مدلسازی فرآیند برش خاک در تیلر دوار با استفاده از روش اجزا محدود(٤٨٩)

احسان الهی فرد[۱] ، محمدرضا حجتی[۲] ، ناصر علوی[۳]

چکیده

استفاده از تیلرهای دوار به عنوان یکی از کارآمدترین ماشینهای خاکورزی در باغات و شالیزارها به صورت روزافزونی مورد استقبال قرار گرفته است. پودر شدگی خاکدانه ها به واسطه اعمال تنش های اضافی به سطح خاک، یکی از نتایج نامطلوب کاربرد این دستگاه می باشد. در این تحقیق، فرآیند برش خاک در تیلر دوار با استفاده از روش اجزا محدود مدل سازی گردید و اثر پارامترهای سرعت پیشروی، در دو سطح ۲,۲۳ و ۳,۴۱ کیلومتر بر ساعت، سرعت دورانی روتور در دو سطح ۱۸۳ و ۲۵۱ دور بر دقیقه و محتوای رطوبتی خاک در سه سطح ۱۲-۱۰، ۱۴-۱۲ و ۱۶-۱۴ درصد بر تنش های اعمال شده بر خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل سازی بیانگر این است که افزایش سرعت پیشروی منجر به کاهش تنش ها و افزایش سرعت دورانی و افزایش محتوای رطوبتی خاک منجر به افزایش تنش های اعمالی به سطح خاک گردید. مقادیر تنش در وضعیت های مختلف با مقدار مجاز تنش خاک مقایسه و میزان تنش اضافی اعمال شده به خاک که منجر به پودر شدن خاک می گردد محاسبه شد.

کلیدواژه: تیلر دوار، سرعت پیشروی، سرعت دورانی روتور، محتوای رطوبتی، روش اجزا محدود

۱- دستیار آموزشی، دانشگاه پیام نور، سیرجان
۲- مدرس آموزشکده فنی
۳- استادیار دانشگاه باهنر

