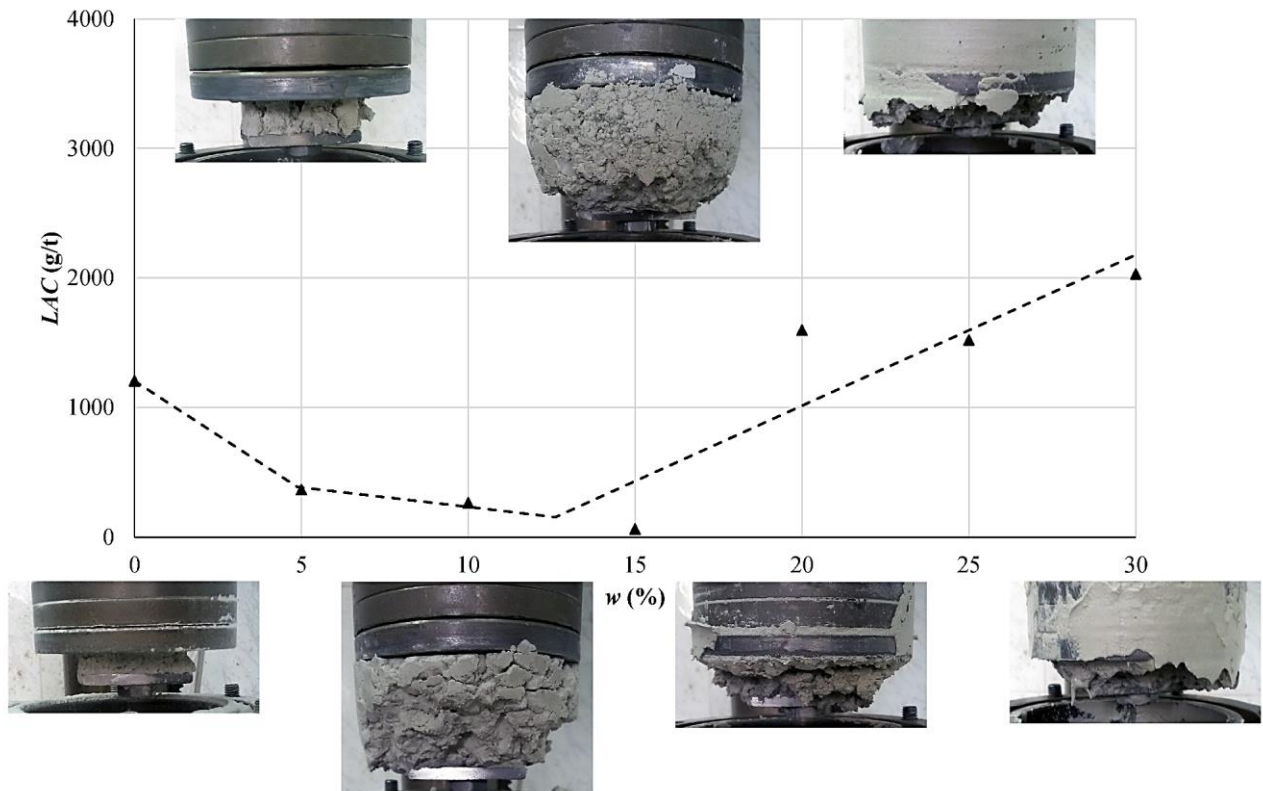
$$22 = \frac{500w_{PL}}{M_{S(TI)}} \quad (4)$$

$$w_{PL} = 0.044M_{S(TI)}$$

$$29 = \frac{500w_{LL}}{M_{S(TI)}} \quad (5)$$

$$w_{LL} = 0.058M_{S(TI)}$$

در روابط بالا W_{LL} و W_{PL} نشان دهنده رطوبت کل نمونه‌اند که در آن‌ها تالک موجود در ترکیب نمونه، به ترتیب در حد خمیری و حد



شکل ۶. ارتباط میان وضعیت نمونه‌های ساینده و مقادیر LAC اندازه‌گیری شده بر اساس شکل ۵ - ت و تنش ۲/۲۷ kPa

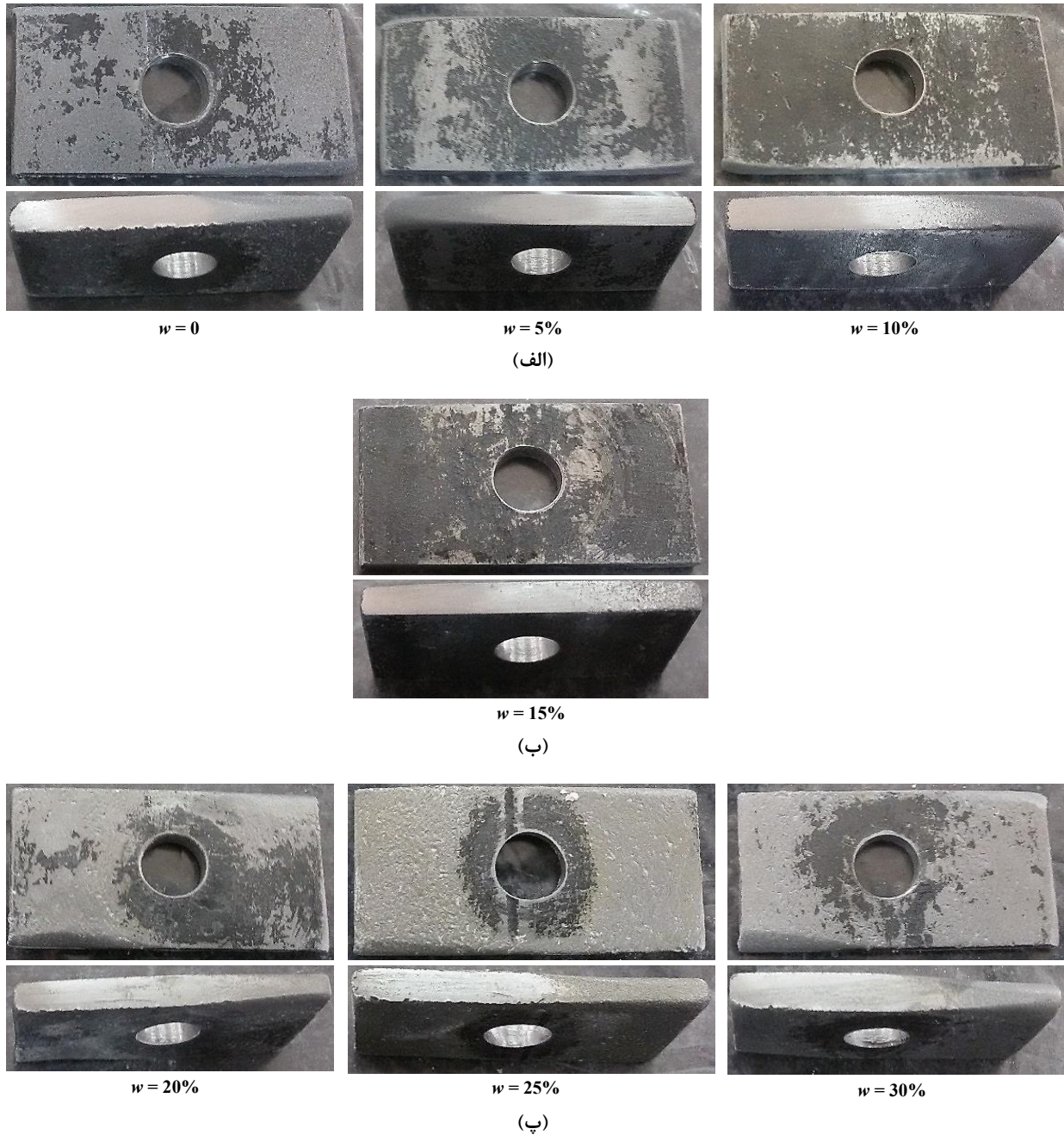
Fig. 6. The correlation between the conditions of abrasive samples and the measured LAC values based on Fig. 5d under the stress level of 2.27 kPa

به‌نمایش می‌گذارند.

شکل ۸ روند کلی تغییرات LAC بر حسب رطوبت را، بر اساس درصد‌های مختلف تالک در ترکیب نمونه، نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار تالک، ضریب سایندگی LAC کاهش می‌یابد و این روند کاهش در نمونه تالک خالص به حداکثر مقدار خود رسیده و منطبق بر محور افقی ($LAC = 0$) می‌شود. این وضعیت، نشان‌دهنده عدم وقوع سایش در نمونه تالک خالص است.

تالک دارای سختی ۱ در مقیاس موس^۱ و سیلیس دارای سختی ۷ است [۹ و ۱۲]. افزایش درصد تالک در ترکیب نمونه، به معنی کاهش سختی متوسط ترکیب است و همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، روند عمومی، کاهش سایش‌های پدید آمده، با کاهش سختی متوسط نمونه است. روند کاهشی سایش با کاهش سختی نیز در مطالعات قبلی گزارش شده است [۴]. به بیان دیگر، سایش‌های پدیدآمده، ناشی از برخورد ذرات سیلیس و پروانه فولادی‌اند و رس به

شرایط، چنین وضعیتی را نشان می‌دهند. به‌عنوان نمونه، تصاویر پروانه‌های فولادی بعد از آزمایش مربوط به شکل ۵ - پ، تحت تنش ۲/۲۷ kPa در شکل ۷ ارائه شده است. در شکل‌های ۷ - الف پروانه‌های سای یافته در نمونه‌های با رطوبت‌های صفر، ۵ و ۱۰ درصد به نمایش درآمده‌اند. با توجه به شکل ۵ - ت، این درصد‌های رطوبت در محدوده کمتر از حد خمیری قرار دارند. در شکل ۷ - ب وضعیت سایش در پروانه‌های فولادی به نمایش درآمده، که با رطوبتی در محدوده میان حد خمیری و حد روانی آزمایش شده است. پروانه‌های به نمایش درآمده در شکل ۷ - پ تحت رطوبت‌هایی بیش از حد روانی سایش یافته‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، سایش در گوشه‌های پروانه‌های فولادی در شکل ۷ - الف، قابل‌ملاحظه است. در قطعه فولادی شکل ۷ - ب سایش چندانی مشاهده نمی‌گردد. با این حال میزان جدایش مواد از کناره‌های قطعات به‌نمایش درآمده در شکل ۷ - پ مجدداً به میزان قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافته است. این شکل‌ها نیز به روشنی، تاثیر رفتار خمیری جزء رسی موجود در مخلوط ساینده را بر سایش‌های ایجاد شده روی قطعه فولادی،

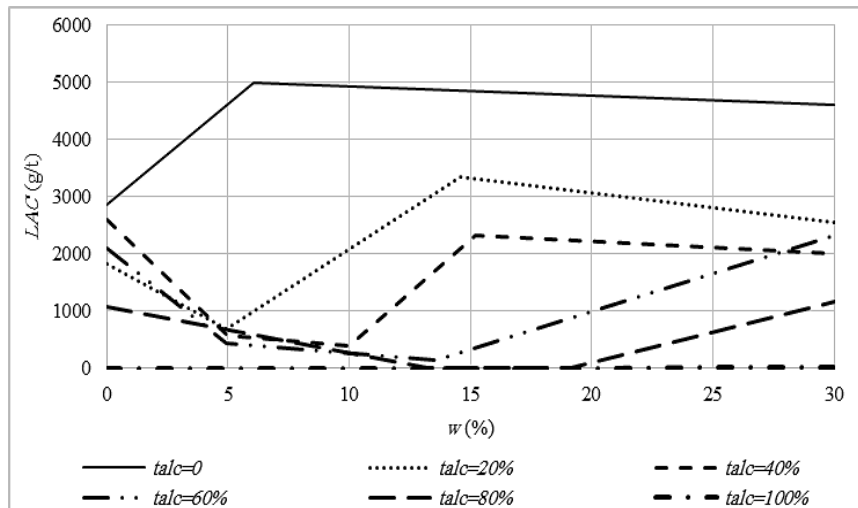


شکل ۷. تصاویر پروانه‌های فولادی بعد از انجام آزمایش طبق نمودار شکل ۵- پ با تنش 2.27 kPa . الف) رطوبت‌های کمتر از حد خمیری، ب) رطوبت میان حد خمیری و روانی، پ) رطوبت‌های بیش از حد روانی.

Fig. 7. The photos of steel propeller after tests based on Fig. 5c under stress level of 2.27 kPa. a) water contents lower than plastic limit. b) water contents between plastic and liquid limit. c) water contents higher than liquid limit

افزایش رطوبت در محدوده قبل از حد خمیری منجر به کاهش LAC شده و این کاهش در محدوده میان حد خمیری و حد روانی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. افزایش دوباره رطوبت در محدوده بزرگ‌تر از حد روانی، منجر به افزایش LAC می‌گردد. در واقع قبل از رسیدن به حد خمیری، به علت کمبود آب و سیالیت کم مخلوط،

تنهایی نقش مستقیمی در وقوع سایش ندارد. اما، همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با اضافه شدن رطوبت، رس می‌تواند تاثیر قابل‌توجهی بر احتمال برخورد میان ذرات سیلیس و فولاد داشته و در فرآیند سایش نقش مهمی ایفا نماید. این گراف‌ها نقش متناقض رطوبت در شرایط مختلف را نیز نشان می‌دهند. به‌گونه‌ای که ابتدا



شکل ۸. نمودارهای تغییرات ضریب سایندگی LAC با رطوبت در مقادیر تالک مختلف تحت تنش ۳/۴۹ kPa
 Fig. 8. The variations of LAC with water contents for different talc percentages under the stress level of 3.49

جدول ۲. مقادیر AMC ترکیب‌های مختلف سیلیس و تالک
 Table 2. The AMC values for different silica and talc mixtures

AMC	مقدار سیلیس در ترکیب (%)	مقدار تالک در ترکیب (%)
۱/۰۰	۱۰۰	۰
۰/۸۳	۸۰	۲۰
۰/۶۶	۶۰	۴۰
۰/۴۹	۴۰	۶۰
۰/۳۱	۲۰	۸۰
۰/۱۴	۰	۱۰۰

ساینده^۱ (AMC) استفاده شد که یک میانگین‌گیری وزنی برای به‌دست آوردن سختی متوسط کانی‌های یک نمونه سنگی یا یک ترکیب خاک است و از آن به‌عنوان یک پارامتر اولیه برای ارزیابی قدرت سایندگی محیط‌های سنگی و خاکی استفاده می‌شود. برای ترکیب‌های مختلف، مقدار AMC با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید. اعداد به‌دست آمده برای ترکیب‌های ساینده مختلف، در جدول ۲ خلاصه شده‌اند.

