

شبیه‌سازی برهم‌کنش چرخ و خاک با استفاده از نرم افزار سیمولینک (۴۴۷)

محمد حسین قیصری^۱، محمد لنوی^۲

چکیده

یکی از مسائل مهم در خودروهای خارج از جاده ارتقاء عملکرد گیرایی آنها می‌باشد. تحرک چنین وسایلی به عنوان یک خصوصیت کلیدی تلقی می‌گردد که چرخ در آن نقش حیاتی را ایفا می‌نماید. با توسعه و ارتقای توانایی رایانه‌ها و مکانیک محاسباتی، شبیه‌سازی سیستم برهم‌کنش چرخ و خاک به منظور دستیابی به راندمان عملکردی بالا بسیار قابل اهمیت و ضروری تلقی می‌گردد. مدل‌های گوناگونی توسط محققین به منظور بیان برهم‌کنش چرخ و خاک بیان شده است. شبیه‌سازی روابط موجود بین چرخ و خاک بر اساس پارامترهایی همچون نشست خاک، لغزش چرخ و سایر عوامل دیگر امری بسیار پیچیده می‌باشد. کلید اساسی در این شبیه‌سازی، محاسبات نیروهای تماسی در ناحیه بین چرخ و خاک می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از معادلات موجود که تابعی از خصوصیات چرخ و خاک در ناحیه تماس می‌باشد، ساختار اصلی بدنه نرم افزار سیمولینک (*Simulink*) طراحی گردیده است. داده‌های ورودی همچون سرعت خطی و زاویه‌ای و مشخصات خاک و چرخ، در برنامه تحلیل گر مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. با توجه به تعاریف موجود داده‌های خروجی نیرو، گشتاور و سایر پارامترهای مؤثر در عملکرد چرخ و خاک بر حسب زمان نمایش داده می‌شود. در پایان با استفاده از روابط حاکم و داده‌های حاصل از مدل، به مطالعه و پیش‌بینی عملکرد گیرایی چرخ پرداخته شده است.

کلیدواژه: برهم‌کنش چرخ و خاک، شبیه‌سازی، گیرایی، سیمولینک

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه شیراز، پست الکترونیک: mhghaissari@gmail.com

۲- دانشیار بخش مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه شیراز

مقدمه

نظریه های مختلفی برای بیان پارامترهای مؤثر در برهمکنش چرخ و خاک توسط محققین متعددی ارائه گردیده است. پیش بینی برهم کنش چرخ و خاک، بطور کلی بر اساس تنش و کرنش خاک با استفاده از چسبندگی خاک، زاویه اصطکاک داخلی خاک، نشست و تحمل پذیری خاک که بعنوان شاخص مخروطی خاک شناخته می شود، انجام می گیرد. به منظور دستیابی به چنین نتایجی پارامترهای مؤثر در عملکرد مربوط به چرخ و خاک می بایست به دقت اندازه گیری شود. تئوری های مربوط به آنالیز روابط چرخ و خاک بدلیل نامتجانس بودن و رفتار طبیعی غیرالاستیک خاک بسیار پیچیده می باشند. علم ترا مکانیک در حقیقت به بررسی و مطالعه خصوصیات خاک، بخصوص به بیان روابط چرخ و خاک می پردازد. در علم ترا مکانیک روشهای گوناگونی به منظور مدل سازی بر هم کنش چرخ و خاک و عملکرد آن بکار برده شده اند. مدل های برهم کنش ارائه شده در بیان چنین روابطی را می توان به سه دسته عمده تقسیم نمود [6]: ۱- روش Wes^1 ۲- روش $Bekker^3$ ۳- روش حل ریاضی^۲. در روش نخست مدل سازی بر اساس مقاومت به نفوذ خاک $(CI)^3$ به عنوان مؤثرترین پارامتر مورد استفاده قرار می گیرد. در روش دوم با استفاده از پارامترهای بدست آمده توسط دستگاهی به نام بومتر^۴ که توسط بکر در سال ۱۹۶۵-۱۹۶۹ طراحی و ساخته شد به ارائه مدلی برای بیان برهم کنش چرخ و خاک با بکار گیری پارامترهایی چون k_ϕ ، k_c و n پرداخته شد. در این روش مبنای اصلی مدل بر اساس تئوری الاستیک خاک بنیان گردیده است. با استفاده از ثابت های بدست آمده از آزمایش صفحه ای فشار- نشست و حلقه برشی به بیان رفتار برشی و در نتیجه به عملکرد گیرایی چرخ پرداخته شده است [7].

مبنای اصولی در روش سوم را می توان بر اساس تئوری پلاستیک خاک، مقاومت برشی و سایر پارامترهای ثابت همچون چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و چگالی خاک بیان نمود. در حقیقت مدل سازی ریاضی خاک را می توان به دو صورت عددی و تحلیلی تقسیم نمود [6]. امروزه علاوه بر روشهای فوق، شاهد کاربرد روز افزون برنامه های شبیه سازی برهم کنش چرخ و خاک با تلفیقی از تئوریهای فوق می باشیم. در سال ۲۰۰۳ اسمولویچ^۵ به بیان مدلی برای عملکرد گیرایی چرخ بر اساس معادلات ریاضی پرداخت. وی با استفاده از معادلات سهمی گون ناحیه تماسی بین چرخ و خاک در دو حالت ترمزی و متحرک چرخ، به شبیه سازی عملکرد گیرایی بر روی خودرو چهار چرخ محرک پرداخت [10]. در سال ۲۰۰۶ نیز فوکامی و همکاران^۶ به بیان مدلی ریاضی برای جابجایی خاک در زیر چرخ صلب بر اساس معادلات گوسی و بدنبال آن به توزیع تنش در خاک پرداختند [2]. در سال ۲۰۰۱ یوشیدا و هامانو^۷ به بررسی و شبیه سازی رفتار حرکت دینامیکی جستجوگر چرخ ساره ای در حالتی که بر روی سطوح ناصاف زمین حرکت می نماید پرداختند. آنها روابط تنش برشی بین چرخ و خاک و تأثیر آن بر عملکرد گیرایی بر مبنای نسبت لغزش با توجه به سرعت خطی و زاویه ای جستجوگر را مورد بررسی قرار دادند و به ارائه مدلی برای شبیه سازی رفتار چرخ و خاک بر اساس نسبت گیرایی و لغزش چرخ بر مبنای زمان دست یافتند [11]. در سال ۲۰۰۴ رنگ لاو^۸ به شبیه سازی سیستم ترمزی با استفاده مدل سیمولینک مربوط به چرخ پرداخت [5]. در سال ۲۰۰۵ بویر^۹ و همکاران روابط موجود بین چرخ و خاک در جستجوگر چرخ سیاره ای را مورد مطالعه قرار دادند و به مقایسه بین داده های تجربی و شبیه سازی شده بر اساس معادلات بکر پرداختند. پارامترهایی چون ثابت k_ϕ ، k_c ، ϕ و چگالی خاک در مدل آنها نیز مورد توجه قرار گرفت. آنها به بیان روابط زمانی بر اساس نشست، لغزش، مقاومت لغزشی و کشش پرداختند [1].

1. Waterways Experiment Station method(WES)

2. Mathematical method

3. Cone Index

4. Bevameter (Bekker Value Meter)

5. Shmulevich

6. Fukami

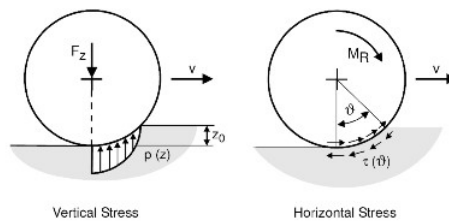
7. Yoshida and Hamano

8. Rangelov

9. Bauer

مواد و روشها:

بر اساس تئوری ترامکانیک برهم کنش خاک به دو تغییر شکل افقی و عمودی که متناسب با تنش های بوجود آمده می باشد تقسیم می گردد. لذا با توجه به آن می توان روابط بین چرخ و خاک را با استفاده از تئوریهای فشار- نشست و تنش برشی-جابجایی خاک بیان نمود. براساس این نظریه مقاومت خاک، در ناحیه تماسی بین چرخ و خاک، به دو مقاومت عمودی و افقی تقسیم بندی می گردد (شکل ۱).



شکل ۱. تنش های عمودی و افقی در ناحیه تماس بین چرخ و خاک

به منظور اندازه گیری مقاومت عمودی خاک از آزمون صفحه فشار، بر اساس دو پارامتر فشار و نشست، بطور گسترده ای استفاده می گردد. منحنی اندازه گیری شده با استفاده از فرمول بکر تقریب زده می شود و بدنبال آن پارامترهای k_c ، k_ϕ و n اندازه گیری می گردد [12].

$$P = \left[\frac{Kc}{b} + K_\phi \right] z^n \quad (1)$$

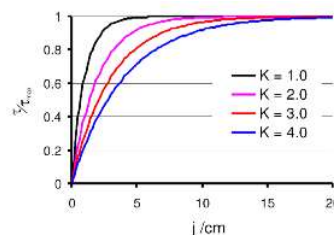
مقاومت افقی خاک نیز براساس آزمایش برشی و اندازه گیری تنش برشی ماکزیمم در فشارهای عمودی گوناگون تعیین می شود که بدنبال آن c و ϕ خاک تعیین می گردد. ماکزیمم تنش برشی توسط معادله موهر-کلمب بیان شده است.

$$\tau_{max} = c + \tan \phi \quad (2)$$

در مدل، تنش برشی حاصل که تابعی از تغییر شکل برشی خاک (j) می باشد، با استفاده از معادله جانوسی و هاناماتو^۱ بکار برده شده است که به شرح زیر می باشد:

$$\tau = \tau_{max} \left(1 - e^{-j/k} \right) \quad (3)$$

k مدول مماسی تغییر شکل افقی برشی خاک است که محدوده آن بین ۱-۳ سانتی متر می باشد. بطور معمول این مقدار در حدود ۲/۵ سانتی متر در نظر گرفته می شود (شکل ۲).

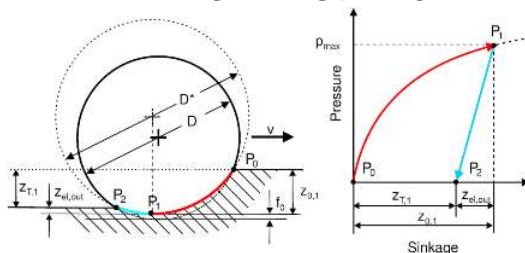


شکل ۲. رابطه جابجایی برشی با توجه به معادله جانوسی و هاناماتو

¹ Janosi and Hanamoto

مدل استفاده شده در سیمولینک:

شبه سازی رفتار چرخ لاستیکی امری بسیار پیچیده می باشد. به منظور بیان رفتار الاستیک چرخ از دایره جانشینی بزرگتر برای تقریب سازی تغییر شکل چرخ استفاده می گردد. این مدل توسط بکر بیان گردیده است. در شکل (۳) نمای کلی مدل دایره جانشینی نشان داده شده است. در شکل ارائه شده، خط قرمز نشان دهنده حالت پلاستیک و خطوط آبی و سبز مبین حالت الاستیک در مدل می باشد. میزان D^* در مدل از تعادل بین نیروی واکنش عمودی بین چرخ و خاک بدست می آید. عکس العمل عمودی خاک نیز از انتگرال عددی فشار مکانی در زیر چرخ محاسبه می گردد [4], [8].



شکل ۳. نمای کلی مدل دایره جانشینی

رابطه بین دو قطر دایره D (قطر چرخ) و D^* (قطر دایره جانشینی) را می توان بصورت ذیل ارائه نمود:

$$\frac{D^*}{D} \approx \left[\sqrt{1 + \frac{f_0}{z_{0,1}}} + \sqrt{\frac{f_0}{z_{0,1}}} \right] \quad (4)$$

که در آن f_0 تغییر شکل چرخ و $z_{0,1}$ نشست خاک در اثر عبور چرخ می باشد. رابطه بین تغییر شکل چرخ (f_0) و نیروی عمودی (F_Z) بر روی سطح خاک سفت را نیز بوسیله معادله سهمی گون زیر می توان بیان نمود:

$$F_Z = Af_0^2 + Bf_0 \quad (5)$$

پارامترهای A و B ، بر اساس داده های f_0 و F_Z اندازه گیری شده بدست می آید. در صورتی که آزمایش ها در چند فشار باد مختلف صورت گیرد بهترین حالت محاسبه ضرایب در آن برازش غیر خطی می باشد. برای این منظور از کمینه مربعات استفاده می گردد که به شرح ذیل می باشد:

$$\sum_{\forall i} [F_{zi} - F_z(f_{0i})]^2 = \min \quad (6)$$

$$A = a_1 p + a_2 p^2 \quad \sum_{\forall i} [B_i - B(P_i)]^2 = \min \quad (7)$$

$$B = b_1 + b_2(1 - e^{-b_3 p}) \quad \sum_{\forall i} [A_i - A(P_i)]^2 = \min$$

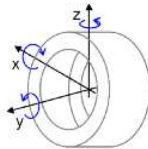
بنابراین با استفاده از رابطه بین فشار باد چرخ، نشست و تغییر شکل خاک می توان به خصوصیات الاستیک چرخ دست یافت. شعاع غلتش دینامیکی چرخ نیز در این مدل بر اساس معادله زیر بیان گردیده است:

$$r_D = \lambda r_0 + (1 - \lambda) \left(r_0 - \frac{F_z^N}{c_z^N} \right)$$

$$\lambda = \lambda_N + (\lambda_{2N} - \lambda_N) \left(\frac{F_z}{F_z^N} - 1 \right) \quad (8)$$

که در آن r_0 شعاع چرخ در حالت بدون بار، F_z بار واقعی چرخ، F_z^N بار اسمی چرخ در شرایط استاندارد، C_z^N نرخ ارتجاعی عمودی چرخ، λ_N و λ_{2N} ضرایب مربوط به باراسمی چرخ می باشند. همچنین سیستم مختصاتی که در مدل مورد استفاده قرار گرفته است، در شکل (۴) نمایش داد شده است.

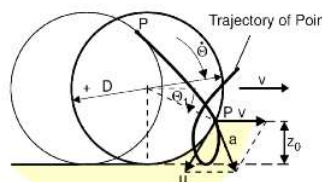
Wheel Carrier Coordinates



شکل ۴. سیستم مختصاتی در مدل

محاسبه نیروی گیرایی، جانبی، مقاومت غلتشی و گشتاوری در برهم کنش چرخ و خاک:

محاسبه نیروی گیرایی و همچنین گشتاور مورد نیاز بر اساس فشار مکانی و جابجایی برشی در مسیر تماس می باشد. با استفاده از قطر دایره جانشینی و نشست واقعی، فشار مکانی از رابطه نشست- فشار تعیین می گردد. محاسبه جابجایی برشی تا حدی پیچیده می باشد. با توجه به شکل (۵) اختلاف سرعت نسبی بین نقاط پیرامونی چرخ و زمین در طول مسیر تغییر می کند. با بکار بردن تعریف لغزش فقط در نقطه تماس دارای اختلاف سرعت صفر خواهیم بود، درحالیکه در بقیه نقاط شاهد سرعت متفاوتی خواهیم بود. بنابراین مدل جابجایی برشی مکانی را با انتگرال گیری زمانی حاصل از اختلاف سرعت می توان تعیین نمود. باانتگرال گیری از نیروی برشی در مسیر نیروی تماسی، نیروی محیطی چرخ حاصل می گردد.

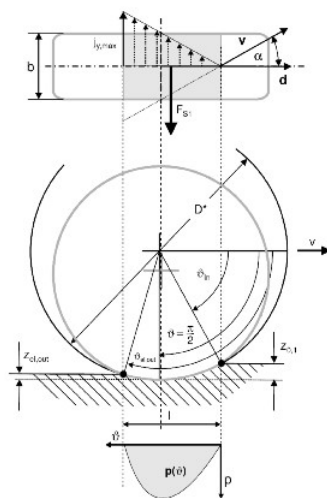


شکل ۵. خط سیر نقطه ای بر روی چرخ به هنگام عبور بر روی سطح خاک نرم.

گشتاور از حاصلضرب تفاضل نیروی محیطی و نیروی غلتشی در شعاع غلتشی دینامیکی چرخ حاصل می گردد. در لغزش صفر، اختلاف سرعت در مسیر صفر خواهد بود. در سطوح سفت مسیر تماسی صاف می باشد، درحالی که در خاکهای نرم خط تماسی منحنی وار و سرعت تفاضلی در طول خط تماسی وابسته به نشست خاک می باشد. در نتیجه شاهد تغییر شکل برشی و در کل نیروی برشی خواهیم بود.

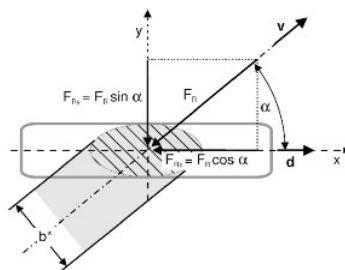
نیروی جانبی چرخ بر اساس مطالعات سانگ هرت [9] و وگرنگو [3] بیان گردیده که بر اساس آن تنش برشی زیر چرخ بر اساس فشار مکانی و جابجایی برشی مکانی محاسبه می گردد (شکل ۶). نیروی جانبی در اثر تنش برشی در مسیر تماس بین چرخ و خاک و مقاومت غلتشی ناشی از آن ایجاد می گردد.

¹. Schwanghart



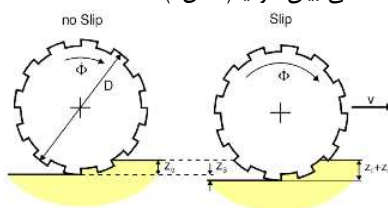
شکل ۶. نیروی جانبی بر روی خاک نرم بر اساس فشار و تغییر شکل برشی

همچنین مقاومت غلتشی بر اساس تراکم خاک حاصل از تغییر شکل پلاستیک خاک بیان شده است که بستگی به طول ناحیه تماسی دارد. در مدل، مقاومت غلتشی چرخ به دو مولفه F_{Ry} و F_{Rx} تقسیم گردیده است که به نیروی جانبی حاصل از تغییر شکل برشی اضافه می گردد. همچنین مقاومت خمشی چرخ نیز بعنوان مقاومت غلتشی داخلی در نظر گرفته می شود. (شکل ۷).



شکل ۷. مقاومت غلتشی در زاویه لغزشی بالا

بنابراین نیروی مقاومت غلتشی را می توان شامل سه جزء دانست:
 ۱- مقاومت غلتشی تغییر شکل پلاستیک خاک ۲- مقاومت غلتشی ناشی از خمش تایر ۳- مقاومت غلتشی حاصل از نشست و لغزش. مقادیر لغزش بالای چرخ، باعث افزایش مقدار نشست خاک می گد. نظریه اساسی در محاسبه این عامل، حجم خاکی است که در واحد زمان بوسیله فضای بین آج چرخ جابجا می گردد. این نظریه نخستین بار توسط استینر^۲ ارائه شد که بر اساس آن، اثر معنی دار لغزش چرخ بر مقدار مقاومت غلتشی بیان گردید (شکل ۸).



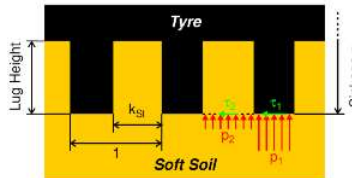
¹. Grecenko

².Steiner

شکل ۸. اثر لغزش در نشست خاک

سایر عوامل مؤثر:

عامل مؤثر دیگر مقاومت برشی ماکزیمم خاک می باشد که به آن اشاره گردید. مقاومت برشی ماکزیمم بین چرخ و خاک در تخمین اولیه، تابعی از فشار عمودی و ضریب اصطکاک می باشد. معمولاً این ضریب بین ۱/۳-۱ می باشد. مدل، مینیمم مقدار بین چسبندگی و اصطکاک داخلی خاک را در نظر می گیرد. عامل دیگری را که می توان بیان نمود، اثر گام چرخ می باشد. دو پارامتر ارتفاع آج و رابطه بین آج و فضای بین آج چرخ در مدل در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل (۹) دیده می شود اختلاف بین دو سطح فشار P_1 و P_2 در بین آج چرخ قابل ملاحظه می باشد. در قسمت پایین آج مقاومت برشی و در نتیجه نیروی برشی چرخ و خاک بیشترین مقدار را دارا می باشد.

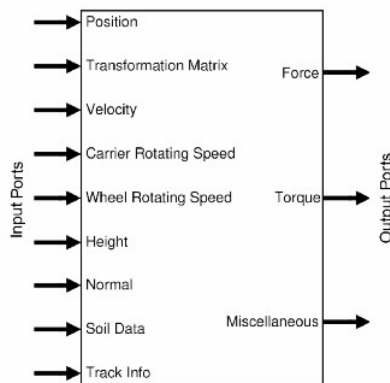


شکل ۹. اثر گام چرخ بر تنش برشی

لازم به ذکر است که عوامل دیگری نیز در برهم کنش چرخ و خاک مؤثر می باشد که می توان به اثر گشتاور ترمزی چرخ، اثر دینامیکی چرخ و خاک و خصوصیت دینامیکی خاک و فشار دینامیکی اشاره نمود [4].

ساختار اصلی مدل:

بدنه اصلی مدل شامل دو سیگنال ورودی و خروجی می باشد. مطابق شکل (۱۰) پارامترهای موقعیت مرکز حامل چرخ، ماتریس تبدیل مختصات، سرعت حامل چرخ، سرعت دورانی چرخ، مختصات ارتفاع سطح، بردار نرمال سطح، داده های مربوط به مشخصات نوع خاک و نوع چرخ، پس از ورود و تحلیل در تابع اصلی برنامه، بصورت سیگنالهای خروجی همچون نیرو، گشتاور و دیگر پارامترهای موجود ظاهر می گردند.



شکل ۱۰. بدنه اصلی برنامه تحلیل گر برهم کنش چرخ و خاک

داده های خروجی:

نیروها و گشتاور در نمایشگر خروجی نشان داده می شود که می توان از تعامل آنها به بیان عملکرد بین چرخ و خاک پرداخت. به غیر از دو سیگنال ذکر شده ، خروجی های دیگری همچون لغزش، زاویه لغزش، نیروی جانبی، تغییر شکل چرخ، شعاع دینامیکی و دیگر پارامترهای مورد نظر را نیز نمایش می دهد.

نتایج و بحث:

در مدل، مشخصات مربوط به خاک و چرخ مطابق جداول (۱) و (۲) وارد شده است. سرعت خطی چرخ $10/8 \text{ km/h}$ و سرعت زاویه ای آن 5 rad/s در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. مشخصات مربوط به خاک در مدل.

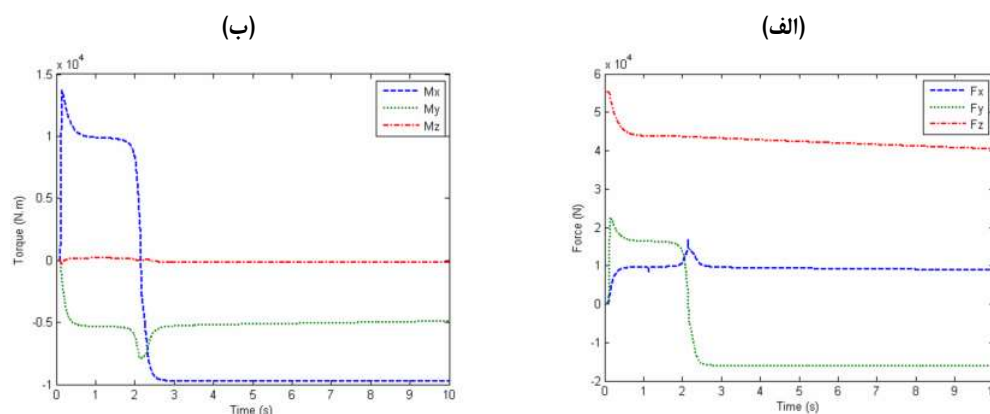
چگالی	c	ϕ	k_c	k_ϕ	n
لوم	۲	۲/۵	۱۸	۶	۰/۵
ماسه	۱/۹	۱	۲۰	۲۳	۰/۵۵
رس	۲	۳/۵	۳۵	۳۰	۰/۱۸

جدول ۲- مشخصات مربوط به چرخ در مدل.

شعاع چرخ	۵۹/۶cm
ماکزیمم فشار	۶bar
شعاع دینامیکی	۵۸cm
بار اسمی چرخ	۳۰۰۰N

نیرو و گشتاور:

نمودار نیرو و گشتاور مربوط به نتایج حل گر مدل در سه راستای X، Y و Z سیستم مختصاتی چرخ، در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.

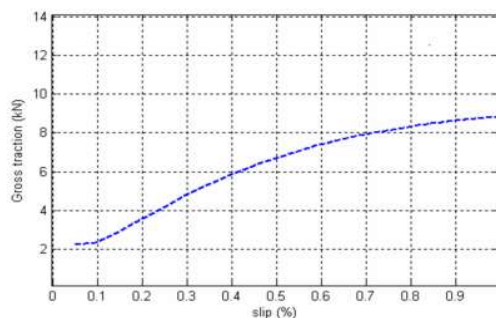


شکل ۱۱. نمودار (الف) - نیرو و (ب) - گشتاور اعمالی بر چرخ در سیستم مختصاتی آن

نیروهای وارد بر چرخ در دستگاه مختصات چرخ (F_x, F_y, F_z)، تابعی از پارامترهایی نظیر شعاع چرخ، ضریب نیرو بر واحد طول تماس بین چرخ و خاک، ضریب میرایی خاک، ضریب اصطکاک بین چرخ و خاک، سرعت لغزشی چرخ می باشد. همچنین تغییرات

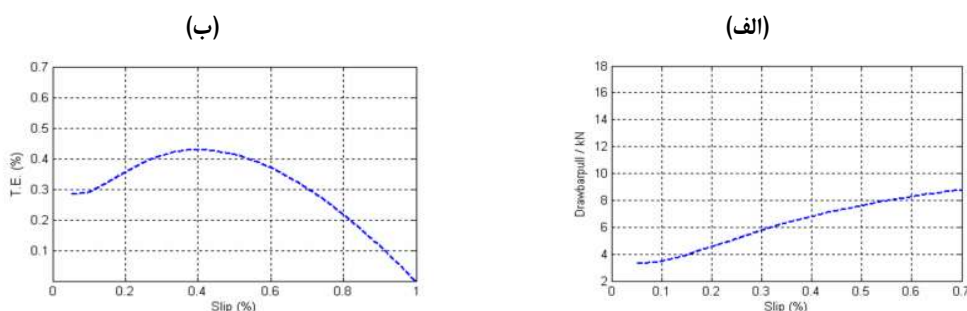
گشتاور اعمالی بر چرخ در حول محور X و Y (M_x, M_y)، تابعی از نیروهای بیان شده، شعاع چرخ در حالت بی باری و توزیع تنش در سیستم مختصاتی چرخ می باشد. پسجکا¹ [4] نشان داد که گشتاور حول محور X تابعی از (F_z) و (F_y) بوده به نحوی که با افزایش (کاهش) مقادیر (F_z) و (F_y) مقدار M_x نیز افزایش (کاهش) می یابد. همچنین گشتاور حول محور Y نیز رفتاری مشابه نسبت به نیروهای (F_x) و (F_z) دارد. با این استدلال، مقادیر منفی گشتاور، بعد از ۲ ثانیه در شکل (۱۱-ب) قابل توجیه می باشد.

در قسمتهای پیشین به بیان عوامل مؤثر در برهم کنش چرخ و خاک پرداخته شد. با توجه به نتایج حاصله از مدل و بدست آوردن نمودارهای مربوطه بر حسب زمان، می توان با تعامل نتایج، به بررسی و مطالعه در مورد پارامترهایی چون کشش مالبندی و راندمان گیرایی با توجه به معادلات موجود پرداخت. پس از تحلیل داده ها در شکل (۱۲) کشش ناخالص با افزایش لغزش بر صعودی را نشان می دهد.



شکل ۱۲. نیروی گیرایی ناخالص

شکل (۱۳) با استفاده از تعامل بین نتایج بدست آمده از مدل که شامل نیروی کشش ناخالص، مقاومت غلتشی و لغزش چرخ می باشد، حاصل شده است. همانطور که در شکل دیده می شود در لغزش ۴۰ درصد، ماکزیمم راندمان گیرایی در حدود ۴۳ درصد می باشد و با افزایش میزان لغزش چرخ، کشش مالبندی افزایش می یابد.



شکل ۱۳- نمودار (الف) نیروی مالبندی و (ب) راندمان گیرایی

جمع بندی:

مدل ارائه شده در نرم افزار سیمولینک با عوامل مؤثر تعریف شده و مشخص در آن و توانایی بالا در پیش بینی برهم کنش چرخ و خاک بعنوان یک راهکار عملی در ارائه مدلی توانمند قابل توجه می باشد. علاوه بر موارد ذکر شده در این مطالعه، تحقیق در مورد عوامل دیگری نیز چون زاویه لغزش، نشست خاک، ناحیه تماس بین چرخ و خاک و فشار در ناحیه تماس نیز، در بیان کلی تر برهم کنش چرخ و خاک ضروری بنظر می رسد.

¹.Pacejka



منابع:

- [1] Bauer, R., Leung, W. and Barfoot, T. 2001. *Experimental and Simulation Results of Wheel-Soil Interaction for Planetary Rovers*. Department of Mechanical Engineering. Dalhousie University. Canada.
- [2] Fukami, K., Ueno, M., Hashiguchi, K. and Okayasu, T. 2006. *Mathematical models for soil displacement under a rigid wheel*. Journal of Terramechanics : Vol.43:(287–301).
- [3] Grecenko, B. 1967. *Binomic slip-thrust equation for tractors on predominantly frictional soil*. Journal of Terramechanics, Vol.4:(37–54).
- [4] Pacejka, H. B. 2004. *Tyre and Vehicle Dynamics*. Britain, Elsevier.
- [5] Rangelov, K. Z. 2004. *Simulink Model of a Quarter-Vehicle with an Anti-lock Braking System*. Eindhoven.
- [6] Saarilahti, M. 2002. *Soil Interaction Model*, University of Helsinki , Department of Forest Resource Management .
- [7] Sally, A. Shoop.1993. *Terrain Characterization for Trafficability*. US Army Corps of Engineers. CRREL Report 93-6.
- [8] Schmidt, I. C. 1995. *Interaction of vehicle and terrain – results from 10 years research at IKK*. Journal of Terramechanics, Vol.32:(3–26).
- [9] Schwanghart, H. 1968. *Lateral Forces on steered tyres in loose soil*. Journal of Terramechanics, Vol.5:(5–29).
- [10] Shmulevich, I. and Osetinskya, A. 2003 . *A traction performance of a pushed/pulled drive wheel*. Journal of Terramechanics: Vol.40 :(33–50).
- [11] Yoshida, K., Hamano, H. 2001. *Motion Dynamics and Control of a Planetary Rover with Slip-Based Traction Model*. Tohoku University, Sendai, Japan.
- [12] Wong, J. W. 1989. *Terramechanics and Off-Road Vehicles*. Elsevier, Amsterdam.