مقدمه

مطالعات مختلفی در مورد فرآیند خاکورزی صورت پذیرفته است. بررسی میزان کارآمدی ادوات، توصیف رفتار خاک ، تحقیق در مورد عوامل موثر بر کارکرد ادوات خاکورزی، تاثیر خاکورزی بر میزان تولید محصول، نوع ترکیب ادوات مورد استفاده در سیستم های خاکورزی عنوان برخی از این تحقیقات می باشد. فردلاند [1] خاک را به عنوان سیستمی چندگانه مطرح نمود که شامل فازهای آب، هوا و ذرات جامد می باشد. رفتار این سیستم، تابعی از شرایط فیزیکی و میزان و نحوه اعمال بارهای وارده بر پروفیل خاک می باشد. این مولفه ها نیز به نوبه خود تابعی از متغیرهای متعددی می باشد; به طور مثال، شرایط فیزیکی خاک به بافت خاک، رطوبت، میزان منافذ موجود در خاک و . . . بستگی دارد. این موارد، سائل متعددی را در مطالعه پدیده های مربوط به خاک مانند جاری شدن و شکست در خاک به وجود می آورد. لاب و همکارانش [2] در سال 1999 تلفات مربوط به خاک را در پدیده فرسایش مورد بررسی قرار دادند. ماحصل این بررسی، ارتباط معنادار پدیده فرسایش با ادوات به کار رفته در سیستم خاکورزی را نشان می داد. وی در این مطالعه، همچنین اثرات نحوه کاربرد ادوات ، عرض و عمق کار ادوات خاکورزی، سرعت پیشروی وسیله و شرایط فیزیکی خاک بر پدیده فرسایش را مورد بررسی قرار داد. سیبستن و همکارانش [3]، جابجایی خاک در مسیری افقی را طی عملیات خاکورزی بررسی نمود. ایشان، یک مدل ریاضی جهت تقریب حرکت خاک مطرح نمود. مدل مطرح شده توسط وی ، جابجایی ذرات خاک را نسبت به متغیر زمان پیش بینی می نمود. مدل پیشنهادی بر پایه معادله دیفرانسیل جزیی پخش در محیط های متخلخل مطرح گردیده شده بود. [۸] یکی از ادواتی مد نظر در سیستم های خاکورزی، تیلر دوار است که بستر بذر را با یک بار عبور روی زمین تهیه کرده و در صورت استفاده در شرایط مناسب، می تواند جایگزین ارزشمندی برای گاوآهن و دیسک باشد. [۱] بررسی های مختلفی بر روی کارکرد تیلرهای دوار در منظرهای مختلف صورت گرفته است. این تحقیقات، در راستای استفاده بهینه و مطلوب از این دستگاه جهت کاهش مصرف توان، بهبود فرآیند خاکورزی و ... صورت گرفته است. فرورت [4] در سال 1940 دریافت که با افزایش طول لقمه از 4 به 8.1 سانتی متر اندازه کلوخه ها به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافته و حتی با لقمه های برش به طول 15 سانتی متر، درجه نرم سازی خاک به همان شدتی است که با استفاده پشت سر هم گاوآهن برگرداندار، دیسک به تعداد دوبار و چنگه دندانه میخی ایجاد می گردد. همچنین با استفاده از قدرت موتور و انتقال آن از طریق محور توان دهی به تیغه ها و خاک به جای استفاده از نیروی کششی از طریق چرخ ها قدرت کمتری تلف شده و کار با آنها وزن تراکتور و میزان فشردگی خاک را تقلیل می دهد. هنریک [5] در آزمایشاتی که توسط یک چیزل معمولی انجام داد، دریافت که انتقال نیروی موتور از طریق محور تواندهی منتقل شده نسبت به نیروی کششی که توسط چرخ ها اعمال می شود، بازده بالاتری داشته و کمتر هدر می رود. همچنین کاهش نیروی کششی در حین خاک ورزی انجام کار در شرایط نامساعد مثلا لغزنده بودن سطح زمین و استفاده از تراکتورهای سبک تر که اثر کمتری در فشردگی خاک دارد را امکان پذیر می رساند. در نهایت سطح به هم خورده خاک و میزان شدت خرد کردن خاک توسط این وسیله بیشتر از چیزل معمولی است. [1]

باید توجه داشت در مقایسه با گاوآهن های برگرداندار نیاز به قدرت چنین وسیله ای بالا ، درجه پودر سازی و هوادهی به خاک به وسیله آن بسیار زیاد است. از این رو در صورت کم بودن عمق شخم و در صورت عدم وجود شرایطی که به پودر سازی و هوادهی منجر شود، از جمله باغات و شالیزارها می توان آن را به کار برد. [4]

کاستیک و همکارانش [6] میزان مصرف انرژی در تیلر دوار را با استفاده از دو نوع تیغه تحت آرایش های مختلف مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که نوع تیغه مورد استفاده، اثر مهمتری نسبت به آرایش تیغه ها بر روی فلانج بر میزان مصرف انرژی دارند. ایشان سرعت پیشروی و عمق کار را در زمان استفاده از تیلر دوار مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که افزایش سرعت از 0/68 به 1/40 متر بر ثانیه منجر به افزایش انرژی تا میزان 23 درصد می گردد. سالوخ و همکارانش [7] اثر استفاده از تیغه های L شکل و C شکل و ترکیب این تیغه ها بر روی فلانج را بر میزان مصرف انرژی مورد بررسی قرار دادند. ایشان

1 Fredlund and Rahardjo,
2 Lobb et al.
3 Sibbesen et al .
4 Fervert
5 Hendrick
6 Koustic et al
7 Saloukh et al

نتیجه گیری نمودند که استفاده از تیغه های L شکل منجر به افزایش توان مورد نیاز نسبت به تیغه های C شکل می گردد. سینگ [1] در سال 2004 اثر پارامترهای سرعت پیشروی ، دور بر دقیقه شافت و نوع تیغه استفاده شده را بر میزان توان مصرفی، برگرداندن خاک و میزان خرد شدن خاک با استفاده از دو نوع تیغه مورد بررسی قرار داد. نتایج کار ایشان نشان می داد که کاهش سرعت پیشروی و افزایش دور بر دقیقه منجر به افزایش نرخ خرد شدن خاک می گردد. استفاده از تیغه های C شکل، منجر به کاهش 19 درصدی توان مورد نیاز نسبت به تیغه های L می گردد. بیشترین میزان خرد شدن خاک با استفاده از تیغه های L شکل در دور بر دقیقه 210 و سرعت 2/86 کیلومتر بر ساعت به دست آمد. [6]

معرفی روش اجزا محدود

کاربرد روش های عددی در شاخه های مختلف علوم، طی سالهای اخیر از گسترش بی نظیری برخوردار بوده است. در این میان، روش اجزا محدود به عنوان مهمترین روش عددی نقش ویژه ای در مهندسی دارا می باشد. روش های عددی در حالت های ساده، در قالب روش اختلاف محدود از دیرباز در جهان علم و صنعت شناخته شده و در بسیاری از موارد که تحلیل مسایل پیچیده و دشوار می گردیده، راه حلی مناسب جهت بدست آوردن نتایج تقریبی بوده است. از طرف دیگر، استفاده از این روش ها توام با محاسبات ساده ولی طولانی و وقت گیر بوده به گونه ای که حل معمولی چنین محاسباتی به وسیله دست و فکر انسان کاری طاقت فرسا و همراه با خطا بوده و این روش تنها در موارد خاص مورد استفاده قرار گرفته است. اگر روش اجزا محدود را محور اصلی روش های عددی به حساب آوریم، گرایش به کاربرد وسیع تر روش های عددی را می توان در حوالی سالهای جنگ دوم جهانی ، مشاهده نمود. [3]

استفاده از یک نظریه پایه به صورت یک قالب ریاضی مطلوب و تبدیل آن از روابط پیچیده به روابطی ساده و اجرای نهایی محاسبات توسط رایانه ها ، نقش اساسی در تحلیل به کمک روش های عددی را دارا می باشند. به این ترتیب ساختار عمومی استفاده از روش های عددی را دارا می باشند. بدین ترتیب می توان ساختار عمومی استفاده از روش های عددی را تحت عناوین زیر، مطرح نمود:

- نظریه پایه
- ساخت مدل
- الگوی محاسبات

روش اجزا محدود در خاک

روش اجزا محدود در خاک و برنامه های ارائه شده در راستای این روش، جهت بررسی ساختار مکانیکی و نیز پیش بینی رفتار یک مدل خاک تحت بار های اعمالی مطرح می گردد.به واسطه رفتار غیر خطی خاک، تحقیقات مربوط به این زمینه نسبت به سایر موارد کاربردی با پیشرفت کندتری همراه بوده است. ارائه روابطی که بیانگر رفتار غیر خطی خاک در قالب روش اجزا محدود باشد، نخستین بار در سال 1970 توسط دانکن[2] و چانگ[3] بررسی گردید. ایشان مدلی تحت عنوان مدل هیپربولیک[4] را جهت توصیف روابط مابین تنش و کرنش در خاک بیان کردند. این مدل رفتار غیرخطی و ارتجاعی خاک را توصیف می نمود. مدول مماسی[5] بیان شده در این مدل به صورت تابعی از سطح تنش اعمالی و مقاومت خاک بیان می گردید. از این مدل عموما به واسطه سهولت در تحقیقات مربوط به خاک استفاده می گردد. معادله مربوط به محاسبه مدول مماسی با استفاده از رابطه (۱) تعریف می گردد که به آن معادله دانکن نیز اطلاق می شود.

1 Singh
2 Duncan
3 Chang
4 Hyperbolic Model
5 Tangent Modulus

$$E_t = KP_a\left[\frac{\sigma_3}{P_a}\right]^n\left[1-\frac{R_f(\sigma_1-\sigma_3)}{(\sigma_1-\sigma_3)_f}\right]^2 \qquad (۱)$$

E_t : مدول مماسی ارتجاعی

P_a : فشار اتمسفر

σ_1 : تنش اصلی بیشینه

σ_3 : تنش اصلی کمینه

$(\sigma_1-\sigma_3)_f$: اختلاف تنش های اصلی بیشینه و کمینه در نقطه گسیختگی

R_f : نسبت گسیختگی (نسبت تنش نهایی به مقاومت تسلیم خاک)

k, n : اعداد بدون بعد که برای خاک های مختلف قابل تعریف می باشد.

در معادله دانکن مدول مماسی ارتجاعی به صورت تابعی از تنش های اصلی تعریف می گردد. شن[1] در سال 1988 رابطه ای آماری را جهت محاسبه نرخ کرنش برشی در خاک ارائه نمود. (2)

$$\ln\dot{\xi} = \alpha + \beta(0.5(\sigma_1-\sigma_3)) \qquad (2)$$

$\dot{\xi}$: نرخ کرنش برشی در خاک

α, β : ضرایب معادله

شن و کوشواها[2] در سال 1993 با استفاده از روابط (۱) و (2) تعریف دیگری را جهت محاسبه مدول مماسی بیان نمودند. (رابطه ۳)

$$E_t = KP_a\left[\frac{\sigma_3}{P_a}\right]^n\left(1-\frac{R_f(\sigma_1-\sigma_3)}{(\sigma_1-\sigma_3)_f[1+B_t\ln(\dot{\xi}/\dot{\xi}_0)]}\right)^2 \qquad (۳)$$

$\dot{\xi}_0$: نرخ کرنش بیشینه در آزمایشات

B_t :ضریب ثابت که وابسته به نرخ کرنش دارد.

معادله اساسی در روابط اجزا محدود جهت محاسبه تنش های اعمالی و تغییر مکان ها، رابطه موهر–کولمب می باشد. (رابطه ۴)

$$\tau = C + \sigma.\tan(\phi) \qquad (۴)$$

τ : تنش برشی

C : چسبندگی خاک

σ : تنش نرمال

ϕ : زاویه اصطکاک داخلی

در مطالعات انجام شده توسط دانکن در سال 1970 که بر روی دو نوع ماده انجام گردید، مشخص شد که به جز تعریف مدول مماسی نیاز به تعریف پارامتر دیگری تحت عنوان نسبت پواسون[3] جهت توصیف رفتار مکانیکی مواد می باشد. این ضریب برای

1 Shen
2 Kushwaha
3 Poisson's ratio

توصیف رفتار غیر خطی و ارتجاعی خاک، در سال 1993 توسط چی و همکارانش[1] محاسبه گردید و به صورت یک معادله تعریف شد. این معادله، تابعی از تنش های اعمال شده بر خاک و مقاومت خاک می باشد. (رابطه ۵)

$$\nu = a + b\left[\frac{[1-\sin(\phi)][\sigma_1 - \sigma_3]}{2c.\cos(\phi) + 2\sigma_3 \sin(\phi)}\right] \qquad (۵)$$

ν : نسبت پواسون

a, b, c : ضرایب معادله که با توجه به نوع خاک تعریف می گردد.

معادله دیفرانسیل اساسی جهت بیان رفتار یک سیستم مکانیکی در سال 1988 توسط کوک[2] بیان گردید.[5]

$$M\ddot{a} + C\dot{a} + Ka + f = 0 \qquad (۶)$$

f : بردار نیروی اعمالی

$\ddot{a}$: بردار شتاب

$\dot{a}$: بردار سرعت

a : بردار جابجایی

M : ماتریس جرم

C : ماتریس میراگر

K : ماتریس سختی

در مسائل مربوط به خاک و کاربرد روش اجزا محدود به واسطه رفتار غیرخطی، روش نموی (افزایشی)[3] مورد استفاده قرار می گیرد. علت استفاده از این روش، محاسبه تنش در هر مرحله به صورت تابعی از میزان تنش محاسبه شده در قسمت قبل می باشد.در این روش از مدول مماسی به عنوان مدول ارتجاعی مورد نیاز در محاسبات استفاده می گردد.

لذا استفاده از روش اجزا محدود جهت بررسی رفتار خاک می تواند منجر به نتایج رضایتمندی شود. استفاده از این روش در سال های اخیر با استقبال مواجه گردیده است .

یکی از این تحقیقات، در سال 2003 در کشور اردن انجام شد. ابوحمده[4] با استفاده از روش اجزا محدود ، رفتار خاک را طی استفاده از گاوآهن های بشقابی به صورت یک رفتار غیرخطی مورد تحلیل قرار داد و اثرات سرعت پیشروی و زاویه برش تیغه ها را در دو خاک مختلف مورد بررسی قرار داد. نتایج ایشان نشان می داد که افزایش زاویه برش تیغه ها منجر به افزایش نیروی کششی مورد نیاز و کاهش نیرو های جانبی اعمالی بر گاوآهن بشقابی می شد.همچنین افزایش سرعت پیشروی ، منجر به افزایش نیروی کششی مورد نیاز و کاهش نیروهای عمودی وارد بر گاوآهن بشقابی می شد. [7]

مواد و روش ها

جهت بررسی فرآیند برش خاک در تیلرهای دوار، با استفاده از روش اجزا محدود، نرم افزار Plaxis مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق، ابتدا مدل قطعه خاک با توجه به پارامترهای مربوطه آماده گردید و سپس اثرات سرعت پیشروی، سرعت دورانی روتور و محتوای رطوبتی خاک بر میزان تغییر مکانها و تنش های ایجادشده به واسطه برش تیغه در خاک مورد تحلیل قرار گرفت. سطوح مختلف هر اثر عبارت بود از:

- اثر سرعت پیشروی در دو سطح (2/23 و 3/41 کیلومتر بر ساعت)
- سرعت دورانی روتور در دو سطح (183 و 251 دور بر دقیقه)
- محتوای رطوبتی خاک در سه سطح (10-12%، 12-14% و 14-16%)

1 Chie et al.
2 Cook
3 Incremental method
4 Abu-Hamdeh

شکل پروفیل خاک که توسط تیغه تحت برش قرار می گیرد، به پارامترهای مختلفی بستگی دارد. این پارامترها شامل شکل تیغه ، سرعت پیشروی تراکتور ، سرعت دورانی روتور، تعداد تیغه های واقع بر فلانج و عمق کار می شود. برای بررسی تاثیر هریک از این پارامترها بر شکل و مشخصات هندسی پروفیل خاک ، برنامه ای در نرم افزار MATLAB آماده گردید. با استفاده از این برنامه که شامل سه زیر- برنامه می شد، شکل هندسی پروفیل خاک تحت تاثیر پارامتر های مطرح شده آماده گردید. جهت اجرای برنامه ، کاربر باید مقادیر سرعت پیشروی، دور بر دقیقه شافت، تعداد تیغه های واقع بر یک فلانج، شعاع برش (مجموع طول تیغه و شعاع روتور) و عمق کار را وارد نماید . پس از اجرای برنامه، مختصات نقاط تشکیل دهنده مسیر برش خاک توسط تیغه به عنوان خروجی برنامه ارائه می گردد. مقادیر خروجی برنامه تهیه شده در نرم افزار MATLAB ، به عنوان مختصات لقمه خاک استفاده گردید. در این برنامه ، تعداد تیغه ها ، شعاع برش که مجموع طول تیغه و شعاع روتور می باشد و عمق کار ، ثابت فرض گردید. تعداد تیغه های موجود بر روی فلانج، 6 تیغه فرض گردید که به صورت 3 جفت در زوایای 120 درجه نسبت به یکدیگر قرار گرفته بودند. شعاع برش معادل 22 سانتی متر و عمق کار 16 سانتی متر فرض گردید. نوع تیغه، ال-شکل انتخاب شد. پارامتر های متغیر جهت به دست آوردن شکل لقمه خاک، سرعت پیشروی در دو سطح 2/23 و 3/41 کیلومتر بر ساعت و نیز، سرعت دورانی در دو سطح 183 و 251 دور بر دقیقه فرض شد . بنابراین، 4 مدل جهت توصیف این 4 وضعیت آماده گردید. برای محاسبه نیروی اعمال شده از طرف تیغه بر خاک در زمان برش ، حداقل مقدار نیروی برش، معادل نیروی عکس العمل خاک در نظر گرفته شد. مقدار این نیرو با توجه به کشش ویژه محاسبه شد.. مک کبین[1] در سال ۱۹۵۲ بسیاری از ارقام سرعت در بر کشش را جمع آوری و محاسبه نمود. نهایتا هندریک در سال ۱۹۸۸ رابطه (۷) را جهت محاسبه کشش ویژه خاکهای مختلف به دست آورد. [2]

$$D = c_1 + c_2 .s^2 \qquad (۷)$$

جهت محاسبه نیروهای اعمالی بر مقطع خاک، برنامه ای در نرم افزار MATLAB آماده گردید.
مشخصات فیزیکی خاک در جدول زیر آمده است. بر روی مدل لقمه خاک، ۶ نقطه انتخاب گردید تا مقادیر تنش های اعمالی در وضعیت های مختلف محاسبه و مقایسه گردد.

جدول (1) پارامترهای به کار رفته در مورد خاک

عبارت	*برچسب*
وزن مخصوص خشک	γ_d
وزن مخصوص تر	γ
چسبندگی	C
زاویه اصطکاک داخلی	ϕ

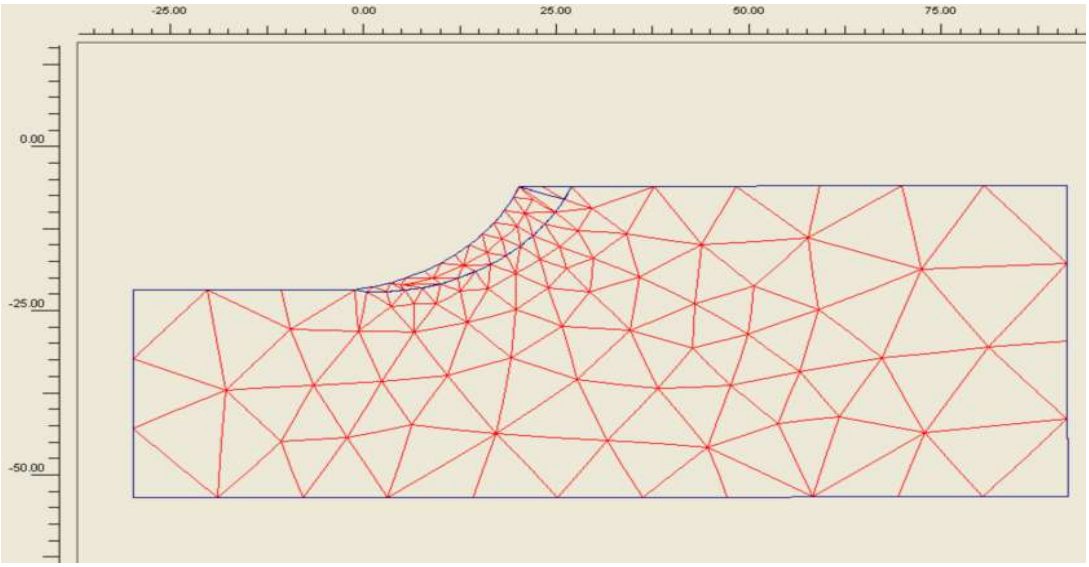
جدول(2) : مقادیر پارامترهای مربوط به خاک در سه محتوای رطوبتی

محتوای رطوبتی	γ_d [kg/m^3]	γ [kg/m^3]	C [N/m^2]	ϕ [deg]
10-12	1610	1770	9000	22
12-14	1610	1800	9300	21.46
14-16	1610	1833	9800	20.61

1 Mckibben

نتایج و بحث

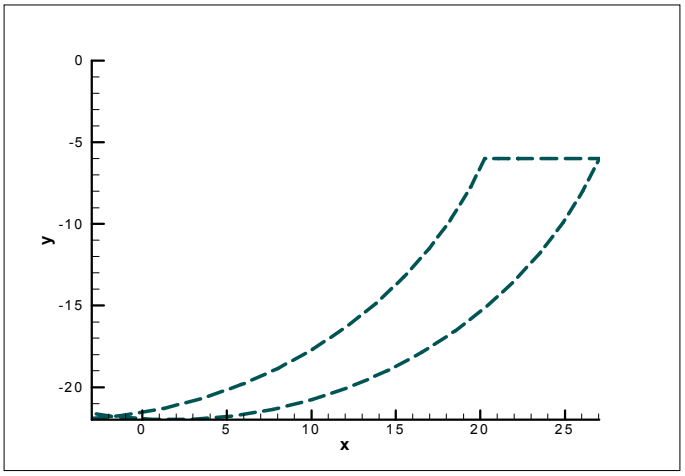
شکل پروفیل خاک در وضعیت های مختلف آماده گردید. در جدول (۳) مقادیر خروجی برنامه در وضعیت سرعت پیشروی ۲/۲۳ کیلومتر بر ساعت و سرعت دورانی ۱۸۳ دور بر دقیقه مشخص شده است. مدل شبکه بندی شده خاک در نرم افزار در شکل (۱) دیده می شود.



شکل(۱): مدل شبکه بندی شده جهت توصیف سرعت پیشروی 2/23 کیلومتر بر ساعت و سرعت دورانی 183 دور بر دقیقه

جدول (۳): مختصات نقاط تشکیل دهنده لقمه خاک در سرعت 2/23 کیلومتر بر ساعت و دور 183 دور بر دقیقه

مختصات	محتوای رطوبتی	عرض	طول
		-21/44	-10/71
		-21/98	-5/91
		-21/72	-1/09
-20/66	3/59		
-18/85	8/01		
-16/34	12/01		
-13/24	15/48		
-9/65	18/30		
-6/00	20/27		
-6/00	21/64		
-6/00	22/22		
-6/00	27/04		
-9/92	24/89		
-13/47	22/02		
-16/54	18/51		
-19/00	14/48		
-20/76	10/04		
-21/76	5/33		
-21/97	0/50		
-21/37	-4/27		
-19/99	-8/87		

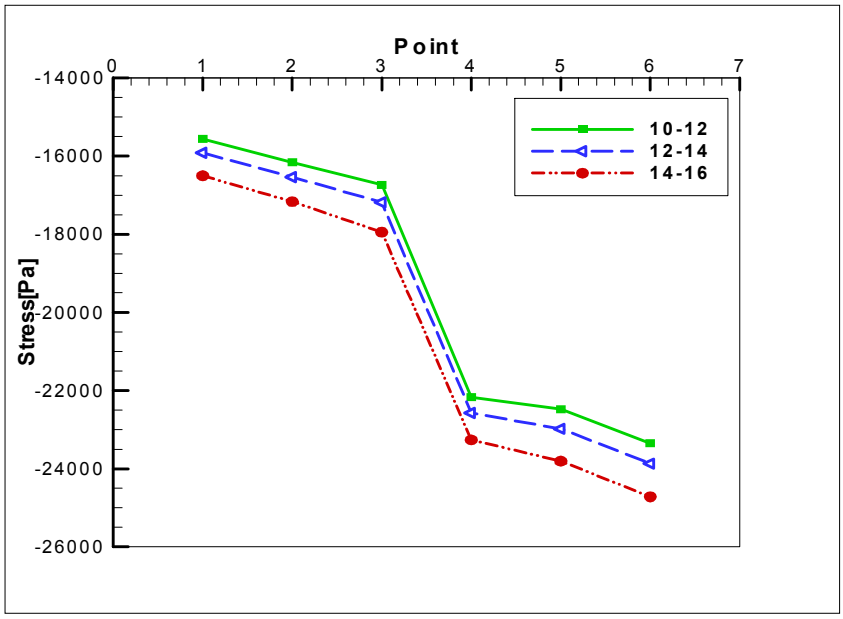


شکل (۲): لقمه خاک در سرعت 2/23 کیلومتر بر ساعت و دور183 دور بر دقیقه

مقادیر تنش در نقاط انتخابی بر روی لقمه خاک در ۱۲ وضعیت محاسبه گردید. مقادیر تنش در وضعیت سرعت پیشروی ۲/۲۳ کیلومتر بر ساعت و سرعت دورانی ۱۸۳ دور بر دقیقه در سه محتوای رطوبتی در جدول (۴) مشخص شده است. نمودار این مقادیر در شکل (۳) مشخص شده است.