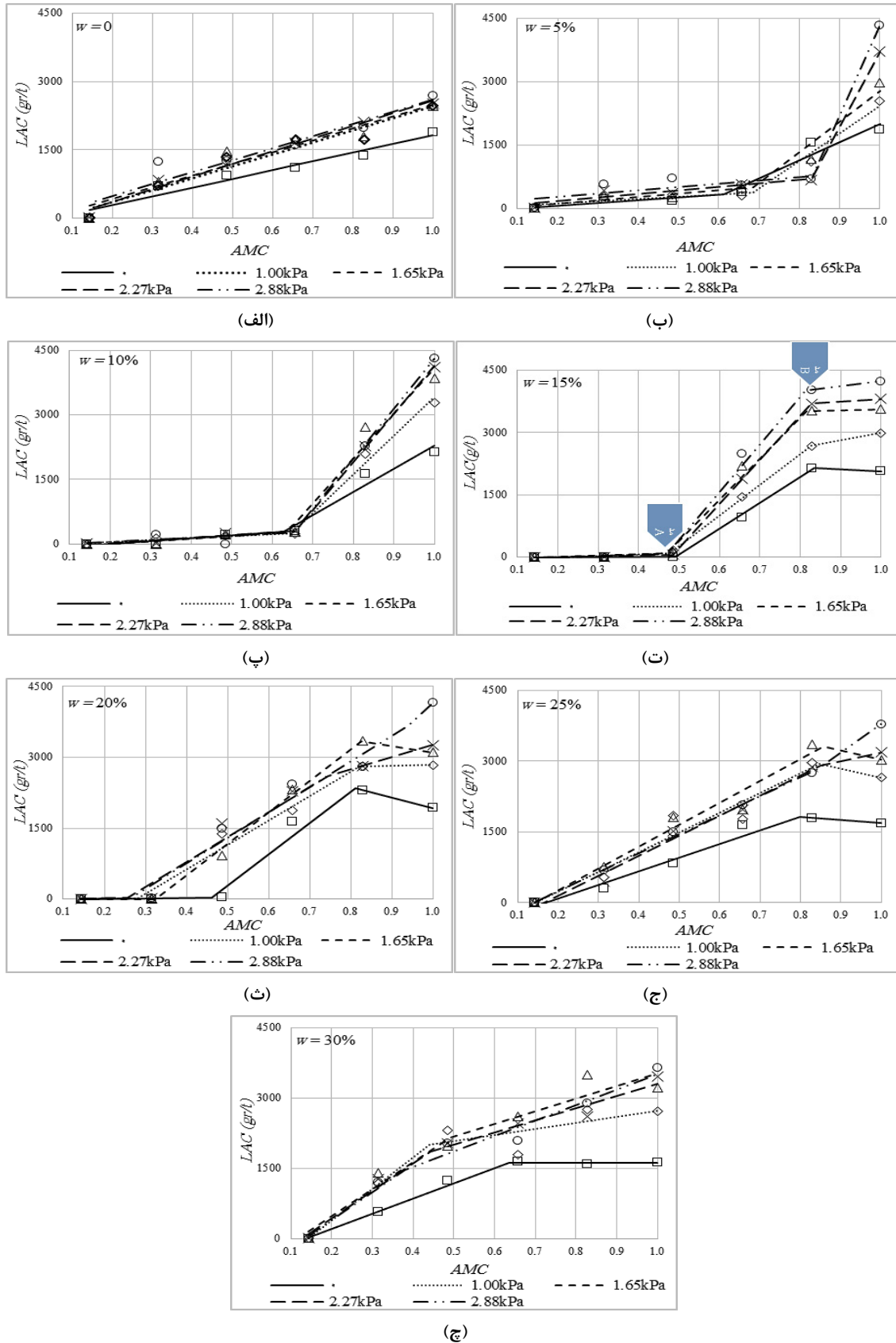
$$AMC = \sum_{i=1}^n A_i R_i \quad (6)$$

که در آن A_i نسبت سختی کانی نام به سختی کوارتز، براساس مقیاس سختی موس، R_i سهم کانی نام در ترکیب و n تعداد کانی‌های تشکیل‌دهنده است [۱۳]. لازم به یادآوری است، سختی

ذرات سیلیس برخورد کمتری با پروانه داشته و با افزایش رطوبت، به هم چسبیدن ذرات شدیدتر می‌شود، تا به کمترین مقدار خود در محدوده میان حد خمیری و روانی برسد. با افزایش میزان رطوبت به مقادیر بیش از حد روانی، به علت افزایش سیالیت مخلوط و جاری شدن، امکان برخورد ذرات سیلیسی درشت، مجدداً افزایش یافته و LAC نیز افزایش می‌یابد.

۲-۳- اثر نسبت ذرات رس

با توجه به حضور دو جزء رس و سیلیس در مخلوط‌های ساینده مورد بررسی، می‌توان نسبت این اجزاء را به صورت سختی متوسط مخلوط بیان کرد. برای این منظور از مفهوم محتوای کانی‌های



شکل ۹. تغییرات ضریب سایندگی LAC با سختی AMC در تنش‌های مختلف. الف) $w = 0$ ، ب) $w = 5\%$ ، پ) $w = 10\%$ ، ت) $w = 15\%$ ، ث) $w = 20\%$ ، ج) $w = 25\%$ ، چ) $w = 30\%$.

Fig. 9. The variations of LAC with AMC hardness under different stress levels. a) $w = 0$. b) $w = 5\%$. c) $w = 10\%$. d) $w = 15\%$. e) $w = 20\%$. f) $w = 25\%$. g) $w = 30\%$.

خمیری و روانی مطرح نیست. به همین دلیل، ظهور این شکستگی در روندهای برازش یافته بر نمودارها را می‌توان با وقوع زه‌کشی آب اضافه شده به نمونه، در اثر اعمال بار وزنه‌ها توجیه کرد. به عبارت دیگر، با کاهش مقدار تالک در ترکیب نمونه، میزان جذب آب اضافه شده کاهش می‌یابد و در اثر اعمال بار، آب اضافی از محفظه آزمایش خارج می‌گردد. در نتیجه، ادامه آزمایش با رطوبتی متفاوت از لحظه‌های اولیه شروع آزمایش، ادامه می‌یابد.

در گروه چهارم یا آخرین گروه (رطوبت ۲۵ و ۳۰ درصد)، شکل‌های ۹-ج و ۹-چ، رابطه‌ای خطی و مستقیم میان ضریب ساینده‌گی LAC و AMC با شیب زیاد در ابتدای نمودارها مشاهده می‌شود. در این نمودارها نیز یک نقطه شکستگی مشهود است. با توجه به محل این نقاط که در سختی‌های زیاد ظاهر می‌شوند، می‌توان گفت شکستگی‌ها از نوع مد B بوده و علت آن، مشابه روند ذکر شده برای حالت قبل می‌باشد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که روند خطی و صعودی این نمودارها، تشابه زیادی با حالت خشک دارد. در واقع با افزایش قابل توجه رطوبت، مجدداً امکان چرخش آزادانه ذرات ترکیب فراهم شده و نمودارهای به‌دست آمده، تا حدود زیادی مشابه حالت خشک می‌گردند.

