شبیه‌سازی برهم کنش خاک و تیغه‌های کولتیواتور در مقایسه با نتایج تجربی در انباره خاک

هوشنگ محبوب ینگجه[1]، عارف مردانی کرانی[2]

[1]دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه؛ (h.mahboub@urmia.ac.ir)
[2] دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه (a.mardani@urmia.ac.ir)

چکیده

نیروهای وارده بر روی ابزارهای خاک‌ورزی در طی عملیات کشاورزی به دلیل نوع بارگذاری و شکل هندسی مرکب ابزارها پیچیده هستند. که نوع، مقدار و جهت این نیروهای وارده به‌طور کامل شناخته‌شده نیستند. اصلاح و بهبود طرح یک ابزار برای استحکام مناسب و بهبود عملکرد کاری به اطلاعات کافی درباره نحوه نیروهای وارده به ابزار و رابطه خاک-ابزار نیاز دارد. روش تجربی و تحلیلی دیدگاه خوبی از توزیع تنش در تماس خاک و ابزار درگیر با خاک و همچنین تغییر شکل‌ها را ندارد. بر این اساس محققان از روش‌های چون المان محدود برای مقایسه داده‌ها و راستی آزمایی از آزمایش در جهت تکمیل آزمایش‌های خود با کمک نرم‌افزارهای المان محدود استفاده می‌کنند. در این تحقیق آزمایش‌ها به‌وسیله یک دستگاه خاک ورز پنجه غازی که دارای دوتیغه، که فاصله دوتیغه از همدیگر ۳۵ سانتیمتر با سه عمق مختلف ۶ ، ۱۰ و ۱۴ سانتیمتر در سویل‌بین انجام‌شده است. همچنین برای شبیه‌سازی آزمایش‌ها توسط سامانه طراحی‌شده از نرم‌افزار ABAQUS استفاده‌شده، که یک روش المان محدود به‌حساب می‌آید.

کلمات کلیدی: گاوآهن پنجه غازی، روش المان محدود(FEM) ، برهم کنش خاک- تیغه.

Simulation of soil interaction and cultivator blades compared to experimental results in soil bin

Houshang Mahboub Yangeje[1], Aref mardani Korani [2]

[1]PhD student of Mechanical Bio System Engineering, Urmia University, h.mahboub@urmia.ac.ir
[2]Aref mardani Korani, Department of Mechanical Bio System Engineering, Urmia University, a.mardani@urmia.ac.ir

ABSTRACT

The forces involved in tillage during agricultural operations are complex because of the type of loading and the combined geometry of the tool. The type, amount and direction of these forces are not fully understood. Correcting and improving the design of a tool for proper strength and performance improvement requires sufficient information about how the forces involved and the soil-tool relationship are. The experimental and analytical method does not have a good view of the distribution of stress in contact with the soil and the tools involved with the soil as well as the deformations. Accordingly, researchers use methods such as finite element to compare data and verify the test to complete their experiments with the help of finite element software. In this research, the experiments were carried out using a cultivator that has two axes, each with a spacing of 35 cm and three different depths of 6, 10 and 14 cm in soil bin. It is also used to simulate experiments using the ABAQUS software system, which is a finite element method.

Keywords: chisel plow, finite element method (FEM), soil- tine interaction.

۱- h.mahboub@urmia.ac.ir

۱- مقدمه

خاک یکی از منابع طبیعی است که ساختار و عملکرد بسیار متغیر را دارا می‌باشد. که به‌طور پویا خاک تحت بازسازی و یا تخریب قرار می‌گیرد (Várallyay et al., 2010). ازجمله تخریب‌های ایجادشده توسط روش‌های خاک ورز سنتی که کانال‌های و مجاری ساخته‌شده توسط موجودات داخلی خاک چشم‌گیر است. این امر با کاهش نفوذپذیری آب‌وهوا به عمق زیر ۱۵ سانتی‌متری خاک، منجر به کاهش فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک شده و تنفس ریشه گیاه را با مشکل مواجه می‌کند. که در این روش به دلیل زیر و رو کردن خاک سطحی زمینه برای فرسایش آبی، سله بستن، باد بردگی مستعد می‌شود. برای به حداقل رساندن این تخریب‌ها از روش‌های حفاظتی یا خاک‌ورزی مرسوم استفاده می‌شود. که در این خاک‌ورزی سه اصل مهم باید رعایت شود ازجمله: حداقل کردن خاک جابجا شده حین عملیات خاک‌ورزی، پوشش دائمی خاک با مواد ارگانیک و تناوب زراعی می‌باشد. جهت رسیدن به این پارامترها نیازمند بررسی رابطه خاک-ابزار درگیر با خاک است.

بنابراین، وظیفه اصلی خاک ورزها حفظ کیفیت مطلوب خاک، باروری، بازسازی، و همچنین جلوگیری از تأثیر تغییرات آب‌وهوا است. تعدادی از نویسندگان (Birka´s et al., 2009; Maca´k et al., 2010) تأیید می‌کنند، که اختلالات مکانیکی غیرمنطقی بر روی خاک می‌تواند منجر به از دست دادن مواد آلی خاک و ایجاد خسارتی ازجمله بدتر شدن ظرفیت باربری و کارایی خاک شود. آماده کردن زمین زراعی مستلزم برش خاک، برگرداندن و خرد کردن خاک می‌باشد. عملیات اولیه آماده کردن زمین زراعی توسط ادواتی مثل گاوآهن برگردان دار، گاوآهن بشقابی، گاوآهن چیزل و زیرشکن‌ها انجام می‌گیرد. به لحاظ مصرف انرژی، آماده‌سازی زمین زراعی همیشه برای محققان، طراحان، تولیدکنندگان و کشاورزان یک مسئله مهم بوده است. تهیه بستر بذر زمین زراعی در کشاورزی دقیق از اهمیت خاصی برخوردار است. عملیات خاک‌ورزی در حدود نیمی از انرژی مکانیکی مورداستفاده در تولید محصول را به خود اختصاص می‌دهند (Kushwaha et al., 1998). ازاین‌رو پیش‌بینی دقیق نیروهای عمل‌کننده روی تیغه خاک ورز و بهینه‌سازی طراحی ابزار خاک ورز به بهبود بازده انرژی کمک خواهد کرد.

مهم‌ترین قسمت ادوات خاک‌ورزی که با خاک درگیر بوده و کار برش و نرم‌سازی را انجام می‌دهد، تیغه ادوات است. پژوهشگران بر اساس فرم شکست خاک توسط تیغه‌های خاک‌ورزی آن‌های را به دو گروه تیغه‌های باریک و تیغه‌های پهن تقسیم کرده‌اند (Gowdin et al., 1977; Mckeys et al., 1985; Spoor et al., 1978). همچنین بر اساس تحقیقات به‌عمل‌آمده، خاک محیطی ناپیوسته است که مدل‌سازی عملیات برش و برگردان کردن آن با استفاده از روابط سنتی بسیار سخت و گاهی غیرواقعی می‌باشد. بررسی رابطه خاک-ابزار و اندازه‌گیری‌های در محل بسیار وقت‌گیر و پرهزینه هستند و تنها پس از انجام آزمایش‌ها ابزار موردنظر تولید می‌شود که در این حالت ارزیابی و روند مخلوط کردن خاک و پیش‌بینی نیرو با خاک ورزها تنها به‌صورت آزمایشی امکان‌پذیر بود. اما تنوع فضایی کنترل نشده در این زمینه، ابعاد دیگری را به پیچیدگی این روش اضافه می‌کند. همچنین روش‌های تحلیلی در مطالعه تعامل خاک-ابزار تنها برای پیش‌بینی نیروی ابزار استفاده می‌شود. بنابراین روش‌های عددی (Mouazen et al., 1999)، ازجمله روش المان محدود (FEM) و روش المان گسسته (DEM) نیز برای شبیه‌سازی تعامل بین خاک و ابزارهای خاک‌ورزی استفاده شد (Asaf et al., 2007). مطابق گزارش‌های این روش‌ها نه‌تنها قادر به محاسبه نیروی ابزار، بلکه شبیه‌سازی به هم خوردگی خاک را دارا است (Mouazen et al., 1999; Kushwaha et al., 1995; Spoor et al., 1978). قابلیت روش المان مجزا برای مدل‌سازی برهم‌کنش خاک- ابزار در یک فرآیند خاک‌ورزی با استفاده از شبیه‌سازی برهمکنش تیغه برشی پهن-خاک بررسی‌شده و چهار شکل متفاوت تیغه انتخاب گردید و همبستگی خوبی بین نتایج شبیه‌سازی المان مجزا و نتایج آزمایشگاهی برای منحنی شکست به دست آمد (Shmulevich et al., 2007).

هدف از این مطالعه، بررسی مقدار نیروی مال‌بندی موردنیاز گاوآهن چیزل و مقایسه با شبیه‌سازی رابطه بین خاک-گاوآهن چیزل با نرم‌افزار ABAQUS در سه عمق متفاوت می‌باشد. همچنین شبیه‌سازی مدلی از خاک که روی آن آزمایش انجام‌شده طبق شرایط مرزی و بارگذاری و خواص خاک در نرم‌افزار مورد ارزیابی قرار داده‌شده است.

۲- مواد و روش‌ها

داده‌های آزمایشی برای اعتبار سنجی مدل FEM: برای اعتبارسنجی مدل عددی، اندازه‌گیری داده‌های آزمایشگاهی که می‌تواند اطلاعات موردنیاز برای مقایسه را فراهم کند، مهم است. آزمایش‌ها آزمایشگاهی در کانال سویل‌بین دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه با نوع بافت خاک رسی لومی انجام شد. سویل‌بین یا انباره خاک محیط کنترل‌شده‌ای برای انجام یک چنین تحقیقاتی با شبیه‌سازی محیط واقعی خاک در اختیار محققان قرار می‌دهد. شرایط آماده‌سازی خاک برای تمامی آزمایش‌ها به‌صورت یکسانی انجام می‌گرفت، برای از بین بردن تمام لایه‌های سخت ایجادشده از یک چنگه که مخصوص عملیات آماده‌سازی داخل کانال است به شاسی سویل‌بین متصل شد استفاده گردید. طول دنده‌های چنگه به‌گونه‌ای می‌باشد که لایه بالایی خاک تا عمق تقریبی ۲۵ سانتی‌متر شخم می‌خورد و لایه‌های مرطوب و خشک خاک به‌خوبی باهم مخلوط می‌شود و سپس بعد از چنگه زنی خاک توسط ماله سطح خاک هموار گردید.

مشخصات خاک را در جدول (۱) توضیح داده‌شده است. همچنین برای دستیابی به هدف موردنظر تحقیق و انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه خاک ورز شامل دوتیغه پنجه غازی که هرکدام دارای عرض ۱۵ سانتیمتر و طول ۲۰ سانتیمتر استفاده‌شده است و همچنین مکانیسم مربوطه به نحوی طراحی‌شده که قابلیت تغییر عمق را دارا باشد. نمایی از گاوآهن پنجه غازی در شکل (۱) که بر بروی سویل‌بین سوار شده، همچنین مدل کامپیوتری به‌صورت سه‌بعدی نمایش داده‌شده است.

جدول ۱- خصوصیات مواد خاک اعمالی در تحلیل FEM.

Table 1 - Material Properties Applied soil in analysis FEM.

Properties	Unit	Value
Sand	(--)	%43
Silt	(--)	%22
Clay	(--)	%35
Young's Modulus	(MPa)	0.04
Poisson Ratio	(--)	32
Density	(kg/m3)	1900
yield stress	(MPa)	0.035
friction angle of the material(β0)	(--)	35
flow stress coefficient (K)	(--)	.8
dilatancy angle (ψ)	(--)	1

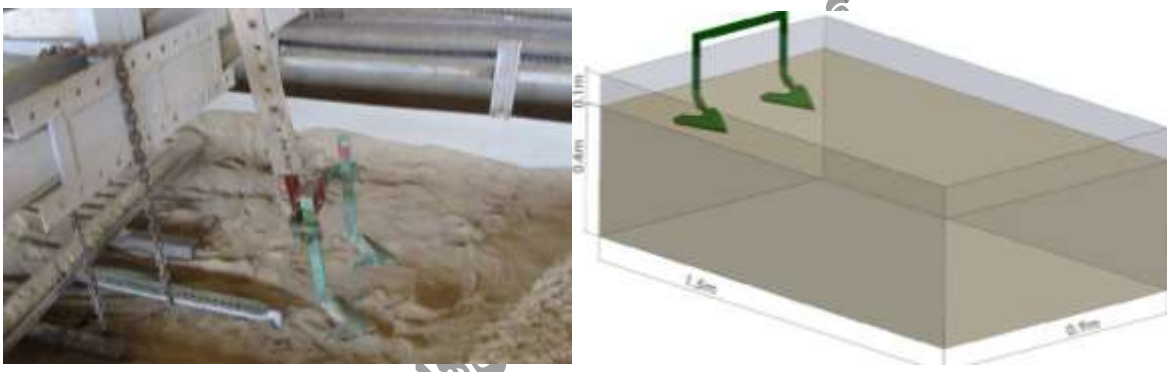

Figure 1. Figure and Solid 3D model chisel plow.

شکل ۱ - شکل و مدل جامد 3D گاوآهن پنجه غازی.

روش انجام آزمون: پس از مراحل آماده کردن مکانیسم گاوآهن پنجه غازی و بستر خاک به مرحله آزمایش‌ها جهت داده‌برداری پرداخته شد. آزمایش‌ها با استفاده از دو گاوآهن پنجه غازی بافاصله ۳۵ سانتیمتر با سه عمق مختلف ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتیمتر انجام‌شده است. هر آزمون سه بار تکرار گردید. داده‌برداری با استفاده از یک دیتالاگر ۱۰کاناله باقابلیت اتصال لودسل به انجام رسید. داده‌های سنجیده شده بر روی حافظه جانبی توسط دیتالاگر ثبت شد. سپس داده‌ها به محیط اکسل منتقل‌شده و میانگین مقادیر به‌دست‌آمده از نیرو برای کشش سه تکرار برای هر عمق در ماتریس داده‌ها جایگزین شد.

شبیه‌سازی آزمون در اباکوس: تغییر شکل خاک به‌طور عمده هنگامی‌که به بیشتر از تنش عملکرد برسد به جریان پلاستیکی منجر می‌شود. بنابراین، استفاده از معیار عملکرد مناسب برای تجزیه‌وتحلیل رفتار پلاستیک خاک بسیار مهم است. در این تحقیق، از مدل Drucker-Prager برای محاسبه تنش و رابطه خاک ابزار استفاده می‌شود. فرمول‌بندی و روش تحلیل مسئله و شبیه‌سازی عددی، با استفاده از بسته نرم‌افزار المان محدود ABAQUS و با تحلیل‌های دینامیکی انجام‌شده است. با استفاده از این بسته نرم‌افزار می‌توان تغییر شکل‌های بزرگ را با تحلیل Eulerian-Lagrangian مدل کرد. در فرمول‌بندی این تحقیق صفحه فشار دهنده لاگرانژی که به‌صورت صلب و تغییر شکل ناپذیر در نظر گرفته‌شده، خاک هم در ناحیه اویلرین تعریف‌شده است. شبیه‌سازی FEM از شرط تسلیم موهر-کلمب توسط شرط تسلیم دراکر-پراگر تقریب زده‌شده است و مدل‌های توسعه‌یافته دراکر-پراگر برای مدل کردن مواد اصطکاکی (مواد گرانوله مانند خاک) توسعه‌یافته‌اند. درنتیجه بر اساس مطالعات محققان و فرمول‌های پایه‌ای مدل دراکر-پرگر برای هر دو رفتار حجمی و برشی استفاده می‌شود (Mouazen et al., 2007).

مدل هندسی شامل قسمت‌هایی چون خاک و ناحیه اویلری با گاوآهن است که در نرم‌افزار SOLIDWORKS طراحی و اسمبل شد، و از آن خروجی (x.t) گرفته‌شده تا آنکه در نرم‌افزار اباکوس قابل باز شدن باشد. ابعاد خاک به‌اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته‌شده است تا تأثیری در نتایج نداشته باشد. در شکل(۱) ابعاد مدل 3D، ناحیه لاگرانژ و اویلری نشان داده‌شده است.

برای حل مسئله، اقدام به اعمال تعریف پارامترهای خاک و ابزار، برهمکنش بین مدل خاک-ابزار و قیدهای لازم ازجمله شرایط مرزی گردید. در مرحله بعد، مش بندی برای مدل شده انجام شد، که میزان درشتی و ریز بودن به قدرت سیستم بستگی دارد. ناحیه اویلرین که خاک مدل شده در آن تطبیق داده می‌شود با المان‌های مکعبی شکل ۸ گرهی استفاده‌شده است، و در شکل (۲) نمایی از مش بندی المان‌ها نشان داده‌شده است.

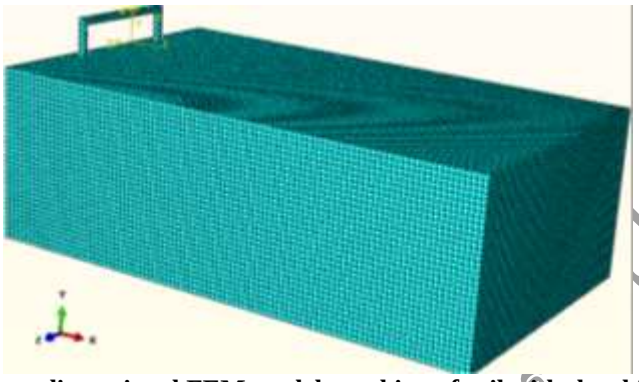

Figure 2. Three-dimensional FEM model, meshing of soil with the chisel plow.
شکل ۲- مدل سه‌بعدی FEM، مش‌بندی خاک با گاوآهن پنجه غازی.

مراحل پایانی که مرحله حل مسئله و پردازش است نرم‌افزار مسئله را طبق شرایط تعریف‌شده حل می‌کند و نمایش نتایج را به‌صورت کانتورهای رنگی و نمودارهایی که برای نتایج مسئله در نظر گرفته‌شده را نمایش می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

بررسی مدل شبیه‌سازی‌شده از آزمایش‌های تجربی: مدل‌سازی با استفاده از رایانه برای طراحی اشیاء یا سیستم‌هایی که ویژگی‌های مؤلفه‌ها و رفتار با دنیای واقعی را دارد، مدل می‌کند. نرم‌افزار طراحی کامپیوتری برای افزایش بهره‌وری طراح، بهبود کیفیت طراحی، بهبود ارتباطات از مستندات و ایجاد پایگاه داده برای تولید استفاده می‌شود. تا قبل از ظهور این نرم‌افزارها اصلاح طرح و شکل کار باری طراحان آسان نبود.

با استفاده از لودسل و دیتالاگر مقدار نیروهای سنجیده شد از مجموع ۹ آزمودن، ثبت گردید. با قرار گرفتن این داده‌ها در نرم‌افزار Excel نمودارها آزمایش‌ها رسم شد، میانگین مقادیر به‌دست‌آمده نیروهای ثبت‌شده در شکل (۴): (a) عمق ۶ سانتی‌متری، (d) عمق ۱۰ سانتی‌متری و (c) عمق ۱۵ سانتی‌متری نمایش داده‌شده است.

شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در تطابق با آزمون‌های آزمایشگاهی و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به انجام رسیده است. این شبیه‌سازی برای هر سه عمق به‌صورت مجزا و با اعمال پارامترهای خاک تکرار شده است. یکی از مهم‌ترین فاکتور در هنگام طراحی و ساخت ادوات خاک ورز: مقدار و چگونگی به هم خوردن خاک و مقدار نیروی کششی لازم برای کشش خاک ورز است. در اینجا خروجی‌های گرفته‌شده از این شبیه‌سازی در قالب نمای گرافیکی خاک تحت تأثیر رفتار تیغه در قالب توزیع تنش و مقدار نیروی لازم برای کشش خاک ورز در عمق‌های متفاوت استخراج‌شده است. شکل‌های (۳) کانتورهای تنش وارده در خاک و خاک تحت تأثیر حرکت تیغه به‌صورت برش خورده در نمای روبه‌رو نمایش داده است. همچنین در شکل (۴، ۵ و۶)، نتایج شبیه‌سازی نمودار نیروهای در سه راستای پیشرو (x)، عمودی (y) و جانبی (z) برای تیغه نشان داده‌شده است. در این نمودارها، نمودارهای مبتنی بر مقایسه داده‌های تجربی نیز برای هر عمق در تطابق با خروجی نرم‌افزار ارائه‌شده است. و در هر عمق، انطباق مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های واقعی دیده می‌شود که این همخوانی ازنظر کمی و هم ازنظر آهنگ چگونگی تغییرات، رضایت‌بخش دیده می‌شود.

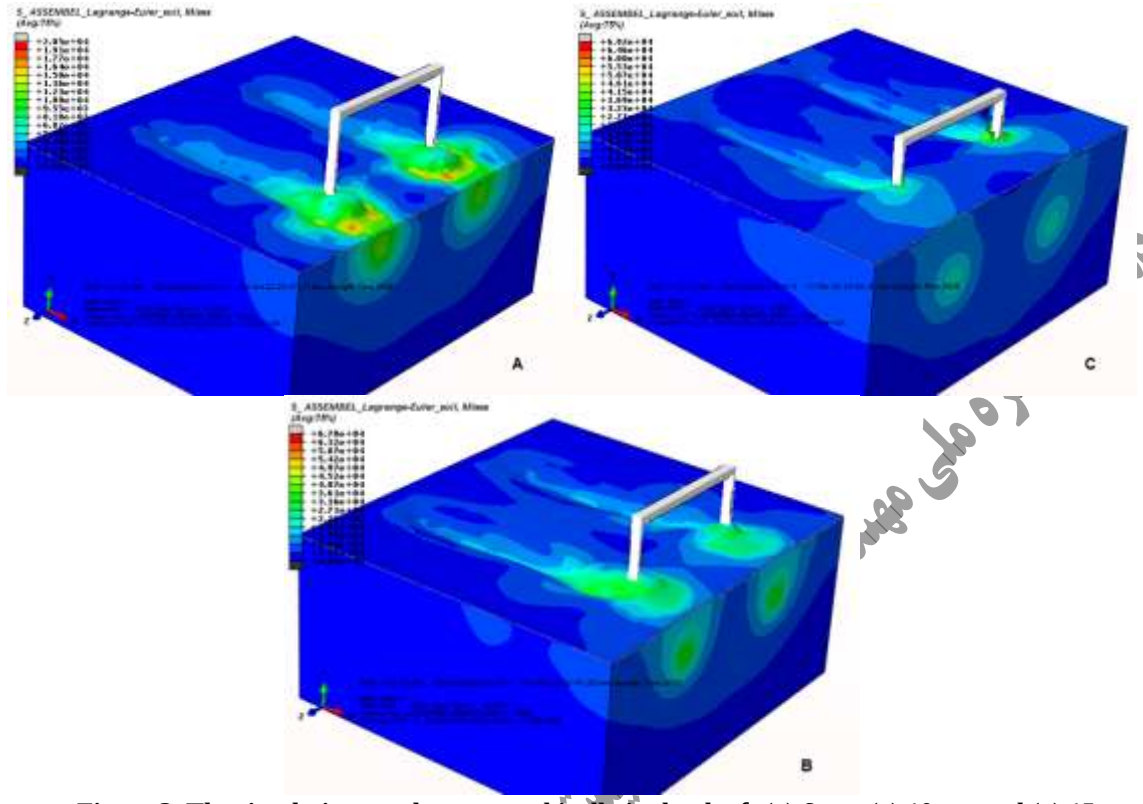

Figure 3. The simulation results are graphically in depth of: (a) 6 cm, (a) 10 cm and (a) 15 cm.

شکل ۲- نتایج شبیه‌سازی به‌صورت گرافیکی در عمق کاری: ۶ سانتی‌متر،۱۰ سانتی‌متر و ۱۵ سانتی‌متر.

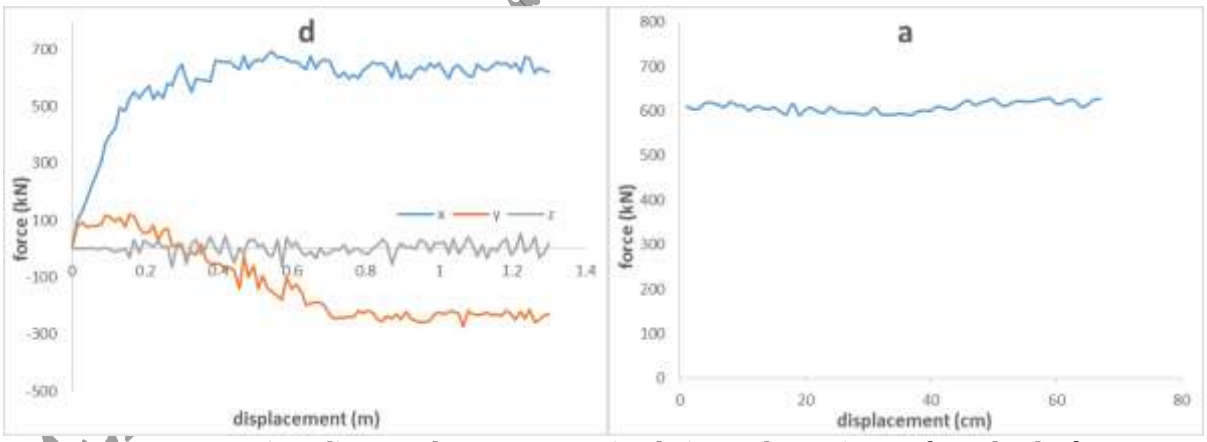

Figure 4. Comparison diagrams between DEM simulation and experiments for a depth of 6 cm.

شکل ۴- نمودار مقایسه بین نمودارهای مقایسه‌ای بین شبیه‌سازی DEM و آزمایش‌ها تجربی برای عمق کاری ۶ سانتی‌متر.

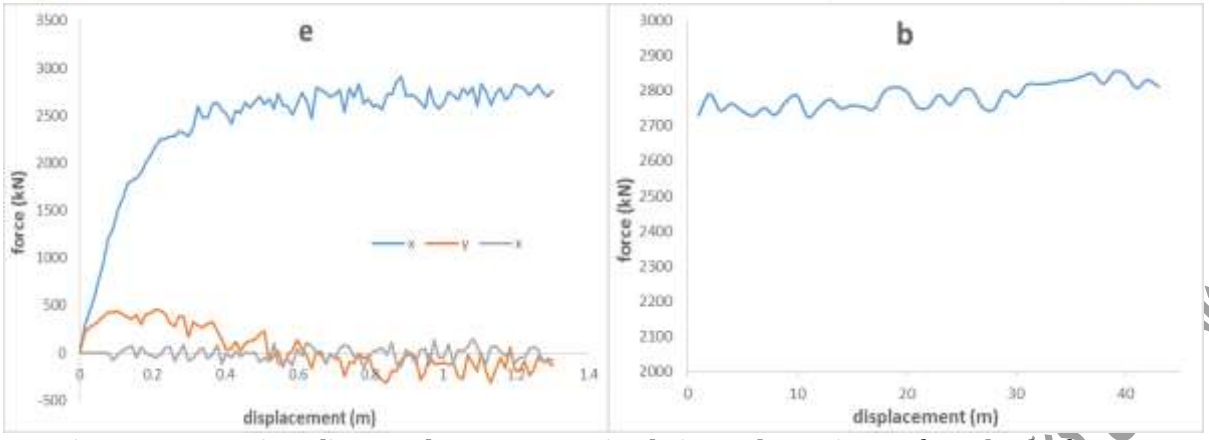

Figure 5. Comparison diagrams between DEM simulation and experiments for a depth of 10 cm.
شکل ۵- نمودار مقایسه بین نمودارهای مقایسه‌ای بین شبیه‌سازی DEM و آزمایش‌ها تجربی برای عمق کاری ۱۰سانتی‌متر.

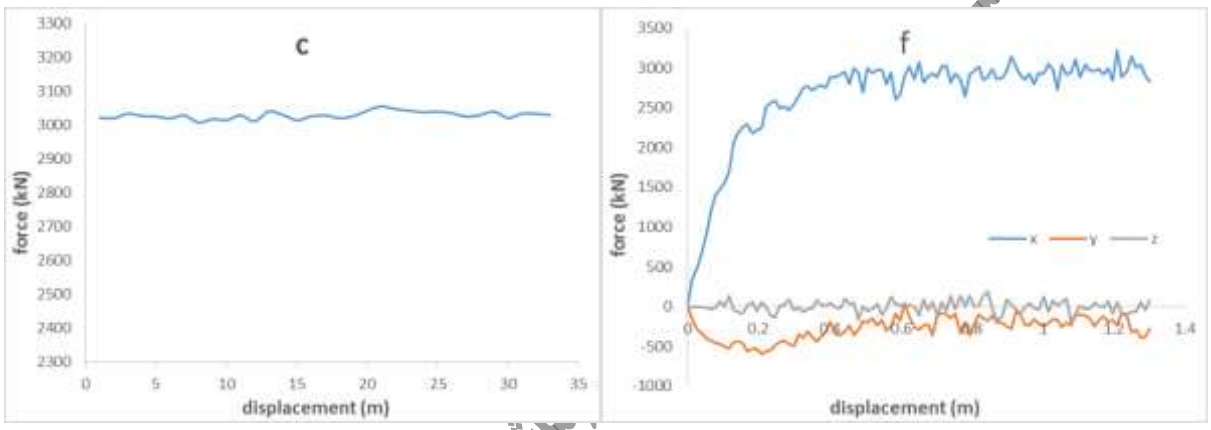

Figure 6. Comparison diagrams between DEM simulation and experiments for a depth of 15 cm
شکل ۶- نمودار مقایسه بین نمودارهای مقایسه‌ای بین شبیه‌سازی DEM و آزمایش‌ها تجربی برای عمق کاری ۱۵ سانتی‌متر.

۴- نتیجه‌گیری

داده‌ها خروجی شامل مقادیر نیروی اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی در راستای پیشروی تیغه، داده‌های حاصل از شبیه‌سازی المان محدود شامل مقادیر پیش‌بینی‌شده نیروی پیشرو، جانبی و عمودی در سرعت ۲٫۵ کیلومتر بر ساعت در سه عمق متفاوت ۶، ۱۰ و ۱۵ سانتی است. نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل المان محدود شامل نمودار نیروهای واکنش وارده بر تیغه در تکیه‌گاه شاسی و همچنین نتایج بصری به‌صورت گرافیکی که ناحیه تحت تأثیر حرکت تیغه قرار می‌گردد، است. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی تحلیل روش عددی FEM به‌صورت اویلر-لاگرانژی و تجربی، تطابق نسبتاً خوبی ازلحاظ پیش‌بینی نیروی از نیروهای واکنش لازم برای خاک ورز پنجه غازی نشان داد.

۵- مراجع

1- Várallyay, G. (2010). The role of soil resilience in sustainable development. Növénytermelés, 59(Supplement), 173-176.
2- Birkás, M. (2009). Classic cultivation requirements and the need of reducing climatic damage. Növénytermelés, 58(2), 123-134.
3- Smatana, J., Macák, M., & Demjanová, E. (2010). The influence of different tillage practices on soil physical characteristics. Research journal of agricultural science, 42(3), 315-319.
4- 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.

5- Godwin, R. J., & Spoor, G. (1977). Soil failure with narrow tines. Journal of Agricultural Engineering Research, 22(3), 213-228.
6- McKyes, E. (Ed.). (1985). Soil cutting and tillage (Vol. 7). Elsevier.
7- Spoor, G., & Godwin, R. J. (1978). An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. Journal of Agricultural Engineering Research, 23(3), 243-258.
8- Mouazen, A. M., & Neményi, M. (1999). Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil. Soil and Tillage Research, 51(1-2), 1-15.
9- Asaf, Z., Rubinstein, D., & Shmulevich, I. (2007). Determination of discrete element model parameters required for soil tillage. Soil and Tillage Research, 92(1-2), 227-242.
10- Kushwaha, R. L., & Shen, J. (1995). Finite element analysis of the dynamic interaction between soil and tillage tool. Transactions of the ASAE, 38(5), 1315-1319.
11- Shmulevich, I., Asaf, Z., & Rubinstein, D. (2007). Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method. Soil and Tillage Research, 97(1), 37-50.
12- Mouazen, A. M., & Neményi, M. (1999). Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil. Soil and Tillage Research, 51(1-2), 1-15

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران