

پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی و انرژی مورد نیاز عملیات زیرشکنی با استفاده از رویکرد منطق فازی

یوسف عباسپور گیلانده^{۱*} - رضا صدقی^۲

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۰/۵

چکیده

در این تحقیق از سیستم مبتنی بر دانش یا قواعد داده‌های آزمایشی و با استفاده از منطق فازی به منظور پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی و انرژی مورد نیاز عملیات خاک‌ورزی استفاده شده است. در مقایسه با روش‌های سنتی (رگرسیون)، منطق فازی در ایجاد ارتباط بین ورودی‌های چندگانه به یک سیگنال خروجی در دامنه غیرخطی بسیار مؤثرتر عمل می‌کند. آزمایش‌ها به منظور جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز در خاک با بافت شنی لومی در مرکز تحقیقات و ترویج دانشگاه کلمسون در نزدیکی شهر بلک ویل ایالت کارولینای جنوبی آمریکا (۲۱° ۳۳' شمالی و ۸۱° ۱۸' غربی) انجام شد. در این مقاله، از یک مدل هوشمند، بر اساس رویکرد اصول مدل فازی ممدانی استفاده شد. این مدل فازی شامل ۲۵ قانون می‌باشد. در این تحقیق، استنتاج ماکسیمم - مینیمم ممدانی برای استنتاج مکانیزم (ترکیب قواعد با ورودی فازی) و روش غیر فازی ساز مرکز ثقل برای غیر فازی سازی (تبدیل خروجی نهایی سیستم به یک عدد کلاسیک) مورد استفاده قرار گرفت. اعتبار مدل ارائه شده از طریق معیار خطای عددی مبتنی بر داده‌های تجربی به دست آمد. نتایج پیش‌بینی با استفاده از مدل فازی مقادیر بسیار نزدیکی را بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده نشان داد. به طوری که میانگین خطای نسبی مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل فازی ۳/۱٪ برای نیروی مقاوم کششی و ۲/۹۴٪ برای انرژی مورد نیاز عملیات زیرشکنی به دست آمد. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل فازی و مدل رگرسیونی به منظور پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی و انرژی مورد نیاز عملیات زیرشکنی نشان داد میانگین خطاهای نسبی در مدل‌های رگرسیونی بزرگتر از مدل پیش‌بینی فازی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: استنتاج ممدانی، انرژی خاک‌ورزی، رویکرد منطق فازی، عملیات زیر شکنی، نیروی مقاوم کششی

مقدمه

انرژی بسیار بالایی به منظور از بین بردن لایه فشرده شده خاک یا سخت لایه خاک، مورد نیاز می‌باشد که از بین بردن این لایه به گسترش ریشه و همچنین تحمل به خشکی گیاه بسیار کمک خواهد کرد. نیروی مقاوم کششی ادوات خاک‌ورزی یکی از مهم‌ترین نیروهایی است که برای اندازه‌گیری و ارزیابی انرژی لازم ادوات مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج بسیاری از تحقیقات نشان می‌دهد که اثرات خصوصیات فیزیکی خاک بر روی نیروی مقاوم کششی ادوات خاک‌ورزی و انرژی مورد نیاز، مسئله‌ای کاملاً اثبات شده می‌باشد. خصوصیات و پارامترهای خاک که بر نیروی مقاوم کششی و انرژی

مصرفی ادوات خاک‌ورزی تأثیرگذار می‌باشد عبارتند از: محتوی رطوبتی خاک، جرم مخصوص ظاهری، شاخص مخروطی و بافت خاک، که اثرات این پارامترهای مؤثر در نیروی مقاوم کششی توسط بسیاری از محققان بررسی شده است (Gill and Vanden Berg, 1968; Upadhyaya *et al.*, 1987; Upadhyaya *et al.*, 1994; Adamchuk *et al.*, 2001; Abbaspour-Gilandeh *et al.*, 2006).

در حال حاضر، روش‌های مختلف در نرم افزارهای محاسباتی مبتنی بر آمار، ماشین یادگیری^۳، شبکه عصبی^۴ و فازی^۵ برای تحلیل داده‌های تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ross, 1995). با توجه به محدودیت‌های روش‌های تحلیلی و رگرسیونی در کاربردهای پیش‌بینی، استفاده از داده‌های پارامترهای مختلف خاک و سرعت حرکت به منظور پیش‌بینی انرژی مورد نیاز وسیله خاک‌ورزی،

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار و دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

(Email: abbaspour@uma.ac.ir)

(*- نویسنده مسئول)

3- Machine learning
4- Neural network
5- Fuzzy

نمی‌توانند به خوبی عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها را در نظر بگیرند.

هدف اصلی از این تحقیق توسعه مدل پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی و انرژی مورد نیاز عملیات زیرشکنی با استفاده از مدل فازی بر اساس رویکرد ممدانی می‌باشد. پارامترهایی که برای پیش‌بینی انرژی مورد نیاز خاک‌ورزی و نیروی کششی مورد استفاده قرار می‌گیرد شامل سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی خواهد بود که در مطالعات مختلف اثرات این پارامترها روی انرژی خاک‌ورزی و نیروی مقاوم کششی مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

۱- ادوات مورد استفاده در انجام تحقیق

از یک دستگاه فروسنج مجهز به سیستم مکان‌یاب جهانی تفاضلی (DGPS) که روی یک تراکتور شش چرخ نصب شده بود، به منظور اندازه‌گیری مقاومت به نفوذ خاک استفاده گردید (Khalilian *et al.*, 2002). مقادیر شاخص مخروطی بر اساس نیروی اندازه‌گیری شده برای فشار دادن یک مخروط با سطح مقطع 130mm^2 و زاویه نوک 30° درجه به داخل خاک مطابق با استاندارد ASAE محاسبه شد (ASAE, 2004).

