

آنالیز اجزا محدود سه بعدی ابزار خاکورزی عریض در خاک های لومی شنی

حسین نوید
 نثار محمدی بانه
 استادیار گروه مهندسی ماشین های کشاورزی، دانشگاه تبریز
 کارشناس ارشد مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه تبریز

چکیده

مدل های عددی از قبیل اجزا محدود می توانند به خوبی برای شبیه سازی فرایند خاکورزی و حرکت تیغه در خاک به کار روند. در این تحقیق یک مدل اجزای محدود غیرخطی سه بعدی برای آنالیز حرکت ابزار خاکورزی عریض در خاک توسعه داده شده است. خاک با فرض همگن بودن و بر اساس مدل دراگر-پراگر مدل سازی شد و برای مدل سازی سطح تماس خاک و ابزار از المان های تماسی استفاده شد. با استفاده از این مدل، نیروهای عمودی و افقی مورد نیاز برای حرکت تیغه در خاک پیش بینی شده و سطوح شکست در نتیجه عملیات خاکورزی، توزیع تنش های الاستیک و پلاستیک در خاک و بردارهای جابه جایی خاک به دست آمدند. نتایج به دست آمده از این مدل با نتایج به دست آمده توسط سایر محققان مقایسه شد و نشان داد این روش می تواند به خوبی برای پیش بینی عملیات خاکورزی به کار رود.

کلمات کلیدی: اجزای محدود غیرخطی سه بعدی، ابزار خاک ورزی عریض، مدل های عددی، توزیع تنش و نیروی کشش

A Three Dimensional Finite Element Analysis of Wide Tillage Tools in Sandy Loam Soil

H. Navid Assistant Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture, University of Tabriz
 N. Mohammadi Baneh M.Sc Student, Department of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture, University of Tabriz

Abstract

Numerical model such as finite element analysis can be used for simulation of tillage process and movement of blade in soil. In this paper a non-linear 3-D finite element model for analyzing of wide tillage tool moving in soil was developed. It is assumed that soil is completely homogenous and modeled based on drucker-pragers elastic perfectly plastic model. Contact element was used for modeling of contact surface between soil and tool. By this model, horizontal and vertical forces needed for blade moving in soil were predicted and failure surfaces made by tillage operation, distribution of elastic and plastic stress in soil and displacement vectors of soil obtained. This model was compared with other models and showed a good agreement. Results showed that this method can be used for prediction of tillage operation.

Keywords: 3D Nonlinear Finite Element Method, Wide Tillage Tools, Numerical Models, Draft and Stress Distribution

۱- مقدمه

بیش از ۵۰٪ از انرژی مورد نیاز فعالیت‌های کشاورزی به وسیله عملیات خاک ورزی مصرف می‌شود. خاک ورزی و اثرات متقابل خاک و تیغه هنوز هم علمی نیست که بر اساس داده‌های کمی باشد و بر اساس مشاهدات کیفی استوار است. هم روش‌های تحلیلی و هم روش‌های عددی برای فرایند برش خاک و اثرات متقابل خاک و ابزار استفاده شده‌اند. روش‌های عددی از جمله روش‌های اجزای محدود در فهم و توصیف موضوع بسیار مهم هستند. رفتار مکانیکی خاک و عکس‌العمل خاک و ابزار دو موضوع مهم هستند که باید در تحلیل اجزای محدود و اثرات متقابل خاک و ابزار مورد توجه قرار گیرند. بهینه‌سازی طراحی تجهیزیات خاک ورزی می‌تواند با دو روش آزمایشگاهی و مدل-سازی ریاضی انجام شود. روش‌های آزمایشگاهی پر هزینه هستند در حالی که استفاده از مدل‌های ریاضی می‌تواند هزینه-های کم تری تحمیل نمایند. این مدل‌ها می‌توانند نتایج نزدیک به واقعیت را ارائه نمایند. معمولاً دو مولفه رفتار مکانیکی خاک و عکس‌العمل متقابل خاک و ابزار در ملاحظات وارد می‌شود. اثرات متقابل خاک و فلز در محاسبات، هم به صورت اصطکاک خالص و هم به صورت اصطکاک با دگرچسبی وارد می‌شود که بستگی به فاکتورهای موثر مختلف دارد. رفتار مواد و واکنش بین خاک و فلز معمولاً از نوع غیرخطی است. روش اجزای محدود^۱ ابزار قدرتمندی است که اطلاعات بسیار مهمی را برای فهم اینکه چه چیزی به طور واقعی در طول عملیات خاک ورزی رخ می‌دهد ارائه می‌کند. این ابزار می‌تواند شرایط مرزی پیچیده و خصوصیات متفاوت لایه‌های گوناگون خاک و ابزار را در برداشته باشد. در آنالیز با مدل الاستیک غیر خطی، مدل هیپربولیک دانکن چانگ^۲ و در آنالیز با مدل الاستیک - کاملاً پلاستیک مدل دراکر - پراگر استفاده می‌شود. امتیاز مدل الاستیک هیپربولیک سادگی آن است اما رفتار پلاستیک خاک مورد توجه قرار نمی‌گیرد. ابو-النور و همکاران [۱] برهم کنش خاک و تیغه باریک را با استفاده از نرم افزار ABAQUS شبیه سازی کرده و رفتار خاک را الاستیک در نظر گرفتند. چی و کوشواها [۲] روش برازش منحنی را برای آنالیز شکست خاک با تیغه باریک به کار بردند و از فرمول‌های هیپربولیک برای تقریب رفتار و عکس‌العمل‌های بین خاک و ابزار استفاده کردند. آنها گزارش دادند که مدل FEM به طور نسبتاً دقیق، نیروهای کششی را پیش بینی می‌کند. داوودی و همکاران [۳] حرکت ابزار خاک ورزی مسطح در خاک را به روش اجزای محدود دو بعدی تحلیل کرده و نیروهای عکس‌العمل بین خاک و تیغه را به

دست آوردند. فیلک [۴] تأثیر هندسه لبه برنده ابزار خاک ورزی بر روی نیروهای عمودی و افقی، الگوی شکست خاک و جابه-جایی خاک در زیر عمق خاک ورزی را با روش اجزای محدود دو بعدی، با استفاده از مدل شکست خاک بررسی کرد. نتایج مدل-سازی نشان داد که کرنش و نسبت پواسون در تخمین عملکرد یک تیغه با لبه کند روی زاویه حمله کم ابزار خاک ورزی نقش مهمی دارد. گادوین و اسپور مدلی را جهت پیش بینی نیروهای مورد نیاز و الگوی شکست خاک در نسبت‌های مختلف عمق به عرض تیغه گسترش دادند و از روابط مور کولمب استفاده کردند [۵]. جی-کلاف و همکاران [۶] روش اجزای محدود را برای مدل سازی تغییر شکل و شکست در خاک‌های رسی مرطوب به وسیله یک تیغه عریض با زوایای حمله ۲۵° و ۱۲۵° به کار بردند و از خواص تنش کرنش خاک به عنوان داده‌های ورودی در محاسبات استفاده کردند. موازن و نمینی [۷] در تلاش برای مدل سازی نرم کردن عمیق خاک با استفاده از یک زیر شکن نیمه عمیق پیشنهاد کردند که خاک لومی شنی به صورت مواد الاستیک - کاملاً پلاستیک در نظر گرفته شده و مدل دراکر - پراگر و قانون جریان پلاستیسیته به کار برده شود. روش المان گسسته^۳ نیز یک روش عددی است که خاک را به صورت مجموعه‌ای از ذرات مجزا در نظر می‌گیرد. فعل و انفعال میان ذرات با مجموعه‌ای از قوانین حرکت نیوتن کنترل می‌شود [۸]. یک روش متداول برای تحلیل مدل استفاده از تئوری فشار تریزاگی است. این مدل نیروی عامل روی ابزار را با معادله عمومی پیشنهاد شده به وسیله ریس پیش بینی می‌کند [۹]. شمولویچ و همکاران [۱۰] در طی تحقیقاتشان برای پیدا کردن پارامترهای مورد نیاز برای شبیه سازی خاک دریافتند که برای افزایش دقت و کمینه کردن خطا تا کمتر از ۱۵٪ استفاده از رابطه الاستو پلاستیک ضروری است. تکستا و همکاران [۱۱] فرایند نفوذ یک مخروط در خاک‌های لایه‌ای را با استفاده از نرم افزار ABAQUS و با استفاده از رابطه دراکر- پراگر شبیه سازی کردند. این مدل قادر به نشان دادن نقطه‌ای بود که بیشترین مقاومت را به نفوذ داشت. نتایج به دست آمده مشابه نتایج حاصل از آزمایشات بود.

