یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک
بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران

طراحی و ارزیابی سیستم کنترل زیرشکن عمق متغیر به روش فعال نیروی هوشمند

منا طهماسبی*[1]، محمد گهری[2]، ابوالفضل هدایتی‌پور[1]

[1]بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران؛ tahmasebi.mona@gmail.com

[2]دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران؛ moh-gohari@arakut.ac.ir

چکیده

امروزه فشردگی خاک یکی از مهمترین مشکلات کشاورزی در ایران می‌باشد. لایه سخت خاک اصلی‌ترین مانع رشد ریشه گیاه و عامل کاهش تولید/عملکرد می‌باشد. از سوی دیگر، افزایش عمق کار خاک‌ورز جهت شکستن لایه های سخت منجر به بالا رفتن مصرف سوخت و توان کششی لازم می‌شود. در روش خاک ورزی دقیق عمق کار در هر ناحیه از مزرعه براساس عمق سخت لایه خود تنظیم می شود و این امر موجب کاهش سوخت و توان مصرفی می گردد.

این مطالعه امکان بهبود عملکرد یک دستگاه زیرشکن عمق متغیر توسط طراحی یک روش کنترل هوشمند جدید با نام کنترل نیروی فعال (AFC) را بررسی نموده است. در ابتدا روش AFC به همراه کنترلر تناسبی-انتگرالگیر-مشتقگیر (PID) در نرم افزار MATLAB/Simulink طراحی و شبیه‌سازی شدند. سپس روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) در حلقه AFC جهت محاسبه پارامتر جرم تخمینی بکار گرفته شد که با نام NeuroAFC نامگذاری گردید. عملکرد دو سیستم کنترل پیشنهادی (PID و NeuroAFC) در دامنه زمان با یکدیگر مقایسه گردیدند. نتایج این مطالعه نشان دادکه سیستم کنترل NeuroAFC عملکرد بهتری در افزایش کارایی خاک‌ورز عمق متغیر موردنظر خواهد داشت.

کلمات کلیدی: کنترل فعال نیرو، شبکه عصبی مصنوعی، خاک‌ورز عمق متغیر، شبیه‌سازی، کشاورزی دقیق

Design and Evaluation of a Variable Depth Subsoiler Control System integrated to Intelligent Active Force Scheme

Mona Tahmasebi[1], Mohammad Gohari[2], Abolfazl Hedayatipoor[1]

[1] Agricultural Engineering Research Department, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Arak, Iran, tahmasebi.mona@gmail.com

[2] Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran, moh-gohari@arakut.ac.ir

ABSTRACT

Nowadays, soil compaction is one of the most important problems of agriculture in Iran. Indeed, soil hard layer is the main impediment of root growth and reduces production/yield. On the other hand, increasing depth of tillage to break the hard layers will lead to increase fuel consumption and traction power. In precision tillage, the depth of work in each area of the farm is adjusted based on its hardpan depth which reduces fuel and power consumption. This study investigates the feasibility of improving a variable depth Subsoiler performance by designing a new intelligent control technique, namely active force control (AFC). Firstly, the AFC scheme with a proportional-integral-derivative (PID) controller has been designed and simulated in MATLAB / Simulink Software. Then, an artificial intelligence network (ANN) method was implemented into the AFC loop to compute the estimated mass parameter of the system, named AFCANN.

* منا طهماسبی: اراک، کمربندی شمالی، جاده مبارک آباد، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، تلفن: ۰۸۶۳۳۶۷۵۵۷۳؛ نمابر: ۰۸۶۳۳۶۷۵۵۶۹

Subsequently, the results of this study imply that the ANNAFC scheme has a superior performance in improving proposed variable depth subsoiler efficiency.

Keywords: Active force control, artificial neural network, variable depth tool, Simulation, precision farming

۱- مقدمه

فشردگی ایجاد شده در خاک بسته به شرایط مختلف می تواند محدود به لایه خاک سطحی و عمقی باشد. فشردگی خاک، رشد گیاه و نفوذ ریشه در خاک را کاهش داده و همچنین حرکت آب و هوا در خاک را محدود ساخته و در نتیجه باعث تنش های غذایی برای گیاه و خروج آهسته جوانه از خاک شده و نهایتا باعث کاهش عملکرد محصول می گردد (مطالعات نشان می دهد، مقادیر مقاومت خاک که بیشتر از ۲ تا۳ مگاپاسکال باشد، رشد گیاه را محدود می‌کنند). در روش خاک‌ورزی مرسوم عمق شخم درطول و عرض مزرعه یکسان بوده، اما عمق لایه سخت و فشرده خاک از یک ناحیه به ناحیه دیگر در مزرعه معمولا تغییر می‌کند که جهت استفاده از زیرشکن در این مزارع نیاز به ادوات و تراکتور سنگین خواهد بود. این موضوع افزایش مصرف انرژی بالایی را به دنبال دارد و به همین دلیل منجر به هزینه‌بر بودن این عملیات شده و کشاورزان رغبتی به اجرای آن نخواهند داشت. در روش خاک‌ورزی دقیق عمق شخم در هر ناحیه از مزرعه بر اساس عمق سخت لایه خاک، شخم زده می شود که این امر موجب کاهش مصرف سوخت و توان مصرفی می‌شود. همچنین باتوجه به تشویق کشاورزان به استفاده از روش کشاورزی حفاظتی و بهم نخوردن خاک، استفاده از دستگاه خاک‌ورز زیرشکنی با مصرف کمترین توان و انرژی جهت افزایش عملکرد ضروری به نظر می‌رسد. در ایران طراحی و ساخت یک سیستم زیرشکن اتوماتیک ساده می‌تواند مشکلات عدم توجیه‌پذیری اقتصادی و فنی را در تولید انبوه و کاربرد این دستگاه حل نماید.

فولتن و همکاران دریافتند که خاک‌ورزی عمق متغیر سوخت مصرفی را تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهد (Fulton et al., 1996). در پژوهشی دیگر تخمین زده شد که هزینه انرژی در عملیات زیرشکنی به روش خاک‌ورزی خاص مکانی در مقایسه با خاک‌ورزی عمق یکنواخت، در حدود ۳۴ درصد کاهش دارد (Raper., 1999). آدامچوک و همکارانش نیزگزارش نمودند که زیرشکنی همراه با تنظیم عمق برای شکستن لایه سخت اقتصادی بوده و می‌تواند بصورت تجاری در دسترس همه قرار گیرد (Adamchuk et al., 2004).

در تحقیقی، پژوهشگران علاوه بر استفاده از پنوترومتر متصل به DGPS جهت اندازه گیری سختی خاک و خصوصیات سخت لایه خاک، یک تیغه ساب سویلر دارای ۵ لودسل و متصل به GPS و دیتا لاگر و چرخ تنظیم عمق را بعنوان خاک‌ورز عمق متغیر استفاده نمودند. در تحقیقات آنها ۴۳ درصد کاهش در انرژی مصرفی و ۲۸ درصد کاهش در مصرف سوخت در خاک‌ورزی عمق متغیر را گزارش نمودند (Khalilian et al., 2002). اگرچه در ادامه پژوهشگران دیگر با استفاده از خاک‌ورز عمق متغیر مذکور، ۵۰٪ ذخیره انرژی و ۳۰٪ ذخیره سوخت را گزارش نمودند (Abbaspour-Gilandeh et al., 2005; Alimardani et al., 2007).

گهری (۱۳۸۴) و گهری و همکاران (۱۳۸۹) در سال ۱۳۸۴ توسط پژوهشگران یک خاک‌ورز عمق متغیر ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت (Gohari, 2005; Gohari et al., 2010). در این تحقیق در ابتدا یک دستگاه فروسنج مخروطی پشت تراکتوری مجهز به GPS به منظور تهیه تغییرپذیری مکانی مقاومت خاک ساخته شد (Gohari and Hemmat., 2007) و خاک‌ورز موردنظر از داده‌های آن استفاده می‌نمود. آنها گزارش نمودند سخت لایه در عمق ۲۵-۳۰ سانتیمتری بوده و بجز در لایه ۰-۱۰ سانتیمتری رابطه مقاومت خاک و رطوبت معنی‌دار نمی‌باشد.

از سویی دیگر محققان گزارش نمودند که در مقایسه با زیرشکنی عمیق یکنواخت (۴۵سانتیمتر)، به کارگیری زیرشکنی خاص ناحیه‌ای در کرت‌هایی که عمق خاک‌ورزی با توجه به عمق سخت لایه، سطحی (۲۵سانتیمتر) و متوسط (۳۵ سانتیمتر) بود، سوخت مصرفی و مقاومت کششی به ترتیب به اندازه ۴۳ و ۲۳ درصد و ۵۹ و ۳۵ درصد کاهش یافته است (Raper et al., 2007). خاک‌ورزی دقیق یا خاک‌ورزی خاص مکانی، خواص فیزیکی خاک را فقط تا عمقی که نیاز است تغییر می‌دهد. مدیریت خاص مکانی فشردگی خاک می‌تواند موجب صرفه‌جویی در انرژی مصرفی در عملیات خاک ورزی شود (Hemmat and Adamchuk., 2008).

در واقع همانطور که بررسی نتایج تحقیقات محققان مشخص می کند، کشاورزی دقیق منجر به کاهش هزینه‌ها، وقت و استفاده کمتر از انرژی و نهاده‌ها می‌شود. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که در خاک‌ورزی دقیق عمق عملیات با توجه به تغییرپذیری مکانی مقاومت سخت لایه خاک تعیین می‌شود و از روش های مختلفی برای اندازه‌گیری فشردگی و مقاومت مکانیکی خاک در عمق‌های مختلف و تشخیص سخت لایه خاک استفاده شده است. در این راستا خاک‌ورز عمق متغیر نیاز به سیستم کنترلی دارد که بتواند عمق کار را بطور آنلاین کنترل و تنظیم نماید.

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون کشاورزی ایران

تاکنون برخی سیستم‌های کنترلی با استفاده از عملگر هیدرولیکی برای خاک‌ورزهای عمق متغیر استفاده گردیده است (Lee et al., 1998; Condon et al., 2001). معمولا این خاک‌ورزها شامل سنسور عمق، چرخ تنظیم عمق کنترل شونده بوسیله عملگر و کنترلرها هستند. در واقع سنسورها در دو بخش تماسی و غیر تماسی دسته‌بندی می‌شوند. سنسورهای تجاری سنجنده فاصله آلتراسونیک و سنسورهای NIR به عنوان سنسورهای غیر تماسی استفاده شده‌اند (Lee et al., 1998; Yasin et al., 1992). همچنین گهری و همکاران سنسور دیجیتالی موقعیت زاویه‌ای (شفت انکودر) را به چرخ تثبیت عمق[1]متصل نموده و بدین وسیله داده‌برداری را انجام داده‌اند (Gohari et al., 2006). آنها خاک‌ورز موردنظر خود را به یک کنترلر On/Off مجهز نمودند. خلیلیان و همکاران از شیر کنترل جهت تناسبی که با کامپیوتر کنترل می‌گردید، استفاده نمودند (Khalilian et al., 2002). لذا این تحقیق با هدف طراحی و امکان‌سنجی استفاده از یک کنترلر با دقت بالا برای زیرشکن (خاک‌ورز) عمق متغیر انجام گرفته و بر روی چرخ تنظیم عمق کنترل شونده توسط سیلندر هیدرولیکی عمل خواهد نمود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل دینامیکی چرخ تثبیت عمق فعال

در خاک‌ورز عمق متغیر موردنظر، چرخ‌های تثبیت عمق به سیلندر هیدرولیکی متصل شده و لینکهای چرخ به بدنه خاک‌ورز بصورت لولایی متصل شده‌اند. در زمانی که سیلندر هیدرولیکی باز می‌شود بازوی چرخ، چرخیده و عمق عملیات تغییر می‌یابد. در شکل ۱ تصویر شماتیک چرخ زیرشکن و نیروهای وارده به آن آورده شده است. نیروی موردنیاز سیلندر هیدرولیکی توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$F_x.a = I\ddot{\theta} + W\cos\theta.b \quad (۱)$$

که در آن:

F: نیروی استفاده شده توسط سیلندر هیدرولیکی (N)

I: اینرسی جرمی (kgm^2)

$\ddot{\Theta}$: شتاب زاویه‌ای میله اتصال چرخ (Rad/s^2)

W: وزن خاک‌ورز (N)

Θ: زاویه میله اتصال چرخ با صفحه افقی (Rad)

H: عمق عملیات (m)

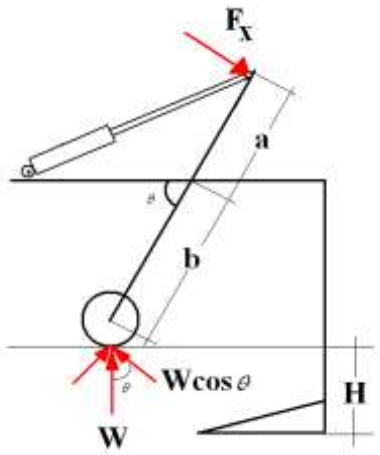

Figure 1. The configuration of tillage tool and forces

شکل ۱. تصویر شماتیکی از چرخ اندازه‌گیری خاک‌ورز و نیروهای وارده بر آن

[1]Gauge wheel

طبق رابطه (۱)، مدل ریاضی می‌تواند بصورت دیاگرام بلوکی نشان داده شود (شکل ۲). ورودی و خروجی مدل به ترتیب Fx و Θ می‌باشد. بنابراین برای کنترل موقعیت، توسط این تابع انتقال، بدست آوردن نیروی موردنیاز برای زاویه میله اتصال مناسب امکانپذیر بوده و برای طراحی ضروری می‌باشد.

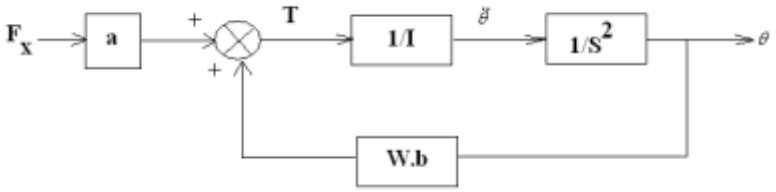

Figure 2: The block diagram of mathematical model
شکل ۲. نمودار بلوکی مدل ریاضی

۲-۲- طراحی کنترلر PID

کنترلر تناسبی-انتگرالگیر- مشتقگیر (PID) از رایج‌ترین نمونه‌های الگوریتم کنترل بازخوردی است که در بسیاری از فرآیندهای کنترلی نظیر کنترل سرعت موتور DC، کنترل فشار، کنترل دما و... کاربرد دارد. کنترلر PID مقدار خطا بین خروجی فرآیند و مقدار ورودی مطلوب را محاسبه می‌کند. لذا با توجه به خصوصیات آن می‌تواند برای کنترل این خاک‌ورز بکاربرده شود. تابع تبدیل کنترلر PID بهص صورت زیر است:

$$G_c = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \qquad (۲)$$

که در آن K_p، K_d و K_i به ترتیب ضرایب تناسبی، مشتقگیر و انتگرالگیر هستند. با توجه به بازخوردی بودن آن، کنترلر برای مدار خارجی سیستم کنترل خاک‌ورز استفاده می‌شود. این سه پارامتر به روش آزمون و خطا تنظیم شده‌اند تا زمانی که سیگنال مناسب برای سوپاپ کنترل جهت سلنوئیدی تناسبی بدست آید.

۲-۳- سیستم کنترل فعال نیرو

یکی از معایب کنترلرهای PID عدم قابلیت آنها در مواجه با اغتشاشات در سرعت بالا می‌باشد. در این مرحله، کنترلر PID با کنترل فعال نیرو ترکیب می‌گردد. اولین بار هویت و بوردس یک بسته کامل از این سیستم پیشنهاد دادند که اغتشاشات وارده به سیستم را کاهش داده و نتایج نشان داد که سیستمهایی که از این تکنیک جهت کنترل آن استفاده می شود در مقابل اغتشاشات خارجی و داخلی پایداری بالاتری دارند (Hewit and Burdess., 1981). به این ترتیب کارآیی سیستم با دو درجه آزادی شدن (2-DOF) کنترلر افزایش محسوسی خواهد یافت. در حقیقت کنترل فعال نیرو یک پتانسیل جدیدی برای غلبه اغتشاش ایجاد می کند (Mailah., 1998). معادله AFC از قانون دوم حرکت نیوتن مشتق شده است. روش AFC کاربردی شامل اندازه گیری مستقیم و تخمین تعدادی از پارامترهاست (جرم خاک ورز، نیروی عملگر اندازه‌گیری شده، شتاب و اینرسی جرمی تخمینی چرخ تثبیت) جهت کاهش اغتشاشات و نویز است. بنابراین، نیروی اغتشاش تخمینی (F') از فرمول زیر محاسبه می گردد

$$F' = F_a' - M'a' \qquad (۳)$$

که در آن F، M و a به ترتیب مجموع نیروهای عمل کننده بر روی بازوی چرخ، جرم و شتاب بازوی چرخ می‌باشند. همچنین F'_a نیروی اعمال شده و a' شتاب واقعی هستند که به ترتیب توسط مبدل‌های نیرو و شتاب‌سنج اندازه‌گیری می‌شوند، M' نیز جرم تخمین زده است. عملکرد این روش به چگونگی تخمین جرم تخمینی خاک ورز نیز بستگی دارد. در این مقاله جرم تخمینی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی[1] تنظیم گشته است. شکل ۳ ساختار شماتیک سیستم کنترل فعال نیرو را نشان می‌دهد.

[1]Artificial neural network

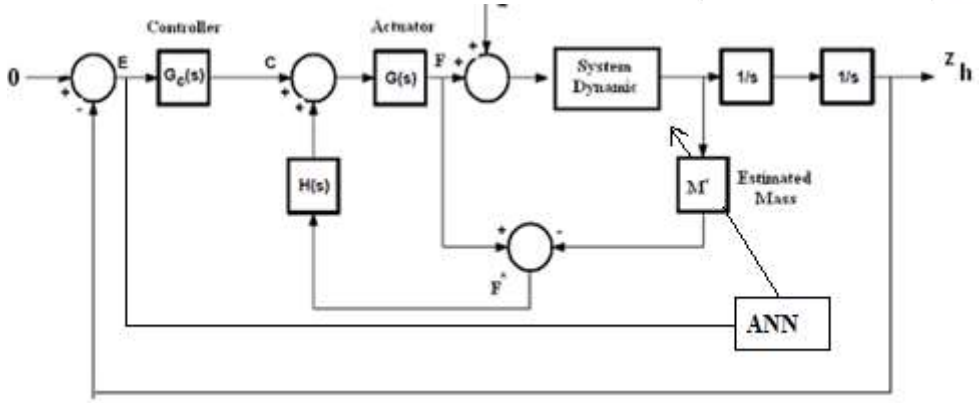

Figure 3. A representation block diagram of an AFC technique

شکل ۳. ساختار شماتیک سیستم کنترل فعال نیرو

۴-۲- شبیه‌سازی

نرم افزار MATLAB/Simulink جهت مدلسازی و شبیه‌سازی سیستم کنترل شامل کنترلر PID و AFC استفاده گردید. در ابتدا کل پارامترهای مورد نیاز کنترلر (AFC and PID) بدست آمدند. مهمترین سیگنال بازخورد ، خروجی موقعیت زاویه ای میله رابط چرخ تثبیت عمق است و سیگنال بازخورد دوم سیگنال نیروی سیلندر هیدرولیک محاسبه شده است. مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی در این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است. ضرایب بهره PID در ابتدا با روش سعی و خطا به ترتیب ۱۵۰۰، ۴۵۰ و ۱۲۰۰ بدست آورده شد. مدل دینامیکی سیستم بر اساس معادله ۱ پدید آورده شد و دو اغتشاش به قرار زیر به سیستم تحمیل شد

- موج سینوسی با دامنه ۱/۲ سانتیمتر و فرکانس ۰/۸ هرتز
- تابع پله با ارتفاع ۱۵ سانتیمتر

جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی خاک‌ورز عمق متغیر

Table 1. The parameters of variable depth subsoiler

Description	Value
Mass of VDS	75 kg
Friction of Wheel	0.4
Length of Gauge Wheel link	60 cm

بلوک دیاگرامی شبیه‌سازی زیرشکن عمق متغیر که در نرم‌افزار شبیه‌سازی گردیده است در شکل ۴ نشان داده شده است. پاسخ سیستم به اغتشاش‌های مذکور و عملکرد دو تکنیک کنترل شبیه سازی شده و مقایسه شده شامل PID و NeuroAFC در بخش نتایج و بحث نشان داده خواهد شد.

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

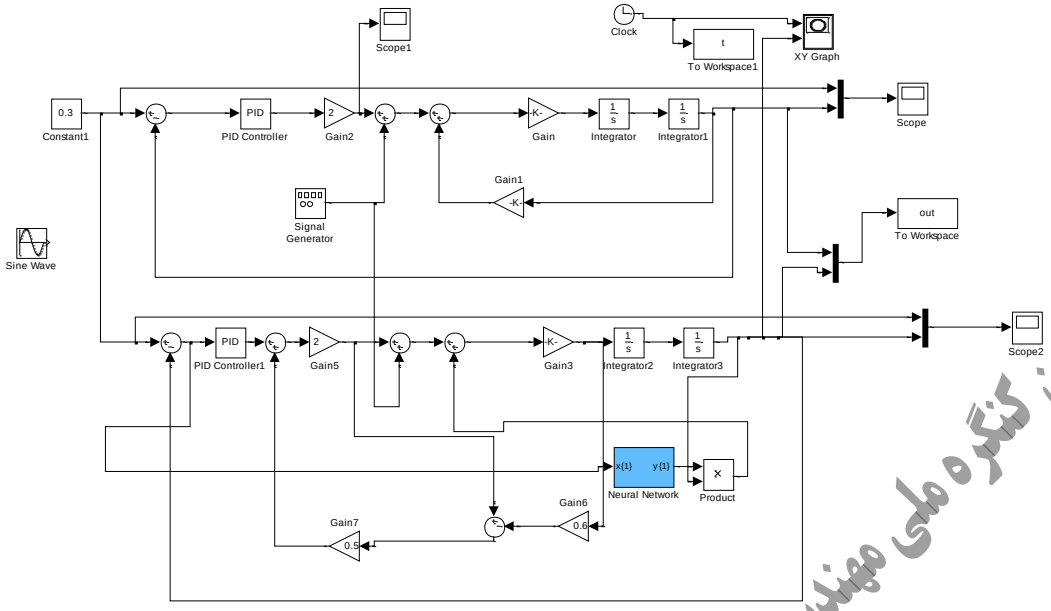

Figure 4. Simulation block diagram of variable depth subsoiler controlled by NeuroAFC in Simulink

شکل ۴. بلوک دیاگرامی شبیه‌سازی زیرشکن عمق متغیر کنترل شده با NeuroAFC در simulink

۳- نتایج و بحث

پاسخ سیستم کنترل در مقابل اغتشاش‌های سینوسی و ورودی تابع پله‌ای و سینوسی در شکل ۵ آورده شده است. همانطور که در شکل مشخص است جابجایی در زمان با استفاده از روش NeuroAFC کمتر می‌باشد و در زمان ورود تابع پله میزان فراجهش (overshoot) سیستم کمتر بوده است. همچنین در زمان وارد نمودن موج سینوسی بعنوان اغتشاش ناهمواری زمین سیستم کنترل NeuroAFC بهتر عمل نموده و نسبت به کنترلر PID دقیق‌تر عمل می‌نماید به طوری‌که بسیار پاسخ بسیار نزدیک به سیگنال ورودی می‌باشد.

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

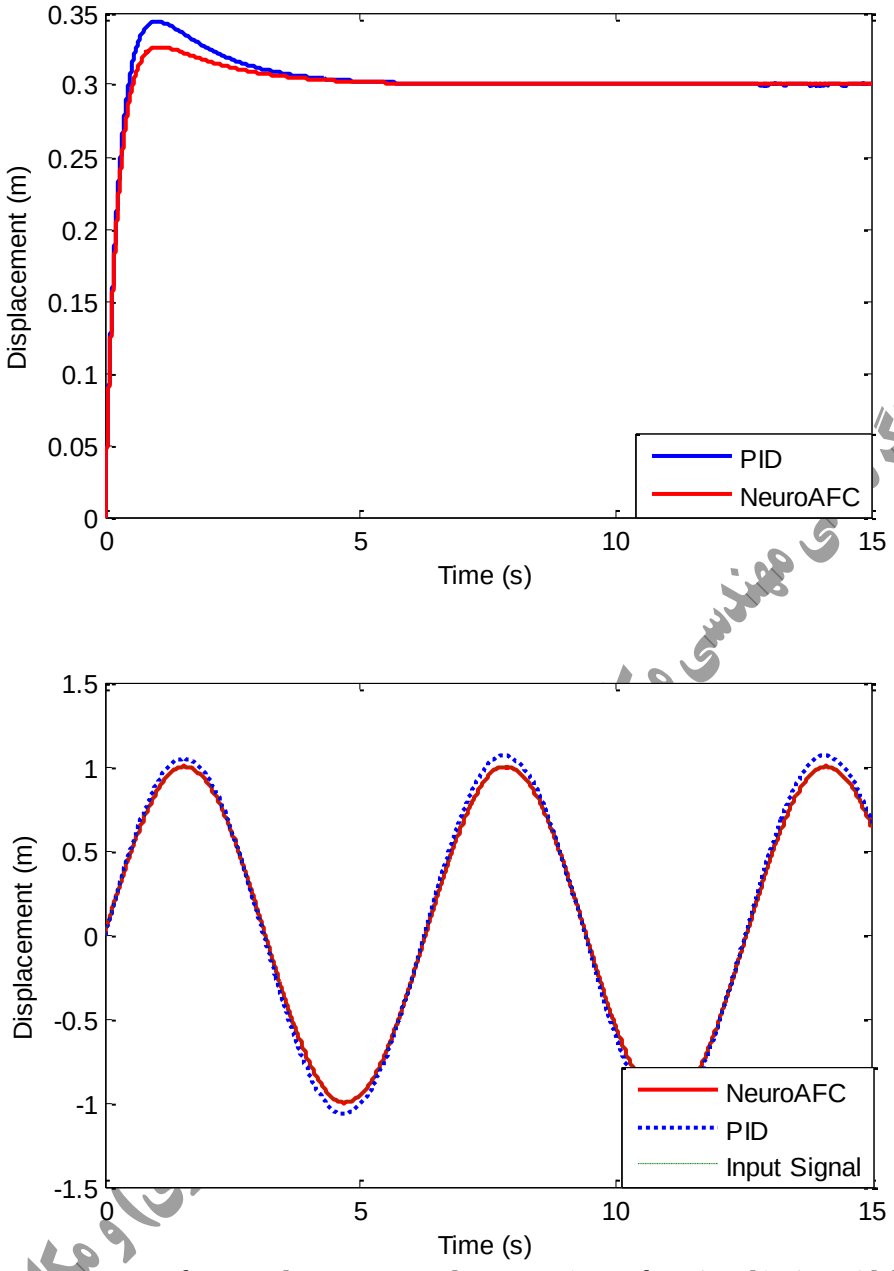

Figure 5. Response of PID and NeuroAFC schemes to a) step function; b) Sinusoidal function

شکل ۵. پاسخ روش‌های PID و NeuroAFC در مقابل الف) تابع پله ب) موج سینوسی

نتایج نیروی عملگر در استفاده از دو روش کنترل در مواجه با دو اغتشاش در شکل ۶ آورده شده است. در این حالت نیز میزان نیروی موردنیاز عملگر در زمان استفاده از تکنیک NeuroAFC پایین تر از زمان استفاده از PID می‌باشد. اگرچه این اختلاف در زمان وارد نمودن موج سینوسی بسیار مشخص می‌باشد و استفاده از این کنترلر میزان نیرو را بسیار کاهش داده است.

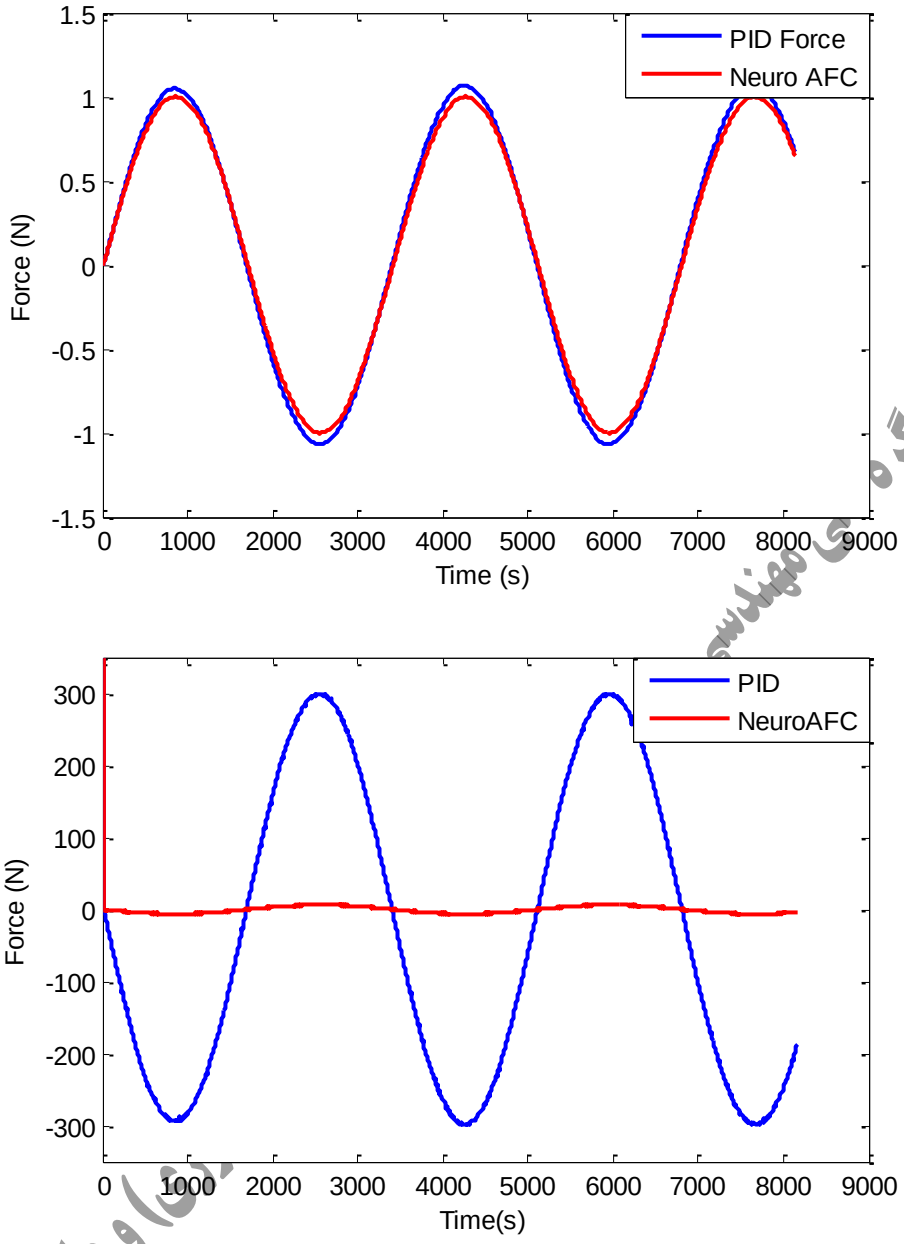

Figure 6. Actuated force of the system a) step function; b) Sinusoidal function.

شکل ۶. نیروی عملگر سیستم الف) تابع پله ب) موج سینوسی

۴- نتیجه‌گیری

همانطور که بیان شد لایه سخت خاک اصلی‌ترین مانع رشد ریشه گیاه و عامل کاهش تولید در مزارع می‌باشد. از سوی دیگر، استفاده از خاک‌ورز زیرشکن جهت شکستن لایه های سخت منجر به بالا رفتن مصرف سوخت و توان کششی لازم می‌شود. در واقع همانطور که بررسی نتایج تحقیقات محققان مشخص می کند، کشاورزی دقیق منجر به کاهش هزینه‌ها، وقت و استفاده کمتر از انرژی و نهاده‌ها می‌شود. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که در خاک‌ورزی دقیق عمق عملیات با توجه به تغییرپذیری مکانی مقاومت سخت لایه خاک تعیین می‌شود و سخت لایه را براساس نقشه‌های آماده شده شکست. در این راستا خاک‌ورز عمق متغیر نیاز به سیستم کنترلی دارد که بتواند عمق کار را بطور آنلاین کنترل و تنظیم نماید. در این تحقیق امکان بهبود عملکرد یک دستگاه زیرشکن عمق متغیر توسط طراحی و استفاده از یک روش کنترل هوشمند با نام کنترل

نیروی فعال (AFC) بررسی شد. عملکرد روش AFC با کنترلر تناسبی-انتگرالگیر-مشتقگیر (PID) در نرم افزار MATLAB/Simulink شبیه‌سازی و مقایسه شدند. همچنین روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) در حلقه AFC جهت محاسبه پارامتر جرم تخمینی بکار گرفته شد و سیستم کنترل با نام NeuroAFC نامگذاری گردید. نتایج این مطالعه نشان دادکه سیستم کنترل NeuroAFC عملکرد بهتری در افزایش کارآیی زیرشکن عمق متغیر موردنظر خواهد داشت.

۵- مراجع

- Abbaspour-Gilandeh, Y., Khalilian, A., Reza, A., Alireza, K., & Sadati, S. H. (2005). Energy savings with variable-depth tillage. In Proceedings of the 27th Southern Conservation Tillage Systems Conference, Florence, South Carolina, USA, 27-29 June, 2005 (pp. 84-91). North Carolina Agricultural Research Service, North Carolina State University.
- Adamchuk, V. I., Hummel, J. W., Morgan, M. T., & Upadhyaya, S. K. (2004). On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, *44*(1), 71-91.
- Alimardani, R., Abbaspour-Gilandeh, Y., Khalilian, A., Keyhani, A., & Sadati, S. H. (2007). Energy Savings with Variable-Depth Tillage–A Precision Farming Practice. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, *2*(4), 442-447.
- Condon, S. F., Ward, S. M., Holden, N. M., & McGee, A. (2001). The development of a depth control system for a peat milling machine, part I: sensor development. *Journal of agricultural engineering research*, *80*(1), 7-15.
- Fulton, J. P., Wells, L. G., Shearer, S. A., & Barnhisel, R. I. (1996). Spatial variation of soil physical properties: a precursor to precision tillage. *ASAE Paper*, 961002, 1-9.
- Gohari, M. (2005).). *Design, construction and evaluation of a variable depth subsioler*. Master thesis. Isfahan University of technology. Isfahan (Persian).
- Gohari, M., Hemmat, A., & Afzal, A. (2010). Design, construction and evaluation of a variable depth tillage implement equipped with a global position system (GPS), *Iranian Journal of Biosystems Engineering (Iranian Agricultural Science)*, *1*(41), 1-9 (Persian).
- Gohari, M. & Hemmat, A. (2007). A tractor-mounted soil cone penetrometer for mapping spatial variability of soil strength. *New Finding in Agriculture*, *1*(3), 233- 240 (Persian).
- Gohari, M., Hemmat, A., & Afzal, A. (2006). 970 A Design, Development of a Variable-Depth Subsoiler for Site-Specific Tillage: A Study of Response Time. VDI BERICHTE, 1958, 293.
- Hemmat, A., & Adamchuk, V. I. (2008). Sensor systems for measuring soil compaction: Review and analysis. *Computers and electronics in agriculture*, *63*(2), 89-103.
- Hewit, J. R., & Burdess, J. S. (1981). Fast dynamic decoupled control for robotics, using active force control. *Mechanism and Machine Theory*, *16*(5), 535-542.
- Khalilian, A., Han, Y. J., Dodd, R. B., Sullivan, M. J., Gorucu, S., & Keskin, M. (2002). A control system for variable depth tillage. ASAE PaperNo, 21209.
- Mailah, M. (1998). *Intelligent active force control of a rigid robot arm using neural network and iterative learning algorithms*. PhD Thesis, University of Dundee, UK.
- Lee, J., Yamazaki, M., Oida, A., Nakashima, H., & Shimizu, H. (1998). Electro-hydraulic tillage depth control system for rotary implements mounted on agricultural tractor design and response experiments of control system. *Journal of Terramechanics*, *35*(4), 229-238.
- Raper, R. L., Reeves, D. W., Shaw, J. N., Van Santen, E., & Mask, P. L. (2007). Benefits of site-specific subsoiling for cotton production in Coastal Plain soils. *Soil and Tillage Research*, *96*(1-2), 174-181.
- Raper, R.L. (1999). Site-specific tillage for site-specific compaction: is there a need? In: Proceedings of the International Conference on Dryland Conservation/Zone Tillage, China Agriculture University, Beijing, China, pp. 66–68.
- Yasin, M., Grisso, R. D., & Lackas, G. M. (1992). Non-contact system for measuring tillage depth. *Computers and electronics in agriculture*, *7*(2), 133-147.