

تأثیر سرعت لغزشی قطعات لغزنده از جنس مختلف و مقدار رطوبت خاک بر ضریب اصطکاک خارجی سه نوع خاک

یوسف عباسپور گیلانده^{۱*}، فرشته حسن خانی قوام^۲ و غلامحسین شاهقلی^۳

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: استاد؛ دانشجوی سابق کارشناسی ارشد؛ و دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱/۱۶

چکیده

طراحی و بومی‌سازی ادوات و ماشین‌های کشاورزی نیاز به تعیین دقیق خواص فیزیکی و مکانیکی خاک از جمله ضریب اصطکاک خارجی آن دارد. در این تحقیق اثر سرعت لغزشی (در سه سطح ۰/۵، ۲/۵، و ۳/۵ سانتی‌متر بر ثانیه) چهار قطعه لغزنده فولادی، چدنی، لاستیکی و تفلونی بر ضریب اصطکاک خارجی سه نوع خاک لومی، لومی شنی، و شنی لومی در پنج سطح رطوبت بررسی شد. برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک خاک و فلز و چسبندگی، از یک سیستم اندازه‌گیری دقیق استفاده گردید. داده‌ها در قالب طرح فاکتوریل ۳×۴×۵ و بر پایه طرح بلوک کامل تصادفی با استفاده از نرم‌افزار MSTATC تحلیل شدند. با توجه به تفاوت درصد رطوبت در فازهای مختلف اصطکاک، چسبندگی و سیالی در خاک‌های با بافت مختلف تجزیه و تحلیل آماری برای هر بافت خاک به صورت جداگانه صورت گرفت و برای مطالعه اثر بافت از طرح عاملی آشیانه‌ای استفاده شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که اثر سه سطح سرعت لغزشی بر مقادیر ضریب اصطکاک خارجی خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است. با افزایش سرعت لغزشی، ضریب اصطکاک خاک و فلز نیز روند افزایشی داشته است. نتایج تحقیق همچنین نشان می‌دهد که الگوی منحنی‌های اصطکاک-مقدار رطوبت خاک‌ها در سرعت‌های لغزشی مورد آزمایش یکسان است. نتایج به دست آمده از این تحقیق و مقادیر تعیین شده پارامترهای چسبندگی و اصطکاک خارجی خاک، می‌تواند در طراحی ادوات کشاورزی، مدل‌سازی رابطه بین ماشین و خاک، محاسبه نیروی مقاومت کششی، و بررسی عملکرد و سایدگی ادوات خاک‌ورزی اهمیت اساسی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی

اصطکاک خاک- فلز، خاک‌ورزی، دگرچسبی، فاز اصطکاک، فاز روان‌کاری

مقدمه

تفاوت بسیار زیادی دارد. در حالت کلی، سه نوع اصطکاک در مطالعات مربوط به دینامیک خاک پیش می‌آید: (الف) اصطکاک خاک با فلز (μ')، (ب) اصطکاک خاک روی خاک (μ) و (ج) اصطکاک داخلی خاک ($\tan \phi$) (Gill & Vanden-Berg, 1968).

وقتی دو تکه خاک نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند، در سطوح تماسی دو طرف نیروهایی عمل خواهند کرد یا به سخنی دیگر اصطکاک ایجاد می‌شود (شکل ۱). مطابق

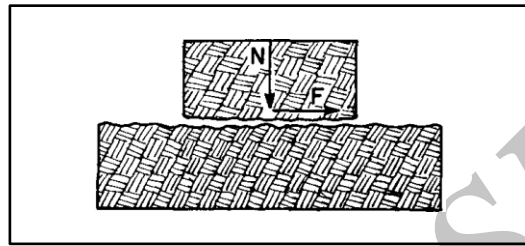
خاک‌ورزی اصلی‌ترین عامل جابه‌جایی خاک است و باعث سریدگی خاک روی قسمتی از ابزار خاک‌ورز می‌گردد. پارامتر اصطکاک خاک در ابزارهایی که سطح تماس بزرگتری با خاک دارند، عامل افزایش نیروی مقاومت کششی است. هنگام عبور دو قطعه یا دو تکه خاک از کنار هم نیز اصطکاک ایجاد می‌شود ولی باید توجه کرد که این پدیده با اصطکاک داخلی خاک

نظریه کولمب، ضریب اصطکاک به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$\mu = \frac{F}{N} = \tan \psi \quad (1)$$

μ = ضریب اصطکاک (خاک روی خاک)، F = نیروی اصطکاکی مماس بر سطح (نیوتن)، N = نیروی عمودی (عمود بر سطح) (نیوتن) و ψ = زاویه اصطکاک (زاویه‌ای که تانژانت آن برابر است با μ) (Gill & Vanden-Berg, 1968; Kepner et al., 1972).

که در آن،



شکل ۱- نیروی عمودی و نیروی اصطکاکی بین دو قسمت سخت خاک

سیستم شامل یک جسم لغزنده است که روی سطح خاک کشیده می‌شود. برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک خاک و فلز، روی قطعه لغزنده وزنه‌هایی اضافه می‌شود تا نیروی عمودی لازم (N) ایجاد گردد، پس از آن، لغزنده توسط نیروی F روی خاک کشیده می‌شود. اگر آزمایش با وزنه‌های مختلف اجرا شود، نیروی اصطکاکی حاصل از فشارهای عمودی مختلف اندازه‌گیری و نسبت به بارهای عمودی رسم می‌شود. شیب خط حاصل، ضریب اصطکاک خاک و فلز است که به عنوان زاویه اصطکاک لغزشی δ یا تانژانت زاویه ($\tan \delta = \mu'$) بیان می‌شود (Srivastava et al., 2006) و معادله آن طبق رابطه ۲ خواهد بود:

$$\mu' = \frac{F}{N} = \tan \delta \quad (2)$$

که در آن،

μ' = ضریب اصطکاک لغزشی (خارجی)، F = نیروی ایجادکننده لغزش (N)، N = نیروی عمودی روی سطوح لغزش (N)، و δ = زاویه اصطکاک خاک و فلز (درجه).