۳-۳- اثر بار

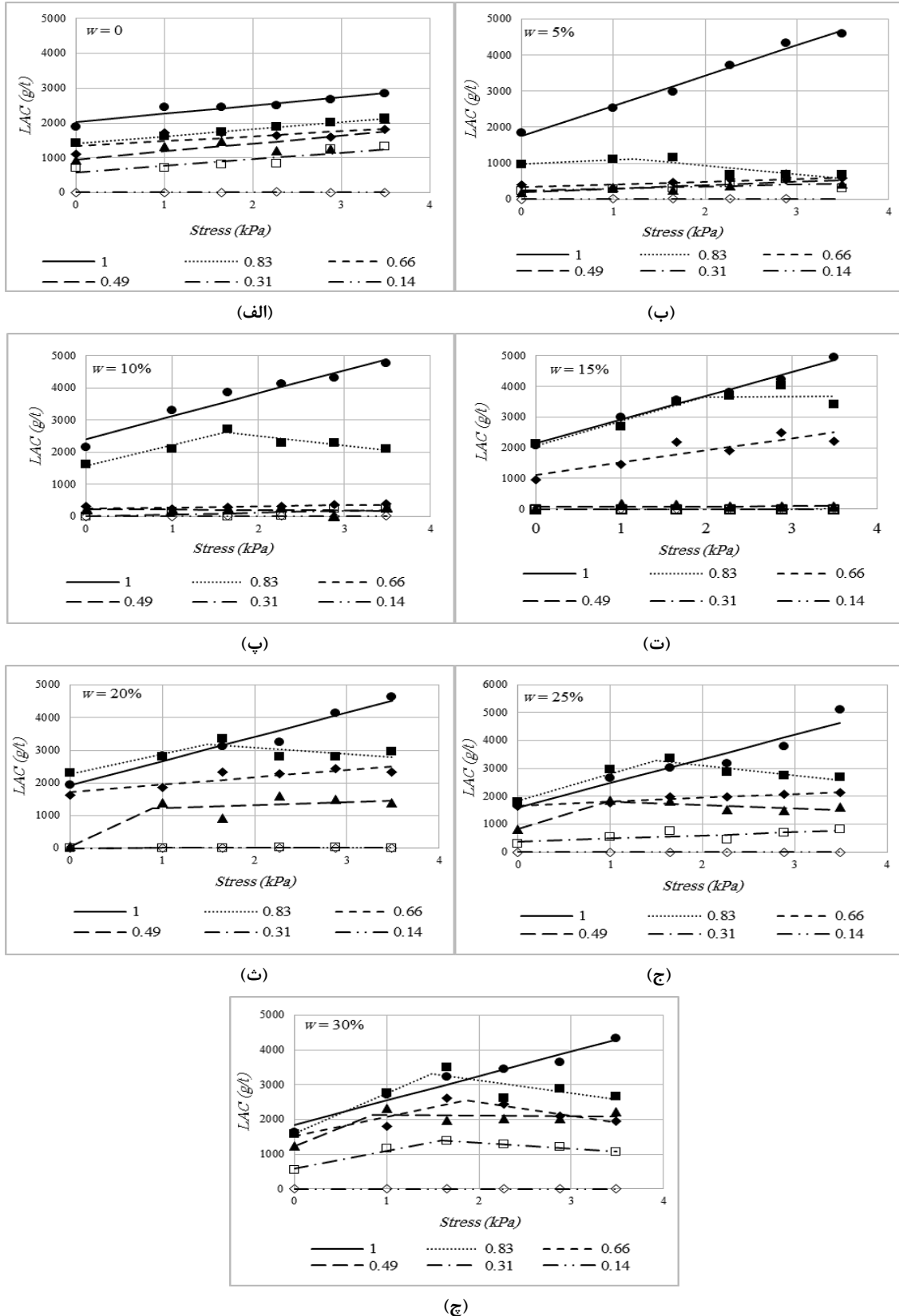
شکل ۱۰ تغییرات ضریب ساینده‌گی LAC با تنش‌های اعمال شده را در سطوح مختلف سختی، به صورت جداگانه برای رطوبت‌های ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد نشان می‌دهد. هر یک از خطوط برازش یافته نمایانگر یک مقدار AMC ثابت اند که معادل با یک ترکیب ثابت از سیلیس و رس می‌باشند. روند تغییرات تمامی گراف‌ها، نشانگر رابطه خطی میان LAC و تنش‌های اعمالی، در ترکیب سیلیس خالص است. می‌توان گفت افزایش بار، موجب افزایش تنش موثر میان دانه‌ها شده و در نتیجه، ضرایب ساینده‌گی افزایش می‌یابد. برزگری و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۵ ارتباط‌های مشابهی را میان بارهای مکانیکی اعمال شده به نمونه و افزایش سایش‌های پدید آمده، گزارش کرده‌اند [۱۵]. با این وجود، در شرایطی که نمونه غالباً تالک (۸۰ و ۱۰۰ درصد) است، ارتباطی میان تنش‌های اعمالی و LAC دیده نمی‌شود. در واقع، افزایش بار در شرایط غالباً ریزدانه، موجب افزایش چندانی در سایش‌های پدید آمده در قطعه فولادی

تالک در مقیاس سختی موس برابر ۱ و سختی کوآرتز برابر ۷ می‌باشد. در شکل ۹ منحنی‌های LAC - AMC در سطوح مختلف تنش به نمایش درآمده‌اند.

هر کدام از نمودارهای ۹-الف تا ۹-چ، در یک درصد رطوبت ثابت به‌دست آمده‌اند (به ترتیب صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد). خطوط برازش یافته بر داده‌های این نمودارها نیز هر کدام یک بار ثابت اعمال شده به سطح نمونه ساینده را نمایندگی می‌کنند. با توجه به شکل ۹، ارتباط میان LAC - AMC را می‌توان در چهار حالت کلی در نظر گرفت. گروه اول نمودارها در شکل ۹-الف، رابطه‌ای خطی میان LAC و AMC نشان می‌دهند. در این حالت، نمونه‌ها خشک هستند. مشاهده می‌شود با افزایش محتوای کانی‌های ساینده، سایش‌های ایجاد شده روی پروانه فولادی افزایش می‌یابد. این ارتباط توسط سایر مولفین نیز گزارش شده است [۱۶-۱۴].

در گروه دوم نمودارها (رطوبت ۵ و ۱۰ درصد) در شکل‌های ۹-ب و ۹-پ، یک نقطه شکست روی نمودارها ظاهر می‌شود که قبل از آن، ارتباط چندانی میان مقادیر LAC و AMC مشاهده نمی‌گردد. با تطابق محل این نقطه با نمودارهای (LAC - w) شکل‌های ۵-ب و شکل ۵-پ مشاهده می‌شود این نقطه شکست مربوط به زمانی است که رطوبت نمونه به مقادیر بیش از رطوبت حد روانی افزایش یافته است. بنابراین، با افزایش رطوبت، مجدداً احتمال برخورد ذرات درشت‌دانه سیلیس با پروانه افزایش می‌یابد و باعث ایجاد ضرایب ساینده‌گی بیشتر می‌گردد.

در گروه سوم این نمودارها (رطوبت ۱۵ و ۲۰ درصد)، در شکل‌های ۹-ت و ۹-ث، نقاط شکست در روندهای برازش شده، در دو قسمت مشاهده می‌گردند. برای توصیف این نقاط شکست، از دو نوع شکستگی مد A و B استفاده شده است. مد A نشان دهنده نقاط شکستی است که قبل از آن، ارتباط چندانی میان LAC و AMC مشاهده نمی‌شود و مد B نیز نشانگر حالتی است که بعد از آن، افزایش سختی سبب افزایش LAC با شیبی کم، می‌شود. همان‌طور که برای گروه قبلی هم بیان شد، علت شکستگی مد A در این گروه از نمودارها نیز، مشابه گروه قبلی، افزایش میزان رطوبت در محدوده فراتر از حد روانی است. با این وجود، همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مد B در مقادیر سختی بالا (سیلیس زیاد) ظاهر می‌شود. بنابراین به دلیل وجود سیلیس زیاد، امکان تشکیل خمیر چسبیده وجود نداشته و موضوع رطوبت حد



شکل ۱۰. تغییرات ضریب سایندگی LAC با تنش‌های اعمالی در سختی‌های مختلف. الف) $w = 0$ ، ب) $w = 5\%$ ، پ) $w = 10\%$ ، ت) $w = 15\%$ ، ث) $w = 20\%$ ، ج) $w = 25\%$ ، چ) $w = 30\%$.

Fig. 10. The variations of LAC with the applied stress levels. a) $w = 0$. b) $w = 5\%$. c) $w = 10\%$. d) $w = 15\%$. e) $w = 20\%$. f) $w = 25\%$. g) $w = 30\%$.

عملی تجربه می‌کنند، اصطکاک و سایش رخ می‌دهد. اصطکاک علت اصلی اتلاف انرژی است. در حالی که سایش، عامل اصلی جدایش ماده است [۱۷]. از انرژی ویژه سایش به‌عنوان پارامتری برای توصیف مکانیزم‌های سایش خراشنده^۱ استفاده شده است [۱۸]. این پارامتر، اطلاعاتی در مورد میزان انرژی ویژه لازم برای جدایش حجم یک میلی‌مترمکعب از ماده را فراهم می‌کند. انرژی اصطکاکی را می‌توان از حاصل ضرب توان اصطکاکی (P_F) در طول مدت زمان انجام آزمایش (t_f) به‌دست آورد:

$$E_F = P_F t_f \quad (7)$$

انرژی ویژه سایش (E_W) نیز از نسبت انرژی اصطکاکی به حجم از دست رفته نمونه سایش یافته (V_W)، به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$E_W = \frac{E_F}{V_W} \quad (8)$$

مطالعات انجام شده نشان داده‌اند که انرژی ویژه سایش در مواد ساینده، کمتر از مقدار آن در مواد غیرساینده است. زیرا نمونه‌های ساینده با سهولت بیشتری می‌توانند سبب جدایش ماده از جسم در حال سایش گردند [۱۷]. با استفاده از انرژی مصرفی موتورهای الکتریکی و با استفاده از نمودارهای کارایی موتور، امکان تخمین گشتاور اعمال شده به محور محرک دستگاه نیز، با اندازه‌گیری انرژی مصرفی، وجود دارد [۲].

همان‌گونه که گفته شد، در مطالعات حاضر با استفاده از یک توان‌سنج، توان مصرفی موتور الکتریکی در هر لحظه از اجرای آزمون LCPC، اندازه‌گیری و بوسیله یک دیتالاگر ثبت گردید. با توجه به اینکه توان به‌صورت انرژی مصرف شده در واحد زمان تعریف می‌شود، می‌توان انرژی مصرف شده در هر آزمایش را با استفاده از رابطه زیر به‌دست آورد:

$$E = \int_0^t P dt \quad (9)$$

در رابطه بالا، E مقدار انرژی کل مصرف شده در هر آزمون، t مدت زمان آزمون (s^{300}) و P توان لحظه‌ای است. مثالی از نمودارهای $P-t$ ثبت شده به‌هنگام آزمایش‌ها، در شکل ۱۱ به نمایش درآمده است. با محاسبه عددی انتگرال فوق برای داده‌های هر آزمایش، می‌توان مقادیر E مربوط به هر آزمایش را به‌دست آورد. برای نشان

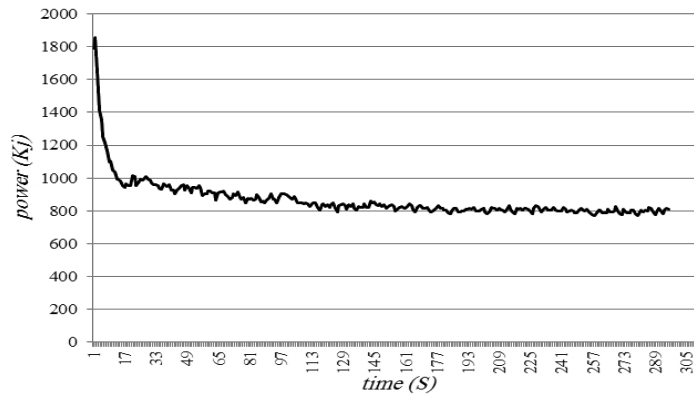
نمی‌گردد. علت این امر نیز می‌تواند ماهیت رسی ذرات باشد که با افزایش آن‌ها در مخلوط نمونه، خاصیت تراکم‌پذیری نمونه خراشنده، از میان می‌رود.

طبق شکل ۱۰ - الف با افزایش مقدار تالک در نمونه (کاهش ذرات ساینده)، ارتباط میان LAC و تنش، به‌صورت تدریجی کمتر شده و در نهایت در نمونه تالک ۱۰۰٪ از بین می‌رود. در شکل‌های ۱۰ - ب، ۱۰ - پ و ۱۰ - ت، نمودارها در دو دسته جدا از هم مشاهده می‌شوند. نمودارهای قسمت بالاتر، که دارای مقادیر تالک کمتری می‌باشند، و نمودارهای منطبق بر محور افقی، که دارای ضرایب ساینده‌گی کم و نزدیک به صفر هستند. می‌توان گفت با افزایش رطوبت به نمونه‌هایی که غالباً از تالک تشکیل شده‌اند (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ریزدانه) مخلوط چسبنده‌ای تشکیل می‌شود و امکان برخورد موثر ذرات درشت‌دانه با پروانه فراهم نمی‌گردد و بنابراین، ضریب ساینده‌گی LAC به شدت کاهش می‌یابد. هم‌چنین مشاهده می‌شود در این شرایط، افزایش تنش عملی نیز تاثیری بر روند تغییرات LAC نمی‌گذارد.

در شکل‌های ۱۰ - ث، ۱۰ - ج و ۱۰ - چ، تقریباً تمامی نمودارها به آسانی و به صورت جدا از هم قابل تشخیص‌اند. به علت رطوبت زیاد در این نمونه‌ها، ترکیب نمونه در اثر اضافه شدن آب به حالت خمیری سفت در نمی‌آید و به‌دلیل جریان‌یافتگی در ترکیب نمونه، امکان چرخش نسبتاً یکنواخت و آزادانه در نمونه فراهم می‌گردد. در این شکل‌ها نیز با افزایش مقدار تالک (کاهش سختی)، ارتباط میان LAC و تنش کم‌رنگ‌تر می‌شود. هم‌چنین در بعضی از نمودارهای شکل‌های یاد شده، نقاط شکست مشاهده می‌شوند. به‌علت حضور رطوبت قابل‌توجه در این آزمایش‌ها، به نظر می‌رسد که دلیل به‌وجود آمدن این نقاط، وقوع زه‌کشی باشد. به عبارت دیگر، با افزایش بار اعمال شده، تمرکز تنش میان ذرات ساینده افزایش یافته و ضریب ساینده‌گی LAC به حداکثر مقدار خود می‌رسد و با افزایش مجدد بار، زه‌کشی رخ می‌دهد و ادامه آزمایش، با رطوبتی کمتر یا تحت رطوبت‌های نسبتاً ثابت ادامه می‌یابد که موجب تشکیل شکستگی‌هایی، در نمودارها می‌گردد.

۳-۴- ارتباط ضرایب ساینده‌گی LAC و انرژی مصرفی

هنگامی که دو سطح متقابل، لغزش یا غلتشی را تحت بارهای



شکل ۱۱. نمودار توان مصرفی ثبت شده به وسیله دیتالاگر
 Fig. 11. The graph of consumed power recorded by data logger

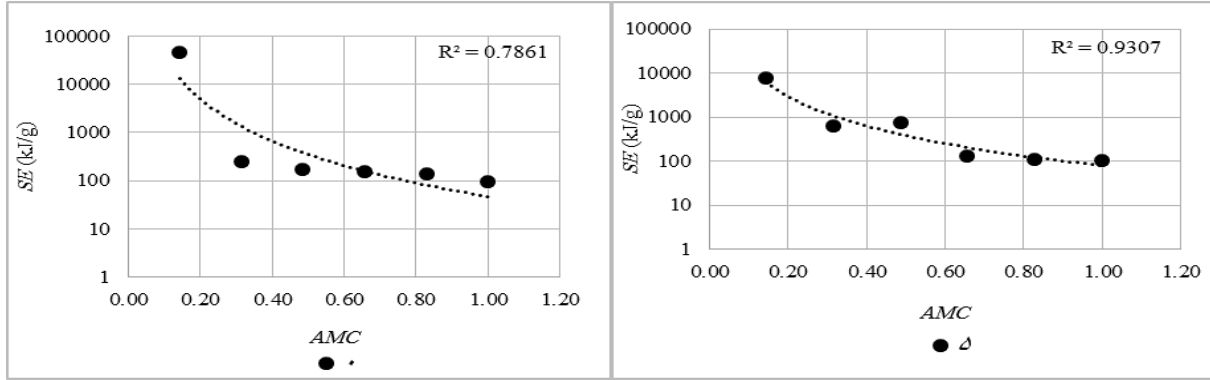
روند مشابهی است. می توان روندهای موجود در شکل ۱۳ را به دو گروه تقسیم نمود. نمودارهای بالایی، که مربوط به رطوبت های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد می باشند و نمودارهای پایین تر، که مختص رطوبت های ۰، ۵، ۲۵ و ۳۰ درصدند. با توجه به رابطه ۹، علت قرارگیری نمودارها در قسمت بالاتر، می تواند افزایش انرژی مصرفی، کاهش میزان ساییدگی قطعه و یا هر دو باشد. به منظور بررسی دقیق تر علت این امر، نمودار تغییرات LAC و انرژی با رطوبت، که به ترتیب بر حسب بیشترین مقادیر LAC و انرژی، نرمال شده اند، در حالت بدون تنش و نسبت کانی های ساینده ۰/۳۱ رسم گردید و در شکل ۱۴ به نمایش درآمد. با توجه به شکل ۱۴، مشاهده می گردد روند تغییرات گراف های LAC و انرژی، تا حدودی مشابه اند. همچنین در محدوده میان حدود خمیری و روانی، کمترین مقادیر انرژی مصرفی، مشابه روند تغییرات LAC، به دست می آید. بنابراین، می توان گفت علت جدا شدن منحنی های مربوط به رطوبت های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد از بقیه منحنی ها، در شکل ۱۳، کاهش میزان ساییدگی است. ولی با توجه به شکل ۱۴، مشخص است که انرژی نیز کاهش می یابد. با این تفاوت که میزان کاهش سایش با افزایش رطوبت، شدیدتر از کاهش پدید آمده در انرژی است. بر اساس شکل ۱۴ مشاهده می شود در اثر تغییرات رطوبت، LAC در دامنه ای میان صفر الی ۱۰۰٪ تغییر می کند، در حالی که که تاثیر تغییرات رطوبت بر نمودار انرژی، در حدود صفر الی ۲۰٪ است. به بیان دیگر، تاثیر رطوبت بر میزان ضریب ساییدگی، بیش از تاثیر آن بر انرژی مصرف شده در آزمایش است. بررسی روند گراف های انرژی در شکل ۱۴، نشان می دهد که با افزایش رطوبت، ابتدا انرژی کاهش

دادن ارتباط میان ضریب ساییدگی LAC با انرژی مصرفی و سایر متغیرها (رطوبت، سختی)، از مفهوم انرژی ویژه سایش که به صورت مقدار انرژی صرف شده برای ایجاد سایش واحد (گرم) تعریف می شود، استفاده شد. انرژی ویژه سایش نیز همان گونه که اشاره شد، از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$(9) \quad \text{انرژی مصرف شده در هر آزمون (Kj)} = \frac{\text{مقدار سایش روی داده در قطعه فولادی (g)}}{\text{انرژی ویژه سایش}}$$

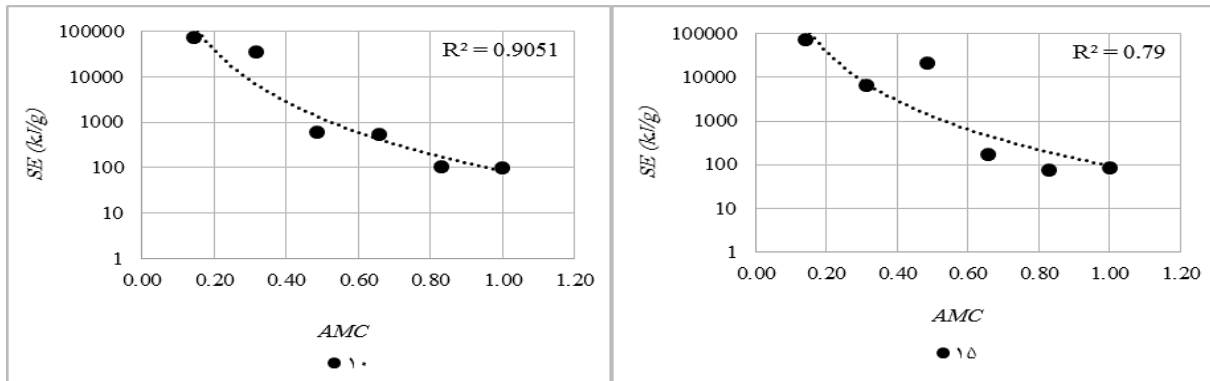
نمودارهای تغییرات انرژی ویژه سایش با سختی، برای رطوبت های مختلف و در شرایط بدون اعمال تنش در شکل ۱۲ نشان داده شده است. به علت احتمال وجود خطاهایی به هنگام آزمایش با حضور وزنه های اعمال بار، و بنابراین وجود خطا در مقادیر توان های ثبت شده، نمودارهای این قسمت فقط برای حالت بدون اعمال تنش رسم شده اند. با توجه به نمودارهای شکل ۱۲، با افزایش سختی، انرژی ویژه به صورت یک تابع توانی کاهش می یابد. ضرایب هم بستگی به دست آمده نیز قابل توجه اند. به بیان دیگر، با افزایش سختی متوسط نمونه، مقدار انرژی لازم برای وقوع سایش در قطعه کاهش می یابد. بنابراین، برای ایجاد سایش در شرایطی که مقدار تالک (رس) زیاد است، نیاز به صرف انرژی بیش تری وجود دارد.

به منظور مقایسه دقیق تر اثر رطوبت بر نمودارهای شکل ۱۲، تمامی روندهای نمودارهای یاد شده، مجدداً با هم در یک نمودار رسم گردید و در شکل ۱۳ نشان داده شد. بر اساس این شکل، مشاهده می شود روند تغییرات انرژی ویژه با AMC، در سطوح مختلف رطوبت، دارای



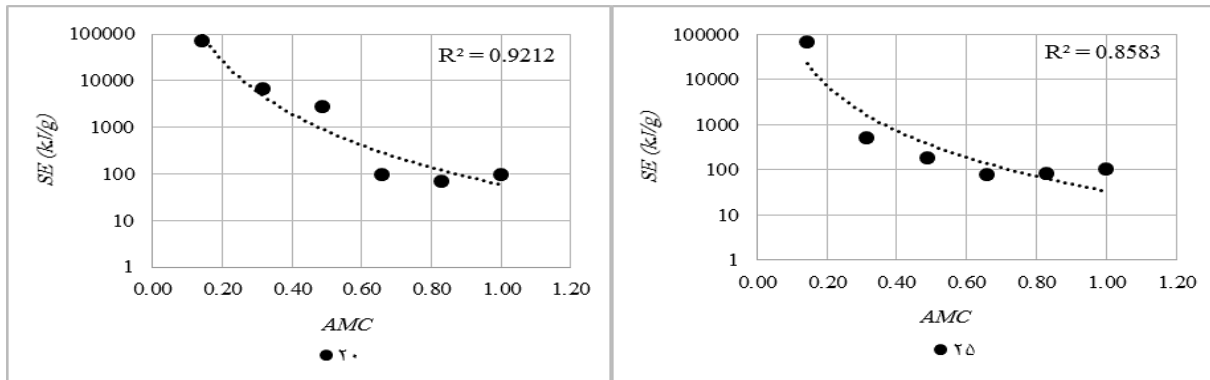
(الف)

(ب)



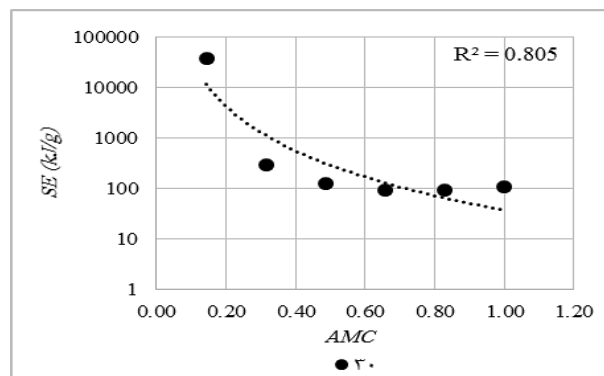
(پ)

(ت)



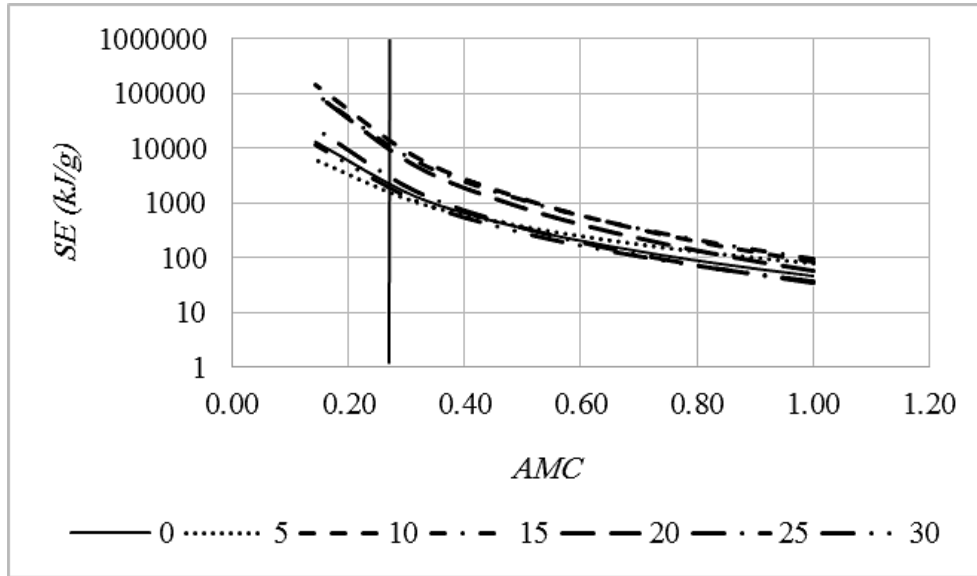
(ث)

(ج)



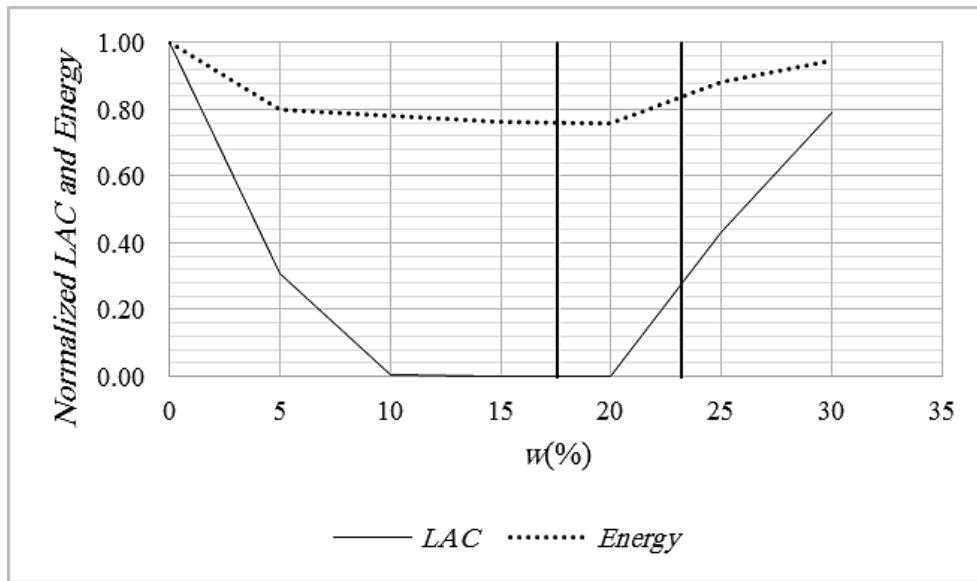
(ج)

شکل ۱۲. تغییرات انرژی ویژه با AMC. الف) $w = 0$ ، ب) $w = 5\%$ ، پ) $w = 10\%$ ، ت) $w = 15\%$ ، ث) $w = 20\%$ ، ج) $w = 25\%$ ، گ) $w = 30\%$.
 Fig. 12. The variations of specific energy with AMC values. a) $w = 0$. b) $w = 5\%$. c) $w = 10\%$. d) $w = 15\%$. e) $w = 20\%$. f) $w = 25\%$. g) $w = 30\%$.



شکل ۱۳. تغییرات انرژی ویژه با AMC در سطوح مختلف رطوبت.

Fig. 13. The variations of specific energy with AMC values under different water content levels



شکل ۱۴. تغییرات مقادیر تعدیل شده LAC و انرژی با رطوبت.

Fig. 14. The variations of modified LAC and energy values with moisture

دوران می کند. در ادامه با افزایش رطوبت به مقدار بیش از حد روانی، چسبندگی از بین رفته و مجددا انرژی مصرفی برای دور راندن دوغاب از مسیر قطعه سایشی، افزایش می یابد. با توجه به نتایج مورد اشاره، به نظر می رسد که میان مکانیزم دوران پروانه فولادی، در آزمایش LCPC و مکانیزم حرکت برنده های مورد استفاده در TBM های زمین های نرم، تفاوت های عمده ای

یافته و سپس، تقریباً ثابت می ماند. بعد از گذر رطوبت از حد روانی، دوباره مقدار انرژی افزایش می یابد. می توان گفت در شرایط خشک، قطعه ساینده انرژی زیادی را صرف راندن ذرات خاک از محدوده چرخش خود می کند. اما با اضافه شدن رطوبت و ظهور چسبندگی در خاک، امکان پر شدن فضای خالی ایجاد شده، پس از عبور پروانه کاهش یافته و در نتیجه پروانه با سهولت بیشتر و صرف انرژی کمتری

صورت تابع توانی کاهش می‌یابد. هم‌چنین مشاهده شد تاثیر رطوبت بر میزان ضریب ساینده‌گی بیشتر از تاثیر آن انرژی مصرف شده در آزمایش است.

نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، نشان دادند که نمونه رسی مورد استفاده، به تنهایی نقشی در ساینده‌گی نمونه خاک نداشته ولی ترکیب آن با ذرات درشت‌دانه، به‌ویژه در حضور رطوبت، می‌تواند مهم و تاثیرگذار باشد. در همین راستا در حال حاضر آزمایش‌هایی با استفاده از کانی‌های رسی دیگر در حال اجرا می‌باشد. نتایج به‌دست آمده را می‌توان برای ارزیابی و پیش‌بینی سایش‌های پدید آمده در TBM‌های سپری مورد استفاده در زمین‌های نرم و تاثیر پارامترهای مختلفی چون درصد ذرات ریزدانه، محتوای آب و سطح تنش‌های حاکم بر شدت سایش‌های احتمالی، مورد استفاده قرار داد.

مراجع

- [1] K. Thuro, J. Singer, H. Käsling, M. Bauer, Soil abrasivity assessment using the LCPC testing device, Felsbau, 24(6) (2006) 37-45.
- [2] J. Rostami, E. Alavi Gharabagh, A. M. Palomino, M. Mosleh, Development of soil abrasivity testing for soft ground tunneling using shield machines, Tunnelling and Underground Space Technology, 28 (2012) 245-256.
- [3] J. Düllmann, M. Alber, R. J. Plinninger, Determining soil abrasiveness by use of index tests versus using intrinsic soil parameters, Geomechanics and Tunneling, 7 (2014) 87-97.
- [4] H. Mirmehrabi, M. Ghafoori, G. Lashkaripour, Impact of some geological parameters on soil abrasiveness, Bull Eng Geol Environ, 75 (2016) 1717-1725.
- [5] R. Najafi, Evaluation of soil abrasion capacity in mechanized excavation with LCPC test, Dissertation, Sahand University of technology, (2017) (in Persian).
- [6] AFNOR P18-579, Essai d'abrasivite' et de broyabilite, (1990).
- [7] P. Drucker, Validity of the LCPC abrasivity coefficient through the example of a recent Danube gravel, Geomechanics and tunneling, 6 (2011) 681-691.
- [8] M. Köhler, U. Maidl, L. Martak, Abrasiveness and tool

وجود داشته‌باشد. برنده‌های TBM مانند ریپر‌ها و اسکرپرها، به گونه‌ای نصب می‌شوند که خاک سینه‌کار را خراشیده و از زمین برجا جدا نمایند. در حالی که نتیجه دوران تیغه فولادی آزمون LCPC، بریدن یک ضخامت نازک پنج میلی‌متری از نمونه است. بنابراین میان مکانیزم درگیری پره فولادی در آزمایش LCPC و مکانیزم درگیری برنده‌های مورد استفاده در زمین‌های نرم، تفاوت‌های عمده‌ای وجود دارد و از این نظر، آزمون LCPC نیازمند به اعمال تغییر در شکل پروانه و چگونگی برهم کنش آن با نمونه خاک مورد استفاده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر ذرات رس در ترکیب با مواد دانه‌ای، بر ساینده‌گی خاک‌ها، با استفاده از آزمون LCPC مورد بررسی قرار گرفت. مشخص گردید که با اضافه شدن رطوبت به نمونه‌هایی با ترکیب‌های مختلف تالک و سیلیس، ضریب LAC کاهش می‌یابد و در محدوده میان حد خمیری و روانی، کمترین مقدار ضریب LAC به‌دست می‌آید. مجدداً با افزایش رطوبت به مقدار بیش از رطوبت حد روانی، ضریب LAC می‌تواند افزایش یابد. هم‌چنین در نمونه تالک خالص، ارتباطی میان LAC و w مشاهده نشد. حضور رطوبت موجب تغییراتی در روند خطی و مستقیم، ضریب LAC با افزایش سختی متوسط ترکیب ساینده گردید. قبل از رسیدن به حد روانی نمونه، ارتباط چندانی میان AMC و LAC مشاهده نشد و با افزایش رطوبت به مقدار بیش از حد روانی، دوباره رابطه خطی و صعودی میان AMC و LAC ظاهر شد. حضور رس در ترکیب درشت‌دانه، موجب کاهش اثر افزایش تنش بر افزایش ضرایب LAC گردید. دلیل این امر ناشی از کاهش تراکم‌پذیری نمونه به‌دلیل افزایش جزء ریزدانه است. افزایش تنش موثر اعمالی در شرایط کاملاً رسی، سبب افزایش ضریب ساینده‌گی LAC نمی‌شود. بعد از وقوع زه‌کشی در نمونه، شیب روند افزایشی LAC با افزایش AMC کمتر شده و حتی در برخی موارد جهت شیب عوض می‌شود که علت آن کاهش رطوبت باقیمانده در نمونه، بعد از وقوع زه‌کشی است. تاثیر تنش‌های اعمال شده بر افزایش میزان ساینده‌گی پروانه در نمونه‌های ساینده با سختی متوسط زیاد، بیش از نمونه‌های دارای سختی متوسط کم است. در نهایت اندازه‌گیری انرژی ویژه سایش نشان داد که با افزایش AMC مقادیر انرژی ویژه به

- 1 Ripper
- 2 Scraper

- Utilizing water, mineralogy and sedimentary properties to predict LCPC abrasivity coefficient, Bull Eng Geol Environ, 75 (2016) 841-851.
- [15] G. Barzegari, A. Uromeihy, J. Zhao, Parametric study of soil abrasivity for predicting wear issue in TBM tunneling project, Tunnelling and underground space technology, 48 (2015) 43-57.
- [16] S. Kahraman, M. Fener, H. Käsling, K. Thuro, The influences of textural parameters of grains on the LCPC abrasivity of coarse-grained igneous rocks, Tunnelling and Underground Space Technology, 58 (2016) 216-223.
- [17] M. Petrica, E. Badisch, T. Peinsitt, Abrasive wear mechanisms and their relation to rock properties, Wear 308 (2013) 86-94.
- [18] M. Petrica, M. Painsi, Badisch, T. Peinsitt, Wear mechanisms on martensitic steels generated by different rock types in 2-body conditions, Tribology Letters (2013).
- wear in shield tunneling in soil, Geomechanics and Tunneling, 4 (2011) 36-53.
- [9] M. T. Hamzaban, H. Memarian, J. Rostami, Comparison of various rock abrasivity testing methods, Iranian Journal of Mining Engineering, 8(19) (2013) 87-106. (in Persian)
- [10] B. Nilsen, F. Dahl, J. Holzhäuser, P. Raleigh, SAT: NTNU's new soil abrasion test, Tunnels & Tunneling International (2006) 43-45.
- [11] K. Thuro, H. Käsling, Classification of the abrasiveness of soil and rock, Bull Eng Geol Environ, 68 (2009) 17-26.
- [12] B. Nilsen, F. Dahl, J. Holzhäuser, P. Raleigh, Abrasivity testing for rock and soils, Tunnels & Tunneling International, (2006) 47-49.
- [13] K. Thuro, Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunneling, Geol Rundsch, (1997) 426-438.
- [14] A. Hashemnejad, M. Ghafoori, S. Tarigh Azali,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Hosseini Tavana, M.T. Hamzaban, The Effect of Clay on Soil Abrasivity in the results of LCPC Test, Amirkabir J. Civil Eng., 52(2) (2020) 351-370.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14808.5746](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14808.5746)



