

چالش‌های ترددپذیری در وسایل نقلیه کف اقیانوس پیما

سید محمدرضا سطوتی، مسعود مسیح‌طهرانی*

آزمایشگاه طراحی سیستم‌های دینامیکی خودرو، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

*مسئول مکاتبات: masih@iust.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

ترامکانیک
ترددپذیری
برهم‌کنش شنی و خاک
کف اقیانوس پیما
ماشین حفاری کف اقیانوس
وسایل نقلیه خارج‌جاده‌ای

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۹/۳۰
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۴/۰۵

ترددپذیری یکی از چالشی‌ترین موضوعات در پژوهش‌های اخیر مرتبط با خودروهای خارج‌جاده‌ای هست. زیرا در سال‌های اخیر به حوزه‌های جدیدی مانند پیمایش سطح سیاره‌های دیگر و پیمایش کف اقیانوس‌ها جهت استخراج معادن اعماق اقیانوس پرداخته شده است. یکی از مهم‌ترین مسائل در وسایل نقلیه خارج‌جاده‌ای بررسی برهم‌کنش شنی (چرخ) با خاک می‌باشد. در مقاله حاضر سعی شده است تا به مرور تحقیقات تجربی و تئوری انجام شده در ترددپذیری وسایل نقلیه خارج‌جاده‌ای پرداخته شود. همچنین برخی تحقیقات انجام شده در زمینه ترامکانیک نیز مرور گردیده است. ترامکانیک نوین و سنتی مقایسه شده‌اند. در این مقاله مروری نگاه ویژه‌ای به وسایل نقلیه مخصوص پیمایش و حفاری در کف اقیانوس‌ها شده است. در پایان با توجه به مباحث مرور شده فرصت‌های تحقیقاتی در این زمینه شناسایی گردیده است. فقدان آزمایشگاهی جهت پژوهش‌های تجربی در ارتباط با خودروهای خارج‌جاده‌ای در کشور محسوس است.

۱ مقدمه

وسيله نقلیه خارج‌جاده‌ای طیف وسیعی از وسایل نقلیه را شامل می‌شود، از جمله وسایل نقلیه تایدرا، وسایل نقلیه شنی‌دار و ترکیبی (ترکیبی از چرخ و شنی) [۱]. وسایل نقلیه خارج‌جاده‌ای کارکردهای زیادی در زمینه‌هایی مانند: کشاورزی، راه‌سازی، نظامی و مریخ‌پیما دارند [۲].

افزایش شدید تقاضا برای مواد خام فلزی همراه با افزایش قیمت فلزات و مصرف شدن تدریجی منابع معدنی زمین، علاقه زیادی به معادن دریایی را ایجاد کرده است [۳]. همین مورد باعث شده تا در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به وسایل نقلیه مخصوص پیمایش و حفاری کف اقیانوس بشود. نصب و تعمیرات کابل‌های مخابراتی در کف اقیانوس‌ها نیز از دیگر دلایل توجه به ساخت وسایل نقلیه‌ای برای پیمایش خاک‌های نرم انعطاف‌پذیر در اعماق دریاها است [۴].

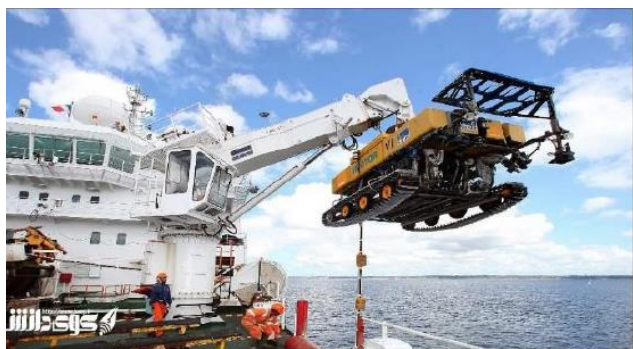
در ادامه این مقاله به چالش‌های ترددپذیری و مرور تحقیقات تجربی و شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. در بخش سوم نیز ترامکانیک نوین و سنتی مقایسه می‌گردند. در پایان فرصت‌های تحقیقاتی و جمع‌بندی مطالب ارائه می‌شوند.

۲ چالش‌های ترددپذیری

اصطلاح ترامکانیک به‌عنوان علم مطالعه خواص خاک در طول برهم‌کنش آن با وسیله نقلیه عبوری تعریف می‌گردد. در مطالعه رفتار وسیله نقلیه خارج‌جاده‌ای چالش اصلی برهم‌کنش شنی (چرخ) با خاک است [۵]. افزایش شدید تقاضا برای مواد خام فلزی همراه با افزایش قیمت فلزات

و مصرف شدن تدریجی منابع معدنی زمین، علاقه زیادی به معادن دریایی را ایجاد کرده است [۳]. خودروهای حفاری کف اقیانوس پیما در واقع خودشان یکی از زیر دستگاه‌های مهم از مجموعه به‌هم‌پیوسته حفاری اعماق اقیانوس‌ها هستند. ترددپذیری و جابه‌جایی این‌گونه وسایل نقلیه بر کارایی پیوسته این‌گونه دستگاه‌ها مستقیماً مؤثر هستند [۶].

نصب و تعمیرات کابل‌های مخابراتی در اعماق دریاها نیز از دیگر دلایل توجه به طراحی وسایل نقلیه شنی‌دار مخصوص پیمایش کف اقیانوس‌ها است. مثالی از این مورد کشتی پییردیفرمات که به‌طور ویژه برای عملیات تعمیر کابل‌های مخابراتی اعماق اقیانوس‌ها طراحی شده است. این کشتی برای قرارگیری درست در محل از جی‌پی‌اس^۱ استفاده می‌کند و با استفاده از پالس‌های لیزری محل دقیق گسیختگی کابل را تعیین می‌کند. پس از استقرار در محل یک وسیله نقلیه کنترل شونده از راه دور از کشتی به آب انداخته می‌شود تا کابل را بیابد و به سطح آب بیاورد [۴] (شکل ۱).



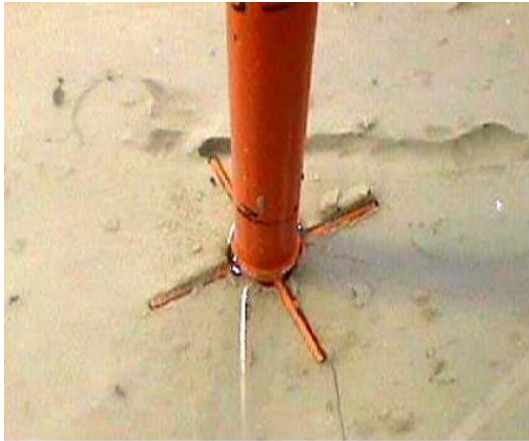
شکل ۱: تصویر کشتی پییردیفرمات [۴]

1GPS

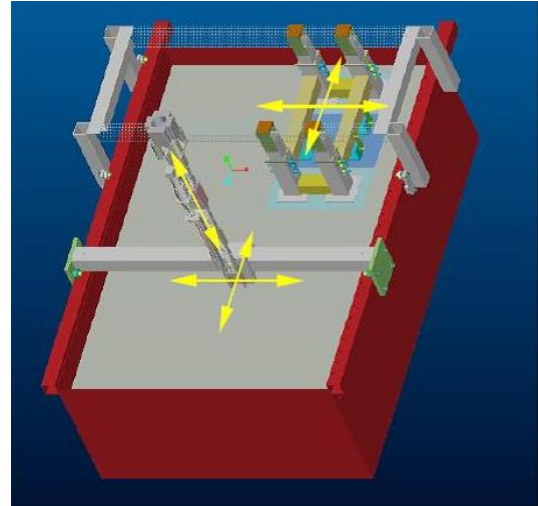
● واحد شنی^۸

۱.۲ مروری بر تاریخچه تحقیقات تردپذیری

برای ارزیابی تردپذیری وسایل نقلیه شنی‌دار در کف دریا شولت^۱ و همکاران یک دستگاه آزمایشگاهی را تدارک دیدند تا آزمایش‌های حد تحمل و تنش برشی را در مخلوط آب و گل مخصوص (مخلوط بنتونیتی آب و خاک^۲) جهت اندازه‌گیری انقباض دینامیکی و استاتیکی (خاک) انجام دهند (شکل‌های ۲ تا ۷).



شکل ۴: دستگاه آزمایش تیغه با انتهای بالایی لبه در سطح خاک [۷]



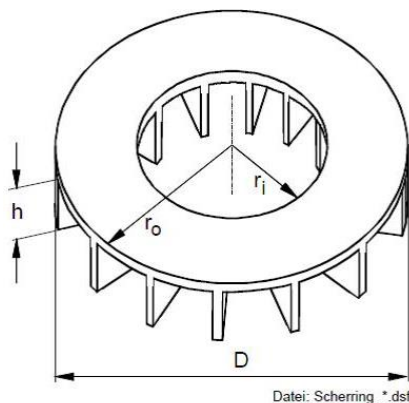
شکل ۲: شمای کلی دستگاه آزمایش مقاومت [۷]



شکل ۵: حلقه برشی [۷]



شکل ۳: مخلوط کردن آب و خاک رس مخصوص بعد از هر مجموعه از آزمایش [۷]



شکل ۶: آزمون پارامترهای هندسی حلقه برشی [۷]

شولت و همکاران نمودار تغییرات تنش برشی و جابه‌جایی برشی را برای سه آزمایش مختلف خود ترسیم و مقایسه نمودند [۷]. (شکل ۸). آن‌ها رابطه‌ای را بین تنش برشی و جابه‌جایی برشی استخراج کردند [۷]. شولت و همکاران در پایان توانستند ضرایب تبدیلی را بیابند که با داشتن یکی

شولت و همکاران برای بررسی تردپذیری آزمون ایستادن آی‌کی‌اس^۳ را تدارک دیدند که اجازه می‌دهد چند آزمایش مقایسه‌ای به کمک وسایل اندازه‌گیری زیر انجام شود [۷]:

- آزمایش ورقه^۴
- آزمایش مخروطی^۵
- حلقه برشی^۶
- صفحه بار (فشاری)^۷

^۱Schulte ^۲Bentonitic-Water mixture ^۳IKS ^۴Vane test ^۵Cone test ^۶Shear ring ^۷Plate load ^۸Track segment

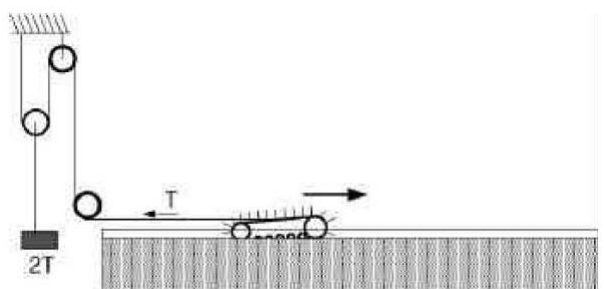
آزمایش یدککش مطابق شکل ۱۱ انجام شده است. به‌وسیله قرقره نشان داده‌شده در تصویر نیروی T که نصف وزن وزنه است، به وسیله نقلیه شنی دار به‌صورت افقی اعمال می‌گردد. درواقع این نیرو، نیروی هیدرودینامیک را نمایندگی می‌کند [۱۰].



شکل ۹: ظرف محتوی خاک انعطاف‌پذیر (مخلوط آب و خاک رس بنتونیت) [۱۰]



شکل ۱۰: نمونه وسیله نقلیه شنی دار [۱۰]



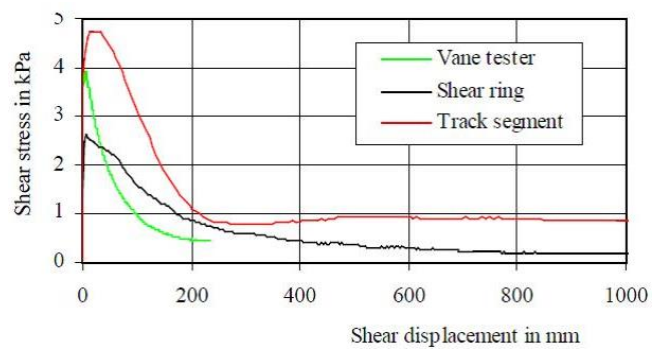
شکل ۱۱: بیکره شماتیک آیش یدککش مدل وسیله نقلیه شنی دار [۱۰]

آن‌ها در پایان به نتایجی دست یافتند ازجمله: اگر طول گروزر خیلی زیاد باشد تأثیر گروزر از بین می‌رود و لغزش و گشتاور افزایش می‌یابد. اگر طول گروزر خیلی کوچک باشد یک جابه‌جایی برشی در کل طول شنی رخ می‌دهد و لغزش و گشتاور مجدداً افزایش می‌یابد. بنابراین یک طول بهینه برای گروزر وجود دارد. ضمناً آن‌ها دریافتند که هر چقدر شنی با سرعت

از پارامترهای حلقه برشی (مثلاً تنش ماکزیمم برشی) بتوان همان پارامتر را برای آزمایش دیگر به دست آورد و بالعکس [۷].



