

بررسی اثر عمق و زاویه حمله ابزار خاک ورز باریک بر مقدار نیرو و نحوه گسیختگی خاک با استفاده از روش اجزاء محدود سه بعدی

علی قاسمی¹، جواد مهدی نیا¹، عباس همت²، مجتبی نادری³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

2- استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، کد پستی 83111-84156

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران

آدرس پست الکترونیکی مکاتبه کننده (alighasemi10@gmail.com)

چکیده

پیش بینی نیروهای وارد بر ابزار خاک ورز بمنظور تخمین مقاومت کششی و توان مورد نیاز، تحلیل تنش وارد بر ابزار و تعیین حوزه گسیختگی خاک جهت مشخص نمودن آرایش مناسب واحدها، از اهمیت بسزایی برخوردار است. اگر چه بررسی های آزمایشگاهی رفتار متقابل خاک- ابزار نتایج واقعی را می دهد، اما این آزمایش ها معمولاً گران و وقت گیر بوده و به محدوده باریکی از تغییرات خصوصیات خاک محدود می شود. در مدل های تحلیلی نیز بسیاری از عوامل اثرگذار مانند سرعت و شتاب خاک در نظر گرفته نمی شود. تحقیقات نشان می دهد که با به کارگیری مدلی مناسب برای شبیه سازی رفتار متقابل خاک- ابزار، روش های عددی می توانند با کمترین هزینه جواب های قابل قبولی ارائه دهند. در این مطالعه با استفاده از روش اجزاء محدود و بسته نرم افزاری آباکوس (ABAQUS, 2010)، حوزه گسیختگی و نیروهای وارد بر ابزار خاک ورز باریکی به پهنای 10 cm که با سرعت ثابت 1 m/s به میزان 5 cm در خاک حرکت می کند، در چهار زاویه حمله 20°، 45°، 90° و 105° و سه عمق 15، 20 و 25 cm بررسی شدند. مدل دراگر- پراگر با معیار برش خطی جهت شبیه سازی رفتار تنش - کرنش خاک استفاده شد. نیروهای وارد بر ابزار و فاصله گسیختگی (ناحیه گسیختگی خاک در ج لوی تیغه و در جهت حرکت) با مدل تحلیلی گادوین مقایسه شدند. نتایج نشان داد، با افزایش زاویه حمله، مقاومت کششی افزایش یافت. جهت نیروهای عمودی در زاویه حمله 90° و 105° بطرف بالا و در 20° و 45° بطرف پایین بود. مقدار نیروی های جانبی به طور قابل ملاحظه ای از نیروهای عمودی و افقی کمتر بود. با افزایش عمق، نیروهای عمودی و افقی افزایش اما نیروهای جانبی کاهش نشان دادند. فاصله گسیختگی با افزایش عمق و کاهش زاویه حمله افزایش یافت. نتایج بدست آمده از حل عددی انطباق نسبتاً خوبی در مقایسه با تئوری گادوین نشان داد. بنابراین، روش اجزاء محدود می تواند بخوبی پاسخگوی نیاز محققان جهت بررسی اثر شرایط مختلف و پیچیده بر رفتار متقابل خاک- ابزار مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: ابزار خاک ورز، زاویه حمله، فاصله گسیختگی، مدل دراگر- پراگر، نیروی عکس العمل

مقدمه

بیش از نیمی از انرژی مصرفی در عملیات کشاورزی، صرف آماده سازی بستر خاک می شود. پیش بینی دقیق نیروهای عکس العمل وارد بر ابزار خاک ورز جهت تخمین مقاومت کششی و توان مورد نیاز جهت بهینه کردن مصرف انرژی و تطابق دادن اندازه ماشین با تراکتور و همچنین تحلیل تنش وارده به ابزار خاک ورز جهت طراحی از اهمیت زیادی برخوردار است. در ابزار خاک ورز باریک حوزه گسیختگی خاک سه بعدی است، لذا تعیین حوزه گسیختگی خاک بمنظور ایجاد همپوشانی مناسب جهت افزایش کارایی با صرف حداقل انرژی اهمیت زیادی در طراحی یک ابزار خاک ورز دارد [Abo-Elnor et al., 2003].

نیروی کشش را می توان توسط تئوری های مکانیک خاک، آزمون های تجربی و یا شبیه سازی رفتار متقابل خاک- ابزار توسط روشهای عددی تخمین زد . روشهای تئوری قادر به محاسبه تمامی جنبه های شرایط واقعی عملیات خاکورزی به عنوان یک فرآیند دینامیکی نمی باشند [Uriel and Aparecido, 1977]. روش های تجربی، دارای نتایج واضح و قطعی می باشد، اما بسیار پر هزینه و محدود به دامنه باریکی از تغییرات خصوصیات خاک هستند و تا حدود زیادی به دقت ابزار بکار رفته برای اندازه گیری وابسته اند. روش اجزاء محدود به طور نسبی می تواند شرایط مرزی پیچیده و متفاوتی از خاک را شبیه سازی کند [Davoudi et al., 2008]. لذا با افزایش توان کامپیوترها و پیشرفت مدل های عددی، روش اجزاء محدود یک ابزار عددی قدرتمند برای تحلیل و درک آنچه در حین برش خاک هنگام عملیات خاکورزی صورت می گیرد می باشد.

نخستین بار دانکن و چانگ در سال 1970 مدلی تحت عنوان مدل هایپربولیک جهت بیان روابط مابین تنش و کرنش در خاک ارائه دادند. این مدل بیانگر رفتار غیرخطی تنش-کرنش خاک در قالب روش اجزاء محدود بود. النور و همکاران در سال 2004 روش اجزاء محدود را برای پیش بینی رفتار حرکت ابزار در خاک شنی خشک بکار بردند. نتایج نشان دادند که شرایط اولیه (مانند پهنای تیغه و تعریف سطح شکست از پیش تعیین شده برای خاک)، شرایط مرزی و نحوه ی مش بندی خاک تاثیر معنی داری در پیش بینی سطوح شکست، جهت و مقدار نیروها دارند. مودن و همکاران در سال 1999، مدل دراگر- پراگر را جهت بررسی نیروهای عکس العمل وارده بر یک زیر شکن نیمه عمیق و در یک خاک غیر همگن شنی لومی به کار بردند . آنها نتیجه گرفتند، که مدل بکار رفته برای خاک - های غیر همگن نسبت به مدل ارائه شده برای خاک همگن با دقت بیشتری توانست توزیع تنش و نیروی عکس العمل در خاک را پیش بینی کند.

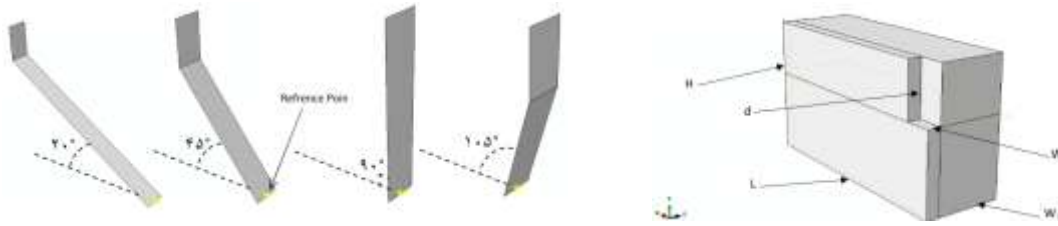
در این تحقیق با استفاده از بسته نرم افزاری آباکوس (ABAQUS/CAE 6.10-1, 2010) و مدل دراگر- پراگر خطی تعریف شده در آن به پیش بینی نیروهای وارد بر یک ابزار خاک ورز باریک، شکل و فاصله گسیختگی خاک بمنظور تعیین همپوشانی مناسب واحدها در عمق و زاویای حمله مختل ف پرداخته شده است. نتایج بدست آمده از شبیه سازی با مدل تئوری گادوین مقایسه شده اند.

مواد و روشها

همانطور که در شکل 1-الف نشان داده شده، محیط خاک در این مسئله به صورت مکعبی با طول (L) 900 mm، ارتفاع (H) 500 mm و عرض (W₁) 300 mm شبیه سازی شد. W نصف عرض برش تیغه برابر با 50 mm (چون مدل متقارن بود برای ساده سازی نیمی از آن مدل سازی شد)، d عمق برش تیغه بوده که در سه سطح 150، 200 و 250 mm آزمون شد. ابزار خاک ورز به صورت جسم صلب¹ با پهنای 50 mm و در چهار زاویه حمله 20°، 45°، 90° و 105° طراحی شد و همانطور که در شکل 1-ب دیده می شود، یک نقطه به عنوان گره مرجع² برای آن لحاظ شد.

در این مسئله از مدل دراگر- پراگر خطی به عنوان معیار گسیختگی خاک استفاده شد . سطح گسیختگی³ ارائه شده در مدل دراگر- پراگر تقریبی از معیار موهر- کلمب است که توسط دراگر- پراگر به عنوان اصلاحی بر معیار ون میسز جهت تاثیر تنش هیدرواستاتیک در تسلیم منظور گردید [صدر نژاد ، 1379].

1- Analytical rigid
2- Refrence point
3- Yield surface



شکل 1- الف) مدل سه بعدی قطعه خاک (ب) ابزار خاک ورز طراحی شده در چهار زاویه حمله (20°, 45°, 90° و 105°)

خصوصیات خاک انتخاب شده

در این تحقیق، از خصوصیات خاک رسی لومی بلمحتوای رطوبتی 14/8 درصد (بر پایه خشک) که کای و همکاران (1990) تعیین کرده‌اند، استفاده شده است. جدول 1 پارامترهای خاک انتخاب شده را ارائه می‌دهد.

جدول 1- خصوصیات خاک انتخاب شده (کای و همکاران 1990)

ψ (deg.)	K	β (deg.)	d (kPa)	زاویه اصطکاک خاک و فلز (deg.)	مدول الاستیسیته (kPa)	نسبت پواسون	زاویه اصطکاک داخلی (deg.)	چسبندگی (kPa)	چگالی (kg.m ⁻³)
1/5	178	54/39	25/14	23/5	300	1/329	34/5	7/19	1434
	0					0			

β و d بر ترتیب شبیه زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در مدل موهر- کلمب هستند. K نسبت تنش تسلیم در کشش سه محوری به تنش تسلیم در فشار سه محوری است که وابستگی سطح تسلیم را بر مقدار تنش اصلی میانه کنترل می‌کند. با داشتن اصطکاک داخلی خاک (Φ) مقدار K را می‌توان از رابطه 1 محاسبه نمود. مقادیر d و β از رابطه 2 محاسبه می‌شوند [ABAQUS, Version 6.10-1, 2010].

$$K = \frac{3 - \sin \Phi}{3 + \sin \Phi} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \tan \beta = \frac{6 \sin \Phi}{3 - \sin \Phi} \\ d = c \frac{6 \cos \Phi}{3 - \sin \Phi} \end{cases} \quad (2)$$

ψ زاویه آماس⁴ نامیده می‌شود که جهت جریان پلاستیک بعد از گسیختگی را تعیین می‌کند. رابطه 3، ارتباط زاویه آماس با اصطکاک داخلی مدل موهر-کلمب را نشان می‌دهد [Susila and Hryciw, 2003, Bolton, 1986].

$$\Phi = \Phi_{cv} + \psi \quad (3)$$

Φ_{cv} ثابت حجم زاویه اصطکاک داخلی⁵ برای مواد دانه‌ای نرم است. مقدار ثابت حجم برای مدل های اجزاء محدود بر اساس مشاهداتی که برای شن و سیلیکا دیده شد برابر با 33 درجه در نظر گرفته شد [Bolton, 1986].

مش بندی و شرایط مرزی

در این مطالعه، از تکنیک مش Structured برای مش بندی استفاده شد. یک المان زنجیره‌ای آجری خطی هشت گره‌ای سه بعدی (3DC8) برای مش بندی خاک انتخاب گردید.

4- Dilation angle

5- Constant volume angle of internal friction

گره های پایینی در صفحه $Y=0$ می توانند آزادانه در این صفحه بغلتند و در سایر جهات مقید شده اند. گره های مرزی عمودی، موازی با صفحه $Y-Z$ در $X=L$ در جهت افقی (محور X) مقید شده اند. گره های مرزی عمودی، موازی با صفحه $X-Y$ در $Z=0$ و $Z=W_1$ (صفحه متقارن) در جهت جانبی (محور Z) مقید شده اند. سطح خاک بدون هیچ گونه قیدی می باشد. تیغه نسبت به هرگونه چرخش و در جهات عمودی مقید شده است اما آزادانه می تواند در صفحه افقی جابجا شود.

شتاب جاذبه به مقدار $9/81 \text{ m.s}^{-2}$ تعریف شد. جهت اعمال نیرو به خاک، ابزار با سرعت ثابت 1 m.s^{-1} در جهت محور X به مقدار 5 cm حرکت داده شد. پس از تعریف سطوح تماس بین خاک ابزار، حرکت نسبی همراه با اصطکاک در سطوح برهم کنش تیغه و خاک لحاظ گردید.

مدل تحلیلی استفاده شده برای مقایسه نتایج

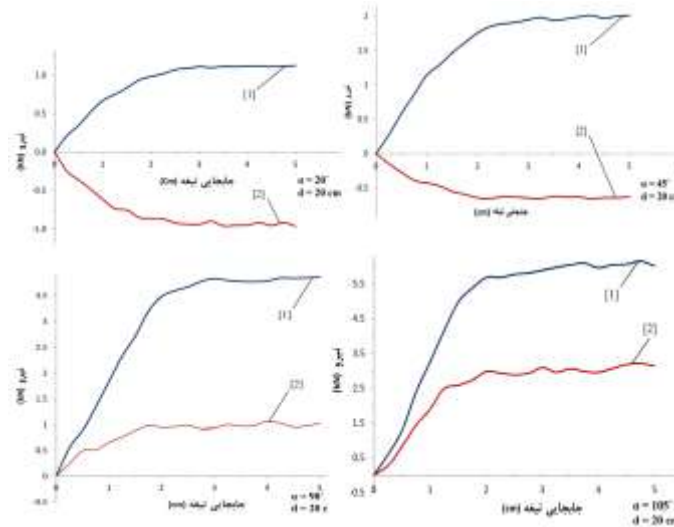
جهت ارزیابی نتایج حاصل از روش اجزاء محدود، از نتایج مطالعات گادوین و همکاران بهره گرفته شد. در این مدل نیروهای وارد بر ابزار خاک ورز و فاصله گسیختگی با توجه به هندسه ابزار، خواص فیزیکی و نوع گسیختگی خاک تعیین شده اند [Godwin et al, 1984].

نتایج و بحث

نیروهای وارد بر ابزار

شکل 2 نمودار نیروی افقی⁶ و عمودی⁷ را بر حسب جابجایی ابزار در خ اک برای گره مرجع در عمق 20 cm و زوایای حمله 20° ، 45° ، 90° و 105° نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش جابجایی نیروی کشش افزایش می یابد، اما پس از یک میزان جابجایی معین نیرو به مقدار بیشینه و حالت پایدار⁸ رسیده که نشان دهنده گسیختگی کامل خاک می باشد. افزایش نیرو در ناحیه گسیختگی به علت افزایش سربار ناشی از خاک بالا آمده، افزایش تنش برشی تا رسیدن به گسیختگی خاک و افزایش تراکم خاک می باشد. نیروی های عمودی در نفوذ و پایداری ابزار در خاک تاثیر زیادی دارند. نیروی های جانبی، اثر منفی بر تعادل و کار ابزار دارند و توان کششی مورد نظر را به دلیل افزایش نیروی اصطکاک بین خاک و ابزار افزایش می دهند.

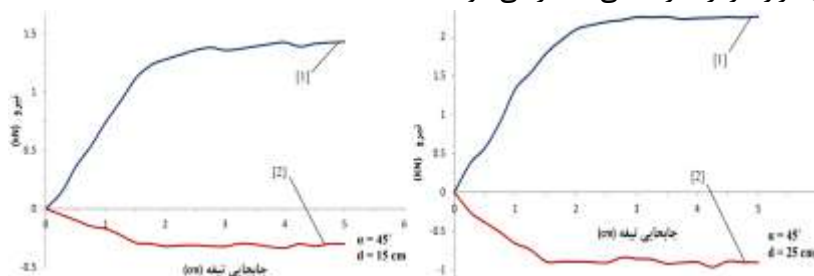
6- Draft force
7 - Vertical force
8 -steady state



شکل 2- نمودار نیرو- جابجایی ابزار در عمق 20cm و زاویای حمله 20° ، 45° ، 90° و 105° : 1: نیروی عمودی، 2: نیروی عمودی

با افزایش زاویه حمله مقدار نیروی افقی افزایش نشان داد، به طوری که در زاویای حمله 90° و 105° به طور معنی داری افزایش یافت. جهت نیروهای عمودی در زاویای حمله 20° و 45° به سمت پایین و در زاویای 90° و 105° به سمت بالا بود. بنابراین، با کاهش زاویه حمله نفوذ و پایداری ابزار در خاک افزایش می یابد.

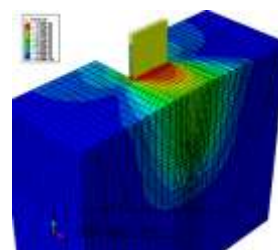
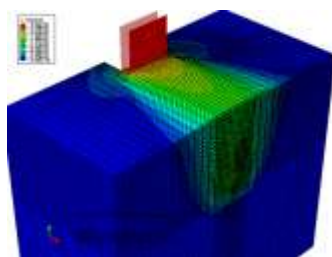
شکل 3 نمودار نیروهای وارد بر خاک را از طرف ابزاری با زاویه حمله 45° و در عمق های 15 و 25 cm را نشان می دهد. همانطور که در شکل 8 مشاهده می شود، با افزایش عمق مقدار نیروی کشش افزایش یافت. همچنین با افزایش عمق مقدار نیروی عمودی نیز به دلیل افزایش سربار افزایش یافت. با توجه به نتایج جدول 2 مشاهده می شود، نیروهای جانبی با افزایش عمق کاهش یافتند، زیرا با افزایش عمق ارتعاشات جانبی ابزار کمتر می شوند، بنابراین پایداری ابزار نیز از نظر جانبی بیشتر می شود.



شکل 3- نمودار نیرو- جابجایی در زاویه حمله 45° برای عمق های 15 و 25 cm

شکل و فاصله گسیختگی خاک

با استفاده از مولفه های جابجایی خاک در مدل حل شده (U_x, U_y, U_z) ناحیه به هم خوردگی خاک و فاصله گسیختگی مطابق شکل 4 و در سطوح مختلف زاویه حمله و عمق تیغه تعیین گردید.



الف) زاویه حمله 90°

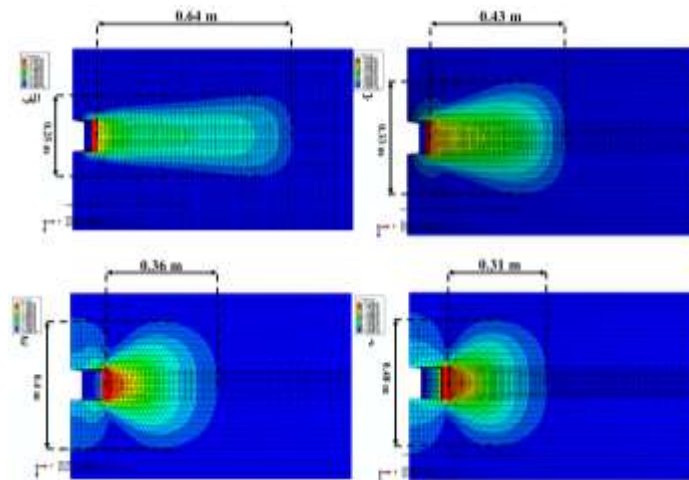
ب) زاویه حمله 45°

شکل 4- نمای برش خورده‌ای از خاک بهم‌خورده پس از 5 cm جابجای ابزار در خاک در عمق

با توجه به شکل 4 مشاهده می‌شود، با افزایش عمق پهنای گسیختگی خاک کمتر شده بنابراین، گسیختگی خاک در ابزار خاک‌ورز باریک سه بعدی است. همچنین با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل 5 مشاهده می‌شود که، با افزایش زاویه حمله فاصله گسیختگی در جلو ابزار کاهش می‌یابد. اما گسیختگی جانبی با افزایش زاویه حمله افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، در عملیات خاک‌ورزی هر چه زاویه حمله بیشتر شود می‌توان مقدار همپوشانی واحدهای خاک ورز را افزایش داد که سبب کاهش مقدار انرژی ویژه می‌شود. با افزایش عمق، فاصله گسیختگی در جلو و گسیختگی جانبی ابزار نیز افزایش یافت بنابراین می‌توان فاصله واحدهای خاک‌ورز از یکدیگر را با افزایش عمق افزایش دهیم.

بررسی اعتبار مدل

نتایج بدست آمده از روش اجزاء محدود در چهار زاویه حمله و سه عمق مختلف با نتایج بدست آمده از مدل تحلیلی گادوین و اسپور (1984) مقایسه و در جدول 2 ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد، نتایج تحلیلی و اجزاء محدود نسبتاً با یکدیگر منطبق بودند.



شکل 5- نمای بالایی خاک بهم‌خورده پس از 5 cm جابجای ابزار در عمق 20 cm (الف) $\alpha = 20^\circ$ (ب) $\alpha = 45^\circ$ (ج) $\alpha = 90^\circ$ (د) $\alpha = 105^\circ$

جدول 2- مقایسه نتایج بدست آمده از مدل تحلیلی و روش اجزاء محدود

پهنای گسیختگی جانبی (m)	فاصله گسیختگی جلو ابزار (m)	نیروی عمودی (kN)	نیروی عمودی گادوین (kN)	نیروی افقی (kN)	عمق (cm)	زاویه حمله			
FEM	FEM	FEM	FEM	FEM	20	20			
0/25	0/64	0/42	0/198	0/88	0/96	1/08	0/24	20	20
0/29	0/34	0/315	0/0135	0/3	0/31	1/35	0/84	15	
0/33	0/43	0/42	0/0108	0/63	0/55	1/91	1/4	20	45
0/37	0/53	0/525	0/0105	0/89	0/83	2/22	2/1	25	
0/4	0/36	0/29	0/017	0/98	1/62	3/65	3/72	20	90
0/48	0/31	0/27	0/0028	2/98	4	5/83	5	20	105

منابع

- مبانی نظریه خمیری در خاک. (1379). تالیف: امیرالدین صدر نژاد -تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- ABAQUS, Version 6.10-1. ABAQUS theory manual. Providence (RI,USA): ABAQUS, Inc.; 2010.
- Abo-Elnor, M., Hamilton, R. and Boyle, J.T., (2003), 3D Dynamic analysis of soil-tool interaction using the finite element method, *J. Terramech.* 40; 51-62.
- Abo-Elnor, M., Hamilton, R. and Boyle, J.T., (2004), Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis, *Soil and Tillage Res.*, 75: 61-73.
- Bolton, M.D., (1986), The strength and dilatancy of sands, *Geotechnique*, 36(1); 65-78.
- Chi, L. and Kushwaha, R.L., (1990), A non-linear 3-D finite element analysis soil failure with tillage tools, *J. Terramech.* 27; 343-366.
- Duncan, J.M. and Chang, C.Y., (1970), Nonlinear analysis of stress and strain in soils, *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, 96(5); 1629-1653.
- Davoudi, S., Alimardani, R., Keyhani, A. and Atarnejad, R., (2008), 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); 498-505.
- Godwin, R.J., Spoor, G. and Soomro, M.S., (1984), The effect of tine arrangement on soil forces and disturbance, *J. Agric. Eng. Res.*, 30; 47-56.
- Mouazen, A.M. and Nemenyi, M., (1999), Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil, *soil Till. Res.* 51; 1-15.
- Susila, E. and Hryciw, R.D., (2003), Large displacement FEM modeling of the cone penetration test (CPT) in normally consolidated soil, *Int J. Numer Anal Meth Geomech*, 27; 585-602.
- Uriel and Aparecido, R., (1977), Performance of narrow tillage tools with inertial and strain rate effects, PhD. dissertation, university of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan.