بررسی تجربی رابطهٔ بین مقاومت غلتشی و نشست خاک در شرایط انبارهٔ خاک با استفاده از آزمونگر تک چرخ

سجاد عباس پور[1*]، ایلیاد الهی حصار[2]، محمد حسین آق خانی[3]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی بیوسیستم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بناب

۳- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد

* ایمیل نویسنده مسئول: s.abbaspour87@gmail.com

چکیده

چرخ یکی از اجزاء مهم ماشین است که برقرار کنندهٔ ارتباط بین ماشین و زمین می باشد. بیشتر نیروهای وارده بر ماشین از طریق چرخ ها اعمال می شوند. این نشان دهنده اهمیت مطالعهٔ نیروهای وارده بین چرخ با زمین می باشد. یکی از این نیروهای مهم، مقاومت غلتشی است. در حرکت چرخ های تراکتور بر روی خاک، مقاومت غلتشی باعث افت بخشی از نیروی کششی می شود. از عوامل مهم تشکیل فشردگی خاک که به عنوان پارامتری منفی به حساب می آید، بار وارده به چرخ ها می باشد. یکی از پارامترهای اندازه گیری فشردگی خاک مقدار نشست ایجاد شده در آن بر اثر عبور چرخ است. هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر مقاومت غلتشی روی کمیت نشست خاک است. انجام آزمون های مورد نظر در این تحقیق مستلزم در اختیار داشتن یک انبارهٔ خاک و آزمونگر تک چرخ می باشد که برای این منظور از یک انبارهٔ خاک استفاده شد. پارامترهای ورودی آزمون ها سه سطح از سرعت پیشروی ۰/۸، ۱ و ۱/۲ متر بر ثانیه، بار عمودی روی چرخ ۲، ۳ و ۴ کیلونیوتن، سه سطح از لغزش ۸ ، ۱۲ و ۱۵ درصد تعیین شدند. در هر کدام از آزمایش ها نشست خاک برحسب میلیمتر اندازه گیری و مقاومت غلتشی چرخ نیز محاسبه گشت. نتایج به دست آمده از این آزمایشات، نشان داد که با افزایش لغزش و بار عمودی مقادیر نشست و مقاومت غلتشی خاک افزایش می یابند. همچنین مشخص شد که سرعت بر مقاومت غلتشی تاثیر چندانی ندارد، گرچه افزایش سرعت باعث کاهش نشست خاک گردید.

کلمات کلیدی: انبارهٔ خاک – آزمونگر تک چرخ – مقاومت غلتشی –نشست خاک

مقدمه

در طول قرن گذشته از ماشین به منظور تولید در کشاورزی استفاده های فراوانی شده و این امر موجب افزایش عملکرد محصولات کشاورزی شده است. از آنجایی که خاک به عنوان محیطی برای تغذیه و رشد گیاه می باشد، همواره باید خواص آن

مورد بررسی قرار گیرد تا بتوان در شرایط بهینه محصولات کشاورزی را پرورش داد. اثرات ماشین بر روی خاک کشاورزی که بیشتر به خاطر تردد ماشین صورت می گیرد نیز از مهم ترین پارامترهای مورد بررسی می باشد. عملیات زراعی مانند شخم اثرات مفید و گاهاً هم اثرات منفی روی ساختمان خاک باقی می گذارد. از بین رفتن علف های هرز و کنترل آن ها و برگرداندن بقایای گیاهی به تودهٔ خاک و تشکیل خاکدانه ها از اثرات مثبت شخم است. از طرفی دیگر ممکن است خاکدانه های موجود در خاک توسط فشار چرخ های تراکتور و ماشین آلات سنگین از بین برود و اثرات منفی روی ساختمان خاک باقی بگذارد.

امروزه رویکرد غالبی که در کشورهای توسعه یافته در رابطه با کشاورزی مد نظر است عبارت است از کشاورزی پایدار و کنار گذاشتن نگاه ماشین محور و بهتر کردن روش های روبه رویی با خاک که مستلزم این امر انجام آزمون های مورد اعتمادی است که در شرایط واقعی صورت گیرند. همان طور که اشاره شد این امر با توجه به پیچیدگی و تنوع متغیرهای حاکم بر تقابل خاک و ماشین دشوار به نظر می رسد. بر همین اساس، ایجاد شرایط کنترل شدهٔ آزمون های مذکور در محیط های از پیش آماده شده نظیر سویل بین[1] (انبارهٔ خاک) راه حل مناسبی به نظر رسید. انبارهٔ خاک در واقع محیطی طراحی شده است که همان شرایط مزرعه را فراهم می کند. در این انباره از چرخی استفاده شده است که با حرکت خود روی خاک در واقع نشانگر حرکت چرخ تراکتور است.

مقاومت غلتشی[2]

در یک تعریف کلی، مقاومت غلتشی یک چرخ برابر است با نیروی مخالف حرکت چرخ هنگامی که چرخ مورد نظر روی سطح زمین یا روی خاک می غلتد. در واقع مقاومت غلتشی یک چرخ بر روی خاک بخشی از کشش ناخالص تولیدی توسط ماشین محرک است که با وجود غیر مفید بودن آن، ناگزیر باید تامین گردد.

