مطالعه لغزش تایر تراکتور با استفاده از رفتار مکانیکی خاک و تایر توسط روش المان محدود

معصومه مشکانی[۱]، یاسر نوربخش[۲]، اسعد مدرس مطلق[۳]، مقداد نصیری[٤]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه ارومیه
۲. کارشناس ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی (دانشگاه ارومیه)
۳. استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه ارومیه
٤. دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه ارومیه

Yaser.Nourbakhsh@yahoo.com

چکیده

لغزش یکی از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار روی کشش ایجاد شده توسط تراکتور می‌باشد. لغزش در اثر برهم‌کنش میان تایر و خاک بوجود می‌آید. تایرها بدلیل تراکم‌ناپذیری لاستیک و خواص ناهمسانگرد لاستیک- تسمه[۱]، پیچیده هستند. شکل هندسی پیچیده تایر و توزیع بارهای روی تایر، لغزش و مطالعات وابسته به آن را محدود می‌کند. بخاطر طبیعت پیچیده خاک، برهم‌کنش تایر و خاک معمولا از طریق آزمایشات تجربی مطالعه شده است که اغلب دارای هزینه بالا و دقت کم بوده است. در این مطالعه روشی برای مطالعه برهم‌کنش بین خاک و تایر بر پایه المان محدود انجام شده است. جهت بررسی رفتار مکانیکی خاک و تایر از یک مدل سه‌بعدی برای شبیه‌سازی برهم‌کنش تایر و خاک استفاده شده است. خاک به عنوان یک ماده الاستیک کاملا پلاستیک در نظر گرفته شده است. تایر انتخاب شده برای این تحقیق، تایر تراکتور کشاورزی Goodyear 16.9R38 R-1، که یک تایر رایج است، می‌باشد. برای شبیه‌سازی برهم‌کنش تایر وخاک از نرم‌افزار ABAQUS که از قوی‌ترین نرم‌افزارهای المان محدود به شمار می‌رود استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: روش المان محدود، برهم‌کنش تایر و خاک ، لغزش، الاستیک کاملا پلاستیک.

[1] Cord- rubber

مقدمه

یک چرخ محرک در اثر سرعت زاویه‌ای ω، سرعت مطلقی برابر با $r\omega$ پیدا می‌کند که r، شعاع چرخ می‌باشد. حال اگر V سرعت نسبی چرخ در اثر تماس با زمین باشد، $r\omega - V$ را سرعت لغزش چرخ می‌نامند. نسبت سرعت لغزش به سرعت مطلق را لغزش[2] s، می‌نامند $\left(s = \frac{r\omega - v}{r\omega}\right)$. در اندازه‌گیری‌های مربوط به پیش‌بینی عملکرد تراکتور، لغزش به تنهایی مهمترین پارامتر وابسته محسوب می‌شود (میلان، ۱۳۸۵).

لغزش نتیجه برهم کنش بین خاک و تایر تراکتور است. شکل هندسی پیچیده تایر و پخش بارها روی تایر فاکتورهای محدودکننده برای مطالعه لغزش و مطالعات وابسته به آن می‌باشند. با این وجود، پیشرفت‌های قابل توجهی برای فهمیدن رفتار تایر در مطالعاتی که روی برهم‌کنش‌های سطحی تایر صلب متمرکز شده، بوجود آمده است. از آنجا که روشهای تجربی از دقت کم و هزینه بالایی برخوردار هستند و روشهای تحلیلی نیز قادر به نمایاندن تمامی جنبه‌های فرایند دینامیکی برهم کنش تایر وخاک نمی باشند، نیاز به یک راه ارزانتر و دقیق‌تر جهت اندازه‌گیری لغزش تایر جهت پیش‌بینی کشش برای کارخانجات تولیدی ماشین‌های کشاورزی و تولیدکننده تایرهای کشاورزی احساس می‌شود.

روش المان محدود روشی دقیق و ارزان برای بررسی برهم‌کنش خاک و تایر می‌باشد (Degirmencioglu, 1997). Fevers در سال ۲۰۰٤ مدل شبیه‌سازی المان محدود جدیدی برای برهم‌کنش خاک و تایر معرفی کرد. نتایج شبیه‌سازی‌ها با مدل تایر جدید روی مسیرهای صاف و ناصاف بصورت نتایج آزمایشات، توانایی‌های این مدل را ثابت کرد.

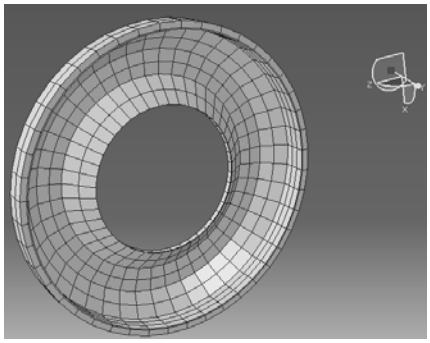
در نتیجه در این تحقیق سعی می‌گردد تا با استفاده از یک بسته نرم افزاری قوی المان محدود یک تحلیل دینامیکی برای برهم‌کنش تایر وخاک با کمترین ساده‌سازی ممکنه برای خاک کشاورزی منطقه نازلوی شهرستان ارومیه انجام شود. تایر انتخاب شده برای این تحقیق، تایر تراکتور کشاورزی Goodyear 16.9R38 R-1، که یک تایر رایج است، می‌باشد.

مواد و روش‌ها

ارائه مدل المان محدود تایر:

تکنیکی که در این تحقیق برای ارائه مدل المان محدود تایر بکار گرفته شد، بر نتیجه تحمل فشار باد داخل تایر سه-بعدی در آنالیز استاتیکی غیر خطی که توسط Mohsenimanesh و همکاران در سال ۲۰۰۹ انجام شد، پایه‌گذاری شده است. مدل مطرح شده شامل ساختار هندسه تایر بادی، خصوصیات ماده سیم- لاستیک غیر همگن و خصوصیت تقریبا تراکم‌ناپذیری از قالب لاستیک می‌باشد (شکل ۱).

[2] Slip



شکل ۱) مدل المان محدود تایر

شرح خصوصیات فیزیکی ماده لاستیک:

با توجه به تایر انتخابی توسط Mohsenimanesh و همکاران در سال ۲۰۰۹، در این تحقیق نیز یک تایر تراکتور لایه شعاعی از نوع تایر تراکتور کشاورزی Goodyear 16.9R38 R-1، بعنوان یک تایر رایج انتخاب شده است. این تایر در منطقه تحدبش، دارای یک لایه اسکلت[3] سیم پلی‌استری و چهار لایه تسمه سیمی[4] پلی‌استری می‌باشد. همه این قسمت‌ها در مدل در نظر گرفته شده‌اند.

با توجه به داده‌های بدست آمده توسط Mohsenimanesh و همکاران در سال ۲۰۰۹، در این تحقیق نیز خصوصیات فیزیکی لایه‌های تسمه و اسکلت بصورت جدول ۱ بکار برده شده است:

جهت فرموله کردن چگالی انرژی کرنشی برای المان هایپرالاستیک در مدل تایر المان محدود روی خاک، ثابت‌های مونی‌رایولین[5] با توجه به داده‌های گزارش شده توسط Mohsenimanesh و همکاران در سال ۲۰۰۹ در جدول ۲ آورده شده‌اند.

جدول ۱) خصوصیات فیزیکی تسمه و اسکلت تایر ارائه شده توسط Mohsenimanesh و همکاران در سال ۲۰۰۹

Material	Mass Density	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
Belt	۵۹۰۰	۱۷۲/۲	۰/۳
Carcass	۱۵۰۰	۹/۸۷	۰/۳

جدول ۲) خصوصیات ماده لاستیک برای مدل ماده مونی- رایولین

Rubber material	C10(kPa)	C01(MPa)
Tread	۸۰۶/۱	۱/۸۰۵

[1] carcass
[2] cord belt
[5] Mooney–Rivlin

ارائه مدل المان محدود خاک:

در این تحقیق جهت شبیه‌سازی‌های عددی از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS استفاده می‌شود. در شبیه‌سازی-های عددی، خاک بعنوان یک ماده اصطکاکی/ چسبناک الاستیک کاملا پلاستیک با استفاده از شرایط تسلیم موهر- کلمب و جریان پلاستیک همراه یا غیر همراه مدل می‌شود. چنین مدل الاستیک- پلاستیک برای خاک بطور وسیع در حل مسائل مکانیک خاک بکار می‌رود و اغلب منبعی برای بیشتر مدل‌های خیلی پیچیده می‌باشد (Hambleton J.P. and Drescher A, 2004). در این بررسی نیز برای نشان دادن رفتار خاک از مدل الاستیک کاملا پلاستیک استفاده شده است در مقابل از مدل موهر- کلمب برای نشان دادن رفتار خاک در برهم‌کنش تایر و خاک استفاده می‌شود.

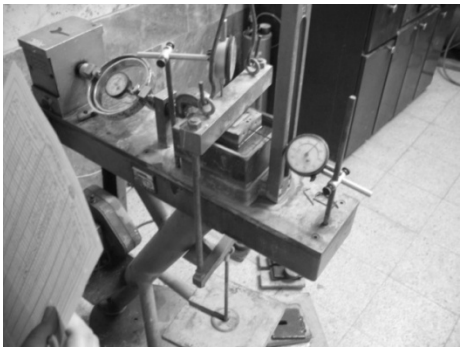
خصوصیات مکانیکی خاک:

ابتدا نمونه‌ی خاک از جعبه خاک[6] موجود در کارگاه گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه تهیه شده (شکل ۲) و به آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک این شهرستان انتقال یافت. جهت تعیین پارامترهای کولمب خاک، تست برش مستقیم با استفاده از یک جعبه برش مستقیم در به آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک شهرستان ارومیه انجام شده است(شکل ۳). خصوصیات الاستیک خاک با توجه به دانه‌بندی بدست آمده در آزمایشگاه، از داده‌های بدست آمده توسط Payn در سال ۱۹۵٦ بکار گرفته شد.

در نتیجه مجموعه خصوصیات الاستیک و پلاستیک خاک در جدول ۳ بدست آمده است.

شکل ۲) جعبه خاک آزمایشی

[6] Soil bin



شکل ۳) دستگاه تست تنش برشی

جدول ۳) خصوصیات مکانیکی خاک کشاورزی مورد آزمایش

C (Kg/cm^2)	ψ(◦)	υ	E (ksf)	Yield stress (kpa)	ρ(kg/m^3)	φ (◦)
۰/۰۰۳	۲۳	۰/۳	۵۰	۵۰۰۰۰	۱۲۰۰	۳۱

تحلیل دینامیکی انتخاب شده:

با توجه به اینکه برای مطالعه لغزش نیاز به برهم‌کنش دینامیکی خاک و تایر می‌باشد، در نتیجه نوع تحلیل انتخاب شده دینامیکی است. چون در خاک‌های کشاورزی تغییرشکل‌های بزرگ اتفاق می‌افتد باید از روش انتگرال‌گیری مستقیم برای تحلیل استفاده شود (بابایی‌نصیر و همکاران، ۱۳۸۷). از آنجا که روش تفاضل محدود استفاده شده در انتگرال‌گیری مستقیم بصورت مشروط پایدار است، از این روش در این تحقیق استفاده نشده است. راه حل انتخاب شده برای این بررسی روش نیومارک می‌باشد.

ارائه مدل تماسی خاک- تایر المان محدود:

Upadhyaya در سال ۱۹۹٤یک تکنیک تابع پنالتی برای بیان پدیده تماس سه‌بعدی در سطح مشترک تایر- خاک بکار برد و نتایج بدست آمده مطابقت خوبی با یافته‌های تجربی نشان داد، بنابراین در این تحقیق نیز برای بیان پدیده تماس سه‌بعدی در سطح مشترک خاک- تایر، یک تابع پنالتی فراهم‌شده در ABAQUS برای حل مسئله تماس غیر خطی بکار رفته است. جهت داشتن بوکساوات کم در سطح تماس،ضریب اصطکاک نیم در نظر گرفته شد.