از یک تراکتور جاندر کمک جلو با توان مشخصه 105 اسب بخار و مجهز به ابزار اندازه‌گیر به منظور جمع‌آوری داده‌های مربوط به نیروی کششی و انرژی خاک‌ورزی در جریان انجام عملیات خاک‌ورزی استفاده گردید. سیستم ابزار اندازه‌گیری تراکتور مجهز به دینامومتر اتصال سه نقطه، سوخت سنج، حسگر اندازه‌گیری دور موتور (RPM)، حسگرهای مختلف اندازه‌گیری سرعت (سیستم رادار، چرخ پنجم و حسگر صوتی)، سیستم مکان‌یاب جهانی تفاضلی، واحد جمع‌کننده داده و همچنین حسگر نوری می‌باشد که از آن حسگر برای مشخص کردن ابتدا و انتهای کرت آزمایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Gorucu *et al.*, 2001).

در این تحقیق، از یک سیستم کنترل عمق مجهز به سیستم مکان‌یاب جهانی تفاضلی به منظور کنترل عمق کاری زیرشکن مطابق با عمق و ضخامت لایه فشرده شده (که از روی داده‌های شاخص مخروطی به دست می‌آید) استفاده شد. این سیستم کنترل عمق می‌تواند عمق خاک‌ورزی را به طور پیوسته و در حال حرکت از سه طریق نقشه فشرده‌گی خاک، داده‌های ساقه مجهز به ابزار اندازه‌گیری و یا از طریق وارد کردن مقدار عمق در کامپیوتر داخل کابین راننده کنترل نماید (Khalilian *et al.*, 2002).

۲- آزمایش‌های مزرعه‌ای

آزمایش‌ها به منظور جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز در خاک با

مجموعه داده خوبی را برای کار در هوش مصنوعی فراهم می‌کند. در سال‌های اخیر علاقه فزاینده‌ای به توسعه مدل‌های فازی و شبکه عصبی مصنوعی و کاربرد آن در بسیاری از شاخه‌های علوم و مهندسی مشاهده می‌شود و با استفاده از آنها می‌توان، فرآیندهای طبیعی پیچیده و دارای عوامل متعدّد را به سادگی و با دقت زیاد مدل‌سازی نمود.

رویکرد مبتنی بر منطق فازی به عنوان یک جایگزین برای دانش تخصصی، در نظر گرفته می‌شود که بسیار انعطاف‌پذیر بوده و به درستی مقادیر مجهول داده‌های مدل را تخمین می‌زند و تا سطح بالایی توانایی بیان نزدیک به واقعیات را دارد (Kartalopoulos, 2000). هدف از سیستم‌های فازی، قراردادن دانش بشری در سیستم‌های مهندسی به شکل سیستماتیک، قابل تجزیه، تحلیل و مؤثر می‌باشد. استنتاج فازی فرآیند واقعی نگاشت داده‌ها از مجموعه متغیرهای ورودی به خروجی بر اساس مجموعه‌ای از قواعد فازی است. چهار واحد اساسی و لازم برای استفاده موفق از هر رویکرد مدل‌سازی فازی وجود دارد که عبارتند از: پایگاه قواعد فازی^۱، موتور استنتاج فازی^۲، فازی ساز^۳، غیر فازی ساز^۴ (Wang, 1997).

چارمن (۲۰۰۸) مدلی را بر اساس رویکرد اصول مدل‌سازی فازی برای پیش‌بینی تغییرات فشرده‌گی خاک به علت تردد چرخ‌ها، توسعه داد. میانگین نسبی خطای مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در حدود $3/35\%$ برای مقاومت به نفوذ، $7/76\%$ برای مدت فشار، $2/98\%$ برای تراکم تخمین زده شد. برای تمامی پارامترها، خطای نسبی مقدار اندازه‌گیری شده کمتر از مقدار حد قابل قبول (10%) بود. همچنین ماراکوفلو و چارمن (۲۰۱۰) مدلی را بر اساس رویکرد اصول مدل‌سازی فازی (ماکسیمم-مینیمم ممدانی^۵) برای پیش‌بینی میزان شل شدگی خاک و راندمان کششی در خاک‌ورزی توسعه دادند. میانگین نسبی خطای مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در حدود $2/41\%$ برای شل شدگی خاک، $2/68\%$ برای راندمان کششی تخمین زده شد.

سیستم استنتاج فازی بر اساس قواعد اگر-آنگاه بنا نهاده شده است، به طوری که با استفاده از قواعد مزبور می‌توان ارتباط بین تعداد ورودی و خروجی را به دست آورد. بنابراین از (FIS) می‌توان به عنوان یک مدل پیش‌بینی برای شرایطی که داده‌های ورودی و یا خروجی دارای عدم قطعیت بالایی باشند استفاده نمود، چرا که در چنین شرایطی روش‌های کلاسیک پیش‌بینی نظیر رگرسیون

- 1- Fuzzy rule base
- 2- Fuzzy inference motor
- 3- Fuzzification
- 4- Defuzzification
- 5- Mamdani max-min
- 6- Fuzzy inference system

عمق کاری زیر شکن (WD) و سرعت پیشروی (FV) به عنوان پارامترهای ورودی، و نیروی کششی (DF) و انرژی مورد نیاز خاک‌ورزی (E_t) به عنوان پارامترهای خروجی مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۱).

