مدل‌های مبتنی بر فیزیک ترامکانیک طی بر هم کنش چرخ و خاک

سجاد درفش پور[1*]، عارف مردانی[2]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه ارومیه

۲- عضو هئیت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه ارومیه

* ایمیل نویسنده مسئول: s.derafshpour@urmia.ac.ir

چکیده

اصطلاح ترامکانیک به عنوان علم مطالعه خواص خاک در طول برهم کنش آن با وسیله‌ی نقلیه عبوری تعریف می‌شود. چالش اصلی در مطالعه رفتار وسیله در شرایط برون جاده ای، برهم کنش چرخ و خاک را توصیف می‌کند. در طی سال‌های متمادی، انواع مختلفی از مدل‌ها برای توسعه‌ی فرموله کردن و شبیه سازی عکس العمل چرخ و خاک ارائه شده است. درجه پیچیدگی این مدل‌ها بر اساس کاربرد، دقت و ارزش محاسباتی توسعه آن مبتنی گشته است. در کل می‌توان این مدل‌ها را به سه دسته اصلی تقسیم نمود که عبارتند از: (۱) مدل‌های تجربی (۲) مدل‌های نیمه تجربی (۳) مدل‌های مبتنی بر فیزیک. در این مطالعه به بررسی مدل-های مبتنی بر فیزیک از لحاظ مزیت و معایب آنها پرداخته می‌شود، ضمناً کارهای مهم انجام گرفته در این زمینه مرور می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تعامل چرخ و خاک، مدل تایر، تغییر شکل خاک، تغییر شکل تایر

مقدمه

برای شبیه سازی وسایل نقلیه‌ای که بر روی زمین‌های عملیاتی و شکل پذیر در حال حرکت هستند، تعیین مدل‌های تایر دقیق و کارآمد ضروری می‌باشد. استفاده‌ی مستقیم از مدل تایر پیش بینی شده برای حرکت جاده‌ای روی خاک نرم امکان پذیر نیست. روش‌هایی که برای مدل کردن و ارزیابی عملکرد تایرهایی که روی سطوح شکل پذیر در حال حرکت هستند تحت تأثیر خواص زمین، طراحی و پارامترهای عملیاتی واقع می‌شوند. این روشها از متدهای تجربی ساده تا روش‌های المان محدود خیلی پیچیده تقسیم بندی شده اند. این تحقیق به بررسی مدل‌های مبتنی بر فیزیک به منظور ارزیابی عملکرد چرخ در یک محیط شبیه سازی شده می‌پردازد.

مدل‌های مبتنی بر فیزیک، روش‌های تحلیلی و اصول فیزیکی را برای نمایش ترکیب تایر و خاک و همچنین تقابل آنها ادغام کرده است.این مدل‌های چند رشته‌ای، ریاضیات کاربردی، آنالیز عددی، فیزیک محاسباتی و حتی گرافیک کامپیوتری را برای ارزیابی عملکرد وسایل نقلیه چرخ دار دخالت داده است. درجه پیچیدگی از مدل‌های ساده‌ای که تایر را به عنوان یک حلقه صلب و زمین را به عنوان یک فنر گرفته تا مدل‌های جزئی که از روابط المان محدود برای تایر و خاک استفاده نموده متغیر است. باید در نظر داشت که این مدل‌ها و بویژه آنهایی که با روش‌های المان محدود[۱] و المان گسسته[۲] صورت گرفته، نیاز به زمان محاسباتی بالا دارند.

مواد و روشها

در این بخش به بررسی کارهای انجام گرفته و مدل‌های پیشنهاد شده در این زمینه پرداخته می‌شود. بطور کلی مهمترین مدل‌های ارائه شده مربوط به مدل‌های مبتنی بر فیزیک را در سه گروه اصلی بررسی میکنیم:

۱- مدل VTIM

۲- مدل مربوط به روش المان گسسته

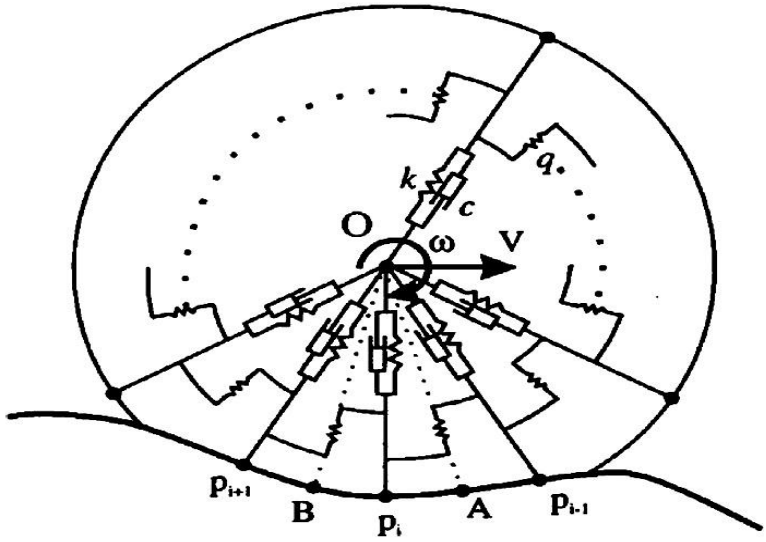
۳- مدل مربوط به روش المان محدود

۲-۱ مدل VTIM

این مدل توسط مادسن[۳] و سیدل[۴] در سال ۲۰۱۲ به عنوان یک مدل سه بعدی تقابل چرخ و خاک مطرح گردید که در این مدل تغییر فرم خاک و تایر لحاظ شده است. در این مدل قابلیت زمان حقیقی به منظور یکی کردن آن با مدل شبیه سازی دینامیکی

[۱] Finite element method
[۲] Discrete element method
[۳] madsen
[۴] seidel

مورد تأکید واقع شده است. پروسه‌ی تشکیل مدل ابتدا توسط نگروت[1] و فریمن[2] برای سطوح تغییر شکل ناپذیر مطرح شد. در مدل ارائه شده، محیط تایر به توده‌های فشرده چندتایی تقسیم گردید که در آن تایر، توسط مجموعه‌ای از فنرها و دمپرها در جهات مماسی و جانبی در لبه‌ها به همدیگر متصل شده اند. علاوه بر این، توده‌های فشرده توسط المان‌های فنر–دمپر شعاعی به مرکز دایره متصل شده اند. به منظور ساده سازی مدل، رفتار دینامیکی تایر حذف شده است. اجزای مدل تایر در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- ساختار مدل تایر با استفاده از سیستم فنر دمپر شعاعی

زمین به مجموعه‌ای از ستون‌های خاک تفکیک گردید که تغییر شکل آن در اثر تنش عمودی اعمالی با استفاده از روابط تراکم پذیری ویسکو- الاستو- پلاستیک محاسبه گردید. به منظور تعیین توزیع تنش‌های عمودی در خاک در طول بارگذاری نرمال تایر، معادله‌ی مکانیک خاک بوسینسک[3] و فرولیک[4] استفاده گردید (رابطه‌ی ۱).

رابطه (۱)
$$\sigma_z = \frac{vWz^v}{2\pi\left(r^2+z^2\right)^{(v/2v+1)}}$$

رابطه‌ی (۱) تنش σ_zرا در خاک متوسط ایزوتروپیک هموژن در طول بارگذاری W به فاصله‌ی r از نقطه‌ی اندازه گیری محاسبه می‌کند. ضریب تمرکز فرولیک (ϑ) برای محاسبه چسبندگی خاک بکار می‌رود. مقدار این فاکتور با توجه به نرمی خاک متغیر است. در حالت کلی مقدار این ضریب در جدول (۱) ارائه شده است.

[1] Negrut
[2] Freeman
[3] Boussinesq
[4] Frohilch

جدول ۱- مقدار ضریب تمرکز فرولیک (ϑ) برای محاسبه تنش‌های عمودی خاک

ϑ	نوع خاک
۳	سبک
۴	متوسط
۵	سنگین

در این مدل، مقدار تنش عمودی در طول بارگذاری افقی اعمالی به سطح خاک طبق رابطه‌ی (۲) می‌باشد:

$$\sigma_z = \frac{3}{2\pi} \frac{r(\cos\Theta)}{(1+(r/z)^2)^{(5/2)}} \frac{H}{z^3}$$

رابطه (۲)

در رابطه‌ی (۲)، H نیروی افقی و Θ زاویه بین جهت نیروی اعمال شده و جهت بردار اتصال بار نقطه ای به موقعیتی است که در آن تنش محاسبه می‌شود. در این مدل، نشست عمودی خاک (Z) مطابق رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود که در آن ρ_0چگالی حجمی خاک متراکم شده و ρ_1 چگالی حجمی نهایی خاک در اثر بارگذاری عمودی و h ارتفاع اولیه ستون خاک می‌باشد.

$$z = \left(1 - \left(\rho_0/\rho_1\right)\right) \cdot h$$

رابطه (۳)

به منظور تعیین نیروهای زمینی در اثر جابجایی طولی و عرضی تایر، جابجایی برشی خاک مربوط به تنش برشی با استفاده از مدلی که توسط جانوسی[۱] و هاناماتو[۲]معرفی شد بدست آمد. علاوه بر این نیروهای تخریبی که از دیواره‌ی خاک به لبه تایر در طول نشست آن اعمال شده بود از طریق محاسبات جانبی خاک عبوری، محاسبه گردید. در این مدل، حداکثر نیروی تخریبی در نقطه‌ی شکست در دیواره خاک جابجا شده توسط رابطه‌ی (۴) تعیین میگردد.

$$F = b\left(0.5\gamma Z^2 \cdot \tan^2(45+\varphi/2) + 2cZ\tan(45+\varphi/2)\right)$$

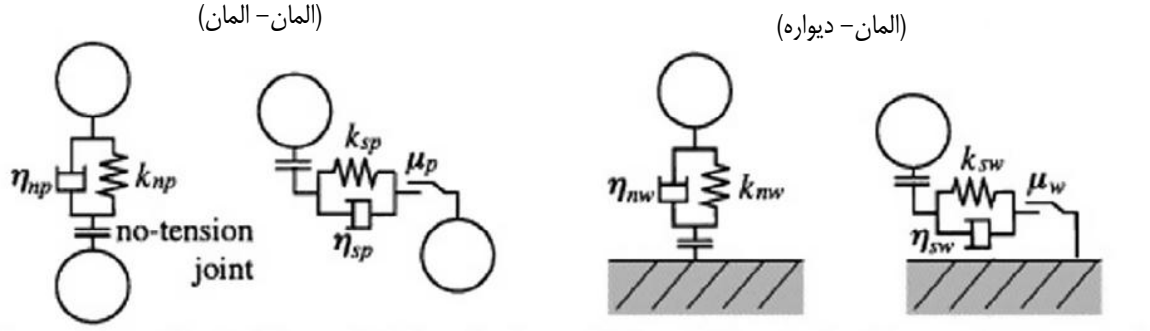
رابطه (۴)

در رابطه‌ی (۴)، b عرض المان خاک، $\varphi/2$ + 45 زاویه صفحه شکست، γ وزن واحد خاک و Z نشست تایر می‌باشد. برای اجرای مدل در شرایط واقعی، معادلات مکانیکی خاک همچنین الگوریتم تشخیص تماسی زمین با استفاده از GPU اجرا گردید.

[۱] Janosi
[۲] Hanamato

۲-۲- مدل مربوط به روش المان گسسته[۱] (DEM)

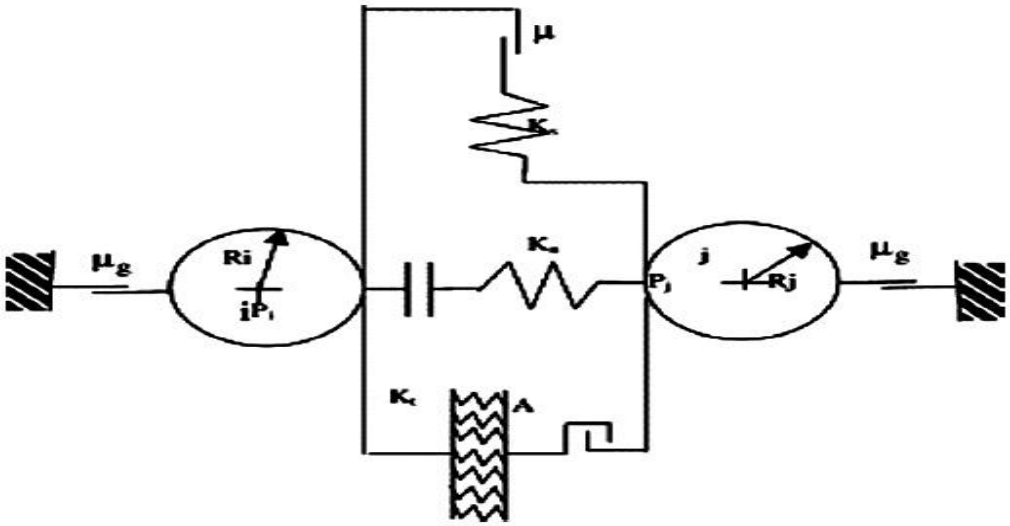
مفهوم اصلی روش المان گسسته از این موضوع منشعب می‌شود که خاک به عنوان سیستم ذرات گسسته فرض می‌شودئکه در آن برهم کنش خاک، مسیر خاک، چرخ‌ها و المان‌های مجاور مدلسازی می‌شود. برخی از مطالعات گذشته، چهارچوب ریاضی را برای بررسی رفتار مواد گرانوله و عکس العمل مکانیکی ماشین و خاک بنا نهاده است. کاربردهای عملی روش المان گسسته را می‌توان در مطالعات ترامکانیک و همچنین مطالعه برهم کنش ماشین- خاک مانند برش صفحه‌ای خاک، برش خاک توسط تیغه‌های دوار و تیغه گاوآهن مشاهده نمود. المان‌هایی که در تماس با چرخ هستند نیروی تماسی از چرخ و همچنین نیروی المان‌های مجاور را دریافت می‌کنند. نیروی عکس العمل حاصل در این روش با استفاده از نیروی المان‌ها محاسبه می‌شود. در شکل اساسی المان گسسته، نیروی میرایی و سختی المان‌ها در جهات نرمال و مماسی بین ذرات تماسی خاک مطابق شکل (۲) فرض می‌شود که تاناکا[۲] و همکاران ارائه نمودند. علاوه بر این، یک نیروی اصطکاک المان وجود دارد که از حاصلضرب ضریب اصطکاک در نیروی عمودی تماسی بدست می‌آید. همین روش برای محاسبه نیروی تماسی بین ذرات زمین و تایر بکار می‌رود.



شکل ۲- نیروی المان‌ها بین المان و المان/دیوار

باید اشاره کرد که میرایی چسبندگی که در شکل (۲) نشان داده شده است مناسب برای مواد گرانوله خشک می‌باشد. در برخی تحقیقات، به منظور دخالت دادن تأثیر اتلاف پسماند داخلی در نتیجه تغییر شکل، این نوع میرایی با میرایی کولومب هم در جهت نرمال و هم در جهت مماسی جایگزین شد. آساف[۳] برای نشان دادن چسبندگی خاک و نیروی دگرچسبی میان ذرات و تایر، المان-های دگرچسبی را معرفی نمود که در شکل (۳) نشان داده شده است.

[۱] Discrete Element Method
[۲] Tanaka
[۳] Asaf



شکل ۳- نمایی از المان گسسته شامل میرایی کولومب، μ_g و المان دگرچسبی K_t

از جمله‌ی مدل‌هایی که در روش المان گسسته ارائه شده اند می‌توان به مدل "H.Nakashima and A.Oida" مدل "F.Wakui and Y.Terumichi" و مدل "W.Smith and H.Peng" اشاره نمود.

۲-۳- مدل مربوط به روش المان محدود[۱] (FEM)

رفتار مکانیکی زمین بستگی به پارامترهای زیادی از جمله شکل ذرات دانه‌ها، محتوای رطوبتی، کهیژن و پوشش گیاهی و غیره دارد. شناسایی تمام این پارامترها و ارتباط آنها با عملکرد وسیله نقلیه با استفاده از روابط تجربی بسته به شرایط آزمون محدود می-باشد. از طرف دیگر استفاده از روش‌های مبتنی بر فیزیک ساده جهت مدلسازی زمین می‌تواند منجر به اشتباهات معناداری هم در براورد پارامترهای ورودی مدل و هم در بکارگیری مکانیک زمین داشته باشد. همه‌ی این عوامل سبب می‌شود که وسیله پاسخی منحرف از داده‌های آزمایشگاهی بدهد. روش دیگر برای آنالیز عملکرد وسیله روش المان محدود می‌باشد. محققین متعددی از روش المان محدود برای برهم کنش خاک-ابزار استفاده نموده اند.

مدلسازی با استفاده از روش المان محدود اساساً توسط مهندسین ارتش آمریکا برای برف توسعه داده شد. این مدل در طی چندین سال گذشته برای انواع زمین همچون شن بسط داده شد. فرایند مدلسازی تایر-خاک به سه ناحیه‌ی اصلی شامل مدلسازی نوع زمین، مدلسازی تایر و برهم کنش تایر-خاک تقسیم گردید. مدلسازی نوع زمین بصورت یک مدل فوم غیر قابل شکست و مدل پلاسیسیته دراگر-پراگر[۲] با سختی حدی[۳] صورت گرفت.

پارامتری کردن مدل نوع زمین با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به نشست صفحه در مزرعه و آزمایشگاه بعلاوه داده‌های قدیمی گزارش شده از زمین‌های مشابه صورت گرفت. چهار مدل تایری که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند عبارتند از (۱)

---

[۱] Finite Element method
[۲] Drucker- Prager
[۳] Cap hardening

مدل تایر صلب (۲) مدل Darnell (۳) مدل تحلیل نمایی مربوط به تایری با آج صاف (۴) مدل تحلیل نمایی مربوط به تایری با آج مستقیم.

مدل تایر صلب برای زمین‌های شکل‌پذیر بسیار نرم مانند نرم ارائه شد. در مدل دومی، تایر به سه بخش اصلی آج، دیواره تایر و گوشت تایر تقسیم شد. ساختار آج تایر با استفاده از المان‌های پوسته‌ای مدل شده و دیواره‌ی تایر به ده طول مساوی با المان‌های تیری بسط داده شد. سومین مدل مربوط به مدل تایر با آج صاف بوده که از المان‌های پوسته‌ای چهرگره‌ای برای اسکلت تایر و از المان‌های پیوسته خطی برای تاج آج‌ها استفاده گردید. این مدل اساساً برای آنالیز نمایی ارتعاشات تایر ارائه شد. بر این اساس، مدل چهارم با حذف بخش‌هایی از المان‌های پیوسته آج توسعه داده شد.

مدل دیگر ارائه شده در این مبحث مربوط به مدل "R.N yong and E.A Fattah" می‌باشد. یانگ و فتاح از اولین نویسندگانی بودند که عملکرد تایر روی خاک را با استفاده از FEM مطالعه نمودند. در این تحقیق تایر بصورت حلقه‌ای نیمه انعطاف پذیر با کرنش صفحه‌ای فرض گردید که شرایط مرزی آزمایشگاهی در برهم کنش تایر–خاک اعمال گردید. شرایط مرزی اعمال شده به لایه خاک، سطح تماسی تایر–خاک و توزیع تنش در سطح تماسی ساده سازی گردید و فرض گردید که تابعی از بار محوری، گشتاور ورودی و سرعت و لغزش انتقالی می‌باشد. نتایج اندازه گیری شده فرموله شده و بصورت نیروی گره ای در هر پله از شبیه سازی‌ها تخصیص داده شد. سرانجام فاکاورهای عملکرد تایر–خاک همچون کشش مالبندی، مقاومت تایر و پروفیل خاک در مقابل داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد.

ابوالنور[۱] یک آنالیز المان محدود (FEA[۲]) که بر هم کنش خاک–ابزار سه بعدی دینامیکی را در بر میگرفت انجام داد. وی یک مدل سازه ای هایپرپلاستیک را برای نشان دادن رفتار یکنواخت شن در طول بارگذاری در سرعت و شتاب‌های مختلف مورد بررسی قرار داد. این مدل که مبتنی بر سطوح شکست از پیش تعریف شده می‌باشد شامل رفتار دینامیکی خاک بوده و می‌تواند برای شبیه سازی اثر برشی در برهم کنش تایر–خاک بکار رود.

نتیجه گیری

مدل‌های مبتنی بر فیزیک را می‌توان در سه گروه VTIM، روش المان گسسته و روش المان محدود بررسی نمود. روش المان گسسته ابتدا برای مطالعه مواد گرانوله که می‌توانست بجای استفاده از قضیه پیوستگی بکار رود توسعه داده شد. اگرچه روش المان پیوسته هنوز در مراحل توسعه می‌باشد، تأثیربخشی آن در سطوحی همچون عکس العمل چرخ‌های رباتیک سبک وزن با خاک گرانوله نشان داده شده است. یکی از مشکلات اساسی در روش المان گسسته، هزینه محاسباتی بالا با توجه به مراحل گسترده تشخیص تماس و همچنین زمان کم موجود برای گرفتن دینامیک سیستم می‌باشد. همچنین در نظر گرفتن شکل‌های ساده برای

[۱] Abo- Elnor
[۲] Finite element analysis

ذرات خاک، اندازه غیر مربوط ذرات خاک در مقایسه با اندازه واقعی، عدم تنظیم پارامترهای قوی برای ورودی مدل و لحاظ نکردن بسیاری ذرات به دلیل محدودیت محاسباتی می‌باشد. از طرفی دیگر روش المان محدود قادر به کنترل شرایط مرزی منحصر به فرد مانند مواردی که در آن نوک آج تایر به عنوان یک نقطه تنش منحصر به فرد در طول عکس العمل خاک کار می‌کند نمی‌باشد. جدول (۱) به برخی از ویزگی‌های مدل‌های ارائه شده مربوط به مدل‌های مبتنی بر فیزیک می‌پردازد.

جدول ۲- برخی مشخصه های مهم مدل ارائه شده مبتنی بر فیزیک

نام نویسنده (نام مدل اگر موجود باشد)	فشار- نشست	کشش مالبندی	نیروی جانبی	لغزش مرکب	گشتاور برگردان	نیروی انباشتگی	اثر تردد	توزیع فشار	اعتبارسنجی با داده های آزمایشگی	خروجی اضافی مدل
VTIM	✓	×	×	×	×	×	×	×	×	انرژی کل برای تغییر شکل پلاستیک خاک
Nakashima	✓	×	×	×	×	×	×	×	×	-
smith	✓	✓	×	×	×	×	×	×	✓	گشتاور محرک برای زمین ناهموار با دامنه و فرکانس متفاوت
Yong	×	✓	×	×	×	×	×	✓	✓	نقشه انرژی تغییر شکل خاک و کرنش خاک
Wakui	✓	✓	✓	×	×	×	✓	×	×	-
Crrel	✓	✓	✓	×	×	×	×	✓	✓	خوابیدگی تایر، تغییر چگالی برف و سطح تماس تایر
Fervers	✓	×	×	×	×	×	×	✓	×	فشار نشست برای خاکهای مختلف
Grajicic	✓	✓	✓	×	×	×	×	✓	✓	سطح تماس، گشتاور شکست، مقاومت

	حرکتی									
Xia	سطح تماس، نشست- لغزش، چگالی فشردگی، کرنش حجمی پلاسیسیته	×	✓	×	×	×	×	✓	✓	✓
Li	بار عمودی دینامیکی	✓	✓	×	×	×	×	✓	✓	✓

منابع

Madsen J et al. A physics-based vehicle/terrain interaction model forsoft soil off-road vehicle simulations. SAE Int J Commercial Veh2012;5(1):280–90.

Negrut D, Freeman JS. Dynamic tire modeling for application withvehicle simulations incorporating terrain. SAE trans1994;103(6):96–103.

Janosi Z, Hanamoto B. Analytical determination of draw bar pull asa function of slip for tracked vehicles in deformable soils, In:Proceedings of the 1st international ISTVS conference. Turin, Italy;1961.

Asaf Z, Rubinstein D, Shmulevich I. Evaluation of link-track performances using DEM. J Terramech 2006;43(2):141–61.

Nakashima H, Oida A. Algorithm and implementation of soil–tire contact analysis code based on dynamic FE–DE method. JTerramech 2004;41(2–3):127–37.

Nakashima H, Yamazaki M. 3D FEM procedure for static sinkageproblems of tire on soil surface, In: Proceedings of the ARBIP95,Japanese Society of Agricultural Machinery. Kobe, Japan; 1995.

Wakui F, Terumichi Y. Numerical simulation of tire behavior on soft ground. J Syst Des Dyn 2011;5(3):486–500.

Wakui F, Terumichi Y. Numerical simulation of tire–ground system considering soft ground characteristics. J Syst Des Dyn 2011;5(8).

Smith W, Peng H. Modeling of wheel–soil interaction over rough terrain using the discrete element method. J Terramech 2013;50(5–6):277–87.

Yong RN, Boonsinsuk P, Fattah EA. Tyre flexibility and mobilityon soft soils. J Terramech 1980;17(1):43–58.

Darnell I, Hulbert GM, Mousseau CW. An efficient three-dimensionaltire model for vehicle dynamics simulations. J StructMech1997;25(1):1–19.

Fervers CW. Improved FEM simulation model for tire–soil interaction. J Terramech2004;41(2):87–100.

Lee J, Kiu Q. Modeling and simulation of in-plane and out-of-planeforces of pneumatic tires on fresh snow based on the finite elementmethod, In: Proceedings of the joint North America, Asia-PacificISTVS conference and annual meeting of Japanese society forterramechanics. University of Alaska, Fairbanks, AK, USA: Intec;2007.

Grujicic M et al. A finite element analysis of pneumatic-tire/sandinteractions during off-road vehicle travel.Multi.Model.Mater.Struct. 2009;6(2):284–308.

Xia K. Finite element modeling of tire/terrain interaction: applicationto predicting soil compaction and tire mobility. J Terramech2010;48(2):113–23.