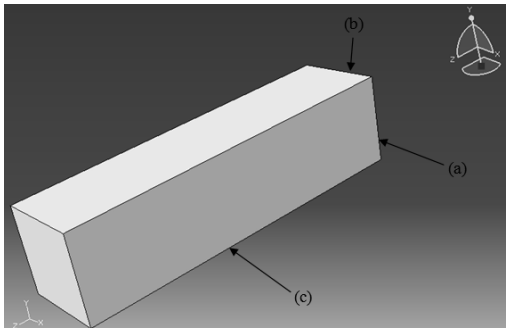
المان‌بندی مدل هندسی:

نخستین مرحله در روش اجزا محدود، گسسته‌سازی میدان و یا جسم به المان‌های کوچکتر (اجزا محدود) می باشد (مجذوبی و همکاران، ۱۳۷٦). در جریان گسسته‌سازی مدل هندسی نوع المان، اندازه و تعداد المان‌ها باید مورد توجه قرار گیرند:

نوع المان

در مسئله برهم‌کنش بین تایر و خاک نمی‌توان کل خاک را توسط المان‌های محدود مدل‌سازی نمود. از آنجا که تاثیر بارگذاری تایر بر روی خاک با فاصله از محل تاثیر کاهش می‌یابد، فقط قسمتی از خاک که تایر بیشترین تاثیر را

دارد در مدل در نظر گرفته شده است. همبلتن و همکاران در سال ۲۰۰۸ بعد خاک را در مدل‌سازی تـایر وخـاک ۲، ۱، ۱ در نظر گرفته‌اند. البته این مدل‌سازی با اعمال شرایط مرزی مناسب بر خاک انجام شده است. شایان ذکر اسـت که اگر شکل جسم و نیز شرایط خارجی آن متقارن باشد، برای مدل‌سازی وگسسته‌سازی جسم، تنهـا نصـف آن در نظر گرفته می‌شود. البته در این موارد باید شرایط تقارن در روش حل دخالت داده شود. بدین منظور در این بررسی نیز تنها نیمی از مدل تقارن در نظر گرفته شده است و صفحه تقارن نسبت به جابه‌جایی در صفحه عمود بر آن مقید شده است. در نتیجه مدل خاک انتخاب شده در این تحقیق بدنبال همبلـتن و همکـاران بـه شـکل ٤ مـی‌باشـد کـه مشخصات آن در جدول ٤ آورده شده است.



شکل ٤) مدل سه‌بعدی خاک در نرم‌افزار ABAQUS

جدول ٤) مشخصات هندسی مدل خاک شبیه‌سازی شده

ضلع	a (m)	b (m)	c (m)
اندازه	۱	۱	۲

در تحقیق حاضر پنج قسمت مختلف رینگ تایر، مجموعه تایر (لاستیک، اسکلت ، تسمه) و خاک المان‌بنـدی مـی-شوند. چون تغییر شکل رینگ تایر در مقابل تغییر شکل قسمت‌های مختلف دیگر مـدل نـاچیز اسـت، رینـگ تـایر بصورت جسم صلب همراه با یک نقطه مرجع[۷] مدل سازی شده است. نقطه مرجـع در مرکـز جـرم رینـگ در ایـن بررسی واقع شده است. استفاده از یک نقطه مرجع در رینگ سبب می گردد که کل نیروی وارده از طـرف خـاک و تایر بر رینگ در این گره محاسبه شود.

برای المان‌بندی رینگ تایر از المان R3D4 (المان چهارضلعی صلب دوسویه سـه‌بعـدی چهـارگرهی[۸]) اسـتفاده شده است. سایر قسمت‌های مدل را نیز با المان C3D8R (المان آجری خطی هشت گرهی بـا حـل انتگـرال‌گیـری کاهش یافته و با کنترل ساعت شنی[۹]) این المان دارای جواب‌های دقیق‌تری بوده ولی به نیاز زمانی بیشتر برای انجام محاسبات توسط کامپیوتر دارد.

