

## مقاله پژوهشی

# شبیه‌سازی اجزا محدود تقابل چرخ پارویی و خاک مرطوب - توسعه مدل و اعتبارسنجی آزمایشی

مهرگان دولتی میله‌سرا<sup>۱</sup> و سید مجید سجادیه<sup>۲\*</sup>

## چکیده

در پژوهش حاضر یک مدل عددی از تقابل چرخ پارویی و خاک مرطوب (۲۴ درصد) توسعه داده شده و نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است. استفاده از روش‌های عددی رایانه‌ای برای شبیه‌سازی تقابل چرخ پارویی و خاک مرطوب آزمایش‌های تجربی را کم کرده و هزینه‌های طراحی و توسعه را به حداقل ممکن می‌رساند. در این پژوهش برای طراحی چرخ پارویی از نرم‌افزار سالیدورکس و برای تحلیل از نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. از روش ترکیبی اوپلری - لاگرانژی (CEL) برای بررسی تقابل چرخ پارویی و خاک مرطوب استفاده شد. مدل‌سازی خاک با فرمول‌بندی از نوع اوپلری و چرخ پارویی از نوع لاگرانژی تعریف شد. خاک به‌عنوان یک ماده الاستیک - پلاستیک کامل با معیار تسلیم دراکر - پراگر مدل شد. نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش بار مالبندی، درصد لغزش و میزان فرورفتگی چرخ پارویی در خاک مرطوب افزایش می‌یابد. همچنین افزایش بار مالبندی منجر به افزایش میزان تنش در خاک می‌شود. نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی و روش المان محدود (FEM)، برای پارامترهای لغزش، فرورفتگی و مقاومت غلتشی، مطابقت رضایت‌بخشی را نشان داد. روش المان محدود (FEM)، به‌عنوان یک روش قابل اطمینان برای بررسی تقابل چرخ پارویی و خاک مرطوب و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در آن می‌تواند معرفی شود.

**واژه‌های کلیدی:** اوپلری - لاگرانژی ترکیبی، بار مالبندی، چرخ پارویی، روش المان محدود، مدل دراکر - پراگر.

ارجاع: دولتی میله‌سرا م. و سجادیه س. م. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی اجزا محدود تقابل چرخ پارویی و خاک مرطوب - توسعه مدل و اعتبارسنجی آزمایشی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۹(۲): ۸۱-۹۴.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

\* نویسنده مسئول: [m.sajadiye@scu.ac.ir](mailto:m.sajadiye@scu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۸

## مقدمه

وسایل نقلیه زمینی در شرایط خارج از جاده<sup>۱</sup>، برای حرکت در شرایط گل‌ولای و رطوبت زیاد خاک نیازمند چرخ‌هایی با عملکرد بهتر در کنترل وسیله نقلیه و همچنین مدیریت مصرف انرژی هستند. هر وسیله نقلیه زمینی با مسئله کشش یا درگیری چرخ و خاک سروکار دارد، لذا مطالعه و تحقیق بر روی رابطه چرخ و خاک از اهمیت فراوانی برخوردار است (Shahidi & Ahmadi Moghaddam, 2008). تحقیقات انجام شده عملکرد بهتر چرخ پارویی<sup>۲</sup> نسبت به چرخ لاستیکی در شرایط گل‌ولای را به وضوح بیان می‌کند. لذا چرخ با آج‌هایی که فضای خالی بین آن‌ها به‌گونه‌ای باشد که بتواند گل‌ولای را بهتر انتقال دهد، تأثیر مطلوب‌تری بر روی کشش وسیله نقلیه ایجاد می‌کند. روش‌های مدل‌سازی و ارزیابی عملکرد وسایل نقلیه چرخ‌دار بر روی زمین‌های ناپایدار، توسط خواص زمین‌های مختلف به‌علاوه پارامترهای طراحی و عوامل وابسته تحت تأثیر قرار می‌گیرند (Taheri et al., 2015). در گذشته تحقیقات متنوعی در زمینه تقابل انواع چرخ و انواع خاک انجام شده است. همچنین مشخص شد که چرخ پارویی یا قفسی عملکرد بهتری نسبت به چرخ لاستیکی برای ماشین‌هایی که در شرایط شخم‌زده و غرقابی کار می‌کنند دارد (Gee-Glough, 1985). بررسی رفتار خاک مرطوب زیر چرخ پارویی نشان داده است که پارامترهای عمق نفوذ و لغزش<sup>۳</sup> (بوکساوات) چرخ تأثیر زیادی بر روی کشش وسیله نقلیه دارد (Salokhe & Gee, 1988). از مقایسه دو نوع چرخ پارویی با آج پلکانی متناوب و آج ساده نتیجه شد که رفتار خاک در برابر چیدمان‌های متفاوت آج تغییر می‌کند (Soekarno & Salokhe, 2003). چرخ پارویی با طراحی منحصربه‌فرد خود از فضای بیشتری بین آج‌ها استفاده می‌کند تا بتواند در هنگام تردد بر روی خاک به خوبی آب را به بیرون انتقال داده و با شرایط بهتری به مسیر خود ادامه دهد. مدل‌های تحلیلی روش المان محدود<sup>۴</sup> یکی از پرکاربردترین روش‌های حل مسائل مربوط به تقابل چرخ-

خاک است. استفاده از روش‌های کلاسیک المان محدود<sup>۵</sup> (FE) که بر اساس فرمولاسیون لاگرانژی استوار است، اغلب منجر به مشکل در محل تماس و تعریف المان در ناحیه تماسی می‌شود؛ برای حل این مشکل، روش ترکیب اویلری-لاگرانژی<sup>۶</sup> (CEL)، مورد توجه قرار گرفته است (Noh, 1963). در تحقیق دیگری بررسی توزیع تنش و تغییر شکل خاک در زیر بار محوری چرخ یک تراکتور در تجزیه و تحلیل تقابل تائر- خاک، مدل FEM دو بعدی معرفی شد. نتایج نشان داد که روش اجزای محدود برای پیش‌بینی توزیع تنش و تغییر شکل خاک در زیر چرخ تراکتور می‌تواند با دقت قابل قبولی مورد استفاده قرار گیرد (Perumpral et al., 1971). در حال حاضر توزیع تنش به دست آمده با استفاده از روش المان محدود و حاصل از نظریه الاستیک، بین محققین پذیرفته شده است و به خوبی برای محاسبه توزیع تنش و تغییر شکل خاک تحت یک چرخ صلب<sup>۷</sup> در حال حرکت قابل اجرا است. در پژوهشی دیگر تقابل بین چرخ‌دندانه‌دار با خاک ماسه‌ای به‌صورت عددی و با استفاده از روش المان محدود اویلری- لاگرانژی ترکیب شده (CEL)، مورد مطالعه قرار گرفت. برای شبیه‌سازی ماسه از تکنیک اویلری که قادر به شبیه‌سازی تغییر شکل‌های بزرگ تحت چرخ‌دندانه‌دار است استفاده شد. همچنین از مدل دراگر- پراگر<sup>۸</sup> به‌عنوان معیار تسلیم خاک استفاده شد. نتایج نشان داد که روش اویلری- لاگرانژی ترکیب شده، بسیاری از محدودیت‌های قبلی برای روش‌های المان محدود را حل می‌کند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی نیروی کششی، گشتاور ورودی و میزان فرورفتگی<sup>۹</sup> تائر با نسبت لغزش همبستگی خوبی نشان داد (Pruiksma et al., 2011). در پژوهشی مشابه برای پیش‌بینی غلتش یک چرخ صلب در خاک، یک مدل المان محدود سه‌بعدی ایجاد شد. در این پژوهش برای خاک از فرمول‌بندی اویلری استفاده شد تا به‌طور مؤثر تغییر شکل بیش از حد مواد را نشان دهد. در نهایت از روش اویلری-لاگرانژی ترکیب شده (CEL)، برای حل این مسئله استفاده شده است. در نتیجه روش پیش‌بینی کشش با مقایسه کشش خالص اندازه‌گیری و پیش‌بینی

5- Finite Element

6- Coupled Eulerian-Lagrangian

7- Rigid

8- Drucker-Prager

9- Sinkage

1- Off-Road

2- Paddle Wheel

3- Slip

4- Finite Element Method (FEM)

است. با توجه به اینکه در چرخ پارویی مورد نظر قابلیت تعویض آج (تغییر ارتفاع، زاویه و فاصله بین آج‌ها) جهت بهبود عملکرد کشنده وجود دارد، لذا هدف این تحقیق توسعه مدل نرم‌افزاری، از طریق ارزیابی دقت نتایج شبیه‌سازی شده تقابل چرخ پارویی با خاک مرطوب (پارامترهای لغزش، میزان فرورفتگی و مقاومت غلشی<sup>۲</sup>) در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی است.