مقاومت غلتشی در تراکتورهای چرخ لاستیکی

برای محاسبهٔ مقاومت غلتشی در تراکتورهای چرخ لاستیکی، چرخ را به دو صورت نرم و صلب مورد بررسی قرار می دهیم. زمانی که چرخ نرم روی سطحی نرم حرکت می کند، این طور فرض می شود که چرخ فشار یکنواختی را روی خاک وارد می آورد که موجب تغییر شکل یکنواخت در سطح خاک می شود.

مقاوت غلتشی در چنین حالتی از رابطهٔ (۱) به دست می آید:

$$R = \frac{b}{(n+1)\left(\frac{K_c}{b}+K_\phi\right)^{\frac{1}{n}}}\left(\frac{W}{bl}\right)^{\frac{n+1}{n}}$$

(رابطه -۱)

[1] **Soil Bin**

[2] **Rolling Resistance**

تحلیل سادهٔ فوق می رساند که مقاومت غلتشی رابطه ای مستقیم با وزن روی چرخ، **W** و رابطه ای معکوس با طول سطح تماس، **l** دارد. همچنین مقاومت غلتشی به شکل پیچیده ای با عرض تماس، **b** رابطه دارد.

نشست خاک [۳]

نشست خاک در نتیجهٔ فشاری است که توسط چرخ ها در خاک ایجاد می شود. بنابراین می توان این گونه نتیجه گیری کرد که مقدار نشست خاک، برای اندازه گیری مقدار فشردگی خاک دارای اهمیت زیادی است. توانایی پیش بینی مقدار نشست خاک به مهندسان کشاورزی این امکان را می دهد که خاک را در شرایطی که نرم و انعطاف پذیر نیست شخم بزنند و یا اینکه میزان تخریب را در نتیجهٔ اعمال بار بیش از حد برآورد کنند. فشردگی خاک در نتیجهٔ نشست بیش از حد خاک ایجاد می شود که یکی از اثرات نامطلوب تردد ماشین های کشاورزی در مزرعه می باشد.

فرضیه های تحقیق

در این تحقیق، بعد از فراهم ساختن ابزار مورد نیاز جهت انجام آزمایش ها به منظور یافتن رابطهٔ بین مقاومت غلتشی و نشست خاک فرضیات زیر ارزیابی می شوند:

۱) مقاومت غلتشی و نشست خاک دارای رابطهٔ منطقی می باشند.

۲) رابطهٔ بین پارامترهای مذکور قابل مدل شدن می باشد.

۳) تصحیح مدلهای مرسوم جهت پوشش شرایط دلخواه انبارهٔ خاک منجر به بهینه شدن خروجی مدل ها می شود.

اهداف تحقیق

در این تحقیق آزمایش ها با استفاده از آزمونگر تک چرخ، در انبارهٔ خاک موجود در دانشگاه ارومیه صورت می گیرد. ساختمان خاک بسته به خصوصیات آن انواع مختلفی دارد، بنابراین تحقیق بر روی خاک کاری پویا می باشد. به طور کلی اهداف این تحقیق را می توان به صورت زیر بیان نمود:

۱. بررسی رابطهٔ بین نشست ایجاد شده در خاک و مقاومت غلتشی چرخ در شرایط کنترل شده درون انبارهٔ خاک

۲. بررسی نقش پارامترهای سرعت، لغزش و بار در نشست خاک و مقاومت غلتشی

۳. تصحیح مدل های مرسوم جهت بهینه سازی در شرایط دلخواه

[3] **Soil Sinkage**

مواد و روش ها

انجام آزمون های چـرخ و خـاک در شـرایط کنترل شده در قالب آزمونگـرهای تک چـرخی مطـرح می شود که در محیط انباره های خاک صورت می گیرند. روابط بین چرخ و خاک دارای پیچیدگی زیادی می باشند که اجرا و بررسی این گونه آزمون ها در شرایط مزرعه را با مشکلات زیادی مواجه کرده اند. در اجرای این گونه آزمایش ها در انبارۀ خاک، امکان کنترل بیشتری بر روی متغیرهای چرخ و خاک وجود دارد. آزمونگر تک چرخ در داخل انبارۀ خاک در واقع دستگاه آزمایشگاهی است که با آن نیروهای وارد بر چرخ اندازه گیری و رابطۀ بین چرخ وخاک در انبارۀ خاک بررسی می شود.

انبارۀ خاکی که در این طـرح مورد استفاده قـرار گرفت، انبارۀ خاک موجود در گـروه مکانیک بیو سیستم (ماشین های کشاورزی) دانشگاه ارومیه می باشد. در این انباره از یک شاسی مخصوص استفاده شده که چرخ مورد آزمایش بر آن سوار است و شاسی از طریق یک جفت ریل عمودی و چهار غلتک به صورت شناور به ارابه متصل می شود. با اعمال گشتاور به محور چرخ، آزمونگر و ارابۀ متصل به آن در طول انباره به حرکت در می آید و نیروی خالص گیرایی چرخ با یک جفت حسگر نیرو اندازه گیری می شود.

نحوۀ داده برداری و انجام آزمایشات

نحوۀ تنظیم پارامترهای ورودی

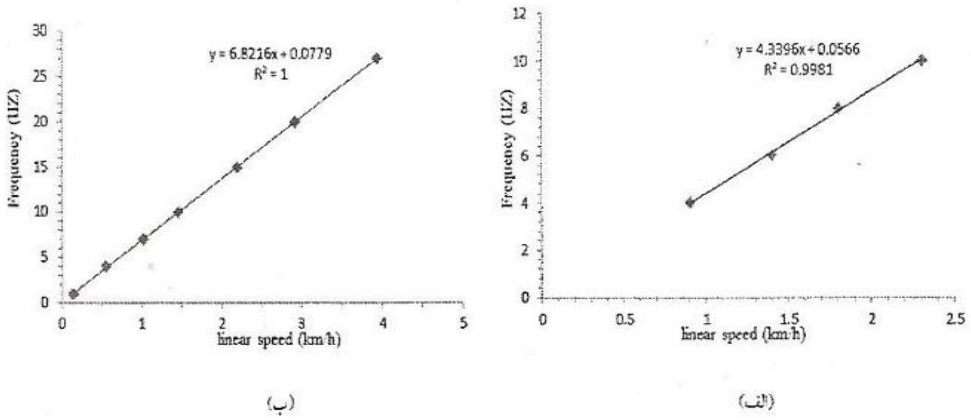
پارامترهای ورودی آزمایشات بار روی چرخ، لغزش و سرعت پیشروی هر کدام در سه سطح و با سه تکرار در قالب طرح بلوک های کاملاً تصادفی برای بررسی اثر پارامترهای کششی بر روی نشست ایجاد شده در خاک مد نظر می باشند. برای اعمال بـار عمودی روی چـرخ از دستۀ متصل به پیچ قدرت عمودی به همـراه نیروسنج آن که از یک سمت به شاسی آزمونگـر و از سمت دیگـر به حـامـل متصل می باشند استفاده شد. به طوری که با چرخاندن دسته و اعمال گشتاور به پیچ قدرت مقدار بـار روی چرخ تغییر پیدا کرد. برای تنظیم مقدار این مقدار بار اعمالی از یک نمایشگر دیجیتال استفاده شد. در این طرح بارهای استاتیکی ۲،۳ و۴ کیلونیوتن به عنوان سطوح مورد ارزیابی در نظر گرفته شدند که البته به هنگام حرکت در کانال انبارۀ خاک مقدار بار اعمالی روی چرخ به صورت پیوسته تغییر می کرد و تغییرات بار دینامیکی ذکر شده در طی هر آزمایش ثبت می شد. مقادیر سرعت پیشروی نیز به اندازه ۰/۸، ۱ و ۱/۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. از مجموعۀ اینورتور و موتور الکتریکی که بر روی آزمونگر نصب شده است برای اعمال سرعت های دورانی مختلف برای آزمونگر تک چرخ استفاده شد.

تنظیم پارامتر ورودی لغزش

با توجه به نمودار فرکانس–سرعت استخراج شده برای سرعت خطی چرخ و همچنین نمودار فرکانس–سرعت خطی برای حامل چرخ که در شکل (۱) نشان داده شده است و اختلاف سرعت های خطی ایجاد شده برای حامل و آزمونگر سطوح مختلف لغزش با استفاده از رابطهٔ (۲) قابل تنظیم و دست یابی بود. لغزش مورد نظر نیز در سطوح ۸ درصد، ۱۲ درصد و ۱۵ درصد در دسترس بود. در واقع لغزش ایجاد شده به دلیل اختلاف سرعت پیشروی حامل با سرعت چرخ می باشد.

(رابطه -۲)

$$\text{لغزش} = \frac{\text{سرعت حامل} - \text{سرعت آزمونگر}}{\text{سرعت آزمونگر}}$$



شکل-۱ نمودارهای مربوط به سرعت خطی الف) حامل چرخ و ب) چرخ محرک بر حسب فرکانس اینورتورهای مربوطه

نحوهٔ داده برداری

با داشتن ترکیبی از ۳ سطح بار عمودی، ۳ سطح سرعت پیشروی و ۳ سطح لغزش با ۳ تکرار، ۸۱ تیمار در حالت کلی برای انجام آزمایش در دسترس بود. هر یک از بازوهای چهارگانهٔ افقی که آزمونگر را به حامل چرخ متصل می کنند دارای یک نیروسنج می باشند. با توجه به هم فاز بودن نیروسنج های دو بازوی بالایی و همچنین هم فاز بودن نیروسنج های دو بازوی پایینی، نیروسنج های بازوهای بالایی به یک عدد پورت **RS232** متصل شدند. بازوهای پـایینی نیز به یک پورت **RS232** دیگر وصل شـدند. هر یک از این پورت ها به یک نمایشگر دیجیتال وصل شدند که به همراه نمایشگر مربوطه، در کل سه عدد نمایشگر برای اندازه گیری پارامترهای کششی توسط بازوهای افقی و ثبت تغییرات بار دینامیکی در اختیار قرار داشتند. داده های خروجی نیز از طریق دیتالاگر به محیط نرم افزار اکسل انتقال یافتند.

اندازه گیری نشست ایجاد شده در خاک در هر آزمایش نیز با استفاده از صفحهٔ پلکسی گلاس مشبک و هـمچنین با استفاده از کولیس دیـجیتال صورت گرفت. ایـن اندازه گیری در دو راستای طولی و عمودی بر مسیر حرکت صورت گرفت. در تکرارهای مختلف هر تیمار، خاک با استفاده از چنگک و ماله تسطیح می شد و با استفاده از یک غلتک مقدار فشردگی خاک به مقدار مورد نظر می رسید. برای کنترل مقدار فشردگی خاک تا رسیدن به حد مطلوب از دستگاه نفوذ سنج مدل Rimik cp20 طبق استاندارد ASAE[4] 3132 و با سرعت ۰/۳ متر بر ثانیه استفاده می شد تا خاک همواره در یک حالت یکنواخت باشد و به عنوان یک متغیر در نتایج به دست آمده از آزمایشات تأثیر نگذارد.

