مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISSN: 1605-9719
سال ۲۶، شماره ۱۱۶، صفحات ۵–۱۲

اهمیت ترامکانیک در طراحی خودروهای خارج جاده‌ای

سید وحید نوربخش[۱]، مسعود مسیح طهرانی[۲ و *]

[۱] کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
[۲] استادیار دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
*مسئول مکاتبات: masih@iust.ac.ir

◄ چکیده

تلاش این مقاله بر تدوین اجمالی معرفی دانش ترامکانیک و اهمیت آن در طراحی خودروهای خارج جاده‌ای است. این مقوله در سرفصل‌های درسی دانشکده‌های مهندسی مکانیک کشور مغفول مانده و منابع فارسی اندکی در این حوزه منتشر شده است. از سویی، صنایع متعددی در کشور (مانند کشاورزی، راه‌سازی، نظامی، محیط زیست و امداد و نجات) نیازمند اطلاعات در این حوزه‌اند. مهندسان خودروهای خارج جاده‌ای در طراحی این دسته از خودروها با چالش‌هایی روبرو هستند که در طراحی خودروهای معمولی دیده نمی‌شود. چالش‌هایی از قبیل نیروی پیشران و ترمزی کافی، فرمان‌پذیری و قابلیت یدک‌کشی. خاک به‌عنوان یک محیط عملیات خارج جاده‌ای با تغییرات دما و رطوبت خواص متفاوتی دارد. داشتن دانش کافی از ویژگی‌های مکانیکی خاک و واکنش آن نسبت به بار خودرو برای تعیین عملکرد یک خودرو خارج جاده‌ای ضروری است. مطالعه عملکرد یک خودرو خارج جاده‌ای در ارتباط با محیط عملیاتی آن (مسیر حرکت)، در علمی با عنوان ترامکانیک بررسی می‌شود. از اینرو مهندسان برای محاسبه عملکرد خودرو خارج جاده‌ای از قبیل پیش‌بینی امکان تردد، قابلیت یدک‌کشی و فرمان‌گیری مناسب از ترامکانیک بهره می‌گیرند. امروزه محدوده وسیعی از تحقیقات و توسعه صنعت خودروسازی، در زمینه‌هایی چون کشاورزی، صنایع ساختمان‌سازی و معدن، اکتشافات سیاره‌های جدید (مریخ‌پیما)، عملیات نظامی، خودروهای نوین خودران و بدون سرنشین معطوف شده است. این نوع خودروها ممکن است با مسیرهای متفاوت، از ماسه بیابانی گرفته تا گل نرم یا برف تازه، روبرو شوند. مهندسان با به‌کارگیری مدل‌های مختلف ترامکانیکی در راستای بهبود و توسعه خودروهای خارج جاده‌ای قدم برمی‌دارند.

◄ واژگان کلیدی

ترامکانیک
خودروهای خارج جاده‌ای
آفرود
عملکرد خودروهای خارج جاده‌ای
قابلیت تردد
یدک‌کشی
فرمان‌گیری
مکانیک خاک
خودروهای خودران
خودروهای بدون سرنشین
مریخ‌پیما

◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۳/۲۱
تاریخ پذیرش ۱۳۹۶/۰۸/۱۴

۱ مقدمه

حمل‌ونقل در مناطق صعب‌العبور از جمله دغدغه‌های اصلی انسان بوده است. پس از اختراع خودرو و موتورسیکلت، مهندسان به‌منظور افزایش کارآیی این‌گونه وسائل نقلیه به اعمال تغییرات روی آنها پرداختند تا توان وسائل نقلیه موتوری را برای عبور از مسیرهای دشوار افزایش دهند. امروزه در عین‌حال که بخش اعظمی از خودروسازان روی خودروهای جاده‌ای[۱] متمرکزند، محدوده وسیعی از تحقیقات و توسعه صنعت خودرو در ارتباط با خودروهای بیابانی و خارج جاده‌ای[۲] است [۱]. کاربرد خودروهای خارج جاده‌ای در حوزه‌کشاورزی، صنایع ساختمان‌سازی و معدن، راه‌سازی، حمل‌ونقل، عملیات امداد و نجات، اکتشافات سیاره‌های جدید (مریخ‌پیما)[۳]، عملیات نظامی[۴] و خودروهای نوین خودران[۵] است [۱]. این نوع خودروها توانایی حرکت روی سطوح ناهموار و متفاوت را دارند. خودروهای خارج جاده‌ای (بیابانی یا بی‌راهه) معمولاً وزن و اندازه بزرگی نسبت به خودروهای معمولی دارند و نیروی اعمالی به سطح مسیر سبب ایجاد فرورفتگی[۶] و افزایش مقاومت به حرکت[۷] می‌گردد. از چالش‌های بزرگ طراحی خودروهای خارج جاده‌ای این است که خودرو باید قادر باشد فشار متناسب با نوع خاک را به سطح جاده وارد کند. همچنین باید بتواند چرخ یا شنی[۸] خود را به‌منظور تولید نیروی مناسب پیشران روی زمین نگه‌دارند. وسائل نقلیه چرخ‌دار این کار را با داشتن تعادل مناسب از تایرهای بزرگ با آج‌های عمیق، باز و اضافی همراه با سیستم تعلیق انعطاف‌پذیر انجام می‌دهند. وسائل نقلیه شنی‌دار این کار را با استفاده از سطح تماس بیشتر شنی نسبت به تایر و تعلیق قابل انعطاف انجام می‌دهند. در خودروهای خارج جاده‌ای چرخ‌دار، فشار باد تایر[۹] از عوامل تأثیرگذار در تولید نیروی پیشران و ترمزی در برهم‌کنش[۱۰] چرخ است. افزایش فشار باد تایر سبب افزایش مقاومت به حرکت و تراکم بیشتر خاک می‌شود همچنین کاهش فشار باد تایر سبب بهبود نسبی تولید نیروی پیشران در خاک‌های نرم می‌گردد [۲، ۳]. لغزش[۱۱] عامل تأثیرگذار دیگر در تولید نیروی پیشران و ترمزی است. در لغزش بین ۱۵ تا ۲۵ درصد برای خودروهای خارج جاده‌ای پایین‌ترین مقدار تراکم خاک در لغزش ۲۵ درصد اتفاق می‌افتد. به این معنا که خاک شروع به گسیخته‌شدن کرده و تایر بیشتر در خاک فرو می‌رود [۴]. اگر سطح تماس تایرهای یک خودروی چرخ‌دار و سطح تماس شنی‌های یک خودرو شنی‌دار را کاملاً مسطح، مستطیل شکل و توزیع فشار عمودی را یکنواخت در نظر بگیریم. نیروی پیشران یک خودروی چرخ‌دار در مقایسه با یک خودروی شنی‌دار برای وزن، ابعاد و لغزش یکسان همواره کمتر است. این مسئله به این دلیل است که به ازای لغزش یکسان، باوجود سطح تماس کوتاه‌تر، تغییر شکل برشی ایجادشده در قسمت عقب سطح تماس

[1]onroad [2]off road [3]planetary rovers [4]military vehicles [5]autonomeus [6]sinkage [7]rolling resistance [8]tracked vehicle [9]inflation pressure [10]traction [11]slip

تایر بسیار کوچکتر از تغییر شکل برشی ایجادشده توسط یک شنی است [۵]. در خودروهای خارج جاده‌ای ارتفاع[1] کف خودرو متناسب با سطح جاده ممکن است بالاتر یا پایین‌تر نسبت به خودروهای معمولی قرار بگیرد. ارتفاع مناسب سبب می‌شود این خودروها توانایی حرکت روی سطوح غیرمتعارف (مانند خاک، برف، گل‌ولای و شنزارها) در شرایط مختلف را داشته باشند [۶]. خودروهای خارج جاده‌ای به دودسته خودروهای شهری و غیرشهری تقسیم‌بندی می‌شوند. خودروهای شهری به خودروهایی گفته می‌شود که توانایی و اجازه تردد در محیط شهری را دارا هستند و مناسب افرادی است که با خودروی خود به محیط غیرشهری و خارج جاده‌ای هم رفت‌وآمد دارند. دسته دیگر خودروهای خارج جاده‌ای، خودروهایی هستند که اغلب از آنها به‌صورت تخصصی و برای مصارف خاص از جمله کاربردهای نظامی، اکتشافی، کشاورزی و صنعتی استفاده می‌شود.

در ادامه این مقاله، تاریخچه ساخت وسائل چندمنظوره و خارج جاده‌ای گفته می‌شود و به بررسی تاریخچه آن در ایران می‌پردازیم. سپس در قسمت سوم ترامکانیک را به‌طور کامل معرفی کرده و در قسمت چهارم مسائل اساسی در ترامکانیک را گفته خواهد شد. در قسمت پنجم خاک به‌عنوان اصلی‌ترین مسیر خارج جاده‌ای بررسی می‌شود؛ سپس عملکرد خودروهای خارج جاده‌ای به‌تفصیل تشریح می‌شود و پس از آن استفاده ترامکانیک در فناوری‌های نو بررسی می‌گردد.

۲ تاریخچه خودروهای خارج جاده‌ای

کگرس[2] از نخستین خودروهای خارج جاده‌ای بود (شکل ۱). جایگزینی چرخ ـ تسمه انعطاف‌پذیر (شنی) با محور عقب خودرو و همچنین قراردادن چرخ‌های جلوروی چوب‌هایی شبیه چوب اسکی، از یک خودروی معمولی یک خودرو باقابلیت حرکت روی زمین‌های خارج جاده ساخته بود [۷]. در طول جنگ جهانی دوم، ارتش امریکا نیاز به خودرویی داشت که با حرکت روی مسیرهای ناهموار، قابلیت رساندن آذوقه و مهمات به نیروها و انتقال مجروحان در سریع‌ترین زمان ممکن را داشته باشد. نیاز به خودرویی چندمنظوره که همین نام (چندمنظوره) روی خودرو ماند. جیپ؛ جیپ ویلیز اولین خودروی دو دیفرانسیل و چهارچرخ محرک بود که نه‌تنها نیاز ارتش امریکا را در مسائل نظامی به‌طور کامل برطرف می‌کرد، که از آن جهت شخم‌زدن زمین‌های کشاورزی، وسیله‌ای برای برف‌روبی و پاک‌کردن معابر، خودروی سم‌پاشی و همچنین وسیله‌ای برای جابه‌جاکردن واگن‌های قطار روی ریل راه‌آهن نیز استفاده شد. در حقیقت جیپ تعریف جدیدی از خودروها و وسائل نقلیه خارج جاده‌ای بود [۸]. پس از جنگ جهانی دوم، تعداد بسیاری خودروی خارج جاده‌ای با قابلیت‌های مختلف در دسترس بود. در سال ۱۳۳۵ بازرگانی به نام جعفر اخوان نمایندگی شرکت جیپ امریکا را به‌دست آورد و در گام اول، اقدام به واردات جیپ ویلیز کرد که یادگاری از دوران جنگ جهانی دوم بود. وی با تأسیس کارخانه‌ای (پارس‌خودرو) اقدام به مونتاژ و تولید جیپ ویلیز، با تغییر نام به جیپ شهباز و به‌دنبال آن وانت سیمرغ نمود. با توجه به وضع راه‌های کشور، یک خودروی دو دیفرانسیل شاسی‌بلند، بهترین خودروی ممکن برای رفت‌وآمد در ایران بود. می‌توان گفت پارس‌خودرو محصولات دو دیفرانسیل و خارج جاده‌ای متنوعی از قبیل لندرور، نیسان پاترول، نیسان پی‌کاپ و انواع جیپ را طی سالیان متمادی روانه بازار کرد [۹، ۱۰]. از خودروسازان دیگر در این زمینه می‌توان به گروه بهمن و شرکت مرتب خودرو اشاره کرد.

شکل ۱: خودروی کگرس [۷]

در حوزه ماشین‌آلات صنعتی و راه‌سازی شرکت صنعتی هپکو تنها کارخانه تولید ماشین‌آلات راه‌سازی در ایران و خاورمیانه است. همچنین در حوزه ماشین‌آلات کشاورزی می‌توان به شرکت تراکتورسازی ایران اشاره کرد. از دیگر مصارف خودروهای خارج جاده‌ای استفاده تفریحی و لذت‌بردن از آن است. آفرودینگ[3] یک رشته ورزشی محسوب و مسابقات آن در پیست‌ها و شرایط گوناگون برگزار می‌شود. در ایران، این رشته علاقه‌مندان خاص خود را دارد.

افرادی که با خودروهای دو دیفرانسیل خود به دل طبیعت زده و از رانندگی در میان مسیرهای صعب‌العبور کوهستانی و جنگلی لذت می‌برند. همچنین برگزاری مسابقات آفرود در نقاط مختلف کشور حکایت از هواداران بیشمار این رشته در ایران دارد. از مزایای جغرافیای ایران این است که تقریباً تمام جاده‌های ممکن (مانند برفی، جنگلی، کوهستان، مرداب، ساحل و کویری) در آن وجود دارد.

۳ ترامکانیک

در اواسط قرن بیستم به‌دلیل کاهش تلفات در جنگ‌های جهانی و به حداقل رساندن صدمات به وسائل و تجهیزات، پژوهشگران شروع به توسعه ترامکانیک[4] کردند. مطالعه خصوصیات خاک در خلال عبور چرخ یا شنی در علمی با عنوان ترامکانیک بررسی می‌گردد که نخستین‌بار توسط مرکز تحقیق و توسعه خودروهای نظامی و تانک ارتش ایالات متحده تعریف شده است [۱۱]. طی سالیان متمادی، انواع متنوعی از مدل‌ها برای توسعه فرموله‌کردن و شبیه‌سازی برهم‌کنش چرخ و خاک ارائه شده است. درجه پیچیدگی این مدل‌ها براساس کاربرد، دقت و ارزش محاسباتی آن مبتنی گشته است. در کل می‌توان این مدل‌ها را به سه دسته اصلی تقسیم‌بندی نمود که عبارت‌اند

[1]clearance [2]Kégresse track [3]off roading [4]Terramechanics

از: مدل‌های تجربی، مدل‌های مبتنی بر فیزیک و نهایتاً مدل‌های نیمه‌تجربی [۱۲].

۱.۳ مدل‌های تجربی

در ابتدا خودروهای خارج جاده‌ای با آزمون و خطا و تجربه طراحان توسعه می‌یافتند. مدل‌های تجربی معمولاً برای ارزیابی قابلیت تحرک خودرو براساس معیار برو ـ نرو[1] بوده‌اند. این مدل‌ها صرفاً مبتنی بر آزمایشگاه یا آزمودن‌های میدانی بودند. فرایند ساخت یک مدل تجربی با سه گام اصلی انجام می‌گیرد. گام نخست شناسایی عوامل مؤثر بر عملکرد خودرو است که می‌تواند با استفاده از اندازه‌گیری مشخص می‌شود. یکی از این عوامل تجربی تعداد تحرک خودرو[2] است که محققان به‌طور گسترده‌ای از آن استفاده می‌کنند. تعداد تحرک خودرو به‌عنوان یک متغیر بی‌بعد تابع مقاومت خاک، بار تایر و خصوصیات هندسه تایر شامل پهنا، قطر، ارتفاع مقطع و تغییر شکل تایر است [۱۱]. گام دوم مشخصه مدل‌های تجربی، استفاده از انواع ورودی از قبیل شماره چرخ‌های محرک است؛ و در آخر استفاده از فن‌های برازش منحنی و به‌دست آوردن روند داده‌ها با اختصاص‌دادن توابع مناسب است [۱۱].

۲.۳ مدل‌های مبتنی بر فیزیک

به‌جای استفاده از تجزیه و تحلیل تجربی برای توصیف برهم‌کنش تایر ـ خاک از مدل‌های مبتنی بر فیزیک استفاده می‌شود. مدل‌های مبتنی بر فیزیک شامل اصول فیزیکی و روش‌های تحلیلی برای نشان‌دادن ساختارهای تایر و زمین در کنار تعاملات آنهاست. در این مدل‌ها از ریاضیات، تحلیل‌های عددی، محاسبات فیزیکی و حتی از گرافیک کامپیوتری برای ارزیابی عملکرد وسائل نقلیه چرخ‌دار استفاده می‌شود [۱۱]. درجه پیچیدگی مدل‌ها با در نظر گرفتن مدل‌های ساده نظیر تایر به‌عنوان یک جسم صلب و زمین به‌عنوان فنر و میراگر و مدل‌هایی با جزییات زیاد نظیر المان محدود برای تحلیل تایر و زمین مورد تغییر است (شکل ۲).

۳.۳ مدل‌های نیمه‌تجربی

طیف گسترده‌ای از مدل‌های برهم‌کنش تایر ـ زمین در این دسته‌بندی قرار می‌گیرند. از این مدل‌ها برای اندازه‌گیری‌های تجربی، فرمولاسیون تجربی و روش‌های تحلیلی در مدل‌سازی تعامل تایر ـ خاک استفاده می‌کنند. استفاده از چنین روش ترکیبی، زمان و تلاش محاسباتی را کاهش می‌دهد و امکان انجام مطالعات روی موردهای خاص را پدید می‌آورد. این باعث می‌شود که مدل‌های تایر نیمه‌تجربی نامزد خوبی برای شبیه‌سازی کامل و کنترل وسائل نقلیه باشند [۱۱]. اکثر مدل‌ها در این زمینه از فرمول تجربی دوبعدی توسعه‌یافته توسط بکر[3] و ونگ[4] استفاده می‌کنند. در این فرمول‌ها، تنش‌های عمودی و برشی، در ناحیه سطح تماس تایر، به‌عنوان تابعی از متغیرهای سینتیکی و سینماتیکی تایر بیان شده است. در نتیجه مؤلفه‌های تنش نظیر روی سطح تماس تایر برای محاسبه نیروهای اسپیندل، فرو روی تایر، تغییر شکل خاک و تایر یکپارچه شده‌اند (شکل‌های ۳ و ۴) [۱۱].

ترامکانیک به طراحان اجازه می‌دهد فراتر از روش‌های تجربی به بینش ارتباط بین مسیر ـ خودرو دست یابند. در اوائل بسیاری از تحقیقات روی خودروهای نظامی متمرکز بود. رفته‌رفته با پایان جنگ جهانی دوم و ظهور وسائل نقلیه کوچک بدون سرنشین[5]، با کاهش در سایز و وزن خودرو، تحقیقات را به‌سمت خودروهای کوچک و همه‌جارو[6] کشاند.

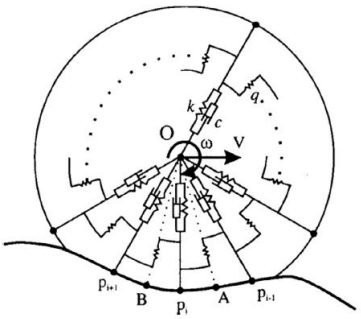
ویژگی‌های زمین در بیشتر اوقات محدودیت‌هایی را بر قابلیت حرکت خودروهای خارج جاده‌ای اعمال می‌کند، بنابراین به جهت توسعه و طراحی خودرو برای یک محیط و عملکرد معین، داشتن دانش کافی از ویژگی‌های مکانیکی زمین و واکنش آن نسبت به بار خودرو ضروری است. این رویکرد شبیه دانش ائرودینامیک در طراحی هواپیما و هیدرولیک در وسائل نقلیه آبی است. از اینرو، مشخصه اصلی خودروهای خارج جاده‌ای توانایی تولید نیروی پیشران یا ترمزی موردنیاز چرخ (شنی) با سطح زمین است [۱]. هدف ترامکانیک ارائه اصول راهنما برای توسعه، طراحی و ارزیابی یک خودرو خارج جاده‌ای و ماشین‌آلات مرتبط با زمین است. افزایش فعالیت‌های اکتشافی در زمین و سایر سیارات توسط امریکا، روسیه، چین، هند، ژاپن و اتحادیه اروپا، بهره‌برداری از منابع طبیعی در مناطق دورافتاده حتی در بستر دریا، تقاضای رو به رشد برای استفاده از سطح زمین در تمام فصول و تمام شرایط آب‌وهوایی همچنین نگرانی فزاینده بر سر مسئله انرژی و حفاظت از محیط زیست سبب توسعه ترامکانیک شده است [۱]. دانش ترامکانیک مستقیم یا غیرمستقیم به توسعه ارزیابی و انتخاب موارد زیر می‌پردازد:

۱. تصور کلی و موقعیت خودرو از منظر فرم، اندازه، وزن و قدرت
۲. نوع چرخ‌دنده درگیر در جعبه‌دنده خودرو
۳. سیستم فرمان، تعلیق و انتقال قدرت خودرو
۴. عملکرد، فرمان پذیری و سواری مطلوب خودرو

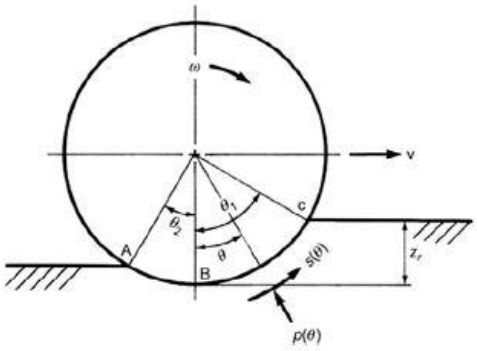
مثال‌های زیادی از موفقیت کاربرد دانش ترامکانیک و روش تجزیه و تحلیل سیستم برای توسعه و ارزیابی از عملکرد خودروهای خارج جاده‌ای می‌توان یافت. یکی از قابل توجه‌ترین مثال‌ها توسعه ماه‌پیمای آپولو توسط بکر بود. وی با استفاده از اصول ترامکانیک عملکرد ماه‌پیما را مورد بررسی قرار داد. بررسی و ارزیابی‌های او منجر به ساخت تایرهای منحصر به‌فردی شد که از سیم‌های فولادی در بافت تایر و تسمه‌هایی از جنس تیتانیوم ساخته‌شده بودند. این دسته از تایرها قابلیت ارتجاعی مطلوب، تولید کشش، استحکام و دوام بالا، با پایین‌ترین وزن ممکن و سازگار با خلأ و دمای بسیار بالای سطح ماه را داشتند [۱].

---

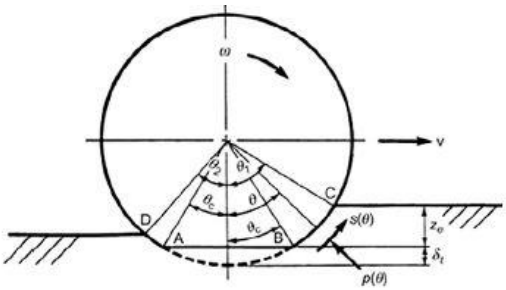
[1] go or no-go
[2] vehicle mobility number
[3] بکر (M. G. Bekker) یک متخصص برجسته و مبتکر ترامکانیک است. او سهم بسزایی در طراحی و ساخت ماه پیماهای آپولو (آپولو ۱۵، آپولو ۱۶، آپولو ۱۷) دارد. او در کتاب‌های خویش به‌ضرورت ترامکانیک پرداخته است. همچنین وی در جنبه تعامل چرخ با خاک بررسی‌های اساسی انجام داده است.
[4] J. Y.Wong
[5] unmanned vehicles
[6] all-terrain vehicles



شکل ۲: مدل ساختار تایر با استفاده از فنر و میراگر شعاعی و بین‌شعاعی [۱۱]



شکل ۳: مدل برهم‌کنش تایر ـ خاک، تایر صلب [۱۱]



شکل ۴: مدل برهم‌کنش تایر ـ خاک، تایر الاستیک [۱۱]

۴ مسائل اساسی در ترامکانیک

مدلسازی رفتار زمین، اندازه‌گیری و ویژگی زمین مدلسازی شده، شناسایی پارامترهای مربوط به خودرو و عملکرد آن و آشکارسازی نحوه تعامل خودرو با زمین از مسائل اساسی در ترامکانیک هستند. هدف از بررسی این مسائل جمع‌آوری اطلاعات و تشکیل پایگاه اطلاعاتی است که براساس آن می‌توان در طراحی خودروهای خارج جاده‌ای پیشرفت حاصل کرد. مدلسازی خاک به‌عنوان ماده الاستوپلاستیک امکان پیش‌بینی و ارزیابی نیروی پیشران مابین تایر خودرو و سطح جاده را می‌دهد. مدول الاستیسیته خاک نمایانگر میزان پتانسیل تغییر شکل خاک است؛ اما با این روش میزان فشردگی خاک را نمی‌توان محاسبه کرد. از دیگر قابلیت‌های مدلسازی رفتار زمین پی‌بردن به وضعیت بحرانی مکانیکی خاک، با فرض همگن و ایزوتروپیک بودن در طیف گسترده‌ای از شرایط خاک، از وضعیت نرم به متراکم و سخت است.

۱.۴ اندازه‌گیری و ویژگی زمین مدلسازی شده

در حال حاضر از روش نفوذسنج مخروطی، مقادیر بِکِر و روش‌های سنتی مکانیک خاک مهندسی عمران برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی زمین (خاک) در تقابل با خودرو مورداستفاده قرار می‌گیرد.

۲.۴ مدلسازی برهم‌کنش خودرو ـ زمین

دو هدف در مطالعه مدلسازی تقابل خودرو ـ زمین وجود دارد. اول ایجاد ارتباط بین عملکرد یک خودرو بیابانی با پارامترهای طراحی آن و ویژگی‌های زمین. دوم پیش‌بینی عملکرد خودرو در تقابل با زمین وقتی خودرو یک‌بار از روی زمین عبور کرده است. عملکرد یک خودروی خارج جاده‌ای به لحاظ مقاومت به حرکت، تقلا برای رانش، قابلیت یدک‌کشی و مسائل دیگر، از تعیین تنش عمودی و برشی سطح تماس خودرو با زمین مشخص می‌گردد. کمک بزرگ ترامکانیک، ایجاد روابط و فرمول‌بندی مدل‌های ریاضی حاصل از آزمایش‌های عملی و تجربی برای پیش‌بینی تقابل خودرو با زمین مورد انتظار است [۱].