### مواد و روش‌ها

شرح روش کلی اجرای این تحقیق به این صورت است که پارامترهای لغزش، مقاومت غلشی و فرورفتگی برای یک چرخ پارویی، در خاک مرطوب با روش المان محدود تعیین شد. پارامترهای ذکر شده تحت تأثیر اعمال شش سطح از بار مالبندی<sup>۳</sup> در بازه صفر تا ۱۰۰ درصد محاسبه شد. آزمایش‌های تجربی با استفاده از یک چرخ پارویی متصل به دستگاه کشنده (شکل ۱)، موجود در انبار خاک گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. در این مطالعه با در نظر گرفتن امکان تردد چرخ پارویی در خاک، آزمایش‌ها برای خاک با سطح رطوبت ۲۴ درصد و چرخ پارویی با بار عمودی ۲۱/۵ کیلوگرم و سرعت خطی ۰/۲۷ متر بر ثانیه طراحی شده است.

### اندازه‌گیری بار مالبندی

شماتیک دستگاه اندازه‌گیری بار مالبندی برای کشنده در شکل ۲- الف، نشان داده شده است. اعمال بارگذاری به کمک میز ترمزی انجام شد. در شکل ۲- ب، شماتیک میز ترمزی جهت اعمال بار مالبندی مجهز به ترمز چوبی مشاهده می‌شود. بارهای مالبندی مختلف با سفت کردن تدریجی پیچ تنظیم بار مالبندی توسط میز ترمزی به دستگاه اعمال شد. این عمل تا زمانی ادامه یافت که مقدار هرزگردی (بوکسوات) حدود ۱۰۰ درصد و سرعت پیشروی به صفر رسید. در این زمان نیروی اندازه‌گیری شده توسط نیروسنج نشان‌دهنده حداکثر بار مالبندی خواهد بود.

شده در طول بارهای مختلف عمودی و چندین لغزش در دو نوع خاک تأیید شده است. به‌علاوه کشش خالص اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده برای هر دو نوع خاک همبستگی خوبی با یکدیگر داشتند. به‌طوری که همبستگی بهتری برای نوع خاک لومی- شنی از خاک لومی- رسی گزارش شده است (Varghese *et al.*, 2012). در پژوهشی مشابه یک مدل المان محدود سه‌بعدی از تراکم خاک ناشی از عبور و مرور تایرهای کشاورزی مورد بررسی قرار گرفت. تایر به‌صورت یک لایه صلب در نرم‌افزار آباکوس<sup>۱</sup> معرفی شد. برای اعتبارسنجی برهم‌کنش تایر- خاک، نتایج به دست آمده از مدل نرم‌افزاری با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی مقایسه شد. این مقایسه نشان داد که مقادیر تنش‌های عمودی منتقل شده به خاک، مستقل از مقدار رطوبت خاک هستند و فشرده‌سازی خاک در زمین‌های مرطوب به تنش‌های تسلیم کمتری در این شرایط بستگی دارد (Cueto *et al.*, 2013). در پژوهشی دیگر برای تحلیل یک تایر تراکتور کشاورزی بر روی خاک از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شد، مدل دراکر- پراگر به‌عنوان معیار تسلیم مورد استفاده قرار گرفت. خاک با استفاده از المان‌های اویلری و تایر با استفاده از المان‌های کلاسیک لاگرانژی مدل شد. در نهایت با بهره‌گیری از تکنیک اویلری- لاگرانژی ترکیب شده همبستگی بسیار خوبی بین نتایج تجربی و مدل‌سازی دیده می‌شود (Rubinstein *et al.*, 2018). تأثیر بار عمودی، فشار باد تایر و رطوبت خاک روی تایر با استفاده از آزمون‌های تجربی و روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش رطوبت خاک، حداکثر فشار تماس منتقل شده به خاک به‌طور چشمگیری کاهش یافته و تأثیر تنش اعمال شده بر خاک افزایش می‌یابد که منجر به تغییر شکل بیشتر خاک در هر لایه می‌شود و در نتیجه موجب افزایش تغییر شکل کل خاک می‌شود. در نهایت افزایش رطوبت خاک باعث افزایش عمق و وسعت ناحیه‌ای از خاک می‌شود که حداکثر تنش را تحمل می‌کند (Farhadi *et al.*, 2019). با وجود اهمیت شناخت پارامترهای موثر در کشش وسیله نقلیه در خاک مرطوب، تاکنون در منابع علمی نتایج تحقیقی در مورد تحلیل عددی آن تقابل منتشر نشده

2- Rolling Resistance  
3- Drawbar Pull

1- Abaqus

شد. با استفاده از حسگر انکودر نوری نصب شده بر روی درام میز ترمزی و همچنین بر روی شافت خروجی الکتروگیربکس، داده‌های مربوط به سرعت‌های واقعی و تئوری به سامانه الکترونیکی کنترل و پردازش داده‌ها ارسال شده و سپس استخراج شد. در نهایت با استفاده از معادله (۱) میزان لغزش به دست آمد.

$$S = 100(1 - \frac{S_a}{S_0}) \quad (1)$$

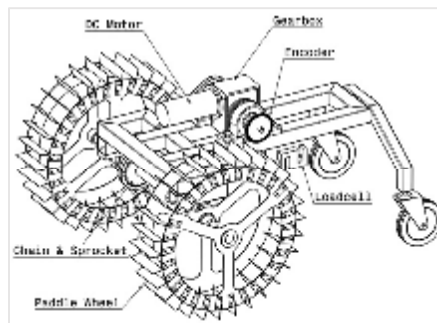
که در آن،  $S$  لغزش بر حسب درصد،  $S_a$  سرعت واقعی بر حسب کیلومتر بر ساعت و  $S_0$  سرعت تئوری بر حسب کیلومتر بر ساعت است.

### اندازه‌گیری فرورفتگی

پس از عبور چرخ پارویی از سطح خاک مرطوب در شرایط آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری میزان فرورفتگی، از عمق‌سنج کولیس و یک صفحه پلکسی که داخل آن سوراخی ایجاد شده است استفاده شد. صفحه پلکسی روی سطحی که محل عبور چرخ پارویی است قرار داده شد و سطح افقی صفحه پلکسی با سطح افقی خاک دست‌نخورده هم‌تراز شد. در این حالت صفحه پلکسی دقیقاً روی شیار ایجاد شده توسط چرخ پارویی قرار گرفت و سپس تیغه عمق‌سنج کولیس درون سوراخ ایجاد شده صفحه پلکسی قرار داده شد تا انتهای عمق‌سنج کولیس به سطح افقی شیار خاک ایجاد شده توسط چرخ پارویی برخورد نماید. در این صورت فاصله انتهایی تیغه عمق‌سنج کولیس تا سطح افقی صفحه پلکسی برابر میزان فرورفتگی چرخ پارویی در خاک مرطوب است (Taghavifar & Mardani, 2014). در پژوهش حاضر این آزمایش در نقاط مختلف بررسی شد و داده‌های موردنظر برای مقایسه با آزمون تحلیلی مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ای از آزمایش انجام شده در شکل ۳، نشان داده شده است.



شکل ۳- اندازه‌گیری فرورفتگی به کمک کولیس و صفحه پلکسی

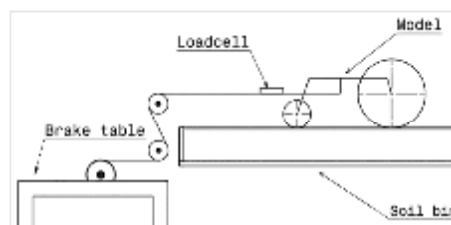


(الف)

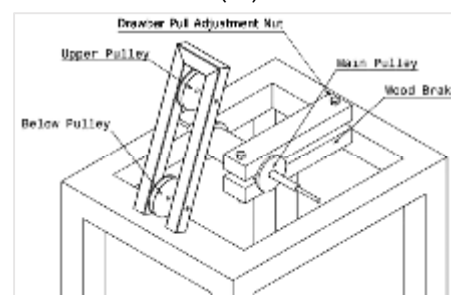


(ب)

شکل ۱- (الف) نمای شماتیک و (ب) نمونه دستگاه کشنده



(الف)



(ب)

شکل ۲- (الف) شماتیک دستگاه اندازه‌گیری بار مالبندی و (ب) شماتیک میز ترمزی

### اندازه‌گیری لغزش

در شرایط آزمایشگاهی با استخراج داده‌های مربوط به سرعت واقعی و همچنین سرعت تئوری، اندازه‌گیری لغزش دریافت، محاسبه و به کمک سامانه الکترونیکی کنترل و پردازش داده‌ها بر روی دستگاه کشنده به کامپیوتر منتقل

اندازه‌گیری مقاومت غلتشی<sup>۱</sup>

به‌طور کلی مقاومت غلتشی مطابق معادله (۲) تعریف می‌شود:

$$R_R = GT - NT \quad (2)$$

که در آن، NT نیروی کشش خالص<sup>۲</sup> برحسب نیوتن، GT نیروی کشش ناخالص<sup>۳</sup> برحسب نیوتن و  $R_R$  مقاومت غلتشی بر حسب نیوتن است (Farhadi et al., 2019).