هدف از این تحقیق گسترش یک مدل المان محدود سه بعدی با استفاده از نرم افزار ANSYS جهت پیش بینی و تعیین نیروهای کشش مورد نیاز برای حرکت یک تیغه خاک ورزی عریض و مسطح در خاک و مقایسه نتایج با داده‌های بدست آمده توسط سایر محققان است. مدل باید قادر به پیش بینی نیروی

³. Discrete Element Method (DEM)

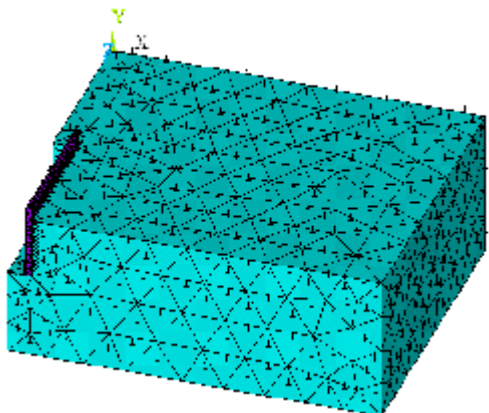
¹. Finite Element Method (FEM)

². Duncan-chang

بین خاک و ابزار، رابطه اصطکاک کولمب استفاده شد. برای حصول شرایط مرزی، جابه‌جایی تمام گره‌های موجود در قسمت تحتانی مکعب در نقطه $y=0$ (صفحه xz) در هر سه جهت z , x , y محدود شده و برابر صفر قرار داده شد. جابه‌جایی تمامی گره‌های روی صفحه موازی صفحه yz در $x=0$ و $x=60$ در امتداد محور x محدود و برابر صفر قرار داده شد. جابه‌جایی گره‌های روی صفحه موازی صفحه xy در $z=0$ و $z=50$ در امتداد محور z محدود و برابر صفر قرار داده شد. حرکت تیغه در جهات x و y محدود شده و تیغه تنها قادر به حرکت در امتداد محور x می‌باشد.

۲-۲ خصوصیات مواد

رفتار الاستیک - کاملاً پلاستیک خاک به وسیله هم‌چسبی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون با استفاده از داده‌های داوودی و همکاران [۳] به وسیله نرم افزار شبیه سازی شد. خواص خاک تیغه و سطح تماس خاک - تیغه در جدول ۱ آورده شده است. این داده ها به عنوان داده های ورودی قابل استفاده بودند. چسبندگی خاک - تیغه با زاویه اصطکاک بین خاک و تیغه در مدل تعیین شد. از گزینه contact pair در ANSYS برای ایجاد المان‌های 174 CONTA و TARGET (سطح تماس) استفاده گردید. المان 174 CONTA با المان TARGET170 به کار رفت تا سطح تماس بین خاک و تیغه شبیه سازی شود (شکل ۲). بدین ترتیب تعداد ۲۱۷ المان تماسی بین سطح خاک و تیغه ایجاد شد. در هر مرحله به تمامی گره های تیغه ۵ میلیمتر در امتداد محور x جابه جایی داده شده و تغییر شکل کلی مدل، جابه جایی، نیروها و تنش های ون میسر اعمالی به تمام گره های خاک به دست آمد. در مجموع تعداد کل ۱۲۰ مدل اجزا محدود با استفاده از نرم افزار اجرا شد.



شکل ۱- مش بندی سه بعدی و شرایط مرزی خاک - تیغه

کشش مورد نیاز ابزار خاک ورزی، سطوح تنش در خاک و تعیین جابه‌جایی‌های خاک باشد. در این مطالعه خاک مورد نظر الاستیک - کاملاً پلاستیک فرض شده و از روش دراگر- پراگر در نرم‌افزار ANSYS استفاده شده است.

۲- توسعه مدل

خاک در روش اجزای محدود به تعداد المان‌های کوچک و متعددی تقسیم شده و هر المان به المان مجاور خود در نقاط گرهی متصل می‌شود (شکل ۱). سطح مشترک خاک - ابزار به وسیله المان‌های تماسی شبیه سازی می‌شود. اساساً دو دلیل برای استفاده از المان‌های شبیه سازی کننده سطح مشترک وجود دارد: ابزار باید قادر به انتقال نیروها به صورت یکنواخت به تمام گره های خاک باشد و تحت نیروهای عمودی و مماسی، کشش کل در یک جابه‌جایی نسبی صحیح بین سطوح خاک- ابزار به دست آید. مدل اجزای محدود خاک - ابزار توسعه داده شده و در نرم افزار ANSYS کدبندی شد. ابزار به صورت تیغه‌ای عریض فرض شد که نسبت عرض به عمق آن بزرگتر از ۲ است.

۲-۱ توصیف مدل

در این تحقیق خاک به صورت مکعبی با ابعاد طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۶۰، ۲۴ و ۵۰ سانتی متر مدل سازی و مش بندی شد. از المان (solid 185) Brick 8node 185 برای مدل سازی خاک و تیغه استفاده شد. تقریباً ۱۹۳۰ المان برای شبیه‌سازی خاک و ۸۰۸ المان برای شبیه سازی تیغه ایجاد گردید. تیغه به صورت یک مکعب با ابعاد ۱، ۱۲ و ۲۴ سانتی متر در نرم‌افزار مدل شد. ۱۰ سانتی متر از عرض تیغه درون خاک و ۲ سانتیمتر آن بالای سطح خاک در نظر گرفته شد. المان 174 CONTA که یک المان سطح به سطح می‌باشد برای شبیه‌سازی تماس و سرش بین خاک و رویه ابزار در سطح مشترک آن دو ایجاد شد. این المان دارای ۸ گره بوده و برای آنالیز سطوح تماس ساختارهای سه بعدی قابل استفاده است. هم چنین این المان غیر خطی بوده و نیازمند روش حل تکرارشونده نیوتن صرف نظر از اعمال تغییر شکل های کوچک یا بزرگ است. در مطالعه سطح تماس بین دو جسم، سطح یکی از اجسام به عنوان سطح تماس و سطح جسم دیگر به عنوان سطح هدف^۱ در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین یکی از این سطوح شکل پذیر و دیگری صلب فرض شده و سطح جسم شکل پذیر، سطح تماس و سطح جسم صلب سطح هدف را ایجاد می‌کند. برای مطالعه عکس العمل‌ها و برش

^۱Target

مقدار ۱۷kN در ابتدای حرکت رسیده و پس از ۲۵ سانتی متر جابه‌جایی به ۱۳kN کاهش یافت. مقدار کاهش در این آزمایشات ۲۳/۵٪ درصد بود. نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج به دست آمده توسط محققان دیگر همخوانی داشت.

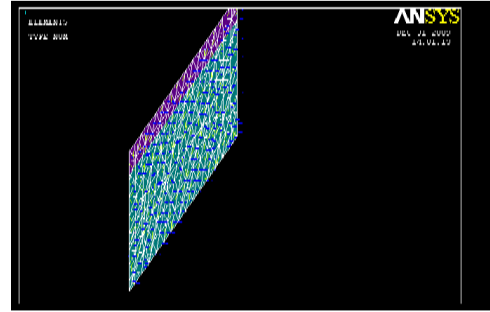
نیروی عمودی در ابتدا تمایل به هل دادن تیغه به طرف بالا و خارج کردن آن از داخل خاک داشت. پس از یک جا به جایی به مقدار ۵۰ میلی متر مقدار این نیرو کاهش یافت. این نیروها رو به بالا بوده و دارای علامت منفی هستند و تنها در شروع فرایند و به دلیل نیروهای اصطکاکی و مقاومت خاک دست نخورده موجود می‌باشند. حداکثر نیروی عمودی برابر ۲۷۲ نیوتن پس از جابه‌جایی ۳۰۰ میلی متر است. کاهش نیروهای عمودی ممکن است به دلیل شل شدن خاک پس از یک مقدار جابه‌جایی باشد.

۳-۲ جا به جایی های خاک

بردارهای جابه‌جایی خاک در شکل ۴ نشان می‌دهد که جابه‌جایی‌های خاک در زیر نوک تیغه و نزدیک تیغه، مؤلفه‌های رو به بالا دارد. از این شکل مشهود است که بیشترین جابه‌جایی‌ها در نزدیکی تیغه و در لایه‌های بالایی خاک بوده و برابر ۶۱ میلی‌متر است. حجم خاک نیز به دو بخش تقسیم می‌شود: یک بخش با جابه‌جایی زیاد و بخشی دیگر با جابه‌جایی کم یا بدون جابه‌جایی. بیشترین جابه‌جایی‌ها در نزدیکی تیغه صورت گرفته و با افزایش فاصله از تیغه مقدار این جابه‌جایی‌ها کم می‌شود. چنانکه در شکل ۴ نشان داده شده است در خاک‌ورزی با تیغه‌های عریض خاک تنها به طرف جلو و بالا حرکت دارد و حرکت‌های جانبی آن اندک و قابل چشم‌پوشی است [۵].

۳-۳ تنش های خاک

تنش‌های ون میسر ایجاد شده در خاک در شکل ۵ نشان داده شده است. بیشینه تنش‌ها در سطح زیرخاک در نقاط تماس با تیغه و در سطوح نزدیک به تیغه است. با مقایسه شکل‌های جابه‌جایی و تنش می‌توان دریافت که برش لایه‌های خاک در امتداد تراز تنش حداکثر حاصل می‌شود. شکل‌های ۶-الف و ۶-ب تنش‌های اصلی حداقل را در خاک نشان می‌دهند. خط نشان داده شده در شکل ۶-ب که تقریباً از انتهای تیغه می‌گذرد خط جدا کننده تنش‌های اصلی حداقل مثبت (پایین) و منفی (بالا) است. درون ناحیه شکست‌های اصلی حداقل منفی، تنش‌های وارده بر خاک سبب انبساط آن شده و تیغه تمایل دارد تا خاک را به جلو و بالا رانده و سبب شل شدن خاک و شکست آن شود.



شکل ۲- المان‌های تماسی ایجاد شده بین سطح تماس خاک و تیغه

جدول ۱- خواص خاک، تیغه و سطح تماس [۳]

مقدار	ویژگی
	خصوصیات مواد خاک
۱۸۰۰	چگالی (kg/m^3)
۱۵۰۰۰	هم چسبی (kPa)
۳۰	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۰٫۳۶	نسبت پواسون
۸۰۰۰	مدول الاستیسیته (kPa)
	خصوصیات مواد تیغه
۸۰۰۰	چگالی (kg m^{-3})
۰٫۳	نسبت پواسون
۸۰۰۰۰۰	مدول الاستیسیته (kPa)
	خصوصیات سطح تماس
۲۰	زاویه اصطکاک خاک - تیغه (درجه)

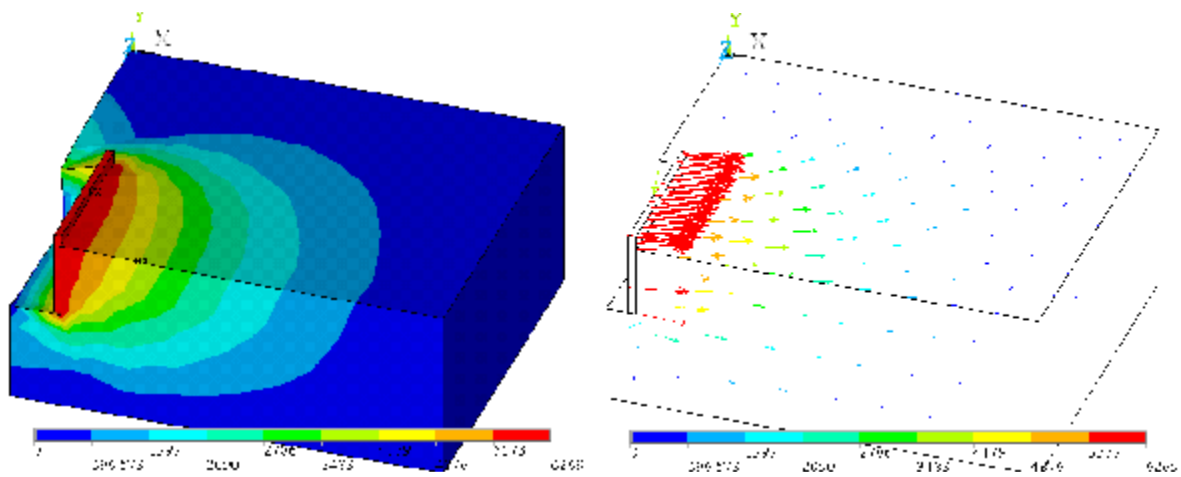
۳-نتایج و بحث

۳-۱ نیروهای افقی (نیروی کششی) و عمودی

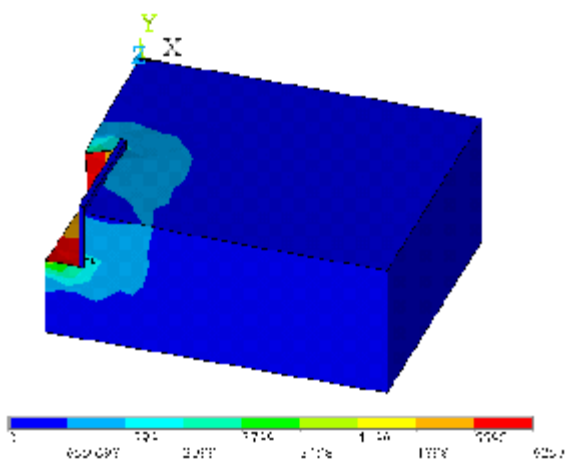
نیروهای کششی و عمودی ابزار از جمع تمام نیروهای افقی و عمودی وارده بر گره‌های تیغه پس از جابه‌جایی اعمال شده به دست آمد. نیروهای کششی و عمودی وارده بر تیغه در شکل ۳ نشان داده شده است. مقدار نیروی کششی از صفر به یک مقدار بیشینه ۱۰۵۴۷ kN در نقطه ۱۵ میلی‌متر جا به جایی رسیده و سپس این مقدار کاهش یافته و به ۶۸۰۱۲ kN در نقطه ۶۰۰ میلی‌متر جا به جایی می‌رسد. علت این کاهش می‌تواند به سبب شکست خاک باشد که باعث می‌شود نیروی کمتری برای ادامه حرکت نیاز باشد. نتایج به دست آمده توسط داوودی و همکاران [۳] با یک تیغه عریض و آنالیز دو بعدی اجزای محدود نشان می‌دهد که نیروی کششی ابتدا به یک مقدار بیشینه ۱۳۶۹۹kN در جابه‌جایی ۱٫۱۳ سانتی متر رسیده و سپس به اندازه ۲۰/۴٪ کاهش یافته و به مقدار ۱۰۹kN می‌رسد. همچنین نتایج به دست آمده در مطالعات اشمولویچ و همکاران [۱۰] که با یک تیغه عریض و به روش المان گسسته صورت گرفته بود حاکی از این بود که نیروی کششی به



شکل ۳- نمودار نیروی کشش (بالایی) و نیروی عمودی (پایینی) عمل کننده روی تیغه در برابر جابه جایی



شکل ۴- بردارهای جابه‌جایی گره‌های خاک

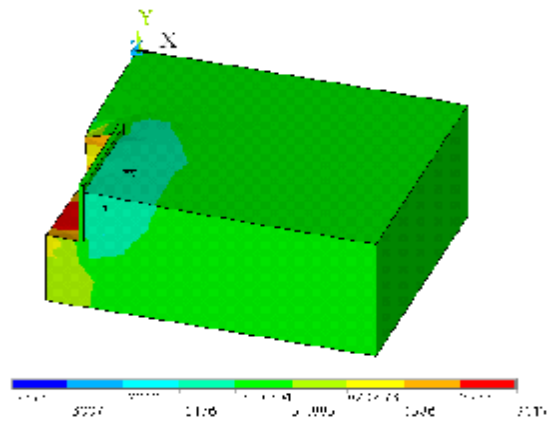


شکل ۵- گسترش تنش‌های ون میسز در خاک

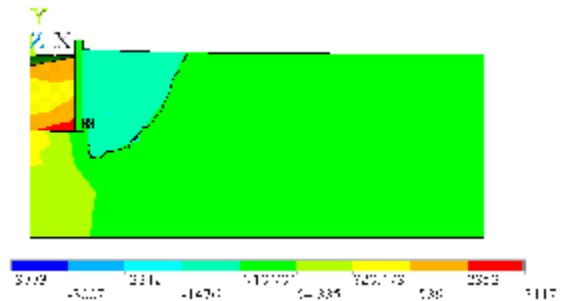
این شکست در امتداد خط رسم شده اتفاق می افتد و مقدار تنش در این ناحیه 22.42 kPa است. مقدار تنش‌های اصلی کمینه که در زیر تیغه قرار داشته و دارای مقادیر مثبت هستند بیانگر تنش‌های فشاری بوده و سبب ایجاد لایه‌های غیر قابل نفوذ و سخت^۱ در زیر سطح ابزار می‌شوند. نفوذ ابزار خاک ورزی در خاک‌های سخت شده به دلایل مختلف از جمله استفاده بی- رویه از ابزار خاک ورز و سنگین بسیار مشکل است مگر اینکه زیر شکنی انجام گردد.

^۱. Hard pan

- [2] Chi L and Kushwaha RL, A non-linear 3- D finite Element Analysis of Soil Failure with Tillage tool. J. Terramech, 27:pp. 343-366, 1990
- [3] Davoudi SH, Alimardani R, Keyhani A and Atranejad R, A Two Dimensional Finite Element Analysis of a Plane Tillage Tool in Soil Using a Non-linear Elasto-Plastic Model. American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci., 3 (3): pp. 498-505, 2008
- [4] Fielke JM, Finite Element Modelling of the Interaction of the Cutting Edge of Tillage Implements with Soil. J. agric. Engng Res., pp. 74, 91-10, 1999
- [5] Godwin RJ and Spoor G, Soil Failure with Narrow tines. J. Agric. Eng. Res., 22: pp. 213-228, 1977
- [6] Gee-Cloughd, Wang J, Kanok-Nukulchai W, Deformation and Failure in Wet Clay Soil: Part 3, Finite Element Analysis of Cutting of Wet Clay by Tines. J. Agric. Engng Res. Pp. 58,121-13, 1994
- [7] Mouazen AM and Nemenyi M, Finite Element Analysis of Subsoiler Cutting Innonhomogenous Sandy Loam soil. Soil and Tillage Res., 51: pp. 1-15, 1999
- [8] Mouazen AM and Nemenyi MA Review of the Finite Element Modelling Techniques of Soil Tillage. Math. Comp. Simul., 48:pp. 23-32, 1998
- [9] Mouazen AM and Nemenyi M, Tillage Tool Design by the Finite Element Method: Part 1. Finite Element Modelling of Soil Plastic Behaviour. J. Agric. Engng Res. pp. 72,37-51, 1999
- [10] Shmulevich I, Asaf Z and Rubinstein D., Interaction Between Soil and a Wide Cutting Blade Using the Discrete Element Method, Soil and Tillage Research. (In Press) doi:10.1016/j.Still.08.009, 2007
- [11] Tekeste MZ, Tollner EW, Raper RL, Way TR and Johnson CE. Non-linear Finite Element Analysis of Cone Penetration in Layered Sandy Loam Soil – Considering Precompression Stress State. J Terramech, pp. 46,229-239, 2009



شکل ۶-الف- نمای سه بعدی گسترش تنش های اصلی
مینیمم مثبت و منفی در خاک



شکل ۶-ب- نمای جانبی گسترش تنش های اصلی مینیمم
مثبت و منفی در خاک

۴- نتیجه گیری

بیشترین مقدار نیروی کششی برای تیغه در نظر گرفته شده در این تحقیق برابر $10,547 \text{ kN}$ در جابه جایی 15 میلی متر است. هم چنین مقدار نیروی عمودی بالا سوی وارده بر تیغه به مقدار حداکثر 272 N پس از جابه جایی 300 میلی متر می رسد. نتایج قابل مقایسه با سایر تحقیقات انجام گرفته در این زمینه است. مطالعه جابه جایی خاک نشان می دهد که بیشترین جابه جایی ها در سطوح نزدیک تیغه بوده، از انتهای تیغه شروع شده و به مقدار حداکثر در سطح می رسد. هم چنین سطوحی که لایه غیر قابل نفوذ شکل می گیرد با این روش قابل تشخیص بوده و برابر با حجمی از خاک است که در آن تنش های فشاری اتفاق می افتد.

مراجع

- [1] Abo-Elnor M, Hamilton R and Boyle JT., Simulation of Soil-Blade Interaction for Sandy Soil Using a Dvanced 3D Finite Element Analysis. Soil and Tillage Res., 75:pp. 61-73, 2004