

## تحلیل اجزاء محدود برهم کنش چرخ محرک - خاک برای برآورد توزیع تنش عمودی خاک

عارف مردانی<sup>۱</sup>، نسا دیباگر<sup>۲</sup> و اسعد مدرس مطلق<sup>۳</sup>

۱- دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه

۲- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه

۳- دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۳/۰۱/۲۵ پذیرش نهایی: ۱۳۹۴/۰۴/۱۹	در این مطالعه به منظور تحلیل برهم کنش تایلر محرک-خاک از دو روش عددی و تجربی استفاده شد تا تاثیر تغییرات سرعت پیشروی و بار دینامیکی تایلر روی تنش عمودی خاک در عمق-های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. در روش عددی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس <sup>۱</sup> برای شبیه سازی خاک به عنوان ماده الاستوپلاستیک از مدل دراگر-پراگر و برای طراحی مولفه های سازنده تایلر به عنوان لاستیک تراکم ناپذیر، از مدل مواد هایپرالاستیک کرنش محدود و الاستیک استفاده شد. آزمون های تجربی نیز با استفاده از آزمونگر تک چرخ و انباره خاک در سطوح مختلفی از سرعت پیشروی و بار دینامیکی در عمق های مختلف خاک انجام گرفتند. مقایسه نتایج حاصل از هر دو روش حاکی از مطابقت خوب نتایج آزمون های شبیه سازی و تجربی بوده است. در هر دو آزمون، افزایش سرعت پیشروی تایلر منجر به کاهش تنش عمودی خاک در ترکیب های مختلف بار دینامیکی و عمق گردید، به طوری که ضریب همبستگی نتایج تجربی و عددی در کمترین و بیشترین سرعت پیشروی تایلر در بار دینامیکی ۲ کیلو نیوتن و عمق ۰/۱ متر به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۹۱ درصد بوده است. در هر دو آزمون، کاهش تنش عمودی خاک بر اثر افزایش عمق، از یک الگوی توانی پیروی کرده است.
* عهده دار مکاتبات Email: a.mardani@urmia.ac.ir	

### مقدمه

مواجهه با خاک از دیدگاه مدیریت خاک و تولید محصول، همیشه مورد توجه بسیار بوده و کوشش می‌شود که ابزارها و روش‌های تقابل با خاک، به گونه‌ای طراحی گردد که تا حد امکان از پیامدهای تخریبی خاک و نیز هدررفت انرژی که خود در برگیرنده محدودیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی می‌باشد، پیشگیری شود. بهتر کردن روش‌های مواجهه با خاک و اصلاح کیفیت ابزارهای مربوط به آن، مستلزم انجام آزمون‌های مورد اعتمادی است که در شرایط واقعی خاک و ابزار صورت گرفته باشند، و این مهم با توجه به پیچیدگی و تنوع متغیرهای حاکم بر تقابل خاک و ماشین دشوار می‌نماید؛ لذا شبیه‌سازی‌های عددی کلید تمام بهینه‌سازی‌هایی است که با حذف آزمایش‌های مزرعه‌ای پر هزینه و کاهش زمان تحقیق مدل‌های مناسبی را ارائه می‌دهند. یکی از روش‌های بررسی تغییر شکل خاک ناشی از عبور تایر، استفاده از روش اجزاء محدود می‌باشد. در سال‌های اخیر تحلیل تغییر شکل خاک با استفاده از روش اجزاء محدود توسط برخی محققان بر اساس معادلات ساختاری معمول (الاستیک، الاستیک-پلاستیک و...) ارائه شده است. معادلات ساختاری استفاده شده توسط آن‌ها بر این اساس بوده است که رفتار ماده در داخل سطح سیلان کاملاً الاستیک می‌باشد و این فرض مغایر با نظریه جدید به نام پلاستیسیته غیرمعمول می‌باشد. در پلاستیسیته غیرمعمول رفتار ماده در داخل سطح سیلان کاملاً الاستیک نبوده، بلکه ماده رفتار پلاستیک نیز از خود نشان می‌دهد (۲). قریشی<sup>۱</sup> (۳) یک مدل اجزاء محدود سه بعدی از تایر، تحت فشار باد، بارگذاری عمودی استاتیکی و غلتش پایدار توسعه داد؛ او از نرم‌افزار آباکوس و فرمول‌بندی لاگرانژی-اولرین متصل شده برای شبیه‌سازی تیراستفاده کرد. تاثیر بعضی از پارامترهای اجرایی و ساختاری تایر از