جدول(٤):تنش در در سرعت 2/23 کیلومتر بر ساعت و سرعت دورانی 183 دور بر دقیقه در سه محتوای رطوبتی

10-12 σ[Pa]	12-14 σ[Pa]	14-16 σ[Pa]	X [cm]	Y [cm]	شماره نقطه
-15560	-15914	-16502	20	-12	1
-16161	-16536	-17163	18	-14	2
-16733	-17184	-17945	16	-16	3
-22166	-22573	-23262	13	-18	4
-22476	-22978	-23805	9	-20	5
-23352	-23867	-24718	5	-21	6



شکل(۵): نمودار مقادیر تنش در نقاط انتخابی در سرعت 2/23 کیلومتر بر ساعت و سرعت دورانی 183 دور بر دقیقه در سه محتوای رطوبتی

- با افزایش رطوبت، میزان تنش های اعمالی بر خاک افزایش یافته است. علت این امر، افزایش فاصله بین ذرات خاک می باشد. با افزایش فاصله، ذرات خاک برای انتقال نیروی اعمالی به ذرات کمتری در تماس می باشد، لذا نیروی انتقالی از یک ذره به ذرات مجاور، به واسطه کاهش سطح تماس با ذرات مجاور، افزایش می یابد. افزایش نیروی وارد بر هر ذره، میزان تنش های اعمالی افزایش می یابد.
- افزایش سرعت پیشروی، منجر به کاهش تنش اعمالی به ذرات خاک شده است. علت این امر، افزایش سطح کل لقمه خاک می باشد. با وجود اینکه افزایش سرعت منجر به اعمال نیروی بالاتری به خاک شده است، لیکن سطح لقمه خاک نیز افزایش یافته است و افزایش سطح خاک نسبت به افزایش نیروی اعمالی، بیشتر بوده است. لذا این امر منجر به کاهش تنش های اعمالی بر ذرات خاک شده است.

- افزایش سرعت دورانی روتور، سبب افزایش تنش های اعمالی در سطح لقمه خاک شده است. علت این امر، کاهش سطح لقمه و افزایش نیروی اعمالی بر خاک می باشد که هر دو مورد، منجر به افزایش تنش در خاک می شود.
- میزان تنش های اعمالی در افزایش سطح رطوبتی از 14-12 به 16-14 درصد، نسبت به افزایش سطح رطوبتی از 12-10 به 14-12 درصد ، بالاتر بوده است.

مراجع

1- به آیین، م. شیخ داودی، م، ج (1381). اثر سرعت پیشروی تراکتور و وضعیت استقرار درپوش بر عملکرد تراکتور، مجله علمی کشاورزی. جلد 25- شماره 2.

۲- بهروزی لار، منصور (1378). اصول طراحی ماشین های کشاورزی، انتشارات علمی دانشگاه آزاد اسلامی

۳- 3- صدر نژاد، سیدامیرالدین (۱۳۸۰). مقدمه ای بر روش اجزا محدود. انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، 411 صفحه

4- منصوری راد، داود.(1372). تراکتورها و ماشینهای کشاورزی. جلد اول. انتشارات دانشگاه بوعلی سینا همدان، 688 صفحه.

5- Cook R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E. (1988). Concepts and Applications of Finite Element Analysis. Wiley, New York

6 -Koustic, S. Filipovic, D and Gospodaric, Z. (1996). Rotary cultivator energy requirement influenced by different constructional characteristics, velocity and depth of tillage. Poljoprivredna- Zanstvena- Somatra, vol 61, nos 3-4, 1996, P239

7- Nidal H. Abu-Hamdeh, Randall C. (2003). A nonlinear 3D finite element analysis of the soil forces on a disk plow. Soil and Tillage Research 74- page 115-124.

8-Sharifat, Karim (1999). Soil translocation with tillage tools. Ph.D thesis. University of Saskatchewan