مطالعه‌ای جامع در خصوص مدل‌های پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی ادوات خاک‌ورزی

حمید جلیل‌نژاد[۱]، یوسف عباسپور گیلانده[۲] و غلامحسین شاهقلی[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

hamidjalilnejhad@yahoo.com

چکیده

طراحی ادوات خاک‌ورزی مستلزم شناسایی نیروهای وارد بر آنها می‌باشد. نیروی مقاوم کششی ادوات خاک‌ورزی یکی از مهمترین نیروهایی است که برای اندازه‌گیری و ارزیابی انرژی لازم ادوات مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از این مطالعه مروری بر مدل‌های پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی ادوات خاک‌ورزی و همچنین پیشرفت‌های انجام شده در این حوزه می‌باشد. مدل‌های پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی به سه دسته تجربی، تحلیلی و عددی تقسیم‌بندی می‌گردند. روش تحلیلی توسط بسیاری از محققین در زمینه خاک‌ورزی در پنج دهه اخیر بکار گرفته شده است. کاربرد مدل‌های تحلیلی برای ابزارهای با اشکال هندسی ساده مناسب می‌باشد. طراحی ابزارهای خاک‌ورزی با اشکال پیچیده نمی‌تواند با این روش انجام گیرد. مدل‌های تجربی یا آزمایشی به علت تجهیزات لازم پرهزینه می‌باشند. تعیین رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته در این روش معمولاً توسط مدل‌های رگرسیونی و همچنین روش شبکه‌های عصبی مصنوعی صورت می‌گیرد. روش دینامیک سیال محاسباتی برای بررسی مسائل حل نشده در دینامیک خاک‌ورزی بکار گرفته شده است. رفتار جریان و تغییر شکل خاک به علت طبیعت ویسکوپلاستیک آن و جرم تغییر شکل یافته به علت تأثیر ابزار توسط این مدل بکار گرفته شد. با روش CFD حرکت ذره‌ای یک سیستم می‌تواند با سرعت و توزیع تنش مشخص شود. با توجه به اینکه روش اجزای محدود و المان گسسته در اکثر موارد با توجه به تغییرات بسیار زیاد در داخل خاک از لحاظ خصوصیّات فیزیکی و دینامیکی، نتایج قابل قبولی را در این زمینه ارائه نکرده است از ترکیب روش اجزاء محدود و شبکه عصبی می‌توان به‌منظور طراحی کامپیوتری ادوات خاک‌ورزی استفاده کرد. با این هدف، شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور پیش‌بینی خصوصیّات دینامیکی خاک بدون نیاز به تجزیه و تحلیل تنش و کرنش در داخل خاک بکار می‌رود و روش اجزاء محدود محاسبه نیروی کششی، تنش‌ها و جابجایی‌ها را در داخل خاک محاسبه می‌نماید. بدین ترتیب از ترکیب این دو روش می‌توان به‌منظور طرّاحی و تجزیه و تحلیل سه بعدی تنش‌ها و نیروهای وارد بر ادوات خاک‌ورزی استفاده کرد.

واژه های کلیدی: نیروی مقاوم کششی، پیش‌بینی، شبیه‌سازی و ادوات خاک‌ورزی.

۱. مقدمه

شناسایی نیروهایی که در طول عملیات خاک‌ورزی بر ابزار وارد می‌شوند، برای طراحی تجهیزات خاک‌ورزی که در ارتباط با خاک هستند، مفید و با ارزش می‌باشد. نیروی مقاوم کششی[۱] ادوات خاک‌ورزی یکی از مهمترین نیروهایی است که برای اندازه‌گیری و ارزیابی انرژی لازم ادوات مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نیرو تابعی از پارامترهای زیر می‌باشد:

- شرایط خاک مثل محتوی رطوبتی، بافت خاک و...
- پارامترهای ابزار مثل عمق، زاویه حمله، تیزی تیغه و...
- پارامترهای عملیاتی مثل سرعت پیشروی ابزار.

که این پارامترها تحت شرایط مختلف تغییر می‌کنند. با توجه به اهمیت این نیرو باید بررسی‌های اساسی روی این نیرو و اثرات آن صورت گیرد. تحقیقات زیادی برای بررسی این نیرو و پیش‌بینی آن انجام شده است که اکثر این مدل‌ها برای ابزارهای متقارن می‌باشند و بر پایه مدل‌های ارتباط خاک- ابزار توسعه داده شده‌اند. این مدل‌ها نیروی مقاوم کششی و نیروهایی را که به طور عمودی به خاک وارد می‌شوند، محاسبه می‌کنند. در برخی موارد مثلاً برای دیسک‌ها و گاوآهن های برگردان‌دار نیروی جانبی نیز پیش‌بینی می‌شود (گادوین و داگرتی[۲]، ۲۰۰۷). یک فهم دقیق از مکانیزم ارتباط خاک- ابزار در طراحی عناصر مؤثر برای بهم‌زدن خاک و نفوذ در خاک با ارزش می‌باشد. همچنین خصوصیات فیزیکی خاک که حرکت ابزار را تحت تأثیر قرار می دهند، برای درک چگونگی طراحی تجهیزات مؤثر می‌باشد تا برای دامنه وسیعی از شرایط و انواع خاک‌ها مناسب باشد. به‌طورکلی مدل ارتباط خاک- ابزار به دو دسته اساسی تقسیم می شود: ۱- مدل‌های پیش‌بینی نیرو که بر پایه مکانیک موهر-کلمب[۳] با استفاده از حد تحمل و دیوار حایل غیر فعال می‌باشند.۲- مکانیزم گسیختگی خاک. (گادوین و داگرتی، ۲۰۰۷).

هدف از این مطالعه مروری بر روش‌های بکار گرفته شده به‌منظور پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی ادوات خاک‌ورزی و همچنین پیشرفت‌های انجام شده در این حوزه می‌باشد.

۲. مدل‌های پیش‌بینی نیرو

بطورکلی مدل‌های پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی شامل سه روش اصلی تجربی[۴]، تحلیلی[۵] و عددی[۶] می‌باشد. مدل‌های تجربی یا آزمایشی به علت تجهیزات لازم پرهزینه می‌باشند که نیاز به داده‌برداری دقیق دارند. در این روش رابطه بین متغیرها توسط یک سری از مشاهدات داده‌ای مشخص می‌شوند. تعیین رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته در این روش معمولاً توسط مدل‌های رگرسیونی و همچنین روش شبکه‌های عصبی مصنوعی[۷] (ANN) صورت می‌گیرد. در مدل‌های تحلیلی لازم به‌ذکر است که کاربرد مدل‌های تحلیلی برای ابزارهای با اشکال هندسی ساده مناسب می‌باشد. طراحی ابزارهای خاک‌ورزی با اشکال پیچیده نمی‌تواند با این روش انجام گیرد و یک روش طولانی برای پارامترهای متغیر خاک - ابزار

---

[1]- Draft
[2] - Godwin and O'Dogherty
[3] - Mohr–Coulomb soil mechanics
[4] - Empirical
[5] - Analytical
[6] - Numerical
[7] - Artificial neural Networks

می‌باشد. این روش شامل پارامترهای مختلف از سیستم خاک‌ورزی می‌باشد و رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل را نشان می‌دهد. مفید بودن این مدل به کامل بودن پارامترها بستگی دارد. کامپیوترهای باسرعت بالا و نرم افزارهای تجاری باعث توسعه مدل‌های عددی شده‌اند که قادر به تحلیل فیزیکی مسائل با هندسه پیچیده ابزار با استفاده از طراحی به کمک کامپیوتر در زمان کوتاه می‌باشند و دقت بالایی دارند و محدودیت روش تحلیلی را مرتفع می‌سازند. (کارماکار و کوشواها[1]، ۲۰۰۶). روش‌های عددی به سه دسته تقسیم می‌شوند: ۱- روش المان محدود[2](FEM) ۲- روش المان گسسته[3] (DEM) ۳- روش دینامیک سیال محاسباتی[4] (CFD). معمولاً از داده‌های تجربی به‌منظور وارسی مدل‌های عددی استفاده می‌گردد. در زیر به تعدادی از مطالعات گذشته که برای پیش‌بینی نیروی کششی بر اساس مدل‌های ذکر شده در فوق انجام شده اشاره می‌شود.