[1] Reference point
[2] 4-node 3D bilinear rigid quadrilateral
[3] 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control

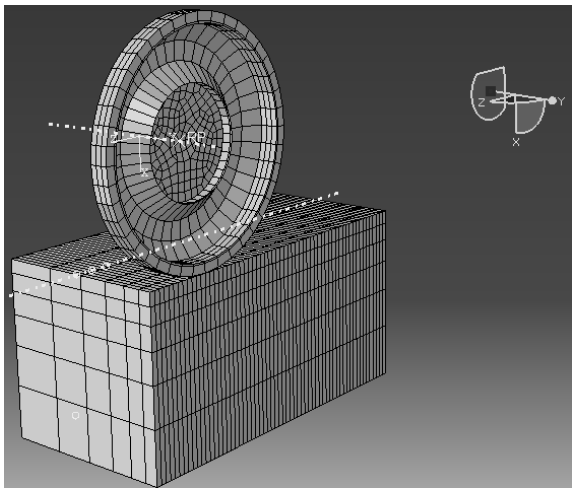
اندازه و تعداد المان‌ها

اندازه المانها بطور مستقیم بر روی همگرایی جواب مسئله تاثیر می‌گذارد و بنابراین باید در انتخاب آن دقت نمود. در این تحقیق تعداد المان و اندازه‌های مختلف آن آزمایش شدند و بهترین نتیجه محاسبه شده است. در نتیجه تعداد المان‌ها با تعداد گره‌هایشان برای قسمت‌های مختلف مدل بصورت زیر بکار برده شده است:

جدول ۵) تعداد المان‌ها و گره‌ها در مدل

	خاک	تایر	رینگ
تعداد المان	۷٦۸	٤۷۰	۱۸۳
تعداد گره	۳۸٤۰	۲۳۵۰	۱٤٦٤

با توجه به تعداد المان‌ها و گره‌ها، مدل المان‌بندی شده تایر و خاک مطابق شکل ۵ بدست آمده است:



شکل ۵) مدل مش‌بندی شده تایر و خاک

شرایط مرزی و بارگذاری

شرایط مرزی

در مسئله برهم‌کنش تایر وخاک، از آنجا که تنها نیمی از جسم در نرم افزار مدل‌سازی شده است، شرایط مرزی صورت زیر در نظر گرفته شده است.

۱. گره‌های صفحه y-z پایین خاک در $x=0$، در همه جهات کاملا مقید شده است.
۲. گره‌های مرزی صفحات x-y خاک در $z=0$ و $z=L$ در جهت افقی محور x مقید شده است.
۳. گره‌های مرزی صفحه تقارن x-z خاک در $z=w$ و گره‌های مرزی صفحه تقارن تایر با تکیه‌گاه

غلتکی در جهت y مقید شده است.

٤. گره‌های مرزی صفحه x-z خاک در z=0 در جهت افقی محور y کاملا مقید شده است.

٥. سرعت زاویه‌ای ω، بصورت شرایط مرزی در جهت y به تمام گره‌های تایر وارد شده است.

بارگذاری

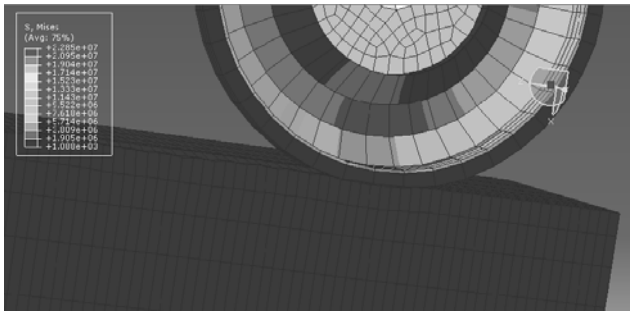
١. در ابتدا با توجه به تحقیق Mohsenimanesh و همکاران در سال ٢٠٠٩، باد داخل تایر بصورت بار فشاری یکنواخت در سطح داخلی تایر بارگذاری شده است.

٢. برای ایجاد یک تماس فیزیکی بین تایر و خاک و خود خاک در سطوح خرابی، نیروی جاذبه با بکارگیری شتاب جاذبه بعنوان یک بار حجمی برای شبیه‌سازی وزن تایر و خاک در نظر گرفته شده است.

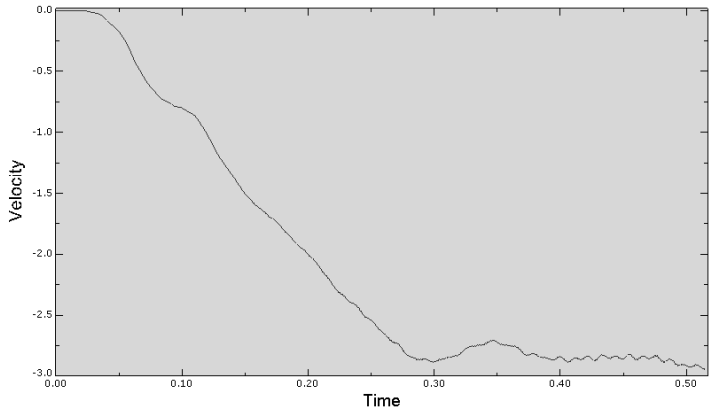
٣. بار دینامیکی آکسل بصورت نیروی متمرکز در گره مرکزی رینگ در نظر گرفته شده است.

نتایج و بحث

لغزش، یک پارامتر وابسته می‌باشد که به سرعت زاویه‌ای روی آکسل و سرعت پیشروی تراکتور و بار روی آکسل بستگی دارد. بنابراین جهت بررسی پارامتر لغزش روی کشش حاصله، چهار سرعت زاویه‌ای ٢، ٣، ٤ و ٥ رادیان بر ثانیه در چهار بار روی آکسل مختلف ٧، ٨، ٩ و ١٠ کیلونیوتن مورد بررسی قرار گرفته است. لغزش از رابطه $\left(s = \frac{r\omega - v}{r\omega} \times 100\right)$ محاسبه می‌گردد. لذا جهت تعیین لغزش در نرم‌افزار المان محدود، ابتدا سرعت زاویه‌ای به تایر تحت بارهای دینامیکی مختلف داده شده است و سپس سرعت پیشروی توسط نرم‌افزار محاسبه گردیده است. در نهایت با استفاده از رابطه ذکر شده لغزش محاسبه گردیده است. برای مثال برای سرعت زاویه‌ای ٥ رادیان بر ثانیه و بار روی آکسل ١٠ کیلونیوتن که بر شبکه ارائه شده داده شده است، نمایش کنتوری حرکت تایر و نمودار سرعت پیشروی توسط نرم‌افزار بصورت زیر نتیجه شده است:



شکل ٦) نمایش کنتوری حرکت تایر روی خاک



شکل ۷) منحنی سرعت پیشروی در سرعت زاویه‌ای ۵ رادیان بر ثانیه و بار روی آکسل ۱۰ کیلونیوتن

در شکل ۷ مشاهده می‌شود که سرعت در ۲/۸۲ متر بر ثانیه ثابت می‌گردد ($t \geq 0.4$). با توجه به اینکه شعاع تایر ۰/۷ متر اندازه‌گیری و در مدل بکار گرفته شده است، سرعت پیشروی ایده‌آل در سرعت زاویه‌ای چهار رادیان بر ثانیه ۳/۵ متر بر ثانیه می‌باشد. بنابراین لغزش برای سرعت زاویه‌ای ٤ رادیان بر ثانیه و بار روی آکسل ۱۰ کیلونیوتن بدین شکل محاسبه گردیده است:

$$s = \frac{r\omega - v}{r\omega} = \frac{3.5 - 2.82}{3.5} = 0.194$$

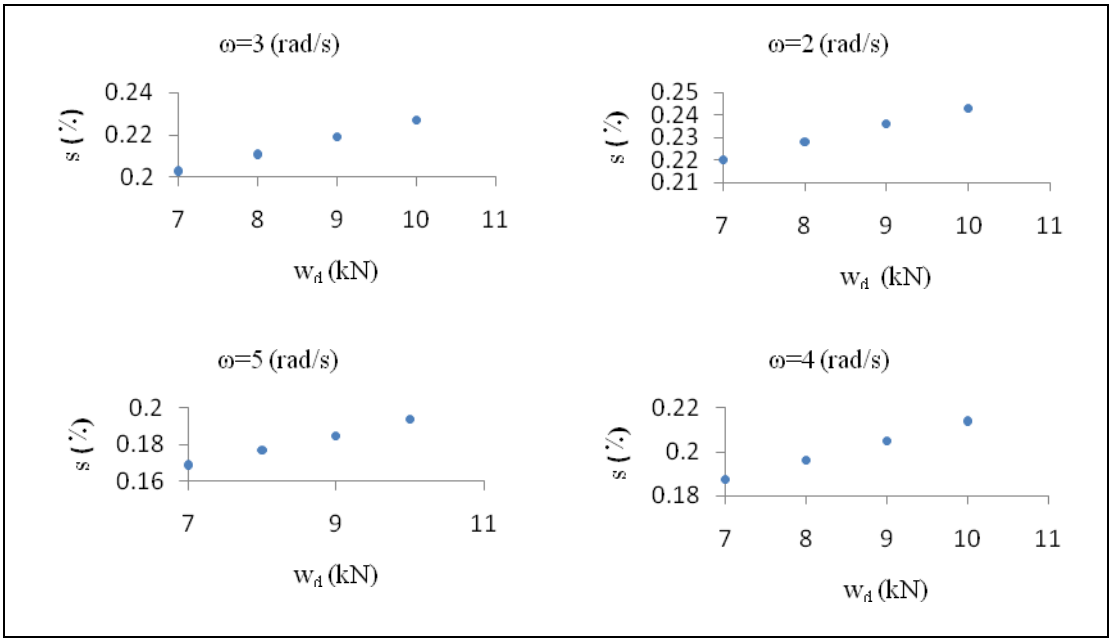
بدین ترتیب چهار سرعت زاویه‌ای و چهار بار دینامیکی مختلف به مدل اعمال شده و لغزش بصورت جدول ٦ بدست آمده است:

جدول ٦) لغزش بدست آمده توسط روش المان محدود در سرعت‌های زاویه‌ای و بارهای روی آکسل متفاوت

S (٪)	V (m/s)	W_d (kN)	ω (rad/s)
۰/۲۲	۱/۰۹۲	۷	۲
۰/۲۲۸	۱/۰۸۱	۸	۲
۰/۲۳٦	۱/۰۷	۹	۲
۰/۲٤۳	۱/۰٥۹	۱۰	۲
۰/۲۰۳	۱/٦۷٤	۷	۳
۰/۲۱۱	۱/٦٥۷	۸	۳
۰/۲۱۹	۱/٦٤	۹	۳
۰/۲۲۷	۱/٦۲۳	۱۰	۳
۰/۱۸۷٥	۲/۲۷٥	۷	٤
۰/۱۹٦	۲/۲٥۱۲	۸	٤
۰/۲۰٥	۲/۲۲٥	۹	٤
۰/۲۱٤	۲/۲	۱۰	٤
۰/۱٦۹	۲/۹۱	۷	٥

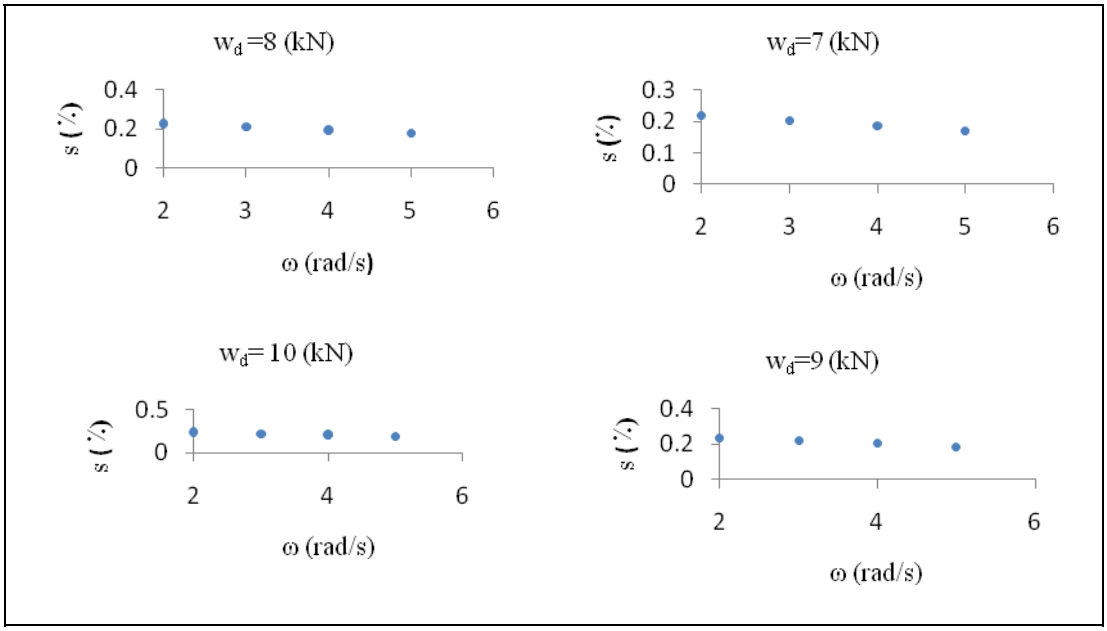
۵	۸	۲/۸۸	۰/۱۷۷
۵	۹	۲/۸۵	۰/۱۸۵
۵	۱۰	۲/۸۲	۰/۱۹٤

نمودارهای مقایسه‌ای از نتایج بدست آمده در شکل‌های ۸ و ۹ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۸) نمودارهای تغییرات لغزش نسبت به بار دینامیکی در سرعت‌های زاویه‌ای ثابت

همانطوریکه از شکل ۸ قابل مشاهده است، در سرعت زاویه‌ای ثابت، با افزایش بار دینامیکی روی آکسل لغزش افزایش می‌یابد.



شکل ۹) نمودارهای تغییرات لغزش نسبت به سرعت زاویه‌ای در بار دینامیکی ثابت

از نمودارهای شکل ۹ می‌توان فهمید که در بار دینامیکی روی آکسل ثابت، با افزایش سرعت زاویه‌ای لغزش کاهش می‌یابد.

منابع و مواخذ

۱. بابایی نصیر، م. مدرس مطلق، اسعد. شهیدی، س. ک. ۱۳۸۷. شبیه سازی دینامیکی برهم کنش تیغه و خاک در تیغه های باریک با استفاده از المان محدود سه بعدی پیشرفته، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.

۲. کیهانی، ع.ر. طباطبایی فر، ا. ۱۳۸۵. مکانیک عملکرد تراکتور و ادوات خاکورزی. (ترجمه). : انتشارات دانشگاه تهران.

۳. مجذوبی، غ. فریبا، ف. ۱۳۷٦. روش اجزاء محدود در مهندسی. انتشارات دانشگاه بوعلی‌سینا همدان

4. Degirmencioglu A. 1997. A study of soil-tire interaction using finite element method. Phd. Thesis , Dept of Agr.Eng., University of Michigan state.
5. Fevers C.W. 2004. Improved FEM simulation model for tire soil interaction Journal of Terramechanics.
6. Hambleton J.P. and Drescher A. 2008. Modeling wheel-induced rutting in soils: Indentation Journal of Terramechanic.
7. Mohsenimanesh A, Ward S.M and Gilchrist M.D. 2009. Stress analysis of a multi-laminated tractor tyre using non-linear 3D finite element analysis Journal of Materials and Design.
8. Payne, P. C. J. 1956. The relationship between the mechanical properties of soil the performance of simple cultivation implements. Journal of Agricultural Engineering Research
9. Upadhyaya S. K. 1994. Soil constitutive modeling-linear and nonlinear elasticity Transaction of ASAE.

Abstract

Slip is one of the most important effective parameters on tractor traction. Slip is produced by soil and tire interaction. Tires are complex with respect to the incompressibility of rubber and the anisotropic properties of cord- rubber laminates. The complicated geometrical shape of a tire and the distribution of the loads on the tire have been limiting factors for slip and related studies. Due to the complex nature of the soils, the soil- tire interaction has usually been studied experimentally that are expensive and has low accuracy. A methodology to study soil- tire interaction based on finite element method was developed in this study. A 3D model was used to simulate the mechanical behavior of soil and tire interaction. The soil is assumed as an elasto fully plastic material. A radial tractor tire, specifically a Goodyear 16.9R38 R-1 agricultural tractor tire, was selected as a common and representative tire. The ABAQUS code was used to simulate the soil-tire interaction which is one of the most powerful finite element software.
Keywords : Finite element method; Tire and soil interaction Slip, Elasto-fully-plastic.