نیروی کشش خالص در این پژوهش مقدار نیرویی است که توسط لودسل کششی اندازه‌گیری شده است. برای محاسبه میزان نیروی کشش ناخالص با محاسبه گشتاور خروجی از محور چرخ و شعاع چرخ از معادله (۳) استفاده شد (Farhadi et al., 2018).

$$GT = \frac{T}{r} \quad (3)$$

که در آن، T گشتاور خروجی چرخ پارویی برحسب نیوتن متر و r شعاع خالص چرخ پارویی بر حسب متر است. برای محاسبه گشتاور از سامانه الکترونیکی کنترل و پردازش داده‌ها، نصب شده بر روی دستگاه کشنده استفاده شده است. همچنین شعاع خالص چرخ پارویی در نظر گرفته شده، برابر مجموع ارتفاع آج و شعاع رینگ است. در نهایت از تفاضل نیروی‌های کشش ناخالص و خالص مقدار مقاومت غلتشی محاسبه شد.

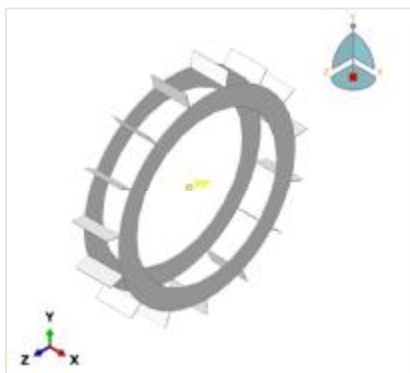
## پارامترهای مدل عددی تقابل چرخ پارویی و خاک مرطوب

در این پژوهش برای تقابل چرخ پارویی و خاک مرطوب از مدل المان محدود اوپلری- لاگرانژی ترکیب شده (CEL) استفاده شد. این روش تلاشی برای به دست آوردن مزایای استفاده از هر دو روش لاگرانژی و روش اوپلری از ابزارهای موجود در آباکوس است (Abaqus, 2017). استفاده از روش اوپلری- لاگرانژی ترکیب شده امکان مدل‌سازی مسائل ژئوتکنیکی با تغییر شکل‌های بزرگ را بدون مشکل اعوجاج مش فراهم می‌کند (Hamann et al., 2015). برای هر المان اوپلری درصدی تعیین می‌شود، که بخشی از المان پر از ماده را نشان می‌دهد (اگر یک المان اوپلری کاملاً با ماده پر شود، کسر حجمی اوپلری<sup>۴</sup> (EVF) آن برابر

یک است. اگر ماده‌ای در این المان وجود نداشته‌باشد، کسر حجمی اوپلری آن برابر صفر است). برای استفاده از کسر حجمی اوپلری نیاز به یک بخش مرجع است که در زمان تحلیل به‌طور کامل غیرفعال می‌شود. تماس بین مواد اوپلری و مواد لاگرانژی با استفاده از یک تماس عمومی<sup>۵</sup> برقرار می‌شود، که بر اساس روش تماس پنالتی<sup>۶</sup> است. المان‌های لاگرانژی از طریق مش اوپلری بدون مقاومت می‌توانند حرکت کنند تا زمانی که با یک المان اوپلری پر از مواد برخورد کنند (Qiu et al., 2011).

## مدل‌سازی چرخ پارویی

وارد کردن تمام جزئیات در مدل المان محدود، به‌دلیل پیچیدگی زیاد چرخ پارویی امکان‌پذیر نیست. بنابراین برخی ساده‌سازی‌ها در طول مدل‌سازی چرخ پارویی در نظر گرفته‌شد (Farhadi et al., 2019). علاوه بر این استفاده از جزئیات کمتر، هزینه طراحی و تحلیل را کاهش می‌دهد. مدل نرم‌افزاری چرخ پارویی مورد استفاده در تست‌های آزمایشگاهی در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکس<sup>۷</sup> نسخه ۲۰۱۶ و با توجه به مشخصات ابعادی چرخ پارویی و آج بر اساس جدول ۱ مدل‌سازی شد. مدل طراحی شده به محیط نرم‌افزار آباکوس نسخه ۲۰۱۷، فراخوانی و یک نقطه مرجع<sup>۸</sup> در مرکز جرم چرخ پارویی برای آن تعریف شد. نیروهای وارده از طرف خاک مرطوب به چرخ پارویی در این نقطه محاسبه شده است (شکل ۴).



شکل ۴- چرخ پارویی فراخوانی شده به محیط نرم‌افزار آباکوس نسخه ۲۰۱۷

5- General contact  
6- Penalty contact  
7- SolidWorks  
8- Reference Point

1- Rolling Resistance  
2- Net Traction  
3- Gross Traction  
4- Eulerian volume fraction

سه‌محوری و تک‌محوری استفاده شد. از آزمایش سه‌محوری پارامترهای چسبندگی<sup>۸</sup> (c)، زاویه اصطکاک داخلی<sup>۹</sup> ( $\phi$ ) و با استفاده از آزمایش تک‌محوری مدول الاستیسیته (E) و بر اساس منابع موجود ضریب پواسون ( $\nu$ ) به دست آمد (Bowles et al., 1996). با استفاده از معادله ( $\Delta$ ) مدول برشی<sup>۱۰</sup> (G) نیز قابل محاسبه است (EI-Sayegh et al., 2018). در این پژوهش برای محاسبه تنش تسلیم معادله (۶) مورد استفاده قرار گرفته است (Nasiri et al., 2013). همچنین تعیین مقدار K با استفاده از رابطه (۷) انجام شده است (Naderi-Boldajji et al., 2013). در این پژوهش مقادیر پارامترهای زاویه اتساع ( $\psi$ ) و زاویه اصطکاک داخلی دراکر-پراگر ( $\beta$ )، یکسان قرار داده شد (Cueto et al., 2013; Farhadi et al., 2019; Naderi-Boldajji et al., 2013). برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی دراکر-پراگر ( $\beta$ ) از معادله (۸) استفاده شد (Nasiri et al., 2013).

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (۵)$$

$$s_y = \frac{2c \cos j}{1 - \sin j} \quad (۶)$$

$$K = \frac{3 - \sin j}{3 + \sin j} \quad (۷)$$

$$\tan b = \frac{6 \sin j}{3 - \sin j} \quad (۸)$$

که در آن‌ها، C چسبندگی برحسب کیلوپاسکال و  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی برحسب درجه، پارامترهایی از تئوری موهر-کلمب است.

قبل از انجام آزمایش‌های تجربی، خاک درون انباره خاک آماده‌سازی شد. انباره خاک آزمایش ۱/۲ متر عرض، ۰/۲ متر عمق و حدود ۴ متر طول دارد. ابتدا خاک، درون انباره خاک تا ارتفاع حدود ۲۰ سانتی‌متر فراهم شد. سپس آب به خاک اضافه شد. سرانجام سطح خاک توسط یک صفحه پلاستیکی پوشانده شد و به مدت حدود ۲۴ ساعت باقی ماند تا توزیع آب به صورت یکنواخت انجام شود. اندازه‌گیری رطوبت در نقاط و عمق مختلف و به صورت مستقیم انجام شد (برای خشک‌کردن نمونه‌ها از دستگاه آون استفاده شد). برای جداسازی بخش خاک از بخش خلاء نیاز به یک بخش مرجع است که پس از

جدول ۱- مشخصات چرخ پارویی به کارگرفته شده

| ارتفاع آج (mm) | تعداد آج‌ها | فاصله بین آج‌ها (deg) | زاویه آج (deg) | عرض رینگ (mm) | قطر رینگ (mm) |
|----------------|-------------|-----------------------|----------------|---------------|---------------|
| ۲۹             | ۱۵          | ۲۴                    | ۰              | ۸۰            | ۴۰۰           |

### مدل‌سازی و شرایط خاک مورد آزمایش

در این پژوهش خاک به‌عنوان یک ماده الاستیک-پلاستیک کامل<sup>۱</sup> در نظر گرفته شد. الاستیسیته خطی برای نشان‌دادن رفتار الاستیک خاک و مدل پلاستیسیته دراکر-پراگر برای نشان‌دادن رفتار پلاستیک خاک استفاده شده است. مدل دراکر-پراگر یک نسخه بروز شده از مدل وان میسر<sup>۲</sup> است (Naderi-Boldajji et al., 2013). مدل دراکر-پراگر برای مدل‌سازی مواد اصطکاکی مانند خاک و سنگ استفاده می‌شود. سطح شکست مدل دراکر-پراگر می‌تواند سه حالت خطی، هذلولی و نمایی داشته باشد (Farhadi et al., 2019). در این پژوهش مدل دراکر-پراگر خطی مناسب‌ترین حالت برای خاک است که با استفاده از نتایج آزمایش فشار سه‌محوری و همچنین اطلاعات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مربوط به تئوری موهر-کلمب<sup>۳</sup> تنظیم شد (Abaqus, 2017). معیار دراکر-پراگر خطی مطابق معادله (۴) نوشته می‌شود:

$$F = t - p \tan b - d = 0 \quad (۴)$$

که در آن، F تابع تسلیم، t تنش تفاضلی بر حسب کیلوپاسکال، P تنش نرمال برحسب کیلوپاسکال،  $\beta$  زاویه اصطکاک ماده و d چسبندگی ماده بر حسب کیلوپاسکال است.

به منظور مدل‌سازی خاک در نرم‌افزار آباکوس پارامترهایی از قبیل؛ مدول الاستیسیته<sup>۴</sup> (E)، ضریب پواسون<sup>۵</sup> ( $\nu$ )، زاویه اصطکاک داخلی دراکر-پراگر ( $\beta$ )، نسبت تنش جریان<sup>۶</sup> (K) و زاویه اتساع<sup>۷</sup> ( $\psi$ ) مورد نیاز است. برای تعیین پارامترهای ذکر شده برای خاک مرطوب از آزمایش

1- Elastic-Perfectly Plastic

2- VonMises

3- Mohr-Coulomb

4- Elasticity modulus

5- Poisson's ratio

6- Flow stress ratio

7- Dilation angle

8- Cohesion

9- Internal friction angle

10- shear modulus

همچنین مشخصات بافت خاک استفاده شده درون انباره خاک به صورت جدول ۳ است.

جدول ۳- مشخصات بافت خاک

| درصد رس | درصد سیلت | درصد شن | بافت خاک |
|---------|-----------|---------|----------|
| ۴۰      | ۴۲        | ۱۸      | رس-سیلتي |

پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک برای مدل‌سازی خاک در نرم‌افزار آباکوس به صورت مشخصات نشان داده شده در جدول ۴ است.

جدول ۴- مشخصات مکانیکی خاک

| K    | $\sigma_y$ (kPa) | c (kPa) | $\nu$ | E (kPa) | $\Psi$ (deg) | $\phi$ (deg) | $\beta$ (deg) | چگالی خشک<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | درجه<br>اشباع (%) | رطوبت (%) |
|------|------------------|---------|-------|---------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------------|-------------------|-----------|
| ۰/۹۲ | ۷۹               | ۳۵/۳۰   | ۰/۴   | ۴۲۱۶    | ۱۴/۲۵        | ۷            | ۱۴/۲۵         | ۱۷۲۰                              | ۷۷                | ۲۴        |

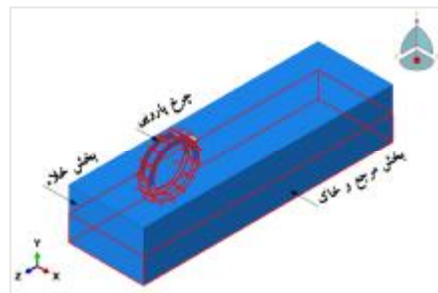
حل را بالا می‌برد، بنابراین بهترین نوع برهم‌کنش<sup>۲</sup> بین ناحیه‌ی اوپلری و لاگرانژی از نوع تماس عمومی (اکسپلیسیت)<sup>۳</sup> تعریف شده است (Qiu et al., 2011). با انتخاب این نوع از برهم‌کنش به صورت خودکار بخش‌های تماس مشخص شد، به طوری که جسم سخت<sup>۴</sup> (چرخ پارویی) به عنوان سطح پایه<sup>۵</sup> و بخش تغییرشکل پذیر (خاک) به عنوان سطح پیرو<sup>۶</sup> انتخاب شده است (Naderi-Boldaji et al., 2013). در مرکز چرخ پارویی یک نقطه مرجع<sup>۷</sup> ایجاد شده است. به علت تغییر شکل بسیار ناچیز چرخ پارویی با استفاده از قید "جسم سخت"<sup>۸</sup> به صورت صلب در نظر گرفته شده است. قید "جسم سخت" حرکت نواحی مختلف یک قطعه را به حرکت یک نقطه مرجع مقید می‌نماید. همچنین موقعیت نسبی نواحی یک قطعه "جسم سخت" در طول تحلیل ثابت باقی می‌ماند (Soroushnia & Beheshtian, 2018). بنابراین بار عمودی و بار مالبندی اعمال شده از طریق این نقطه به سطوح چرخ پارویی منتقل می‌شود. تجزیه و تحلیل تقابل چرخ پارویی و خاک مرطوب طی دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول سوارشدن چرخ پارویی بر روی خاک به وسیله اعمال بارگذاری روی محور چرخ پارویی انجام شده است.

ترکیب‌شدن با بخش خاک و خلاء در زمان تحلیل غیرفعال می‌شود و تأثیری در جریان حل مسئله ندارد. بخش خاک و خلاء و بخش مرجع در نرم‌افزار آباکوس بر اساس خصوصیات ابعادی جدول ۲ مدل‌سازی شده است.

جدول ۲- خصوصیات ابعادی بخش مرجع خاک و بخش خاک

| خصوصیات ابعادی | طول (m) | عرض (m) | ارتفاع (m) |
|----------------|---------|---------|------------|
| بخش مرجع       | ۲       | ۰/۶     | ۰/۲        |
| بخش خاک و خلاء | ۲       | ۰/۶     | ۰/۴        |

مجموعه مونتاژ شده بخش مرجع، خاک و چرخ پارویی برای تحلیل تقابل چرخ پارویی و خاک مرطوب در شکل ۵ نشان داده شده است.



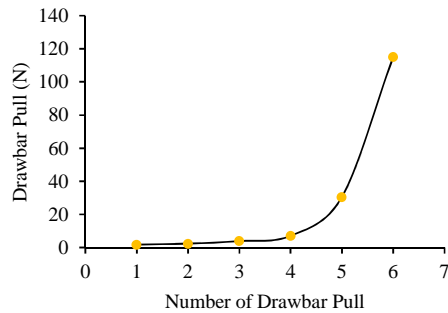
شکل ۵- مجموعه‌ی بخش‌های مرجع و خاک، خلاء و چرخ پارویی

### فرایند حل عددی و شرایط مرزی

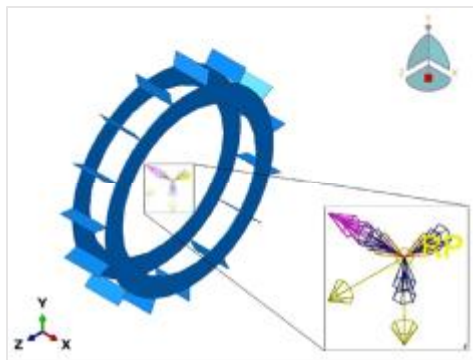
برای حل نرم‌افزاری تقابل چرخ پارویی و خاک مرطوب از یک حلگر دینامیکی / اکسپلیسیت که زیرمجموعه‌ی تحلیل‌های عمومی<sup>۱</sup> است، استفاده شد. یک تحلیل دینامیکی / اکسپلیسیت، مزایای بسیاری از جمله کارایی محاسباتی بالا در مورد مدل‌های بزرگ با زمان شبیه‌سازی کوتاه و یا برای تجزیه و تحلیل فرآیندهای بسیار ناپیوسته است (Soroushnia & Beheshtian, 2018). تعداد سطوح چرخ پارویی بسیار بالا است و امکان انتخاب دوبه‌دو این سطوح و خاک در تماس وجود ندارد و زمان آماده‌سازی

2- Interaction  
3- General Contact (Explicit)  
4- Rigid Body  
5- Master  
6- Slave  
7- Reference Point  
8- Rigid Body

1- General



شکل ۶- نمودار مقدار بارهای مالبندی اعمال شده به یک چرخ پارویی



شکل ۷- شرایط مرزی و بارگذاری‌های ذکر شده

برای المان‌بندی خاک از نوع المان  $EC3D8R^r$  (یک المان مکعبی اولبری خطی هشت گرهی با حل انتگرال‌گیری کاهش‌یافته و کنترل ساعت شنی) استفاده شده است. المان‌بندی بخش چرخ پارویی نیز از نوع المان  $C3D8R^f$  (یک المان مکعبی خطی هشت گرهی با حل انتگرال‌گیری کاهش‌یافته و کنترل ساعت شنی) استفاده شده است (Qiu et al., 2011). اندازه المان‌ها بر اساس داده‌های به دست آمده از آزمون همگرایی و زمان محاسباتی انتخاب شد. پس از تحلیل مدل توسط نرم‌افزار با استخراج سرعت پیشروی از خروجی نرم‌افزار المان محدود با استفاده از معادله (۹) لغزش بر حسب درصد محاسبه شده است.

$$s = \frac{rW - v}{rW} \times 100 \quad (9)$$

که در آن،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای برحسب رادیان بر ثانیه،  $v$  سرعت پیشروی برحسب متر بر ثانیه و  $r$  شعاع چرخ

مدت زمان برای انجام این مرحله ۱ ثانیه در نظر گرفته شده است. در مرحله دوم سرعت دورانی روی محور چرخ پارویی اعمال شده است که موجب غلتش چرخ پارویی و در نتیجه درگیری با خاک می‌شود. مدت زمان برای انجام این مرحله ۵ ثانیه در نظر گرفته شده است. (به‌علت آسیب‌های وارده به دستگاه کشنده و محیط کار آزمایشگاهی در آزمایش مربوط به لغزش ۱۰۰ درصد، مدت زمان مربوط به این آزمایش کمتر از آزمایش‌های دیگر بوده است. در واقع پس از مشاهده لغزش ۱۰۰ درصد، بار مالبندی اعمال شده به دستگاه غیرفعال شده است. لذا در گام دوم مدت زمان در نظر گرفته شده برای این تحلیل ۲ ثانیه است). در تعریف شرایط مرزی انباره خاک، تمامی درجات آزادی صفحه‌ی  $(ZX)$  یعنی صفحه پایین انباره خاک برابر صفر شده است. همچنین جابجایی صفحات  $(YZ)$  در جهت عمود بر خود یعنی در راستای محور  $(X)$  و جابجایی صفحات  $(XY)$  در جهت عمود بر خود یعنی در راستای محور  $(Z)$ ، برابر صفر قرار داده شده است. برای تحلیل عددی برهم‌کنش چرخ پارویی و خاک مرطوب دو گام حل تعیین شده است. در گام اول، تمام درجات آزادی چرخ پارویی به‌غیر از درجه آزادی در راستای محور  $(Y)$ ، برابر صفر شده است. همچنین بار متمرکز<sup>۱</sup>، برابر  $21/5$  کیلوگرم در جهت عمودی و در جهت پایین  $(-Y)$ ، به نقطه مرکزی چرخ پارویی اعمال شد. در گام دوم؛ تمام درجات آزادی چرخ پارویی به‌غیر از درجه آزادی در راستای محور  $(Y)$ ، در راستای محور  $(Z)$  و حول محور  $(X)$ ، برابر صفر شده است. برای دوران چرخ پارویی از سرعت زاویه‌ای<sup>۲</sup> برابر  $1/2$  رادیان بر ثانیه استفاده شد. همچنین برای اعمال بار مالبندی مشخص، یک بار در خلاف جهت مسیر حرکت چرخ پارویی  $(-Z)$ ، به نقطه مرکزی چرخ پارویی اعمال شده است. در تحلیل‌های مختلف مقدار این بار مالبندی تغییر داده‌شد و برابر بارهای مالبندی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های تجربی قرار داده شده است. مقدار بارهای مالبندی اعمال شده برای یک چرخ پارویی مطابق نمودار شکل ۶ است. شرایط مرزی و بارگذاری‌های ذکر شده در گام دوم، برای یک چرخ پارویی در شکل ۷ نشان داده شده است.

3- An 8-node linear eulerian brick, reduced integration, hourglass control

4- An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control

1- Concentrated force

2- Angular velocity



پارویی برحسب متر است.

مقاومت غلته‌ی پس از اعمال نیروی عمودی و بار مالبندی موردنظر به محور چرخ پارویی، گشتاور چرخ پارویی در پایان تحلیل از نرم‌افزار استخراج شد. با استفاده از گشتاور و شعاع غلته‌ی چرخ و با توجه به روشی که در آزمایش‌های تجربی استفاده شده است مقدار کشش ناخالص محاسبه شد. کشش خالص برابر مقدار نیروی است که در جهت خلاف حرکت چرخ پارویی به محور آن اعمال شده است. در نهایت با استفاده از تفاضل نیروی‌های کشش ناخالص و خالص از یکدیگر مقدار مقاومت غلته‌ی محاسبه شده است. برای اندازه‌گیری میزان فرورفتگی خاک در اثر عبور چرخ پارویی، میزان تغییرات در راستای عمودی نسبت به نقطه مرکز چرخ پارویی مورد بررسی قرار گرفته است. اعداد به دست آمده، نشان‌دهنده‌ی میزان فرورفتگی چرخ پارویی درون خاک مرطوب است.

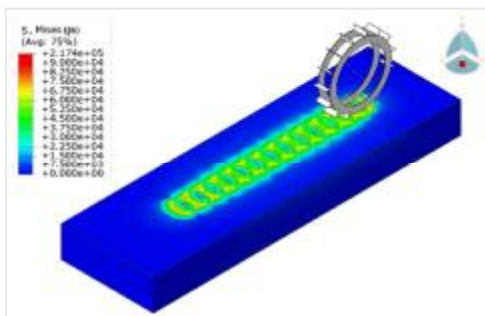
### تحلیل نتایج

با توجه به آزمایش‌های انجام شده در انبار خاک و نتایج آزمون عددی انجام شده توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس به بررسی اعتبار مدل تحلیل شده عددی پرداخته می‌شود.

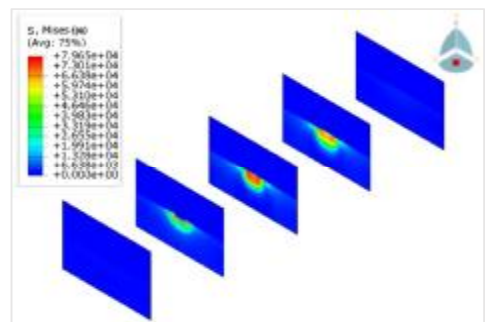
### بررسی نتایج تنش وان میسز برای خاک

در شکل ۸ نمونه‌ای سه‌بعدی از مدل المان محدود اثر متقابل چرخ پارویی و خاک مرطوب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدای تحلیل مرحله دوم زمانی که چرخ پارویی شروع به حرکت می‌کند به علت لغزش اولیه چرخ پارویی، تنش بیشتری به خاک وارد می‌شود که در شکل ۸ مشخص است. این تنش با حرکت چرخ پارویی پس از حدود ۱/۵ ثانیه به تدریج پایدار می‌شود. در شکل ۸ بیشترین تنش مربوط به قسمتی است که بخش آج چرخ پارویی در عمودی‌ترین حالت خود با خاک مرطوب در تماس است.

در شکل ۹ مقاطع برش‌خورده مدل المان محدود صفحه (YX)، تقابل چرخ پارویی و خاک مرطوب نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که حداکثر تنش مربوط به قسمتی است که آج تماس بیشتری با سطح خاک مرطوب دارد و تأثیر تنش در فضای اطراف آج به شکل حباب در زیر سطح آج چرخ پارویی مشخص شده است.

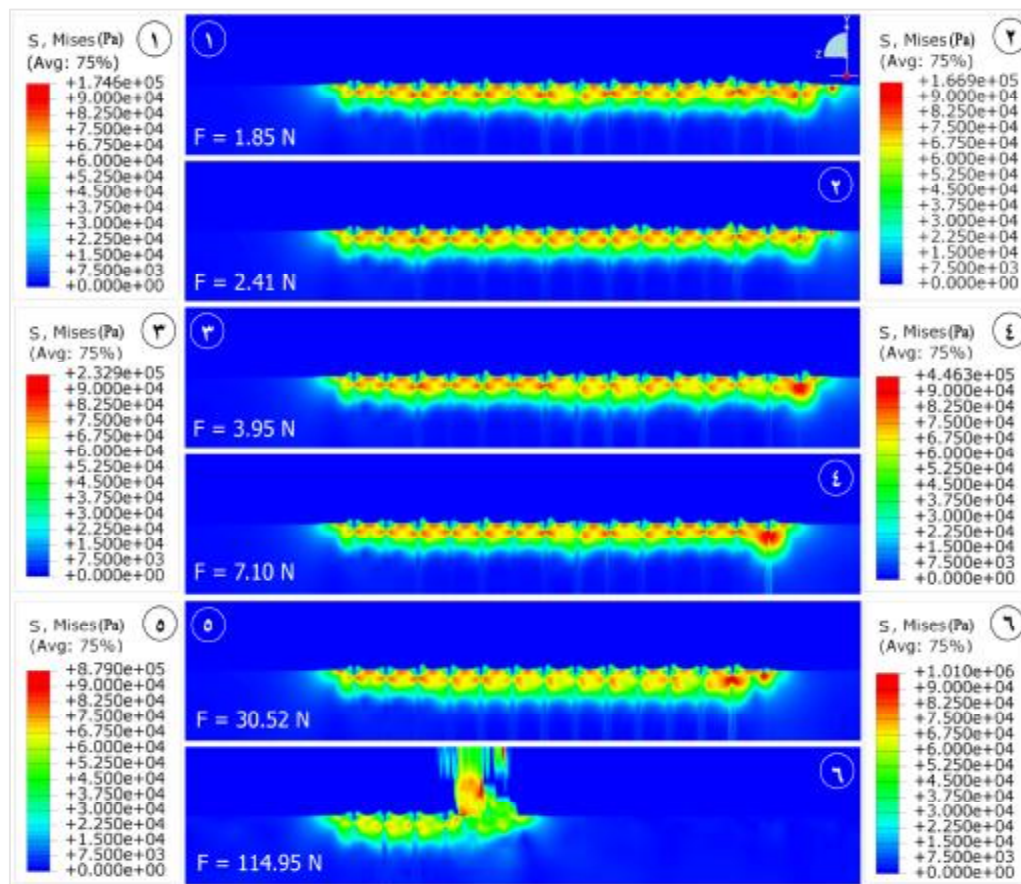


شکل ۸- کانتورهای تنش وان میسز در خاک مرطوب



شکل ۹- کانتورهای تنش وان میسز در مقاطع برش‌خورده عمود بر مسیر حرکت چرخ پارویی (صفحه YX)

جزئیات تغییرات تنش وان میسز در خاک مرطوب از نمای جانبی به‌عنوان برشی از مرکز چرخ پارویی و پروفیل خاک در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بار مالبندی به تدریج افزایش یافته است. همچنین افزایش بار مالبندی سبب افزایش لغزش شده و مسافت طی شده توسط چرخ پارویی در زمان مشخص و شرایط مرزی یکسان کاهش یافته است. بنابراین طول ناحیه اعمال تنش به تدریج با افزایش بار مالبندی کوتاه‌تر از مرحله قبل شده است. همچنین مشاهده می‌شود که تغییر بار مالبندی تأثیر زیادی بر تغییر تنش خاک داشته است (Farhadi *et al.*, 2019). در بار مالبندی شماره ۴ تأثیر عمودی‌ترین حالت آج چرخ پارویی را می‌توان مشاهده نمود که تنش‌های وارده به شکل حباب ظاهر شده است. همان‌طور که دیده می‌شود گسترده‌ترین و همچنین بیشترین لغزش و توزیع تنش در حداکثر بار مالبندی (شماره ۶) رخ داده است. تأثیر نیروی بار مالبندی در برآمدگی‌ها (پشته‌ها) خاک مرطوب به‌خصوص در پشته عقبی خاک مرطوب به وضوح مشخص است. این امر نشان می‌دهد که با افزایش بار مالبندی این برآمدگی‌ها (پشته‌ها) افزایش یافته‌اند.



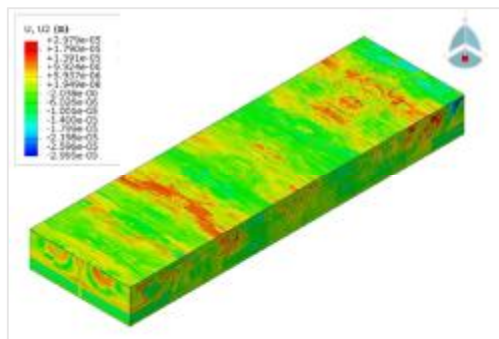
شکل ۱۰- جزئیات تنش وان میسر از نمای جانبی مسیر حرکت (صفحه YZ)

بین مقادیر تجربی و عددی برابر  $\frac{2}{4}$  درصد و در بیشترین مقدار بار مالبندی این اختلاف برابر  $\frac{18}{3}$  درصد است. دلیل این امر خطاهای آزمایشگاهی از جمله نحوه آماده‌سازی خاک و غیره، میزان دقت کالیبراسیون پارامترهای خاک در شبیه‌سازی‌ها و کاهش رطوبت خاک در طول روز آزمایش در خلال فصل تابستان در نظر گرفته شده است. پیشنهاد می‌شود که مدل قبل از به‌کارگیری در مسئله اصلی با یک روش ساده (مانند آزمون نفوذسنجی یا آزمون نشست صفحه) اعتبارسنجی شود. همچنین آماده‌سازی خاک با دقت بیشتری انجام شده و فصل مناسب‌تری برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شود. در پژوهشی که توسط Azimi *et al.* (2013) و Xiao & Zhang (2016) بر روی اثر متقابل چرخ و خاک انجام شد یکی از نتایج به دست آمده، افزایش میزان درصد لغزش، با افزایش مقدار بار مالبندی بوده است. این نتیجه به این علت حاصل می‌شود که میزان جابجایی برشی خاک جهت دستیابی به مقاومت برشی خاک بیشتر و تأمین تکیه‌گاه

### بررسی نتایج لغزش (بوکساوات) چرخ پارویی

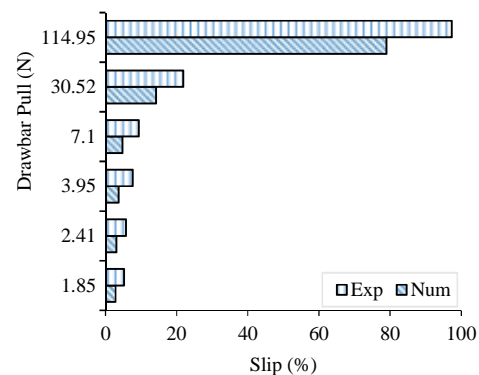
با توجه به نمودار شکل ۱۱، در نتایج تجربی و عددی، با افزایش بار مالبندی، مقدار درصد لغزش به تدریج افزایش یافته است. دلیل این پدیده آن است که تغییر شکل برشی خاک در جهت طولی چرخ با نسبت لغزش افزایش می‌یابد. این امر منجر به تغییر شکل زیاد خاک می‌شود که به نوبه خود باعث ایجاد نیروی کششی زیاد می‌شود (Ishigami *et al.*, 2007). در پژوهش حاضر مقدار درصد لغزش برای کمترین مقدار بار مالبندی، در نتایج تجربی برابر  $\frac{5}{2}$  درصد و در نتایج عددی برابر  $\frac{2}{8}$  درصد به دست آمد که کمترین مقادیر از درصد لغزش هستند. همچنین درصد لغزش برای بیشترین مقدار بار مالبندی، برای نتایج تجربی برابر  $\frac{97}{3}$  درصد و برای نتایج عددی برابر ۷۹ درصد به دست آمده است که بیشترین مقادیر در نتایج هستند. با توجه به نتایج نمودار شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که اختلاف بین مقادیر تجربی و عددی به تدریج افزایش یافته است. به طوری که در کمترین مقدار بار مالبندی، اختلاف

تنها قسمت‌های پلاستیک جابجاشده بر جای خود باقی می‌مانند. در واقع علت اصلی نشست چرخ در خاک تغییر شکل‌های پلاستیک خاک است و زمانی که تنش اعمال شده بر خاک از استحکام تسلیم تجاوز نموده باشد اتفاق می‌افتد. در شکل ۱۳ تغییر شکل المان‌ها در انباره خاک و همچنین مقدار فرورفتگی خاک در جهت عمودی برای یک چرخ پارویی (بار مالبندی ۳۰/۵۲) نشان داده شده است. با کمی دقت می‌توان تأثیر رد برجای‌مانده از آج‌های چرخ پارویی را مشاهده نمود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدا و انتهای تحلیل، مقدار بیشتری جابجایی عمودی مشاهده شده است. در ابتدا به علت این‌که لغزش چرخ پارویی در هنگام شروع حرکت وجود دارد، نشست بیشتری مشاهده می‌شود که پس از حرکت به پایداری نسبی رسیده است و در انتهای تحلیل به علت وجود چرخ پارویی در آن نقطه جابجایی بیشتری مشاهده می‌شود. در شکل ۱۴ مقاطع برش‌خورده در صفحه (YX) نشان داده شده است که می‌توان بیشترین مقدار جابجایی عمودی خاک را مشاهده نمود. در مقاطع شماره ۱ و ۵ در پایین‌ترین قسمت انباره خاک، کمترین مقدار جابجایی عمودی دیده می‌شود. این امر به علت عدم ورود چرخ پارویی در آن نقاط است که تنش کمتری به آن نقاط وارد شده و تغییر شکل‌های پلاستیک خاک کم است. اما در مقاطع دیگر با عبور چرخ پارویی، جابجایی عمودی در انباره خاک به وضوح قابل مشاهده است. در مقطع شماره ۴ به علت وجود چرخ پارویی در آن نقطه بیشترین گسترده‌ترین مقدار جابجایی عمودی خاک مشاهده شده است.

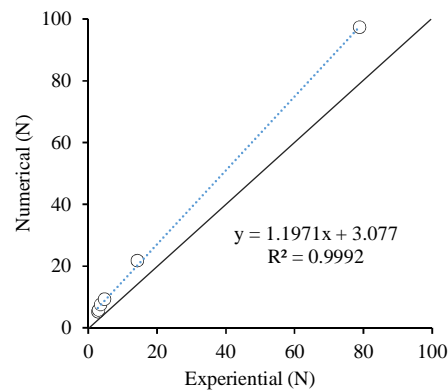


شکل ۱۳- تغییر شکل المان‌ها (جابجایی عمودی) در انباره خاک مربوط به بار مالبندی ۳۰/۵۲ نیوتن

لازم برای تولید کشش خالص بیشتر می‌شود. با توجه به موارد ذکرشده در نهایت دقت قابل قبول خروجی شبیه‌سازی در مقایسه با نتایج تجربی تأیید شد. همچنین در شکل ۱۲ مقایسه مقادیر لغزش حاصل از مدل المان محدود در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده تجربی نشان داده شده است.



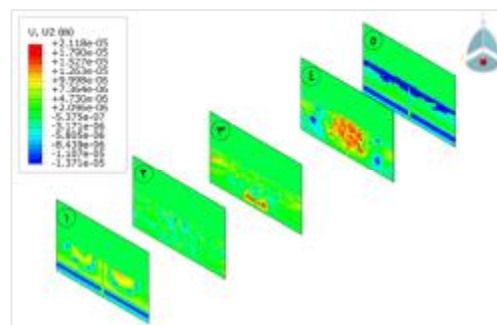
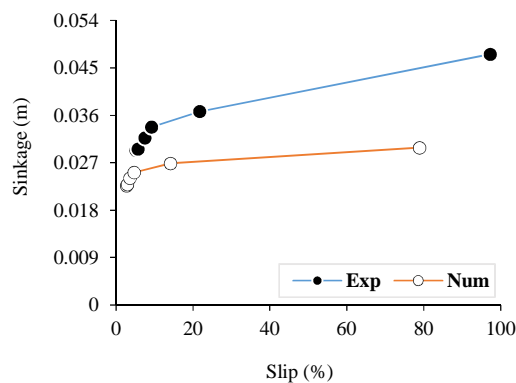
شکل ۱۱- مقایسه مدل شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در بار مالبندی - لغزش چرخ پارویی



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر عددی لغزش در مقابل مقادیر تجربی اندازه‌گیری شده آن

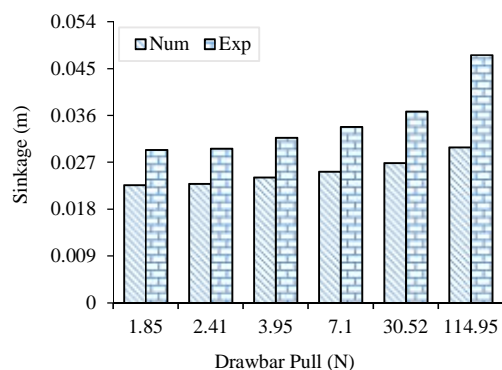
### بررسی نتایج مربوط به فرورفتگی چرخ پارویی در خاک مرطوب

با حرکت چرخ پارویی در راستای افقی (محور -Z)، خاک مرطوب به علت نیروی واردشده از طرف چرخ پارویی، در جهت عمودی جابجا می‌شود. جابجایی مشاهده شده ناشی از تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک است. مشاهده شده است که بعد از عبور چرخ پارویی قسمت‌های الاستیک جابجایی عمودی خاک به محل اولیه برگشته و



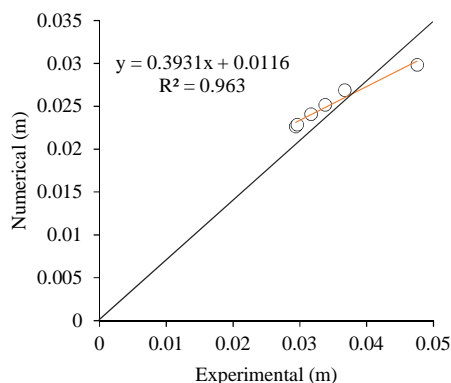
شکل ۱۴- کانتور های جابجایی عمودی بر روی مقاطع برش خورده عمود بر مسیر حرکت (صفحه YZ)

شکل ۱۵- مقایسه نتایج تجربی و عددی بر میزان فرورفتگی - لغزش یک چرخ پارویی



شکل ۱۶- مقایسه نتایج تجربی و عددی بر روی میزان فرورفتگی - بار مالبندی یک چرخ پارویی

در نمودار شکل ۱۷ مقادیر حاصل از مدل المان محدود تقابل چرخ پارویی و خاک مرطوب برای فرورفتگی چرخ پارویی در خاک مرطوب در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده تجربی نشان داده شده است.



شکل ۱۷- مقادیر عددی برای فرورفتگی در مقابل مقادیر تجربی

نمودار نشان داده شده در شکل ۱۵، بیانگر میزان فرورفتگی خاک به‌عنوان تابعی از درصد لغزش است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد لغزش، مقدار فرورفتگی افزایش یافته است. مقایسه بین مقادیر به دست آمده توسط آزمایش‌های تجربی و عددی، نشان‌دهنده مقادیر بیشتر فرورفتگی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های تجربی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده عددی است. دلیل این امر خطاهای آزمایشگاهی از جمله نحوه اندازه‌گیری مقدار فرورفتگی در شرایط آزمایشگاهی و غیره، میزان دقت کالیبراسیون پارامترهای خاک در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است. در پژوهشی که توسط *Azimi et al. (2013)* انجام شد یکی از نتایج به دست آمده بیانگر افزایش مقدار فرورفتگی با افزایش نسبت لغزش بوده است. همچنین مقادیر به دست آمده در شبیه‌سازی، کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده تجربی گزارش شد. به‌علاوه نتایج نشان داد که اختلاف بین مقادیر تجربی و عددی در ابتدای تحلیل بسیار کم بوده و به تدریج با افزایش درصد لغزش افزایش می‌یابد.

همچنین نمودار نشان داده شده در شکل ۱۶ بیانگر میزان فرورفتگی خاک به‌عنوان تابعی از بار مالبندی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار بار مالبندی، مقدار فرورفتگی افزایش می‌یابد. مقایسه بین مقادیر به دست آمده توسط آزمایش‌های تجربی و عددی، نشان‌دهنده مقادیر بیشتر فرورفتگی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های تجربی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده عددی است. در واقع این نتایج بیانگر این مسئله هستند که با افزایش بار مالبندی تمایل چرخ پارویی به لغزش بیشتر می‌شود و درگیری بیشتری با خاک ایجاد می‌نماید و در نتیجه به میزان بیشتری درون خاک فرو می‌رود.

## بررسی نتایج مربوط به مقاومت غلتشی

## منابع

1. Abaqus. (2017). Abaqus User's Manuals Version 6.14. Dassault Systèmes Simulia Corp. Providence, RI.
2. Azimi, A., Kövecses, J., & Angeles, J. (2013). Wheel-soil interaction model for rover simulation and analysis using elastoplasticity theory. *IEEE Transactions on robotics*, 29(5): 1271-1288.
3. Bowles, L. E. (1996). *Foundation analysis and design*. McGraw-hill.
4. Cueto, O. G., Coronel, C. E. I., Morfa, C. A., R., Sosa, G. U., Gómez, L. H. H., Calderón, G. U., & Suárez, M. H. (2013). Three dimensional finite element model of soil compaction caused by agricultural tire traffic. *Computers and electronics in agriculture*, 99: 146-152.
5. El-Sayegh, Z., El-Gindy, M., Johansson, I., & Öijer, F. (2018). Improved tire-soil interaction model using FEA-SPH simulation. *Journal of Terramechanics*, 78: 53-62.
6. Farhadi, P., Golmohammadi, A., Malvajerdi, A. S., & Shahgholi, G. (2019). Finite element modeling of the interaction of a treaded tire with clay-loam soil. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162: 793-806.
7. Farhadi, P., Golmohammadi, A., Sharifi, A., & Shahgholi, G. (2018). Potential of three-dimensional footprint mold in investigating the effect of tractor tire contact volume changes on rolling resistance. *Journal of Terramechanics*, 78: 63-72.
8. Gee-Glough, D. (1985). The special problem of wetland traction and flotation. *Journal of agricultural engineering research*, 32(3): 279-288.
9. Hamann, T., Qiu, G., & Grabe, J. (2015). Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian approach on pile installation problems under partially drained conditions. *Computers and Geotechnics*, 63: 279-290.
10. Ishigami, G., Miwa, A., Nagatani, K., & Yoshida, K. (2007). Terramechanics-based model for steering maneuver of planetary exploration rovers on loose soil. *Journal of Field robotics*, 24(3): 233-250.
11. Kurjenluoma, J., Alakukku, L., & Ahokas, J. (2009). Rolling resistance and rut formation by implement tyres on tilled clay soil. *Journal of Terramechanics*, 46(6): 267-275.
12. Naderi-Boldaji, M., Alimardani, R., Hemmat, A., Sharifi, A., Keyhani, A., Tekeste, M. Z. & Keller, T. (2013). 3D finite element simulation of a single-tip horizontal penetrometer-soil interaction. Part I: Development of the model and evaluation of

مقاومت غلتشی را می‌توان به‌عنوان تابعی از تغییر شکل خاک، نشست چرخ در خاک و غیره در نظر گرفت. اساساً مقاومت غلتشی به‌علت نشست چرخ در خاک و یا فشردگی خاک تحت تردد است. هر چه میزان نشست بیشتر باشد مقاومت غلتشی نیز بیشتر خواهد بود. کاهش مقاومت خاک در برابر نفوذ، یا کاهش مقاومت خاک در برابر تغییر شکل، نیروی مقاومت غلتشی را افزایش می‌دهد. در واقع افزایش مقاومت غلتشی نشانگر افزایش نفوذپذیری و تغییر شکل خاک است (Kurjenluoma et al., 2009). مقادیر مقاومت غلتشی برای آزمایش‌های تجربی و عددی به ترتیب  $53/3$  و  $43/7$  نیوتن به دست آمد. در این مقایسه مقدار اندازه‌گیری شده‌ی عددی کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده‌ی تجربی است. علت این مقدار کمتر به‌عنوان نیروی موردنیاز برای حرکت شاسی چرخ، خطاهای آزمایشگاهی، میزان دقت کالیبراسیون پارامترهای خاک در شبیه‌سازی‌ها و چسبندگی خاک به چرخ پارویی در نظر گرفته شده است. طبق اطلاعات به دست آمده در بخش "بررسی نتایج مربوط به فرورفتگی چرخ پارویی در خاک مرطوب" مشاهده شد که مقدار نفوذ چرخ پارویی در خاک مرطوب در آزمایش‌های تجربی بیشتر از آزمایش‌های عددی است. بنابراین طبق اظهارات مطرح شده می‌توان بیان نمود که مقایسه نتیجه مقاومت غلتشی در آزمایش‌های تجربی و عددی از اعتبار خوبی برخوردار است.

## نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی و عددی و مقایسه مقادیر حاصل می‌توان نتیجه گرفت که از تقابل چرخ پارویی و خاک مرطوب، با افزایش میزان بار مالبندی، میزان درصد لغزش افزایش می‌یابد که افزایش تنش در خاک را نیز به همراه دارد. همچنین افزایش بار مالبندی موجب افزایش میزان فرورفتگی می‌شود. مقاومت غلتشی تجربی مقداری بیشتر از مقاومت غلتشی عددی به دست آمده است. با توجه به شرایط آزمایشگاهی و مقدار اختلاف مشاهده شده در نتایج تجربی و عددی می‌توان بیان کرد که مدل المان محدود از مطابقت خوبی برخوردار است.

24. Taheri, S., Sandu, C., Taheri, S., Pinto, E., & Gorsich, D. (2015). A technical survey on Terramechanics models for tire-terrain interaction used in modeling and simulation of wheeled vehicles. *Journal of Terramechanics*, 57: 1-22.
25. Varghese, A. G., Turner, J. L., Way, T. R., Johnson, C. E., & Dorfi, H. R. (2012). Traction prediction of a smooth rigid wheel in soil using coupled Eulerian-Lagrangian analysis. *In Proceedings of 2012 SIMULIA Community Conference*. 1-15.
26. Xiao, W., & Zhang, Y. (2016). Design of manned lunar rover wheels and improvement in soil mechanics formulas for elastic wheels in consideration of deformation. *Journal of Terramechanics*, 65: 61-71.
- the model parameters. *Soil and Tillage Research*, 134: 153-162.
13. Nasiri, M., Soltani, M., & Motlagh, A. A. M. (2013). Determination of agricultural soil compaction affected by tractor passing using 3D finite element. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(3): 11-16.
14. Noh, W. F. (1963). *CEL: A time-dependent, two-space-dimensional, coupled Eulerian-Lagrange code (No. UCRL-7463)*. Lawrence Radiation Lab. Univ. of California, Livermore.
15. Perumpral, J. V., Liljedahl, J. B., & Perloff, W. H. (1971). A numerical method for predicting the stress distribution and soil deformation under a tractor wheel. *Journal of Terramechanics*, 8(1): 9-22.
16. Pruiksma, J. P., Kruse, G. A. M., Teunissen, J. A. M., & van Winnendael, M. F. P. (2011). April. Tractive Performance Modelling of the Exomars Rover Wheel Design on Loosely Packed Soil Using the Coupled EulerianLagrangian Finite Element Technique. *In 11th Symposium on advanced space technologies in robotics and automation*. 12-14.
17. Qiu, G., Henke, S., & Grabe, J. (2011). Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations. *Computers and Geotechnics*, 38(1): 30-39.
18. Rubinstein, D., Shmulevich, I., & Frenckel, N. (2018). Use of explicit finite-element formulation to predict the rolling radius and slip of an agricultural tire during travel over loose soil. *Journal of Terramechanics*, 80: 1-9.
19. Soroushnia, S., & Beheshtian, N. (2018). *Abaqus Complete Practical Reference (elementary level)*. 7th Edition, Negarandeh Danesh Publisher, Tehran, Iran. 738 p. (In Persian)
20. Shahidi, S. K., & Ahmadi Moghaddam, P. (2008). *Car-soil relationship (Soil and Soil Physics and Mechanics)*. Second Edition, University Jahad Publications, Urmia, Iran.
21. Salokhe, V. M., & Gee-Clough, D. (1988). Modes of wet clay soil behaviour under a single cage wheel lug. *Journal of terramechanics*, 25(4): 273-285.
22. Soekarno, S., & Salokhe, V. (2003). Soil reactions on the cage wheels with staggered echelons of half-width lugs and perfect chevron lugs in wet clay soil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.
23. Taghavifar, H., & Mardani, A. (2014). Effect of velocity, wheel load and multipass on soil compaction. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(1): 57-66.