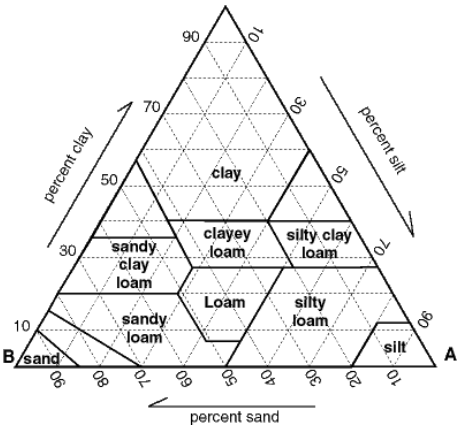
۵ خاک

خاک عبارت است از قشر چند سانتی‌متری تا چند متری از مواد آلی و غیرآلی که روی سنگ قرار گرفته و شامل هوا، آب، موجودات زنده، مواد آلی و ذرات کانیایی (عناصر معدنی) است و گیاه می‌تواند روی آن ادامه حیات دهد. این قشر نازک در واقع بین جو (اتمسفر) و قسمت سخت زمین که هنوز تحت تأثیر عوامل جوی واقع نشده و تخریب نشده قرار گرفته است [۱۳]. خاک‌ها (به‌عنوان یکی از زمین‌های متداول خارج جاده) از سه قسمت اصلی رس[1]، ماسه[2] و سیلت[3] تشکیل شده‌اند. هر نوع خاک این سه جزء اصلی را با درصدهای مختلف داراست. درشت و سبک به خاک شنی، ریز و سنگین به خاک رسی اطلاق می‌شود. خاک لوم[4] مابین این دو نوع است و دارای مخلوط مناسبی از شن، سیلت و رس است [۱۳]. اندازه نسبی ذرات خاک را بافت خاک می‌گویند که حاکی از ریزی و درشتی خاک است. رس به ذراتی گفته می‌شود که کمتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر قطر داشته باشد. ماسه به ذراتی گفته می‌شود که بین ۰/۰۵ تا ۲ میلی‌متر قطر داشته باشد و شن به ذراتی گفته می‌شود که بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر قطر داشته باشد. با اندازه‌گیری و تجزیه مکانیکی خاک و استفاده از مثلث بافت خاک می‌توان به نوع بافت خاک پی برد (شکل ۶).

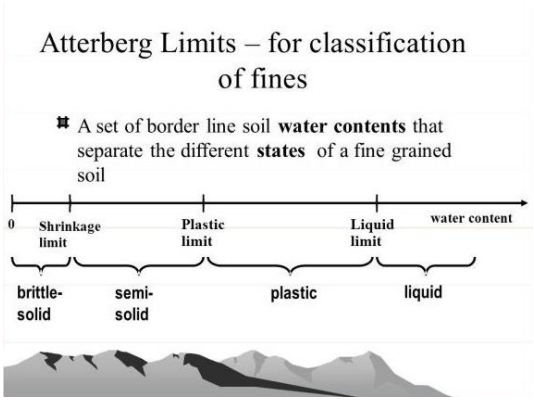
شکل ۵: تایر مورد استفاده در ماه‌پیما آپولو [۱]

[1]clay [2]sand [3]silt [4]Loam

بافت در خاک تا حدودی نمایشگر محیط‌های تشکیل آن، رژیم آبی خاک، ظرفیت نگهداری آب در خاک، نفوذپذیری، تخلخل و میزان واکنش خاک نسبت به دماست [۱۴]. مثلث بافت خاک، مثلثی است متساوی‌الاضلاع که هر ضلع آن مربوط به سه عنصر اصلی خاک؛ یعنی ماسه، سیلت و رس است و ۱۲ دسته‌بندی مختلف از بافت خاک را مشخص می‌کند. هرکدام از این دسته‌بندی‌ها نوع بافت خاک، اندازه نسبی ذرات، ریزی و درشتی خاک را تعیین می‌کند که منجر به مشخص شدن خواص فیزیکی خاک می‌شود [۱۴]. به‌عنوان مثال اگر خاک بیش از ۸۵ درصد از شن و کمتر از ۱۵ درصد از رس تشکیل شده باشد، خاک منظور سریع‌تر از خاک‌های دیگر رطوبت خود را از دست داده و با افزایش دمای محیط سریعتر گرم می‌شود. خاک‌هایی که درصد رس بالاتری دارند نسبت به سایر خاک‌ها دیرتر رطوبت خود را از دست می‌دهند و در مقابل افزایش دمای محیط دیرتر واکنش نشان داده و دیرتر گرم می‌شوند. خاک‌های لؤم وضعیت متوسطی دارند [۱۳]. رطوبت در خاک نقش به‌سزایی در تغییر خواص فیزیکی خاک دارد و می‌تواند باعث تغییر میزان چسبندگی خاک شود. چسبندگی خاک یکی از عوامل پایداری خاک است. ثبات و پایداری خاک‌های چسبنده بیشتر از خاک‌های با چسبندگی کم است. برای تعیین میزان رطوبت در خاک می‌توان از معیار حدود اتربرگ استفاده کرد (شکل ۷). براساس این معیار سه حد برای میزان رطوبت موجود در خاک تعریف می‌شود. حد انقباض، حد خمیری و حد روانی. خاک‌ها براساس مقدار آب جذب‌شده، حالت‌های مختلفی به خود می‌گیرند. این سه حد مرز میان چهار حالت رفتار خاک که عبارت‌انداز: سفت (جامد) و نیمه‌سفت (نیمه‌جامد) و خمیر (پلاستیک) و مایع (روان) می‌باشند [۱۴]. اگر رطوبت از یک میزان کمتر یا شد خاک مانند یک جامد رفتار می‌کند که باعث می‌شود ردپای تایر روی خاک باقی نماند. در رطوبت خیلی زیاد، مخلوط آب و خاک مانند سیال رفتار خواهد کرد که امکان حرکت خودرو در این شرایط به‌شدت دشوار خواهد بود. عموماً خاک‌های رسی تا زمانی که تحت رطوبت ناچیزی قرار می‌گیرند، بارهای زیادی را تحمل نموده و تغییر شکل ناچیزی را متحمل می‌شوند. اما هرچه میزان رطوبت افزایش یابد، ظرفیت باربری آن کم و تغییر شکل بیشتری در خاک ایجاد شده و پایداری خاک از بین می‌رود. هرچه نسبت ماسه در خاک‌های رسی افزایش یابد، مدول الاستیسیته افزایش پیدا می‌کند [۱۵].



شکل ۶: مثلث بافت خاک [۱۴]



شکل ۷: حدود اتربرگ [۱۴]

۶ عملکرد خودروهای خارج جاده‌ای

۱.۶ خودروهای چندمحوره

خودروهای خارج جاده‌ای می‌توانند برحسب نوع استفاده از دو تا چند محور به جهت افزایش تحمل بار بیشتر، تقسیم وزن بهتر، افزایش نیروی جلوبرنده، افزایش نیروی یدک‌کشی، واردکردن فشار حداقلی به سطح جاده و هندلینگ مطلوب را داشته باشند (شکل ۸). انواع متداول خودروها ۲ × ۴، ۲ × ۶ و ۴ × ۶ است. برخی تولیدکنندگان خودروهای ۶ × ۶، ۶ × ۸، ۸ × ۸، ۸ × ۱۰ و حتی ۱۰ × ۱۰ را ارائه می‌دهند. به‌عنوان مثال یک خودرو ۴ × ۶ سه محور (شش چرخ) دارد که ۴ چرخ عقب آن محرک و دوچرخ جلوی آن متحرک هستند [۱۶].

شکل ۸: یک خودرو چندمحوره [۱۶]

۲.۶ قابلیت یدک‌کشی

بسته به نیازهای عملیاتی، معیارهای متفاوتی برای ارزیابی ویژگی‌های عملکرد انواع خودروهای خارج جاده‌ای وجود دارد. یکی از ویژگی‌های خودروهای بیابانی قابلیت یدک‌کشی[1] است. کشاورزی، حمل‌ونقل، صنایع نظامی، استخراج از معادن در عمق ۶۰۰۰ متری بستر دریا و اقیانوس هند [۱۷]، مستلزم خودروها و ماشین‌آلاتی است که قابلیت یدک‌کشی مناسب با توجه به حوزه مورد استفاده را فراهم سازند (شکل ۹). نیروی یدک‌کشی از تفاضل نیروی پیشرانی و برایند نیروهای مقاوم به‌دست می‌آید [۱۸]. مقاومت ناشی از

[1] drawbar pull

تقابل خودرو ـ مسیر نقش تعیین‌کننده در قابلیت حرکت و یدک‌کشی را دارد. مثلاً قابلیت حرکت و یدک‌کشی روی زمین‌های شنی نرم کمتر از خاک‌های محکم‌تر است. همچنین خاک‌های مرطوب‌تر مقاومت به حرکت بیشتری تولید می‌کنند. مقاومت ناشی از موانع زمین همچون سنگ و کنده درختان از عوامل دیگر مقاومت به حرکت هستند. افزایش سرعت همراه با کاهش ضریب دنده سبب کاهش قابلیت یدک‌کشی به‌واسطه افزایش مقاومت به حرکت و مقاومت ائرودینامیکی و کاهش حداکثر نیروی پیشران می‌گردد. امروزه در کشاورزی، عمران و حمل‌ونقل برای دستیابی به حداکثر نیروی پیشران و کاهش مقاومت به حرکت از خودروهای چهارچرخ محرک استفاده می‌شود. نیروی پیشران و یدک‌کشی یک تراکتور چهارچرخ محرک نسبت به یک تراکتور تک دیفرانسیل مشابه روی خاک نرم بیشتر است [۱۸].

شکل ۹: یک خودروی سنگین با قابلیت یدک‌کشی بسیار بالا [۱۸]

۳.۶ فرمان‌پذیری خودروهای خارج جاده‌ای

هدایت و فرمان‌گیری خودروهای خارج جاده‌ای انواع گوناگونی دارد. در خودروهای چرخ‌دار فرمان پذیری به‌صورت تک‌محور، دو محور یا بیش از آن صورت می‌گیرد (شکل ۱۰). خودروهای تک‌محور فرمان‌پذیر مانند خودروهای معمولی فرمان می‌گیرند. خودروهای دومحور یا چندمحور فرمان‌پذیر برای چرخیدن در شعاع کمتر ساخته‌شده و در خودروهای نظامی کاربرد دارند. در این خودروها دو محور جلو به‌تنهایی یا دو محور جلو همراه با آخرین محور خودرو فرمان می‌گیرد. چرخ‌ها در آخرین محور در جهت مخالف چرخش فرمان گردش می‌کنند. فرمان‌پذیری خودروهای شنی‌دار و برخی خودروهای چرخ‌دار به‌صورت فرمان‌گیری لغزشی است. در فرمان‌گیری لغزشی نیروی پیشران شنی یا چرخ خارج پیچ افزایش و نیروی پیشران شنی یا چرخ داخل پیچ کاهش پیدا می‌کند تا یک گشتاور چرخشی در اثر لغزش روی مسیر ایجاد شود. نوع دیگر فرمان‌پذیری در خودروهای خارج جاده‌ای فرمان‌گیری کمرشکن[1] است. برای خودروهای کمرشکن دو یا چندقسمتی، دیگری انجام شود تا خودرو پیچ موردنظر را طی کند. سیستم فرمان کمرشکن روی خاک‌های نرم قابلیت حرکت بهتری نسبت به فرمان‌گیری لغزشی برای یک خودرو ایجاد می‌کند [۲۰].

شکل ۱۰: یک خودروی فرمان‌پذیر چندمحوره [۱۹]

۷ ترامکانیک و فناوری‌های نو

همان‌طور که پیش از این ذکر شد، کمک بزرگ ترامکانیک، ایجاد روابط و فرمول‌بندی مدل‌های ریاضی حاصل از آزمایش‌های عملی و تجربی برای پیش‌بینی تقابل خودرو با زمین مورد انتظار است. امروزه با گسترش فناوری‌های خودروهای خودران و بدون سرنشین و همچنین کاهش قیمت فناوری‌های تشخیص شی، دوربین‌ها و حسگرها امکان استفاده از این نوع فناوری‌ها برای خودروهای خارج جاده‌ای در کشاورزی، معدن، صنایع نظامی و مریخ‌پیما فراهم آمده است. با توجه به رشد روزافزون جمعیت و نیاز به محصولات کشاورزی، کمبود کارگر ماهر در این بخش و همچنین بهره‌وری بالاتر از این محصولات، سبب شده است که متخصصان راه‌حل اصلی را استفاده از تراکتورها و ماشین‌آلات بدون سرنشین و خودران ببینند [۱۹]. ضمن اینکه استفاده از تراکتورهای معمولی برای کار روی زمین به‌صورت طولانی بسیار خسته‌کننده است و حرکات تاب[2] تراکتور ضربات زیادی را به اپراتور وارد می‌کند [۲۲]. از مزایای تراکتورهای بدون سرنشین (شکل ۱۱) این است که سبک‌ترند و تراکم خاک را کاهش می‌دهند. مشکلی که امروزه با تراکتورهای سنگین وجود دارد و می‌تواند میزان تولید محصول را کاهش دهد، همین ایجاد تراکم در خاک است. همچنین تراکتورهای هوشمند قادرند خطوط کشت و زرع مناسب را با توجه به شرایط خاک تشخیص دهند و با دقت زیاد در طول ساعات شبانه‌روز در حال کار باشند [۲۱، ۲۳]. کمپانی بزرگ جان دیر[3] آثار شگرفی بر طراحی و توسعه ماشین‌آلات کشاورزی از جمله تراکتورهای خودران و بدون سرنشین داشته است. در صنایع نظامی، به‌منظور کاهش تلفات انسانی، انجام عملیات حساس و پیچیده، امداد و نجات از ربات‌ها و خودروهای کوچک بدون سرنشین و خودران استفاده می‌گردد. این خودروها می‌توانند عملیات خود را به‌خوبی انجام دهند، منوط بر آنکه از محیط عملیاتی خود اطلاعات درستی را به اپراتور کنترل‌کننده و سیستم تحلیل داده‌های خود بفرستند. اطلاعاتی از قبیل نوع خاک در حال تردد، میزان رطوبت خاک و موانع با فن‌هایی همچون رادار، لیدار[4]، جی. پی. اس. و بینایی رایانه‌ای برای خودرو قابل‌تشخیص است. چون این خودروها در محیط‌های خارج جاده‌ای و صعب‌العبور کاربرد دارند، اهمیت ترامکانیک در طراحی این وسائل بیش از پیش به‌چشم می‌آید. سامانه‌های کنترل پیشرفته، اطلاعات حاصل را تفسیر می‌کند و با استفاده از آنها مسیرهای ناوبری مناسب،

[1] articulated steering [2] pitch [3] John Deer [4] LIDAR

موانع و علامت‌های مربوطه را شناسایی می‌کند. وسائل نقلیه خودران معمولاً می‌توانند نقشه‌های خود را با استفاده از حسگرهای خود به‌روزرسانی کنند. لذا این وسائل قادرند حتی در محیط‌های کاملاً ناشناس نیز به‌خوبی حرکت کنند [۲۴، ۲۵] (شکل ۱۲).

شکل ۱۱: نمایی از یک دستگاه تراکتور بدون سرنشین [۲۱]

شکل ۱۲: جنگ‌افزار بدون سرنشین [۲۴]

شرکت آشکاش دیفنس[1] از جمله شرکت‌های تولیدکننده محصولات نظامی در امریکاست. این شرکت مدت‌هاست که روی وسائل نقلیه نظامی بدون سرنشین کار می‌کند. ترامکس[2] نام فناوری خودران‌کردن وسائل نقلیه نظامی است. تمام عملیات کنترل این خودروها از جمله گردش‌ها، سرعت‌گیری، ترمزکردن و تغییر دنده به‌کمک یک سیستم رایانه‌ای خودکار صورت می‌پذیرد [۲۶]. وقتی ماه‌نورد امریکایی موفق شد روی سطح ماه فرود آید، کشورهای اروپایی، چین و ژاپن، برنامه‌های فضایی خود را سرعت بخشیدند. ماه‌پیمای چین با موفقیت روی ماه فرود آمد، آژانس فضایی اروپا برای سال ۲۰۱۸ م مأموریت‌هایی برای کاوش ماه را برنامه‌ریزی کرده است و ژاپن مجدد برای کاوش‌های فضایی برنامه‌ریزی کرده است. این علاقه جدید به اکتشافات سیاره‌ای، یک چالش بزرگ در زمینه طراحی ربات‌های متحرک چرخ‌دار است. براساس تجربه حاصل از مأموریت‌های اکتشاف سیاره‌ای پیشین، توانایی حرکت، یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده ماه‌پیماها بوده است [۲۷]. امروزه دانشمندان با استفاده از مأموریت‌های فضایی بدون سرنشین قادر به کشف منظومه شمسی هستند، کاری که تا قبل از این برای بشر امکان‌پذیر نبود. به لطف ترامکانیک، ساخت انواع مریخ‌پیما مجهز به تلسکوپ، دوربین و طیف‌سنج سبب شده که این خودروهای بدون سرنشین اطلاعات مورد نیاز دانشمندان را از سیاره‌های گوناگون به زمین مخابره کنند. توسعه مریخ‌پیما براساس مبانی ترامکانیک و برهم‌کنش چرخ ـ خاک، به‌جهت افزایش قابلیت حرکتی، قدرت مانور و عملکرد صورت می‌گیرد و تأثیر پارامترهای اصلی خاک بر بارگذاری چرخ و شرایط زمین در پیکربندی شاسی و چرخ‌های مریخ‌نورد مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد [۲۸]. سطح ماه و دیگر سیارات همانند مریخ از خاک‌های دانه‌ریز (که سنگ پوش[3] نام‌گذاری شده) و تخته ظرف‌شویی و صخره‌هایی تشکیل‌شده که تمام سطح را پوشانده‌اند. علاوه بر اینکه مریخ‌نورد باید توانایی عدم برخورد با صخره‌ها را داشته باشد، باید توانایی مقابله با لغزش چرخ‌ها روی خاک نرم را داشته باشد و در خاک فرو نرود. بدین‌منظور سه رویکرد اساسی در طراحی مریخ‌پیما در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱۳).

شکل ۱۳: مریخ‌نورد [۳۰]

۱. توسعه یک مدل تجربی برای بررسی رفتار حرکت و شیب روی مریخ‌پیما روی خاک نرم براساس ترامکانیک به‌منظور بررسی میزان لغزش (سُر خوردن[4])، محاسبه سه نیرو و دو گشتاور چرخ و صحه‌گذاری اطلاعات با مقایسه آزمایش تک‌چرخ روی میز آزمایش

۲. کنترل مسیر با رویکرد جبران لغزش براساس کنترل بازخورد مبتنی بر داده‌های حس‌گر و مدل مبتنی بر کنترل پیش‌خور

۳. برنامه‌ریزی مسیر و ارزیابی عملکرد برای به‌دست آوردن امن‌ترین مسیر به‌منظور مقابله با لغزش و عدم فروروی در خاک [۲۹].

۸ نتیجه‌گیری

با توجه به تعداد صنایعی که در تولید تجهیزات خودروهای خارج جاده‌ای نقش دارند و در نظر گرفتن تراکتورها و ماشین‌آلات کشاورزی، شمار ماشین‌آلات مورد استفاده در صنعت ساخت‌وساز و معادن، کامیون‌های مورد استفاده در صنعت حمل‌ونقل خارج از جاده وسائل نقلیه لجستیکی و نظامی، ترامکانیک را می‌توان یک صنعت میلیارد دلاری دانست. متأسفانه منابع فارسی اندکی به دانش ترامکانیک پرداخته و کمتر مهندسی اطلاعاتی مناسب از ملزومات طراحی خودروهای خارج جاده‌ای دارد. این مقاله تلاش مختصری برای تدوین اجمالی معرفی علم ترامکانیک و اهمیت آن در طراحی خودروهای خارج جاده‌ای است. ترامکانیک همراه با رویکرد تجزیه و تحلیل سیستم، نقش عمده‌ای در توسعه و ارزیابی خودروهای خارج جاده‌ای برای یک مأموریت در یک محیط خاص ایفا می‌کند. امروزه اولویت با توسعه وسائل نقلیه هوشمند و اصطلاحاً همه‌جارو است. خودروهایی که خود مسیر و نوع پوشش آن را تشخیص دهند و با تجزیه و تحلیل اطلاعات به‌دست‌آمده،

[1] Oshkosh defense [2] TerraMax [3] regolith [4] skid

نیروی پیشران و ترمزی مناسب را اعمال کنند.

مراجع

[1] J. Y. Wong, *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering*, Elsevier, 2010, pp. 1–19.

[2] R. L. Raper, A. C. Bailey, E. C. Burt, T. R. Way, P. Liberati, The effects of reduced inflation pressure on soil-tire interface stresses and soil strength, *J. Terramechanics*, vol. 32, no. 1, pp. 43–51, Jan. 1995.

[3] H. Taghavifar and A. Mardani, Investigating the effect of velocity, inflation pressure, and vertical load on rolling resistance of a radial ply tire, *J. Terramechanics*, vol. 50, no. 2, pp. 99–106, 2013.

[4] G. S. V. Raghavan, E. McKyes, M. Chassé, Effect of wheel slip on soil compaction, *J. Agric. Eng. Res.* vol. 22, no. 1, pp. 79–83, Mar. 1977.

[5] J. Y. Wong, *Theory of ground vehicles*, John Wiley & Sons, 2008.

[6] Off-road vehicle, https://en.wikipedia.org (accessed January 10, 2018).

[7] Kégresse track, https://en.wikipedia.org (accessed January 10, 2018).

[8] Jeep, https://en.wikipedia.org (accessed January 10, 2018).

[۹] تاریخچه صنعت خودرو در ایران / اسب بخار، http://asbe-bokhar.com/article/news (accessed January 10, 2018)

[۱۰] دانشنامه آزاد ویکی‌پدیا، پارس‌خودرو، پارس ـ خودرو https://fa.wikipedia.org/wiki (accessed January 10, 2018)

[11] Sh. Taheri, C. Sandu, S. Taheri, E. Pinto, D. Gorsich, A technical survey on Terramechanics models for tire–terrain interaction used in modeling and simulation of wheeled vehicles, *J. Terramechanics*, vol. 57, pp. 1–22, 2015.

[۱۲] ع. مردانی، مدل‌های مبتنی بر فیزیک ترامکانیک طی برهم‌کنش چرخ و خاک، *دهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی (بیوسیستم) و مکانیزاسیون ایران*، ۱۳۹۵.

[۱۳] دانشنامه آزاد ویکی‌پدیا، خاک https://fa.wikipedia.org/wiki (accessed January 10, 2018)

[۱۴] ب. ام. داس، *اصول مهندسی ژئوتکنیک، جلد اول: مکانیک خاک*، ترجمه ش. طاحونی، پارس آیین، ۱۳۹۴.

[۱۵] ج. احدیان، ا. سالم‌نیا، م. کریمی، بررسی تاثیر مقدار رطوبت و درصد تراکم اولیه بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته دو نوع خاك رسی و رس‌ماسه‌ای، در حفاظت منابع آب‌وخاک، ش. ۲، ج. ۱، ص. ۲۹ ـ ۵۰، ۱۳۹۰.

[16] Wikipedia online encyclopedia, “Tractor unit.” https://en.wikipedia.org/wiki/Tractor_unit (accessed January 10, 2018).

[17] C. Janarthanan et al., Traction and drawbar pull experimental study for development of deep sea mining machine, in 2015 IEEE Underwater Technology (UT), 2015, pp. 1–7.

[18] J. Y. Wong, *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering*, 2010, pp. 129–153.

[19] “First Oshkosh LVSR Deployed in Afghanistan - autoevolution.” https://www.autoevolution.com (accessed January 10, 2018).

[20] J. Y. Wong, *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering*, 2010, pp. 155–176.

[21] “Future of farming: Driverless tractors, ag robots”, http://www.cnbc.com (accessed January 10, 2018).

[22] K. Sim, H. Lee, J. W. Yoon, C. Choi, S. H. Hwang, Effectiveness evaluation of hydro-pneumatic and semi-active cab suspension for the improvement of ride comfort of agricultural tractors, *J. Terramechanics*, vol. 69, pp. 23–32, 2017.

[23] Wikipedia online encyclopedia, “Driverlesstractor” https://en.wikipedia.org (accessed January 10, 2018).

[24] Wikipedia online encyclopedia, “Unmannedgroundvehicle”, https://en.wikipedia.org (accessed January 10, 2018).

[۲۵] دانشنامه آزاد ویکی‌پدیا، ”خودروی خودگردان“ https://fa.wikipedia.org (accessed January 10, 2018).

[26] “Oshkosh TerraMax Unmanned Ground Vehicle Technology-Army Technology”, http://www.army-technology.com (accessed January 10, 2018).

[27] “Terramechanics-based modeling of sinkage and moment for in-situ steering wheels of mobile robots on deformable terrain”, *Mech. Mach. Theory*, vol. 116, pp. 14–33, Oct. 2017.

[28] Z. Deng, X. Fan, H. Gao, L. Ding, Influence analysis of terramechanics on conceptual design of manned lunar rover’s locomotion system, in Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, 2011, pp. 645–648.

[29] G. Ishigami, Terramechanics-based analysis and control for lunar/planetary exploration robots, Self, March, 2008.

[30] “NASA - Mars Rover Curiosity Landing.” https://www.nasa.gov (accessed January 10, 2018).