۲-۱- مدل‌های تحلیلی پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی ادوات خاک‌ورزی

روش تحلیلی یکی از روش‌هایی است که برای پیش بینی ارتباط خاک – ابزار مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش توسط اکثر محققین در زمینه خاک‌ورزی در پنج دهه اخیر بکار گرفته شده است. نتایج این روش هنوز هم در بسیاری از موارد معتبر هستند و در روش‌های تجربی و عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند. معادله ریس[5] (۱۹٦۵) یک معادله اساسی در این روش می‌باشد و توسط محققین مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است (هیتاراتچی و ریس[6]، ۱۹٦٦، ۱۹٦۷، ۱۹۷٤).
اکالاگان و مسی‌کن[7] در سال ۱۹٦۵ عمل یک گاوآهن برگرداندار را به صورت تحلیلی بررسی کردند. آنها نیروهای وارد شده به مثلث اولیه خاک را هنگام عبور از جلوی گاوآهن بررسی کردند و قادر بودند با کمک یک کامپیوتر دیجیتالی کشش گاوآهن را پیش‌بینی کنند.

۲-۲- مدل‌های تجربی پیش‌بینی نیروی مقاومت کششی ادوات خاک‌ورزی براساس روش‌های رگرسیونی

تحقیقی توسط اسکوی[8] و همکاران (۱۹۸۲) به‌منظور پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی یک گاوآهن برگرداندار سه خیشه دو طرفه با دو نوع بدنه در ۵ مکان مجزا انجام شده است. هر مکان در ٤ روز مختلف شخم زده شده بود تا دامنه‌ای از محتوی رطوبتی خاک را فراهم کند. سه سرعت پیشروی برای هر بدنه در نظر گرفته شده بود. نیروهای افقی و عمودی توسط یک دینامومتر اتصال سه نقطه اندازه‌گیری می‌شدند. دورسنج الکتریکی سرعت چرخ محرک تراکتور و سرعت چرخ پنجم را اندازه‌گیری می‌کرد. شاخص مخروطی در عمق متوسط بدست می‌آمد تا یک اندازه رضایت‌بخش از مقاومت خاک برای پیش‌بینی نیروی مقاومت کششی باشد. با پیش‌بینی مقدار نیروی مقاومت کششی برحسب شاخص مخروطی، وزن مخصوص، محتوی رطوبتی خاک، زاویه دنباله صفحه برگردان و سرعت پیشروی، تجزیه و تحلیل رگرسیونی یک ارتباط نزدیک بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داد.

---
[1] - Karmakar and Kushwaha
[2] - Finite Element Method
[3] - Discrete Element Method
[4]- Computational Fluid Dynamics
[5] - Reece
[6] - Hettiaratchi and Reece
[7] - O'Callaghan and McCoY
[8] - Oskoui

داشتن اطلاعاتی درخصوص ارتباط بین نیروهای ابزار و سرعت برای استراتژی‌های مدیریتی برای عملکرد بهینه امری ضروری است. تأثیر سرعت بر روی نیروهای ابزار خاک‌ورزی برای تیغه‌های تخت عریض و باریک در یک خاک شنی سیلتی در مخزن خاک مورد مطالعه قرار گرفته بود. ابزار در دو عمق با دو زاویه حمله و هشت میزان سرعت تست شده بود. عملکرد سه مدل تئوری بر پایهٔ روش گوه آزمایشی[1] در پیش‌بینی نتایج تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته بودند. مدل اول بر پایه روش شونه (با تغییر برای آنالیز سه بعدی) فرض می‌کرد که خاک در یک سری صفحه‌های برشی می شکند و یک گوه تشکیل می‌دهد که به شکل ذوزنقه ای است. تعادل نیروهای مرزی گوه، نیروی لازم برای شکست را تولید می‌کند. مدل دوم بر پایه روش مک‌کای فرض می‌کند که شکست خاک بوسیله تغییر شکل گوه مرکزی احاطه شده توسط دو هلال جانبی می‌باشد. تعادل نیروهای مرزی بر روی گوه و هلال ها نیروی را تولید می‌کند که تابعی از زاویه شکست نامعلوم می‌باشد که از حداقل کردن جزء وزن کل نیرو بدست آمده است. مدل سوم بر پایه روش پرومپرال، همان گوه شکست مدل دو را فرض می‌کند اما در عوض کل نیروی برشی حداقل شده است. نتایج تجربی نشان دادند که نیروی ابزار (نیروی کشش و عمودی) تابعی از سرعت و مربع سرعت می‌باشند در حالیکه سه مدل فوق آن را فقط تابعی از مربع سرعت فرض می‌کردند. میانگین درصد خطای نیروهای پیش‌بینی شده از مقادیر مشاهده شده به ترتیب ٤٣٪، ٤٠٪ و ٦٦٪ برای مدل‌های یک، دو و سه بودند. بنابراین مدل دو سازش بیشتری با مشاهدات تجربی داشت. مدل‌ها برای پیش‌بینی نیروهای ابزار باریک با میانگین درصد خطای ٣٣٪، ٢٨٪ و ٤٦٪در مقایسه با میانگین درصد خطای ٥٣٪، ٥١٪ و ٨٥٪ برای تیغه عریض به ترتیب برای مدل های مدل‌های یک، دو و سه بودند(اونولو و وات[2]، ١٩٩٨).

مدلی توسط الجنوبی و السوهایبانی[3] (١٩٩٨) برای پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی ادوات خاک‌ورزی اولیه استاندارد در یک خاک لومی شنی بکار گرفته شده بود. ادوات شامل سه چیزل با ساقه‌های مختلف، یک دیسک آفست، یک گاوآهن برگردان‌دار و یک گاوآهن بشقابی بودند. تأثیرات سرعت و عمق بر روی کشش مورد بررسی قرار گرفته بود. معادلات رگرسیون عمومی برای پیش‌بینی کشش ادوات بر اساس سرعت و عمق بکار گرفته شد. نتایج نشان داد که با افزایش عمق و سرعت کشش افزایش می‌یافت. با مقایسه متغیرهای بررسی شده مهم، تاثیرات خطی عمق و سرعت بر روی نیروی مقاوم کششی برای تمام ادوات نتیجه مهم این تحقیق بود.

یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی نیروهای وارده بر ابزارهای باریک برش خاک توسعه یافت که شامل هندسه واقعی بیشتری از گوه خاک در مقایسه با مدل‌های مکانیکی پیشین می‌شد. مدل جدید تغییرپذیری زوایای تمایل سطح شکست زیرین در حلقه‌های کناری را در نظر می‌گرفت. همچنین شامل محاسبه نیروهای اینرسی برای حلقه مدل‌های یک، دو و سه های کناری مختلف براساس موقعیت فضایی مثلث سرعت بود که سرعت‌های مطلق کاملاً متفاوتی برای حلقه‌های خاص می‌داد. پیش‌بینی کشش بر پایه یکسری از نیروهای پیچیده بود که شامل عمق بحرانی و ناحیه شکست دو بعدی همراه با نیروهای اینرسی در ناحیه سه بعدی می‌باشند. مقادیر مجهول عمق بحرانی همراه با زاویه شکست بوسیله کمینه کردن کل نیروی وارده بر ابزار محاسبه می‌شد. آزمایشات در مخزن خاک انجام گرفت. مقدار خطا بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده دراین مدل به ١١/٧ رسید. در حالی که درمقادیر محاسبه شده از تئوری‌های مختلف مقدار خطا از ١٧/١ تا ٣٤/٩ می‌رسید.

[1] -Trial wedge approach

[2] -Onwualu and Watts

[3] - Al-Janobi and Al-Suhaibani

نتیجه اصلی مدل امکان‌پذیری پیش‌بینی خیلی دقیق مقاومت ابزار باریک توسط معرفی تغییرپذیری زوایای تمایل سطح شکست زیرین در حلقه‌های کناری می‌باشد که ناشی از انحراف ابزار از مسیر حرکت بود که در مدل های موجود در نظر گرفته نمی‌شد (کوسزوکی و پیوتروسکا[1]،۱۹۹۸).

یک مدل ریاضی برای حرکت افقی ذرات خاک در جلو ابزار خاک‌ورزی توسط شریفت و کوشواها[2] (۲۰۰۷) توسعه داده شده است. با فرض اینکه حرکت ذرات خاک نسبی است و در مسیر حرکت، تنش نرمال از معادلات بوسینیسک تعیین می‌شود، فرض شده بود که یک ناحیه تأثیرگذار دینامیکی در جلو ابزار در حال حرکت موجود می‌باشد. این ناحیه تأثیرگذار به شکل دایره‌ای در نظر گرفته شده بود و به ابزار خاک‌ورزی در مسیر حرکت افزوده شده بود. معادلات مختلفی از حرکت ذرات خاک با در نظر گرفتن این ناحیه توسعه یافته بود و بطور عددی با استفاده از نرم افزار مطلب حل شده بود. نتایج حاصل از مقایسه آزمایشات مخزن خاک و مقادیر پیش‌بینی شده نشان داد که با در نظر گرفتن پیچیدگی شرایط خاک و دشوار بودن مدل کردن پارامترهای خاک، به نظر می‌رسد این مدل سازش خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشته باشد. همچنین این مدل حرکت خاک را فقط تابعی از سرعت عملیات خاک‌ورزی پیش‌بینی می‌کند و برای طراحی بهتر ادوات خاک‌ورزی برای کاهش حرکت خاک مفید می‌باشد.

معادله پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی بوسیله استانداردهای ASAE در سال ۲۰۰۱ معرفی شد و برای ابزارهای باریک خاک‌ورزی بکار برده می‌شود. که در این معادله نیروی کششی تابعی از پارامترهای عمق، عرض، سرعت پیشروی می باشد. این معادله در اکثر مناطق دنیا مورد استفاده قرار می گیرد.

میزان انرژی مصرفی در طول عملیات خاکورزی به سه پارامتر بستگی دارد: پارامترهای خاک، پارامترهای ابزار و پارامترهای عملیاتی. اگرچه محققین زیادی تأثیرات این پارامترها را گزارش کرده اند اما تعداد دقیق پارامترهای مؤثر و توزیع هر یک از پارامترها در کل انرژی لازم مشخص نشده است. مطالعه ای با اهداف مشخص کردن اجزای انرژی مصرفی و تعیین میزان هر جزء توسط اشرفی‌زاده (۲۰۰٦) برای یک ابزار باریک عمودی بخصوص در سرعت های بالای عملیات در مخزن خاک انجام شده بود. بر اساس مدل بلومل[3](۱۹۸٦) و کوشواها و لینک[4] (۱۹۹٦)، چهار جزء انرژی مصرفی عبارتند از: ۱- انرژی لازم در ارتباط با عکس العمل خاک- ابزار ۲- انرژی لازم در ارتباط با عکس العمل بین جرم خاکی شخم خورده و شخم نخورده ۳- انرژی لازم در ارتباط با تغییر شکل خاک ٤- انرژی لازم در ارتباط با شتاب خاک شخم زده شده. تأثیرات سه متغیر محتوی رطوبتی، عمق و سرعت پیشروی بر روی انرژی بررسی شده بود. معادلات رگرسیون برای اجزای مختلف انرژی بر اساس داده های آزمایشی توسعه یافته بودند و بعدا توسط آزمایشات انجام شده در مخزن خاک معتبر شده بودند. داده های اجزای انرژی در مدل توسعه داده شده همبستگی خوبی با داده های تجربی برای تمام چهار جزء نشان داد.

ساهو و راهمن[5](۲۰۰٦) آزمایشاتی با ابزارهای خاکورزی مدل مقایسه ای (گاوآهن برگرداندار، کولتیواتور ودیسک) در خاک لومی شنی رسی در دو محتوی رطوبتی به منظور پیش بینی نیروی کششی انجام دادند. آنها مشاهده کردند که کشش لازم تمام ادوات خاکورزی به طور عمده تحت تأثیر سرعت، عمق، عرض برش، محتوی رطوبتی و شاخص مخروطی قرار می گیرد.

---

[1] - Kuczewski and Piotrowska
[2] - Sharifat and Kushwaha
[3] - Blumel
[4] -Kushwaha and Linke
[5] - Sahu and Raheman

تحقیقاتی در مخزن خاک برای مطالعه تأثیرات برخی از پارامترهای خاک ازقبیل محتوی رطوبتی و شاخص مخروطی بر روی نیروی مقاوم کششی و مدل بهم‌زنی خاک برای ادوات خاک‌ورزی انجام شده بود (منوا و آدمسون[1]، ۲۰۰۷). ابزارها در گروه‌های انگشتی خیلی باریک، باریک و پهن بودند. خاک مورد مطالعه لومی رسی شنی بود. مدل‌های رگرسیونی چند جمله‌ای بهترین توصیف را با ضریب تبیین بالا نشان دادند. نتایج نشان داد که کشش به طور عمده تحت تأثیر محتوی رطوبتی و شاخص مخروطی خاک قرار می‌گیرد. آنالیز واریانس نشان داد که نوع ابزار و زاویه حمله تأثیر معنی‌داری بر روی کشش دارند.

یک مدل ریاضی که نیروی کششی وارده به خیش گاوآهن برگرداندار را پیش‌بینی می‌کرد، توسط گادوین[2] و همکاران(۲۰۰۷) توسعه یافته است. یکی از جنبه‌های مهم این مدل این است که نیروی کششی با استفاده از پارامترهای هندسی اجزای بدنه خیش، سرعت شخم و خصوصیات فیزیکی خاک محاسبه شده است. یک صفحه گسترده برای اجرای محاسبات پیچیده توسعه یافته است تا نیروی کشش کل را تعیین کند. کار تجربی برای اعتبار بخشیدن به مدل با استفاده از دو نوع بدنه خیش در خاک های لومی شنی و رسی شنی انجام شده بود. مقایسه نیروهای کشش اندازه گیری شده و پیش بینی شده توسط مدل نشان داد که نیروهای پیش بینی شده ۲/۸ ٪ کمتر از مقادیر اندازه گیری شده بودند.

تعدادی از مدل های تجربی رگرسیونی چند جمله ای در گذشته توسط محققین زیادی برای پیش بینی کشش ادوات خاکورزی انجام شده است (وانگ[3]، ۱۹۷۲، کلینز[4]، ۱۹۷۸، جی کلاوگ[5]، ۱۹۸۷، کپنر[6]، ۱۹۸۲، کید[7]، ۱۹۸٤، گریسو[8]، ۱۹۹٦، ۱۹۹٦، خیرالا[9]، ۲۰۰٤، ساهو و راهمن، ۲۰۰٦). با این وجود اکثر این مدل ها اغلب به مسائل چند جمله ای منجر می شوند شوند و کاربردشان به خاکها و شرایط ابزاری که کار کرده اند، محدود شده است.

۲-۳- مدل‌های تجربی پیش‌بینی نیروی مقاومت کششی به کمک شبکه عصبی مصنوعی

شبکهٔ عصبی مصنوعی یک سیستم غیرخطّی می‌باشد که بدون داشتن اطّلاعات کامل از نحوهٔ ارتباط پارامترها و قوانین حاکم بین آنها سیستم را شبیه‌سازی می‌نماید. بنابراین استفاده از این سیستم غیر خطّی می‌تواند بسیاری از مشکلات روش‌های تحلیلی را مرتفع سازد و مطابق با شرایط فعلی و شرایط حاکم بر سیستم خاک با استفاده از داده‌های واقعی آموزش ببیند و برای کاربردهای بعدی تعمیم داده شود.

تحقیقاتی در زمینه شبیه‌سازی رفتار خاک، مدل کردن تنش و کرنش در داخل خاک و نیز طبقه بندی ساختار خاک با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی انجام گرفته است(گابوسی و همکاران[10]،۱۹۹۱ ، لوین[11] و همکاران، ۱۹۹٦). و تمامی این

---

[1] - Manuwa and Ademosun
[2] - Godwin
[3] - Wang
[4] - Collins
[5] - Gee-Clough
[6] - Kepner
[7] - Kydd
[8] - Grisso
[9] - Kheiralla
[10] - Ghaboussi
[11] - Levine

تحقیقات نتایج بسیار موفق استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی را در این تحقیقات و بخصوص در کارهای پیش‌بینی و مدل کردن فرآیندهای پیچیده آشکار می‌سازد.

محققین اندکی مدل‌های ANN را به‌منظور پیش‌بینی کشش ادوات خاک‌ورزی بکار برده‌اند. ژانگ و کوشواها[1] (۱۹۹۹) یک تابع شعاعی شبکه عصبی را به‌منظور پیش‌بینی کشش لازم تیغه‌های باریک با استفاده از سرعت، نوع ابزار و خاک به عنوان پارامترهای ورودی توسعه دادند. آنها گزارش کردند که مدل توسعه یافته برای پیش‌بینی، توانایی تعمیم خوبی در درون‌یابی در محدوده پارامترهای ورودی دارد.

کوشواها و همکاران (۱۹۹۸) استراتژی دیگری را ارائه نمودند که از ترکیب روش اجزاء محدود و روش شبکه عصبی مصنوعی می توان به منظور طراحی کامپیوتری ادوات خاک‌ورزی استفاده کرد. با این هدف شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور پیش‌بینی خصوصیات دینامیکی خاک بدون نیاز به تجزیه و تحلیل تنش و کرنش در داخل خاک بکار می‌رود و روش اجزاء محدود محاسبه نیروی کششی تنش‌ها و جابه جایی را در داخل خاک محاسبه می نماید.

الجنوبی[2](۲۰۰۱) یک شبکه چند لایه پس انتشار با الگوریتم یادگیری پس انتشار بر پایه مدل شبکه عصبی مصنوعی به منظور پیش بینی کشش ویژه گاوآهن چیزل، دیسک خارج از مرکز، گاوآهن برگرداندار و یک گاوآهن بشقابی توسعه داد. خصوصیات خاک، نوع ابزار، عمق های عملیاتی و سرعت های پیشروی به عنوان پارامترهای ورودی و کشش به عنوان پارامتر خروجی معرفی شدند. معماری شبکه شامل دو لایه مخفی با ٢٤ نرون در لایه مخفی اول و ۱۲ نرون در لایه دوم می باشد. لایه های خروجی و مخفی از توابع انتقال سیگموید در مدل استفاده کردند. نتایج نشان داد که اختلاف بین مقادیر پیش بینی شده و مقادیر اندازه گیری شده خیلی کم بود و ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۸۷ بود. این مدل یک مدل مناسب بود زمانی که هیچ تغییری از خصوصیات خاک را مطرح نمی‌کرد.

چویی[3] در سال ۲۰۰۰ یک شبکه عصبی مصنوعی بازگشتی با تأخیر زمانی را به‌منظور پیش بینی کشش دینامیکی سه نوع ابزار خاک‌ورزی بکار برد. شکل های مختلف ابزار، نیروی برشی و شاخص مخروطی خاک پارامترهای ورودی بودند. پارامتر خروجی کشش لازم ادوات می باشد. این مدل به عنوان یک روش دلگرم کننده برای محاسبه کشش دینامیکی ادوات گزارش شد.

تحقیقی توسط عباسپور گیلانده و همکاران (۱۳۸۷) به‌منظور توسعه مدل پیش‌بینی نیروی کششی و انرژی خاک‌ورزی عملیات زیرشکنی گزارش شده است. در این تحقیق پارامترهای سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی و پارامترهای مختلف خاک (شاخص مخروطی، محتوی رطوبتی، هدایت الکتریکی، درصد رس، درصد شن و...) مورد استفاده قرار گرفتند. آزمایشات در سه نوع خاک انجام شدند. مدل شبکه عصبی مصنوعی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. شبکه‌های طراحی شده از نوع شبکه چند لایه پس انتشار برگشتی بودند که به منظور آموزش شبکه از سه نوع الگوریتم گرادیان نزولی با مومنتوم، الگوریتم لونبرگ- مارکوات و الگوریتم گرادیان نزولی مقیاسی بودند. انتخاب بهترین الگوریتم آموزشی بر اساس مقایسه عملکرد شبکه های ساخته شده (در مرحله آموزش و آزمون داده ها) انجام گردید. با توجه به دقت پیش بینی بالا (۹۵/۸ ٪) و دقت شبیه‌سازی بالا (۹۷/٦٪) استفاده از الگوریتم لونبرگ- مارکوات با دو لایه میانی با تعداد ۱۲ نرون در لایه اول و ۱۰ نرون در لایه دوم در مقایسه با سایر الگوریتم های آموزشی مناسب تشخیص داده شد. به منظور

[1] - Zhang and Kushwaha
[2] - Al-Janobi
[3] - Choi

ارزیابی مدل شبکه عصبی، داده های بدست آمده از این مدل ها با داده‌های مدل‌های رگرسیونی (مدل ارائه شده توسط انجمن مهندسین کشاورزی آمریکا و مدل گارنر) مورد مقایسه قرار گرفتند. مقایسه نتایج بدست آمده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و مدل‌های رگرسیونی نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی داده‌های بسیار نزدیکتری نسبت به داده‌های واقعی در مقایسه با سایر مدل‌های رگرسیونی ارائه کرد.

مطالعه ای در سال ۲۰۰۹ توسط منوا[1] برای بررسی عملکرد سه ابزار باریک با سه عرض مختلف در یک مخزن خاک با خاک لومی رسی شنی انجام شده بود. ابزار در سه سرعت مختلف و چهار عمق کار می کرد. یک ارتباط خوبی بین مقادیر نیروی مقاوم کششی ندازه‌گیری شده و پیش بینی شده بدست آمد. ارتباط بین عمق و نیروی کششی منحنی شکل بود و توسط تابع نمایی توصیف شد.

مطالعه ای توسط رول[2] و همکاران (۲۰۰۹) برای پیش بینی کشش لازم ادوات خاک‌ورزی در خاک لومی رسی شنی در مخزن خاک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی انجام گرفت. شبکه عصبی با الگوریتم یادگیری پس انتشار برای پیش بینی کشش لازم ادوات مختلف خاکورزی تحت شرایط مختلف عملیاتی و شرایط مختلف خاک مورد استفاده قرار گرفته بود. پارامترهای ورودی شبکه شامل عرض برش، عمق، سرعت پیشروی، محتوی رطوبتی و چگالی ظاهری خاک می شدند. خروجی شبکه کشش لازم ادوات می باشد. این مدل کشش لازم گاوآهن برگرداندار، کولتیواتور و دیسک را با خطای کمتر از ٦/٥ ٪ در مقایسه با مقادیر اندازه گیری شده پیش بینی کرد. همچنین ضریب تبیین بالای ۰/۹۹ بدست آمد و حداقل میانگین مربعات خطا برابر با ۰/۰۲٦٤ بود.

۲-٤- مدل‌های عددی پیش‌بینی نیرو براساس دینامیک سیال محاسباتی

در طراحی و توسعه برنامه های دینامیک سیال محاسباتی (CFD) مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا یک ابزار عددی استاندارد برای پیش بینی نه فقط رفتار جریانی سیال بلکه همچنین گرما و جرم، تغییر فاز، عکس العمل شیمیایی، حرکت مکانیکی و تنش یا تغییر شکل باشند.(سچاین[3]، ۱۹۹۳). این برنامه ها یک توصیف جزئی از توزیع جریان را فراهم می کنند که قادر است تغییرات هندسی را با هزینه و زمان خیلی کمتری نسبت به تست های آزمایشگاهی محاسبه کند.

مطالعه دیگری با استفاده از روش دینامیک سیال محاسباتی برای مدل کردن گسیختگی خاک انجام گرفته است. این روش برای شبیه‌سازی جریان خاک اطراف یک ابزار ساده بکار گرفته شده بود. شبیه‌سازی‌ها برای یک ابزار تخت مستطیلی عمودی انجام شده بود(کارماکار و کوشواها، ۲۰۰۵a). آزمایشات برای یک ابزار با ضخامت ۲۰ میلی متر و عرض ۵۰ میلی متر وعمق ۱۰۰ میلی انجام گرفته بودند. نتایج نشان داد که فشار خاک بر روی سطح ابزار با افزایش سرعت افزایش یافت و شدت فشار در نوک ابزار بیشتر بود. همچنین نیروی کششی تابعی درجه دوم از سرعت بیان شد(کارماکار و کوشواها، ۲۰۰۵b).

مطالعه ای در سال ۲۰۰٦ توسط کارماکار و کوشواها برای عکس العمل ابزار خاک‌ورزی بر روی طرح شکست خاک و توسعه مدل های پیش بینی برای یک طراحی بهینه انجام شده بود. روابط نیرو- تغییر شکل در مدل توسعه یافته با در نظر گرفتن خاک به عنوان یک جامد ثابت یا الاستوپلاستیک متوسط بکار برده شده بود. روش دینامیک سیال محاسباتی برای بررسی مسائل حل نشده در دینامیک خاک‌ورزی بکار گرفته شده بود. همچنین رفتار جریان و تغییر شکل خاک به علت

[1] - Manuwa
[2] - Roul
[3] - Sethian

طبیعت ویسکوپلاستیک آن و جرم تغییر شکل یافته به علت تأثیر ابزار توسط این مدل بکار گرفته شد. با روش CFD حرکت ذره ای یک سیستم می‌تواند با سرعت و توزیع تنش مشخص شود. اصول اساسی حل معادلات تشکیل شده از سیالاتی است که بر پایه نگهداری جرم و معادلات مومنتوم می‌باشند. بنابراین معادلات عمومی حرکت می‌توانند به شکل قابل قبولی بدست آورده شوند. شبیه‌سازی‌ها برای یک ابزار با عرض ۵۰ میلی‌متر انجام شد که به طور عمودی در عمق ۱۰۰ میلی‌متر و در یک خاک لومی رسی بکار گرفته شد. نتایج بر روی طرح تغییر شکل ویسکوپلاستیک خاک و توسعه شکست خاک در جلو نوید بخش بود. به علاوه نتایج نشان داد که روش CFD می‌تواند تحلیل تنش خاک و نیروی لازم برای حرکت ابزار در خاک را پیش بینی کند.

کل انرژی لازم برای یک ابزار باریک عمودی خاک‌ورزی تابعی است از عکس العمل‌های مختلف خاک- ابزار مثل پارامترهای خاک، پارامترهای ابزار و پارامترهای سیستم. مدل تحلیل دینامیکی خاک- ابزار در ارتباط با تغییر شکل خاک به علت گسیختگی برشی به طور عمده ای توسط عکس العمل خاک- خاک، ارتباط خاک- ابزار و انرژی شتاب می باشد. تست های مخزن خاک برای اعتبار بخشیدن به مدل عددی برای پیش بینی کشش ابزار با استفاده از دینامیک سیال محاسباتی با در نظر گرفتن خصوصیات خاک انجام شده بودند. پارامترهای دینامیکی خاک مثل ویسکوزیته و تنش تسلیم توسط یک کنترل کننده میزان کرنش پیچشی خاک تعیین شده بودند. پیش بینی های عددی کشش برای یک ابزار با عرض ٤٠ میلی متر و در عمق های ٤٠، ٨٠، ١٢٠ و ١٦٠ میلی متر و در سرعت های ١، ٨، ١٦ و ٢٤ کیلومتر بر ساعت در خاک لومی رسی با دو محتوی رطوبتی ١٤٪ و ٢٠٪ انجام شده بودند. نتایج نشان داد که در سرعت بالا تغییر کشش با عمق خطی بود و نیز در عمق های کم پیش بینی های CFD نزدیک به داده های تجربی بودند. آنالیز واریانس نشان داد که سرعت عملیات، عمق و محتوی رطوبتی بر روی کشش تجربی و پیش بینی شده در سطح احتمال ۵٪ تأثیر معنی داری دارد. ضریب همبستگی بین داده‌های کشش تجربی و کشش پیش‌بینی شده برای محتوی رطوبتی ١٤٪ و ٢٠٪ به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۹۷ بودند(کارماکار و همکاران، ۲۰۰۷).

۲-۵- مدل‌های عددی پیش‌بینی نیرو براساس روش اجزای محدود و المان گسسته

روش المان محدود یکسری روش های حرفه‌ای هستند که برای اجرا نیاز به علم قوی از کامپیوتر و ریاضی دارند. این روش توسط یونگ و هانا[1] (۱۹۷۷) برای فرآیند برش خاک توسعه یافتند. این روش توجه زیادی را در دهه های اخیر برای بررسی ارتباط خاک- ابزار جلب کرده است(شن و کوشواها، ۱۹۹۸).

کوشواها و شن (۱۹۹۵) روش المان محدود را برای حل معادله دینامیکی عکس العمل بین خاک و ابزار بکار بردند. با استفاده از المان محدود دو بعدی پیش بینی کشش لازم تیغه عمودی انجام گرفت. مقایسه بین نتایج تست‌های مخرن خاک و مدل نشان داد که کشش پیش بینی شده خیلی نزدیک به داده‌های آزمایشی بود.

روشن المان محدود توسط روزا و ولفسون[2] (۱۹۹۹) برای مطالعه یک مدل ترکیبی برای سرعت بالای عملیات خاک‌ورزی برای ابزارهای باریک خاک‌ورزی بکار برده شد. دو نوع ابزار تخت و مستطیلی در مخزن خاک مورد بررسی قرار گرفتند. تأثیر سرعت بر روی کشش مورد مطالعه قرار گرفت. با یک سری فرضیات نتایج پیش‌بینی شده قابل قبول بود.

[1] - Yong and Hanna
[2] - Rosa and Wulfsohn

چی و کوشواها[1] (۱۹۹۱) یک مدل المان محدود سه بعدی غیر خطی را برای بررسی ارتباط خاک – ابزار بکار بردند. یکی از اهداف این تحقیق ارزیابی تأثیر کشش لازم ابزارهای خاکورزی بر روی فرسایش و تلفات اصطکاکی بود. تست‌ها در مخزن خاک و با زوایای حمله متفاوت انجام شده بودند. نتایج هر دو روشهای تجربی و تئوری بطور بدیهی نشان داد که کشش لازم با کاهش زاویه حمله کاهش می‌یابد. همچنین خطای بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای زاویه حمله ٤٥ درجه حدود ۰/۸٪ و برای زاویه حمله ۹۰ درجه ۱۰/۵٪ بود.

موذن و نمنی[2] (۱۹۹۹) روش المان محدود را برای تحلیل عکس العمل یک زیر شکن در خاک لومی شنی همگن بکار بردند. در این تحقیق تأثیر هندسی ابزار بر روی عملکرد زیر شکن بوسیله یک ساق زیر شکن با زوایا و عرض‌های مختلف برش با مدل FEM سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته بود. شبیه‌سازی ارتباط خاک – ابزار با پذیرفتن قانون کولمب از اصطکاک توسعه یافته بود. این مدل نیروی کششی را در یک دامنه‌ای بین ۱۱٪ تا ١٦٪ برای یک خاک غیر همگن و ۱۵٪ تا ١٨/٤٪ برای خاک همگن با زوایای مختلف هنگامی که نتایج با تست‌های تجربی مورد مقایسه قرار گرفته بودند، پیش‌بینی کرد.

تعداد اندکی گزارش از کاربرد روش المان گسسته (DEM) برای مطالعات خاک‌ورزی(شیکانی و یونو[3]، ۲۰۰۲ ،خات[4]، ۲۰۰۵) موجود است. این روش یک آنالیز عددی است که جسم سخت بعنوان خرده‌های انبوه شده مورد بحث قرار می‌گیرد. رفتار جسم سخت از طریق معادله حرکت نسبت به هر ذره در این روش تخمین زده می‌شود. مطالعاتی با استفاده از روش المان گسسته بر پایه رفتارهای مکانیکی شبیه سازی دانه ای انجام شده بود. اگر مدل خاک توسط این روش با یک دقت بالا طرح ریزی شده بود، می‌توانست در اکثر مسایل دینامیکی و مکانیکی بین خاک و ماشین بکار برده شود (تاناکا[5] و همکاران، ۲۰۰۰). بررسی‌ها نشان می‌دهد که روش اجزای محدود برای عکس‌العمل خاک و ابزار هنوز مورد استفاده قرار نگرفته است. علت این است که مدل کردن گسیختگی خاک توسط این روش در طول فرآیندهای دینامیکی پیچیده می‌باشد. مطالعه ای توسط ابوحمده و ریدر[6] در سال ۲۰۰۳ برای مقایسه نیروهای پیش‌بینی شده وارده از طرف خاک به دیسک و نیروهای اندازه‌گیری شده در عمق معین خاک‌ورزی در خاک‌های رسی و لومی شنی انجام شد. یک مدل اجزای محدود غیر خطی سه بعدی برای پیش‌بینی نیروهای وارده از طرف خاک مورد استفاده قرار گرفت. مدل تأثیرات زاویه تمایل و سرعت پیشروی را بر روی کشش و نیروهای جانبی بررسی می‌کرد. دینامومتر اتصال سه‌نقطه برای اندازه‌گیری نیروها مورد استفاده قرار گرفت. به‌طورکلی نتایج ناشی از این مدل با نتایج حاصل از آزمایشات در خاک رسی سازگار بود. در حالی که در خاک لومی شنی بین داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده اختلاف وجود داشت که احتمالا به علت مشکلات اندازه‌گیری خصوصیات مکانیکی خاک در تست سه محوری باشد. خطای نسبی پیش بینی این مدل از ۰/۹ ٪ تا ۹ ٪ بود.

۲-٦- مدل‌های دینامیکی

خاک‌ورزی عمدتا یک عملیات دینامیکی می‌باشد. اگرچه مدل‌های تحلیلی برای بدست آوردن یک مقدار معین بکار برده می‌شوند اما یکی از ضعف‌های این روش این است که این مدل‌ها به حد کافی تأثیر سرعت ابزار بر روی طرح شکست

[1] - Chi and Kushwaha
[2] - Mouazen and Nemenyi
[3] - Shikanai and Ueno
[4] - Khat
[5] - Tanaka
[6] - Abu-Hamdeh and Reeder

خاک را توصیف نمی‌کنند (شن و کوشواها[1]، ۱۹۹۸). در یک فرآیند دینامیکی دو عامل تأثیر اینرسی و میزان تأثیر آن موردنیاز می‌باشد تا در یک تحلیل مورد بررسی قرار گیرند. انرژی لازم خاک‌ورزی، فرسایش ابزار وشرایط نهایی خاک میزان وابسته می‌باشند که پارامترهای بهینه ای برای عملیات خاکورزی با در نظر گرفتن تأثیرات دینامیکی خاک- ابزار در عملکرد خاکورزی را ایجاب می‌کنند (کوشواها و ژانگ[2]، ۱۹۹۸). روش مکانیک خاک مهندسی بر پایه حالت تعادل رابطه تنش- کرنش برای مطالعه تغییر شکل خاک است در حالی که تغییر شکل خاک های کشاورزی به ندرت به تعادل می‌رسد (اورد[3]، ۱۹۹٦). در خاک‌ورزی خاک بالا برده شده و شتاب می‌گیرد و در نتیجه انرژی جنبشی و پتانسیل کسب کرده و تغییر حالت می‌دهد. این فرآیندها تحت شرایط غیر تعادلی رخ می‌دهند (فرنسترم و همکاران[4]، ۱۹۷۰). همچنین خاک‌ورزی در در ناحیه غیر اشباع خاک انجام می‌گیرد و دستیابی به یک شرایط معیار دشوار می‌باشد. بنابراین خاک‌ورزی یک فرآیند غیر تعادلی می‌باشد. اکثر فرضیات مدل‌ها بر پایه تئوری فشار زمین می‌باشند و نیروهای اینرسی را نادیده می‌گیرند و فقط برای پیش بینی نیروهای ابزارهای باریک در سرعت پایین مناسب می‌باشند. اگرچه کاربرد تکنیک های عددی مثل FEM, ANN برای پیش بینی ارتباط خاک- ابزار خیلی دقیق و راه حل مناسب می‌باشند اما خاک را برای تجزیه و تحلیل، استاتیکی فرض می‌کنند و تغییر شکل‌های خاک را نادیده می‌گیرند.

بر اساس مدل مک کای و علی (۱۹۷۷)، دو مدل دینامیکی گسیختگی خاک توسعه یافته اند که تأثیرات سرعت ابزار در نظر گرفته شده است. مدل اول توسط سویک و پرومپرال(۱۹۸۸) و مدل دوم توسط زنگ و یاو[5] (۱۹۹۲) معرفی شدند. مدل مدل اول فرضیاتی داشت که اندازه هلال های جانبی را خیلی بزرگ برآورد می کرد. بنابراین یک زاویه جدید بر پایه داده های آزمایشی پیشنهاد کرده بود که تابعی از فاصله گسیختگی و زاویه حمله می باشد. در مدل دینامیکی دوم، تأثیرات شتاب و میزان کرنش معرفی شدند. اختلاف اصلی بین این دو مدل این است که مدل دوم نیاز به دانش پیشین کرنش برشی در گسیختگی داشت که برای تعیین مرز گسیختگی برشی ضروری است.

۳- تاثیر مکانیزم گسیختگی خاک بر مدل های پیش بینی نیروی مقاوم کششی

شرایط گسیختگی یا جاری شدن در خاک اکثراً پیچیده‌تر از مواد مهندسی است، زیرا شرایط خاک از وضعیت نزدیک به مایع به وضعیت شکننده تغییر می‌کند. گسیختگی ناشی از برش و شکست برای مواد ترد یک معنی آشکار دارد. شکست بوسیله برش نیز در خاک مشاهده شده است. در برخی موارد شکست در خاک‌ها قابل رویت نیست که ممکن است به‌صورت جریان پلاستیکی و تغییر شکل دایمی نمایش داده شود. حالت تنشی که باعث گسیختگی یا جریان پلاستیکی می‌شود یک اندازه‌ای از قدرت مقاومت خاک به نفوذ می‌باشد. بنابراین گسیختگی برشی اکثراً تابعی از حالت تنش به جز عوامل گسیختگی می باشد(جانسون[6]، ۱۹۸۷). عمق و عرض برش، شکل ابزار، آرایش ابزار و سرعت پیشروی عامل‌هایی هستند که بر روی کشش ادوات برای شرایط خاص خاک تأثیر می‌گذارند(کپنر[7]، ۱۹۷۲).

---

[1] - Shen and Kushwaha
[2] - Kushwaha and Zhang
[3] - Or D
[4] - Fornstrom
[5] -Zeng and Yao
[6] - Johnson
[7] - Kepner

پاین[1](۱۹۵٦)، اکلاگان(۱۹٦٤)، هیتاراتچی و ریس(۱۹٦۷)، گادوین و اسپور[2](۱۹۷۷)، مک کای و علی[3](۱۹۷۷) و پرومپرال (۱۹۸۳) محققینی هستند که مدل گسیختگی سه بعدی خاک را در حالت استاتیکی برای بررسی ارتباط خاک – ابزار بکار برده‌اند. در تمام این مدل‌ها تأثیر سرعت پیشروی بر روی کشش ادوات نادیده گرفته شده است.

٤- نتیجه‌گیری

۱- شرایط خاک (از قبیل محتوی رطوبتی، بافت خاک و مقاومت مکانیکی خاک)، پارامترهای ابزار (از قبیل عمق، زاویه حمله، تیزی تیغه) و پارامترهای عملیاتی (مثل سرعت پیشروی ابزار) از جمله عواملی هستند که روی نیروی مقاوم کششی تاثیر گذار می باشد.

۲- مدل ارتباط خاک- ابزار به دو دسته اساسی تقسیم می شود: ۱- مدل‌های پیش‌بینی نیرو که بر پایه مکانیک موهر-کلمب با استفاده از حد تحمل و دیوار حایل غیر فعال می‌باشند.۲- مکانیزم گسیختگی خاک.

۳- بطورکلی مدل‌های پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی شامل سه روش اصلی تجربی، تحلیلی و عددی می‌باشد که روش‌های عددی به سه دسته روش المان محدود، روش المان گسسته و روش دینامیک سیال محاسباتی تقسیم می‌شوند.

٤- روش تحلیلی توسط بسیاری از محققین در زمینه خاک‌ورزی بکار گرفته شده است و نتایج این روش هنوز هم در بسیاری از موارد معتبر هستند. مدل‌های تحلیلی برای ابزارهای با اشکال هندسی ساده مناسب می‌باشد. طراحی ابزارهای خاک‌ورزی با اشکال پیچیده نمی‌تواند با این روش انجام گیرد. یکی دیگر از از ضعف‌های این روش این است که این مدل‌ها به حد کافی تأثیر سرعت ابزار بر روی طرح شکست خاک را توصیف نمی‌کنند.

۵- در مدل‌های تجربی یا آزمایشی رابطه بین متغیرها توسط یک سری از مشاهدات داده‌ای مشخص می‌شوند. تعیین رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته در این روش معمولاً توسط مدل‌های رگرسیونی و همچنین روش شبکه‌های عصبی مصنوعی صورت می‌گیرد. با استفاده از این روش ارتباط بین شرایط خاک، پارامترهای ابزار و پارامترهای عملیاتی با نیروی مقاوم کششی با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای یا مخزن خاک مشخص می‌گردد.

٦- شبکهٔ عصبی مصنوعی یک سیستم غیرخطّی می‌باشد که بدون داشتن اطّلاعات کامل از نحوهٔ ارتباط پارامترها و قوانین حاکم بین آنها سیستم را شبیه‌سازی می‌نماید. بنابراین استفاده از این سیستم غیر خطّی می‌تواند بسیاری از مشکلات روش-های تحلیلی را مرتفع سازد و مطابق با شرایط فعلی و شرایط حاکم بر سیستم خاک با استفاده از داده‌های واقعی آموزش ببیند و برای کاربردهای بعدی تعمیم داده شود. تحقیقات زیادی در این حوزه صورت نگرفته است.

۷- روش اجزای محدود و المان گسسته در اکثر موارد با توجه به تغییرات بسیار زیاد در داخل خاک از لحاظ خصوصیّات فیزیکی و دینامیکی، نتایج قابل قبولی را در این زمینه ارائه نکرده است.

۸- از ترکیب روش اجزاء محدود و شبکه عصبی می‌توان به منظور طراحی کامپیوتری ادوات خاک‌ورزی استفاده کرد. با این هدف، شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور پیش‌بینی خصوصیّات دینامیکی خاک بدون نیاز به تجزیه و تحلیل تنش و کرنش در داخل خاک بکار می‌رود و روش اجزاء محدود محاسبه نیروی کششی، تنش‌ها و جابجایی‌ها را در داخل خاک محاسبه

[1] - Payne
[2] -Godwin and Spoor
[3] - McKyes and Ali

می‌نماید. بدین ترتیب از ترکیب این دو روش می‌توان به‌منظور طرّاحی و تجزیه و تحلیل سه بعدی تنش‌ها و نیروهای وارد بر ادوات خاک‌ورزی استفاده کرد.

۹- در یک فرآیند دینامیکی دو عامل تأثیر اینرسی و میزان تأثیر آن موردنیاز می‌باشد تا در یک تحلیل مورد بررسی قرار گیرند. انرژی لازم خاک‌ورزی، فرسایش ابزار وشرایط نهایی خاک میزان وابسته می‌باشند که پارامترهای بهینه ای برای عملیات خاکورزی با در نظر گرفتن تأثیرات دینامیکی خاک- ابزار در عملکرد خاکورزی را ایجاب می‌کنند. اگرچه کاربرد تکنیک های عددی برای پیش بینی ارتباط خاک- ابزار خیلی دقیق و راه حل مناسب می‌باشند، اما خاک را برای تجزیه و تحلیل، استاتیکی فرض می‌کنند و تغییر شکل‌های خاک را نادیده می‌گیرند.

منابع و مراجع

۱- عباسپور گیلانده، ی.، علیمردانی، ر.، خلیلیان، ا.، کیهانی، ع. ر.، ساداتی، س. ح. ۱۳۸۷. پیش‌بینی نیروی کششی و انرژی خاک‌ورزی عملیات زیرشکنی با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی. مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی ماشین های کشاورزی و مکانیزاسیون. دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

2. Abu-Hamdeh, N. H., Reeder, R. C. 2003. A nonlinear 3D finite element analysis of the soil forces acting on a disk plow. Soil & Tillage Research, 74 (2003) 115–124.
3. Al-Janobi, A. A., Al-Suhaibani, S. A. 1998. Draft of primary tillage implements in sandy loam soil. Transaction of the ASAE, 14(4): 343-348.
4. Al-Janobi, A. A., Aboukarima, A. M., Ahmed, K. A. 2001. Prediction of specific draft of different tillage implements using neural network. MISR Journal of Agricultural Engineering, 18(3): 699-714.
5. ASAE Standards, 48th edition. 2001. ASAE S313.3 FEB99. Soil cone penetrometer: 847. St. Joseph, MI: ASAE.
6. ASAE Standards. 2001a. ASAE D497.4: Agricultural machinery management data. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, MI 49085-9659, USA.
7. ASAE Standards. 2001b. ASAE EP496.2: Agricultural machinery management. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, MI 49085-9659, USA.27
8. Ashrafi Zadeh, S. R. 2006. Modeling of energy requirements by a narrow tillage Tool. Agricultural and Bioresource Engineering Department, University of Saskatchewan, Doctoral of Philosophy dissertation.
9. Blumel, K. 1986. Messungen an Einer Ackerfrase in der Bodenrinne unter besonderer Berucksichtigung der auftretenden Krafte (Measurements on a rotary tiller in the soil bin in special consideration of the acting forces). Research Report Agricultural Engineering No. 129 of Max-Eyth Society, University of Hohenheim, Germany.
10. Chi, L., Kushwaha, R. L. 1991. Three-dimensional, finite element interaction between soil and simple tillage tool. *Transactions of the ASAE* 34(2): 361-366.
11. Choi, Y. S., Lee, K. S., Park, W. Y. 2000. Application of a neural network to dynamic draft model. Agricultural and Biosystems Engineering, 1(2), 67–72.
12. Collins, N. E., Kemble, L. J., Williams, T. H. 1978. Energy Requirements for Tillage on Coastal Plains Soil. ASAE Paper No. 78–1517. ASAE, St. Joseph, MI, USA.

13. Eradat Oskoui, K., Rackham, D. H., Witney, B. D. 1982.The Determination of Plough Draught--PART II The Measurement and Prediction of Plough Draught for Two Mouldboard Shapes in Three Soil Series. Journal of Terramechanics, 19(3): 153-164.
14. Fornstrom, K. J., Brazee, R. D., Johnson, W .H. 1970. Tillage tool interaction with a bounded, artificial soil. *Transactions of the ASAE*;13(4):409–16. p. 418.
15. Garner, T. H., Reynolds, W. R., Musen, H. L., Miles, G. E., Davis, J.W., Dam Wolf., Peiper, U.M.1987. Energy requirement for subsoiling coastal plain soils. Transactions of the ASAE 30(2):343-349.
16. Gee-Clough, D., McAllister, M., Pearson, G., Evernden, D.W. 1978. The empirical prediction of tractor-implement field performance. Journal of Terramechanics, 15, 81–94.
17. Ghaboussi, J., Garrett Jr, J. H., Wu, X. 1991. Knowledge-based modeling of material behavior with neural networks. Journal of Engineering Mechanics 117(1):132-153.
18. Gill, W. R., Vandern Berg, G. E., 1968. Soil dynamics in tillage and traction. Agriculture Handbook No. 316. Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture (USDA). pp.126-140.
19. Godwin, R. J., O'Dogherty, M. J. 2007. Integrated soil tillage force prediction models. Journal of Terramechanics, 44(2007) 3–14.
20. Godwin, R. J., O'Dogherty, M. J., Saunders, C., Balafoutis, A. T. 2007. A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed. Biosystems Engineering, 97 (2007) 117 – 129.
21. Godwin, R. J., Spoor, G. 1977. Soil failure with narrow tines. *Journal of Agricultural Engineering Research* 22(4): 213-228.
22. Grisso, R. D., Yasin, M., Kocher, M. F. 1996. Tillage implement forces operating in silty clay loam. Transactions of the ASAE, 39(6), 1977–1982.
23. Hettiaratchi, D. P., Witney, B. D., Reece, A.R. 1966. The calculation of passive pressure in two dimensional soil failure. Journal of Agricultural Engineering Research, 11(2): 89-107.
24. Hettiaratchi, D. R. P., Reece, A. R. 1967. Symmetrical three-dimensional soil failure. Journal of Terramechanics 4(3): 45-67.
25. Hettiaratchi, D.R.P. and A.R. Reece. 1974. The calculation of passive soil resistance. Geotechnique 24(3): 289-310.
26. Johnson, C. E., Grisso, R. D., Nichols, T. A., Bailey., A.C. 1987. Shear measurement for agricultural soils-A review. Transactions of the ASAE 30(4): 935-938.
27. Karmakar, S., Kushwaha, R. L. 2005a. Simulation of soil deformation around a tillage tool using computational fluid dynamics. *Transactions of the ASAE* 48(3): 923-932.
28. Karmakar, S., Kushwaha, R. L. 2005b. CFD Simulation of soil forces on a flat tillage tool. ASABE paper No. 051160. St Joseph, ASABE.
29. Karmakar, S., Kushwaha, R. L.2006. Dynamic modeling of soil–tool interaction:An overview from a fluid flow perspective. Journal of Terramechanics, 43(2006) 411–425.
30. Karmakar, S., Ashrafizadeh, S. R., Kushwaha, R. L.2007. Experimental Validation of CFD Modeling for Narrow Tillage Tool Draft. American Society of Agricultural and Biological Engineers. An ASABE Meeting Presentation ,Paper Number: 071128
31. Kepner, R. A., Bainer, R., Barger, E. L. 1972. Principles of Farm Machinery.Westport, CT: The Avi Publishing Co.
32. Kepner, R. A., Bainer, R., Barger, E. L. 1982. Principle of Farm Machinery (3rd Edn). CBS Publisher, New Delhi, India.
33. Khat, L. R., Salokhe, V. M., Jayasuriva,. H. 2005. Experimental validation of distinct element simulation for dynamic wheel-soil interaction. ASAE Paper No. 053120. Presented in Annual International Meeting, 17-20 July, 2005, Tampa Convocation Center, Tampa, Florida, USA.
34. Kheiralla, A. F., Yahya, A., Zohadie, M., Ishak, W. 2004. Modeling of power and energy requirements for tillage implements operating in sandy clay loam, Malaysia. Soil and Tillage Research, 78, 21–34.

35. Kuczewski, J., Piotrowska, E. 1998. An improved model for forces on narrow soil cutting tines. Soil & Tillage Research, 46 (1998) 231-239.
36. Kushwaha, R. L. and J. Shen. 1995. Finite element analysis of the dynamic interaction between soil and tillage tool. *Transactions of the ASAE* 37(5): 1315-1319.
37. Kushwaha, R.L., Linke, C. 1996. Draft-speed relationship of simple tillage tools at high operating speeds. *Soil & Tillage Research* 39: 61-73.
38. Kushwaha, R. L., Zhang, Z. X. 1998. Evaluation of factors and current approaches related to computerized design of tillage tools: a review. Journal of Terramechanics, 35(2):69–86.
39. Kydd, H. D., Frehlich, G. E.,Boyden, A. R. 1984. Tillage Power Requirements in Western Canada. ASAE Paper No. 84–1027. ASAE, St. Joseph, MI, USA.
40. Levine, E. R., Kimes, D. S., Sigillito, V.G. 1996. Classifying soil structure using neural networks. Ecological modelling 92: 101-108.
41. Manuwa, S. I., Ademosun, O. C.2007. Draught and Soil Disturbance of Model Tillage Tines Under Varying Soil Parameters. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript PM 06 016. Vol. IX. March, 2007.
42. Manuwa, S. I. 2009. Performance evaluation of tillage tines operating under different depths in a sandy clay loam soil. Soil & Tillage Research 103 (2009) 399–405.
43. Mouazen, A. M., Nemenyi, M. 1999. Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil. *Soil & Tillage Research* 51: 1-15.
44. McKyes, E., Ali, O.S. 1977. The cutting of soil by narrow blades. *Journal of Terramechanics* 14(2): 43-58.
45. Mckyes, E., Desir, F. L. 1984. Prediction and field measurements of tillage tool draft and efficiency in cohesive soils. Soil &Tillage Research. 4, 459-470.
46. O'Callaghan, J. R., Farrelly, K. M. 1964. Cleavage of soil by tined implements. *Journal of Agricultural Engineering Research* 9(3): 259-270.
47. O'Callaghan, J. R., McCoY, J. G. 1965. The handling of soil by mouldboard ploughs. Journal of Agriculture Engineering Resourse, 10, 23-35 (1965).
48. Onwualu, A. P., Watts, K. C.1998. Draught and vertical forces obtained from dynamic soil cutting by plane tillage tools. Soil & Tillage Research, 48 (1998) 239-253.
49. Or D.1996. Wetting induces soil structural changes: the theory of liquid phase sintering. Water Resour Res1996;32:3041–9.
50. Payne, P.C. J. 1956. The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements. Journal of Agricultural Engineering Research 1(1): 23-50.
51. Perumpral, J. V., Grisso, R. D., Desai, C.S. 1983. A soil tool model based on limit equilibrium analysis. *Transactions of the ASAE* 26(4): 991-995.
52. Reece, A.R. 1965. The fundamental equation of earthmoving machines. Symposium of Earthmoving Machines. *Institute of Mechanical Engineering*. 179(3F).
53. Rosa, U. A., Wulfsohn, D. 1999. Constitutive model for high speed tillage using narrow tools. *Journal of Terramechanics* 36: 221-234.
54. Roul, A. K., Raheman, H., Pansare, M. S., Machavaram, R. 2009.Predicting the draught requirement of tillage implements in sandy clay loam soil using an artificial neural network.biosystems engineerin g 104 (2009) 476 – 485.
55. Sahu, R. K., Raheman, H .2006. Draught prediction of agricultural implements using reference tillage tools in sandy clay loam soil. Biosystems Engineering, 94(2), 275–284.
56. Sethian, J. A.1993. Computational fluid dynamics. From desktop to teraflop: exploiting the US lead in high performance computing. Washington (DC): NSF Publications.
57. Sharifat, K., Kushwaha, R.L. 2000. Modeling soil movement by tillage tools. Department of Agricultural and Bioresource Engineering, University of Saskatchewan, 57 Campus Drive, Saskatoon, SK, Canada S7N 5A9. Received 6 October 1999; accepted 1 November 2000.

58. Shen, J., Kushwaha, R. L. 1998. Soil–machine interactions – a finite element perspective. Marcel Dekker; 1998.
59. Shikanai, T., Ueno, M. 2002. Simulation of soil resistance at plate penetration by the distinct element method. ASAE Paper No. 023046. Presented in Annual International Meeting, July 28-July 31, 2002, Hyatt Regency Chicago, Chicago, Illinois, USA.
60. Swick, W. C., Perumpral, J. V. 1988. A model for predicting soil tool interaction. Journal of Terramechanic, 25(1), 43-56.
61. Tanaka, H., Momozu, M., Oida, A., Yamazaki, M. Simulation of soil deformation and resistance at bar penetration by the distinct element method. Journal of Terramechanics, 2000;37(1):41–56.
62. Wang, J., Kwang, L., Liang, T. 1972. Predicting tillage tool draft using four soil parameters. Transactions of the ASAE, 15, 19–23.
63. Yong, R.N., Hanna, A.W. 1977. Finite element analysis of plane soil cutting. Journal of Terramechanics 14(3): 103-125.
64. Zeng, D., Yao, Y. 1992. A dynamic model for soil cutting by blade and tine. *Journal of Terramechanics* 29(3): 317-327.
65. Zhang, Z. X., Kushwaha, R. L. 1999. Application of neural networks to simulate soil tool interaction and soil behaviour. Canadian Agricultural Engineering, 41(2), 119–125.

Abstract

Recognition and Prediction of forces on tillage tools are needed for design of tillage tools. The draft force is an important force which uses for evaluation of tillage tools and also for tillage tools energy requirement calculation. The object of this paper is a review of draft prediction models of tillage tools and its developments. Draft force prediction models divided to analytical, numerical and empirical models. Analytical models have been used by many researchers in the recent five decades. The application of analytical methods is suitable for tillage tools with simple shapes. Design of tillage tool with complex shapes could not be done by this method. Empirical or experimental models are expensive because they need instruments. Determination of the correlation between dependent and independent variables in this method usually carry out by regression models and also artificial neural networks models. Computational fluid dynamics method is used for survey irresolvable problems in tillage dynamics. Flow behaviour and deformation of soil due to its visco-plastic nature and deformed mass due to the impact of tool are used by this model. CFD method can specify particle movement of a system by velocity and stress distribution. Finite element method and discrete element method in many cases have not been presented acceptable results due to intense variations in soil physical and dynamic properties. Combination of finite element method and artificial neural networks could be used for computer-aided design of tillage tools. Fir this purpose, artificial neural networks is used for prediction of soil dynamic properties without a need to analyze stress and strain in the soil and finite element method evaluates draft force, stress and deformation in the soil. Hence, combination of these two methods could be useful for designing and three dimensional analysis of stress and forces on tillage tools.

Keywords: Draft force, Prediction, Simulation and Tillage tools.