جمله نوع لایه‌های بدنه و گپ<sup>۲</sup>، زاویه‌ی تسمه‌ی کابل و ضریب اصطکاک بین جاده و تایر روی رفتار مکانیکی تایر تحت شرایط استاتیکی و غلتش، مورد بررسی قرار گرفت. ایشان به این نتیجه رسیدند که زاویه‌ی تسمه مهم-ترین متغیر ساختاری تایر می‌باشد که روی رفتار تایر به طور معنی‌داری اثر می‌گذارد. از نتایج دیگر این تحقیق افزایش تنش برشی خاک بر اثر افزایش اصطکاک بود (۳). قریشی پژوهش انجام شده قبلی را با اضافه نمودن آج و مقایسه با مدل قبلی تکمیل کرد. مقایسه‌ی نتایج آشکار کرد که چشم‌پوشی از جزئیات طرح ترید<sup>۳</sup> اثر بسیار جزئی روی بعضی از تغییرات بزرگ از قبیل تغییر شکل و بارگذاری دینامیکی تایر دارد؛ بنابراین اگر هدف اولیه از تحلیل، مطالعه‌ی رفتار کلی تایر (از قبیل تعیین منحنی بار- انحراف) باشد، یک مدل اجزاء محدود با ترید راه-راه ساده کافی است، با این روش در تلاش محاسباتی انجام شده و زمان مورد نیاز به مقدار بسیار زیادی صرفه‌جویی می‌شود (۴). محسنی منش و همکاران<sup>۴</sup> (۸) تنش تایر یک تراکتور را با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود انسیس<sup>۵</sup> تحلیل کردند. تحلیل انتخاب شده از نوع استاتیکی غیرخطی بود. در این تحقیق توزیع فشار تماسی بین تایر و خاک به صورت تابعی از فشار باد و بار عمودی بررسی شد. برای دستیابی به خواص لایه‌ها، تایر مورد نظر بعد از انجام آزمون‌های تجربی بریده شد و قسمتی از مسیر تماس تایر به سه لایه‌ی جداگانه (کارکس<sup>۶</sup>، تسمه<sup>۷</sup> و لایه‌ی لاستیک) جدا شد. سپس هر یک از این لایه‌ها به طور جداگانه مورد آزمون کشش قرار گرفتند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اگر فشار تماسی روی خط مرکزی تایر متمرکز نشود، آسیب کمتری به خاک خواهد

2- Gap

3- Tread

4- Mohsenimanesh *et al.*

5- Ansys

6- Carcass

7- Belt

چرخ در محیط انباره خاک و در شرایط مشابه، حاکی از مطابقت خوب نتایج هر دو آزمون بود. در این مطالعه افزایش بار عمودی تایلر نیز سبب افزایش تنش عمودی خاک در عمق‌های مختلف گردید (۱۱). در تحقیق حاضر تلاش شده است تا با وجود تمام ساده‌سازی‌های صورت گرفته، مدل تایلر-خاک نزدیکتری با شرایط آزمایشگاهی توسط نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی گردد، به طوری که بتواند الگوی مناسبی جهت توزیع تنش خاک در شرایط مختلف کاری ارائه داده و قابلیت اعتبارسنجی با نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی را در شرایطی که از یک سامانه کاملاً ابداعی برای ثبت تنش استفاده شده است، داشته باشد.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌های عملی تحقیق با استفاده از مخزن خاک واقع در دانشگاه ارومیه انجام شد. این سیستم مشتمل بر بخش‌های متنوعی از جمله انباره خاک به ابعاد  $1 \times 2$  متر، حامل یا کشنده ابزار، تجهیزات فراوری خاک، سیستم محرک، ابزارهای اندازه‌گیری و سیستم‌های کنترل است. نیروی محرکه این سیستم توسط الکتروموتور صنعتی سه فاز با توان ۲۲ کیلو وات تامین می‌گردد (شکل ۱). برای انجام آزمون‌های تجربی تحت بارگذاری‌های معین، سامانه اندازه‌گیری تنش عمودی در عمق‌های مختلف خاک قرار گرفت (شکل ۲). این سیستم متشکل از لودسل-ها، نمایشگرها، کامپیوتر به عنوان ذخیره‌کننده اطلاعات و سوپاپ‌های دریافت‌کننده تنش بود. با عبور چرخ از روی لودسل‌هایی که در عمق‌های مختلف و زیر خط مرکزی چرخ مدفون شده بودند، تنش وارده به خاک در عمق‌های مختلف تحت پارامترهایی از قبیل سرعت پیشروی و بار عمودی در سه تکرار اندازه‌گیری شد؛ سپس تاثیر این پارامترها با استفاده از نرم‌افزار SPSS و در قالب آزمایشات فاکتوریل و طرح کاملاً تصادفی روی تنش عمودی خاک بررسی گردید. شبیه‌سازی‌های عددی این تحقیق نیز با استفاده از بسته نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس نسخه (۳، ۶

رسید (۹). گروچیسینک و همکاران<sup>۱</sup> (۵) در یک تحقیق جامع، برهم‌کنش تایلر رادیال بادی (HT235/75R15) با یک سطح شنی را به روش اجزاء محدود شبیه‌سازی کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن خواص مواد الاستیک، هایپرالاستیک و ویسکوالاستیک برای مولفه‌های سازنده مدل، رفتار غلتشی- لغزشی تایلر و نیروی کشش تولید شده را در شرایط مختلفی از فشار باد، بار دینامیکی تایلر، لغزش طولی و زاویه لغزش روی یک سطح شنی بررسی کردند. بخشی از نتایج به دست آمده از تحقیقات آنها نشان داد که با افزایش زاویه لغزش، مقاومت حرکتی جانبی کاهش و نیروی کشش ناخالص و خالص جانبی در فشار باد ثابت و بارهای دینامیکی مختلف افزایش پیدا می‌کرد. کاهش مسافت توقف بر اثر افزایش گشتاور ترمز، از دیگر نتایج به دست آمده در این تحقیق با به- کارگیری روش اجزاء محدود بود (۵). زیبا<sup>۲</sup> (۱۲) از روش اجزاء محدود برای شبیه‌سازی برهم‌کنش خاک- تایلر و پیش‌بینی تراکم و چگالی خاک بر اثر حرکت تایلر در فشار باد و بارهای عمودی مختلف پرداخت. برای مدل کردن خاک در نرم‌افزار آباکوس از مدل دراگر- پراگر (ماده الاستیک-پلاستیک) و برای مدل کردن تایلر بدون آج از مدل هایپرالاستیک کرنش محدود (ماده الاستیک تقریباً تراکم ناپذیر) استفاده شده است. نتایج وی نشان داد که افزایش فشار هیدرواستاتیکی روی خاک، کرنش پلاستیک حجمی و متعاقباً چگالی خاک را افزایش می‌دهد. افزایش سرعت زاویه‌ای چرخ نیز منجر به افزایش شعاع غلتش و شتاب تویی چرخ گردید (۱۲). تقوی فر و مردانی<sup>۳</sup> با استفاده از شبکه عصبی (الگوریتم انقیس) تنش عمودی خاک را تحت تاثیر سطوح مختلفی از پارامترهای سرعت پیشروی و بار دینامیکی تایلر در عمق‌های مختلف پیشگویی کردند. اعتبارسنجی نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج آزمون‌های تجربی انجام گرفته توسط آزمونگر تک

1- Grujicic *et al.*

2- Xia

3- Taghavifar and Mardani

مردانی و همکاران: تحلیل اجزاء محدود برهم کنش چرخ...

برش مستقیم روی نمونه‌های خاک گرفته شده از انباره خاک به دست آمده‌اند (جدول ۱).  
تایر مورد استفاده نیز چرخ محرک تراکتور گلدونی از نوع 220/65 R 21 با عرض ۳۶ سانتیمتر، قطر خارجی ۸۰ سانتیمتر با ساختار شعاعی و محصول کارخانه گودیر می باشد. از آنجایی که در شبیه‌سازی تایر چشم پوشی از جزئیات طرح آج اثرات بسیار جزئی روی برخی از تغییرات بزرگ از قبیل تغییر شکل و بارگذاری دینامیکی تایر دارد، لذا تایر شبیه‌سازی شده در این تحقیق کاملاً

انجام گرفت. برای این شبیه‌سازی، ابتدا مدل‌های خاک و قسمت‌های مختلف تایر به طور جداگانه طراحی شدند. به منظور طراحی مدل تحقیق، خاک به صورت یک ماده تک لایه با ساختار الاستیک-پلاستیک کامل در نظر گرفته شده است. پارامترهای الاستیک مربوط به آن، شامل مدول یانگ E و ضریب پواسون  $\nu$  از طریق آزمون سه محوره و دو پارامتر پلاستیک، زاویه اصطکاک  $\phi$  و چسبندگی c از طریق پوش گسیختگی حاصل از آزمون



شکل (۱) آزمونگر تک چرخ و انباره خاک مورد استفاده در آزمون‌های تجربی  
Figure (1) One-wheel tester and soil-bin utilized in experimental tests



شکل (۲) سامانه مجهز به لودسل جهت اندازه‌گیری تنش عمودی خاک  
Figure (2) System equipped with load cells to measure the vertical stress in soil

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d}(J-1)^2 \quad (1)$$

### نتایج و بحث

در این تحقیق آزمون‌های تجربی و عددی در سطوح متفاوتی از سرعت پیشروی و بار عمودی انجام شده و تنش عمودی خاک در عمق‌های مختلف آن قرائت گردید (جدول ۴). سپس به منظور اعتبارسنجی نتایج و بررسی قابلیت مدل آزمون عددی، نتایج آزمون شبیه‌سازی با نتایج آزمون آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که الگوی ارائه شده توسط روش عددی برای پیشگویی تنش عمودی خاک تحت اثر بارگذاری‌های مختلف از اعتبار لازم برخوردار است. اطلاعات مربوط به تجزیه واریانس نتایج تجربی در سه عمق مختلف خاک در جداول ۵ تا ۷ ارائه شده است.

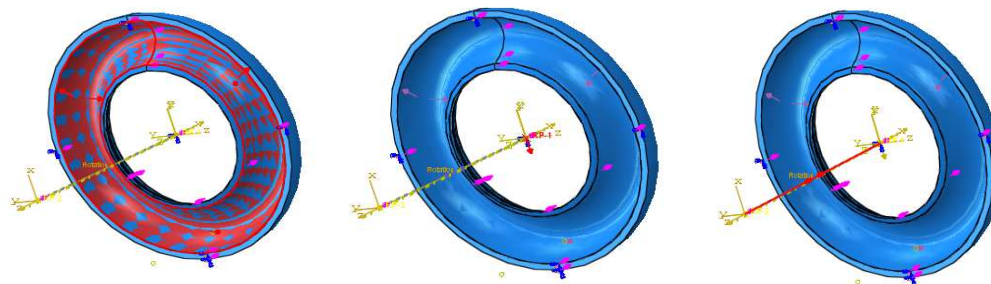
### تأثیر سرعت پیشروی تایلر بر تنش عمودی خاک در آزمون‌های عددی و تجربی

نتایج حاصل از تحلیل نموداری مقادیر تنش‌های عمودی پیش‌بینی شده توسط مدل آزمون عددی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت پیشروی تایلر، تنش عمودی خاک در ترکیب‌های مختلف بار عمودی و عمق کاهش پیدا کرده است. این تغییرات در تمام سطوح بار عمودی و عمق، در هر دو آزمون عددی و تجربی از یک روند یکنواخت خطی پیروی می‌کند. نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس صورت گرفته برای بررسی اثر تغییرات سطوح سرعت پیشروی تایلر روی تنش عمودی خاک در آزمون‌های تجربی، ضمن تایید نتایج آزمون‌های عددی، نشان می‌دهد که تأثیر متقابل عوامل سرعت پیشروی و بار عمودی تایلر روی تنش عمودی خاک، در دو عمق سطحی یعنی ۰/۱ و ۰/۱۵ متر در سطح احتمال ۰/۹۹ معنی‌دار است (جدول ۵ و ۶). بیشترین تنش عمودی ثبت شده در خاک متعلق به بار عمودی ۴۰۰ کیلونیوتن، سرعت پیشروی

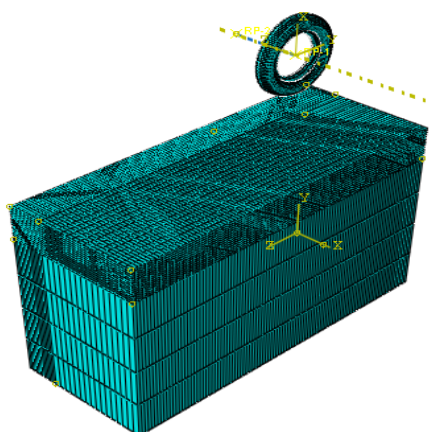
ساده‌سازی شده و شامل آج، لاستیک چند لایه تقویت شده و رینگ است. برای طراحی آج تایلر، خواص ماده هاپیرالاستیک تراکم‌ناپذیر با ثوابت مونی-ریولین<sup>۱</sup> در نظر گرفته شد. برای طراحی لاستیک داخلی مدل تایلر که خود متشکل از تسمه و کارکس می‌باشد خواص لاستیک چند لایه تقویت به کار گرفته شد. ابعاد مدل تایلر کاملاً منطبق با ابعاد تایلر واقعی بوده و با توجه به تقارن هندسی فقط نصف تایلر شبیه‌سازی و بطور دینامیکی تحلیل شده است تا زمان تحلیل به نصف کاهش یابد. یک نقطه مرجع در مرکز تایلر تعریف گردید تا شرایط مرزی (قیود تکیه گاهی)، بارگذاری تایلر (فشار باد، نیروی وزن، گشتاور، بار عمودی و سرعت پیشروی) از طریق این نقطه روی تایلر اعمال شوند. تلاش گردید تا سرعت، بار، گشتاور و خواص مواد سازنده مدل نهایی (خواص الیاستیک، پلاستیک و ...) مطابق با شرایط واقعی وارد نرم افزار شود. با توجه به محرک بودن چرخ، گشتاور در هر آزمون عددی با توجه به سرعت پیشروی تایلر در آن آزمون تعیین گردید. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب مراحل بارگذاری و مدل نهایی مش بندی تایلر-خاک نشان می‌دهد.

المان‌های خاک و آج تایلر از نوع المان‌های مکعبی خطی هشت‌گره‌ای با انتگرال کاهش یافته و کنترل ساعت شنی<sup>۲</sup> و المان‌های لاستیک داخلی از نوع المان‌های ورقه‌ای ظریف منحنی دو جهته چهارگره‌ای با کرنش پوسته‌ای محدود<sup>۳</sup> است. برخی از خواص به دست آمده خاک و تایلر که در شبیه‌سازی مدل این تحقیق به کار گرفته شده‌اند، در جداول ۱ الی ۳ آمده است. در جدول ۲،  $C_{10}$  و  $C_{01}$  ثوابت مادی به کار گرفته شده در مدل مونی-ریولین است (رابطه ۱). در این رابطه،  $(C_{10}, C_{01}, d)$  ثوابت مادی می‌باشند،  $(I_1, I_2)$  ناواردهای اول و دوم بوده و  $(J)$  ژاکوبین تانسور تغییر شکل می‌باشد (۹).

مردانی و همکاران: تحلیل اجزاء محدود برهم کنش چرخ...



شکل (۳) مراحل بارگذاری تایر محرک به ترتیب از چپ: اعمال فشار باد، بار دینامیکی، گشتاور  
 Figure (3) Steps of driven tire loading, respectively from left: pressure, vertical load, torque



شکل (۴) مدل اجزاء محدود نهایی تایر - خاک  
 Figure (4) Final finite element model of tire-soil

جدول (۱) خواص فیزیکی خاک

Table (1) Physical properties of soil

چگالی (Density) (kg/m <sup>3</sup> )	زاویه اصطکاک داخلی (Angle of internal Friction)(°)	زاویه اتساع (Dilatational Angle)(°)	مدول یانگ (Young Modulus) (kPa)	چسبندگی (Cohesion) (kg/cm <sup>2</sup> )	ضریب پواسون (Poisson ratio)
1600	36	36	200	0.003	0.49

جدول (۲) خواص فیزیکی اجزای آج

Table (2) Physical properties of tread

ماده الاستیک (Elastic Material)	C <sub>10</sub> (kPa)	C <sub>01</sub> (MPa)
آج (Tread)	806.1	1.805

جدول (۳) مدول یانگ تسمه و کارکس در راستای x و y

Table (3) Yong modulus of belt and carcass in direction of x and y

	کارکس (Carcass)	تسمه (Belt)
	E <sub>x</sub> (kPa) - E <sub>y</sub> (kPa)	E <sub>x</sub> (kPa) - E <sub>y</sub> (kPa)
برآورد شده (Estimated)	11.8-1124	11.68-68.91

جدول (۴) متغیرهای آزمون‌های تجربی و عددی

Table (4) Variables of experimental and numerical tests

متغیر (Variable)	0.4	0.8	1.2
سرعت پیشروی (Velocity) ( $\text{ms}^{-1}$ )	0.4	0.8	1.2
بار دینامیکی (kN) (Dynamic Load) (kN)	2	3	4
عمق (Depth) (m)	0.1	0.15	0.2

جدول (۵) نتایج تجزیه واریانس متغیرهای مستقل آزمون تجربی در عمق ۰/۱ متر

Table (5) Results of Analysis of variance of experimental independent variables in depth of 0.1 m

متغیر (Variable)	درجه آزادی (dof)	میانگین مربعات (Mean of Squares)	مجموع مربعات (Sum of Squares)	F
سرعت پیشروی (Velocity)	2	2964.111	5928.222	1311.984**
بار دینامیکی (Dynamic load)	2	6652.333	13304.667	2044.475**
سرعت پیشروی * بار دینامیکی (Dynamic load*velocity)	4	13.11	52.444	5.805**

جدول (۶) نتایج تجزیه واریانس متغیرهای مستقل آزمون تجربی در عمق ۰/۱۵ متر

Table (6) Results of Analysis of variance of experimental independent variables in depth of 0.15 m

متغیر (Variable)	درجه آزادی (dof)	میانگین مربعات (Mean of Square)	مجموع مربعات (Sum of Square)	F
سرعت پیشروی (Velocity)	2	2520.778	504.556	1994.053**
بار دینامیکی (Dynamic load)	2	6172.333	12344.667	2923.737**
سرعت پیشروی * بار دینامیکی (Velocity*Dynamic load)	4	29.444	117.778	13.947**

جدول (۷) نتایج تجزیه واریانس متغیرهای مستقل آزمون تجربی در عمق ۰/۲ متر

Table (7) Results of Analysis of variance of experimental independent variables in depth of 0.2 m

متغیر (Variable)	درجه آزادی (dof)	میانگین مربعات (Mean of Square)	مجموع مربعات (Sum of Square)	F
سرعت پیشروی (Velocity)	2	3640.168	7280.296	1694.552**
بار دینامیکی (Dynamic load)	2	5614.370	11228.741	2613.586**
سرعت پیشروی * بار دینامیکی (Velocity*Dynamic load)	4	7.815	31.259	3.638

\*\* معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد.

مردانی و همکاران: تحلیل اجزاء محدود برهم کنش چرخ...

بار عمودی ۲ کیلونیوتن و عمق ۰/۱ متر در جدول ۸ و شکل ۶ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

### تأثیر بار دینامیکی تایلر بر تنش عمودی خاک در آزمون‌های عددی و تجربی

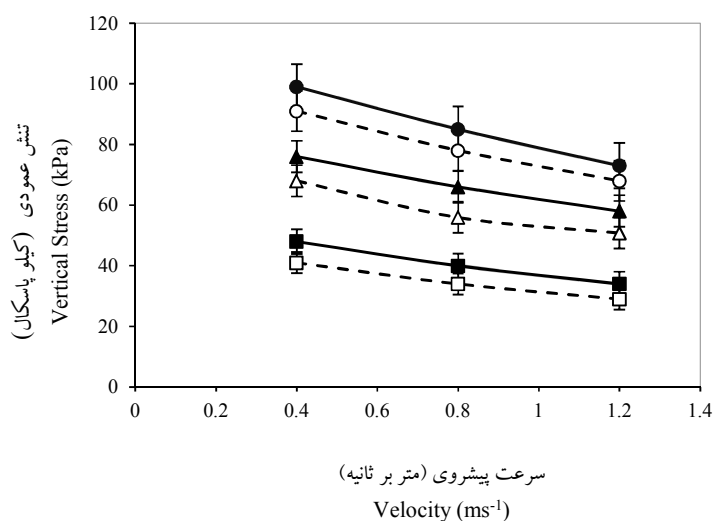
نتایج حاصل از تحلیل نموداری مقادیر تنش‌های عمودی پیش بینی شده توسط مدل آزمون عددی، نشان می‌دهد که با افزایش بار عمودی تایلر، تنش عمودی خاک در تمام ترکیب‌های مختلف سرعت پیشروی و عمق، افزایش پیدا کرده است. تجزیه واریانس انجام گرفته روی نتایج تجربی، نتایج حاصل از آزمون‌های عددی را تایید می‌کنند. (جدول ۵ تا ۷). افزایش بار دینامیکی روی تایلر، نه تنها منجر به افزایش فشار وارده از سوی چرخ به خاک در محل

۰/۴ متر بر ثانیه و در عمق ۰/۱ متری و کمترین مقدار آن ناشی از اعمال بار عمودی ۲۰۰ کیلونیوتن، سرعت پیشروی ۱/۲ متر بر ثانیه و در عمق ۰/۲ متر بوده است. با افزایش سرعت پیشروی تایلر مدت زمان تماس تایلر با خاک کاهش یافته و باعث می‌شود که حتی در بارهای دینامیکی بزرگتر، فرصت بارگذاری کافی روی خاک به تایلر داده نشود. از طرفی با افزایش عمق، بار دینامیکی وارد شده بر لایه‌های خاک منتشر شده و منجر به کاهش تنش عمودی خاک در این مناطق می‌گردد. نتایج فوق با نتایج تقوی فر و مردانی مطابقت دارد (۱۱). شکل ۵ تأثیر سرعت پیشروی تایلر روی تنش عمودی خاک را در عمق‌های مختلف و بار عمودی ۲ کیلونیوتن در آزمون‌های عددی و تجربی نشان می‌دهد. نتایج دو آزمون نیز در

جدول (۸) ارزیابی عملکرد مدل در سرعت‌های مختلف پیشروی، بار عمودی ۲ کیلونیوتن و عمق ۰/۱ متر

Table (8) Assessment of model performance under different forward speeds, dynamic load of 2 kN and depth of 0.1m

متغیر (Variable)	سطح (Level)	R <sup>2</sup>	RMSE	E
سرعت پیشروی (Velocity) (ms <sup>-1</sup> )	0.4	0.8765	0.0321	0.0812
	0.8	0.8637	0.0447	0.1138
	1.2	0.9124	0.0319	0.0758



شکل (۵) تأثیر سرعت پیشروی روی تنش عمودی خاک در بار دینامیکی ۲ کیلو نیوتن و عمق‌های مختلف در آزمون‌های تجربی (●، ▲، ■ و □) و آزمون‌های عددی (○، △، ▽ و ▢) (۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ متر).

Figure (5) Effect of forward speed on soil vertical stress under dynamic load of 2kN and different depth levels in experiment (●, 0.1, 0.15 and 0.2m) and numerical tests (○, 0.1, 0.15 and 0.2m)

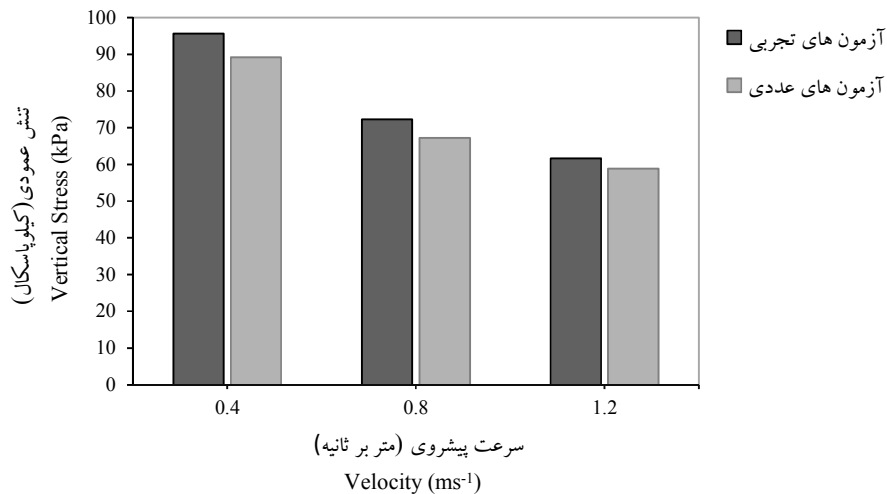


تجربی در ترکیب‌های مختلف بار عمودی و سرعت پیشروی، با افزایش عمق، تنش عمودی خاک با پیروی از یک الگوی توانی کاهش یافته است. این تغییرات در تمام ترکیب‌های بار عمودی و سرعت پیشروی در هر دو آزمون دارای روند مشابهی است. با افزایش عمق خاک بار وارده از سوی تایلر بر سطح خاک منتشر می‌شود. انتشار حباب‌وار سبب کاهش تنش وارده بر لایه‌های زیرین خاک می‌گردد. شکل ۹ تغییرات تنش خاک نسبت به عمق را در سطوح مختلف بار عمودی و سرعت پیشروی ۰/۴ متر بر ثانیه در آزمون‌های عددی و تجربی نشان می‌دهد.

تماس تایلر با خاک شده بلکه موجبات افزایش تنش، چگالی و فشردگی را نیز در لایه‌های زیرین خاک فراهم می‌آورد. کاهش سرعت پیشروی تایلر نیز با توجه به افزایش مدت زمان تماس تایلر با خاک و انتقال بار روی چرخ به خاک، موجب افزایش تنش عمودی خاک می‌گردد. نمودارهای به دست آمده از نتایج آزمون‌های عددی و تجربی حاکی از برقراری یک رابطه خطی نسبتاً خوب در محدوده بارهای مورد بررسی است. نتایج دو آزمون در سرعت پیشروی ۰/۸ متر بر ثانیه و عمق ۰/۱ متر در جدول ۹ و شکل ۸ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

### مقایسه تغییرات تنش عمودی خاک در عمق‌های مختلف در آزمون‌های عددی و تجربی

بررسی تغییرات تنش عمودی خاک در عمق‌های مختلف نشان می‌دهد که در هر دو آزمون عددی و

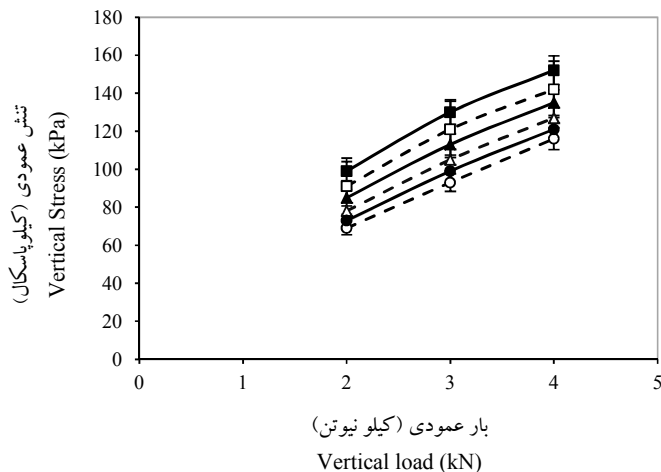


شکل (۶) نتایج عددی و تجربی در سطوح مختلف سرعت پیشروی، بار دینامیکی ۲ کیلو نیوتن و عمق ۰/۱۵ متر  
Figure (6) Numeric and experimental results under different forward speeds, dynamic load of 2 kN and depth of 0.15 m

جدول (۹) ارزیابی عملکرد مدل در بارهای دینامیکی مختلف، سرعت پیشروی ۰/۸ متر بر ثانیه و عمق ۰/۱ متر  
Table (9) Assessment of model performance under different dynamic load levels, forward speed of 0.8ms<sup>-1</sup> and depth of 0.1m

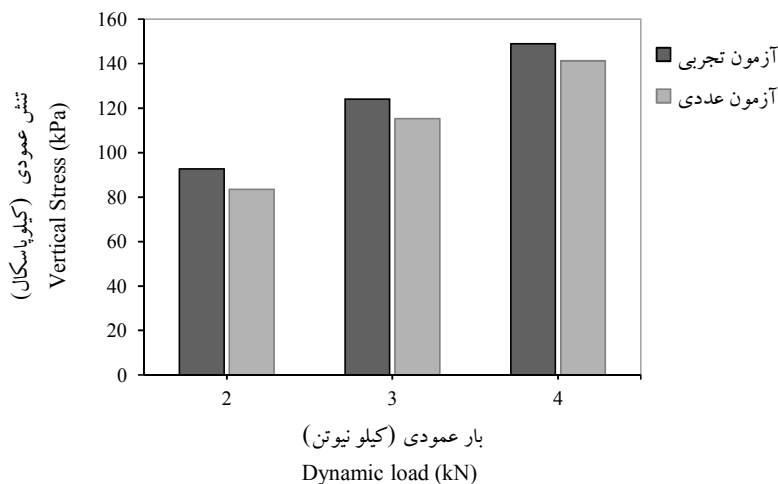
متغیر (Variable)	سطح (Level)	R <sup>2</sup>	RMSE	E
بار دینامیکی (Dynamic load) (kN)	2	0.8976	0.0481	0.1173
	3	0.9125	0.0387	0.0926
	4	0.9086	0.0354	0.0849

مردانی و همکاران: تحلیل اجزاء محدود برهم کنش چرخ...



شکل (۷) تاثیر بار دینامیکی تاثیر روی تنش عمودی خاک در سرعت های مختلف و عمق ۰/۱ متر در آزمون های تجربی (●) و (▲) و (○) و (□) ۴ کیلو نیوتن) و آزمون عددی (●) و (▲) و (○) و (□) ۲، ۳ و ۴ کیلو نیوتن)

Figure (7) Effect of vertical load on soil dynamic stress under depth of 0.1 m and different forward speeds in experimental (●) and numerical tests (○) 2, 3 and 4 kN



شکل (۸) نتایج عددی و تجربی در سطوح مختلف بار دینامیکی، سرعت پیشروی ۰/۸ متر بر ثانیه و عمق ۰/۱ متر

Figure (8) Numeric and experimental results under different dynamic load levels, forward speed of  $0.8 \text{ ms}^{-1}$  and depth of 0.1m

های مختلف، بار عمودی ۴ کیلو نیوتن و سرعت پیشروی ۰/۴ متر بر ثانیه در جدول و شکل ۱۰ مورد مقایسه قرار گرفته اند.

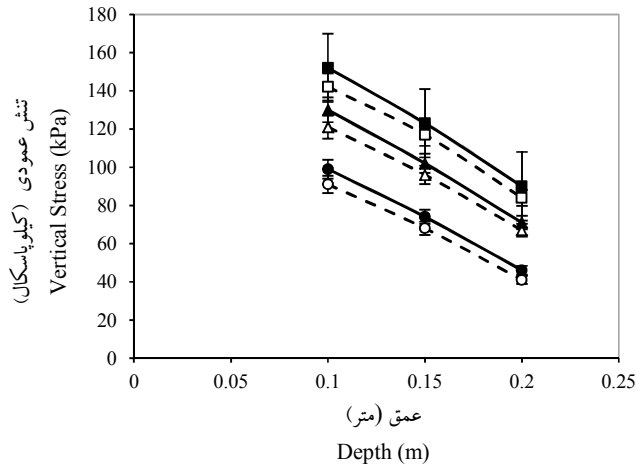
نتایج فوق با نتایج تحقیقات پیتکا و همکاران<sup>۱</sup>، کوفی و همکاران<sup>۲</sup> روی خاک های ریشه دار و بدون ریشه و نیز تحقیقات کلر و همکاران<sup>۳</sup> روی خاک های لومی-رسی مطابقت دارد (۱، ۷ و ۱۰). نتایج عددی و تجربی در عمق-

1-Pytka *et al*  
2-Cofie *et al*  
3-Keller *et al*

جدول (۱۰) ارزیابی عملکرد مدل در عمق های مختلف، بار عمودی ۴ کیلونیوتن و سرعت ۰/۴ متر بر ثانیه

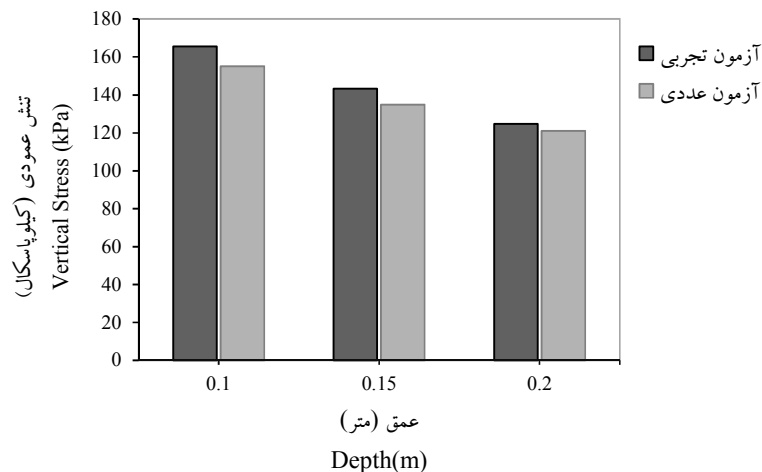
Table (10) Assessment of model performance under different depth levels, dynamic load of 4 kN and forward speed of 0.4ms<sup>-1</sup>

متغیر (Variable)	سطح (Level)	R <sup>2</sup>	RMSE	E
عمق (Depth) (m)	0.1	0.8712	0.0323	0.0826
	0.15	0.9219	0.0387	0.1294
	0.2	0.9401	0.0281	0.0903



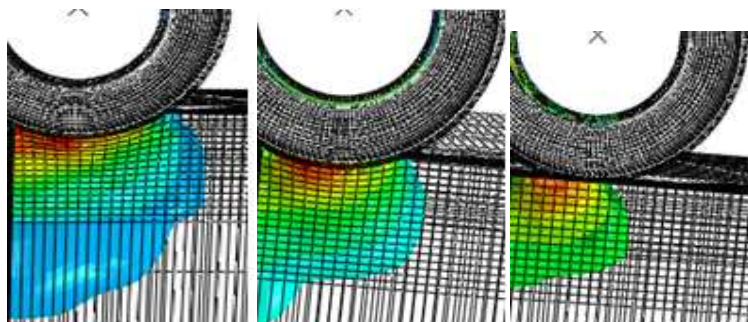
شکل (۹) تغییرات تنش عمودی خاک نسبت به عمق در بارهای دینامیکی مختلف و سرعت پیشروی ۰/۴ متر بر ثانیه در آزمون های تجربی (۲، ۳ و ۴ کیلونیوتن) و آزمون عددی (۲، ۳ و ۴ کیلونیوتن).

Figure (9) Effect of depth on soil vertical stress under different dynamic load levels and forward speed of 0.4 ms<sup>-1</sup> in experimental (2, 3 and 4kN) and numerical tests (2, 3 and 4kN)



شکل (۱۰) نتایج عددی و تجربی در عمق های مختلف، بار دینامیکی ۴ کیلونیوتن و سرعت پیشروی ۰/۴ متر بر ثانیه

Figure (10) Numeric and experimental results under different depth levels, vertical load of 4 kN and forward speed of 0.4ms<sup>-1</sup>



شکل (۱۱) نحوه انتشار تنش در عمق های مختلف خاک در سرعت پیشروی  $0.4 \text{ ms}^{-1}$  و بار عمودی به ترتیب از سمت راست: ۲، ۳ و ۴ کیلو نیوتن

Figure (11) Pattern of vertical stress distribution under forward speed of  $0.4 \text{ ms}^{-1}$  and vertical load of respectively from right: 2, 3 and 4 kN

عمق کاهش می یابد. علت این امر را میتوان در کاهش زمان تماس تایر-خاک و در نتیجه کاهش انتقال بار بر خاک در اثر افزایش سرعت برشمرد. کاهش تنش عمودی خاک بر اثر افزایش عمق و انتشار تنش تابعی از یک الگوی توانی بود. نتایج حاصل از تجزیه واریانس عوامل مورد بررسی در این تحقیق نشان داد که اثر مستقل پارامترهای سرعت پیشروی، بار عمودی روی چرخ بر میزان تنش اندازه گیری شده در هر سه سطح و اثر متقابل آنها در عمق های سطحی  $0.1$  و  $0.15$  در سطح احتمال  $99\%$  معنی دار بوده است.

### نتیجه گیری

در این پژوهش یک مدل اجزاء محدود سه بعدی جدید از تایر محرک-خاک ارائه شد که دارای قابلیت های ویژه بوده و نتایج آزمایش های عملی نشان داد که می توان به پیش بینی های این مدل تا حد خوبی اطمینان کرد. به منظور انجام شبیه سازی دقیق، ضرایب مکانیکی خاک به دقت اندازه گیری شدند و شرایط آزمایش های عملی تا حد ممکن تاثیر داده شدند. بررسی های نموداری و آماری نشان داد که با افزایش سرعت پیشروی تایر، تنش عمودی خاک در ترکیب های مختلف بار عمودی و

### منابع

- 1.Cofie, P., Koolen, A.J., and Pedrok, U.D. 2000. Measurement of Stress-strain relationship of beet roots and calculation of the reinforcement effect of tree roots in soil-wheel systems. Elsevier, Journal of Soil and Tillage research, 57: 1-12.
- 2.Drucker, D.C. 1988. Conventional and unconventional plastic response and representation. Applied Mechanics Reviews, 41: 151-167.
- 3.Goreishy, M.H.R. 2007. Finite element of the steel-belted radial tire with tread pattern under contact load. Journal of Iranian Polymer, 15: 667-674.
4. Goreishy, M.H.R. 2009. Finite element modeling of steady rolling of a radial tire with deatailed pattern. Journal of Iranian Polymer, 18: 641-650.

5. Grujicic, A., Marvi, H., Arakere, G., and Haque, I. 2009. A finite element analysis of pneumatic-tire/sand interactions during off-road vehicle travel. *Journal of Multidiscipline modeling in Materials and Structures*, 6: 284-308.
6. Karaytug, B. 2009. Footprint analysis of radial passenger tire. MSc thesis. Cukurova University, Institute of natural and applied science. Cukurova.
7. Keller, T. 2005. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress bellow agricultural tires from readily available tire parameters. *Biosystem engineering*, 92:85-96.
8. Mohsenimanesh, A., Ward, S.M., and Gilchrist, M.D. 2009. Stress analysis of a multi-laminated tractor tire using non-linear 3D finite element analysis. *Materials and Design*, 30: 1124-1132.
9. Mohsenimanesh, A., Ward, S.M., Owendeph, O.M., and Javadi, A. 2009. Modeling of pneumatic tractor tire interaction with multi-layered soil. *Biosystems Engineering*, 104(2): 191-198.
10. Pytka, J., Horn, R., Kuhner, S., Summerland, and, Blazejczak, H. D. 1995. *Institute of Agrophysics*, 9: 219-226.
11. Taghavifar, H., and Mardani, A. 2014. Prognostication of vertical stress transmission in soil profile by adaptive neuro-fuzzy inference system based modeling approach. *Elsevier, Measurement*, 50: 152-159.
12. Xia, K. 2011. Finite element modeling of tire/terrain interaction: Application to predicting soil compaction and tire mobility. *Journal of Terramechanics*, 48 (2): 113-123.