شکل ۷: گروزهای واحد شنی [۷]



شکل ۸: تغییرات تنش برشی و جابه‌جایی برشی در سه آزمایش مختلف [۷]

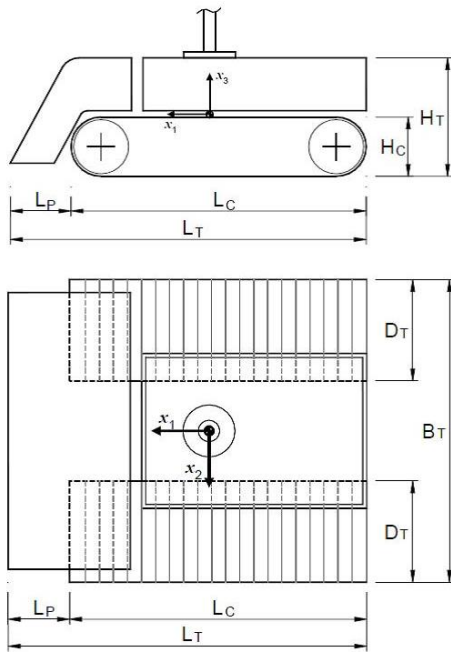
یامازاکی^۱ و همکاران ویژگی‌های ژئوتکنیکال رسوبات اعماق اقیانوس‌ها را ارائه کردند که شامل زاویه اصطکاک، چسبندگی و انسجام، مدول‌های ویسکوزیته و الاستیسیته و همچنین تعامل مکانیکی با یک معدنچی کف اقیانوس پیما هستند [۸].

چوی^۲ و همکاران توزیع احتمالی مقاومت برشی رسوبات کف اقیانوس را مطالعه کردند و روی یکی از این توزیع‌ها برای طراحی دستگاه حفاری کف اقیانوس پیما اقدام کردند [۹]. چوی و همکاران همچنین به شکل تجربی آزمایش‌هایی را برای بررسی کارایی نیروی پیشروی (ترکشن) روی یک نمونه کوچک وسیله نقلیه شنی دار در مقیاس آزمایشگاهی انجام دادند و تأثیر پارامترهای طراحی را بر ترددپذیری بررسی کردند [۱۰].

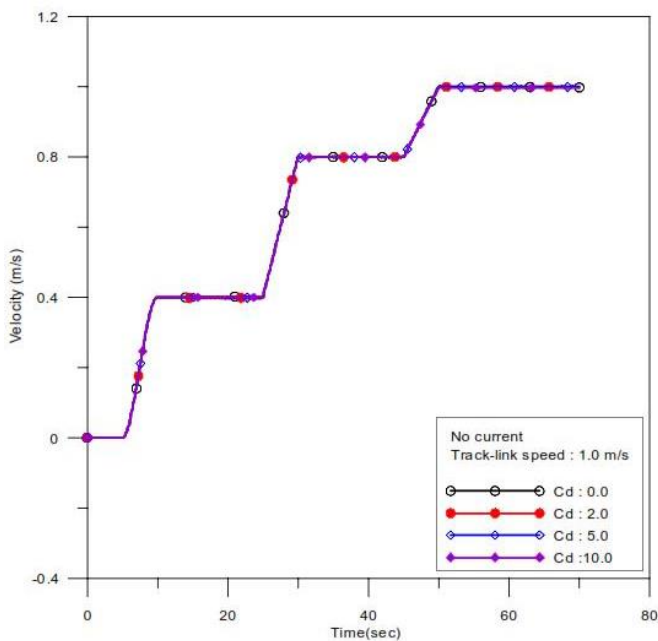
۲.۲ بررسی تأثیر نیروهای هیدرودینامیک در ترددپذیری وسایل نقلیه خارج‌جاده‌ای

چوی و کیم^۳ یک مشاهده تجربی را درباره کارایی پیشروی (ترکشن) یک وسیله نقلیه شنی دار بر روی خاک به‌شدت نرم انجام دادند. عمق کف دریا به‌وسیله مخلوط آب و خاک بنتونیت در یک ظرف ۶ در ۳/۷ متر شبیه‌سازی شده است. سپس لغزش وسیله نقلیه و گشتاور موتور با توجه به متغیرهای آزمایش مانند پوشش گروزر، زاویه‌شانه‌گروزر، سرعت راندن، وزن کشیدن (وزن یدک)، مرکز ثقل و وزن اندازه‌گیری شده‌اند (شکل‌های ۹ تا ۱۲) [۱۰].

¹Yamazaki ²Choi ³Kim



شکل ۱۴: مدل وسیله نقلیه شنی دار کف اقیانوس پیما [۱۱]



شکل ۱۵: سرعت طولی (مرکز جرم) وسیله نقلیه - سرعت شنی ۱ متر بر ثانیه - بدون جریان [۱۱]

آن‌ها آزمایش خود را برای چند سرعت شنی مختلف و جهت جریان متفاوت تکرار کردند و نتایج را ارائه دادند [۱۱].

۳.۲ تحقیقات انجام شده برای یافتن مشخصه‌های خاک و صحت سنجی مدل‌های شبیه‌سازی شده

انجام آزمایش‌ها مکانیکی در محل اقیانوس‌ها (کف اقیانوس‌ها) بین ماشین حفاری کف اقیانوس پیما و خاک بسیار سخت و پرهزینه هستند، بنابراین انجام شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی مفید هستند [۶].

مخلوط آب و گل (بنتونیتی) مناسب‌ترین جایگزین برای شبیه‌سازی

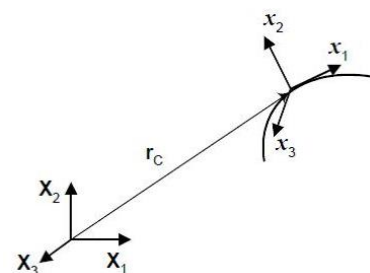
بیشتری به حرکت دربیاید، مقاومت خاک را برای رسیدن به نیروی پیشروی (ترکشن) بالاتر افزایش می‌دهد. همچنین آن‌ها اطمینان یافتند که افزایش نیروی کشش یدک و وزن وسیله نقلیه کارایی آن را بدتر می‌سازد، و حرکت مرکز ثقل وسیله نقلیه به سمت ناحیه جلو، حرکت تاب وسیله نقلیه را کاهش می‌دهد. آن‌ها بیان کردند که شکل وسیله نقلیه می‌تواند در کاهش نیروهای مقاومت خارجی (مانند نیروی هیدرودینامیکی) مؤثر باشد [۱۰].



شکل ۱۶: تصویر وسیله نقلیه شنی دار که وزنه یدک به آن بسته شده و در انتظار حرکت است [۱۰]

برای مطالعه دینامیک و تحلیل جابه‌جایی، کیم و همکاران یک روش تازه را به کمک پارامترهای اوپلر برای تحلیل دینامیکی یک وسیله نقلیه شنی دار در کف اقیانوس‌ها گسترش دادند. کیم و همکاران در مطالعه خود وسیله نقلیه شنی دار به عنوان یک جسم صلب با شش درجه آزادی در نظر گرفته‌اند. جهت‌گیری وسیله نقلیه با چهار پارامتر اوپلر تعریف شده است. کیم و همکاران برای حل معادلات حرکت از روش‌های عددی استفاده کرده‌اند. نیرو و مومنتوم هیدرودینامیک در دینامیک وسیله نقلیه شنی دار آورده شده‌اند. تأثیرات نیروی هیدرودینامیک بر کارایی وسیله نقلیه شنی دار به وسیله شبیه‌سازی عددی بررسی شده‌اند. کیم و همکاران برای این منظور دو دستگاه مختصات کارتزین را تعریف کرده‌اند. یکی دستگاه مختصات جهانی که در فضا ثابت است و دیگری دستگاه مختصات ثابت بر روی بدنه وسیله نقلیه شنی دار ثابت است و همراه با وسیله نقلیه حرکت می‌کند (شکل‌های ۱۳ و ۱۴) [۱۱].

نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد که در شرایطی که هیچ جریانی به وسیله نقلیه وارد نمی‌شود، سرعت وسیله نقلیه با تغییر ضریب درگ تغییر چشمگیری نمی‌کند (شکل ۱۵) [۱۱].



شکل ۱۷: دستگاه‌های مختصات [۱۱]



شکل ۱۹: آزمایش تنش برشی [۶]

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تنش برشی ابتدا به شکل تندی افزایش پیدا می‌کند و به یک مقدار بیشینه در یک جابه‌جایی برشی معین می‌رسد و سپس کاهش پیدا می‌کند و به یک مقدار تقریباً ثابت (توآمان با افزایش جابه‌جایی برشی) می‌رسد [۶]. آن‌گونه که رابطه جانوسی^۱ و هانامتو^۲ بیان کرده است، این مورد برای خاک‌های مختلف سطح زمین متفاوت است [۱۲]. در حال در نتایج کار دای و همکاران با رابطه وونگ^۳ [۱۳] (برای تنش برشی) به نظر تطابق خوبی داشته‌است. آن‌ها به کمک آزمایش‌های خود پارامترهای خاک را برای مخلوط آب-رس بنتونیتی به دست آوردند [۶].

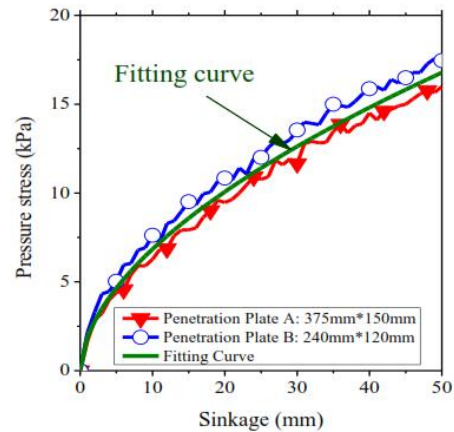
دای و همکاران برای منتشر کردن یک مدل شبیه‌سازی سه‌بعدی دینامیک چند جرمی وسیله نقلیه شنی‌دار از نرم‌افزار ریکورداین (ماژول شنی‌دار) استفاده کرده‌اند. دای و همکاران یک وسیله نقلیه شنی‌دار کوچک را برای انجام آزمایش‌های ترددپذیری و جابه‌جایی بر روی خاک نرم ساختند همچنین یک مدل شبیه‌سازی نرم‌افزاری را نیز به روشی که قبلاً توضیح داده شده در نرم‌افزار ریکورداین آماده ساختند. دای و همکاران آزمایش چرخیدن وسیله نقلیه را با ورودی‌های سرعت شنی داخلی ۰/۰۵ متر بر ثانیه و سرعت شنی خارجی ۰/۱۶ متر بر ثانیه انجام دادند و هم‌زمان آن را در نرم‌افزار نیز شبیه‌سازی کردند، نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تطابق خوبی را نشان دادند (شکل‌های ۲۰ و ۲۱) [۶].



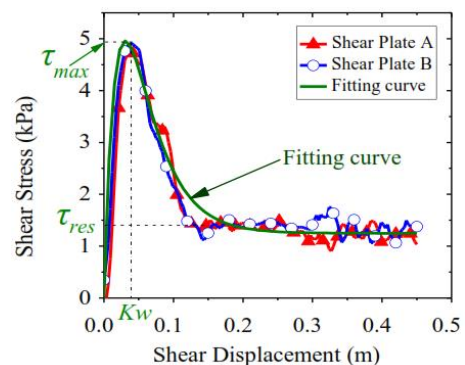
شکل ۲۰: نمونه وسیله نقلیه شنی‌دار برای آزمایش تجربی (آزمایش چرخش) [۶]

آزمایشگاهی خاک کف دریا محسوب می‌شود [۷]. دای و همکاران آزمایش‌های مختلفی را با صفحات مختلف نفوذی و برشی انجام دادند و نمودارهای نتایج فشار-فرورفتگی خاک و فشاربرشی-جابه‌جایی را رسم کردند (شکل‌های ۱۶ و ۱۷) [۶].

آن‌ها برای این منظور از تجهیزات آزمایشگاهی شامل ظرف خاک، صفحات برشی شبیه‌سازی شده، صفحات نفوذی، سیستم راندن هیدرولیک، حسگرهای فشاری-کششی و سیستم دریافت داده‌ها استفاده کردند (شکل‌های ۱۸ و ۱۹) [۶].



شکل ۱۶: فشار-فرورفتگی خاک [۶]



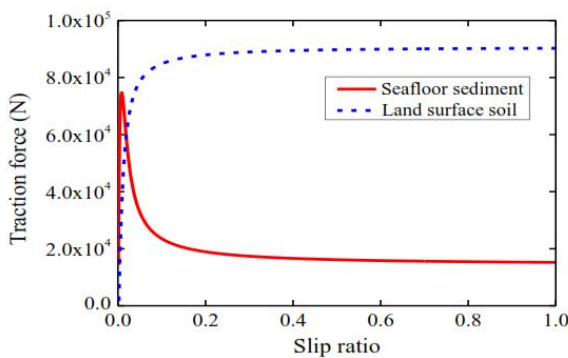
شکل ۱۷: تنش برشی-جابه‌جایی [۶]



شکل ۱۸: آزمایش نفوذ [۶]

¹Janosi ²Hanamoto ³Wong

اقیانوس‌پیما در شرایط پیچیده خاک کف اقیانوس سنجیدند [۱۵].



شکل ۲۳: نموداری نیروی ترکشن بر حسب درصد لغزش [۶]

۳ بررسی و مقایسه ترامکانیک نوین و سنتی

به‌طورکلی مهندسان خودروهای خارج‌جاده‌ای در طراحی این دسته از خودروها با چالش‌هایی مواجه هستند که در طراحی خودروهای معمولی دیده نمی‌شود. چالش‌هایی از قبیل نیروی پیشران و ترمزی کافی، فرمان‌پذیری و قابلیت یدک‌کشی [۲].

خاک به‌عنوان یک محیط عملیاتی خارج‌جاده‌ای با تغییرات دما و رطوبت خواص متفاوتی از خود نشان می‌دهد. داشتن دانش کافی از ویژگی‌های مکانیکی خاک و واکنش آن نسبت به بار خودرو برای تعیین عملکرد یک خودروی خارج‌جاده‌ای ضروری است [۲].

مطالعه عملکرد یک خودروی خارج‌جاده‌ای در ارتباط با محیط عملیاتی آن (مسیر حرکت)، در علمی با عنوان ترامکانیک بررسی می‌شود [۲]. در واقع مطالعه‌ی خصوصیات خاک در خلال عبور چرخ یا شنی در علمی با عنوان ترامکانیک بررسی می‌گردد که نخستین بار توسط مرکز تحقیق و توسعه خودروهای نظامی و تانک ارتش ایالات‌متحده آمریکا تعریف شده است [۱۶].

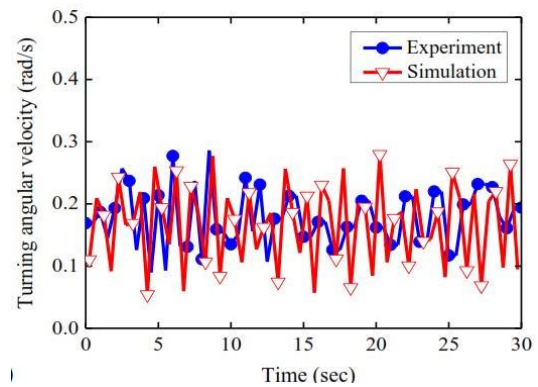
در این بخش تاریخچه ترامکانیک مرور می‌شود و مقایسه‌ای بین روش‌های مطالعه ترامکانیک سنتی و جدید انجام می‌گردد.

۱.۳ ترامکانیک سنتی

تردد وسایل نقلیه خارج‌جاده‌ای بر روی خاک ممکن است تغییراتی را در سطح خاک ایجاد کند که آن‌ها را تا حدودی غیرقابل نفوذ کند و یا باعث فرسایش آن‌ها بشود. مسئله این است که نحوه پاسخ خاک به تردد تحت شرایط مختلف چگونه توصیف شود [۱۷].

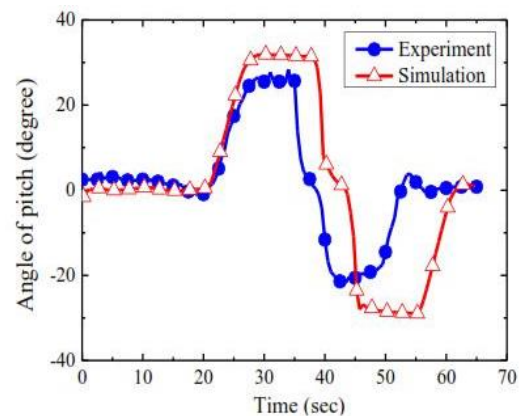
بخش عمده‌ای از تحقیقات انجام شده در ارتباط با اندازه‌گیری تغییرات در خواص فیزیکی خاک مربوط به اثر وسایل نقلیه چرخ‌دار در زمین‌های کشاورزی، یا کشاورزی و تأثیر آن بر نحوه رشد گیاهان هست [۱۸].

تحقیقات انجام شده در ارتباط با وسایل نقلیه شنی‌دار عمدتاً به بحث تحرک (حرکت وسیله نقلیه) پرداخته است و نه تغییرات در خواص فیزیکی خاک [۱۹].



شکل ۲۱: مقایسه سرعت زاویه‌ای چرخش تجربی و شبیه‌سازی [۶]

آن‌ها همچنین برای بالاروی زاویه شیب ۲۶/۵ درجه آزمایش تجربی و شبیه‌سازی را انجام دادند و زاویه تاب^۱ را بین کار تجربی و شبیه‌سازی مقایسه کردند و نتایج به شکل قابل‌پذیرشی منطبق بودند (شکل ۲۲) [۶].



شکل ۲۲: مقایسه نتایج زاویه تاب [۶]

دای^۲ و همکاران با استناد به تحقیقات ذکرشده، دقت شبیه‌ساز را قابل‌پذیرش دانستند و آن را برای توسعه شبیه‌سازی مدل چندجرمی یک وسیله نقلیه حفاری کف اقیانوس‌پیما با دادن ویژگی‌های خاک کف اقیانوس به آن، کارآمد دانستند [۶].

دای و همکاران [۶] به کمک روابط وونگ، بکر^۳ و رورولاند^۴ [۱۴] نیروی خالص پیشروی (ترکشن) را استخراج کردند. آن‌ها با قرار دادن مشخصات وسیله نقلیه شنی‌دار مورد آزمایش و همچنین مشخصات مخلوط آب و خاک به‌دست آمده در رابطه مذکور توانستند نمودار نیروی پیشروی (ترکشن) را برحسب درصد لغزش رسم کنند و برای مقایسه، نمودار مربوط به یک خاک معروف سطح زمین را رسم کردند (شکل ۲۳) [۶].

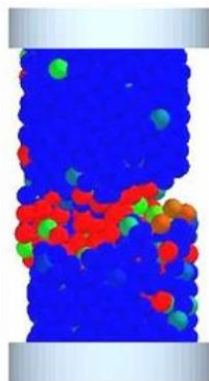
درحالی‌که نمودار نیروی ترکشن وسیله نقلیه شنی‌دار بر روی خاک دریا با افزایش درصد لغزش به‌سرعت افزایش می‌یابد و در لغزش حدود سه درصد به بیشینه مقدار خود می‌رسد و سپس به‌سرعت کاهش می‌یابد و به یک مقدار تقریباً ثابت می‌رسد اما بر روی خاک سطح زمین نیروی ترکشن تا لغزش حدود ۱۰ درصد سیر صعودی دارد و پس از آن تقریباً ثابت می‌ماند [۶].

دای و همکاران همچنین به کمک نرم‌افزار ریکورداین^۵ تأثیر اضافه شدن تیغه حفاری را بر ترددپذیری و قابلیت حرکت وسیله نقلیه شنی‌دار کف

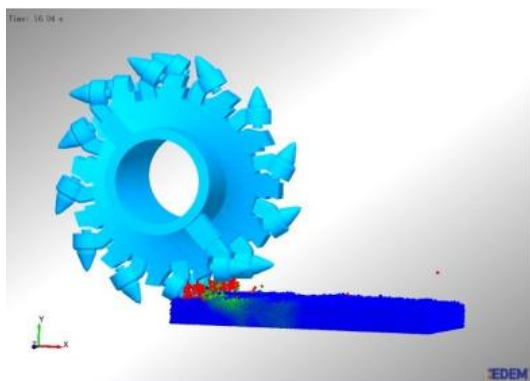
¹Pitch angle ²Dai ³Bekker ⁴Rowland ⁵RecurDyn®

انجام شده است. روجک^۴ و همکاران از دی‌ای‌ام^۵ برای شبیه‌سازی شکستن سنگ‌ها و مته حفاری در اعماق زمین استفاده کردند و نتایج شبیه‌سازی عددی را با داده‌های تجربی مقایسه کردند [۲۴].

دای و همکاران یک مدل المان جداسازی سه جهته یا به اختصار دی‌ای‌ام را برای سولفیدهای (خاک) کف اقیانوس در محیط شبیه‌سازی دی‌ای‌ام^۶ به کار بردند و سپس جهت صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی را با آزمایش‌های تجربی خود سنجیدند (شکل‌های ۲۶ و ۲۷) [۱۵].



شکل ۲۶: شبیه‌سازی دی‌ای‌ام شکاف (شکستگی) خاک [۱۵]



شکل ۲۷: نمونه‌ای از شبیه‌سازی با دی‌ای‌ام برای بررسی تأثیر نیروهای بین تیغه برنده و سولفیدهای اعماق (کف) دریا [۱۵]

لازم به توضیح است که دی‌ای‌ام یک نرم‌افزار پیشرو در بازار برای شبیه‌سازی توده‌ای از مواد است. در واقع دی‌ای‌ام نرم‌افزاری است که با استفاده از مدل جداسازی المان‌ها شبیه‌سازی‌های سریع و معتبری را برای توده‌ای از مواد مانند خاک، زغال‌سنگ و پودر می‌دهد [۲۵]. از مزایای این نرم‌افزار می‌توان به مواردی چون شبیه‌سازی هر نوع ماده، کارایی مناسب و راحتی در کاربرد اشاره کرد [۲۵].

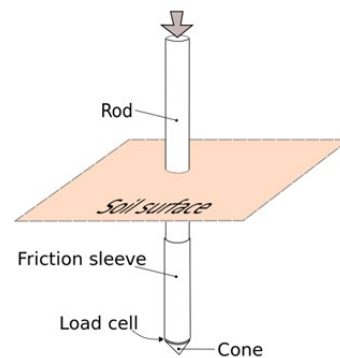
دای و همکاران با سوار کردن تیغه برش مورد بررسی خود بر روی وسیله نقلیه کف اقیانوس‌پیما و شبیه‌سازی در نرم‌افزار ریکورداین تأثیر اضافه شدن تیغه بر ترددپذیری و کارایی حرکت آن را بررسی کردند. در پایان به این نتیجه رسیدند که اضافه شدن این تیغه مشکلی در ترددپذیری وسیله نقلیه کف اقیانوس‌پیما بر روی خاک کف اقیانوس ندارد [۱۵] (شکل ۲۸)

نتایج چند تحقیق افزایش در پارامترهای مقاومت شاخص مخروطی را با افزایش تعداد پیمایش مسیر توسط وسیله نقلیه را نشان می‌دهد [۲۰]. با این حال در یک پژوهش آزمایشگاهی تجربی جهت شبیه‌سازی مسیر وسیله نقلیه شنی‌دار براناک^۱ در شاخص مقاومت مخروطی یک کاهش را (با افزایش تعداد تردد) اندازه‌گیری کرد [۲۱]. ژاکوبسن^۲ و ژریاسون^۳ همچنین کاهش (مقاومت شاخص مخروطی) در شرایط مشابه اندازه‌گیری کردند [۲۲].

آزمون نفوذ مخروط یکی از بررسی‌های ژئو-تکنیکی است که برای تعیین مشخصات مکانیکی و مهندسی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش اولین بار در دهه ۱۹۵۰ میلادی در کشور هلند مورد استفاده قرار گرفت و به همین دلیل گاهی آن را آزمایش مخروط هلندی نیز می‌نامند (شکل‌های ۲۴ و ۲۵) [۲۳].



شکل ۲۴: کامیون حمل ادوات مربوط به آزمایش نفوذ مخروط مربوط به سازمان نقشه‌برداری‌های زمین‌شناسی آمریکا [۲۳]



شکل ۲۵: یک مدل ساده‌شده از آزمایش نفوذ مخروطی [۲۳]

انجام آزمایش‌ها مکانیکی در محل اقیانوس‌ها (کف اقیانوس‌ها) بین ماشین حفاری کف اقیانوس‌پیما و خاک بسیار سخت و پرهزینه هستند، بنابراین انجام شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی مفید هستند [۶].

در بخش ۲.۳ پژوهش دای و همکاران برای یافتن مشخصات خاک و چگونگی تطبیق آن با روابط ترامکانیک سنتی توضیح داده شده است [۶].

۲.۳ ترامکانیک نوین

در این قسمت منظور از ترامکانیک‌نوین، روش‌ها و تحقیقات جدیدتر در ارتباط با برهم‌کنش شنی (چرخ) و خاک در خودروهای خارج‌جاده‌ای است. مطالعاتی درباره شبیه‌سازی شکستن سنگ‌ها در شرایط جوی مختلف

¹Braunack ²Jakobsen ³Greacen ⁴Rojek ⁵DEM ⁶EDEM

وسایل نقلیه خارج جاده‌ای بوده است [۲]. بنابراین توسعه آزمایشگاه ارزیابی ترددپذیری خودروی خارج جاده‌ای مفید است. در این آزمایشگاه می‌توان تأثیر نوع خاک را روی برهم‌کنش شنی (چرخ) مشاهده کرد. همچنین تأثیر ناهمواری‌های مسیر حرکت را می‌توان در ترددپذیری وسیله نقلیه خارج جاده‌ای دید. نتایج کار تجربی در صحنه‌گذاری نتایج تحقیقات عددی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری مفید هستند.

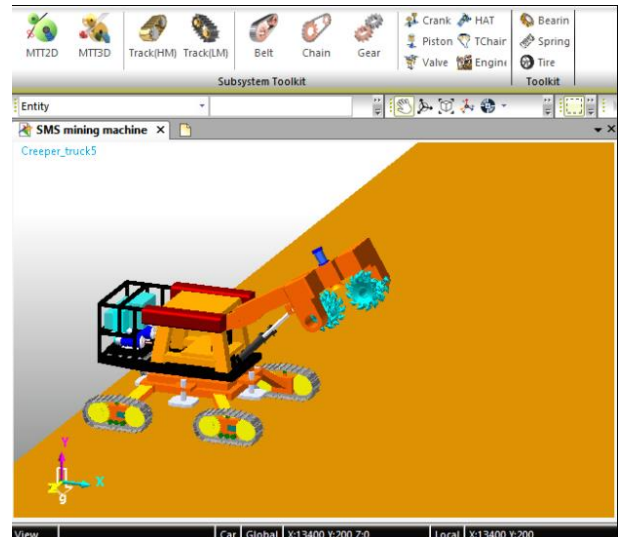
۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

دلایل افزایش علاقه‌مندی به معادن زیردریایی از جمله افزایش شدید تقاضا برای مواد خام فلزی بیان شدند [۳]. تحقیقات انجام شده برای ترددپذیری وسایل نقلیه شنی‌دار در خاک کف اقیانوس‌ها مرور شد که می‌توان آن‌ها را به سه دسته اصلی پروژه‌های شبیه‌سازی، پروژه‌های مبتنی بر روابط نظری و فیزیکی و پروژه‌های آزمایشگاهی تقسیم کرد. کیم و همکاران در تحقیقات خود هم برای ترددپذیری وسایل نقلیه بر روی کف اقیانوس‌ها مدل دینامیکی ارائه کرده‌اند که تأثیر نیروهای هیدرودینامیکی را در نظر گرفته است [۱۱]. همچنین آن‌ها در آزمایش‌های تجربی خود روش‌هایی ساده‌سازی شده عملی را برای وارد کردن تأثیر نیروهای هیدرودینامیک به ترددپذیری وسایل نقلیه شنی‌دار کف اقیانوس‌ها ارائه کردند [۱۰]. دای و همکاران پژوهش‌هایی را برای بررسی تطبیق نتایج شبیه‌سازی‌های مکانیکی نظیر نرم‌افزار ریکورداین با نتایج آزمایشگاهی انجام دادند [۶]. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد یکی از دغدغه‌های اصلی محققین حوزه این صنعت، تطابق مدل‌های سنتی خاک با ویژگی‌های خاک اعماق اقیانوس است. دای و همکاران نشان دادند که می‌توان با تقریب قابل قبولی از همان مدل‌های سنتی مکانیک خاک که توسط وونگ و بکر ارائه شده‌اند، برای خاک کف دریا نیز استفاده کرد [۶]. دای و همکاران در تحقیقات خود نشان دادند که اضافه کردن تیغه تراش به وسیله نقلیه شنی‌دار تأثیر مخربی بر ترددپذیری و کنترل آن ندارد و وضعیت جابه‌جایی وسیله نقلیه در کف اقیانوس باز هم مطلوب می‌ماند [۱۵].

در پایان می‌توان با استناد به تحقیقات گذشتگان چند نتیجه‌گیری مهم را برای استفاده در پژوهش‌های آتی گرفت:

۱. شبیه‌سازی‌هایی چون ریکورداین از دقت و اعتبار لازم برای انجام شبیه‌سازی‌های وسایل نقلیه شنی‌دار (برای بررسی پیمایش کف اقیانوس) برخوردارند.
۲. مدل‌های سنتی ترامکانیک مانند مدل‌های ارائه شده توسط وونگ و بکر می‌توانند با تقریب قابل قبولی برای مدل کردن خاک کف اقیانوس‌ها نیز استفاده شوند.
۳. برای بررسی تأثیر نیروهای هیدرودینامیک و شناوری کیم [۱۰] و دای [۶] در تحقیقاتشان روش‌هایی را پیشنهاد کرده‌اند که می‌تواند در تحقیقات آینده مورد استفاده قرار گیرد.

توسعه آزمایشگاه ارزیابی ترددپذیری خودروی خارج جاده‌ای مفید است. در این آزمایشگاه می‌توان تأثیر نوع خاک را روی برهم‌کنش شنی (چرخ) مشاهده کرد. همچنین تأثیر ناهمواری‌های مسیر حرکت را می‌توان در ترددپذیری



شکل ۲۸: محیط شبیه‌ساز ریکورداین [۱۵]

۴ فرصت‌های تحقیقاتی پیش رو

صنایع متعددی در کشور و جهان (مانند کشاورزی، راه‌سازی، نظامی، محیط‌زیست و امدادونجات) نیازمند اطلاعات در حوزه خودروهای خارج جاده‌ای هستند. ترددپذیری یکی از چالشی‌ترین موضوعات در پژوهش‌های اخیر مرتبط با خودروهای خارج جاده‌ای می‌باشد [۲]. زیرا در سال‌های اخیر به حوزه‌های جدیدی مانند پیمایش سطح سیاره‌های دیگر [۲۶] و پیمایش کف اقیانوس‌ها جهت استخراج معادن اعماق اقیانوس پرداخته شده است [۲۷].

شرکتی مانند «سیمک تکنولوژی»^۱ اقدام به ساخت چند نمونه وسیله نقلیه شنی‌دار کف اقیانوس پیمایش جهت حفاری در اعماق اقیانوس پرداخته است [۲۸]. (شکل ۲۹ یکی از محصولات شرکت مذکور را نشان می‌دهد).



شکل ۲۹: کف اقیانوس پیمایش آلفا ۸ [۲۸]

یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین مسائل در ترددپذیری، برهم‌کنش شنی (چرخ) با خاک هست. با تفاوت نوع و شرایط فیزیکی خاک، رفتار آن در مقابل شنی (چرخ) متفاوت می‌شود. شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی و مشاهده تجربی از گذشته تا به امروز یکی از روش‌های محققین برای بررسی ترددپذیری

¹Simec-technologies

- [13] Wong, Jo Yung. *Theory of ground vehicles*. John Wiley & Sons, 2008.
- [14] Wong, Jo Yung. *Terramechanics and off-road vehicle engineering: terrain behaviour, off-road vehicle performance and design*. Butterworth-heinemann, 2009.
- [15] Dai, Y, Chen, LS, Zhu, X, and Liu, H. Modelling and simulation of a mining machine excavating seabed massive sulfide deposits. *International Journal of Simulation Modelling*, 15(2):377-387, 2016.
- [16] Taheri, Sh, Sandu, C, Taheri, S, Pinto, E, and Gorsich, D. A technical survey on terramechanics models for tire-terrain interaction used in modeling and simulation of wheeled vehicles. *Journal of Terramechanics*, 57:1-22, 2015.
- [17] Soane, BD, Blackwell, PS, Dickson, JW, and Painter, DJ. Compaction by agricultural vehicles: a review ii. compaction under tyres and other running gear. *Soil and Tillage Research*, 1:373-400, 1980.
- [18] Soane, BD, Dickson, JW, and Campbell, DJ. Compaction by agricultural vehicles: A review iii. incidence and control of compaction in crop production. *Soil and Tillage Research*, 2(1):3-36, 1982.
- [19] Yong, Raymond N. Track-soil interaction. *Journal of Terramechanics*, 21(2):133-152, 1984.
- [20] Adams, John A, Endo, Albert S, Stolzy, Lewis H, Rowlands, Peter G, and Johnson, Hyrum B. Controlled experiments on soil compaction produced by off-road vehicles in the mojave desert, california. *Journal of Applied Ecology*, pp. 167-175, 1982.
- [21] Braunack, Michael Verno. *Effect of duration of impact on soil properties*. Canberra, ACT, CSIRO Division of Water and Land Resources, 1984.
- [22] Jakobsen, BF and Greacen, EL. Compaction of sandy forest soils by forwarder operations. *Soil and Tillage Research*, 5(1):55-70, 1985.
- [23] آزمايش نفوذ مخروط-ويکي پديا-دانشنامه آزاد. <https://fa.wikipedia.org/wiki/>، ۲۰۱۸/۰۸/۱۴.
- [24] Rojek, Jerzy, Onate, Eugenio, Labra, Carlos, and Kargl, Hubert. Discrete element simulation of rock cutting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(6):996-1010, 2011.
- [25] Edem software: powered by discrete element method (dem) technology, 2018.
- [26] Gallina, Alberto, Krenn, Rainer, and Schäfer, Bernd. On the treatment of soft soil parameter uncertainties in planetary rover mobility simulations. *Journal of Terramechanics*, 63:33-47, 2016.
- [27] Dai, Yu and Liu, Shao-jun. Theoretical design and dynamic simulation of new mining paths of tracked miner on deep seafloor. *Journal of Central South University*, 20(4):918-923, 2013.
- [28] to fuveau. building and equipment of marine engines bouches-du-rhone. <http://www.simec-technologies.com/>, 2018-08-18.
- وسيله نقلیه خارج جاده‌ای دید. به این منظور، از تجهیزات آزمایشگاهی لازم برای سنجش ترددپذیری وسيله نقلیه خارج جاده‌ای استفاده می‌گردد. نتایج کار تجربی می‌تواند در صحنه‌گذاری نتایج تحقیقات عددی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری مفید باشند.
- ## مراجع
- [۱] خودروی بیابانگرد. <https://fa.wikipedia.org/wiki/>، ۲۰۱۸/۰۸/۰۷.
- [۲] نوربخش، سید وحید و مسیح طهرانی، مسعود. اهمیت ترامکانیک در طراحی خودروهای خارج جاده‌ای. *مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران*، ۲۶(۱۱۶):۵-۱۶، ۱۳۹۶.
- [3] Dai, Yu and Liu, Shao-jun. An integrated dynamic model of ocean mining system and fast simulation of its longitudinal reciprocating motion. *China Ocean Engineering*, 27(2):231-244, 2013.
- [۴] این روایات غول پیکر، کابل‌های اینترنت پرسرعت زیر دریا را تعمیر می‌کند. <http://kooy.ir/News1728.html>، ۲۰۱۸/۰۸/۰۷.
- [۵] درفش‌پور، سجاد و مردانی، عارف. مروری بر مدل‌های ترامکانیک تجربی ارائه شده برای تعامل چرخ و خاک و ساییل چرخدار. در *دهمین کنگره مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران*، ۱۳۹۵.
- [6] Dai, Y, Zhu, X, Chen, LS, Liu, H, Zhang, T, and Liu, SJ. A new multi-body dynamic model for seafloor miner and its trafficability evaluation. *International Journal of Simulation Modelling*, 14(4):732-743, 2015.
- [7] Schulte, E, Handschuh, R, Schwarz, W, et al. Transferability of soil mechanical parameters to traction potential calculation of a tracked vehicle. in *Fifth ISOPE Ocean Mining Symposium*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003.
- [8] Yamazaki, T, Komine, T, Kawakami, T, et al. Geotechnical properties of deep-sea sediments and the in-situ measurement techniques. in *Sixth ISOPE Ocean Mining Symposium*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2005.
- [9] Choi, Jong-Su, Hong, Sup, Chi, Sang-Bum, Lee, Hyun-Bok, Park, Cheong-Kee, Kim, Hyung-Woo, Yeu, Tae-Kyeong, and Lee, Tae Hee. Probability distribution for the shear strength of seafloor sediment in the kr5 area for the development of manganese nodule miner. *Ocean Engineering*, 38(17-18):2033-2041, 2011.
- [10] Kim, Hyung-Woo, Hong, Sup, Choi, Jong-su, Lee, Tae Hee, et al. An experimental study on tractive performance of tracked vehicle on cohesive soft soil. in *Fifth ISOPE Ocean Mining Symposium*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003.
- [11] Kim, Hyung-Woo, Hong, Sup, Choi, JongSu, Yeu, Tae-kyeong, et al. Dynamic analysis of underwater tracked vehicle on extremely soft soil by using euler parameters. in *Sixth ISOPE Ocean Mining Symposium*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2005.
- [12] Janosi, Zoltan. The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils. in *Proc. of 1st Int. Conf. of ISTVS. Turin., 1961*, 1961.