بحث و نتیجه گیری

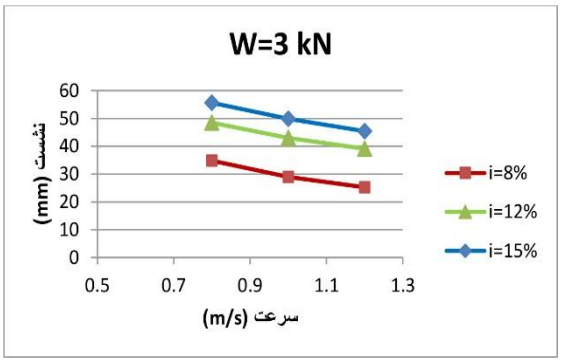
در این تحقیق اثرات سه پارامتر ورودی سرعت پیشروی، بار عمودی و لغزش بر روی مقاومت غلتشی و نشست خاک که پارامترهای خروجی ما هستند بررسی شد. در نهایت نیز تأثیر این دو پارامتر خروجی روی یکدیگر مورد بررسی قرار گرفت. ضمن این که بار عمودی نیز متغیر بود و در طول آزمایش عددی ثـابت را نشان نمی داد و در نتیجه هر لحظه مقادیر مختلفی برای بار عمودی ثبت می شد.

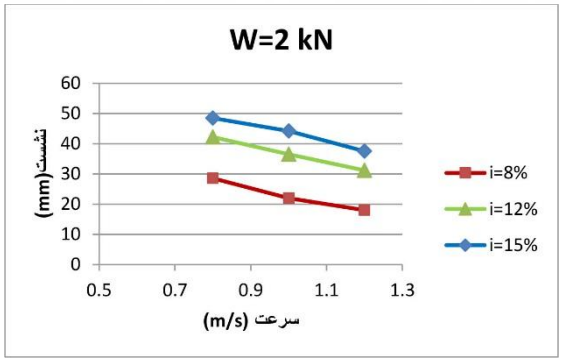
بررسی نمودارهای تجربی و تحلیل آماری

الف. تأثیر سرعت پیشروی بر روی نشست خاک

همان طور که از نمودارهای موجود در اشکال (۲) ، (۳) و (۴) مشخص است با افزایش سرعت پیشروی، نشست خاک دچار کاهش می شود. زمانی که چرخ با سرعت بیشتری عبور می کند فرصت لازم برای تماس چـرخ با سطح خـاک کاسته شده و به تـبع آن نشست کمتری در سـطح خاک ایجاد می شود. با مقایسهٔ نمودارهای به دست آمده می توان مشاهده کرد که بیشترین مقدار نشست خاک در بار ۴ کیلونیوتن، سرعت ۰/۸ متر بر ثانیه و سطح لغزش ۱۵ درصد به دست می آید. مقدار بیشینهٔ نشست خاک نیز ۶۱/۹ میلی متر می باشد. کمترین مقدار نشست نیز در بار ۲ کیلونیوتن، سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه و لغزش ۸ درصد به دست می آید که این مقدار ۱۸ میلی متر می باشد.

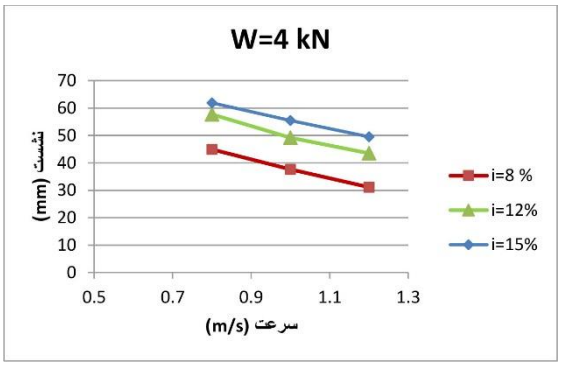
[4] **American Society of Agricultural Engineering**