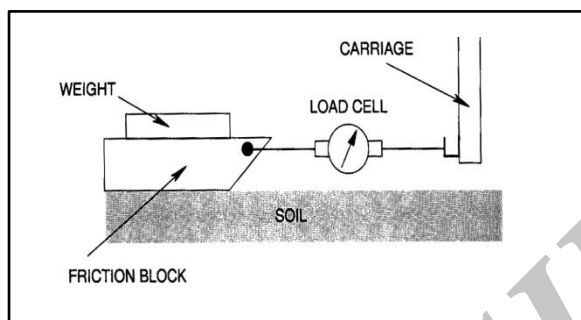
در پدیده اصطکاک خاک با خاک، خاک مانند جسمی سخت روی قطعه دیگر خاک حرکت می‌کند. در حالی که اصطکاک داخلی در هنگام شکست خاک تحت نیروی برشی تجلی می‌کند. بنابراین، در آزمون‌های مقاومت خاک، وقتی خاک شکسته شد و شروع به حرکت کرد، اصطکاک خاک با خاک پدید می‌آید که نتیجه برش یک قطعه خاک روی قطعه دیگر است. ولی تا قبل از شکست خاک، اصطکاک داخلی خاک در مقابل نیرو مقاومت می‌کند (Srivastava et al., 2006; Shahidi & Ahmadi-Moghadam, 2009) و زمانی که یک قسمت از موادی دیگر از قبیل ادوات فولادی کشاورزی جانشین خاک می‌شود اصطکاک به صورت اصطکاک خاک- فلز نمایان می‌شود. همین اصطکاک سایش تیغه‌های خاک‌ورز را به دنبال دارد (Shahidi & Ahmadi-Moghadam, 2009).

اصطکاک خاک روی ادوات خاک‌ورزی معمولاً بین خاک و فولاد و گاهی بین خاک و پلاستیک عمل می‌کند (Kepner et al., 1972). ضریب اصطکاک خاک و ابزار اساساً با استفاده از یک سیستم ساده لغزنده، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، اندازه‌گیری می‌شود. این

تأثیر سرعت لغزشی قطعات لغزنده از جنس...

این روش ساده لغزنده را تعدادی از محققان برای اندازه‌گیری اصطکاک فلز با خاک به کار برده‌اند (Gill & Vanden Berg, 1968; Kepner *et al.*, 1972).

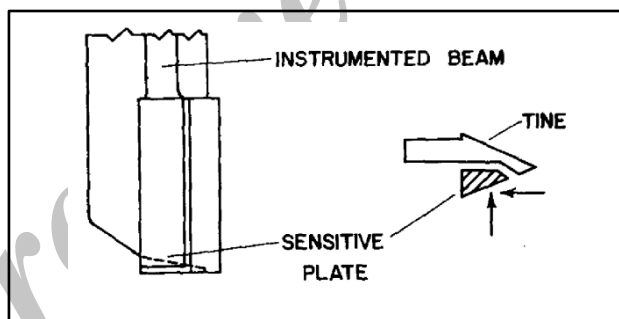
لغزنده نشان داده شده در شکل ۲ ممکن است با ورقه‌هایی از جنس پلی تترافلورواتیلن یا ماده‌ای دیگر پوشانده شده باشد که به خاک نچسبد.



شکل ۲- طرح‌واره یک سیستم ساده لغزنده به کار رفته برای تعیین ضریب اصطکاک خارجی

با یک دینامومتر متحرک درون خاک کشیده می‌شد. طرح کلی دستگاه در شکل ۳ نشان داده شده است (Payne, 1956; Rogers & Tanner, 1955).

پاین (Payne, 1956) از یک لغزنده عمودی برای آزمایش‌های مزرعه‌ای به منظور اندازه‌گیری ضریب μ' استفاده کرد. این وسیله شبیه یک چیزل عمودی است که



شکل ۳- قسمت نفوذپذیر تحت تأثیر نیروهایی که با برش خاک ایجاد می‌شوند (Rogers & Tanner, 1955)

این محققان مقاومت لغزشی خاک را در مقادیر مختلفی از فشار مخصوص بین سطوح لغزش سنجیدند که این مقاومت برشی به عوامل زیادی از قبیل نوع خاک، ترکیب مکانیکی آن، رطوبت، ساختار و بسیاری عوامل دیگر بستگی دارد. آنها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از روش حداقل مربعات می‌توان ضریب اصطکاک خاک و نیروی چسبندگی مخصوص را تعیین کرد.

جیو همکاران (Gee *et al.*, 2005) دستگاهی برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک اجزای مماس بر هم طراحی کردند و ساختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سیستم اندازه‌گیری می‌تواند بین ضریب اصطکاک مواد مختلف آزمایش فرق قائل شود و خصوصیات اصطکاکی مواد مختلف را اندازه‌گیری کند. ویلد و همکاران (Vilde *et al.*, 2005) برای تعیین ضریب اصطکاک خاک و چسبندگی روشی پیدا کردند.

در تحقیقی دیگر، ویلد و روسن (Vilde & Rucins, 2004) تأثیر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک را روی مقاومت کششی گاوآهن بررسی کردند. سختی خاک، چسبندگی و ضریب اصطکاک، همچنین پارامترهای طراحی بدنه گاوآهن و سرعت کاری عوامل مؤثر روی مقاومت کششی گاوآهن بودند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بیشینه و کمترین مقاومت گاوآهن به ترتیب در خاک‌های رسی و شنی اتفاق می‌افتد.

احمدی مقدم و همکاران (Ahmadi-Moghadam *et al.*, 2006) دستگاهی ساده برای اندازه‌گیری دگرچسبی و زاویه اصطکاک خارجی خاک طراحی کردند و ساختند. این دستگاه در داخل خاک در همان حال که تحت نیروهای عمودی قرار دارد، کشیده می‌شود و نیروی کششی لازم اندازه‌گیری خواهد شد. نتایج تحقیق نشان داده است که با افزایش رطوبت خاک، مقدار ضریب اصطکاک خاک-فلز از ۰/۳۵ تا ۰/۶۱ افزایش می‌یابد.

وقتی خاک روی فلز سر می‌خورد، یا زمانی که تأثیر تراکتور روی سطح خاک حرکت می‌کند، نیروهای دگرچسبی بین خاک و فلز یا بین خاک و لاستیک، اثر بارزی بر نیروی اصطکاک می‌گذارند. این نیروها در درجه اول زاینده لایه‌های رطوبتی در خاک است و مقدار آنها با مقدار رطوبت تغییر می‌کند. اثر نیروی دگرچسبی عبارت است از افزایش بار عمودی روی سطوح که این امر باعث افزایش نیروی اصطکاک می‌مماسی می‌گردد (Kepner *et al.*, 1972).

برای تشریح اصطکاک ماکزیمم و چسبندگی بین یک سطح فلزی سخت و خاک، رابطه ۳ که ترزاچی (Terzaghi, 1966) پیشنهاد داده است، می‌تواند استفاده شود:

$$\tau_{f \max} = C_a + p \tan \delta \quad (3)$$

که در آن،

$\tau_{f \max}$ = تنش اصطکاک ماکزیمم (نیوتن بر متر مربع)،
 C_a = چسبندگی سطوح تماسی (نیوتن بر متر مربع)،
 p = فشار عمودی (نرمال) (نیوتن بر متر مربع)،
 δ = زاویه اصطکاک بین سطح فلزی و خاک (درجه).

هینز (Haines, 1925) و نیکولز (Nichols, 1931) فرقی بین اصطکاک و چسبندگی قائل نشدند ولی فاکتورهای مؤثر روی نیروی برشی را مورد توجه قرار دادند. پایین و فانتاین (Payne & Fountaine, 1954) از معادله ۳ برای پیدا کردن مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک و فلز استفاده و آنها را با چسبندگی داخلی خاک و زاویه اصطکاک داخلی خاک مقایسه کردند. فانتاینو پایین (Fountaine & Payne, 1954) نشان دادند که چسبندگی فقط به مقدار رطوبت موجود در خاک و زاویه اصطکاک خاک و فلز بستگی دارد. نیل (Neal, 1966) نشان داد که ضریب اصطکاک خاک و لاستیک با ضریب برش داخلی خاک^۱ اختلاف کمی دارد و چسبندگی بین لاستیک و خاک خیلی کمتر از چسبندگی داخلی خاک اما خیلی شبیه به چسبندگی بین فلز و خاک است. تئوری فانتاین و پایین (Fountaine & Payne, 1954) به‌طور مناسب روابط بین چسبندگی و مقدار رطوبت را توصیف می‌کند. همچنین در یک خاک دانه‌ریز خوب تغییرات زاویه اصطکاک خاک با خاک و زاویه اصطکاک خاک با فلز تابع روان کاری و وابسته به مقدار رطوبت خاک است. در محدوده رطوبتی زیر محدوده پلاستیک مقادیر آنها به سرعت افزایش می‌یابند.

نیکولز (Nichols, 1931) اثر رطوبت روی ضریب اصطکاک خارجی خاک را بررسی کرد و نشان داد که در رطوبت‌های کم، این عامل تأثیر محسوسی روی ضریب اصطکاک ندارد. در این حالت، اصطکاک فقط نتیجه برش است و دگرچسبی بسیار کم خواهد بود. در مقادیر متوسط

سرعت‌های لغزشی پایین است. با توجه به لزوم تعیین پارامترهای خاک از قبیل چسبندگی و اصطکاک خارجی خاک در طراحی و بومی‌سازی ادوات کشاورزی، هدف از این تحقیق مطالعه اثر سرعت لغزشی چهار قطعه لغزنده فولادی، چدنی، لاستیکی و تفلونی روی ضریب اصطکاک خارجی سه نوع خاک لومی، لومی شنی و شنی لومی در مقادیر متفاوت رطوبت خاک است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، نمونه‌های خاک با سه بافت متفاوت لومی، لومی‌شنی و شنی‌لومی از سه مزرعه آموزشی - تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی برداشته و به آزمایشگاه انتقال داده شد. در آزمایشگاه ابتدا خاک‌ها با الک ۲۰۰ سرند شدند و پس از آن بافت خاک‌ها به روش هیدرومتری و به کمک مثلث بافت خاک USDA تعیین شد (جدول ۱).

جدول ۱- بافت خاک‌های مورد آزمایش

بافت خاک	درصد سیلت	درصد شن	درصد رس
لومی	۲۹/۳۳	۴۵/۶۶	۲۵/۰۱
لومی شنی	۲۳/۵	۵۵	۱۱/۵
شنی لومی	۱۱/۵	۷۹/۵	۹

درصد برای خاک لومی، ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۲۹ درصد برای خاک لومی شنی و ۷، ۱۳، ۲۱، ۳۲ و ۳۹ درصد برای خاک شنی لومی)، سه سطح سرعت ۰/۵، ۲/۵ و ۳/۵ سانتی‌متر بر ثانیه، چهار جنس فولاد، چدن، لاستیک و تفلون، و سه تکرار دنبال شد.

در این مطالعه، نمودار تغییرات نیروی کششی در مقابل بار عمودی وارد شده رسم شد و از روی این نمودار و با توجه به معادله معروف ترزاقی (Terzaghi, 1966)، (رابطه ۳)، مقادیر ضریب اصطکاک خارجی خاک و چسبندگی خاک^۱ به ترتیب از روی شیب خط و عرض از

رطوبت، افزایش رطوبت موجب افزایش چشمگیر در ضریب اصطکاک می‌شود. دلیل این تاثیر افزایش نیروی جاذبه مولکولی بین ذرات خاک و سطح فلز است. با افزایش مقدار رطوبت خاک، ضریب اصطکاک شروع به کاهش می‌کند. زیرا در این حالت اثر دگرچسبی از بین می‌رود و اصطکاک ناشی از برش نیز به دلیل رطوبت زیاد خاک بسیار کم می‌شود.

استافورد و تانر (Stafford & Tanner, 1983) اثر سرعت لغزشی را روی اصطکاک خاک و فلز در خاک رسی و لومی رسی شنی و قطعه لغزنده فولاد نرم بررسی کردند و دریافتند که در فاز اصطکاک، زاویه اصطکاک به صورت لگاریتمی همراه با دامنه‌های مختلف سرعت و مقدار رطوبت خاک افزایش می‌یابد. یوسو و دچاو (Yusu & Dechao, 1990) با بررسی رابطه بین اصطکاک خاک- فلز و سرعت لغزشی دریافتند که الگوی منحنی‌های اصطکاک و مقدار رطوبت خاک در سرعت‌های لغزشی بالا شبیه به منحنی‌های اصطکاک و مقدار رطوبت خاک در

پنج سطح رطوبتی، ۴ قطعه آزمایشی، ۳ سرعت آزمایشی و ۳ بافت خاک جمعاً به ۵۴۰ آزمایش منجر شد و داده‌ها در قالب طرح فاکتوریل ۳×۴×۵ و بر پایه طرح بلوک کامل تصادفی با استفاده از نرم‌افزار MSTATC تحلیل شدند. با توجه به تفاوت درصد رطوبت در فازهای مختلف اصطکاک، چسبندگی و سیالی در خاک‌های با بافت مختلف تجزیه و تحلیل آماری برای هر بافت خاک به صورت جداگانه صورت گرفت و برای مطالعه اثر بافت از طرح عاملی آشیانه‌ای استفاده گردید. آزمایش‌ها برای هر بافت خاک در پنج سطح رطوبتی (۱۱، ۱۶، ۲۱، ۳۲ و ۴۶

خودکار در حافظه کامپیوتر و یا دیتالاگر متصل به آن ثبت کند. مخزن خاک روی دو ریل موازی به حرکت در می‌آید؛ حاصل این حرکت، تماس قطعه ثابت با سطح مماسی خاک داخل مخزن است. قطعه مورد نظر به صورت مکعب مستطیل از جنس فولاد، چدن، لاستیک و تفلون با ابعاد سطح مقطع ۵×۵ سانتی‌متر ساخته شد. همچنین از یک دیتالاگر (مدل DT800، ساخت شرکت DataTaker، کشور استرالیا) متصل به لودسل S شکل برای اندازه‌گیری مستقیم نیروی کششی استفاده شد (Hasankhani-Ghavam et al., 2012a, b).

مبدا به دست آمد. گفتنی است اگر در این رابطه طرفین معادله در سطح تماس (A) ضرب شوند، شیب خط نمودار تغییرات نیروی کششی در مقابل بار عمودی برابر ضریب اصطکاک خارجی خاک و عرض از مبدا برابر AC_a خواهد بود که با داشتن سطح تماس می‌توان چسبندگی خاک (C_a) را به دست آورد (Manuwa, 2012).

برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک خاک و فلز و چسبندگی، از سیستم اندازه‌گیری ساخته شده استفاده شد که نمایی از آن در شکل ۴ دیده می‌شود. این دستگاه می‌تواند مقادیر نیروی اصطکاک خارجی را به صورت



شکل ۴- نمایی از دستگاه مورد استفاده برای تعیین ضریب اصطکاک خاک و فلز و چسبندگی

گذاشته شد و بعد از هر بار اعمال بار، مخزن با نیروی الکتروموتور کشیده شد و نیروی کششی مورد نیاز با لودسل اندازه‌گیری و در حافظه کامپیوتر ثبت گردید.

نتایج و بحث

با توجه به نتایج تجزیه واریانس اشاره شده در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ داده‌های ضریب اصطکاک خارجی خاک مشاهده می‌شود که در خاک‌های لومی، لومی شنی و شنی لومی اثرهای اصلی رطوبت، سرعت و جنس در سطح احتمال ۱ درصد روی ضریب اصطکاک خارجی خاک معنی‌دار هستند. همچنین اثرهای متقابل دوتایی رطوبت در سرعت، رطوبت در جنس، و سرعت در جنس و نیز اثرهای متقابل سه‌تایی سرعت در رطوبت در جنس، در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است.

توان موردنیاز برای به حرکت درآوردن جعبه خاک از طریق یک جعبه دنده حلزونی با نسبت کاهش دور ۱ به ۸۰، از یک الکتروموتور سه فاز جریان متناوب با توان ۱۸۰ وات تامین شد؛ و برای کاهش دور موتور و تامین سرعت‌های مورد نیاز در آزمایش‌ها نیز از یک اینورتور (مدل SS-021-1.5K، ساخت شرکت Dongguan City Dongcheng the Huafu line operation، کشور چین) استفاده گردید. آزمایش‌ها با سرعت‌های متوسط ۰/۵، ۲/۵ و ۳/۵ سانتی‌متر بر ثانیه اجرا شد.

با تنظیم فرکانس اینورتور برای تأمین سرعت‌های کاری مورد آزمایش، در هر سرعت مخزن با خاک‌های مرطوب ذکر شده تا ارتفاع ۶ سانتی‌متر و چگالی ۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب پر و سطح آن با ماله دستی پهن و هموار شد. بارهای عمودی ۵ تا ۲۰ نیوتن روی قطعه مزبور

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر سرعت، رطوبت، جنس بر ضریب اصطکاک خارجی خاک در بافت لومی

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
تکرار	۲	۰/۰۰۰۰۰۰۴۹ ^{n.s}
سرعت	۲	۰/۲۵۷۱۴ ^{**}
رطوبت	۴	۱/۶۷۱۳ ^{**}
جنس	۳	۰/۵۸۴۴ ^{**}
رطوبت × سرعت	۸	۰/۰۰۷۷ ^{**}
سرعت × جنس	۶	۰/۰۰۳۰ ^{**}
رطوبت × جنس	۱۲	۰/۰۳۱۰ ^{**}
رطوبت × جنس × سرعت	۲۴	۰/۰۰۱۷۹ ^{**}
خطا	۱۱۸	۰/۰۰۰۰۰۶۷۴
مجموع	۱۷۹	-

**معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد و n.s نبود اثر معنی دار

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر سرعت، رطوبت، جنس بر ضریب اصطکاک خارجی خاک در بافت لومی شنی

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
تکرار	۲	۰/۰۰۰۰۰۰۲۱ ^{n.s}
سرعت	۲	۰/۱۲۲ ^{**}
رطوبت	۴	۱/۴۳۰ ^{**}
جنس	۳	۰/۴۴۶ ^{**}
رطوبت × سرعت	۸	۰/۰۰۴ ^{**}
سرعت × جنس	۶	۰/۰۰۲ ^{**}
رطوبت × جنس	۱۲	۰/۰۵۴ ^{**}
رطوبت × جنس × سرعت	۲۴	۰/۰۰۱ ^{**}
خطا	۱۱۸	۰/۰۰۰۱
مجموع	۱۷۹	-

**معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد و n.s نبود اثر معنی دار

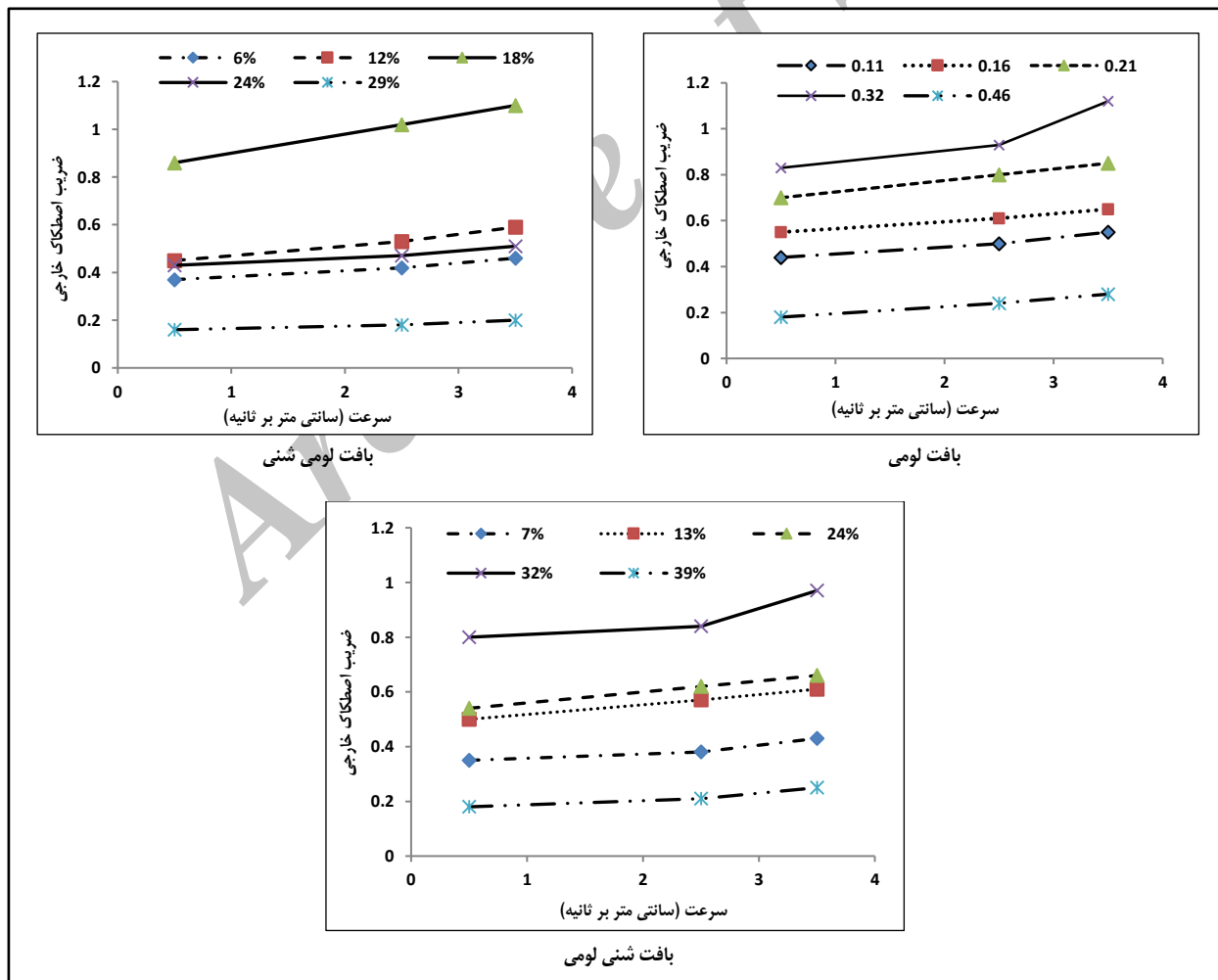
جدول ۴- تجزیه واریانس اثر سرعت، رطوبت، جنس بر ضریب اصطکاک خارجی خاک در بافت شنی لومی

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
تکرار	۲	۰/۰۰۰۰۷۵۱ ^{n.s}
سرعت	۲	۰/۱۷۰ ^{**}
رطوبت	۴	۱/۳۵۰ ^{**}
جنس	۳	۰/۴۷۱ ^{**}
رطوبت × سرعت	۸	۰/۰۱۰ ^{**}
سرعت × جنس	۶	۰/۰۰۰۱ ^{n.s}
رطوبت × جنس	۱۲	۰/۰۲۳ ^{**}
رطوبت × جنس × سرعت	۲۴	۰/۰۰۰۱ ^{n.s}
خطا	۱۱۸	۰/۰۰۰۱
مجموع	۱۷۹	-

**معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد و n.s نبود اثر معنی دار

اصطکاک خارجی خاک‌های آزمایشی مربوط به سرعت ۳/۵ سانتی‌متر بر ثانیه با مقدار ۰/۵۵۸۳ در بافت لومی، با مقدار ۰/۴۴۰۸ در بافت لومی شنی، و با مقدار ۰/۴۶۹۵ در بافت شنی لومی و کمترین آن مربوط به سرعت بارگذاری ۰/۵ سانتی‌متر بر ثانیه با مقدار ۰/۴۲۷۶ در بافت لومی، با مقدار ۰/۳۵۰۹ در بافت لومی شنی و با مقدار ۰/۳۶۲۹ در بافت شنی لومی است. در شکل ۵ مشخص است که با افزایش سرعت از ۰/۵ به ۳/۵ سانتی‌متر بر ثانیه، افزایش تغییرات ضریب اصطکاک خارجی بین دو سرعت مجاور کاملاً مشهود است. این نتایج با یافته‌های یوسو و دچاو (Yusu & Dechao, 1990) مطابقت دارد.

شکل ۵، تغییرات مقادیر ضریب اصطکاک خارجی خاک را بر حسب سرعت در سطوح مختلف رطوبت و قطعات تماسی فولادی نشان می‌دهد. برای قطعات چدنی، لاستیکی و تفلونی رفتار مشابه به دست آمده است. مقادیر میانگین ضریب اصطکاک های خارجی به دست آمده (جدول ۵) نشان می‌دهد که بین هر سه سطح سرعت در سه بافت خاک در سطح احتمال ۱ درصد اختلاف معنی‌داری وجود دارد به طوری که با افزایش سرعت، ضریب اصطکاک خارجی خاک افزایش پیدا می‌کند. بنابراین، می‌توان گفت سرعت لغزشی در خاک‌های مورد آزمایش با احتمال ۹۹ درصد اثر معنی‌داری بر مقدار ضریب اصطکاک خارجی خاک داشته است. بیشترین مقدار میانگین ضریب



شکل ۵- تغییرات ضریب اصطکاک خارجی خاک بر حسب سرعت در سطوح مختلف رطوبت، در سه بافت با قطعه فولادی

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین اثرهای اصلی بر ضریب اصطکاک خارجی خاک

بافت خاک			سرعت
لومی - شنی	لومی - شنی	لومی	
۰/۳۶۲۹۵ ^c	۰/۳۵۰۹۶ ^c	۰/۴۲۷۶ ^c	۰/۵ سانتی متر بر ثانیه
۰/۴۱۳۲۳ ^b	۰/۴۰۴۰۳ ^b	۰/۵۰۰۶ ^b	۲/۵ سانتی متر بر ثانیه
۰/۴۶۹۵۰ ^a	۰/۴۴۰۸۰ ^a	۰/۵۵۸۳ ^a	۳/۵ سانتی متر بر ثانیه

در هر ستون، حروف غیر مشابه نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد است.

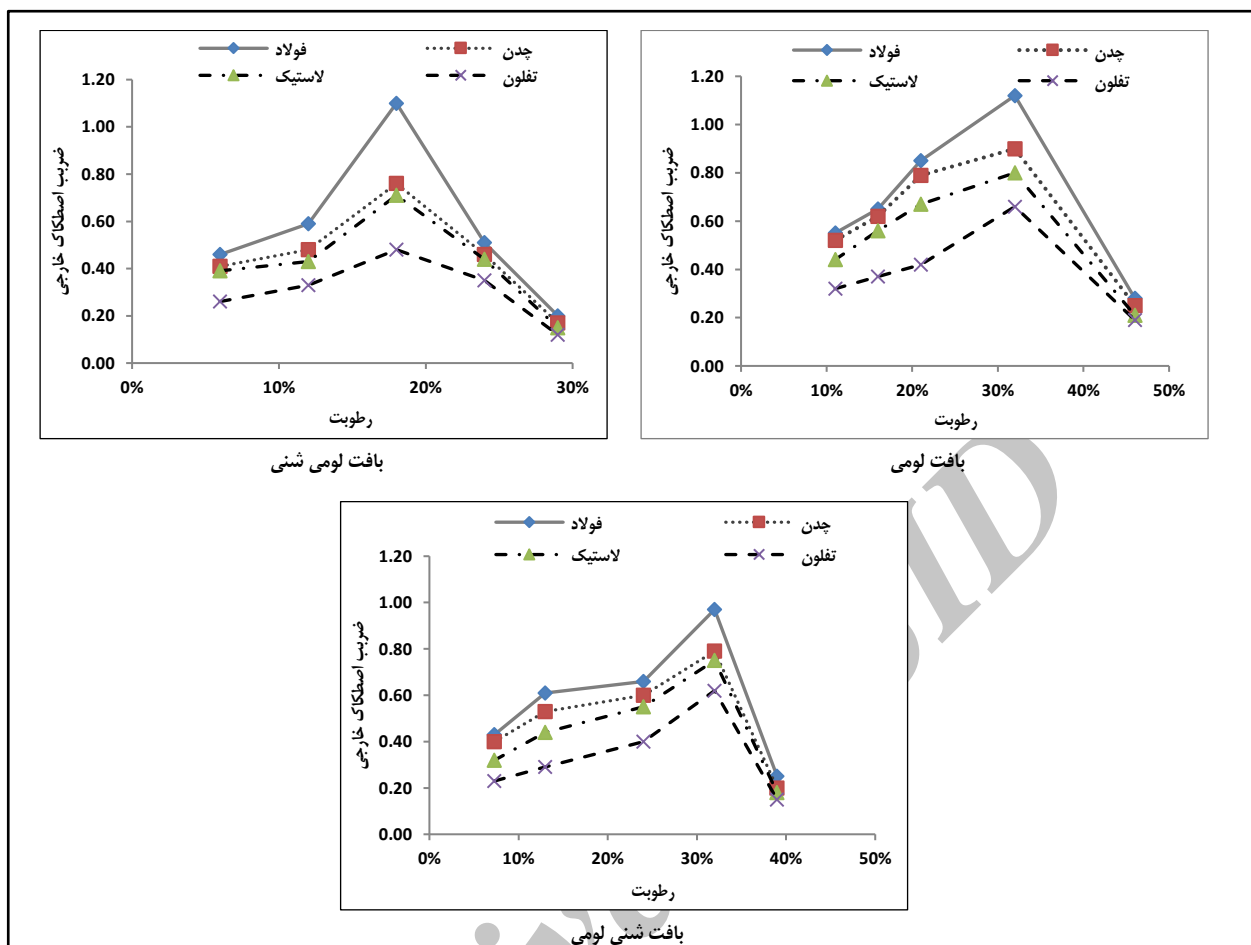
در دو خاک با بافت لومی و بافت رسی به این نتیجه دست یافتند که در این دو نمونه بافت خاک الگوی منحنی‌های اصطکاک و مقدار رطوبت خاک در سرعت‌های لغزشی بالا شبیه سرعت‌های لغزشی پایین است.

در شکل ۶ مشاهده می‌شود که در بین ۴ قطعه آزمایشی، فولاد بیشترین و تفلون کمترین مقادیر ضریب اصطکاک خارجی خاک را در هر سه خاک و سرعت به خود اختصاص داده‌اند و تفاوت معنی‌داری بین آنها دیده می‌شود.

نوع و درجه صیقلی بودن ماده‌ای که خاک روی آن سر می‌خورد بر ضریب اصطکاک ظاهری تأثیر می‌گذارد.

سطوحی چون فولاد و چدن که رطوبت را به خود جذب می‌کنند، در یک سطح رطوبتی در مقایسه با دو جنس دیگر (لاستیک و تفلون) مقادیر بالاتری از ضریب اصطکاک خارجی خاک را نشان می‌دهند و در مقایسه کلی نیز با افزایش رطوبت، تغییرات بیشتری در این ۲ قطعه دیده می‌شود و موادی چون تفلون، که رطوبت را به خود نمی‌گیرند، نیروی چسبندگی زیادی در تماس با خاک ایجاد نمی‌کنند و از این‌رو ضرایب اصطکاک ظاهری کمتری دارند (Kepner et al., 1972).

شکل ۶، تغییرات مقادیر ضریب اصطکاک خارجی خاک را بر حسب رطوبت در سرعت ۳/۵ سانتی متر بر ثانیه با جنس‌های مختلف را در سه بافت خاک نشان می‌دهد. برای سرعت‌های دیگر نیز روند مشابهی همانند شکل ۶ به دست آمد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در همه سطوح سرعت با افزایش رطوبت (در خاک لومی و شنی لومی تا ۳۲ درصد و خاک لومی شنی تا ۱۸ درصد) ضریب اصطکاک خارجی خاک افزایش می‌یابد، و پس از آن با رسیدن رطوبت به ۴۶ درصد در خاک لومی، ۲۴ درصد خاک لومی شنی، و ۳۹ درصد در خاک شنی لومی، ضریب اصطکاک خارجی خاک کاهش می‌یابد. علت این امر این است که با افزودن آب، لایه‌های رطوبت بین لغزنده و خاک توسعه می‌یابد و به افزایش چسبندگی می‌انجامد. افزایش نیروی دگرچسبی همانند افزایش وزن لغزنده عمل می‌کند. از این‌رو نیروهای چسباننده باعث افزایش سریع ضریب اصطکاک ظاهری با مقدار رطوبت می‌شوند (Gill & Vanden Berg, 1968). این نتیجه با نتایج به دست آمده از تحقیقات یوسو و دچاو (Yusu & Dechao, 1990) مطابقت دارد. فازهای اصطکاک، چسبندگی و روان کاری در این نمودارها قابل مشاهده است. یوسو و دچاو (Yusu & Dechao, 1990) نیز با بررسی رابطه بین اصطکاک خاک- فلز و سرعت لغزشی



شکل ۶- تغییرات ضریب اصطکاک خارجی خاک بر حسب رطوبت در سه بافت خاک و سرعت ۳/۵ سانتی‌متر بر ثانیه

حدی که مقدار چسبندگی خاک‌ها بیشینه می‌شود، ضریب اصطکاک خارجی خاک نیز افزایش می‌یابد. پس از آن با افزایش بیشتر رطوبت، به علت ایجاد یک سطح سیال روان روی سطح خاک، این ضریب روند کاهشی دارد.

- در بین چهار قطعه آزمایشی، فولاد بیشترین و تفلون کمترین مقادیر ضریب اصطکاک خارجی خاک را در هر سه خاک و سرعت به خود اختصاص داده است. نوع و درجهٔ صیقلی بودن ماده‌ای که خاک روی آن سر می‌خورد ضریب اصطکاک ظاهری را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

نتیجه‌گیری

- در هر سه بافت خاک مورد آزمایش و در تمامی سطوح رطوبتی، ضریب اصطکاک خارجی خاک با افزایش سرعت روند افزایشی داشته است.

- نمودارهای اصطکاک-مقدار رطوبت خاک در سطوح مختلف سرعت لغزشی مورد بررسی، روند مشابهی داشتند.

- نمودارهای ضریب اصطکاک خارجی خاک و مقدار رطوبت در هر سه بافت خاک، اثر رطوبت را روی ضریب اصطکاک خارجی خاک نشان می‌دهند که با افزایش رطوبت خاک‌ها تا

مراجع

Ahmadi-Moghadam, P., Ataeiyan, P. and Azimi, S. 2006. Design, fabrication and evaluation of instrument for measuring adhesion and angle of internal friction. Proceeding of 5th Congress of Iranian Agricultural Machinery and Mechanization. Aug. 27-28. Mashhad, Iran. (in Persian)

- Fountaine, E. R. and Payne, P. C. J. 1954. Causes of non-scouring in soil working implements. Proceeding of 5th International Congress Soil Science. Aug. 16-21. Leopoldville, Congo. 2, 35-45.
- Gee, M. G., Tomlins, P., Calver, A., Darling, R. H. and Rides, M. 2005. A new friction measurement system for the frictional component of touch. *Wear*. 259, 1437-1442.
- Gill, W. R., Vanden-Berg, G. E. 1968. Assessment of the dynamic properties of soils. Agriculture handbook. No. 316. U. S. Government Printing Office. Washington, D. C.
- Haines, W. B. 1925. Studies in the physical properties of soil. I. Mechanical properties concerned in cultivation. *J. Agr. Sci.* 15, 178-200.
- Hasankhani-Ghavam, F., Abbaspour-Gilandeh, Y. and Shahgoli, G. 2012a. The effect of some parameters on the coefficients of external friction and adhesion of soil and metal. Proceeding of 7th Congress of Iranian Agricultural Machinery and Mechanization. Sep. 4-6. Shiraz, Iran. (in Persian)
- Hasankhani-Ghavam, F., Abbaspour-Gilandeh, Y. and Shahgoli, G. 2012b. The effect of sliding speed on the coefficients of external friction and adhesion of soil in three soil textures. Proceeding of The 7th Congress of Iranian Agricultural Machinery and Mechanization. Sep. 4-6. Shiraz, Iran. (in Persian)
- Kepner, R. A., Bainer, R. and Barger, E. L. 1972. Principles of Farm Machinery. 2nd Ed. Avi Pub Co. New York, USA.
- Manuwa, S. I. 2012. Evaluation of soil/material interface friction and adhesion of Akuresandy clay loam soils in southwestern Nigeria. *Adv. Nat. Sci.* 5(1): 41-46.
- Neal, M. S. 1966. Friction and adhesion between soil and rubber. *J. Agr. Eng. Res.* 11(2):108-112.
- Nichols, M. L. 1931. The dynamic properties of soil. II. Soil and metal friction. *Agr. Eng.* 12, 321-324.
- Payne, P. C. J. 1956. A field method of measuring soil-metal friction. *J. Soil Sci.* 7: 235-241.
- Payne, P. C. J. and Fountaine, E. R. 1954. The mechanism of scouring for cultivation implements. Technical Memoranda. No. 116. National Institute of Agricultural Engineering. Silsoe, Bedfordshire, England.
- Rogers, O. J. J. and Tanner, D. W. 1955. Measurements with strain gauges at the N. I. A. E. Technical Memoranda. No. 106. British Society for Research in Agricultural Engineering.
- Shahidi, K. and Ahmadi-Moghadam, P. 2009. Soil and Machine Systems: Physics and Mechanics of Soil and Tillage. 2nd Ed. Iranian Academic Center for Education Culture & Research, West Azarbayjan Branch. (in Persian)
- Srivastava, A. K., Goering, C. E., Rohrbach, R. P. and Buckmaster, D. R. 2006. Engineering Principles of Agricultural Machines. 2nd Ed. American Society of Agricultural Engineers. USA.
- Stafford, J. V. and Tanner, D. W. 1983. Effect of rate on soil shear strength and soil-metal friction II. Soil-metal friction. *Soil Till. Res.* 3(4): 321-330.
- Terzaghi, K. 1966. Theoretical Soil Mechanics. John Wiley and Sons, New York.
- Vilde, A. and Rucins, A. 2004. The impact of soil physical and mechanical properties on draft resistance of ploughs. TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. Vol. IV. Polish Academy of Sciences Branch in Lublin. Lublin, Poland.
- Vilde, A. and Tanas, W. 2005. Determination of the soil friction coefficient and specific adhesion. *TEKA Kom. Mot. Energ. Roln.* 5, 212-216.
- Yusu, Y. and Dechao, Z. 1990. Investigation of the relationship between soil-metal friction and sliding speed. *J. Terramechanics.* 27(4): 283-290.

Effects of Sliding Speed of Slider Part With Different Materials and Soil Moisture Content on Soil-Metal Friction Coefficient of Three Soil Types

Y. Abbaspour-Gilandeh*, F. Hasankhani-Ghavam and G. Shahgoli

* Corresponding Author: Professor, Department of Boissystems Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: abbaspour@uma.ac.ir
Received: 11 December 2015, Accepted: 5 April 2017

Design of agricultural machinery and implements for local needs, requires determination of accurate values of physical and mechanical properties of soil, including soil-metal friction coefficient. In this study, the effects of soil moisture content at five levels and sliding speed (at three levels of 0.5, 2.5 and 3.5) on four contact materials namely: steel, cast iron, rubber, and teflon on the soil- metal external coefficient of friction of of loam, sandy loam and loamy sand soil at 5 levels of soil moisture content was investigated. In this context a device was designed and evaluated for accurate determination of soil friction coefficient. Data were analyzed based on 5×4×3 factorial experiment in randomized complete block design using MSTATC software. Due to differences in moisture content at different phases of friction, adhesion and fluid in soils with different textures, statistical analysis was performed separately for each soil texture and nested factorial design was used to study the effects of soil texture. Results showed that in all soil types, three sliding speed levels affected soil-metal friction significantly at the probability level of 1%. Also, with increasing sliding speed, soil-metal friction coefficient had incremental trend. Meanwhile, the results also showed that at the experimental sliding speeds of 0.5, 2.5 and 3.5 cm/s, the trend and pattern of the curves of soil friction coefficient versus soil moisture content were similar. Results of this study and the determined values of parameters of soil-metal friction coefficient and adhesion could be used in the design of agricultural machinery and implements, modeling of the relationship between soil & machine, draft calculation and also in tillage implements performance and their wear and tear investigations.

Key Words: Adhesion, Friction Phase, Lubricating Phase, Soil-Metal Friction, Tillage