برای فازی کردن این پارامترها از متغیرهای زبانی، خیلی کم (VL)، کم (L)، متوسط (M)، بالا (H) و خیلی بالا (VH) استفاده شد (شکل ۳و۲). در این تحقیق، استنتاج ماکسیمم-مینیمم مددانی برای استنتاج مکانیزم و روش غیر فازی‌ساز مرکز ثقل^۳ برای غیر فازی‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. از توابع عضویت مثلثی^۴ شکل برای هر دو متغیر ورودی و خروجی بدلیل دقت بالا استفاده شد. انتخاب تعداد توابع عضویت و مقادیر آنها بر اساس سیستم مبتنی بر دانش و شرایط آزمایش بود. واحدهای مورد استفاده برای پارامترها به ترتیب: عمق خاک‌ورزی (cm)، سرعت پیشروی (km h^{-1})، نیروی کششی (kN) و انرژی مورد نیاز (kWh) می‌باشند.

تمامی ۲۵ قانون توسعه داده شده فعال شدند. برای مثال قانون ۱ را می‌توان به صورت زیر تفسیر نمود:

Rule 1: IF FV = VL and WD = VII, then DF = M and $E_t = L$

یعنی اگر سرعت پیشروی خیلی کم و عمق خاک‌ورزی خیلی زیاد باشد، آنگاه نیروی کششی متوسط و انرژی مورد نیاز کم خواهد بود. بخش‌هایی از قوانین توسعه یافته در جدول ۲ نشان داده شده است. برای فازی کردن پارامترها از توابع ایجاد شده زیر استفاده گردید. که این توابع با مقادیر اندازه گیری شده تعیین شده‌اند.

$$FV(t_1) = \begin{cases} t_1 : 5.4 \leq t_1 \leq 10.5 \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$WD(t_2) = \begin{cases} t_2 : 27.5 \leq t_2 \leq 46.5 \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$DF(a_1) = \begin{cases} a_1 : 6 \leq a_1 \leq 9 \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$E_t(a_2) = \begin{cases} a_2 : 0.003 \leq a_2 \leq 0.01 \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

تابع عضویت هر یک از پارامترهای مورد نظر با استفاده از توابع بالا (محدوده ورودی و خروجی) تعیین شدند. این توابع تعلق در برگرداندن متغیرهای عددی به متغیرهای زبانی کمک می‌کنند. برای مثال، متغیرهای زبانی و توابع تعلق (WD) از طریق قوانین توسعه یافته و فرمول‌های زیر به دست می‌آید:

در گام غیر فازی سازی، صحت درجات^۵ (α) قوانین نوشته شده برای هر قانون به وسیله کمک گرفتن از مینم و سپس به وسیله گرفتن ماکسیمم از مقادیر بین قوانین تعیین شد. برای مثال، برای

بافت شنی لومی در مرکز تحقیقات و ترویج دانشگاه کلمسون در نزدیکی شهر بلک ویل ایالت کارولینای جنوبی آمریکا ($33^\circ 21'$ شمالی و $18^\circ 18'$ غربی) انجام شد. جدول ۱ خصوصیات بافت خاک مزرعه آزمایشی را ارائه می‌کند. مزرعه آزمایشی به کرت‌های 4×15 متر تقسیم شد. بعد از آن نمونه‌های خاک از هر کرت به منظور به دست آوردن بافت خاک جمع‌آوری گردید. در هر کرت آزمایشی مقادیر شاخص مخروطی برای ۹ نقطه به فاصله $1/5$ متر از یکدیگر به دست آمد. این مقادیر برای عمق صفر تا ۴۶ سانتی‌متری از سطح خاک و در دو شرایط رطوبتی ذکر شده در جدول ۱، به دست آمد. به منظور اندازه‌گیری انرژی مورد نیاز عملیات زیرشکنی، عملیات خاک‌ورزی در مزرعه آزمایشی انجام گردید. انرژی مورد نیاز برای عملیات زیرشکنی از طریق رابطه (۱) به دست آمد (ASAE, 2003b; Alimardani et al., 2009).

$$E = t \times E_{PTO} \quad (1)$$

که در این فرمول: E = انرژی مورد نیاز (kWh)، t = زمان لازم به منظور انجام عملیات زیرشکنی مورد نظر در داخل کرت آزمایشی E_{PTO} (h)، t = توان مصرفی معادل محور تواندهی تراکتور به منظور انجام عملیات خاک‌ورزی (kW) است.

زمان مورد نیاز به منظور انجام عملیات زیرشکنی در داخل کرت آزمایشی از روی مدت زمان لازم برای عبور از ابتدا به انتهای کرت آزمایشی (ابتدا و انتهای کرت آزمایشی توسط حسگر نوری مشخص می‌گردد) به دست آمد. توان مصرفی معادل محور تواندهی تراکتور (E_{PTO}) با تقسیم توان مالبندی تراکتور (P_{db}) به عدد ثابت (۰/۶۵) به دست آمد. این عدد ثابت بر اساس شرایط خاکی مزرعه و نوع تراکتور مورد استفاده، مطابق با استاندارد ASAE انتخاب شده است (ASAE, 2003b).

توان مالبندی مورد نیاز (P_{db}) بر اساس رابطه (۲) به دست می‌آید (ASAE, 2003a):

$$P_{db} = \frac{D \cdot S}{3.6} \quad (2)$$

که در این فرمول: P_{db} = توان مالبندی مورد نیاز به منظور انجام عملیات خاک‌ورزی (kW)، D = نیروی کششی کل اندازه‌گیری شده توسط دینامومتر اتصال سه نقطه تراکتور (kN)، S = سرعت پیشروی تراکتور موقع انجام عملیات خاک‌ورزی (km h^{-1}) است.

۳- مدل فازی

برای پیاده سازی تئوری مجموعه فازی^۱ به مدل، از جعبه ابزار منطق فازی در نرم افزار مطلب نسخه ۷/۱۲ تحت ویندوز استفاده شد. برای ارائه مدل پیش‌بینی با استفاده از سیستم خبره فازی (FES)^۲،

3- Center of gravity defuzzifier

4- Triangular membership function

5- Truth degrees

1- Fuzzy set theory

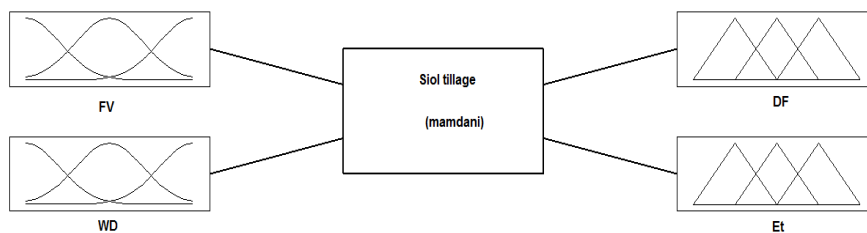
2- Fuzzy expert systems

$\min(0.23, 0.21) = 0.21$
 $\alpha_{12} = \min(\text{Medium FV, Medium WD}) =$
 $\min(0.23, 0.789) = 0.23$
 مطابق استنتاج ماکسیمم-مینم ممدانی، مقدار توابع تعلق سیستم: $\max(\alpha_7, \alpha_8, \alpha_{12}, \alpha_{13}) = 0.692$ یافت شد. سپس می‌توان خروجی قطعی را محاسبه کرد.

$FV = 7 \text{ km h}^{-1}$ و $WD = 38 \text{ cm}$ ، قوانین ۷، ۸، ۱۲، ۱۳ فعال می‌شوند:
 $\alpha_7 = \min(\text{Low FV, High WD}) =$
 $\min(0.692, 0.21) = 0.21$
 $\alpha_8 = \min(\text{Low FV, Medium WD}) =$
 $\min(0.692, 0.798) = 0.692$
 $\alpha_{12} = \min(\text{Medium FV, High WD}) =$

جدول ۱- میانگین مقادیر پارامترهای خاک مورد مطالعه
Table 1- Average values of soil parameter

میانگین درصد رطوبت خاک بر پایه وزن خشک در عمق 0-46 cm خاک	درصد رس	درصد شن	طبقه‌بندی خاک بر اساس خانواده خاک	نوع خاک
Mean of soil moisture content based on dry weight at soil depth of 0-46 cm	Percent of clay	Percent of sand	Soil classification based on soil families	Soil type
شرایط مرطوب Wet condition	شرایط خشک Dry condition			
11.6	8.9	85.5	Loamy-siliceous-thermic, Arenic Plinthic Paleudults	فوکوی Fuquay (شنی لومی) sandy loam



شکل ۱- ساختار سیستم خبره فازی
Fig.1. Structure of fuzzy expert system

جدول ۲- قوانین فازی
Table 2- Fuzzy rules

قوانین Rules	ورودی Input FV	متغیرها Variables WD	خروجی Output DF	متغیرها Variables Et
قانون (۱) Rule (1)	VL	VH	M	L
.....
قانون (۱۵) Rule (15)	M	VL	VL	M
.....
قانون (۲۲) Rule (22)	VH	H	H	VH
.....
قانون (۲۵) Rule (25)	VH	VL	VL	M

$$\mu_{VL}(i_2) = \begin{cases} 1: i_2 < 27.5 \\ \frac{32.25 - i_2}{4.75}: 27.5 \leq i_2 \leq 32.25 \\ 0: i_2 > 32.25 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{VL}(i_2) = \{1/27.5 + 0.9/27.975 + \dots + 0.1/31.775 + 0/32.25\} \quad (8)$$

$$\mu_L(i_2) = \begin{cases} \frac{i_2 - 27.5}{4.75}: 27.5 \leq i_2 \leq 32.25 \\ \frac{60 - i_2}{4.75}: 32.25 \leq i_2 \leq 37 \\ 0: i_2 > 37 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_L(i_2) = \{0/27.5 + 0.1/27.975 + \dots + 1/32.25 + 0.9/32.725 + \dots + 0.1/36.525 + 0/37\} \quad (10)$$

$$\mu_M(i_2) = \begin{cases} \frac{i_2 - 32.25}{4.75}: 32.25 \leq i_2 \leq 37 \\ \frac{41.75 - i_2}{4.75}: 37 \leq i_2 \leq 41.75 \\ 0: i_2 > 41.75 \end{cases} \quad (11)$$

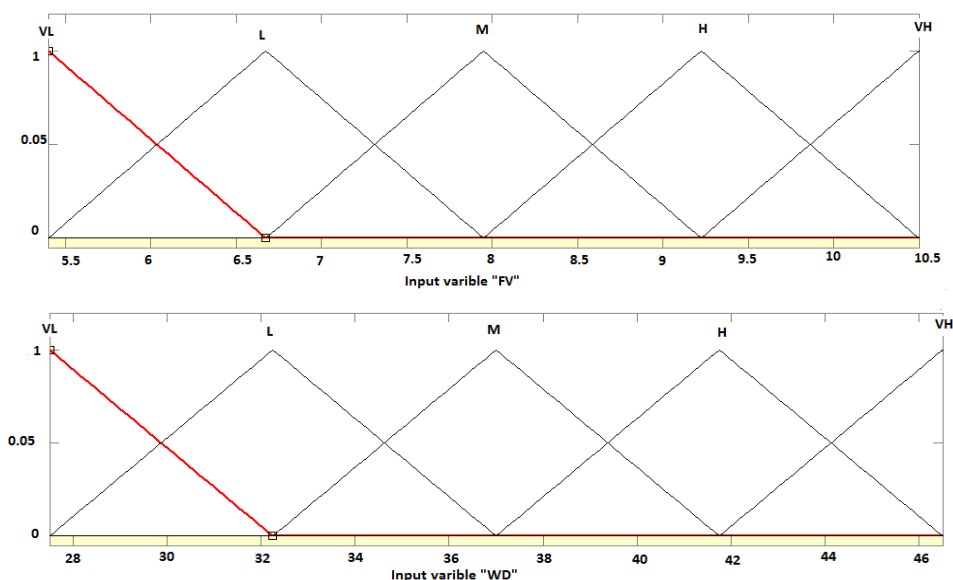
$$\mu_M(i_2) = \{0/32.25 + 0.1/32.725 + \dots + 1/37 + 0.9/37.475 + \dots + 0.1/41.275 + 0/41.75\} \quad (12)$$

$$\mu_H(i_2) = \begin{cases} \frac{i_2 - 37}{4.75}: 37 \leq i_2 \leq 41.75 \\ \frac{46.5 - i_2}{4.75}: 41.75 \leq i_2 \leq 46.5 \\ 0: i_2 > 46.5 \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_H(i_2) = \{0/37 + 0.1/37.475 + \dots + 1/41.75 + 0.9/42.225 + \dots + 0.1/46.025 + 0/46.5\} \quad (14)$$

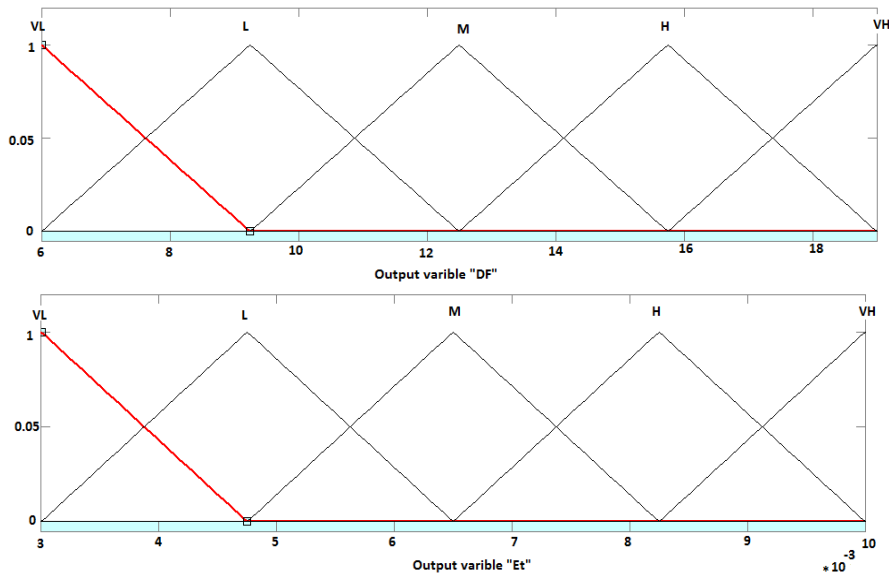
$$\mu_{VH}(i_2) = \begin{cases} 0: i_2 < 41.75 \\ \frac{i_2 - 41.75}{4.75}: 41.75 \leq i_2 \leq 46.5 \\ 0: i_2 > 46.5 \end{cases} \quad (15)$$

$$\mu_{VH}(i_2) = \{0/41.75 + 0.1/42.225 + \dots + 0.9/46.025 + 1/46.5\} \quad (16)$$



شکل ۲- توابع عضویت متغیرهای ورودی

Fig.2. Membership functions of input variables



شکل ۳- توابع عضویت متغیرهای خروجی

Fig.3. Membership functions of output variables

پیش‌بینی شده و داده‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و مطلوب است که به مقدار صفر برسد.

۴- مدل رگرسیونی

در این تحقیق علاوه بر توسعه مدل فازی جهت پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی و انرژی مورد نیاز خاک‌ورزی، با استفاده از نرم افزار SPSS و روش گام به گام (stepwise) به ارائه یک مدل رگرسیونی به منظور پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی (DF) و انرژی مورد نیاز عملیات زیرشکنی (E_t) اقدام شد. متغیرهای سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی به عنوان متغیرهای مستقل مدل در نظر گرفته شدند که در جداول ۳ و ۴ تجزیه رگرسیونی نیروی مقاوم کششی و انرژی مورد نیاز عملیات زیرشکنی ارائه شده است.

در غیر فازی کردن، از روش مرکز ثقل استفاده شد که معادله (۱۷) آن را بیان می‌کند.

$$Z^* = \frac{\int Z \cdot \mu_c(Z) \cdot dz}{\int \mu_c(Z) \cdot dz} \quad (17)$$

در این فرمول: Z^* = مقدار قطعی، Z = مقدار فازی شده، $\mu_c(Z)$ = مقدار درجه تابع تعلق فازی شده است. قابلیت پیش‌بینی سیستم توسعه یافته بر طبق روش‌های ریاضی و آماری به دست می‌آید. به منظور تعیین خطای نسبی (E) سیستم، از معادله (۱۸) استفاده شد.

$$E = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y - \hat{y}}{y} \right| \quad (18)$$

که در آن: n = تعداد مشاهدات، y = مقادیر اندازه‌گیری شده، \hat{y} = مقادیر پیش‌بینی شده است. خطای نسبی، انحراف بین مقادیر

جدول ۳- جدول تجزیه واریانس رگرسیونی به منظور پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی

Table 3- Analysis of variance table of regression to predict draft force

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	
مدل	437.546	2	218.782	310.307**
باقیمانده	25.383	36	0.705	
کل	462.986	38		
Total				

** - Significant at probability level of 1%

** - معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪

جدول ۴- جدول تجزیه واریانس رگرسیونی به منظور پیش‌بینی انرژی مورد خاک‌ورزی

Table 4- Analysis of variance table of regression to predict tillage energy

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	
مدل	0.923	2	0.462	253.713**
باقیمانده	0.065	36	0.002	
کل	0.989	38		
Total				

** - Significant at probability level of 1%

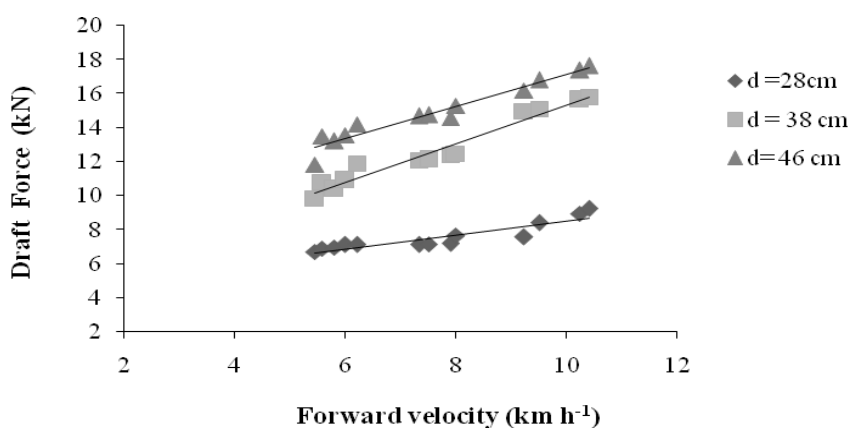
** - معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪

بحث و نتایج

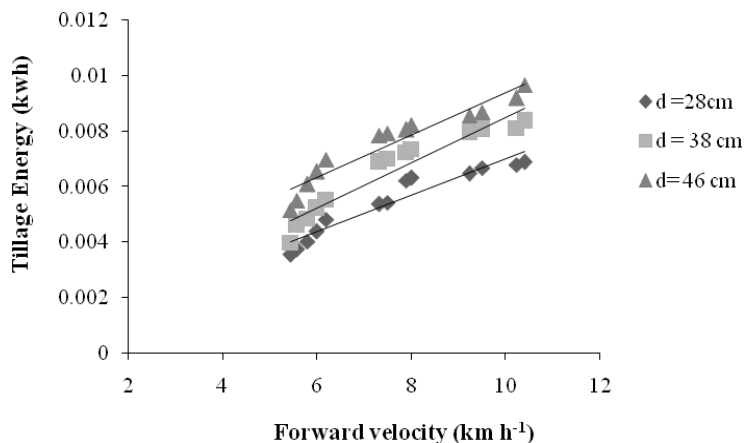
شکل ۵ اثر سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی بر روی انرژی مورد نیاز را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار انرژی در سرعت ۶ کیلومتر بر ساعت و عمق ۲۸ سانتی متر به دست آمد.

نتایج پیش‌بینی با استفاده از سیستم خبره فازی (FES) مقادیر بسیار نزدیکی را بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده نشان داد. به طوری که میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نیروی مقاوم کششی به ترتیب ۱۱/۷ و ۱۱/۷۵ کیلونیوتن به دست آمد. همچنین نتایج به دست آمده میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای انرژی مورد نیاز را به ترتیب ۰/۰۶۵۳ و ۰/۰۶۵۶ کیلووات ساعت ارائه داد. ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نیروی مقاوم کششی و انرژی مورد نیاز عملیات خاک‌ورزی با استفاده از منطق فازی در شرایط کاری مختلف به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده‌اند. ضریب تبیین مدل برای نیروی مقاوم کششی و انرژی مورد نیاز عملیات خاک‌ورزی به ترتیب ۰/۹۸۲ و ۰/۹۸۴ به دست آمد.

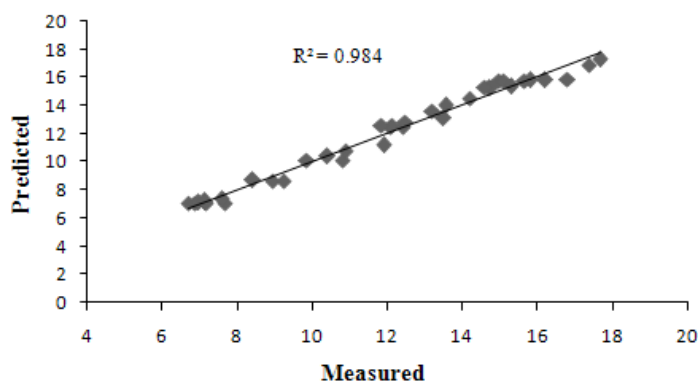
نتایج نشان داد همراه با افزایش عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی، میزان نیروی مقاوم کششی افزایش می‌یابد ($P < 0.01$). شکل ۴ تأثیر سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی بر روی نیروی مقاوم کششی را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار نیروی مقاوم کششی در سرعت پیشروی ۱۰/۴ کیلومتر بر ساعت و عمق ۴۶ سانتی‌متر به دست آمد. علت تفاوت در نیروی مقاوم کششی در سرعت‌های پیشروی مختلف می‌تواند به دلیل تفاوت در شتاب داده شده به ذرات خاک در سرعت‌های پیشروی مختلف باشد. همچنین با افزایش عمق خاک‌ورزی با توجه به این که نیروی مقاوم مکانیکی خاک به علت افزایش سطح تیغه درگیر با خاک زیاد شده و همچنین در خاک‌های مورد مطالعه میزان مقاومت مکانیکی خاک (شاخص مخروطی خاک) با افزایش عمق افزایش می‌یابد، میزان نیروی مقاوم کششی هم افزایش خواهد یافت. با افزایش سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی، انرژی مورد نیاز عملیات خاک‌ورزی افزایش یافته است ($P < 0.01$).