شکل-۲ تأثیر سرعت پیشروی بر نشست خاک در بار ثابت دو کیلو نیوتن

شکل-۳ تأثیر سرعت پیشروی بر نشست خاک در بار ثابت سه کیلو نیوتن

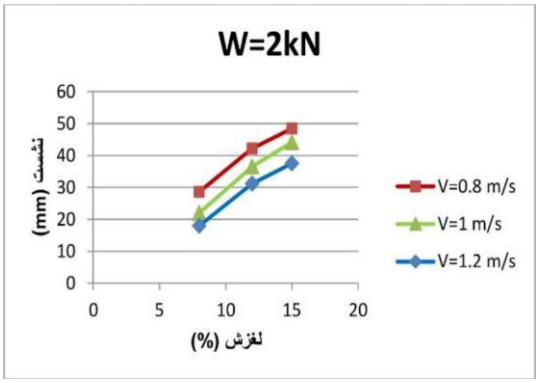


شکل-٤ تأثیر سرعت پیشروی بر نشست خاک در بار ثابت چهار کیلو نیوتن

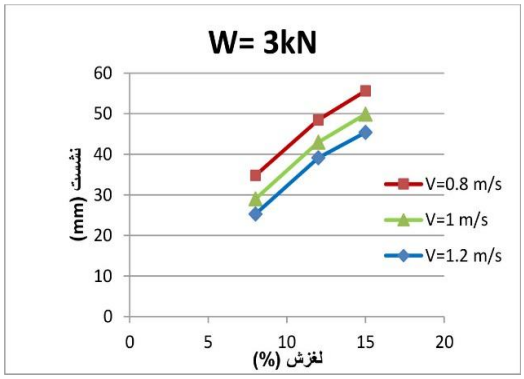
نتایج تحقیقات تقوی فر و مردانی نیز در تحقیق مشابه بیان کنندهٔ این واقعیت می باشد. آن ها به قطعیت بیان کردند که بیشترین میزان نشست خاک در کمترین سرعت و در بیشترین بار به دست می آید که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد.

ب. تأثیر لغزش چرخ بر روی نشست خاک

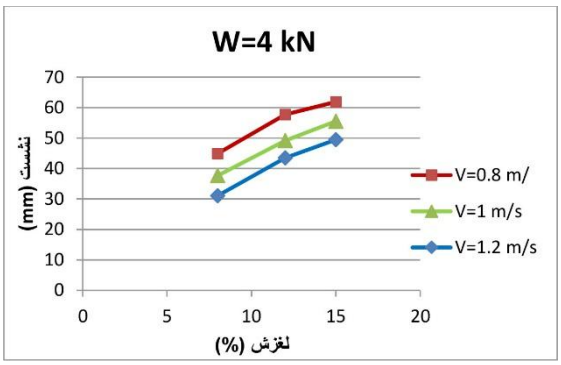
نمودارهای مربوط به اشکال (۵) ، (۶) و (۷) تأثیر لغزش چرخ بر روی نشست خاک را نشان می دهد. همان طور که از این شکل ها می توان دید برخلاف سرعت با افزایش لغزش نشست خاک افزایش می یابد. مهم ترین نیرو در دستگاه های کشنده نظیر تراکتورها نیروی کششی آن ها می باشد. بنابراین برای دست یابی به توان کششی بالا و انجام کارهایی نظیر شخم که به نیروی کششی بالاتری نیاز دارند، باید نیروی زمین گیرایی را افزایش داد. در اثر اعمال و افزایش این نیرو توسط چرخ بر خاک، تغییر فرم برشی در خاک و به بیان دیگر لغزش افزایش می یابد که حاصل آن کاهش میزان پیشروی است. لغزش چرخ، طبق بحث انجام شده بیانگر افت در حرکت جلو سوی تراکتور است.



شکل-۵ تأثیر لغزش بر نشست خاک در بار ثابت دو کیلو نیوتن



شکل-٦ تأثیر لغزش بر نشست خاک در بار ثابت سه کیلو نیوتن

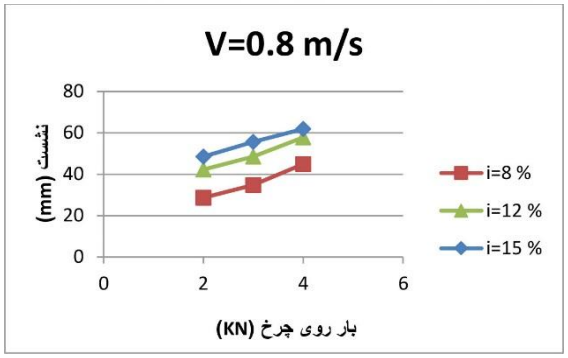


شکل-۷ تأثیر لغزش بر نشست خاک در بار ثابت چهار کیلو نیوتن

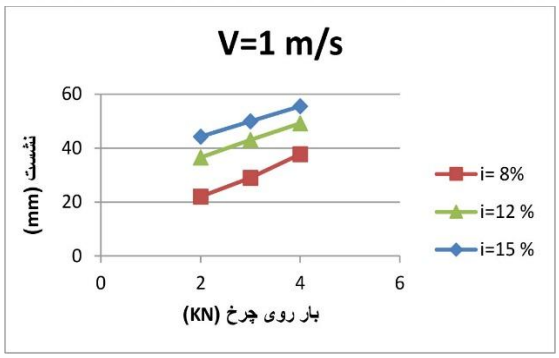
همان طور که از نمودارها نیز مشخص است با افزایش سطح لغزش و کاهش سرعت، نشست خاک نیز بیشتر می شود که که بیشترین مقدار آن در لغزش ۱۵ درصد و سرعت ۰/۸ متـر بـر ثانیه و به اندازه ۶۱/۹ میلی متر به دست می آید. نتایج تـحقیقات راگاوان و همکاران نیز بیان کنندهٔ این واقعیت می باشد. آن ها بیشترین مقدار نشست خاک در لغزش ۲۰ درصد را به دست آوردند که سطحی بالا برای لغزش می باشد. لیاسکو نیز در سال ۲۰۱۰ به نتیجه ای مشابه در مورد تأثیر لغزش بر روی نشست خاک رسیده است.

پ. تأثیر بار دینامیکی چرخ بر روی نشست خاک

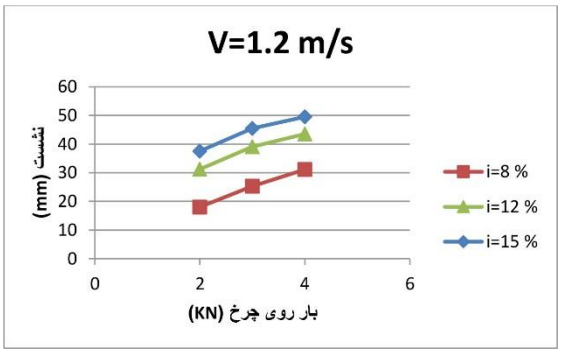
اشکال (۸) ، (۹) و (۱۰) نمودارهای مربوط به تـأثیر بـار روی چـرخ بر نشست خاک را در سرعت های ثابت برای هر آزمایش، نشان می دهد. همان طور که مشخص است با افزایش بار روی چرخ در سرعت پیشروی ثابت مقدار نشست خاک نیز افزایش می یابد. همچنین با مقایسهٔ سه نمودار می توان فهمید که هر چه سرعت پیشروی ثابت برای هر نمودار بیشتر باشد، تأثیر بار روی چرخ در نشست خاک کمتر می شود. زیرا در سرعت های بالاتر زمان لازم برای اعمال بار کمتر می شود و در نتیجه نشست کمتری در سطح خاک به وجود می آید.



شکل-۸ تأثیر بار روی چرخ بر نشست خاک در سرعت ثابت ۸/ ۰متر بر ثانیه



شکل-۹ تأثیر بار روی چرخ بر نشست خاک در سرعت ثابت یک متر بر ثانیه

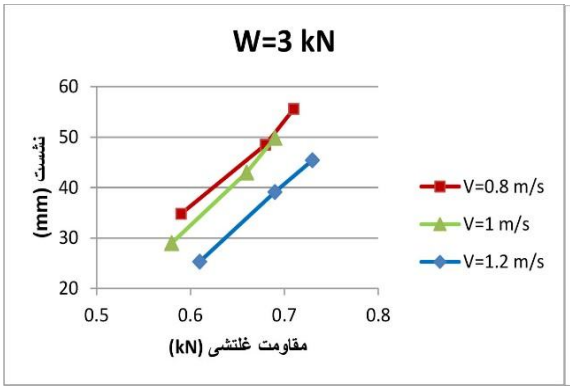


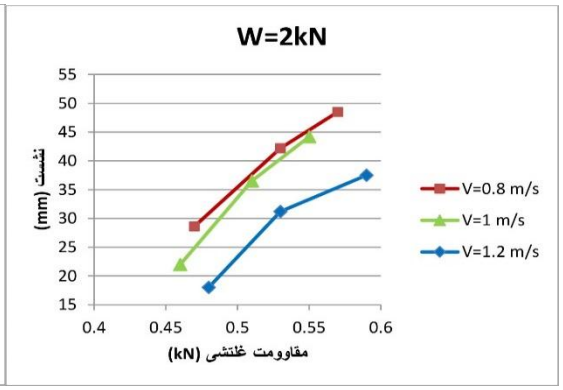
شکل-۱۰ تأثیر بار روی چرخ بر نشست خاک در سرعت ثابت ۱/۲ متر بر ثانیه

این نتایج نشان دهندهٔ اهمیت اندازه و وزن ماشین های کشاورزی می باشد. در واقع هرچه وزن این ماشین ها بیشتر باشد، مقدار بار وارده بر چـرخ نیز بیشتر شده و باعث ایجاد فشردگی در لایه های خاک می شود.

ت. تاثیر مقاومت غلتشی روی نشست خاک

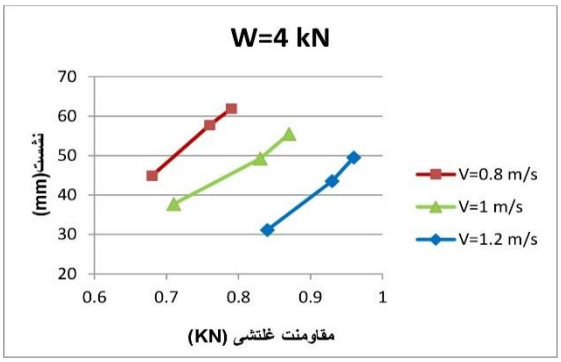
در تحلیل های قبلی تأثیر پارامترهای ورودی بر روی پارامتر نهایی خروجی ارزیابی شد. طبق نتایج به دست آمده از این پـژوهش، تحلیل نهایی بـررسی بـر هم کنش بین مقـاومت غلتشی و نشست خـاک می باشد. با استفاده از داده های به دست آمده، تأثیر مقاومت غلتشی بر روی نشست خاک که در واقع دو پارامتر خروجی آزمون های مورد نظـر بودند، مورد بـررسی قرار گرفت. شکل های (۱۱) ، (۱۲) و (۱۳) نشانگر تأثیر مقاومت غلتشی بر روی نشست خاک در بارهای ثابت ۲، ۳ و ۴ کیلونیوتن می باشد. واضح است که هر چه مقاومت غلتشی بیشتر شود، خاک نیز دچار نشست بیشتری در سطح خارجی خود می شود. با در نظر گرفتن بارهای ثابت در هر نمودار مشاهده می شود که بیشترین مقدار نشست خاک با در نظر گرفتن سطوح لغزش مربوط به شکل (۱۳) می باشد که در آن بار ثابت چهار کیلونیوتن می باشد.





شکل-۱۱ تأثیر مقاومت غلتشی بر نشست خاک در بار ثابت دو کیلو نیوتن

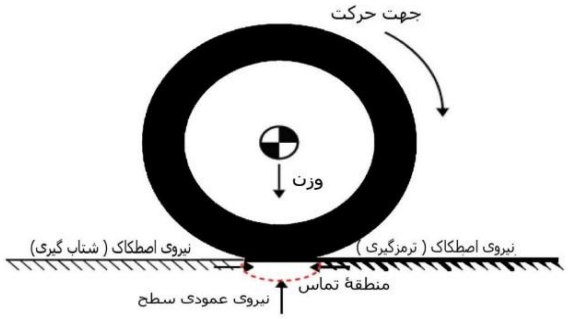
شکل-۱۲ تأثیر مقاومت غلتشی بر نشست خاک در بار ثابت سه کیلو نیوتن



شکل-۱۳ تأثیر مقاومت غلتشی بر نشست خاک در بار ثابت چهار کیلو نیوتن

تایـرها زمـانی که بر روی سطح زمین می غلتند از طـریق اصطکاک داخـلی انـرژی خود را از دست می دهند. زمانی که چرخ ها می چرخند تا ماشین حرکت خود را به سمت جلو ادامه دهد، تایرها دچار تغییر شکل می شوند تا سطح تماس خود را با جاده یا زمین حفظ کنند. بخشی از تایر که با سطح زمین در تماس می باشد را منطقهٔ تماس[۵] می نامند. تمام نیروهای لازم برای شتاب گیری و ترمزگیری چرخ از این منطقه عبور داده می شود و تایر در این منطقه تغییر شکل پیدا می کند تا سطح تماس خود را با زمین حفظ کند. شکل (۱۴) منطقهٔ تماس و نیروهای اعمال شده بر این منطقه را نشان می دهد.

[۵] **Contact Patch**



شکل-۱٤ تصویر منطقهٔ تماس چرخ با سطح زمین و نیروهای وارد بر آن

زمانی که تایر تغییر شکل پیدا می کند ترکیبات لاستیک که در آن وجود دارند انرژی را به صورت حرارت آزاد می کنند. هرچه مقدار مقاومت غلتشی کمتر باشد، تایر به انرژی کمتری برای تغییر شکل نیاز دارد. از فاکتورهای مهمی که در افزایش یا کاهش مقاومت غلتشی تأثیر دارد علاوه بر مقدار تغییر شکل تایر، تغییر شکل سطح تماس چرخ با زمین و یا خاک می باشد. مقدار نیرویی که صرف تغییر شکل تایر می شود را پسماند حرارتی[۶] می نامند و دومین عامل نیرویی است صرف تغییر شکل مسیر حرکت تایر و یا خاک می شود. در مورد تایرهای مورد استفاده در بخش کشاورزی که بر روی خاک حرکت می کنند وضعیت متفاوت است. تحقیقات کورجنلوما در سال ۲۰۰۹ نیز در رابطه با این موضوع می باشد. وی مقاومت غلتشی را در زمین های نرم و زمین های سخت با هم مقایسه کرد و فهمید که در زمین سخت به راحتی بر مقاومت غلتشی غلبه می شود. او دلیل افزایش مقاومت غلتشی در زمین های نرم را تغییر شکل خاک در جهات افقی و عمودی دانست که باعث افزایش نشست خاک می شود. نتایج تحقیقات مک کیبن و دیویدسون نیز در همین رابطه می باشد. آن ها نیز افزایش مقاومت غلتشی را عامل افزایش نشست خاک دانسته اند.

تحلیل آماری

جدول (۱) تحلیل کوواریانس نشست ایجاد شده با مقاومت غلتشی چرخ که با استفاده از نرم افزار **SAS** صورت گرفته است را نشان می دهد.

[6] **Hysteresis Loss**

جدول-۱ تحلیل کوواریانس نشست ایجاد شده با مقاومت غلتشی چرخ

منابع	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	P
مقاومت غلتشی	۰/۲۰٦	۱	۰/۲۰٦	۰/۰٤۸*
بار روی چرخ	۹۷٤	۲	٤۸۷/۰۰۰	۱۱۳/۷۳۰**
سرعت	۳۰۲۲/۵۲۹	۲	۱۵۱۱/۲٦٤	۳۵۲/۹۲۹**
لغزش	٦۷٤۵/۱٦	۲	۳۳۷۲/۵۸٤	۷۸۷/٦۰۸**
بار روی چرخ × سرعت	۱۰۳/۷۰۰	٤	۲۵/۹۲۵	٦/۰۵٤**
بار روی چرخ × لغزش	۱۰۹/۱۰٦	٤	۲۷/۲۷۷	٦/۳۷۰**
لغزش × سرعت	۳۲/۰٦۱	٤	۸/۰۱۵	۱/۸۷۲*
بار روی چرخ × سرعت × لغزش	۱۷/٤۳۰	۸	۲/۱۷۹	۰/۵۰۹*
خطا	۲۲٦/۹٤۹	۵۳	٤/۲۸۲	
کل	۲۹۳۰۲/۸٦۲	۸۱		

*معنی دار در سطح احتمال پنج درصد

**معنی دار در سطح احتمال یک درصد

۰/۹۸۳= ضریب تبیین تصحیح شده

جدول (۱) نشان می دهد که تأثیر مقاومت غلتشی بر روی نشست خاک دارای اثر معنی داری با سطح آماری پنج درصد می باشد که نسبتاً معنی دار است. بار عمودی روی چرخ، سرعت و لغزش دارای اثر معنی داری با سطح آماری یک درصد بر روی نشست خاک می باشند. تأثیر متقابل سرعت × بارعمودی و بار عمودی × لغزش در سطح آماری یک درصد معنی دار می باشند. گرچه تأثیر دو پارامتر متقابل سرعت × لغزش در سطح آماری پنج درصد معنی دار می باشد. این جدول همچنین نشان می دهد تأثیر سه گانه پارامترهای بار × سرعت × لغزش در سطح آماری پنج درصد معنی دار می باشد. طبق این جدول رابطهٔ کوواریانس ایجاد شده دارای دقت بالایی با ضریب تبیین تصحیح شده ۰/۹۸۳ می باشد.

نتایج کلی

انجام آزمون های آزمایشگاهی در شرایط کنترل شدهٔ انبارهٔ خاک برای بررسی روابط بین چرخ و خاک دارای دقت نسبتاً بالایی در به دست آوردن مقادیر صحیحی از پارامترهای دخیل در آزمون ها می باشند. در مقایسه با تحقیقات صورت گرفتهٔ دیگر در شرایط مزرعه ای نیز تطابق بسیار بالایی در نتایج حاصله از این آزمون ها وجود دارد. مقاومت غلتشی به عنوان یک عامل هدر رفت انرژی تأثیر به سزایی در نشست ایجاد شده در خاک دارد و این دو دارای رابطه ای منطقی با یکدیگر می باشند. به طوری که همواره با افزایش مقاومت غلتشی، نشست خاک نیز بیشتر می شود. پارامترهای ورودی سرعت پیشروی، بار عمودی و لغزش نیز هر کدام به نوبهٔ خود بر نشست خاک موثر می باشند. به طوری که با کاهش سرعت پیشروی، افزایش بار عمودی و افزایش لغزش

چرخ، نشست خاک نیز بیشتر می شود. بنابراین با تنظیم مطلوب این پارامترها، می توان مقدار فشردگی ایجاد شده در خاک را تا حدی کنترل کرد.

ابعاد و وزن ماشین های کشاورزی و همچنین ابعاد تایرهای مورد استفاده در این ماشین ها از قبیل تراکتور در هنگام کار بر روی خاک های کشاورزی، تأثیر نسبتاً بالایی در ایجاد تراکم و فشردگی ایجاد شده در خاک دارند. به طوری که با طراحی صحیحی از ماشین های کشاورزی و همچنین انتخاب ابعاد مناسب برای تایرهای آن ها می توان فشردگی ایجاد شده در خاک را در حد چشمگیری کاهش داد. برای مثال انتخاب تایرهای با پهنای بیشتر و سطح تماس بالاتر با سطح خاک که مناسب با کار مورد نظر می باشند، راهکاری مفید در کاهش فشردگی خاک می باشد.

منابع

شیخ داوودی، م. مینایی، س. اثر لغزش چرخ بر مقاومت حرکتی تایرهای لاستیکی، مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی ماشین های کشاوزی و مکانیزاسیون، ۱۳۸۵، کد مقاله ۱۱.

شهیدی ، کاظم ، احمدی مقدم ، پرویز ، ۱۳۸۵ ، رابطه ماشین و خاک: فیزیک و مکانیک خاک های کشاورزی ، جهاد دانشگاهی ارومیه ، جلد اول.

مک میلان، راس، ۱۳۸۵، مکانیک عملکرد تراکتور و ادوات خاک ورزی، ترجمه علیرضا کیهانی- احمد طباطبایی فر، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، جلد اول.

Çarman. K. Tractor forward velocity and tire load effects on soil compaction, Journal of Terramechanics, 1994 – Elsevier. Volume 31: 11-20

Horn, R. Domżżał, H. Słowińska-Jurkiewicz A. Van Ouwerkrek C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment, Soil and Tillage Research, 1995. Volume 35: 23-36

Taylor, H.M., Gardner, H.R. Penetration of Cotton Seedlingn Taproots As Influenced By Bulk Density, Moisture Content, and Strength of Soil, Soil Science, 1963. Volume 96: 153-156.

Upadhyaya, S.K. Chancellor, W.J. Wulfsohn, D. Sources of variability in traction data, Journal of terramechanics, 1998. Volume 25: 249-272.

Raper, R.L. Agricultural traffic impacts on soil, Journal of Terramechanics, 2005, Volume 42: 259-280.

Raghavan, G.S.V. McKeys, E. chasse, M. Effect of wheel slip on soil compaction, Journal of Agricultural Engineering Research, 1977, Volume 22: 79-83.

Kurjenluoma, J. Alakukku, L. Ahokas, J. Rolling resistance and rut formation by implement tires on tilled clay soil, Journal of Terra-mechanics, Volume 46: 267-275.

Taghavifar Hamid, Mardani Aref, Effect of velocity, wheel load and multipass on soil compaction, Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2013.

Mardani, A. Shahidi, k. Rahmani, A. Mashoofi, B. Karimmaslak, H. Studies on a long soil bin for soil-tool interactions, Cercetări Agronomice în Moldova, 2010, Volume 142: 5-10.