



ششمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران (کرج)

۲۴ و ۲۵ شهریور ۱۳۸۹



بررسی تحلیلی چند مدل ارائه شده در مورد فشردگی خاک و مبانی آنها

علیرضا شفیع‌زاده^۱ و عباس همت^۲

۱) به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و استاد مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان

alireza_shafizadeh@yahoo.com

چکیده :

بدون تردید ورود ماشین‌های کشنده ادوات مانند تراکتور و ماشین‌های عملیاتی کشاورزی یکی از عمده عوامل افزایش بازدهی تولید در مزارع بوده است. از زمان ورود این ماشین‌ها به سیستم تولید کشاورزی بررسی اثرات متقابل محیط و ماشین بر روی یکدیگر یکی از موضوعات مورد علاقه محققین بوده است. در این میان یکی از مهمترین تاثیرهای ماشین‌های سنگین کشاورزی بر روی محیط ایجاد فشردگی‌های سطحی و عمقی در خاک بوده است. بررسی عوامل موثر بر فشردگی خاک در سطح و عمق، پیش‌بینی میزان فشردگی، تخمین و تحلیل توزیع تنش در زیر چرخ ادوات، محاسبه و شبیه‌سازی تنش‌های خاک عمقی و سطحی در برابر بارهای وارده، توانسته کمک شایانی به پیشرفت روش‌های جلوگیری از فشردگی خاک و راه‌های مقابله با آن در چند دهه گذشته بنماید. تاکنون مدل‌های متعددی جهت پیش‌بینی فشردگی خاک در اثر عبور ماشین‌های کشاورزی ارائه شده است. در این تحقیق تعدادی از مدل‌های فشردگی خاک و همچنین مبانی و اصولی که این مدل‌ها براساس آن ارائه گردیده، مورد بررسی قرار گرفته است.

کلید واژه : فشردگی خاک، مدل فشردگی خاک

۱. مقدمه :

ساختمان خاک مجموعه‌ای از اجزای جامد در اندازه‌های مختلف، از ذرات درشت شن تا ذرات بسیار ریز رس است؛ در بین این اجزای جامد فضاهای خالی وجود دارد که از نظر شکل و اندازه متفاوت می‌باشند. این فضاها معمولاً توسط آب و هوای موجود در خاک پرمی‌شوند. بدین ترتیب عملاً این فضاهای خالی هستند که میزان و جریان آب و هوای درون خاک را مدیریت می‌کنند. تراکم خاک به معنای کاهش حجم و پیوستگی منافذ خاک است. کاهش این فضاها خالی به ویژگی‌های نگهداری و انتقال آب در خاک آسیب وارد کرده و ریشه دوانی گیاه در خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با افزایش فشردگی خاک، ظرفیت نگهداری آب و هوا، قدرت ریشه‌دوانی گیاه و حرکت محلول‌ها در خاک کاهش می‌یابد و در نهایت افت عملکرد محصول را باعث می‌شود. فشردگی خاک سطحی با تاثیر بر روی خصوصیات نفوذپذیری خاک باعث ایجاد روان‌آب و ماندآب و نیز فرسایش در سطح خاک پس از هر بارندگی می‌گردد. برهم خوردن تعادل گرمایی درون خاک و تغییر در چرخه نیتروژن درون خاک علت مخدوش شدن تعادل شیمیایی موجود در

خاک و تخلیه گازها با ترکیبات نیتروژن دار در اثر تغییر در حجم منافذ خاک از دیگر مضرات ایجاد فشردگی در خاک می باشد (Anderson & Hamaz, 2005).

در اوایل قرن بیستم نیاز به افزایش تولید محصول، کشاورزان را وادار نمود تا حجم عملیات کشاورزی و استفاده از ماشین آلات بزرگتر را افزایش دهند. هم اکنون تراکتورها، کمباین ها، برداشت کننده های علوفه سیلویی، واگن-های غلات و علوفه، کودپاش های دامی بسیار بزرگتر از آن چیزی است که در گذشته استفاده می شد. بعنوان مثال، ۲۰ سال پیش یک کودپاش مایع دامی ۲.۵ تنی ماشینی بسیار رایج در امریکا بود، این در حالی است که هم اکنون انواع ۲۰ تا ۳۰ تنی از این ماشین بسیار رایج است (Avoiding soil compaction, 2004). عبور و مرور مکرر این تجهیزات در سطح مزرعه از دیگر عوامل مهم ایجاد فشردگی در خاک است. گسترش استفاده از عملیات های کم خاکورز و بدون خاکورز، بار دیگر اهمیت توجه به تاثیر عبور و مرور ماشین های کشاورزی بر روی ساختار خاک را مشخص می کند. مدیریت خاکورزی ایده آل هنگامی صورت می گیرد که بیشترین میزان تولید با کمترین میزان خسارت به محیط توام گردد. مواجهه با مسئله فشردگی خاک با توجه به تاثیر عوامل متعددی همچون خصوصیات ماشین، محتوی رطوبتی خاک، ساختار خاک، محتوی مواد آلی خاک، آب و هوای منطقه، مدیریت خاکورزی و حل مساله به صورت واقعی را بسیار دشوار می کند.

مدلسازی، روشی بسیار موثر برای کمک به مدیریت این سیستم پیچیده است که از آن جمله می توان به ارزیابی و مدلسازی چگونگی تغییر فشردگی خاک در اثر تنش های وارده از طرف وسیله به آن و مقایسه مقادیر پیش بینی شده با خصوصیات خاک حقیقی اشاره کرد. مدل های ارائه شده در مورد فشردگی خاک به دو بخش عمده تقسیم می شود. اولین قسمت مربوط به تعیین انتشار بارهای وارده درون خاک در نتیجه نیروهای وارد در سطح مشترک خاک-تایر (زیر مدل-های انتشاری) و نیز مقدار تنش ها در سطح مشترک خاک-تایر (زیر مدل های بار وارد بر سطح) است. قسمت دوم به بررسی رفتار تنش-کرنشی خاک، تعیین چگونگی تغییر در حجم خاک در اثر تنش وارد شده بر آن اشاره نمود. در این میان تفاوت اصلی بین مدل های موجود در استفاده از مدل های محاسبه تنش در خاک می باشد که شامل مدل های تحلیلی-فشاری و یا محاسبات عددی بر مبنای روش اجزاء محدود است (Defossez & Richard, 2002). در این بررسی ابتدا به مبانی و اصولی که مدل های فشردگی خاک براساس آن ارائه شده خاک پرداخته می شود و در مرحله بعد تعدادی از آخرین مدل های ارائه شده توسط محققین به طور مختصر مورد بررسی قرار می گیرد.

۱.۱. مبدل شبه-تحلیلی :

مدل های ارائه شده در قسمت مبدل تحلیل-فشاری براساس فعالیت ها و تحقیقات Söhne (۱۹۵۳) استوار است. او توانست توزیع تنش عمودی بر روی سطح تماس را مدلسازی کرده و سپس انتشار تنش اصلی بزرگتر (σ_1) در درون خاک را محاسبه نماید. اساس کار Söhne بر تحقیقات اولیه صورت گرفته توسط Boussinesq (۱۸۸۵) و Frolich (۱۹۳۴) قرار داشت. حالت تنش در یک مکعب کوچک محدود از خاک را می توان با تنش های نرمال بیان نمود. تنش-

های عمود بر صفحه (σ) و تنش‌های برشی (τ) مماس بر سطح وارد می‌شوند. این تنش‌ها را می‌توان به صورت یک ماتریس نشان داد که تانسور تنش نامیده می‌شود. تانسور تنش در نتیجه تعادل جفت نیروها همیشه متقارن است، از خاصیت‌های بسیار مهم تانسور تنش وجود همیشگی یک موقعیت نسبت به سیستم مختصات است که در آن تنش‌های تماسی صفر می‌شود و در این هنگام حالت تنش تنها بوسیله تنشهای نرمال σ_1 و σ_2 و σ_3 که به تنش‌های اصلی معروفند و به ترتیب مقادیر بیشینه، میانی و کمینه تنش‌ها را دارند بیان می‌شوند.

در حالت فشار ایزوتروپیک تنش‌های اصلی با هم برابرند و هیچ‌گونه تنش برشی وجود ندارد. از خصوصیات الاستیک که برای محاسبه رفتار ماده مورد نیاز است مدول یانگ (E)، مدول برشی (G) و نسبت پواسون (μ) می‌باشد. یکی از خصوصیات تانسور تنش وجود نامتغییر تنش است. فعالیت تنش‌ها بر روی یک جزء خاک را می‌توان به صورت نامتغییرهای تنش مکانیکی بیان نمود که این بستگی به محورهای مرجع انتخابی دارند. سه نامتغییر تنش اصلی را با نماد I نشان می‌دهند که به صورت زیر تعریف می‌شوند (معادلات ۱ و ۲ و ۳).

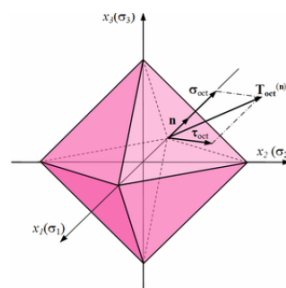
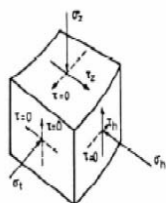
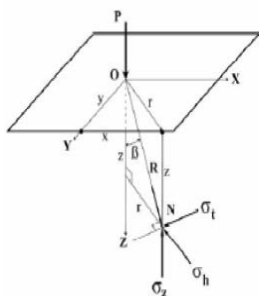
$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (1) \quad I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 \quad (2) \quad I_3 = \sigma_1 * \sigma_2 * \sigma_3 \quad (3)$$

با استفاده از نامتغییر تنش می‌توان مقادیری از تنش را بدست آورد که مستقل از سیستم مختصات و محورهای مختصات است. این تنش‌ها، تنش نرمال اوکتاهدرال (σ_{oct}) و تنش برشی اوکتاهدرال (τ_{oct}) هستند (معادلات ۴ و ۵). حالت بحرانی مکانیک خاک از تنش‌های نرمال اوکتاهدرال و نیز تنش‌های تفاضلی استفاده می‌کند (شکل ۱).

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} = \sqrt{\frac{9}{2}(I_1^2 - 3I_2)} \quad (4) \quad \sigma_{oct} = \frac{1}{3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)} = \frac{1}{3I_1} \quad (5)$$

Boussinesq (۱۸۸۵) راه حلی کاملاً ریاضی برای محاسبه تنش‌ها در یک ماده الاستیک پیشنهاد داد. این معادله براساس توزیع تنش یک بار متمرکز در نقطه‌ای مشخص و بر پایه حالت تعادل تنش - کرنش بیان گردید (معادله ۶). Boussinesq فرض نمود بار نقطه‌ای بر یک محیط نیمه متناهی، همگن، همسان، بدون وزن و در محیط الاستیک ایده‌آل وارد می‌گردد. اجزای تنش عمودی Boussinesq در نقطه N به صورت زیر است که در آن r فاصله محل اعمال بار تا نقطه محاسبه تنش‌ها و θ زاویه بین امتداد نیرو و بردار بین دو نقطه محل اعمال بار و محل محاسبه تنش‌ها است (شکل ۲).

$$\sigma_1 = \frac{3P}{2\pi r^2} \cos^3 \theta \quad (6)$$



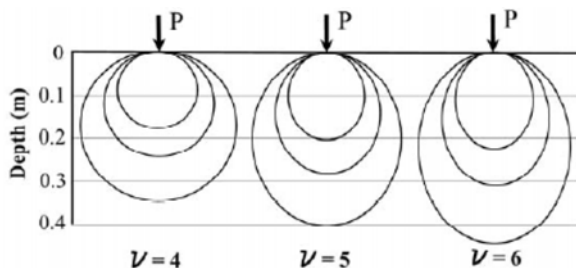
شکل ۲. تنش‌های ایجاد شده بر یک جزء خاک در اثر بار متمرکز P

شکل ۱. تنش‌های اوکتاهدرال

اندازه‌گیری‌ها نشان داد که معادله Boussinesq بدلیل فرض خاک به عنوان یک محیط همگن، همسان و با رفتار ماده الاستیک ایده‌آل نمی‌تواند به صورت رضایت بخشی توزیع تنش‌ها در خاک را پیش‌بینی کند. چندی بعد Frolich (۱۹۳۴) در معادله Boussinesq فاکتور تمرکز (۹) را معرفی کرد. بدین ترتیب رفتار خاک به عنوان یک ماده غیر الاستیک بررسی گردید و تا حدودی نواقص معادله Boussinesq جبران شد (معادله ۷).

$$\sigma_1 = \frac{3P}{2\pi r^2} \cos^9 \theta \quad (7)$$

مقدار فاکتور تمرکز مساوی ۳، توزیع تنش در یک ماده ایزوتروپیک با رفتار کاملاً الاستیک را بیان می‌کند. مقادیر ۴ و ۵ و ۶ به ترتیب برای خاک سخت (خشک) خاک معمولی (نیمه خشک) و خاک نرم (مرطوب) در نظر گرفته شد است. بدین ترتیب فرض شد که خاک بیشتر رفتاری پلاستیک داشته و بیشتر تنش‌ها در اطراف بار محوری وارد می‌گردد و سپس در اعماق خاک نفوذ می‌کند (شکل ۳).



شکل ۳. تاثیر فاکتور تمرکز بر انتشار تنش در خاک

همچنین Söhne تنش‌های عمودی در زیر مرکز تاپر تراکتور را با استفاده از معادله Frolich محاسبه نمود. او سطح تماس تاپر با زمین را به اجزاء کوچکی تقسیم نمود که هر کدام را A_i نامید و تنش نرمال σ_i که در اثر بار نقطه‌ای P_i بوجود آمده را به هر یک از آنها نسبت داد. بدین ترتیب بار عمودی را در یک عمق خاص محاسبه نمود (معادله ۸).

$$\sigma_z = \sum_{i=0}^{i=n} (\sigma_z)_i = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{VP_i}{2\pi r^2} \cos^9 \theta \quad (8)$$

Söhne فرض نمود که سطح تماس تاپر-خاک به شکل بیضی است. او تنش‌های برشی ایجاد شده در اثر عبور چرخ‌ها را در نظر نگرفت و در نهایت توزیع تنش عمودی در سطح خاک را به صورت یک سهمی با درجات ۱۶ و ۴ و ۲ به ترتیب برای خاک سخت ($\vartheta = 4$)، خاک محکم ($\vartheta = 5$) و خاک نرم ($\vartheta = 6$) توصیف نمود. باید در اینجا به این نکته اشاره نمود که برای بررسی رفتار تنش - کرنش خاک براساس مدل تحلیل-فشاری مدلهای تنش-کرنش براساس آزمایش و بصورت تجربی بدست می‌آیند.

۲.۱. مدل‌های اجزاء محدود :

در مدل‌های تحلیل - فشاری به منظور ساده سازی مسئله تنها از یک متغیر مکانیکی (σ_1) استفاده می‌کنند. امروزه اما با توجه به پیشرفت‌های مرتبط با مباحث اجزاء محدود، از هر سه متغیر مکانیکی ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) استفاده می‌شود و شبیه سازی سه بعدی امکان‌پذیر شده است. با این وجود معمولاً در عمل حل این مسائل به صورت دو بعدی و

با فرض تقارن و یا تغییر صفحه‌ایی صورت می‌گیرد، بطوریکه در حالت تقارن σ_2 برابر σ_3 در نظر گرفته شده و در مدل از متوسط تنش نرمال (p_i) و تنش تفاضلی (q_i) استفاده می‌شود (معادلات ۹ و ۱۰).

$$q_i = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (9) \quad p = \frac{1}{3}(2\sigma_3 + \sigma_1) \quad (10)$$

از اصول کار مجازی به عنوان پایه‌ایی برای حل مدل‌های ارائه شده براساس اجزاء محدود استفاده شده است (Zienkiewicz, 1971). روش اجزاء محدود تکنیک بسیار قدرتمندی است که در اصل برای حل عددی مسائل پیچیده در ساختارهای مکانیکی بوجود آمد و به عنوان روشی برای حل مسائل پیچیده باقی ماند. در روش اجزاء محدود ساختار سیستم بوسیله مجموعه‌ایی از جزءهای کوچکتر که در نقاطی به نام نقاط شبکه با هم ارتباط دارند مدل می‌شود. هر جزء می‌تواند خصوصیات فیزیکی مانند ضخامت، ضریب هدایت گرمایی، دانسیته، مدول یانگ، مدول برشی و یا ضریب پواسون مربوط به خود را داشته باشد. جزءها می‌توانند به صورت یک بعدی مانند منحنی یا خط راست با خصوصیات فیزیکی مانند خمش یا سختی پیچشی باشند. این جزءها مناسب مدل‌سازی کابل‌ها، تیرها، داربست‌ها و خرپاها می‌باشند. از دیگر حالت‌های اجزاء صورت‌های دو بعدی، جزءهای پوسته‌ایی شکل و اجزای‌های سه بعدی است. اجزاء دو بعدی برای تحلیل تنش و کرنش صفحه‌ایی یا تحلیل‌های خمش در صفحه‌ها و پوسته‌ها مناسب‌اند. جزءها ممکن است شکل‌های مختلفی مانند سه ضلعی، صاف، خم‌دار و یا چهار ضلعی داشته باشند، نقاط شبکه در گوشه‌های آنها قرار می‌گیرند. اگر دقت بیشتری مورد نیاز باشد می‌توان نقاط بیشتری بر روی لبه‌های جزء و یا حتی درون آن قرار داد. اجزاء‌های سه بعدی برای مدل‌سازی اجزای جامد سه بعدی مانند اجزای ماشین، سدها، خاکریزها و یا یک حجم خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. اشکال معمول اجزاء در این حالت انواع شش وجهی و چهار وجهی است و نقاط شبکه در گوشه‌ها و بر روی صفحه‌ها و یا درون خود اجزاء قرار می‌گیرند.

جزءها تنها از طریق نقاط بیرونی با هم در تماسند و تا حد امکان سطوح و حجم درون قطعه اصلی را پوشش می‌دهند. نقاط شبکه می‌توانند دارای درجات آزادی مختلف مانند انتقال، چرخش و یا در موارد خاص درجات بیشتر آزادی باشند. جابجایی هر نقطه درون جزء بوسیله درون‌یابی جابجایی نقاط شبکه مشخص می‌شود و این مهمترین دلیل برای طبیعت تخمینی این نوع حل است. در مورد تحلیل ساختار خاک و مدل‌سازی چگونگی اجزاء خاک از اصول کار مجازی برای یک حجم از خاک در حالت تغییر شکل ایستا استفاده می‌شود. طرف چپ تساوی برابر کار مجازی خارجی و طرف راست مجموع کارهای انجام شده بر روی حجم (dV) و سطح جسم (dS) به ترتیب می‌باشد (معادله ۱۱).

$$\int \delta \underline{\varepsilon}^T \underline{\sigma} dV = \int \delta \underline{u}^T \underline{P} dV + \oint \delta \underline{u}^T \underline{t} dS \quad (11)$$

با توجه به اینکه تغییر شکل در مسائل اجزاء محدود کوچک می‌باشد و با در نظر گرفتن این موضوع که در کارهای کشاورزی خاک در زیر چرخ در حال حرکت دارای مقدار زیادی جابجایی است؛ در نتیجه رابطه غیر خطی بین کرنش و جابجایی بوجود می‌آید و در نهایت برای حل مسائل کشاورزی نیاز به روش‌های خاص عدی مانند مبدل‌های بارگذاری جزئی است.

مدل سازی رفتار تنش و کرنش خاک با استفاده از روش اجزاء محدود :

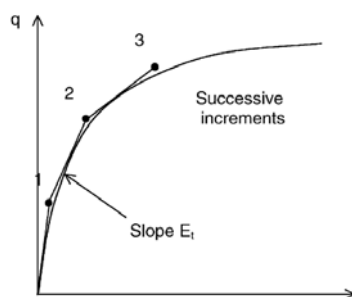
آزمایش‌های استاندارد صورت گرفته مکانیک خاک و نتایج ثبت شده از آن مشخص کرده است که رفتار فشردگی خاک ترکیبی از تغییر شکل الاستیک، پلاستیک و همچنین شکست است. بنابراین مدل‌های مختلف ارائه شده توسط محققین از فرضیات و مدل‌های پایه متفاوتی برای پیش‌بینی رفتار پیچیده خاک استفاده می‌کنند که در واقع مدل‌های ارائه شده توسط محققین مختلف در این زمینه زیر مجموعه‌ای از E مدل، لگاریتمی، شبه-الاستیک، Cam Clay و مزدوج و چند فازی است.

مدل لگاریتمی :

مدل لگاریتمی تنها از یک متغیر مکانیکی (σ_1) استفاده می‌کند و از این مبدل تنها در مبدل تحلیل-فشاری توزیع تنش همانگونه که در بخش ۲ توضیح داده شد استفاده می‌شود.

مدل شبه-تحلیلی :

در ابتدا تحلیل اجزاء محدود برای یک محیط همگن با مشخصات الاستیک خطی ارتقاء یافت. اما خاک با توجه به خصوصیات خود رفتاری در محدوده الاستیک غیر خطی و غیرقابل برگشت از خود بروز می‌دهد. در نتیجه برای تحلیل اجزاء محدود خاک از روابط ارائه شده برای محیط الاستیک خطی استفاده شد، با این تفاوت که مدول یانگ و نسبت پواسون با توجه به سطح تنش، متغیر در نظر گرفته شد و مقادیر آنها در هر سطح تنش با توجه به منحنی‌های بدست آمده از آزمایش‌های سه محوری مشخص می‌شود (شکل ۴).



شکل ۴. نمودار تغییر مدول یانگ خاک با توجه به میزان بار وارده

مدل Cam Clay :

اولین مدل‌های حالت بحرانی برای بررسی رفتار خاک‌های نرم مانند خاک‌های رسی با نام‌های Cam Clay (CC) و (MCC) Modify Cam Clay بوسیله محققین دانشگاه Cambridge ارائه گردید. در هر دو مدل سه جنبه مهم از رفتار خاک شامل مقاومت، فشردگی یا افزایش حجم (تغییر حجم ناشی از برش) و حالت بحرانی که در آن اجزاء خاک می‌توانند تغییر شکل نامحدود را بدون تغییر در حجم و یا تنش‌ها تجربه کنند مورد بررسی قرار داده شده است. در مکانیک حالت بحرانی حالت یک نمونه از خاک با سه پارامتر تنش متوسط موثر (P_i) تنش برشی سه محوری (τ') و نیز حجم مخصوص (V) بیان می‌شوند (معادله ۱۲ و ۱۳).

$$(13)$$

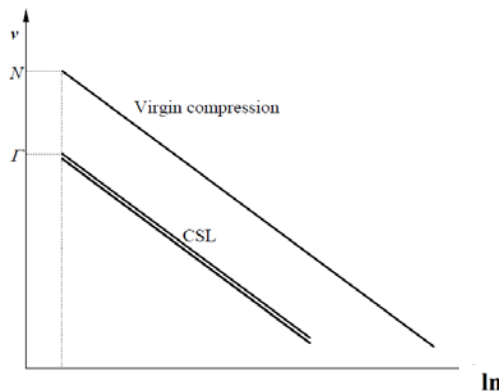
$$p = \frac{1}{3}(\sigma_3 + \sigma_2 + \sigma_1) \quad (12) \quad \tau' = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2) + (\sigma_2 - \sigma_3) + (\sigma_3 - \sigma_1)}$$

در این دو مدل پایه فرض می کنند که هنگامی که نمونه خاک نرم در زیر یک تنش ایزوتروپیک قرار می گیرد به آرامی فشرده می شود ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = p_i$) و تحت شرایط زهکش ایده آل رابطه بین حجم مخصوص و لگاریتم فشار وارده ($\ln P_i$) به صورت یک خط استحکام اصلی و یک خط باربرداری-بارگذاری مجدد بیان می شوند (شکل ۵) (معادله ۱۴ و ۱۵).

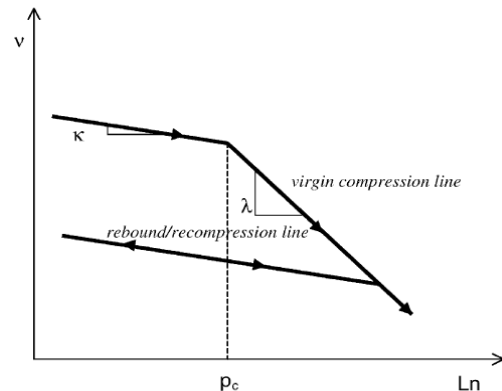
$$v = N - \lambda \ln P_i \quad (14) \quad v = v_s - K \ln P_i \quad (15)$$

برش مداوم نمونه ایی از خاک می تواند منجر به حالتی شود که در آن برش بدون هیچ تغییر در میزان تنش و یا در حجم حادث شود. این بدین معنی است که در این شرایط که به حالت بحرانی شناخته شده است خاک در یک حالت ثابت دچار پیچش می شود و این حالت با خط حالت بحرانی (CSL) مشخص می شود که محل این خط بستگی به خط فشار عمودی دارد. پارامتر Γ حجم مخصوص خط حالت بحرانی (CSL) در فشار واحد است و مشابه پارامتر حجم مخصوص خط فشار نرمال در فشار واحد (N) مقدار آن بستگی به واحد اندازه گیری دارد. شیب خط فشار نرمال با λ نمایش داده شده است (شکل ۶) (معادله ۱۶ و ۱۷).

$$CC: \Gamma = N - (\lambda - K) \quad (16) \quad MCC: \Gamma = N - (\lambda - K) \ln 2 \quad (17)$$



شکل ۶. نمودار محل قرارگیری خط CLS نسبت به خط فشرده‌گی اصلی



شکل ۵. نمودار بارگذاری-باربرداری خاک در برابر تغییر حجم مخصوص

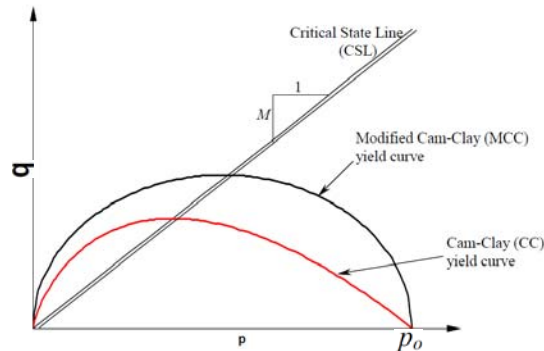
تابع‌های نهایی :

در تحت شرایط بارگذاری برشی سه محوری افزایشی، خاک رفتاری الاستیک از خود بروز می دهد تا هنگامی

q' که به مقدار نهایی q برسد (معادله ۱۸ و ۱۹).

$$CC: \tau + Mp_i \ln \left[\frac{p_i}{p'_0} \right] = 0 \quad (18) \quad MCC: \frac{\tau^2}{\tau'^2} + M^2 \left[1 - \frac{p_i}{p_0} \right] = 0 \quad (19)$$

حال اگر مقدار نهایی در سمت راست نقطه‌ایی که محل برخورد خط CSI و نیز سطح نهایی (سطحی که در فضای سه بعدی $q - \tau - v$ با فرمول‌های $Cam\ Clay$ و $Modify\ Cam\ Clay$ وجود داشته و با عنوان سطح حالت مرزی شناخته می‌شود) واقع شود فشردگی در خاک رخ خواهد داد. برخلاف علوم مهندسی که معمولاً مقادیر پارامترهایی مانند مدول حجمی (k) ثابت منظور می‌شود برای مدل‌های $Cam\ Clay$ و $Modify\ Cam\ Clay$ مقدار مدول حجمی بستگی به متوسط تنش (p') و حجم مخصوص (v) و شیب خط باربرداری - بارگذاری مجدد دارد (شکل ۷).



شکل ۷. نمودار فضای سطوح شکست ($p' - q'$) برای مدل‌های CC و MCC . پارامتر M شیب خط CSL است.

۱.۳. مدل‌های چند فازی :

آخرین تلاش‌ها برای ارتقاء مدل‌های فشردگی خاک بر روی وارد کردن پارامترهای هیدرولیکی و نیز پارامترهای پنیوماتیکی در ترکیب با پارامترهای معمول مکانیکی بوده است. $Bioship$ (۱۹۵۹) برای ترکیب فرایند هیدرولیکی برای خاک غیر اشباع از تئوری تنش موثر استفاده نمود. $Horn$ (۱۹۹۸) و $Richard$ (۱۹۹۲) به صورت بسیار دقیق بر روی اثرات متقابل بین دو فرایند فیزیکی شامل بارگذاری-تغییر شکل-شکست و فرایند جریان سیال تحقیق نمودند. مدل الاستوپلاستیک $Geiser$ (۱۹۹۹) یک مدل ۲ سطحی با سطوح شکست نهایی مکانیکی F_1 و سطح نهایی هیدرولیکی F_2 است که تغییرات پلاستیک ناشی از بارگذاری هیدرولیکی مانند تغییرات فشار کاپیلاری را پوشش می‌دهد. این مدل صورت گسترش یافته مدل‌های خانواده $HISS$ می‌باشد که توسط $Desai$ (۱۹۹۹) ارائه شده است. در این معادلات J_1 اولین نامتغییر تانسور تنش است و J_{2D} و J_{3D} به ترتیب نامتغییر دوم و سوم تانسور تنش موثر تفاضلی، λ و n ثابت-های ماده، p_a ثابت نرمال شده بدست آمده از مقادیر ثابت فشار اتمسفریک، α و α_0 پارامترهای سخت شوندگی، p^c پتانسیل ماتریک و β پارامتر حالت یکنواخت هستند. همچنین $Gysi$ (۲۰۰۰) سه فرایند هیدرولیکی، پنیوماتیکی، مکانیکی را در مدل خود وارد کرده است (معادله ۲۰ و ۲۱ و ۲۲).

$$F_1 = \frac{J_{2D}}{P_a^2} - F^s \left[-\alpha(P^c) \left\{ \frac{J_1 + c(P^c)}{P_a} \right\}^n + \lambda \left\{ \frac{J_1 + c(P^c)}{P_a} \right\}^2 \right] \quad (20)$$

$$F_2 = \frac{J_{2D}}{P_a^2} - \left[-\alpha_2(P^c) \left\{ \frac{3(P^c)}{P_a} \right\}^n + \lambda \left\{ \frac{3(P^c)}{P_a} \right\}^2 \right] F^s \quad (21)$$

$$F_s = \left(1 - \beta \sqrt{\frac{27}{2} \frac{J_{3D}}{J_{2D}^{1.5}}} \right)^{-0.5} \quad (22)$$

۲. مدل O'Sullivan :

مدل O'Sullivan به عنوان زیر مدلی از روش تحلیل-فشاری محسوب می‌شود. با توجه به سادگی این مدل در برابر دیگر مدل‌ها می‌تواند ابزاری مناسب برای دانشجویان و مشاوران بخش کشاورزی جهت بررسی فاکتورهای تاثیر مهم و تاثیرگذار بر فشردگی خاک باشد. این مدل شامل سه جزء اساسی، مدلسازی نیروهای وارد شده به سطح خاک توسط ماشین شامل پیش‌بینی سطح تماس بین تایر و خاک (سطح سخت و سطح نرم) و چگونگی توزیع بار در آن، همچنین مدلسازی توزیع تنش در خاک و در نهایت بررسی تاثیر تنش‌ها بر روی تغییر حجم در خاک می‌باشد. خصوصیت این مدل سادگی بدست آوردن داده‌های ورودی شامل فشار باد تایر در حالت بدون بار ($P_{inflation}$)، طول سطح تماس (L)، قطر تایر (d) و عرض تایر (b) برای برآورد سطح تماس (A) می‌باشد. مقادیر ضرایب S_1 تا S_3 براساس Blackwell (۱۹۷۹) و Plackett (۱۹۸۴) در دسترس می‌باشد (جدول ۱). تنها باید در نظر داشت که نوع تایر استفاده شده در این آزمایش‌ها از نوع Cross بوده است و در صورت استفاده از تایرهای نوع Radial به علت تفاوت در میزان سختی و میزان خوابیدگی دو نوع تایر باید میزان برآورد شده سطح تماس بین ۲۰ تا ۵۰ درصد افزایش یابد (معادله ۲۳).

$$A = S_1 db + S_2 L + S_3 \frac{L}{P_{Inflation}} \quad (23)$$

در مدل اوسالیوان چگونگی انتشار تنش در خاک براساس نسبت بین تنش بزرگتر، تنش‌های میانی و کوچکتر ($\frac{\sigma_1}{\sigma_3}, \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$) بیان شده است. Johnson و Burt (۱۹۹۵) نشان دادند که مقدار σ_2 و σ_3 با افزایش عمق (Z) با سرعت بیشتری نسبت به σ_1 کاهش می‌یابند. اما در صورتی که نسبت‌های آنها مد نظر قرار گیرد و بار محوری افزایش یابد این نسبت‌ها ثابت مانده و مستقل از میزان بار محوری می‌مانند. بدین ترتیب ساده‌سازی مناسبی جهت بررسی چگونگی انتشار تنش در خاک صورت گرفته است. مقادیر C_1 تا C_3 براساس جدول ۲ در معادله قرار می‌گیرد (معادله ۲۴).

$$\ln \frac{\sigma_1}{\sigma_{..}} = C_1 Z + C_2 A + C_3 \theta \quad (24)$$

جدول ۲. مقادیر ضرایب ثابت C_1 تا C_3 جهت محاسبه انتشار تنش در خاک برای مدل O'Sullivan

جدول ۱. مقادیر ضرایب ثابت S_1 تا S_3 برای محاسبه سطح تماس در مدل O'Sullivan

ثابت	σ_1/σ_2	σ_1/σ_3	ثابت	سخت	نرم
c_1	5.30	4.66	s_1	0.041	0.310
c_2	2.08	2.06	s_2	0	0.00263
c_3	0.21	0.32	s_3	0.613	0.239

در این مدل فشردگی خاک براساس شاخص حجم مخصوص (V) بیان می‌شود که معرف نسبت دانسیته ماده جامد به دانسیته ماده خشک می‌باشد. شاخص توانایی فشردگی خاک براساس خطوط نمودار تنش متوسط نرمال برحسب حجم مخصوص بدست می‌آید. در مدل اوسالیوان خط فشردگی اولیه (VCL) با فرض فشردگی یکنواخت بدون پیچش و براساس شاخص لگاریتمی از فشار متوسط استفاده شده است. در این مدل خط فشردگی مجدد برای دو نوع خاک مورد آزمایش جهت ارزیابی مدل در محتوی رطوبتی حد پلاستیک و نیز تنش تسلیم لحاظ شده است. همچنین با توجه به تاثیر عامل رطوبت خاک بر میزان فشردگی این پارامتر نیز در معادله مدل لحاظ شده است. فاکتورهای اساسی برای راه اندازی مدل در نرم افزار اکسل شامل خصوصیات تایر (بار محوری وارده، فشار باد، عرض تایر، قطر تایر) جهت برآورد سطح تماس و متوسط فشار تماسی می‌باشد. همچنین خصوصیات خاک (نوع خاک، محتوی رطوبتی، جرم مخصوص اولیه) به منظور محاسبه چگونگی تغییر حجم در خاک باید وارد شود.

۳. مدل SOCOMO :

Van den Akker (۱۹۹۸) مدلی جهت پیش‌بینی میزان فشردگی خاک معروف به مدل SOCOMO ارائه نمود. این مدل میزان فشردگی ایجاد شده در خاک را بیان نمی‌کند بلکه برای پاسخ به این سوال که آیا خاک عمقی بوسیله یک بار محوری مشخص تحت تاثیر آن میزان تنش قرار می‌گیرد که در آن فشردگی ایجاد شود یا نه، ارتقاء یافته است. از این مدل می‌توان بعنوان ابزاری جهت تعیین بار محوری مجاز، اندازه تایر، فشار باد تایر و همچنین مقاومت موثر خاک (وابسته به بافت خاک و ساختار خاک، شرایط رطوبتی، جرم مخصوص حجمی) استفاده نمود. اساس مدل بر پایه تئوری Boussinesq قرار گرفته است. در این مدل تنش در سطح مشترک خاک تایر بر روی یک شبکه مستطیلی تصویر شده بطوریکه تنش‌ها در محل نقاط شبکه متمرکز شده‌اند. در این مدل تنش‌های عمودی با توجه به جرم مخصوص حجمی و نیز معادله Tschebotarioff (۱۹۵۱) (تنش‌های عمودی حدوداً نصف تنش‌های افقی) محاسبه می‌شود. تنش‌های دینامیکی و استاتیکی براساس اصول ارائه شده توسط Timoshenko و Goodier (۱۹۸۰) بدست می‌آید. در این مدل، فشردگی خاک با توجه به آزمایش‌های سه محوری صورت گرفته توسط Van den Akker (۱۹۸۸) و نیز Van den Akker و Van Wijk (۱۹۸۷) بدست آمده و مقاومت برشی براساس قانون Mohr-Coulomb محاسبه گردیده است.

۴. مدل Gysi :

مدل Gysi (۲۰۰۰) مدلی است براساس مدل چند فازی که علاوه بر پارامترهای مکانیکی پارامترهای هیدرولیکی و پنوماتیکی را نیز در مدلسازی رفتار فشردگی خاک وارد کرده است. از پارامترهای مورد نیاز این مدل می‌توان به پارامترهای مکانیکی مدول الاستیسیته و نسبت پواسون به منظور تعیین تغییر شکل الاستیک و ۱۱ پارامتر جهت تعیین تغییر شکل پلاستیک اشاره نمود. در این مدل Gysi از روش‌های آزمایشگاهی برای بدست آوردن پارامترهای مورد نیاز استفاده کرده است و برای شبیه سازی فشردگی خاک حالت کرنش صفحه‌ای و تنش عمودی ثابت در سطح

خاک را مد نظر گرفته است. به عبارتی محاسبات به صورت ۲ بعدی برای تنش و کرنش صورت گرفته و فشردگی متوجه با استفاده از مدل سه فازی برای خاک غیر اشباع برآورد شده است.

از ویژگی‌های بارز این مدل می‌توان به افزایش فشار پیش تراکمی با مکش رطوبتی خاک متناظر با تاثیر بار بر روی فشار پیش تراکمی، افزایش سختی با مکش، لحاظ شدن شکست‌های ساختاری در اثر افزایش رطوبت و کاهش تخلخل در خاک در مدل و سرانجام افزایش مقاومت نهایی با مکش و افزایش هر دوی آنها با میزان تردی اشاره نمود. در این مدل از فعالیت‌های Klubertanz (۱۹۹۹) استفاده شده است که مدلی عددی برای جریان چند فازی در محیط متخلخل شکل پذیر ارائه کرده است. در مدل Gysi معادله‌ای جهت برآورد سطح تماس ارائه نشده است و محقق سطح تماس را به روش تجربی و استفاده از روش‌های معمول چاپ اثر رد چرخ بر سطح و در نهایت استفاده از روش تحلیل تصویر دیجیتال بدست آورده است.

۵. مدل Keller :

این مدل جهت برآورد سطح تماس و نیز چگونگی توزیع تنش عمودی در زیر تایرهای ماشین‌های کشاورزی ارتقاء یافته است. از ویژگی‌های این مدل می‌توان به معادلاتی اشاره نمود که پارامترهای مورد نیاز آن همگی به راحتی قابل اندازه‌گیری می‌باشد. این معادلات براساس پارامترهای مختلف ماشین از جمله فشار باد تایر در حالت پیشنهادی برای بار مورد نظر، فشار باد تایر بکار برده شده، بار محوری، عرض تایر و قطر تایر بدون بار ارائه شده است. این مدل در واقع به صورت تجربی و براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده در مزرعه ارائه شده است. اندازه‌گیری‌ها با قرار دادن پنج نیروسنج در عمق ده سانتی متری خاک به صورت ردیفی و عمود بر جهت حرکت وسیله در فواصل معین از یکدیگر و عبور تایر از روی آنها بطوریکه حسگرها از لبه خارجی تا خط مرکزی تایر را پوشش داده، انجام شده است. خط مرکزی تایر بعنوان محور تقارن در نظر گرفته شده است (شکل ۸). محاسبه نیروی محوری وارده از ماشین بر خاک و مقایسه قرائت‌ها با آنها نشان داده است که نتایج تنها به میزان ۳٪ با میزان واقعی توزین شده تفاوت داشته که قابلیت اطمینان نتایج بدست آمده را نشان داده است. در این مدل از معادلات رگرسیونی خطی چند متغییره و نرم افزار SAS برای بررسی اثر پارامترهای تایر و بار محوری بر روی تنش ماکزیمم، شکل توزیع تنش و نیز طول سطح تماس استفاده شده است.

بیشینه تنش در این مدل با توجه به تحلیل رگرسیونی به صورت معادله‌ای با پارامترهای فشار تایر، لگاریتم نسبت فشار باد تایر به فشار باد پیشنهادی و بار محوری ارائه شده است. در نتیجه با افزایش فشار تایر (P_{tyre}) و یا بار محوری (F_{wheel}) و یا کاهش نسبت فشار باد تایر به فشار باد پیشنهادی ($\frac{P_{tyre}}{P_{recommended}}$)، بیشینه تنش (σ_{max}) افزایش می‌یابد. برای فشار باد برابر فشار باد پیشنهادی ($P_{recommended}$) مقدار لگاریتم مساوی صفر شده که علت استفاده از عامل لگاریتم را در معادله نشان می‌دهد (معادله ۲۵).

$$\sigma_{max} = 34.4 + 1.13 p_{tyre} + 0.72 F_{wheel} - 33.4 \ln\left(\frac{P_{tyre}}{P_{recommended}}\right) \quad (25)$$

سطح تماس برپایه ربع مساحت بیضی‌گون ($A_{quadrant}$) ارائه شده توسط Hallonborg (۱۹۹۶) مدل سازی شده است و سپس با ۴ برابر نمودن آن مساحت کل بدست آمده است. پارامتر بدون بعد شکل (n) در معادله بیضی‌گون به صورت تابعی از عرض و قطر تایر داده شده که برای $n=2$ معادله بیضی‌گون بوده و با میل n به بینهایت به یک مستطیل تبدیل می‌شود (معادله ۲۶).

$$A_{quadrant} = b \int_0^a \left(1 - \frac{x^n}{a^n}\right)^{\frac{1}{n}} dx = kab \quad (26)$$

معادله توزیع عرضی تنش عمودی ($\sigma(y)$) در این مدل با توجه به این نکته ارائه شده است که در اندازه‌گیری‌ها بیشینه تنش عمودی در جهت عرضی (عمود بر جهت حرکت)، هم در زیر خط مرکزی و هم در لبه تایر و در بعضی موارد در فاصله بین لبه تایر و خط مرکزی مشاهده شد و پارامتر α که بین ۱ تا ۱۶ متغیر است، مشخص کننده حالت هر کدام از این موارد می‌باشد. در اینجا با توجه به رابطه موجود بین بار محوری و عرض تایر در واقع اثر بار محوری نیز در پارامتر وارد شده است. معادله توزیع تنش عمودی ($\sigma(x)$) در طول با توجه به اینکه بیشترین تنش‌ها در زیر خط مرکزی بین لبه جلویی و عقبی اثر رد چرخ تائیری که مستقیماً در زیر اکسل چرخ قرار درد مشاهده شد به صورت یک معادله توانی ارائه شد. در معادلات زیر $L(y)$ طول سطح تماس در نقطه y ، $w(x)$ عرض سطح تماس در نقطه x و δ پارامتر شکل است (معادلات ۲۷ و ۲۸).

$$\sigma(x) = \sigma_{x=0,y} \left\{ 1 - \left(\frac{x}{L(y)} \right)^\alpha \right\} \quad 0 \leq y \leq \frac{L(y)}{2} \quad (27) \quad \sigma(y) = C \left(\frac{w(x)}{2} - y \right) e^{-\delta \left(\frac{w(x)}{2} - y \right)} \quad 0 \leq y \leq \frac{w(x)}{2} \quad (28)$$

۶ Soil Flex :

Soil Flex یکی از آخرین مدل‌های ارائه شده برای تحلیل توزیع و انتشار در خاک و شاید از جامع‌ترین آنها در مورد فشردگی خاک می‌باشد. این مدل بر این اساس Soil Flex نامیده شده است که می‌توان ترم‌های مختلف را به عنوان ورودی‌های این مدل به صورت انعطاف‌پذیری در مدل وارد نماید. این مدل شامل ۲ بخش برای محاسبه جابجایی عمودی و نیز عمق رد چرخ می‌باشد که این محاسبات یا فقط تنها از طریق بررسی میزان کرنش حجمی و یا همراه کرنش برشی قابل انجام است. هر کدام از مدل‌های فشردگی خاک مانند O'Sullivan (۱۹۹۹) و Van den Akker (۲۰۰۴) که در این مقاله نیز تا حدودی به آن پرداخته شده و نیز مدل‌های Gupta (۱۹۸۵) و Johnson (۱۹۹۰) دارای محدودیت‌های مربوط به خود می‌باشد. به عنوان مثال بعضی مدل‌ها شامل روابط بین تنش کرنش بوده و بعضی مدل‌ها این بخش را شامل نمی‌شود. بعضی از آنها به بررسی رفتار خاک در مواجهه با تنش‌های برشی نیز پرداخته‌اند که در بعضی این عامل در نظر گرفته نشده است. در واقع هدف اصلی از ارتقاء این مدل جمع‌آوری و بکارگیری جنبه‌های کاربردی و سودمند تمامی مدل‌ها در یک مدل بوده است تا براساس این گردآوری بتوان پیش‌بینی دقیق از انتشار تنش‌ها و تغییرات در جرم مخصوص حجمی براساس شرایط محیط خاک و شرایط ماشین و نیز تعداد عبورها را فراهم آورد.

این مدل دو بعدی امکان مقایسه مستقیم بین روابط مختلف تنش کرنش را فراهم می‌آورد. همچنین ارتقاء مدل به گونه‌ای بوده است که امکان شبیه‌سازی عبور ترکیب‌های مختلف ماشین (چرخ مختلف و بارهای مختلف) و نیز ترتیب مختلف قرارگیری چرخ‌های (دوبل-تک) را فراهم می‌کند. بعلاوه مدل شامل توابعی برای برآورد میزان سطح تماس و نیز تنش ناشی از تایر و خصوصیات بار محوری بر روی آن می‌باشد. از دیگر ویژگی‌های این مدل استفاده از مبدل‌های- فشاری برای برآورد خصوصیات مکانیکی خاک است که در تحلیل روابط تنش-کرنش بسیار حائز اهمیت بوده و یکی از ویژگی‌های بارز مدل Soil Flex می‌باشد.

ساختار مدل Soil Flex شامل جزء اصلی، برآورد میزان تنش‌های اعمالی بر روی سطح شامل تنش‌های برشی و تنش‌های برشی، محاسبه چگونگی انتشار تنش در خاک به صورت تحلیلی و محاسبه تغییر شکل خاک به صورت تابعی از تنش، می‌باشد. جهت برآورد میزان تنش‌های اعمالی بر روی سطح، تنش‌ها به صورت مجموعه‌ای از بارهای نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود که در هر نقطه دارای بار نرمال P_i و جزء برشی H_i بوده و در مرکز ناحیه A_i مربوط به خود وارد می‌شوند. شکل سطح تماس به طور کلی معادله یک بیضی در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب با تغییر مقادیر موجود در معادله بیضی‌گون می‌توان شکل بیضی را به یکی از شکل‌های دایره و یا مستطیل با توجه به خواست کاربر تغییر داد. در این مدل عرض سطح تماس برابر با عرض تایر فرض شده است. سطح تماس مطابق با مدل‌های ارائه شده توسط O'Sullivan (۱۹۹۹) یا Keller (۲۰۰۵) براساس مشخصات تایر و بارمحوری و یا تقسیم فشار بار محوری بر فشار باد تایر محاسبه می‌شود.

امکان محاسبه توزیع تنش با استفاده از مدل ارائه شده توسط O'Sullivan (۱۹۹۹) یا مدل Keller (۲۰۰۵) که در آنها بار محوری برابر $\sum P_i$ در نظر گرفته شده وجود دارد. توزیع تنش در جهت محور طولی (محور موازی حرکت) براساس مدل Keller (۲۰۰۵) محاسبه می‌گردد. تنش‌های افقی (تنش برشی) در سطح خاک براساس مدل Johnson به صورتی است که در آن تنش برشی یا به صورت یکنواخت و یا به صورت خطی از لبه جلویی تایر تا لبه انتهایی، از صفر تا مقدار بیشینه تغییر می‌کند. جابجایی برشی براساس مدل Koolen و Kuipers (۱۹۸۳) محاسبه می‌شود. از ویژگی‌های بارز مدل وارد نمودن داده‌هایی مانند تعداد تایرها و ترتیب قرارگیری و نیز فاصله بین چرخ‌ها و یا فاصله بین اکسل‌ها در چرخ‌های دوگانه و سه‌گانه و حالت تندوم می‌باشد. معادله تنش نرمال شعاعی ($\sigma_{r,i}$) Soil Flex ترکیبی است از معادله ارائه شده توسط زونه که تنش‌های برشی نیز در نقطه مذکور وارد می‌شوند. همچنین استفاده از معادلات ارائه شده توسط Söhne تنش‌های متوسط عمودی، تنش‌های تفاضلی و تنش برشی اکتاهدرال (H_i) محاسبه می‌شود (معادله ۲۹).

$$\sigma_{r,i} = \frac{\xi P_i}{2\pi r_i^2} \cos^{\xi-2} \theta_i + \frac{\xi H_i}{2\pi r_i^2} \sin^{\xi-2} \theta_i \cos \delta_i \quad (29)$$

Soil Flex شامل سه روش می‌باشد که کاربر با انتخاب هر کدام از آنها می‌تواند روابط بین تنش کرنشی و در نهایت فشردگی خاک براساس تغییرات در حجم خاک را بدست آورد. این سه روش براساس مدل‌های Larsson (۱۹۸۰)، Bailey و Johnson (۱۹۸۹)، و O'Sullivan (۱۹۹۶) در Soil Flex قرار دارد. مدل لارسون تغییرات

حجم با چگالی حجمی را به صورت معادله لگاریتمی بر مبنای ده و با استفاده از تنش اصلی بزرگتر محاسبه می‌کند. مدل Johnson و Bailey (۱۹۸۹) برای حالت تنش در مختصات استوانه‌ای ارائه شده است. در نهایت معادله مربوط به کرنش حجمی با برخی تبدیل‌ها بر اساس جرم مخصوص حجمی بیان می‌گردد. در مدل Soil Flex می‌توان به صورت اختیاری گسیختگی برشی را بر اساس معیار شکست موهر-کلمب محاسبه نمود. مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی باید به عنوان داده‌های ورودی مورد نیاز جهت محاسبه معلوم باشد. به منظور محاسبه جابجایی عمودی در خاک و عمق اثر آج، دو گزینه در Soil Flex به صورت انتخابی وجود انتخابی وجود دارد. گزینه اول استفاده از کرنش تک محوری بر اساس معادله کولن و کیوپرز (۱۹۸۳) (کرنش جانبی در عمق خاک قابل چشم‌پوشی در نظر گرفته شده) است. تحقیقات بعدی در این مورد توسط O'Sullivan (۱۹۹۹)، Richard و De'fossez (۲۰۰۲) نشان داده که استفاده از این حالت باعث برآورد کمتر عمق اثر آج می‌شود. حالت دوم کرنش حجمی و کرنش برشی محاسبه می‌شود. این مدل به صورت یک برنامه نوشته شده Macro توسط نرم‌افزار Visual Basic می‌باشد که در نرم‌افزار Exel قابل اجرا است.

۷. بحث و نتیجه‌گیری :

بدون شک پیش بینی مقدار و درجه فشردگی در خاک‌های کشاورزی و عوامل موثر در تولید آن از عمده مسائل پیش روی فعالین در بخش کشاورزی است. مدل‌های ارائه شده توسط محققین مختلف می‌تواند کمک شایانی به حل این مساله بنماید. تنها باید به این نکته توجه داشت که هر مدل برای شرایطی خاص از نقطه نظر ویژگی‌های خاک و خصوصیات ماشین ارائه شده است و نمی‌تواند به تمامی مسائل مطرح شده پاسخ صحیح دهد. بنابراین بر عهده فعالین بخش کشاورزی بخصوص دانشجویان، اساتید و مشاوران کشاورزی است تا با تطبیق شرایط ارائه مدل با شرایط واقعی خود اقدام به انتخاب یک مدل از مدل‌های معتبر ارائه شده بنمایند.

۸. منابع :

- Anonymous. 2004. Avoiding soil compaction. The Pennsylvania State University, College of Agricultural Sciences.
- Anonymous,. 2004. Description of Cam-Clay and modified-Cam-Clay critical strength models. Available at: <http://www.roscience.com/download/phase2/WebHelp/pdf/files/theory/CamClay.pdf>. (Verified on, Sep. 26, 2009)
- Bailey, A.C., Johnson, C.E., 1989. A soil compaction model for cylindrical stress states. Trans. ASAE 32, 822–825.
- Blackwell, P.S., 1979. A method for predicting soil dry bulk density beneath agricultural wheels. Ph.D. Thesis, University of Edinburgh, unpublished.
- Boussinesq, J., 1885. Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastique. Gauthier- Villais, Paris (cited by Fröhlich).
- Defossez, P., Richard, G., 2002. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. Soil Tillage Res. 67,41–64.
- Desai, C.S., Sharna, K.G., Wataguala, G.W., Rigby, P.B., 1991. Implementation of hierarchical single surface d0 and d1 models in @nite element procedure. Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech. 15, 649±680.
- Fröhlich, O.K., 1934. Druckverteilung im baugrunde. Verlag von Julius Springer, Wien.

- Geiser, F., Laloui, L., Vuilliet, L., 1999. Unsaturated soil modeling with special emphasis on undrained conditions. In: Pande, G.N., Pietruszczak, S., Schweiger, H.F. (Eds.), *Numerical Models in Geomechanics. Proceedings of the Seventh International Symposium on Numerical Models in Geomechanics- NUMOG VII*, Graz, Austria, September 1-3, pp. 9-14.
- Gupta, S.C., Hadas, A., Voorhees, W.B., Wolf, D., Larson, W.E., Schneider, E.C., 1985. Field testing of a soil compaction model. In: *proceeding of the international Conference on Soil Dynamics*, Auburn, AL, Vol. 5, pp. 979-994.
- Gysi, M., 2001. Compaction of a Eutric Cambisol under heavy wheel traffic in Switzerland: Field data and a critical state soil mechanics model approach. *Soil Tillage Res.* 61,133–142.
- Hamza, M.A., Anderson, W.K., 2005. Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 82,121–145.
- Horn, R., 1998. Eine method zur ermittlung der druckbelastung von boden anhand von drucksetzungskurven. *Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung* 22,20-26.
- Keller, T., 2005. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. *Soil Tillage Res.* 92(1), 85-96.
- Kelubertanz, G., 1999. Zur hydromechanischen kopplung in dreiphasigen porösen median. These de doctorat. Lausanne, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- Koolen, A.J., Kuipers, 1983. *Agriculture soil mechanics: advanced series in agriculture sciences*, Vol. 13. Springer Heidelberg.
- O’Sullivan, M.F., Henshall, J.K., Dickson, J.W., 1999. A simplified method for estimating soil compaction. *Soil Tillage Res.* 49, 325–335.
- Plackett, C.W., 1984. The ground pressure of some agricultural tyres at low load and with zero sinkage. *J. Agric. Eng. Res.* 29, 159-166.
- Söhne, W., 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tyres. *Agric. Eng.* 39, 276– 281.
- Van den Akker, J. J. H., 2004. SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. *Soil Tillage Res.* 79, 113–127.
- Zienkiewicz, O.C., Taylor, R. T., 2005. *The Finite Element Method*. Introduction.

Abstrac:

Undoubtedly, emerge of track machines like tractors and other kind of agricultural machines are two of the most important factors that cause increasing in yield and efficiency. Since entrance of agricultural machines to production system, evaluation of interaction among environment and machine has been being very popular among scientist. One of the most interesting issues in this realm has been being effects of heavy machines on environment and also production of soil compaction. Assessment of effective factors on soil compaction on different layers of soil, prediction of soil compaction degree, estimation and analyses stress distribution under tire, calculation and simulation of stresses on different layers of soil due to loading could help significantly to improve ways of preventing soil compaction and approaches for overcoming soil compaction in recent years. Up to now, various models were presented for prediction of soil compaction due to agriculture machines traffic. The following research evaluates some of soil compaction prediction models and their principles.

Key words: soil compaction models