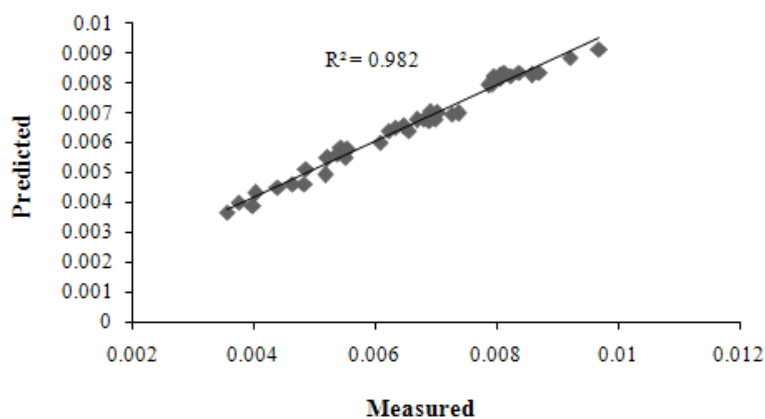
شکل ۴- اثر سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی بر روی نیروی مقاوم کششی
Fig.4. Effect of forward velocity and tillage depth on the draft force



شکل ۵- اثر سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی بر روی انرژی مورد نیاز عملیات خاک‌ورزی
 Fig.5. Effect of forward velocity and tillage depth on tillage energy requirements



شکل ۶- رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نیروی مقاوم کششی (فازی)
 Fig.6. Relationship between measured and predicted values of draft force (from FES model)



شکل ۷- رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده انرژی مورد نیاز عملیات خاک‌ورزی (فازی)
 Fig.7. Relationship between measured and predicted values of the required energy for tillage (from FES model)

کششی برحسب نیوتن، S سرعت پیشروی بر حسب کیلومتر بر ساعت و W عرض وسیله خاک‌ورزی بر حسب متر و T عمق کار وسیله خاک‌ورزی بر حسب سانتی‌متر می‌باشد. F_i شاخص (ضریب) مربوط به خاک می‌باشد که برای خاک با بافت سنگین برابر ۱، برای خاک با بافت متوسط ۰/۷ و برای خاک با بافت شنی ۰/۴۵ در نظر گرفته می‌شود. A, B, C ضرایب مربوط به ابزارهای خاک‌ورزی می‌باشند که برای وسیله خاک‌ورزی مورد استفاده در این تحقیق (زیرشکن) $A = 226, B = 0, C = 1.8$ در نظر گرفته شدند.

نتایج مقایسه پیش‌بینی با استفاده از مدل فازی با مدل ارائه شده توسط انجمن مهندسين کشاورزی آمریکا (ASAE) و همچنین مدل گارنر و همکاران (۱۹۸۷) نشان داد که تمام داده‌های نیروی مقاوم کششی به دست آمده برای عمق‌های مختلف خاک‌ورزی (داده‌های واقعی) در محدوده اعداد به دست آمده از استاندارد ASAE (با دقت ۵٪) قرار گرفته است و در این خاک، مدل پیش‌بینی فازی داده‌های نزدیک‌تری به داده‌های واقعی نسبت به سایر مدل‌های رگرسیونی ارائه کرده است. مدل گارنر و همکاران (۱۹۸۷) در خاک شنی لومی داده‌های بسیار کوچک‌تری نسبت به داده‌های واقعی ارائه می‌نماید.

نتیجه گیری

در مقایسه با دیگر شیوه‌های مدل‌سازی پیش‌بینی کننده (آنالیز رگرسیونی کلاسیک) مدل‌سازی فازی به خاطر وجود ساختار ساده (رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی می‌تواند به وسیله قوانینی که بر اساس متغیرهای زبانی هستند توصیف گردند) و قدرتمند (عملکردشان بستگی به آموزش و متغیرهای ورودی جدید ندارد به راحتی می‌توان قوانین را به آن اضافه کرد)، برتری دارد. بنابراین از (FIS) می‌توان به عنوان یک مدل پیش‌بینی برای شرایطی که داده‌های ورودی و یا خروجی دارای عدم قطعیت بالایی باشند؛ استفاده نمود، زیرا در چنین شرایطی روش‌های کلاسیک پیش‌بینی نظیر رگرسیون نمی‌توانند به خوبی عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها را در نظر بگیرند. به نظر می‌رسد توسعه این مدل می‌تواند به عنوان یک مرجع برای مطالعات خاک‌ورزی استفاده گردد. همچنین این سیستم می‌تواند با افزایش قوانین علمی از یک طرف و با اضافه کردن شبکه عصبی به سیستم از طرف دیگر توسعه بیش‌تری پیدا کند.

میانگین خطای نسبی مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل فازی ۳/۱٪ برای نیروی مقاوم کششی و ۲/۹۴٪ برای انرژی مورد نیاز عملیات زیرشکنی به دست آمد. برای تمامی پارامترها، مقادیر خطای نسبی پیش‌بینی شده کمتر از حد قابل قبول (۱۰٪) است (Marakoglu and Carman, 2010).

در این تحقیق، نتایج ارائه مدل رگرسیونی پیش‌بینی نیروی کششی و انرژی مورد نیاز عملیات خاک‌ورزی با استفاده از متغیرهای مستقل سرعت پیشروی تراکتور (FV) و عمق خاک‌ورزی (WD) به صورت معادلات (۱۹) و (۲۰) به دست آمد.

$$E_t = 0.0007425 FV + 0.0001185 WD - 0.0035561 \quad (19)$$

$$DF = 0.831FV + .412WD - 10.018 \quad (20)$$

میانگین مقادیر خطای نسبی جهت پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی و انرژی مورد نیاز عملیات زیرشکنی با استفاده از مدل رگرسیونی به ترتیب ۶/۱۹٪ و ۵/۷۲٪ پیش‌بینی شد. میانگین خطاهای نسبی در مدل‌های رگرسیونی بزرگتر از مدل پیش‌بینی فازی یافت شد.

علاوه بر مقایسه بالا، نتایج پیش‌بینی با استفاده از مدل فازی با مدل گارنر و همکاران (۱۹۸۷) و مدل ارائه شده توسط انجمن مهندسين کشاورزی آمریکا (ASAE) به منظور پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی مورد نیاز ادوات خاک‌ورزی مورد مقایسه قرار گرفتند (ASAE, 2003a; ASAE, 2003b; Garner et al., 1987).

مدل گارنر و همکاران (۱۹۸۷) برای خاک‌های مناطق جلگه‌ای ساحلی ارائه گردیده است و لازم به ذکر است که این محققان آزمایشات خود را در مرکز تحقیقات و ترویج ادیستوی دانشگاه کلمسون در نزدیکی شهر بلک ویل انجام داده‌اند مدل ارائه شده توسط گارنر و همکاران (۱۹۸۷) برای خاک داتن (Dothan) - شنی لومی به صورت $y = -8.2 + 77.9x$ و برای خاک نورفولک (Norfolk) - شنی لومی به صورت $y = -18.2 + 102.6x$ می‌باشد که در آن x عمق خاک‌ورزی بر حسب متر و y نیروی مقاوم کششی مورد نیاز خاک‌ورزی بر حسب کیلو نیوتن می‌باشد.

انجمن مهندسين کشاورزی آمریکا (ASAE) نیروی کششی مورد نیاز ادوات خاک‌ورزی را برای سه حالت خاک: خاک با بافت سنگین، خاک با بافت متوسط و خاک با بافت سبک ارائه کرده است. مدل ارائه شده توسط ASAE به صورت $D = F_i[A + B(S) + C(S^2)]WT$ می‌باشد که در آن D نیروی

منابع

1. Abbaspour-Gilandeh, Y., A. Khalilian, R. Alimardani, A. R. Keyhani, and S. H. Sadati. 2006. Comparison of energy requirements of uniform-depth and variable-depth tillage as affected by travel speed and soil moisture. Iranian Agricultural Science Journal 35: 473-483.

2. Adamchuk, V. I., M. T. Morgan, and H. S. Sumali. 2001. Mapping of spatial and vertical variation of soil mechanical resistance using linear pressure model. Presented at the 2001 ASAE Annual International Meeting, Paper No.01-1019, American Society of Agricultural Engineers. 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659, USA.
3. Alimardani, R., Y. Abbaspour-Gilandeh, A. Khalilian, A. Keyhani, and S. H. Sadati. 2009. Prediction of draft force and energy of subsoiling operation using ANN model. *International Journal of Food, Agriculture & Environment (JFAE)*, 7(3&4): 537-542.
4. ASAE Standards, 2003a. ASAE EP496.2 FEB03: Agricultural Machinery Management. In: ASAE Standards 2003. ASAE, St. Joseph, MI.
5. ASAE Standards, 2003b. ASAE D497.4 FEB03: Agricultural Machinery Management Data. In: ASAE Standards 2003. ASAE, St. Joseph, MI.
6. ASAE Standards, 2004. ASAE S313.3 FEB04: Soil cone penetrometer. In: Hahn, R. H., Purschwitz, M. A., Rosentreter, E. E. (Eds.), and ASAE Standards 2004. ASAE, St. Joseph, MI.
7. Carman, K., 2008. Prediction of soil compaction under pneumatic tires a using fuzzy logic approach. *Terramechanics* 45:103-105.
8. Garner, T. H., W. R. Reynolds, H. L. Musen, G. E. Miles, J. W. Davis, Dam Wolf, and U. M. Peiper. 1987. Energy requirement for subsoiling coastal plain soils. *Transactions of the ASAE* 30(2): 343-349.
9. Gill, W. R., and G. E. Vanden Berg. 1968. Soil dynamics in tillage and traction. *Agricultural handbook* 316. Washington, D.C.: USDA-Agric. Res. Service.64
10. Gorucu, S., A. Khalilian, Y. J. Han, R. B. Dodd, F. J. Wolak, and M. Keskin. 2001. Variable depth tillage based on geo-referenced soil compaction data in Coastal Plain region of South Carolina. ASAE Paper No. 011016. St. Joseph, Mich.: ASAE.
11. Karatalopoulos, S. V., 2000. *Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic- Basic Concepts and Applications*; Prentice Hall, New-Delhi, India.
12. Khalilian, A., Y. J. Han, R. B. Dodd, Mike J. Sullivan, S. Gorucu, and M. Keskin. 2002. A control system for variable depth tillage. ASAE Paper No. 021209. St. Joseph, Mich.: ASAE.
13. Marakoglu, T., and K. Carman. 2010. Fuzzy knowledge-based model for prediction of soil loosening and draft efficiency in tillage, *Terramechanics* 47: 173-178.
14. Ross, J. T., 1995. *Fuzzy Logic with engineering applications*. New York: McGraw Hill Inc.
15. Upadhyaya S. K., T. X. Ma, W. J. Chancellor, and Y. M. Zhao. 1987. Dynamics of soil-tool interaction. *Soil & Tillage Research* 9(1): 187-206.
16. Upadhyaya, S. K., W. J. Chancellor, J. V. Perumpral, R. L. Schafer, W. R. Gill, and G. E. Vandenberg. 1994. *Advances in Soil Dynamics* (1). American Society of Agricultural Engineering.
17. Wang, Li-Xin, 1997. *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall.