# مدل‌سازی نیروهای وارد بر تیغه قلمی کامپوزیتی در انباره خاک به کمک روش اجزا محدود

محمد رحمتیان [۱]، سید حسین کارپرورفرد [۲*]، محمد امین نعمت اللهی [۳]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز (m.rahmatian@shirazu.ac.ir)
۲- دانشیار بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز (karparvr@shirazu.ac.ir)
۳- استادیار بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز (manema@shirazu.ac.ir)

## چکیده

عملیات خاک‌ورزی مهم‌ترین مرحله در تولید محصولات کشاورزی و تهیه زمین است که توان و انرژی زیادی را مصرف می‌کند. به همین خاطر، نیروهای وارد بر هر نوع گاوآهنی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. در این تحقیق، تیغه قلمی از جنس کامپوزیت FRP برای استفاده در گاوآهن قلمی در نظر گرفته شد. متغیرهای این پژوهش سرعت پیشروی (۳، ۵ و ۷ کیلومتر بر ساعت)، زاویه حمله (۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه) و عمق خاک‌ورزی (۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد. متغیرهای اندازه‌گیری شده در این پژوهش نیروهای وارد بر تیغه قلمی کامپوزیتی شامل نیروی مقاومت کششی و نیروی عمودی بود. این پژوهش در انباره خاک انجام گردید و سپس نتایج آن با نتایجی که از شبیه‌سازی آزمایش‌ها در انباره خاک به کمک روش اجزا محدود به دست آمد، مقایسه و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. بر این اساس، مقادیر خطای بین داده‌های پیش‌بینی و آزمایش در انباره خاک از ۲/۲ تا ۱۰/۱ درصد برای مقاومت کششی و از ۱/۲ تا ۷/۹ درصد برای نیروی عمودی به دست آمد. با این تفاسیر می‌توان گفت که روش اجزاء محدود به‌خوبی نیروهای وارد بر تیغه قلمی کامپوزیتی نظیر نیروی مقاومت کششی و نیروی عمودی را پیش‌بینی نموده است.

**کلمات کلیدی:** *انباره خاک، تیغه کامپوزیتی، روش اجزا محدود، زاویه حمله، سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی.*

*نویسنده مسئول: karparvr@shirazu.ac.ir

# مدل‌سازی نیروهای وارد بر تیغه قلمی کامپوزیتی در انباره خاک به کمک روش اجزا محدود

**مقدمه**

طراحی مؤثر ادوات برش خاک، با تحلیل شکست خاک، محاسبه میزان نیرو و انرژی مورد نیاز برای این ادوات آغاز می‌شود. هر چند که کشاورز در انتخاب هر یک از ادوات آزاد است، اما همواره سعی دارد تا انرژی مصرفی مورد نیاز هر یک از آن‌ها را شناخته و مطابق با شرایط کشت خود، ادوات مناسب را انتخاب کند.

در هنگام انجام عملیات خاک‌ورزی عواملی هستند که می‌توان به‌عنوان عوامل مهم و مؤثر در راندمان آن عملیات موردبررسی قرارداد. این عوامل عبارت از نیروهای وارد بر ابزار از طرف خاک، نیروی کششی وسیله خاک‌ورز، سطح مقطع به هم خوردگی خاک، سطح مقطع بالاآمده خاک، میزان نفوذپذیری مقدار آب در خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک شخم‌خورده، شاخص مخروطی خاک، قطر متوسط وزنی کلوخه‌ای، مقاومت ویژه‌ی خاک‌ورز و میزان مصرف سوخت می‌باشند [۱]. در بین این عوامل، نیروهای وارد بر ابزار خاک‌ورز، به دلیل تأثیرگذاری زیاد بر دیگر عوامل و همچنین فاکتوری برای تعیین هزینه‌های عملیات خاک‌ورزی، از مهم‌ترین عوامل مورد بررسی می‌باشد.

متغیرهای زیادی ازجمله سرعت پیشروی، زاویه حمله‌ی تیغه، عمق خاک‌ورزی، رطوبت خاک، طول و عرض تیغه مورداستفاده، تعداد تیغه‌های مورداستفاده و غیره بر روی نیروهای وارد بر گاوآهن تأثیرگذار می‌باشد [۱ و ۳]. پژوهشگران زیادی نیروهای وارد بر گاوآهن‌های مختلف را با بهره‌گیری از متغیرهای گوناگون مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند.

السوهیبانی و قالی [۳]، تأثیر سرعت پیشروی و عمق کار را بر مقاومت کششی و نیروی عمودی ابزار قلمی موردبررسی و ارزیابی قراردادند. نتایج نشان داد که با افزایش عمق کار و یا سرعت پیشروی، مقاومت کششی و نیروی عمودی افزایش یافت.

منووا [۵]، نشان داد که عرض به هم خوردگی خاک در اثر عبور خاک‌ورز قلمی، با افزایش عرض و عمق کار و همچنین سرعت پیشروی، افزایش یافت که این خود باعث ازایش نیروی مقاومت کششی می‌گردد.

برخی از دیگر از پژوهشگران نیز از روش‌های ریاضی مختلفی همچون آنالیز ابعادی [۱]، اجزا محدود [۵]، شبکه عصبی مصنوعی [۲] و غیره برای پیش‌بینی نیروهای وارد بر ابزارهای خاک‌ورزی مختلف استفاده کرده‌اند.

حسینی و کارپرورفرد [۱]، با استفاده از روش آنالیز ابعادی و با به‌کارگیری متغیرهایی همچون سرعت پیشروی، زاویه حمله و نسبت عمق به عرض تیغه، نیروهای وارد بر گاوآهن قلمی را در انباره خاک مدل‌سازی کردند.

ابراهیمی و همکاران [۴]، اثر هندسه ابزار و شرایط عملیاتی بر نیروهای وارد بر گاوآهن برگردان‌دار با استفاده از روش اجزا محدود را بررسی کردند و بیان داشتند که با افزایش عمق کار و سرعت پیشروی، مقاومت کششی و نیروی عمودی گاوآهن برگرداندار افزایش یافت.

رحمتیان و همکاران [۲]، با استفاده از دو روش عددی شامل سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی، نیروهای وارد بر گاوآهن برگردان‌دار را مدل‌سازی نمودند و بیان داشتند که روش شبکه عصبی مصنوعی عملکرد بهتری نسبت به روش سطح پاسخ از خود نشان داده است.

در این پژوهش برای ارزیابی تیغه جدید از جنس کامپوزیت به کار گرفته‌شده در گاوآهن قلمی از نقطه نظر نیروهای وارد بر آن، از متغیرهای سرعت پیشروی، زاویه حمله و عمق خاک‌ورزی در انباره خاک استفاده می‌شود. همچنین به‌منظور پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن قلمی با تیغه کامپوزیتی از روش اجزا محدود استفاده گردید.

**مواد و روش‌ها**

هدف از این آزمایش بررسی آزمایشگاهی اثرات عمق خاک‌ورزی، زاویه حمله و سرعت پیشروی بر نیروی‌های کششی و عمودی وارد بر تیغه کامپوزیتی می‌باشد .این آزمایش‌ها در سه سطح عمق خاک‌ورزی (۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر)، سه سطح زاویه حمله (۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه) و سه سطح سرعت پیشروی (۳، ۵ و ۷ کیلومتر در ساعت) و در سه تکرار انجام پذیرفت. آزمایش‌ها در این پژوهش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام گرفت.

تیغه مورداستفاده در این پژوهش از جنس کامپوزیت FRP[1] بوده و از لوله‌های کامپوزیت ساخته‌شده توسط شرکت فراسان استان فارس، برش و به شکل تیغه معمول درآورده شد (شکل ۱). در زیر تیغه‌ی کامپوزیت، به‌منظور تسهیل و تقویت در امر برش، از یک ورق فولادی به ضخامت ۸ میلی‌متر که به‌عنوان تکیه‌گاه تیغه بود، استفاده گردید (شکل ۱). مصالح FRP مقاومت کششی بسیار بالایی نسبت به مقاومت کششی فولاد دارند. مقاومت کششی مصالح FRP اساساً به مقاومت کششی آن‌ها، نسبت حجمی، اندازه و سطح مقطع فایبرهای FRP بکار رفته در آن‌ها بستگی دارد. وزن مخصوص کامپوزیت FRP به‌مراتب کمتر از وزن مخصوص فولاد است.

**شکل ۱- تیغه‌ی کامپوزیت و تکیه‌گاه آن**

این پژوهش در انباره خاک مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی واقع در کرج انجام گرفت (شکل ۲). انباره خاک مورداستفاده از نوع انباره‌های مستقر در زمین بوده و مخزن خاک آن دارای ابعاد طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۲۴، ۱/۷ و ۱ متر بود. بافت خاک موجود در انباره خاک لومی رسی بود. در این تحقیق مخزن خاک به ۶ قسمت مساوی هم از جهت طول و هم از جهت عرض تقسیم و آزمایش‌های مدنظر در جهت طولی و در امتداد هم انجام می‌گرفت. با هر بار آماده سازی خاک، ۱۱ متر طول و ۱/۶ متر از عرض مخزن خاک آماده برای انجام آزمایش می‌شد. در هر بار آزمایش، یک عمق و یک زاویه‌ی حمله در نظر گرفته‌شده و سه سطح سرعت در کنار هم در مخزن خاک مورد آزمایش قرار می‌گرفت. بعد از انجام آزمایش‌ها داده‌های به‌دست‌آمده توسط دیتالاگر ذخیره‌شده و سپس به کامپیوتر برای تحلیل داده‌ها انتقال داده شد.

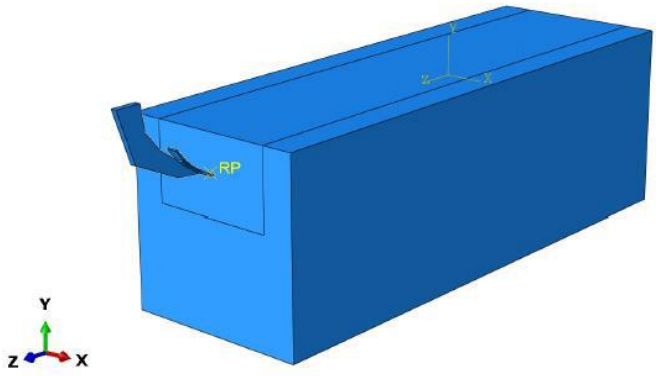
1- Fiber Resistance Polymer (FRP)

**شکل ۲- نمایی از گاوآهن قلمی متصل به دستگاه در انباره خاک**

به‌منظور پیش‌بینی نیروهای وارد بر تیغه کامپوزیتی در انباره خاک، از روش ریاضی اجزاء محدود استفاده گردید. برای شبیه‌سازی ابزار خاک‌ورز، ابزار با ابعاد واقعی در نرم‌افزار SolidWorks 2015 شبیه‌سازی شد و به نرم‌افزار Abaqus CAE 2016 به‌منظور به‌کارگیری روش اجزاء محدود برای شبیه‌سازی عملیات خاک‌ورزی منتقل گردید (شکل ۳). برای کاهش حجم محاسبات به ابزار خاک‌ورز قید صلب داده شد و نوک تیغه خاک‌ورز نیز به‌عنوان نقطه مرجع انتخاب گردید. در تعریف مواد ابزار، از خواص فولاد و کامپوزیت FRP استفاده شد (جدول ۱).

**جدول ۱- خصوصیات مکانیکی ساقه و تیغه‌ی ابزار خاک‌ورز**

| جنس ماده | مدول کشسانی (MPa) | ضریب پواسون | چگالی ظاهری کل ($kg.m^{-3}$) |
|---|---|---|---|
| فولاد | $۲ \times ۱۰^{۵}$ | ۰/۳۰ | ۸۷۵۰ |
| کامپوزیت FRP | $۲/۳ \times ۱۰^{۵}$ | ۰/۳۵ | |




**شکل ۳- مدل سه‌بعدی ابزار خاک‌ورز و خاک شبیه‌سازی‌شده در نرم افزار Abaqus**

خاک با مدل کشسان-خمیری دراکر-پراگر با معیار برش خطی و قانون جریان همراه تعریف شد. پارامترهای مورد نیاز برای این مدل در جدول (۲) نشان داده‌شده است. این پارامترها از آزمون‌های تک‌محوری، سه محوری و برش مستقیم به دست آمد. جهت جلوگیری از انباشته شدن المان‌ها در جلوی ابزار و پیغام خطا از نرم‌افزار، از آسیب برشی[۲] در تعریف خصوصیات خاک استفاده گردید.

برای شبکه‌بندی خاک از یک المان سه‌بعدی پیوسته مکعبی که با هشت گره در گوشه‌ها می‌باشد، استفاده گردید. در بخش‌هایی از خاک که با توجه به نتایج تجربی پیش‌بینی می‌شد در اثر تماس با ابزار خاک‌ورز در معرض گسیختگی قرار دارند شبکه‌بندی ریزتر انجام شد. از حل گر دینامیکی[۳] با زمان ۳/۵ ثانیه استفاده شد. اصطکاک بین خاک و ساقه ابزار خاک‌ورز با رفتار مماسی و نوع تماس عمومی با ضریب اصطکاک ۰/۳۸ و بین خاک و تیغه کامپوزیت ۰/۳۳ تعریف شد. سپس در انتها، بعد از انجام تمام مراحل مد نظر، نرم افزار در حال اجرا قرار گرفت و پس از حل مسئله، نتایج برای تحلیل و بررسی، ذخیره گردید.

**جدول ۲- پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی خاک**

| جنس خاک | مدول کشسانی (MPa) | تنش پیش تراکمی (MPa) | ضریب پواسون | چگالی ظاهری ($kg.m^3$) | زاویه اصطکاک داخلی (°) | ضریب چسبندگی (kPa) | دراکر-پراگر (°) | نسبت تنش جریان | زاویه اتساع (°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| لومی رسی | ۸/۱۰ | ۰/۰۷ | ۰/۳۶ | ۱۴۵۰ | ۸/۱۱ | ۶۳/۰۴ | ۱۶/۵۰ | ۰/۹۱ | ۱۶/۵۰ |

## نتایج و بحث

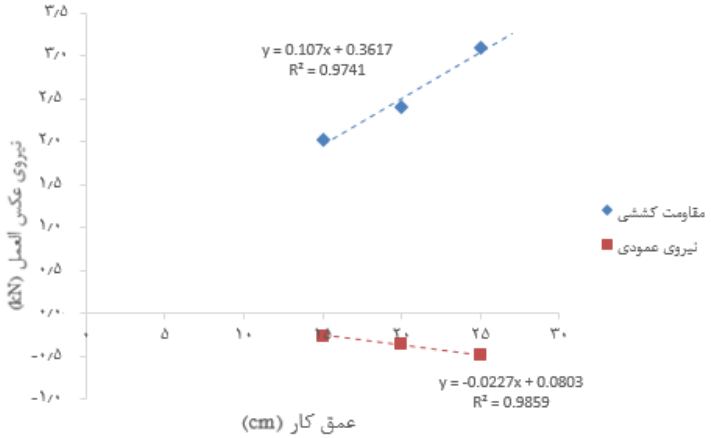
ارزیابی کلی شبیه سازی به روش اجزا محدود با مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی و داده‌های بدست آمده از آزمایش در انباره خاک در مقاومت کششی و نیروی عمودی خاک‌ورز قلمی با تیغه کامپوزیتی انجام شد. مقادیر خطای بین داده‌های پیش بینی و آزمایش در انباره خاک از ۲/۲ تا ۱۰/۱ درصد برای مقاومت کششی و از ۱/۲ تا ۷/۹ درصد برای نیروی عمودی بدست آمد. در روش اجزاء محدود بخاطر افزایش عمق بحرانی نسبت به سطح خاک و کاهش فشار خاک دست نخورده بر روی تیغه‌ی خاک‌ورز، هر دو مقاومت کششی و عمودی نسبت به نتایج تجربی در انباره خاک کمتر شده است. نتایج نشان داد که مدل استفاده شده توانست با خطای کمی داده‌های تجربی را پیش بینی کند.

در نتایج بدست آمده از شبیه سازی با نرم افزار Abaqus با افزایش عمق خاک‌ورزی، نیروی مقاومت کششی و نیروی عمودی نیز افزایش داشتند (شکل ۴). دلیل این امر، افزایش حجم خاک در جلو و بالای تیغه می‌باشد که برای ایجاد گسیختگی و جابجایی در آن نیاز به نیروی افقی و عمودی زیادی می‌باشد[۱ و ۲ و ۳].

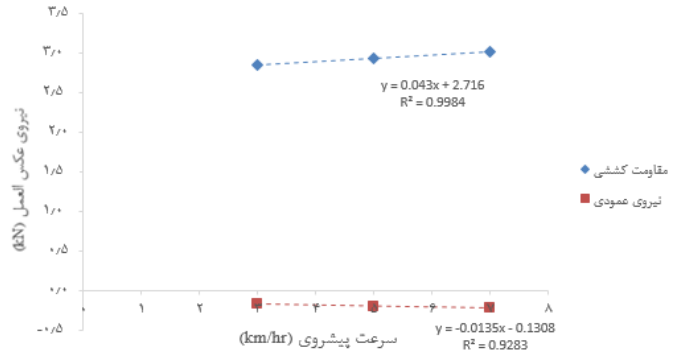
از نظر سرعت، با افزایش سرعت پیشروی نیز، میزان نیروی مقاومت کششی و نیروی عمودی افزایش یافتند (شکل ۵). زیرا با افزایش سرعت تیغه در خاک شتاب بیشتری به خاک وارد شده به همین دلیل ذرات خاک مقاومت بیشتری در مقابل این نیروی وارد بر خود نشان می‌دهند که باعث افزایش نیروهای کششی و عمودی می‌گردد [۱ و ۲ و ۳].

همچنین با افزایش زاویه حمله، میزان نیروی مقاومت کششی و نیروی عمودی به ترتیب افزایش و کاهش یافتند (شکل ۶). به هنگام افزایش زاویه حمله، سطح تصویر تماس تیغه با خاک افزایش یافته و خاک بیشتری در معرض جابجایی قرار می‌گیرید به همین دلیل نیروی بیشتری برای این امر نیاز است که باعث افزایش نیروهای کششی و عمودی وارد بر تیغه می‌گردد [۱]. تمام نتایج بدست آمده از شبیه سازی، با نتایج بدست آمده از انباره‌ی خاک همخوانی داشت.

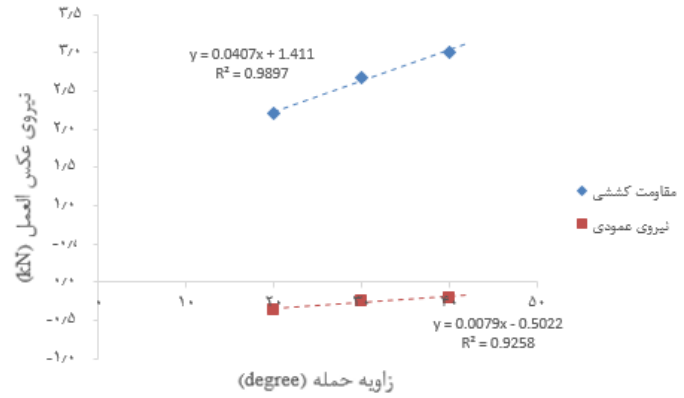
2- Shear damage
3- Dynamic Explicit




**شکل ۴- اثر عمق خاک‌ورزی بر نیروی مقاومت کششی و نیروی عمودی محاسبه شده با روش اجزاء محدود برای خاک‌ورز با تیغه کامپوزیت در زاویه حمله ۳۰ درجه و سرعت پیشروی ۵ کیلومتر بر ساعت**




**شکل ۵- اثر سرعت پیشروی بر نیروی مقاومت کششی و نیروی عمودی محاسبه شده با روش اجزاء محدود برای خاک‌ورز با تیغه کامپوزیت در عمق ۲۵ سانتی‌متر و زاویه حمله ۳۰ درجه**




**شکل ۶- اثر زاویه حمله تیغه بر نیروی مقاومت کششی و نیروی عمودی محاسبه شده با روش اجزاء محدود برای خاک‌ورز با تیغه کامپوزیت در عمق ۲۵ سانتی‌متر و سرعت پیشروی ۵ کیلومتر بر ساعت**

## نتیجه‌گیری

با توجه به مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از آزمایش در انباره خاک و روش اجزاء محدود می‌توان نتیجه گرفت که روش اجزاء محدود به خوبی توانسته نیروهای وارد بر تیغه کامپوزیتی را با درصد خطای کمی پیش بینی کند. به همین دلیل، پیشنهاد می‌گردد که از این روش برای پیش بینی نیروهای وارد بر تیغه سایر گاوآهن‌ها و همچنین پیش بینی دیگر عوامل مورد نظر در امر خاک‌ورزی نظیر شاخص مخروطی و غیره مورد بررسی قرار گیرد.

## منابع


۱. حسینی، و. و کارپرورفرد، س. ح. ۱۳۹۱. یش بینی نیروهای وارد بر تیغه خاک‌ورز قلمی به روش تحلیل ابعادی. مجله مهندسی بیوسیستم ایران، ۴۳(۱): ۹۳-۱۰۳.

۲. رحمتیان، م.، یگانه، ر.، نعمت اللهی، م. ا. ۱۳۹۸. مدل سازی و پیش بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار با استفاده از دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی. مجله ماشین‌های کشاورزی، (پذیرش شده).

3. Al-Suhaibani, S., and Ghaly, A. E. 2010. Effect of plowing depth of tillage and forward speed on the performance of a medium size chisel plow operating in a sandy soil. American Journal of Agricultural and Biological Science, 30: 122-130.
4. Ibrahmi, A., Bentaher, H., Hbaieb, M., Maalej, A., and Mouazen, A. 2015. Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 1. Finite element simulation. Computers and Electronics in Agriculture, 117: 258-267.
5. Manuwa, S. 2009. Performance evaluation of tillage tines operating under different depths in a sandy clay loam soil. Soil and Tillage Research, 103(2): 399-405.

# Modeling of forces on the composite chisel blade in the soil bin by using finite element method

M. Rahmatian, S. H. Karparvarfard*, M. A. Nematollahi

Department of Biosystems Engineering, Collogue of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.

## Abstract

Tillage operations are the most important stage in crop production, which consumes a lot of power and energy. For this reason, forces on any type of plow are of high importance. In this study, the FRP composite chisel blade was considered for use in chisel plow. The variables of this study were forward speeds (3, 5 and 7 $km.h^{-1}$), rake angles (20, 30 and 40 degrees) and tillage depths (15, 20 and 25 cm). The treatments in this study were considered forces on the composite chisel blade included draft force and vertical force. This research was done in the soil bin and then its results were compared with the results obtained from simulation experiments in soil bin by using the finite element method. Accordingly, the error values between the predicted data and the experimental data in the soil bin from 2.2 to 10.1% for the draft force and from 1.2 to 7.9% for vertical force. With these explanations, it can be said that the finite element method predicts well the forces on the composite blade such as the draft force and the vertical force.

**Key words**: composite blade, finite element method, forward speed, rake angle, soil bin, tillage depth.

*Corresponding author
E-mail: karparvr@shirazu.ac.ir