

مدل سازی عددی مسائل تماسی برهم کنش خاک- تایر بر اساس تزویج روش‌های محاسباتی اجزای محدود و اجزای گسسته (۳۷۶)

محمد معراجی^۱، حسین اشرفی^۲، مهرداد فرید^۳

چکیده

یکی از تحقیقات اساسی در مکانیک خاک، بررسی برهم کنش سیستم‌های خاک- تایر می‌باشد. توسعه سریع قدرت و حافظه سیستم‌های کامپیوتری، محققان را در به کارگیری روش‌های عددی مدرن که به حافظه‌ی بالایی نیاز دارند، توانا ساخته است. در میان روش‌های محاسباتی، تحلیل به روش کلاسیک اجزای محدود در مسائل تماسی دوبعدی و سه بعدی خاک- تایر بارها به کار گرفته شده است. با این حال، قابل ذکر است که تحلیل به روش اجزای محدود، توانایی در برگیری دقیق شرایط مرزی منفرد را دارا نمی‌باشد و علاوه بر این، مدل سازی اجزای محدود خاک به عنوان پیکره‌ای پیوسته سبب ایجاد خطای غیر قابل پیش‌بینی در تحلیل سیستم‌های تماسی درگیر با خاک می‌شود. از سوی دیگر، روش اجزای گسسته با مدل سازی غیرپیوسته، توانایی خاصی در تحلیل تغییرشکل میکروسکوپی خاک را داراست و شرایط مرزی منفرد را به طور دقیق در برمی‌گیرد ولی این روش به زمان محاسبه‌ی بالایی نیاز دارد. بنابراین تزویج روش‌های محاسباتی اجزای محدود و اجزای گسسته به منظور بهره‌گیری از قابلیت‌های هر دو روش در تحلیل سیستم‌های تماسی خاک- تایر، اقدامی سودمند خواهد بود. در مقاله حاضر، پس از بیان مختصری بر ویژگی‌های هر دو روش، به ارائه نحوه‌ی بکارگیری تزویج این دو رهیافت در سیستم‌های محاسباتی تماسی پرداخته می‌شود.

کلیدواژه: روش اجزای محدود، روش اجزای گسسته، مسائل تماسی خاک- تایر

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

۲- دانشجو کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه شیراز

۳- استادیار، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز

۱- مقده

مسئله‌ی برهمکنش تاپر و خاک یکی از موضوعات مهم پژوهشی برای خودروسازان و محققین بخش مکانیک خاک می‌باشد. روش‌های مدل سازی متعددی به منظور بررسی برهمکنش تاپر بر روی خاک مورد استفاده قرار گرفته است. پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی اطلاعات، امکان بکارگیری شبیه‌سازی‌های عددی پیچیده در مسائل برهمکنش را افزایش داده است. همچنین، مسئله‌ی تماس تاپرهای یک خودرو با یک سطح ناهموار، به یک مسئله‌ی بسیار حساس در صنایع نظامی، هوافضا، خودروسازی و کشاورزی تبدیل شده است. اغلب برای حل این نوع مسائل تماسی از الگوریتم‌های انتگرال‌گیری زمان به طور ضمنی استفاده می‌شود و جزءبندی ریزی در حدود یک میلیون المان محدود برای بیانی دقیق از ساختار پیچیده‌ی تاپر و آج‌های آن مورد نیاز است. از این گذشته، این تحلیل‌ها همراه با توجه به مسائل چند میدانی نظیر گرم‌شدگی، سرخوردگی، تولید نویز و معادلات میدانی صوتی انجام می‌شوند [۱ و ۲]. لازم به ذکر است که چنین تحلیل‌هایی به دلیل رفتار مکانیکی پیچیده، نیازمند دانسته‌های جامعی در زمینه‌های مکانیک محیط‌های پیوسته، روش‌های عددی و کدنویسی در نرم افزارهای کاربردی هستند. متأسفانه علی‌رغم تلاش‌هایی که در سال‌های اخیر به مسئله مدل سازی برهمکنش تاپر و سطح صلب انجام شده در زمینه‌ی تاپر و خاک کارهای کمی انجام شده است که شاید دلیل اصلی آن، طبیعت پیچیده‌ی تاپر و حل همزمان با رفتار غیرخطی خاک است.

استفاده از رهیافت‌های متداول پیوسته در تحلیل به روش اجزای محدود در میکروساختارهایی مانند یک سازه‌ی ساختمانی در یک مقیاس طولی بسیار کوچکتر از موارد معمول، موفقیت آمیز است [۳]. با این وجود، در برخی موارد به دلیل گسترش دانسته‌ها در علم مکانیک میکروسکوپی به مدل سازی موادی برمی‌خوریم که غیرپیوسته هستند. موادی همانند خاک‌ها که مورد بحث این کار می‌باشند، کاندیدای مناسبی برای مدل سازی به عنوان یک سیستم غیرپیوسته می‌باشد [۴]. در سطوح مختلف عالم طبیعت، اکثر مواد و سیستم‌های فیزیکی غیرپیوسته هستند. میکروساختارهای بلوری همانند خاک به دلیل در برگیری دانه‌های غیرپیوسته در ساختار خود حتی در سطوح میکرونی هم غیرپیوسته هستند [۴ و ۵]. بنابراین مقیاس طولی که برای تحلیل چنین رفتارهای مکانیکی مورد نظر قرار می‌گیرد در فاصله‌بندی غیرپیوسته است. لذا ناتوانی مدل‌های مکانیک محیط‌های پیوسته کلاسیک در بازسازی مناسب رفتار مواد غیرپیوسته، منجر به توسعه‌ی مدل‌های گسسته شد [۶]. مدل عددی غیرپیوسته، برای نخستین بار، در حدود سال ۱۹۶۸ میلادی توسط گودمن^۱ و همکارانش [۷] در خاک و بتن بکاربرده شد.

اثر متقابل سیستم‌های خاک-تاپر نیز، در روابط تحلیل عددی نخستین، توسط یانگ^۲ و همکارانش [۸ و ۹] به وسیله روش اجزای محدود کلاسیک و در شرایط مرزی تقریبی و ساده‌سازی شده تحلیل شده‌اند. مدل خاک معرفی شده‌ی آنها یک مدل الاستیک بود ولی بعدها مدل الاستوپلاستیک خاک نیز مورد توجه قرار گرفت. رگلی^۳ و همکارانش [۱۰] مدل الاستوپلاستیک و الگوریتم تماس را برای آنالیز دوبعدی سیستم خاک-تاپر بکار بردند. با گسترش توسعه روش اجزای محدود، فرمول‌بندی‌های تماسی کاملتر و دقیقتری وارد تحلیل‌های برهمکنش سیستم‌های خاک-تاپر شدند [۲]. به دلیل اینکه اثر برهمکنش در مکانیک خاک، به عنوان نمونه‌ای از مسائل مکانیک تماس در طبیعت به حساب می‌آید، لذا یافته‌های علم مکانیک تماس محاسباتی از اهمیت خاصی در سیستم‌های خاک-تاپر مکانیک خاک محاسباتی برخوردار است. فرورز^۴ [۱۱] با شبیه سازی دوبعدی، مدلی برای برهمکنش تاپر رادیال و خاک ارائه کرد. در این مدل توجه بیشتری به ساختار اجزای تاپر شده است و توانایی آن در مدل سازی تماس بر روی سطوح مختلف افزایش یافته است. مدل تاپر سه بعدی اجزای محدود توسط ناکاشیما^۵ و همکاران [۱۲ و ۱۳]، برای تعیین میزان فرورفتگی استاتیک در خاک الاستیک با یک برنامه آنالیز تماسی تاپر سه بعدی توسعه داده شد.

از سوی دیگر، روش اجزای گسسته نه تنها برای مسائل مکانیک خاک یا سنگ بلکه برای خاک ورزی ساده و مسائل اثر متقابل چرخ - خاک نیز کاربرد دارد [۱۴-۱۶]. روش اجزای گسسته شامل اجتماع المان‌های دانه ای جدا از هم بوده که توسط یک برنامه کامپیوتری ساده انجام می شود. اویدا^۶ و همکاران [۱۷]، ابتدا قابلیت بکارگیری روش اجزای گسسته در مسائل تماسی خاک-تاپر را با توجه به آج‌های متفاوت نشان دادند. آن‌ها رد چرخ که معمولاً در آزمایشات صحرائی مشاهده می‌شود را نیز توسط روش اجزای گسسته به دست آوردند. چون در این پژوهش مسئله برای بررسی تماس و جمع بازه‌های زمانی در روش اجزای گسسته به عملیات

1- Goodman
2- Yong
3- Regli
4- Fervers

5- Nakashima
6- Oida
7- Pan and Reed
8- Horner

9- Raje
10- Half-space of soil

محاسباتی زیاد نیاز داشت، استفاده از روش اجزای محدود به همراه روش اجزای گسسته در جبران کاستی های هر دو روش کاملاً طبیعی بوده و باعث کاهش حجم محاسبات و سهولت در تعیین رفتار شکل آج تایر می شود. پن و رید^۱ [۱۸]، روش ترکیبی اجزای گسسته و محدود را در مسائل مکانیک سنگ استفاده کردند. مسائل جریان در سیلو نیز با روش ترکیبی اجزای گسسته و محدود آنالیز شد [۱۹]. هرنز^۲ و همکاران [۲۰]، قابلیت کاربرد کامل و دقیق روش ترکیبی اجزای گسسته و محدود را در مقیاس وسیع برخی مسائل مکانیک خاک نشان دادند. ناکاشیما و اویدا [۲۱]، با استفاده از الگوریتمی ساده در روش ترکیبی اجزای گسسته و محدود، سیستم خاک-تایر را مدل سازی کردند. راجه^۳ و همکارانش [۲۲]، نیز در سال ۲۰۰۷ میلادی، با ارائه الگوریتم های کاربردی، یک رهیافت جدید برای محاسبه تنش ناشی از بارگذاری خطی بر روی نیم فضای خاک^۱ توسعه دادند.

هدف اصلی این پژوهش ارتقای شبیه سازی کامپیوتری برای آنالیز برهمکنش خاک-تایر می باشد که روش اجزای محدود و گسسته برای این منظور به هم پیوند داده شده اند. باید توجه داشت که در شرایط واقعی که آج های تایر بر روی سطح خاک تماس پیدا می کنند، بسیاری از مدل های عددی که با فرض پیوستگی مواد شبیه سازی ایجاد شده اند، توانایی مدل سازی و حل معادلات در لبه های نوک آج را ندارند و به همین دلیل است که در غالب مدل های عددی، سطح تایر بدون برجستگی و صاف در نظر گرفته شده است. در برخی موارد برای در نظر گرفتن ناهموری های سطح، ضرایبی فرض شده و این ضرایب در مدل سازی دخالت داده شده است. به هر حال قابل توجه است که تکنولوژی اجزای محدود نیز در حال حاضر با دقت کافی قادر به کنترل شرایط مرزی منفرد نمی باشد. به خصوص در نوک آج تایر که تماس به عنوان نقطه منفرد میدان تنش رفتار می کند. از سوی دیگر روش اجزای گسسته همانطور که قبل از این بسیاری از محققین نشان داده اند، ذاتاً قابلیت آنالیز تغییر شکل یا جریان میکروسکوپی خاک را دارد. در روش اجزای گسسته باید توجه داشت که زمان محاسبه ی زیادی که صرف می شود نه فقط جهت بررسی تماس بین المان های ذره ای است بلکه به دلیل زیاد بودن بازه زمانی نر می باشد. در این تحقیق تلاش کردیم تا قابلیت های دو روش اجزای محدود و گسسته را با همدیگر جمع کرده و سیستم اثر متقابل تایر و خاک را تجزیه و تحلیل کنیم.

۲- آنالیز تماسی اجزای محدود و اجزای گسسته

به منظور محاسبه ی نیروی عکس العمل تماسی، در این بخش ابتدا رهیافت اجزای محدود، سپس رهیافت اجزای گسسته و در ادامه نیز ترکیب این دو رهیافت در تحلیل تماس بیان می شود. در این بخش به اختصار این موارد ارائه شده اند، ولی برای کسب اطلاعات بیشتر می توان به منابع [۲-۵] مراجعه شود.

۲-۱- تحلیل اجزای محدود

روش های مختلفی در آنالیز تماسی رهیافت اجزای محدود پیشنهاد شده اند [۲ و ۳]. به دلیل اهداف این پژوهش، یکی از ساده ترین آن ها که روش پنالتی^۱ است و به طور وسیعی در مسائل مختلف مهندسی استفاده می شود، انتخاب شده است. در روش پنالتی، تماس نقطه (۳) از یک جسم تماسی بر المان خطی هدف (۱-۲) را با توجه به پذیرش همپوشانی (u_n) می توان به صورت شماتیک مانند شکل ۱ بیان کرد. عکس العمل تماسی نرمال (R_3) را می توان توسط معادله ۱ تعریف کرد، که در آن (α) عدد پنالتی است که مفهوم فیزیکی آن ثابت فنر می باشد.

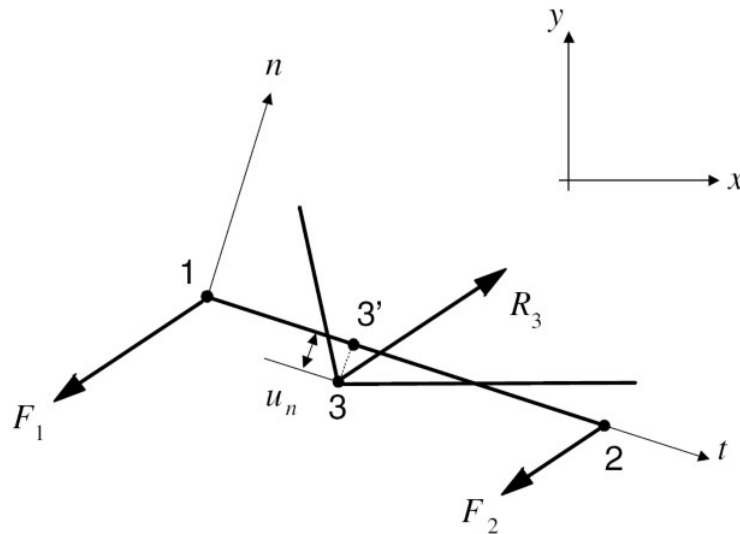
$$R_3 = -\alpha u_n \quad (1)$$

با استفاده از (R_3) می توان (R_3') را از رابطه ی عمل و عکس العمل نیوتن به دست آورد. بنابراین (F_1) و (F_2) برای نقاط هدف ۱ و ۲ با روابط زیر به دست آو می شوند:

$$F_j = N_j R_3' = -N_j R_3 \quad (2)$$

که در آن، ($j=1, 2$) بوده و (N_j) بیانگر توابع شکل المان خطی می باشد [۳]. اصطکاک کلمب^۲ را نیز می توان در جهت مماسی پس از جمع نمو عکس العمل مماسی در مقابل عکس العمل عمودی معرفی کرد [۲].

^۱- Penalty method
^۲- Coulomb friction



شکل ۱- تحلیل اجزای محدود تماس به روش پناستی

۲-۲- تحلیل اجزای گسسته

در مدل اجزای گسسته، نیروهای عمودی و مماسی تماسی به وسیله مدل کلوین^۱ که به صورت شماتیک در شکل ۲ هم نشان داده شده است، منتقل می شوند [۴ و ۵]. بر اساس این مدل، پاسخ تماسی نرمال (F_n) را می توان به شرط مشخص بودن جابجایی نسبی (Δu_n) و نرخ جابجایی نسبی ($\Delta \dot{u}_n$)، به صورت زیر محاسبه کرد:

$$F_n = -K_n \Delta u_n - C_n \Delta \dot{u}_n \quad (۳)$$

که در آن، (K_n) ثابت عمودی فنر می باشد و (C_n) به عنوان ضریب دمپینگ^۲ است با این شرط که، فاصله ی مراکز جرم دو المان اجزای گسسته (۲-۱)، که در شکل (۳-الف) نیز نشان داده شده، کمتر از $(r_i + r_j)$ شود. در معادله ی ۳، پاسخ دمپینگ مکمل که شامل عکس معادله (۱) می باشد، به عنوان دمپینگ موضعی^۳ نامیده می شود [۵].

پاسخ تماس مماسی را می توان با استفاده از اصطکاک کولمب به صورت روابط زیر بیان کرد:

$$F_t = -K_t \Delta u_t - f_t^v \quad (۴)$$

$$F_t < \alpha F_n$$

$$f_t^v = C_t \Delta \dot{u}_t$$

و یا

$$F_t = \alpha F_n \quad (۵)$$

$$F_t \geq \alpha F_n$$

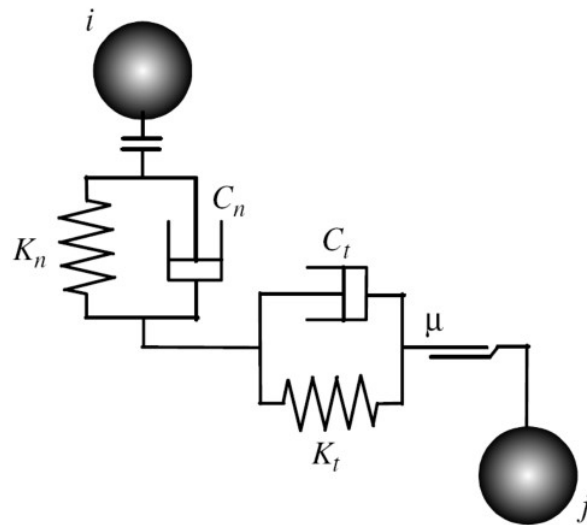
که در آن ها، $(K_t \Delta u_t)$ پاسخ مماسی، و (f_t^v) پاسخ ویسکوز مماسی می باشد. علامت منفی نیز در رابطه اول، بیانگر جهت مخالف جابجایی نسبی و نرخ جابجایی نسبی می باشد. اثر ممان پیچشی نیز به عنوان مؤلفه ای از پاسخ مماسی می تواند مورد نظر قرار داده شود.

مدل تماس نمونه دیواره با المان گسسته نیز در شکل (۳-ب) نشان داده شده است. فرآیند تماس دیواره با المان گسسته کاملاً مشابه فرآیند تماس المان محدود-المان گسسته می باشد. یکی از کارهای دشوار در تحلیل به روش اجزای گسسته، پیشاپیش قرار دادن ثوابت مجازی ماده از قبیل ثوابت فنر و فاکتورهای دمپینگ می باشد. ثوابت مقدار واحد، از محاسبات سعی و خطا و ثوابت مقدار متغیر، اغلب بر اساس تئوری تماسی هرگز به کار گرفته می شوند [۵]. در این تحقیق از تئوری هرگز استفاده شده است.

^۱- Kelvin model

^۲- Damping coefficient

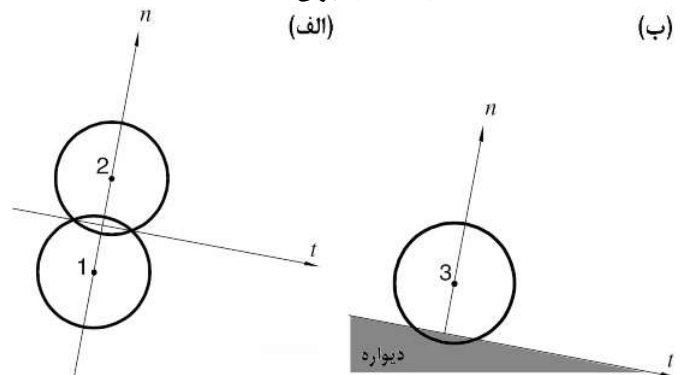
^۳- Local damping



شکل ۲- مدل اجزای گسسته

(الف)

(ب)



شکل ۳- (الف) مدل تماس اجزای گسسته، (ب) مدل تماس المان گسسته و دیواره

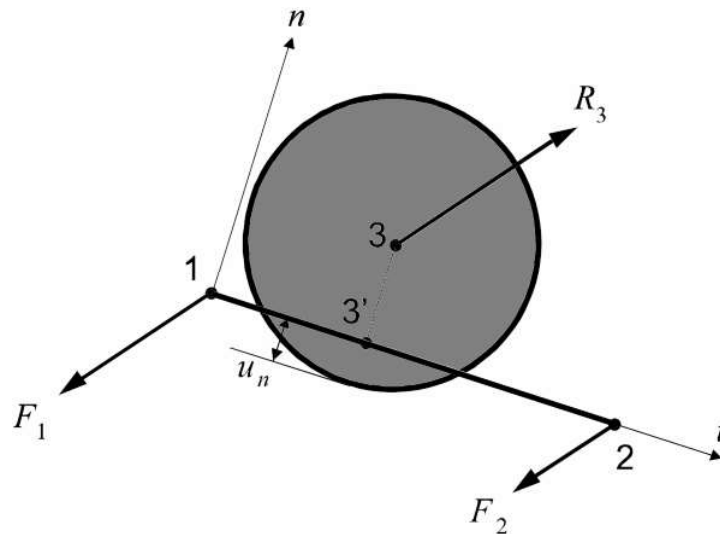
۲-۳- تحلیل به روش تزویج اجزای محدود- اجزای گسسته

فرض می‌شود که یک المان نمونه مانند ۳ از اجزای گسسته در تماس با بخشی از یک خط نمونه مانند ۱-۲ از اجزای محدود دوبعدی مانند شکل ۴ قرار گیرد. قابل توجه است که رفتار این حالت، مشابه تماس دیواره در آنالیز به روش اجزای گسسته می‌باشد. به هر حال، قطعه خطی المان محدود ممکن است مطابق با پاسخ مکانیکی تماس تغییر شکل پیدا کند. محاسبه جابجایی نسبی، به مانند تحلیل تماس به روش اجزای محدود، بین مرکز جرم نقطه ۳ المان گسسته و نقطه‌ی تصویر شده‌ی ۳ بر روی قطعه خطی ۱-۲ انجام می‌شود. اگر همپوشانی (u_n) وجود داشته باشد، برهمکنش تماسی بر مرکز جرم ۳ به مانند (R_3) در حالت تماس المان محدود عمل می‌کند. برای محاسبه‌ی (R_3)، یا از روش پنالتی (معادله ۱) و یا از مدل فنر نرمال در تماس المان گسسته با المان گسسته‌ی (معادله ۳) می‌توان استفاده کرد. واکنش بخش مقابل بر گره‌های ۱ و ۲، با استفاده از توابع شکل^۱ (معادله ۲) قابل محاسبه می‌باشد. اگر در تحلیل تماس، اصطکاک نیز لحاظ شود، واکنش مماسی از قانون اصطکاک کولمب (معادلات ۴ و ۵) به دست آورده می‌شود.

۲-۴- تحلیل دینامیکی

^۱ - Shape Function

در روش اجزای گسسته و یا در روش اجزای محدود دینامیکی، دو نوع معادلات حرکت زیر را می‌بایست در نظر گرفت [۳]:



شکل ۴- مدل تماس به روش تزویج اجزای محدود- اجزای گسسته

$$f = f_c + f_b + f_v = m \frac{d^2 u}{dt^2} \quad (\text{برای هر دو روش اجزای محدود و گسسته}) \quad (6)$$

$$N = N_c + N_b = I \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{فقط برای روش اجزای گسسته}) \quad (7)$$

که در این روابط، (f_c) واکنش تماسی، (f_v) نیروی حجی، (f_b) بار مرزی، (m) جرم، (u) جابجایی، (N_c) ممان در اثر (f_c) ، (N_b) ممان خارجی، (I) ممان اینرسی و (ω) سرعت زاویه‌ای می‌باشند. برخلاف آنالیز استاتیکی که باید سیستم‌های خطی معادله‌ی حرکت حل شوند، آنالیز دینامیکی کاملاً ساده است و اگر یک روش صریح اتخاذ شود، نیازی به حل معادلات همزمان خطی نخواهد بود. باید توجه داشت که نتایج جابجایی حاصل از روش حل ضمنی نسبت به روش صریح دقیقتر می‌باشد. در تحلیل به روش اجزای محدود، بیشینه نمو گام زمانی از معادله کورانت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta t_{FEM} \leq L_e / c \quad (8)$$

که (L_e) طول مؤثر هر المان و (c) سرعت موج الاستیک می‌باشند. چون در روش اجزای گسسته، دمپینگ بحرانی اندازه‌ی گام زمان را تعیین می‌کند از اینرو گام زمانی ترجیحی در روش اجزای گسسته به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta t_{DEM} \leq 2 \sqrt{m / K_n} \quad (9)$$

باید توجه داشت که گام زمانی بهینه را پیش از اینکه محاسبات بتوانند به صورت موفقیت آمیز انجام شوند، می‌بایست با روش سعی و خطا تعیین کرد. واضح است که گام زمان بستگی به پارامترهای روش اجزای گسسته دارد که بر حسب هندسه المان تعیین می‌شود، اگر چه کل ناحیه مدل اجزای گسسته در روش تزویجی می‌تواند کاهش یابد.

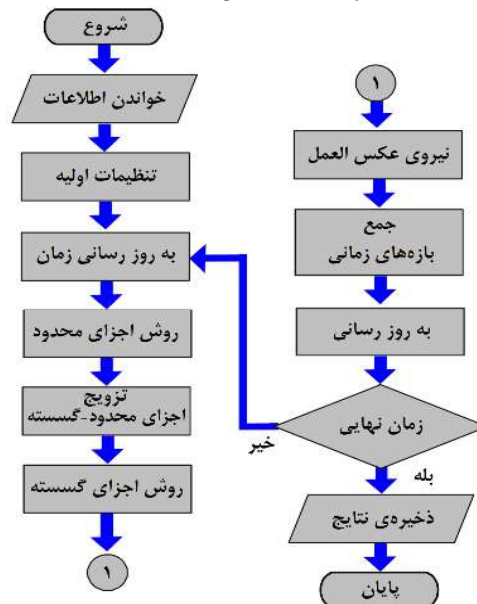
۳- الگوریتم تحلیل تماسی المان محدود- المان گسسته

با استفاده از یک روش محاسباتی صریح، می‌توان الگوریتم ساده‌ای را به صورت زیر ترتیب داد:

- ۱) انتخاب یک قطعه خطی المان محدود دلخواه ۱-۲.
- ۲) بررسی نمودن انطباق المان اجزای گسسته ۳ به خط انتخابی المان محدود ۱-۲.
- ۳) بررسی نمودن همپوشانی بین المان اجزای گسسته ۳ با خط انتخابی المان محدود ۱-۲، پس از مشخص شدن المان اجزای گسسته ۳.

- ۴) در صورت وجود همپوشانی، محاسبه مؤلفه‌ی مماسی و عمودی جابجایی‌های نسبی (Δu) بین نقطه ۳ المان گسسته و نقطه‌ی تصویر شده‌ی ۳.
- ۵) محاسبه‌ی نرخ جابجایی‌های نسبی (Δu_i).
- ۶) محاسبه‌ی عکس‌العمل عمودی با استفاده از معادلات ۱ یا ۳.
- ۷) محاسبه‌ی عکس‌العمل عمودی کل (F_n) برای یک زوج تماسی مدل المان محدود-المان گسسته با استفاده از ثوابت فنر بر اساس تئوری تماسی هر تیز.
- ۸) محاسبه‌ی عکس‌العمل مماسی کل و بررسی شرایط اصطکاک کولمب.
- ۹) استفاده از معادلات ۴ و ۵ بر اساس مقادیر (F_t) و (∞F_n).
- ۱۰) به منظور محاسبه‌ی قطعات دیگر المان محدود، بازگشت به گام اول و در غیر این صورت، بازگشت به محاسبات روش اجزای گسسته.

در صورتی که سطح یک مدل اجزای محدود که با مدل اجزای گسسته تماس خواهد داشت، مانند حالت آج تایر تراکتور مسطح نباشد، نیاز به راهکارهای ویژه‌ای در بررسی تماس می‌باشد. در این تحقیق، مدل تایر بدون آج در نظر گرفته شده است. الگوریتم تحلیل که در فوق بیان شد، در شکل ۵ به طور شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۵- فلوجارت جریان برنامه در تحلیل المان محدود-المان گسسته

شتاب، سرعت و جابجایی کنونی یک گره المان محدود یا یک المان گسسته از نیروهای مشخص شده از معادلات ۶ و ۷، با اعمال انتگرال‌گیری ساده در زمان از قانون دوم نیوتن حاصل می‌شوند؛ هدف سیستم این است که سپس با استفاده از جابجایی حاصل، نیروهای اعمالی به سیستم هدف را در گام زمانی بعدی محاسبه کند. ذکر این نکته ضروری است که حلقه‌ی بررسی تماس المان محدود-المان گسسته، بعد از محاسبات اجزای محدود و قبل از محاسبات اجزای گسسته قرار داده شده است، که این به معنی آن است که عکس‌العمل تماسی به عنوان نیروهای مرزی اعمالی در محاسبات اجزای گسسته رفتار می‌کند.

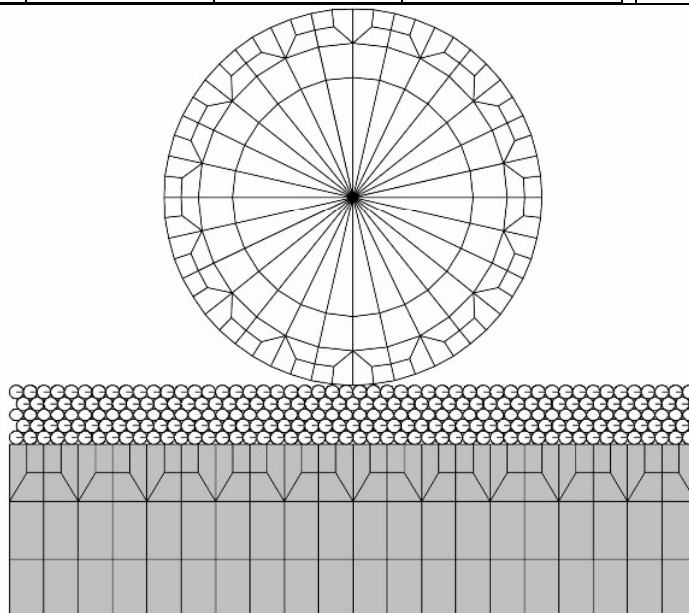
۴- نتایج مدل سازی عددی

مسئله‌ی نشست عمودی تایر به عنوان یک نمونه‌ی کاربردی برای تحلیل مورد نظر قرار گرفته شده است. قطر تایر نیز ۱۲۰۰ میلی متر فرض شده است. برای لایه تحتانی خاک و تایر از مش اجزای محدود استفاده شده و برای لایه سطحی خاک از اجزای گسسته

بهره گرفته شده است. پارامترهای استفاده شده در جدول ۱ به صورت خلاصه آورده شده‌اند. داده‌های چگالی به کار رفته در آنالیز به نحوی اصلاح شده‌اند که مقادیر بزرگتری از گام زمان به کار رود. شعاع هر المان روش اجزای گسسته برابر با ۲۰ میلی متر می‌باشد. لایه بالایی خاک در جایی که با تایر تماس دارد با روش اجزای گسسته مدل‌سازی شده است. ساختار مش برای آنالیز تزیوجی در شکل ۶ نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای استفاده شده برای تحلیل المان محدود-المان گسسته

دیواره	خاک سطحی	خاک تحتانی	تایر	
-	-	۱۰۰	۱۵۵	تعداد المان محدود
-	۲۴۸	-	-	تعداد المان گسسته
۳۰۰۰	۳۲۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰	مدول الاستیسیته (MPa)
۰/۳	۰/۳۳	۰/۳	۰/۴۵	ضریب پواسون
-	۲۰	۲۰	۲۰	چگالی المان (kg/m^3)
۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	ضریب اصطکاک



شکل ۶- ساختار مش سیستم مورد تحلیل

شرایط بار گذاری تایر بر اساس جابجایی می‌باشد و سرعت متناظر تایر در حدود ۱۷۲ (mm/sec) می‌باشد. زمان محاسبات مورد نیاز برای این حالت در حدود ۳۰ دقیقه است. پس از شروع محاسبات، فاصله‌ی بین المان‌های گسسته ناحیه خاکی که درست زیر ناحیه تماس تایر وجود داشت، افزایش یافت که این امر بیانگر خط برش داخلی می‌باشد. بنابراین، این برنامه توسعه یافته به طور رضایت بخشی می‌تواند چنین مسائلی را به طور ساده بر حسب تغییر شکل حل کند.

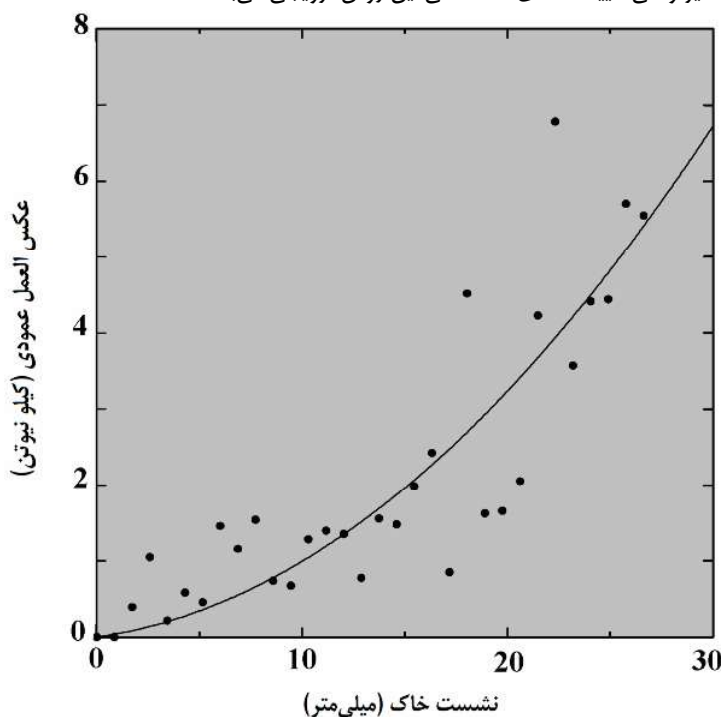
در شکل ۷، یک خط درجه دوم می‌توان برآزش داد تا ارتباطی مشابهی را با داده‌های موجود در منابع نشان دهد. اگر چه می‌بایست نتایج ارتعاشی را نیز در محاسبات اصلی بررسی کرد. زیرا عامل اصلی خطا را می‌توان به دلیل اثر ناکافی دمپینگ در محاسبات ارزیابی کرد. بعلاوه این مسئله باعث کاهش عکس العمل عمودی در مقایسه با وزن تایر نیز می‌شود. این اصلاحات باید در راستای ارتقای برنامه اضافه گردند تا نتایج بهتری از لحاظ کیفی و کمی حاصل شود.

در ناحیه تماس مرز المان محدود-المان گسسته در بعضی مواقع نیاز است که مقدار ثوابت فنر تنظیم شوند تا پیشاپیش، همپوشانی بالایی در این مرز وجود نداشته باشد. البته این مورد اغلب برای روش پنالتی اتفاق می‌افتد. به منظور گسترش و بهبود این روش در

تعیین پارامترها برای روش تزویجی المان محدود-المان گسسته باید یک روش واحدی اتخاذ شود. همچنین در ادامه و گسترش این روش شبیه سازی عددی، تحلیل تماس تایر آجدار با خاک و بکارگیری شعاع اختیاری برای المان گسسته نیز مد نظر قرار دارد.

۵- نتیجه گیری

تحلیل به روش اجزای محدود، توانایی در برگیری دقیق شرایط مرزی منفرد را دارا نمی باشد و علاوه بر این، مدل سازی خاک به عنوان پیکره ای پیوسته سبب ایجاد خطا در تحلیل سیستم های درگیر با خاک می شود. روش اجزای گسسته، توانایی خاصی در تحلیل تغییر شکل میکروسکوپی خاک داراست و شرایط مرزی منفرد را به طور دقیق در برمی گرد. در این پژوهش تزویج روش های محاسباتی اجزای محدود و اجزای گسسته به منظور بهره گیری از قابلیت های هر دو روش در تحلیل مسئله ی برهمکنش سیستم های تماسی خاک با تایر کشاورزی، به کار گرفته شد. گسیختگی خاک که در اثر نیروی فشاری تایر اتفاق می افتد در این شبیه سازی با ایجاد فاصله بین المان های گسسته پیش بینی شد. همچنین زمان حل مسئله به دلیل به کارگیری این رهیافت جدید در المان بندی خاک تحتانی به روش اجزای محدود به نحو قابل قبولی کاهش یافت. علاوه بر این بازه ی زمانی به کار رفته در حل مسئله نیز در یک الگوریتم اصلاح شونده بهینه شد به نحوی که خطا کاهش یافته و زمان حل تا حد ممکن کوتاه شود. مقایسه ی نتایج این شبیه سازی با مقادیر واقعی تأیید کننده ی دقت کافی این روش تزویجی می باشد.



شکل ۷- واکنش عمودی محاسبه شده

مراجع

- [1] Wong, J.Y. 2001. Theory of Ground Vehicles. New York: John Wiley and Sons.
- [2] Wriggers, P. 2002. Computational Contact Mechanics. Chichester: John Wiley and Sons.
- [3] Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L. 2000. The Finite Element Method: The Basis. London: Butterworth-Heinemann, UK.
- [4] D'Addetta, G.A. 2004. Discrete Models for Cohesive Frictional Materials. Stuttgart: Stuttgart University Press.



- [5] Munjiza, A. 2004. The Combined Finite-Discrete Element Method. Chichester: John Wiley and Sons.
- [6] Mase, G.T. and Mase, G.E. 1999. Continuum Mechanics for Engineers. New York: CRC Press, USA.
- [7] Goodman, R.E. Taylor, R.L. and Brekke, T.L. 1968. A model for the mechanics of jointed rock. ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, v(94): 637–659.
- [8] Yong, R.N. and Fattah, E.A. 1976. Prediction of wheel–soil interaction and performance using the finite element method. Journal of Terramechanics, v(13): 227–240.
- [9] Yong, R.N. Fattah, E.A. and Boonsinsuk, P. 1978. Analysis and prediction of tyre–soil interaction and performance using finite elements. Journal of Terramechanics, v(15): 43–63.
- [10] Regli, G. Handke, A. and Bütikofer, M. 1993. Material laws as a basis for simulation models for the calculation of wheel-soil interaction examination using the finite element method. Journal of Terramechanics, v(30): 165-179.
- [11] Fervers, C.W. 2004. Improved FEM simulation model for tire–soil interaction. Journal of Terramechanics, v(41): 87–100.
- [12] Nakashima, H. and Wong, J.Y. 1993. A three-dimensional tire model by the finite element method. Journal of Terramechanics, v(30/1): 21–34.
- [13] Nakashima, H. and Oida, A. 2004. Analysis of soil–wheel interaction by elastoplastic finite element method. Journal of Terramechanics, v(41): 127–137.
- [14] Cundall, P.A. and Strack, O.D.L. 1979. Discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique, v(29/1): 47–65.
- [15] Tijkskens, E. Ramon, H. and De Baerdemaeker, J. 2003. Discrete element modelling for process simulation in agriculture. Sound Vib., v(266): 493–514.
- [16] Asaf, Z. Rubinstein, D. and Shmulevich, I. 2007. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage. Soil and Tillage Research, v(92): 227–242.
- [17] Oida, A. and Ohkubo, S. 2000. Application of DEM to simulate interaction between soil and tire lug. Agric. Biosyst. Eng., v(1/1): 1–6.
- [18] Pan, X.D. and Reed, M.B. 1991. A coupled distinct element–finite element method for large deformation analysis of rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., v(28/1): 93–99.
- [19] Lu, Z, Negi, S.C. and Jofreit, J.C. 1997. A numerical model for flow of granular materials in silos, Part 1: Model development. J. Agric. Eng. Res., v(68): 223–229.
- [20] Horner, D.A. Peters, J.F. and Carrillo, A. 2001. Large scale discrete element modeling of vehicle–soil interaction. J. Eng. Mech., v(127/10): 1027–1032.
- [21] Nakashima, H. and Oida, A. 2004. Algorithm and implementation of soil–tire contact analysis code based on dynamic FE–DE method. Journal of Terramechanics, v(41): 127–137.
- [22] Raje, N. Sadeghi, F. and Rateick Jr, R.G. 2007. A discrete element approach to evaluate stresses due to line loading on an elastic half-space. Computational Mechanics, v(40): 513–529.