مروری بر مدل‌های ترامکانیک تجربی ارائه شده برای تعامل چرخ و خاک وسایل چرخ‌دار

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

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. مدل‌های تجربی معمولاً برای ارزیابی ساده ای از وسایل نقلیه در جایگاه‌های در حال حرکت یا در حال ایستا استفاده می‌شود. این مدل‌ها بطور کلی بر اساس تست های آزمایشگاهی یا تست‌های مزرعه‌ای قرار می‌گیرند. در این تحقیق هدف اینست که به بررسی مدل‌های ارائه شده در گروه مدل‌های تجربی و مزایا و معایب آن پرداخته شود.

واژه‌های کلیدی: تعامل چرخ و خاک، ترامکانیک، آفرود، مدل تایر

مقدمه

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 تجربی از لحاظ مزیت و معایب آنها پرداخته می‌شود، ضمناً کارهای مهم انجام گرفته در این زمینه مرور می‌گردد.

مدل‌های تجربی معمولاً برای ارزیابی ساده ای از وسایل نقلیه در جایگاه‌های در حال حرکت یا در حال ایستا استفاده می‌شود. این مدل‌ها بطور کلی بر اساس تست های آزمایشگاهی یا تست‌های مزرعه‌ای قرار می‌گیرند. پروسه تشکیل یک مدل تجربی می‌تواند در سه قدم اصلی انجام گیرد. قدم اول شامل شناسایی عوامل مؤثر در عملکرد وسیله است که می‌تواند با استفاده از اندازه گیری مشخص شود. یکی از فاکتورهای تجربی که محققان بطور گسترده از آن استفاده می‌کنند عدد چرخ می‌باشد. عدد چرخ به عنوان یک متغیر بی بعد، تابعی از قدرت خاک، بار تایر و خواص هندسی تایر شامل عرض، قطر، ارتفاع مقطع و خمش می‌باشد. همه‌ی این پارامترها، متغیرهای مختلفی برای این عدد بی بعد محسوب می‌شوند. به هر حال بسیاری از آنها با ضرب عدد چرخ (N) در یک ضریب ثابت (K) بدست می‌آیند (رابطه‌ی ۱).

رابطه (۱)
$$N = \frac{CI.b.d}{W}$$

در این رابطه، CI، شاخص مخروطی خاک، b، عرض تایر، d، قطر تایر و W، بار روی چرخ می‌باشد. جدول (۱) برخی از ضریب-های مرسوم تعیین شده که محققان برای محاسبه عدد چرخ استفاده کرده اند را نشان می‌دهد.

جدول ۱- عدد تحرک پذیری چرخ پیشنهاد شده توسط محققین مختلف

محقق	عدد تحرک پذیری چرخ
ویسمر و لوث	$K_W = 1$
فریتاژ	$K_F = \sqrt{\frac{\delta}{h}}$
تورناژ	$K_T = \sqrt{\frac{\delta}{h}}\frac{1}{1+b/2d}$
بریکسیوس	$K_B = \left(\frac{1+5\delta/h}{1+3b/d}\right)$
مک لورین	$K_M = \frac{\delta^{0.4}}{b^{0.2}\ d^{0.2}}$

رونلد و پیل	$K_T = \sqrt{\frac{\delta}{h}} \frac{d^{0.15}}{b^{0.15}}$
هگازی و ساندو	$K_{HS} = \sqrt{\frac{h-\delta}{d}}$

در قدم دوم آزمایشات مربوط به چرخ متحرک با استفاده از ورودی‌های مختلف مانند عدد چرخ صورت می‌گیرد. قدم سوم مربوط به تکنیک برازش منحنی می‌باشد بطوریکه با استفاده از روند داده‌گیری، توابعی مناسب در طیف گسترده ای از داده‌های ورودی حاصل می‌شود.

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 تجربی را در چهار گروه بررسی میکنیم:

۱- مدل WES VCI

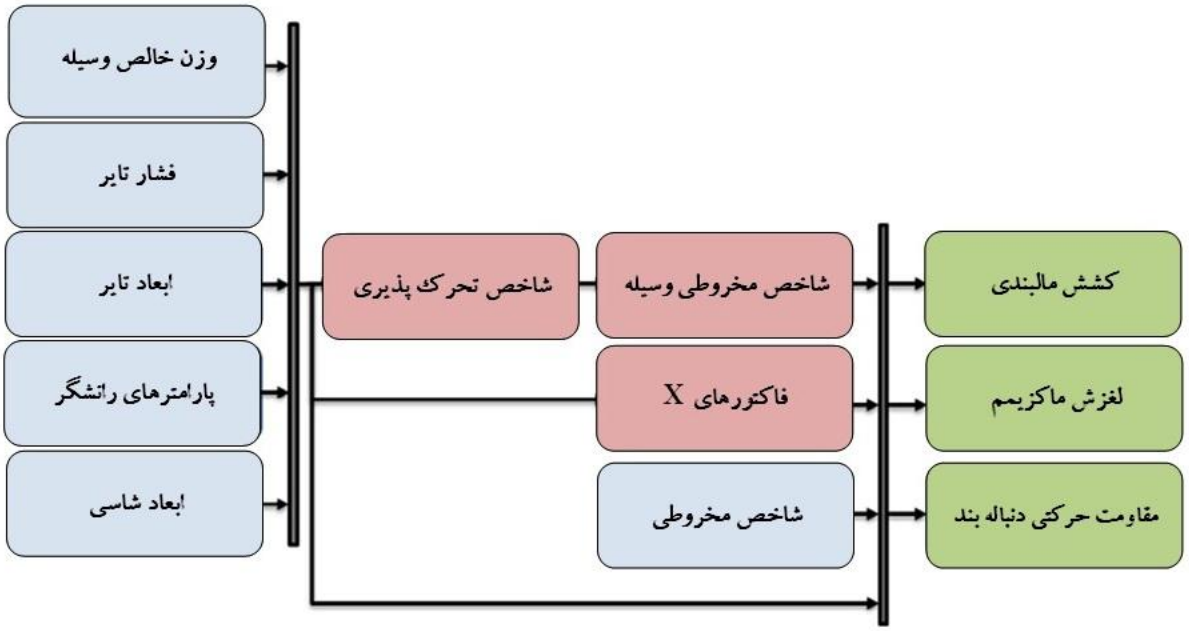
۲- مدل عددی حرکتی WES

۳- مدل Deer and Company

۴- مدل STIREMOD

مدل WES VCI

مدل VCI توسط مهندسین ایستگاه تحقیقاتی ارتش امریکا در سال ۱۹۷۱ مطرح شد. در این مدل یک سری وسیله برون جاده ای بر روی خاک درشت دانه و مطلوب غیر آلی تست گردید. پس از ان پارامترهای عملکردی وسیله مانند کشش مالبندی، مقاومت حرکتی و شاخص مخروطی وسیله برای خاک درشت دانه و خاک ریزدانه ارتباط داده شد. برای تشخیص نوع زمین، یک الک شماره ۲۰۰ استفاده شد. در این روش اگر بیش از ۵۰ درصد دانه‌های خاک (از لحاظ وزنی) از الک عبور می‌کرد، خاک ریزدانه و در غیر این صورت درشت دانه محسوب می‌گردید. برای تعیین قدرت خاک، از فاکتور شاخص مخروطی استفاده شد. شاخص مخروطی بصورت نیرو در واحد سطحی که برای نفوذ مخروط به خاک با سرعت حالت پایدار و با عمق نفوذ متفاوت محاسبه شد. شاخص مخروطی، پارامترهای چسبندگی خاک، زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اصطکاک خارجی را دریک پارامتر ادغام کرده است. فلوچارت این پروسه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- فلوچارت پروسه‌ی مدل WES VCI- کادر آبی (داده های تست)، کادر قرمز (پارامترهای واسط) و کادر سبز (پارامترهای عملکردی وسیله به عنوان خروجی مدل)

ایستگاه تحقیقاتی ارتش، پارامترهای اندازه گیری شده تایر، پارامترهای پیشرانه، شاسی و خاک را به عنوان داده های ورودی استفاده نمود. سپس بر اساس یک سری محاسبات تجربی پیشرفته، شاخص تحرک و یک سری فاکتورهای تصحیح (فاکتورهای x) محاسبه گردید. در صورتیکه شاخص تحرک از شاخص مخروطی تجاوز کند در اینصورت حرکت امکان پذیر است و در غیر این صورت وسیله از حرکت باز می‌ایستد. با بکار بردن تکنیک‌های رگرسیون خطی و منحنی الخط، معادلات عملکرد وسیله–خاک برای این مدل استنتاج می‌شود. شاخص تحرک پذیری بیانگر حداقل مقاومت مورد نیاز برای لایه خاک بحرانی است. در نتیجه پارامترهای عملکرد وسیله از جمله کشش مالبندی، لغزش ماکزیمم مورد بحث و مقاومت حرکتی بوکسل شده به عنوان خروجی-های مدل بیان می‌شود.

مدل عددی حرکتی WES

این مدل بر اساس آنالیز ابعادی داده‌های آزمایشگاهی برای تای که با حرکت یکنواخت بر روی خط راست بر روی خاک شنی خشک و رسی حرکت می‌کرد صورت گرفت. در این پارامترهای عملکردی مانند مقاومت حداقل خاک برای اینکه چرخ اولین دور را طی کند، کشش مالبندی، گشتاور ورودی در لغزش ۲۰ درصد و مقاومت حرکتی بوکسل شده با یک واحد عددی یکتا با استفاده از توابع تجربی مربوط گشت. عدد حرکت پذیری[1]، یک فاکتور بی بعد است که بصورت نسبت مقاومت خاک به بار واحد اسمی توصیف می‌شود. این مقدار عددی از طریق روابط تجربی و با استفاده از داده‌های ورودی مانند شاخص مخروطی، شکل هندسی

[1]The mobility numeric

تایر، بار و غیره محاسبه می‌شود. عدد تایر– رس (N_c) و تایر – شن (N_s) برای چرخهایی که در خاکهای چسبنده و خاکهای اصطکاکی کار می‌کنند به ترتیب طبق روابط (۲) و (۳) ارائه شده است:

رابطه (۲)
$$N_c = \frac{cbd}{W}\left(\frac{\delta}{h}\right)^{1/2} \cdot \frac{1}{1+(\frac{b}{2d})}$$

رابطه (۳)
$$N_s = \frac{G\,(bd)^{3/2}}{W}\left(\frac{\delta}{h}\right)$$

پارامترهای موجود در روابط (۲) و (۳) در جدول (۲) ارائه شده اند:

جدول ۲- پارامترهای مربوط به روابط (۲) و (۳)

C	b	d	W	δ	h	G
شاخص مخروطی	عرض مقطع تایر	قطر تایر	بار روی چرخ	خوابیدگی تایر	ارتفاع مقطع تایر (بار روی آن نیست)	گرادیان مقاومت در برابر نفوذ

این مقادیر عددی بیشتر توسط تورناژ[1] (۱۹۸۴) تجدید نظر شد که شامل پارامترهای اضافی خاک–چرخ از جمله محتوای رطوبتی خاک، چگالی نسبی خاک، نسبت تخلخل، میزان شن (تفاضل بین نسبت تخلخل خاک متراکم و خاک سست تقسیم بر نسبت تخلخل خاک متراکم) و قطر متوسط دانه‌های شن (قطر متوسط برای ٪۵۰ بخش ریز خاک بصورت وزنی) بود.

این توسعه، محدوده‌ی پیش بینی عملکرد مدل را به محدوده‌ی گسترده‌ای از انواع خاک افزایش داده است. همچنین در مطالعات بعدی نشان داده شد که ایده‌ی اولیه توصیف زمین عملیاتی تنها بر اساس شاخص مخروطی کافی نبوده و مجموعه‌ی اندازه گیری-ها از جمله آنالیز ابعادی، اندازه دانه و تست سازگاری[2] ضروری بود.

مدل مرکز فنی کمپانی و دیر[3]

این مدل، روشی مشابه به WES، نوسط ویسمر و لوث[4] در سال ۱۹۷۳ پیشنهاد گردید.. بر اساس قضیه Buckingham pi، هفت نسبت بی بعد جهت مدلسازی پیش بینی عملکرد چرخ–خاک ارائه گردید. مدل آنها بعداً توسط بریکسیوس[5] (۱۹۸۷) جهت پیش بینی حرکت وسایل نقلیه کشاورزی با تایر چند لای اریبی اصلاح شد. وی همچنین اثر لغزش چرخ را لحاظ نمود و سپس بر اساس برازش منحنی بیش از ۲۵۰۰ تست آزمایشگاهی که در ۱۲۱ ترکیب چرخ–خاک جمع آوری شده بود، روابط ریاضی مورد نیاز را بسط داد. این روابط، گشتاور چرخ، مقاومت حرکتی، کشش و راندمان، کشش خالص، مقاومت خاک، ابعاد تایر و خوابیدگی آن را به

[1] Turnage
[2] Compatibility test
[3] Deer and Company
[4] Wismer and Luth
[5] Brixius

همدیگر مرتبط نمود. علاوه بر این ویسمر و لوث، این مدل را از لحاظ اعتبار با مدل WES مقایسه نمودند و نتیجه گرفتند که یک توافق منطقی میان مدل‌ها برای مقاومت خاک و مقدار لغزش وجود دارد.

مدل STIREMOD

این مدل به عنوان بخشی از نرم افزار شبیه سازی دینامیک خودرو (VDANL[1]) توسط ارتش آمریکا توسعه یافت. این مدل، نخست برای سطوح هموار تعیین شد و سپس با استفاده از توابع شکل دهی تجربی پیشرفته توسط متز[2] (۱۹۹۳) به شرایط برون جاده ای بسط داده شد. مشخصه‌های کلی مدل تایر– جاده شامل نیروهای طولی و جانبی همراه با گشتاور روی اکسل می‌باشد. مشخصات کاراکتری این پارامترها شامل شیب ناحیه دگرچسبی، ضریب اصطکاک بیشینه قبل از ورود به ناحیه اشباع و کاهش نیروی حدی در مقدار لغزش حداکثر در این معادله در نظر گرفته شده است. رابطه‌ی STIREMOD یک تابع لغزش درجه دوم (σ) می‌باشد که یک شاخصی از لغزش طولی و جانبی می‌باشد. به منظور تخمین رابطه‌ی تجربی، ابتدا مجموعه‌ای از پارامترهای اولیه شامل لغزش مرکب (σ)، طول سطح تماس تایر (α)، ضریب سختی جانبی (K_S)، ضریب سختی طولی (K_C) و تابع نیروی اشباع ($f(\sigma)$) از داده‌های ازمایشگاهی محاسبه می‌شود. در این مدل، لغزش مرکب طبق رابطه‌ی (۴) محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{\pi a_p^2}{8\mu . F_z}\sqrt{K_S^2 . tan^2\alpha + K_C^2\left(\frac{S}{1-S}\right)^2}$$ رابطه‌ی (۴)

در رابطه‌ی (۴) S، لغزش طولی و α زاویه لغزش می‌باشد.

تابع نیروی اشباع بصورت نسبتی از منحنی برازش بصورت بار نرمال مرکب طبق رابطه (۵) تعریف می‌گردد.

$$f(\sigma) = \frac{F_c}{\mu \cdot F_z} = \frac{C_1\sigma^3 + C_2\sigma^2 + C_5\sigma}{C_1\sigma^3 + C_3\sigma^2 + C_4\sigma + 1}$$ رابطه‌ی (۵)

متز یک مدل نمایی برای نیروهای جانبی در طول لغزش خالص را معرفی نمود. مدل STIREMOD پارامترهای تابع شکل نیروی اشباع را برای تطبیق داده‌های مزرعه ای با شکل نمایی مدل متز استفاده نمود. شکل نهایی تابع نیروی جانبی در رابطه‌ی (۶) ارائه شده است:

$$\frac{F_y}{F_z} = A\frac{\frac{\left(\frac{B}{DsD\alpha}\right)^3}{6}\sigma^3 + \frac{\left(\frac{B}{DsD\alpha}\right)^2}{2}\sigma^2 + \left(\frac{B}{DsD\alpha}\right)\sigma}{\frac{\left(\frac{B}{DsD\alpha}\right)^3}{6}\sigma^3 + \frac{\left(\frac{B}{DsD\alpha}\right)^2}{2}\sigma^2 + \left(\frac{B}{DsD\alpha}\right)\sigma + 1}$$ رابطه‌ی (۶)

[1]Vehicle Dynamic Analysis, Non-linear
[2]Metz

اساساً این مدل ضریب مؤثر اصطکاک را برای شبیه سازی نیروهای مقاومتی افزایشی در حال حرکت در شرایط برون جاده ای معرفی می‌کند. ضرایب A، B، C و D برای زمین آسفالت و زمین شخم خورده متفاوتمی‌باشد.

نتیجه گیری

جدول (۳) خلاصه ای از ویژگی‌های مدل‌های تجربی ارائه شده را نشان می‌دهد که در آن نوع زمین عملیاتی و تایر آزمونگر و هدف مدل بحث شده است.

جدول ۳- خلاصه ای از ویژگی های مدل تجربی

مدل	سال ارائه	نوع تایر	نوع زمین	شرایط	هدف مدل	تلاش محاسباتی
WES VCI	۱۹۷۱	کششی	خاک درشت دانه و ریز غیر آلی	یکنواخت	ارتباط پارامترهای عملکرد به شاخص مخروطی (CI)	کم
WES Mobility Numeric	۱۹۷۱	کششی	خاک رسی و شنی خشک	یکنواخت	ارتباط پارامترهای عملکردی به عدد حرکت پذیری	کم
Wismer	۱۹۷۳	بایاس کشاورزی	۱۲۱ ترکیب خاک مختلف	یکنواخت	ارتباط پارامترهای عملکردی به هفت فاکتور بی بعد	کم
Turnage	۱۹۸۴	کششی	رسی و شنی	یکنواخت	ارتباط پارامترهای عملکردی به سه فاکتور بی بعد	کم
STIREMOD	۱۹۹۷	کششی و سواری	زمین شخم خورده، آسفالت، شنی	یکنواخت	استفاده از توابع شکل دهی تجربی برای زمین آسفالت روش برازش منحنی نیرو–لغزش	کم
Hegazy and Sandu	۲۰۱۳	کششی (7.5- R16)	شنی سست	یکنواخت	استفاده از عدد حرکت پذیری جدید در معادله بریکسیوس برای ارزیابی فاکتور عملکرد حرکت پذیری	کم

مدل‌های تجربی ارائه شده برای رابطه‌ی تایر و خاک به عنوان ابزار ساده برای ارزیابی عملکرد وسایل نقلیه چرخ‌دار در شرایطی مشابه با محیط آزمایشگاه و با خواص و ویژگی‌های تایر مشابه با تایر مورد آزمون قرار گرفته مفید می‌باشند. از آنجائیکه این مدل‌ها برای استنتاج نتایج نیاز به محیط آزمایشگاهی دارند، نمیتوانند در شرایط برون جاده ای مورد استفاده قرار گیرند که این امر سبب محدودیت استفاده از این مدل ها میگردد. بنابراین طراحی یک تایر یا آزمون عملکرد آن در شرایطی عملیاتی، نمی‌تواند با استفاده از این مدل‌های ترامکانیک بکار رود. از طرفی دیگر مدل‌های تجربی پیشرفته برای طراحی تایرهای ماشینهای سواری و تریلی (کششی) و نمیتواند شاخص کاملی برای تایرهایی با ابعاد کوچک مانند تایرهای بکار رفته در کاربرد های رباتیک باشد. مهمتر از همه، پاسخ دینامیکی چرخ- زمین نمی‌تواند برای پاسخ الاستیک-پلاستیک خاک در شرایط عملیاتی بکار رود.

منابع

Brixius WW. Traction prediction equations for bias ply tires. USA: American Society of Agricultural Engineers (ASAE); 1987. p. 162.

Freitag DR. A dimensional analysis of the performance ofpneumatic tires on soft soils, DTIC Document; 1965.

Freitag DR. Performance evaluation of wheels for lunar rovingvehicles. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Waterways ExperimentStation; 1970.

Hegazy S, Sandu C. Experimental investigation of vehicle mobility using a novel wheel mobility number. J Terramech 2013;50(5–6): 303–10.

Maclaurin EB. The effect of tread pattern on the field performanceof tyres, In: Proceedings of the 7th international ISTVS conference;1981.

Maclaurin EB. The use of mobility numbers to describe the in-fieldtractive performance of pneumatic tyres, In: Proceedings of the 10thinternational ISTVS conference. Kobe, Japan; 1990.

Maclaurin EB. The use of mobility numbers to predict the tractiveperformance of wheeled and tracked vehicles in soft cohesive soils,In: Proceedings of the 7th European ISTVS conference. Ferrara,Italy; 1997.

Rowland D, Peel JW. Soft ground performance prediction andassessment for wheeled and tracked vehicles.InstMechEng1975;205:81.

Rowland D. Tracked vehicle ground pressure and its effect on softground performance, In: Proceeding of 4th international ISTVSconference; 1972.

Rula AA, Nuttall CJ, U.S.A.E.W.E. Station. In: An Analysis ofGround Mobility Models (ANAMOB). U.S. Army EngineerWaterways Experiment Station; 1971.

Rula AA, Nuttall CJ. An Analysis of Ground Mobility Models(ANAMOB).U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station;1971.

Turnage GW. Tire selection and performance prediction for off-road wheeled vehicle operations, In: Proceedings of the 4th international ISTVS conference. Stockholm, Sweden; 1972.

Turnage GW. Performance of soils under tire loads-application of test results to tire selection for off-road vehicles. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station; 1972.

Wismer RD, Luth HJ.Off-road traction prediction for wheeled vehicles. J Terramech 1973;10(2):49–61.