



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Simulation and Redesign of Tractor Front End Loader Hydraulic System Using Fluidsim Software

Hasan Ghafori ^{a,*} ^a Department of Biosystems Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-10-28

Revised: 2025-04-28

Accepted: 2025-05-13

Keywords:

Tractor;
Loader;
Hydraulic;
Simulation;
FluidSIM software.

ABSTRACT

Tractor front end loaders are one of the widely used tools in civil and agricultural operations such as moving, conveying and loading civil materials and agricultural products. Manufacturers of road and agricultural machinery in Iran, in order to use the capabilities of tractors, have tried to manufacture and install hydraulic loader on tractors. Existing loaders have limitations such as creating a floating mode for the loader and the simultaneous use of two handles by the operator. Therefore, the main objective of this research is to replace a new hydraulic system in order to add floating mode to the loader and more precise control of the cylinders by one handle. For this purpose, first a behavior prediction model for determining the speed of the cylinders in terms of flow rate and pressure was extracted and verified using the response surface method. Then, the hydraulic system was designed using two approaches: using a fully hydraulic circuit and an electrohydraulic circuit approach. FluidSIM4.2 software was used for design and simulation. Position and velocity diagrams related to different cylinder stimulation modes were drawn. Validation of the simulation process was done by comparing the simulation results and mathematical calculations. The results showed that the presented model has high accuracy ($R^2=0.92$) for predicting cylinder speeds. The new design is able to perform all vertical and angling movements of the loader correctly. Also, by adding a quick drop valve to the hydraulic circuit of the boom, the opening velocity of the boom cylinder increased by 17%.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.35759.2747>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: h.ghafori569@iau.ac.ir

How to cite this article:

H. Ghafori, "Simulation and redesign of tractor front end loader hydraulic system using FluidSIM software," Journal of Modeling in Engineering, 23 82 (2025): 237-251, doi: 10.22075/jme.2025.35759.2747

شبیه سازی و بازطراحی سیستم هیدرولیک بیل جلوی تراکتور با استفاده از نرم افزار FluidSIM

حسن غفوری^{۱*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۰۷	
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳	
واژگان کلیدی:	
تراکتور،	بیل های جلو تراکتوری یکی از ادوات پرکاربرد در عملیات عمرانی و کشاورزی مانند جابجایی، انتقال و بارگیری مصالح و تولیدات کشاورزی است. سازندگان ماشین های راه سازی و کشاورزی در کشور ایران، به منظور استفاده از قابلیت های تراکتورهای موجود، اقدام به ساخت و نصب بیل های هیدرولیکی به روی تراکتورها نموده اند. بیل های موجود محدودیت هایی مانند عدم ایجاد حالت شناوری برای بیل و استفاده همزمان از دو دسته توسط اپراتور را به همراه دارد. لذا هدف اصلی از این تحقیق، جایگزین کردن یک سیستم هیدرولیک جدید به منظور اضافه کردن قابلیت شناوری برای بیل و کنترل دقیق تر سیلندرهای توسط یک دسته است. برای این منظور، ابتدا یک مدل پیش بینی رفتار برای تعیین سرعت سیلندرهای بر حسب دبی و فشار به روش رویه پاسخ، استخراج و راستی آزمایی شد. سپس طراحی سیستم هیدرولیک با دو رویکرد استفاده از مدار کاملاً هیدرولیکی و رویکرد مدار الکتروهیدرولیکی انجام شد. برای طراحی و شبیه سازی از نرم افزار FluidSIM 4.2 استفاده شد. نمودارهای موقعیت و سرعت مربوط به حالت های مختلف تحریک سیلندرهای ترسیم گردید. نتایج نشان داد که مدل ارائه شده از دقت بالایی ($R^2=0.92$) برای پیش بینی سرعت سیلندرهای برخوردار است. طراحی جدید قادر است کلیه حرکت های عمودی و زاویه دار کردن بیل را به درستی انجام دهد. همچنین با اضافه کردن شیر تغذیه سریع به مدار هیدرولیک بوم، سرعت بازشدن سیلندر بوم، ۱۷ درصد افزایش یافت.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.35759.2747>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

از ادواتی که به طور گسترده در کشاورزی و راه سازی استفاده می شود، بیل های جلوی تراکتور است که کنترل آن از زمان های دور تا به امروز همچنان به صورت هیدرولیکی-دستی انجام می شود. این در حالی است که تجهیزات و قابلیت های اضافه شده به ماشین های مشابه، مانند لودرها، بیل ها و بولدوزرها بسیار پیشرفت نموده است و قابل پیاده سازی روی بیل های جلوی تراکتور در داخل کشور است. استفاده از علوم جدید و تجهیزات پیشرفته در طراحی و ساخت ماشین های عمرانی، به دلیل دقت و راحتی در زمان

ورود اتوماسیون در حوزه های مختلف عمرانی و کشاورزی منجر به افزایش بهره وری، دقت، ایمنی و مقبولیت فعالیت ها و فرآیندهای مرتبط با این دو بخش شده است. امروزه در زمینه طراحی و ساخت ماشین های عمرانی، بسیاری از ادوات و تجهیزاتی که روی تراکتورها نصب می شوند به صورت الکتریکی یا الکترونیکی کنترل و پایش می شوند. اما در کشور ایران، بسیاری از ماشین های عمرانی، تجهیزات و ادوات مرتبط با آنها به صورت دستی کنترل می گردند. یکی

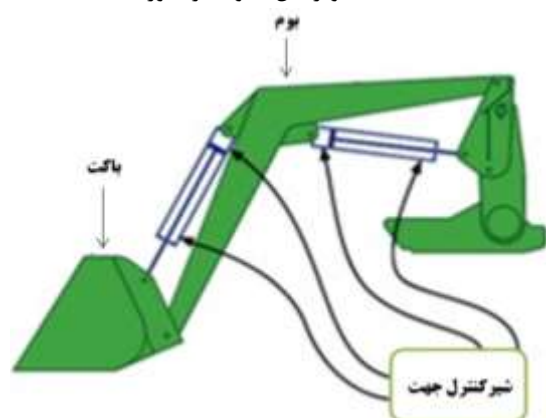
* پست الکترونیک نویسنده مسئول: h.ghafari569@iaui.ac.ir

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، واحد اصفهان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

استناد به این مقاله:



الف- تصویر بیل جلوی تراکتور



ب- طرح‌واره بیل جلوی تراکتور

شکل ۱- تصویر و طرح‌واره بیل جلوی تراکتور.

امروزه روش‌های مختلفی برای طراحی سیستم‌های هیدرولیکی وجود دارد که یکی از آنها طراحی به روش مدل‌سازی است. رویکرد طراحی سیستم مبتنی بر مدل که یک روش ریاضی و گرافیکی است، امکان طراحی پیاده‌سازی، تست و ارزیابی سیستم‌های مهندسی پیچیده را در یک محیط نرم‌افزاری فراهم می‌کند [۲]. نمونه‌هایی مانند ماشین‌های راه‌سازی و کشاورزی، خودرو، هواضا [۳] و راه‌آهن [۴]، سیستم‌هایی هستند که می‌توانند از طراحی مبتنی بر مدل بهره ببرند. با استفاده از رویکرد طراحی سیستم مبتنی بر مدل، هزینه و زمان توسعه محصول را می‌توان به میزان قابل توجهی کاهش داد. نرم‌افزارهای مختلف مدل‌سازی مانند SimHydraulics، Amesim، MATLAB و FluidSIM برای مدل‌سازی سیستم‌های هیدرولیک استفاده شده است. در تحقیقی سیلندرهای

انجام کار، خستگی اپراتور را کاهش داده و به اپراتور اجازه می‌دهد روی عملکرد دستگاه تمرکز کنند. تحقیقات نشان می‌دهد استفاده از سیستم‌های خودکار روی ماشین‌های حفاری می‌تواند به اپراتورهای کم‌تجربه کمک کند تا وظایف داده شده را به‌روشی کارآمد و با کیفیت قابل قبول انجام دهند. به‌علاوه، این ماشین‌های خودکار پتانسیل این را دارند که فعالیت‌های جابجایی، بارگیری و تخلیه مواد را در محیط‌های آلوده و خطرناک تسهیل کنند [۱]. بیل تراکتوری (شکل ۱- الف) یکی از ادوات پرکاربردی است که با اتصال به تراکتور کار می‌کند. بیل تراکتوری توان مورد نیاز خود را از تراکتور دریافت می‌کند و برای عملیات‌های کشاورزی (جابجایی علوفه، غلات و کود دامداری) و عملیات‌های ساختمانی و راه‌سازی (حفاری، جابجایی خاک و مصالح) استفاده می‌شود. بیل تراکتوری در دو مدل جلو تراکتور^۲ و پشت تراکتور^۳ بر روی انواع تراکتورهای زراعی و باغی در داخل ایران نصب می‌شود. این بیل‌ها با استفاده از توان هیدرولیک کار می‌کنند و توان مورد نیاز خود را از طریق سیستم هیدرولیک تراکتور و یا از طریق نصب سیستم هیدرولیک جداگانه به‌روی تراکتور دریافت می‌کنند. در تراکتورهایی که دارای چهار خروجی هیدرولیک هستند، مانند تراکتورهای فرگوسن مدل ۳۹۹، ۸۰۰ و ۱۵۰۰، نیازی به تعبیه سیستم هیدرولیک جدید روی تراکتور نداشته و از سیستم هیدرولیک تراکتور برای تغذیه و کنترل بیل استفاده می‌شود. در این حالت، سرعت حرکت سیلندرهای هیدرولیکی، تابع مقدار دبی سیستم هیدرولیک تراکتور است که به‌دلیل پایین بودن دبی سیستم هیدرولیک تراکتور، حرکت سیلندرهای هیدرولیکی بیل با سرعت کم انجام می‌شود. در روش دیگری که بیشتر متداول است، مدار هیدرولیک بیل لودر از سیستم هیدرولیک تراکتور مستقل می‌شود. برای این منظور از مخزن، پمپ و شیر جداگانه استفاده می‌گردد. در این روش، یک پمپ هیدرولیک پیستونی با اتصال به محور تواندهی تراکتور^۴، روغن را از مخزن گرفته و به‌سمت شیر و سیلندرهای هیدرولیکی بیل می‌فرستد. برای هدایت و کنترل سیلندرهای هیدرولیکی از شیرهای کنترل جهت استفاده می‌شود (شکل ۱- ب).

^۴ Power Take Off Shaft^۲ Front loader^۳ Rear loader

هیدرولیکی یک لودر به‌وسیله نرم‌افزار Simulink شبیه‌سازی شده است که نتایج آن حاکی از کاهش زمان و کاهش خطا در انجام عملیات خاک‌برداری بوده است [۵]. بهینه‌سازی الگوی باز شدن شیرهای کنترل دبی لودر از جمله تحقیقاتی است که با ارائه الگوهای ریاضی برای شیر کنترل دبی، سرعت سیستم هیدرولیک را کنترل کرده و عملکرد آن را ارتقا داده است [۶]. نتایج شبیه‌سازی سیستم هیدرولیک اتصال سه نقطه تراکتور که از شیر پرپورشنال برای کنترل سرعت استفاده شده بود، نشان داد که اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های عملی بین ۴ تا ۱۲/۵ درصد بوده است [۷]. استفاده از شبیه‌سازی به‌روش SimHydraulics و SimMechanics نیز برای مدل‌سازی رفتار سیلندرهای هیدرولیکی لودرها کاربرد داشته است [۸]. شبیه‌سازی تجهیزات هیدرولیکی و مکانیکی لودر توسط نرم‌افزار AMESim و مقایسه نتایج مربوط با فشار سیستم هیدرولیک با نتایج تجربی نشان داد که اختلاف نتایج کمتر از ۱۰ بار بوده است [۹]. نتایج مدل‌سازی قسمت‌های مختلف سیستم هیدرولیک لودر چرخ لاستیکی شامل پمپ اصلی، شیر کنترل جهت، جبران‌کننده جریان و اهرم جوی‌استیک به‌روش AMESim، نشان داد که هم‌بستگی خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی وجود دارد [۱۰]. در تحقیقی از نرم‌افزار FluidSIM برای طراحی سیستم هیدرولیک بازوی بلندکننده استفاده شد و نتایج شبیه‌سازی با محاسبات ریاضی مقایسه گردید. نتایج نشان دادند که روش استفاده شده در این تحقیق به‌خوبی سیستم هیدرولیک را شبیه‌سازی کرده است [۱۱]. همچنین استفاده از نرم‌افزار FluidSIM برای شبیه‌سازی کنترل حرکت و سرعت سیلندرهای هیدرولیکی با استفاده از شیرهای الکتروهیدرولیک گزارش شده است [۱۲]. این نرم‌افزارهای مدل‌سازی دارای قابلیت‌های مدل‌سازی گرافیکی هستند، که کاربر می‌تواند به‌راحتی مدل یک سیستم را با کنار هم قراردادن اجزای فیزیکی آن بسازد. فعالیت‌های تحقیقاتی و صنعتی زیادی روی ماشین‌هایی که با سیستم هیدرولیک کار می‌کنند انجام شده است. عمده این فعالیت‌ها در زمینه حرکت و کنترل محرک‌های هیدرولیکی اعم از سیلندرهای هیدروموتورها بوده است [۱۳]. دلایلی مانند ناپایداری سیستم هیدرولیک، تأخیر و وابستگی سیستم هیدرولیک

به بار، دشواری طراحی یک سیستم کنترل پایدار را افزایش می‌دهد [۱۴]. استفاده از قابلیت سیستم‌های الکتروهیدرولیک در ماشین‌های راه‌سازی، منجر به تحقیقات نوین در زمینه کنترل این ماشین‌ها از راه دور و بدون سرنشین شده است [۱۵]. تحقیقات گسترده‌ای روی بهینه‌سازی مسائل مهندسی انجام شده است که عمدتاً شامل دو دسته کلی کلاسیک و فراابتکاری است [۱۶ و ۱۷]. در تحقیقی بهینه‌سازی سیستم هیدرولیک ماشین‌های راه‌سازی به‌روش کلاسیک انجام شد. در این تحقیق سیستم هیدرولیک بوم، باکت و بازوی لودرها بهینه‌سازی شد [۱۸]. در بسیاری از مقالات علمی از یک روش پیش‌بینی برای رفتار خروجی‌های متغیر وابسته استفاده می‌شود. به‌منظور پیش‌بینی رفتار متغیر خروجی توابع چندمتغیره، می‌توان از روش رویه پاسخ (RSM)^۵، شبکه عصبی و روش‌های دیگر استفاده نمود. روش رویه پاسخ به‌عنوان یک تکنیک آماری، برای پیش‌بینی رفتار متغیر خروجی و برازش مدل‌های تجربی و آزمایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹ و ۲۰]. در این روش، اثر هر کدام از متغیرهای مستقل، برهم‌کنش‌ها و اثرات درجه دوم آنها در معادله رگرسیون لحاظ شده و شکل موضعی سطح پاسخ ترسیم می‌شود.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که سه روش برای کنترل سیستم هیدرولیک در بیل‌های جلوی تراکتور قابل استفاده است که شامل کنترل هیدرولیک دستی دو اهرمی، کنترل هیدرولیک دستی جوی‌استیک^۶ تک اهرمی و کنترل الکتروهیدرولیک جوی‌استیک تک اهرمی است. کنترل هیدرولیک دستی دو اهرمی، به‌دلیل هزینه کمتر، در بیشتر بیل‌های جلوی تراکتور استفاده می‌شوند که قابلیت کاربرپسندی کمی دارند. کنترل هیدرولیک دستی جوی‌استیک تک اهرمی، به‌دلیل راحتی کار و داشتن قابلیت شناوری، جایگزین مناسبی برای روش کنترل قبلی است. کنترل الکتروهیدرولیک، با توجه به اینکه قابلیت کنترل دقیق سیلندرهای سرعت دلخواه اپراتور را دارد و امکان نصب سیستم کنترل از راه دور بر روی آن میسر است، در آینده جایگزین روش‌های قبلی شده و امکان اتوماسیون، کنترل از اتاق فرمان و کنترل بدون سرنشین این ادوات را فراهم می‌آورد. لذا تحقیق حاضر یک سیستم هیدرولیک جایگزین را برای کنترل راحت و دقیق بیل‌های جلوی تراکتور با استفاده از تجهیزات هیدرولیک پیشرفته مانند

^۶ Joy stick^۵ Response Surface Methodology

$$P = p * Q \quad (۲)$$

برای تعیین مشخصه‌های سیلندرها نیاز به محاسبه مساحت پیستون، مساحت دسته پیستون، حجم سیلندر، زمان باز شدن سیلندر، سرعت باز شدن سیلندر و نیروی قابل انتقال سیلندر است. حجم سیلندر با توجه به مساحت پیستون و کورس سیلندر، مطابق با رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۲۲].

$$V = L * A \quad (۳)$$

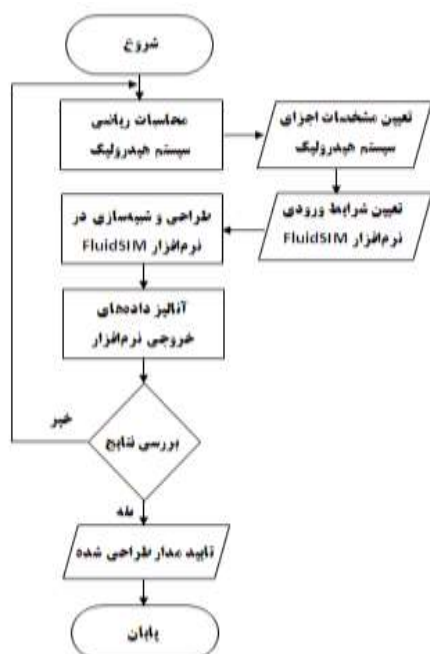
زمان و سرعت باز شدن سیلندر به دبی ورودی بستگی دارد و به ترتیب از معادله‌های ۴ و ۵ به دست می‌آیند [۲۲].

$$t = A * L / Q \quad (۴)$$

$$v = L / t \quad (۵)$$

نیروی قابل انتقال توسط سیلندر در موقع باز شدن، تابع فشار و سطح مقطع پیستون است و با توجه به رابطه ۶ تعیین می‌گردد [۲۳].

$$F = p * A \quad (۶)$$



شکل ۲- مراحل انجام طراحی و شبیه سازی.

بخشی از این محاسبات به عنوان پارامترهای ورودی در نرم افزار FluidSIM و بخشی هم برای راستی آزمایی نتایج مدل پیش بینی شده استفاده می‌شود.

اهرم مخصوص جوی استیک و شیرهای پروپورشنال ارائه می‌کند.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از نرم افزار FluidSIM4.2 که یک نرم افزار قدرتمند و جامع در عرصه شبیه سازی و طراحی سیستم‌های هیدرولیک و نیوماتیک است، استفاده شد. مراحل مختلف انجام این شبیه سازی در شکل (۲) نشان داده شده است. طراحی سیستم هیدرولیک بر مبنای بیل‌های موجود در کشور ایران انجام شده است. مشخصات بیل مورد نظر که به روش تجربی اندازه گیری شد، در جدول ۱ نشان داده شده است. بیل در نظر گرفته شده دارای چهار سیلندر هیدرولیکی دوطرفه است که دو سیلندر برای بالا و پایین بردن بوم و دو سیلندر برای زاویه دار کردن باکت استفاده می‌شود.

جدول ۱- مشخصات فنی بیل جلوی تراکتور.

مشخصات	مقادیر
حداکثر ظرفیت بارگیری	۱۰۰۰ کیلوگرم
حداکثر ارتفاع تخلیه	۲۸۰ سانتی متر
حداکثر ارتفاع بیل	۳۵۰ سانتی متر
عرض باکت	۱۵۰ سانتی متر
حجم باکت	۴۵۰ لیتر
زاویه چرخش باکت	۹۰ درجه
کورس سیلندر بوم و باکت	۱۰۰ سانتی متر و ۷۰ سانتی متر
قطر پیستون و دسته پیستون	۱۰ سانتی متر و ۵ سانتی متر
فشار سیستم هیدرولیک	۱۰۰ بار
جابجایی پمپ هیدرولیک	۳۵ سی سی بر دور

طراحی سیستم هیدرولیک شامل دو بخش طراحی مدارهای هیدرولیک و طراحی مدارهای الکتریکی است. هر دو مدار در نرم افزار FluidSIM4.2 طراحی و ترسیم شد. خلاصه محاسبات انجام شده برای به دست آوردن مشخصات اجزای سیستم هیدرولیک در جدول ۲ آورده شده است. در محاسبات مربوط به پمپ‌ها، تعیین دبی و توان مصرفی پمپ باید مدنظر قرار گیرد. دبی خروجی از پمپ هیدرولیک بر حسب جابجایی پمپ^۷ و سرعت دورانی پمپ از معادله ۱ به دست می‌آید [۲۱].

$$Q = v * n * \eta_{vol} \quad (۱)$$

توان مصرفی در سیستم هیدرولیک به فشار و دبی وابسته بوده و بر اساس معادله ۲ محاسبه می‌گردد [۲۱].

⁷ Displacement pump

جدول ۲- محاسبات مربوط به مشخصات سیستم هیدرولیک.

مشخصات پمپ	PTO = ۱۰۰۰ rpm = سرعت دورانی	PTO = ۵۴۰ rpm = سرعت دورانی
دبی پمپ	$Q = v * n * \eta_{vol}$ $Q = 35 * 1000 * 0.95$ $Q = 33250 \text{ cc/min}$ $Q = 33.2 \text{ l/min}$	$Q = v * n * \eta_{vol}$ $Q = 35 * 540 * 0.95$ $Q = 17955 \text{ cc/min}$ $Q = 17.9 \text{ l/min}$
توان مورد نیاز پمپ	$P = p * Q$ $P = 100 * 33250/600$ $P = 5541 \text{ W}$ $P = 5.54 \text{ kW}$	$P = p * Q$ $P = 100 * 17955/600$ $P = 2992 \text{ W}$ $P = 2.99 \text{ kW}$
مشخصات سیلندر	سیلندر باکت	سیلندر بوم
مساحت پیستون	$A = \pi d^2/4$ $A = \pi * 10^2/4$ $A = 78.5 \text{ cm}^2$	$A = \pi d^2/4$ $A = \pi * 10^2/4$ $A = 78.5 \text{ cm}^2$
مساحت دسته پیستون	$A = \pi d^2/4$ $A = \pi * 5^2/4$ $A = 19.6 \text{ cm}^2$	$A = \pi d^2/4$ $A = \pi * 5^2/4$ $A = 19.6 \text{ cm}^2$
حجم سیلندر	$V = L * A$ $V = 70 * 78.5$ $V = 5495 \text{ cm}^3 = 5.49 \text{ l}$	$V = L * A$ $V = 100 * 78.5$ $V = 7800 \text{ cm}^3 = 7.8 \text{ l}$
زمان باز شدن سیلندر	$t = A * L/Q$ $t = 78.5 * 70/33250$ $t = 0.165 \text{ min} = 9.9 \text{ s}$	$t = A * L/Q$ $t = 78.5 * 100/33250$ $t = 0.236 \text{ min} = 14.1 \text{ s}$
سرعت باز شدن سیلندر	$v = L/t$ $v = 70/9.9$ $v = 7 \text{ cm/s}$	$v = L/t$ $v = 100/14.1$ $v = 7 \text{ cm/s}$
نیروی قابل انتقال سیلندر	$F = p * A$ $F = 70 * 78.5$ $F = 54950 \text{ N} = 54.9 \text{ KN}$	$F = p * A$ $F = 100 * 78.5$ $F = 78500 \text{ N} = 78.5 \text{ KN}$
$Q = \text{دبی (L/min)}$ $v = \text{جابجایی پمپ (L/rev)}$ $n = \text{سرعت دورانی پمپ (rpm)}$ $\eta_{vol} = \text{راندمان پمپ (-)}$	$P = \text{توان پمپ (W)}$ $p = \text{فشار سیستم هیدرولیک (bar)}$ $V = \text{حجم سیلندر (l)}$ $v = \text{سرعت باز شدن سیلندر (cm/s)}$	$L = \text{کورس سیلندر (cm)}$ $A = \text{مساحت سیلندر (cm}^2\text{)}$ $t = \text{زمان باز شدن سیلندر (s)}$ $F = \text{نیرو قابل انتقال (N)}$

پس از محاسبه مشخصات اجزای سیستم هیدرولیک، مقادیر به دست آمده از جدول ۲ به عنوان ورودی برای تنظیمات پمپ و سیلندرها در نرم‌افزار FluidSIM استفاده گردید. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، سه رویکرد برای طراحی و کنترل سیستم هیدرولیک در بیل‌های جلوی تراکتور قابل استفاده است که در ادامه مدارهای طراحی شده برای هر رویکرد تشریح می‌گردد.

۲-۱- طراحی مدار سیستم هیدرولیک با استفاده از

شیر کنترل تحریک دستی دو اهرمی

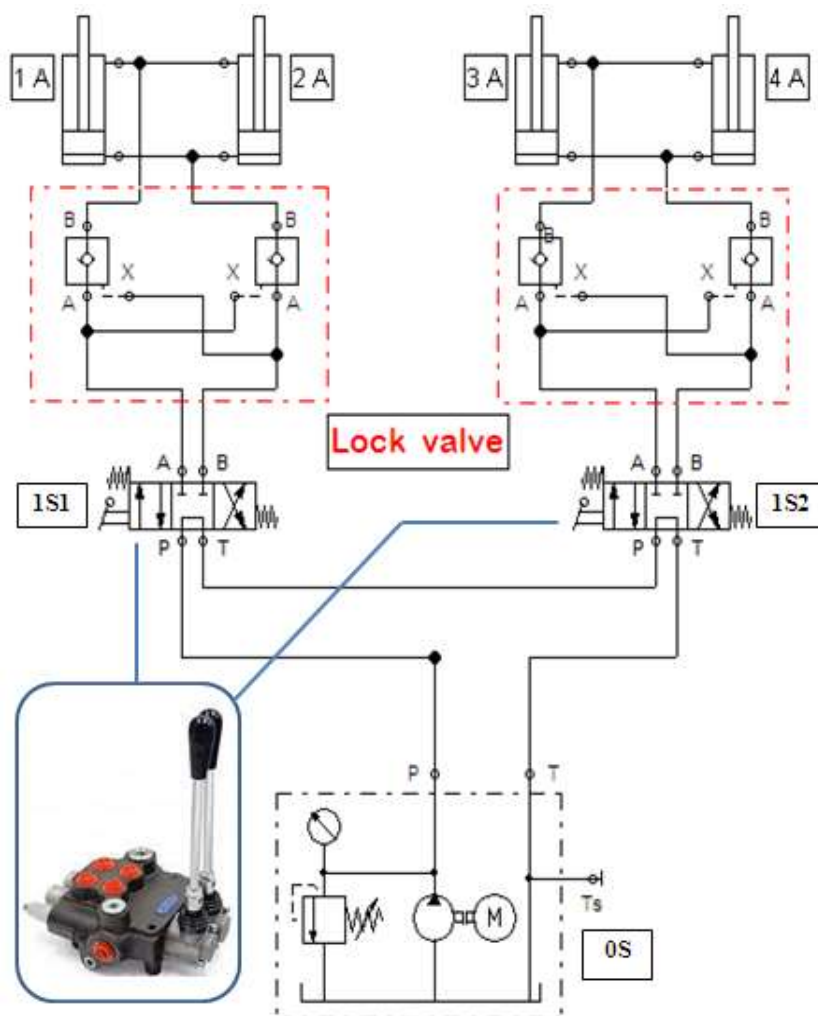
مدار هیدرولیک طراحی شده با استفاده از شیر کنترل تحریک دستی دو اهرمی در شکل (۳) نشان داده شده است. سیلندرهایی A1، A2، A2 و A4 از نوع دوطرفه و شیرهای 1S1 و 1S2 از نوع اهرمی ۴ راهه و سه وضعیتی است که

راه‌اندازی آنها با تحریک دست و برگشت آنها با فنری است. مجموعه 0S که یونیت هیدرولیکی نام دارد شامل مخزن، پمپ، الکتروموتور، شیر فشارشکن، فشارسنج و لوله‌های ارتباطی است. در شکل (۳)، سیلندرهایی A1 و A2 مربوط به کنترل حرکت بوم (حرکت به سمت بالا و پایین) و سیلندرهایی A3 و A4 مربوط به کنترل زاویه باکت (حرکت به سمت جلو و عقب) است. یک مکانیزم قفل‌کن^۸ که در شکل با دو عدد مستطیل قرمز به صورت خط و نقطه نشان داده شده است، مانع از حرکت ناخواسته سیلندرها در موقع پارک و یا وضعیت وسط شیر کنترل جهت می‌گردد. این مدار هیدرولیکی، ساده‌ترین مداری است که روی بیل‌های موجود در کشور نصب می‌گردد و اپراتور مجبور است با یک دست از هر دو اهرم برای حرکت همزمان بوم و باکت

^۸ Lock valve

عملیات‌های انتقال و جابه‌جایی محصولاتی که روی زمین انبار شده‌اند، نیاز به شناور بودن بیل برای پیروی از پستی و بلندی‌های زمین است.

استفاده کند. همچنین به دلیل استفاده از شیرهای سه وضعیتی، سه حالت بالا بردن، پایین آوردن و ثابت بودن برای سیلندرها قابل برنامه‌ریزی است و حالت شناوری برای بوم میسر نیست. این در حالی است که در بسیاری از



شکل ۳- طراحی مدار هیدرولیک بیل جلوی تراکتور موجود توسط نرم‌افزار FluidSIM.

شیر کنترل دبی^۹ در مسیر ورود روغن به سیلندرها بایست، امکان تنظیم سرعت چرخش بایست مهیا گردید و اپراتور قادر خواهد بود با تنظیم این سرعت، زاویه بایست را با دقت بیشتری کنترل کند. همچنین با اضافه نمودن شیر پرکن برگشت سریع^{۱۰}، روغن خروجی از سیلندر به روغن ورودی اضافه شده و مشکل کند بودن سرعت بازشدن سیلندرها بوم برطرف گردید. این قابلیت باعث خواهد شد تا سرعت بلندکردن بار نسبت به طراحی قبل افزایش یابد.

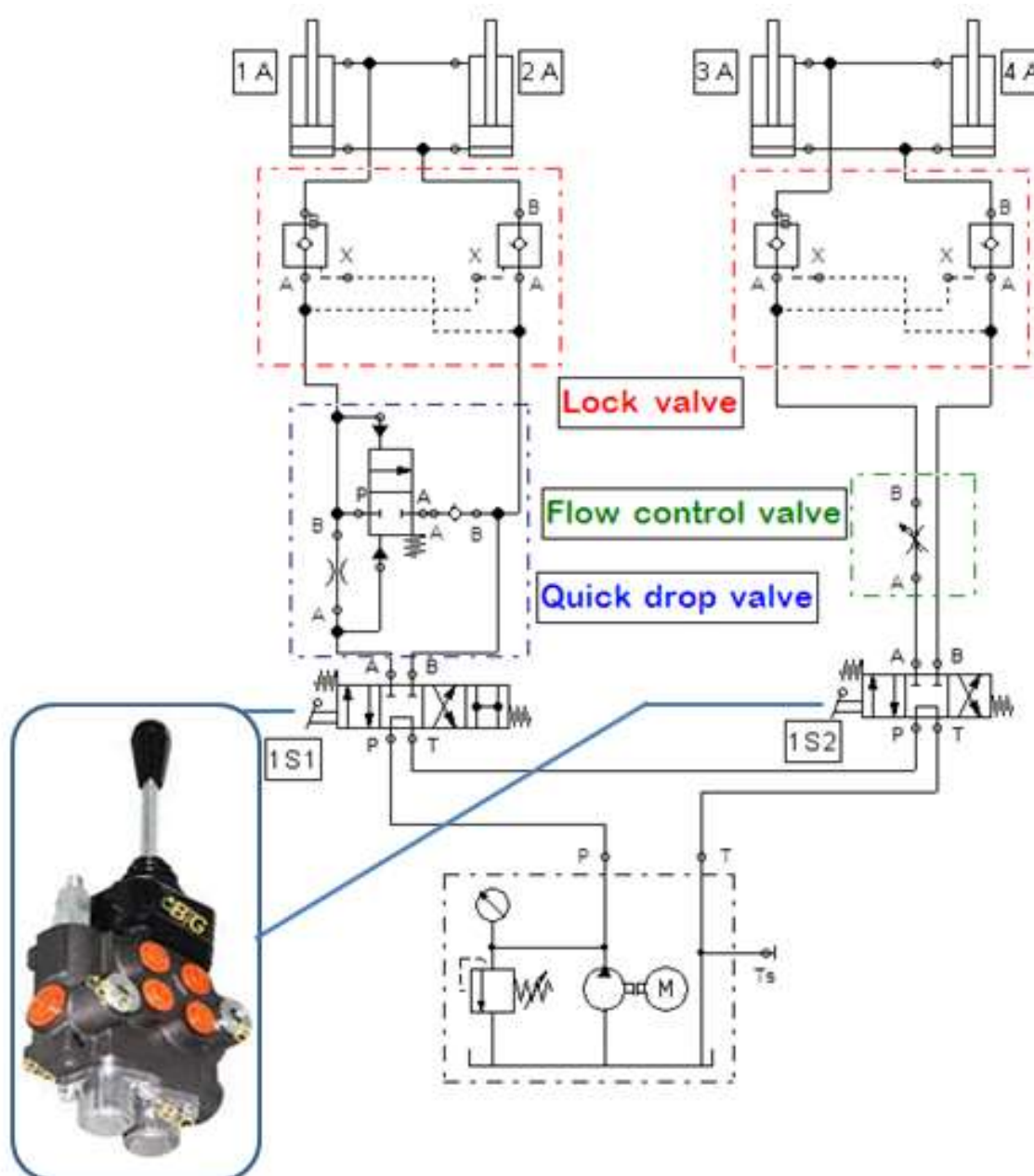
۲-۲- طراحی مدار سیستم هیدرولیک با استفاده از

شیر کنترل تحریک دستی جوی‌استیک

برای رفع نواقص مطرح شده در مدار قبل، مدار هیدرولیک جدیدی مطابق شکل (۴) طراحی گردید که به جای استفاده از شیر کنترل جهت دواهرمی از یک شیر کنترل جهت جوی‌استیک استفاده شد تا اپراتور با یک دسته قادر به کنترل هم‌زمان بوم و بایست باشد. در این طراحی علاوه بر قابلیت شناور بودن بیل، دو قابلیت دیگر نیز برای بهبود عملکرد بیل به سیستم هیدرولیک اضافه شد. با اضافه کردن

¹⁰ Quick drop valve

⁹ Flow control valve



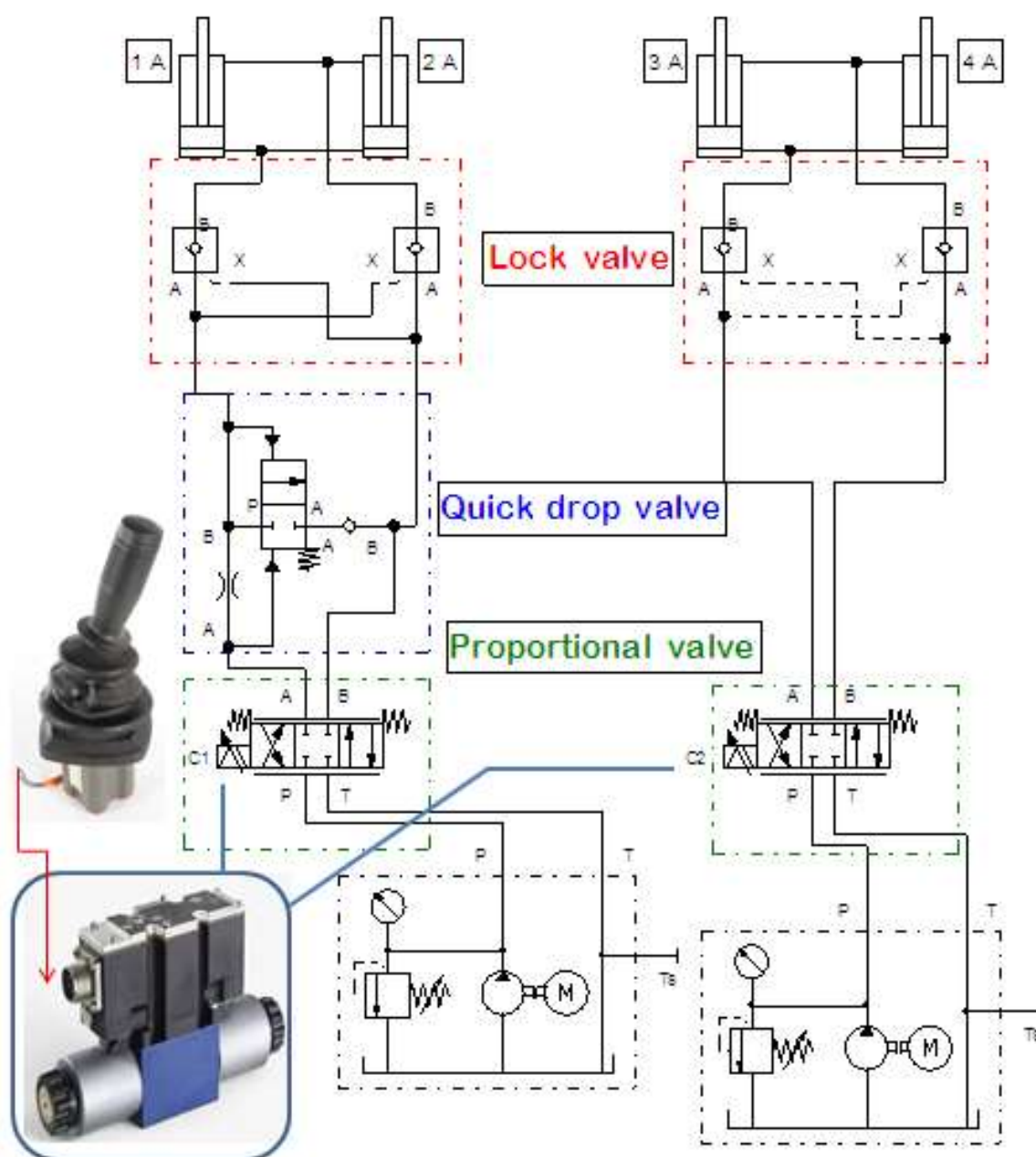
شکل ۴- طراحی مدار هیدرولیک بیل جلوی تراکتور جدید توسط نرم‌افزار FluidSIM.

۳-۲- طراحی مدار سیستم هیدرولیک با استفاده از

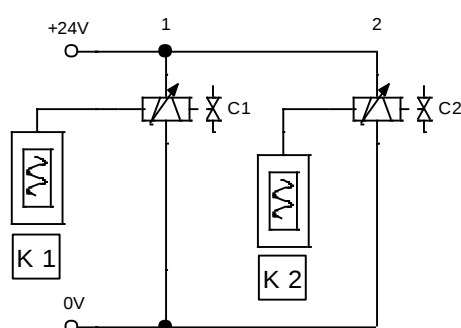
شیر کنترل پروپورشنال

در این رویکرد از مدار الکتروهیدرولیک برای طراحی سیستم هیدرولیک بیل جلوی تراکتور استفاده شد. به همین منظور، شیرهای تحریک برقی جایگزین شیرهای تحریک دستی شد. مبنای این طراحی بر این هدف است که امکان کنترل جهت و کنترل سرعت سیلندره‌های بوم و باکت به صورت مستقل توسط یک دسته انجام گیرد و نیازی به تعبیه شیر کنترل دبی جداگانه برای تنظیم سرعت (مانند

مدار قبل) نباشد. لذا در طراحی سیستم هیدرولیک از شیر کنترل جهت پروپورشنال استفاده شد. استفاده از این شیر، قابلیت کنترل از راه دور را توسط اپراتور مقدور می‌سازد و در چشم‌انداز عملیات عمرانی دقیق، برای طراحی ماشین‌ها و ادوات خودگردان و بدون سرنشین قابل استفاده است. سیستم هیدرولیک طراحی شده دارای یک مدار هیدرولیکی مطابق با شکل (۵) و یک مدار الکتریکی مطابق با شکل (۶) است. در مدار هیدرولیک، از شیرهای قفل کن و شیر تغذیه سریع (همانند مدار قبل) استفاده شد.



شکل ۵- طراحی مدار الکتروهیدرولیک بیل جلوی تراکتور جدید توسط نرم افزار FluidSIM.



شکل ۶- طراحی مدار الکتریکی بیل جلوی تراکتور جدید توسط نرم افزار FluidSIM.

در طراحی مدار الکتریکی نیاز به دو عدد بوبین بنام های C1 و C2 است که در واقع هر کدام یک رله داخلی برای شیرهای پروپورشنال هستند و وظیفه آنها کنترل وضعیت شیر پروپورشنال است. این المان ها باید توسط ولتاژ ۲۴ ولت تغذیه شود و سپس ورودی آنها توسط نوسان سازهای K1 و K2 کنترل شود. این نوسان ساز، شبیه ساز اهرم جوی استیک برای ایجاد ولتاژهای مختلف جهت کنترل موقعیت شیر است. ولتاژ در این نوسان ساز بین ۱۰- تا ۱۰+ قابل تغییر است.

تغییرات فشار در محدوده ۸۰ تا ۱۰۰ بار و تغییرات دبی در محدوده ۱۷/۹ تا ۳۳/۲ لیتر بر دقیقه مطابق جدول ۳ برای کدها استفاده شد.

جدول ۳- مقادیر متغیرهای مستقل و نمادها.

سطوح تغییرات	نماد ریاضی	متغیر مستقل		
			-۱	+۱
فشار	X_1		۸۰	۱۰۰
دبی	X_2		۱۷/۹	۳۳/۲

۳- نتایج و بحث

۳-۱- راستی‌آزمایی مدل پیش‌بینی رفتار

با توجه به اینکه در این تحقیق از روش پاسخ رویه برای پیش‌بینی نتایج استفاده شد، نیاز به اطمینان از وجود هم‌بستگی بین مقادیر خروجی از نرم‌افزار و مقادیر پیش‌بینی شده است. برای این منظور از پارمترهای ضریب تعیین مدل (R^2)، ضریب تعیین مدل استاندارد شده ($Adjusted-R^2$) و سطح معناداری (P -value) استفاده شد. دستیابی به مقادیر ضرایب $R^2 > 0/8$ ، $Adjusted-R^2 > 0/9$ و $P\text{-value} < 0/05$ در برازش مدل‌ها، بیانگر ایده‌آل بودن رویه ترسیم شده است [۲۰].

تجربه واریانس سرعت پیشروی سیلندرهای هیدرولیکی در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که از مقادیر ضرایب در جدول ۴ مشخص است، مدل برازش شده از دقت بالایی برخوردار است.

جدول ۴- تجربه واریانس سرعت پیشروی سیلندرهای هیدرولیکی.

ترم‌ها	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F-value	P-value
مدل	۵	۱۱/۲۳۵	۲/۲۵۷	۲۶۱/۲۷	۰/۰۰۲
X_1	۱	۱/۵۶۴	۱/۵۶۲	۲۱۰/۶۸	۰/۰۳۵
X_2	۱	۷/۲۶۸	۷/۲۶۸	۹۷/۵۱	۰/۰۴۱
X_1^2	۱	۰/۳۲۴	۰/۳۲۴	۷۱/۳۸	۰/۰۰۹
X_2^2	۱	۰/۶۵۱	۰/۶۵۱	۳۱/۲۸	۰/۰۴۷
$X_1 X_2$	۱	۰/۲۱۴	۰/۲۱۴	۱۲/۸۴	۰/۰۲۴
$R^2 = 0/92$		$Adjusted-R^2 = 0/96$			

پاسخ رویه پیش‌بینی‌شده برای برآورد سرعت سیلندرهای بر اساس متغیرهای دبی و فشار مطابق با شکل (۸) است.

متناسب با حرکت اهرم جوی‌استیک به سمت جلو و عقب، شیر پروپورشنال چهار وضعیت را برای سیلندرهای بوم محیا می‌سازد و با حرکت اهرم جوی‌استیک به سمت چپ و راست، سه وضعیت برای سیلندر باکت قابل دستیابی است. کلیه وضعیت‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷- وضعیت‌های مختلف کنترل اهرم جوی‌استیک.

۴-۲- مدل پیش‌بینی رفتار

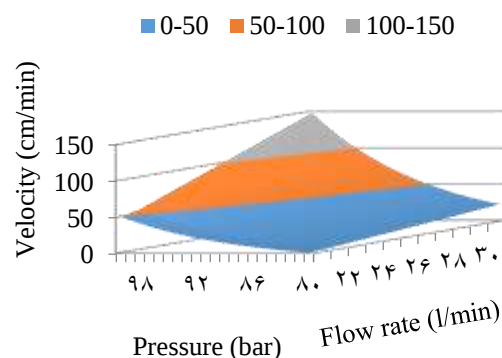
در این تحقیق برای پیش‌بینی سرعت باز شدن سیلندرهای دقت در کنترل حرکت آنها از روش پاسخ رویه استفاده شد. در این روش اثر متغیرهای مستقل دبی و فشار روی سرعت باز شدن سیلندرهای به‌صورت یک معادله ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم ارائه گردید. مدل کلی رویه پاسخ چند متغیره به‌صورت معادله ۷ است که Y_n پاسخ پیش‌بینی شده، b_0 ضریب ثابت، b_i اثر خطی، b_{ii} اثرات مربعات و b_{ij} اثرات متقابل است [۱۸].

$$Y_n = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j=1}^k b_{ij} X_i X_j \quad (7)$$

در این روش از طرح باکس بنکن^{۱۱} (BBD) برای تعیین کد استفاده شد. طرح آماری باکس بنکن با استفاده از نرم‌افزار Design Expert انجام شد و دو متغیر مستقل

^{۱۱} Box Behnken

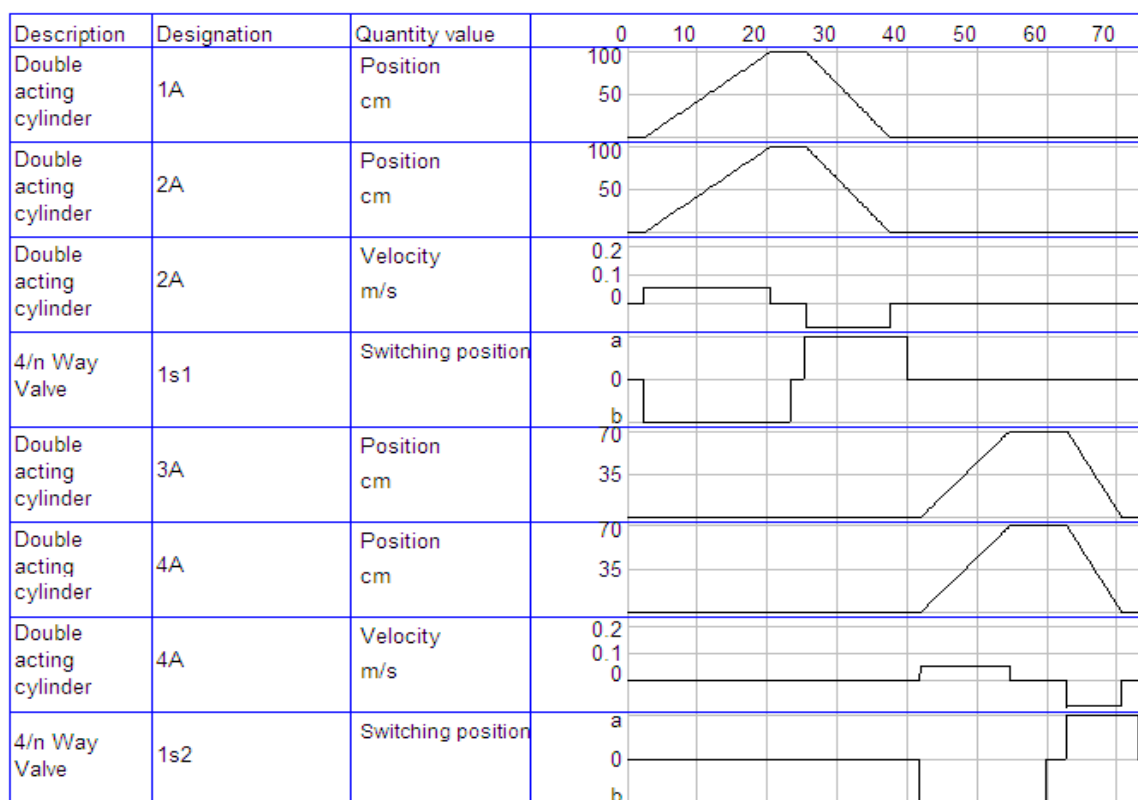
تحریک معکوس شیر 1s1، سیلندرهاى بوم به سمت داخل حرکت کرده و پس از گذشت زمان ۱۱ ثانیه به طور کامل بسته شدند. سرعت بازشدن سیلندرها، ۵/۵۶ سانتی متر بر ثانیه و سرعت بسته شدن سیلندرها، ۹/۰۱ متر بر ثانیه بود. با تحریک شیر 1s2، سیلندرهاى باکت (سیلندر 3A و 4A) باز شده و کورس ۷۰ سانتی متری را در مدت زمان ۱۲ ثانیه طی کرده است. با تحریک معکوس شیر 1s2، سیلندرهاى باکت، پس از گذشت زمان ۸ ثانیه به طور کامل بسته شدند. سرعت بازشدن سیلندرهاى باکت، ۵/۸۳ سانتی متر بر ثانیه و سرعت بسته شدن سیلندرها، ۸/۷۵ سانتی متر بر ثانیه بود. همان طور که انتظار می رفت، زمان بازشدن سیلندرها نسبت به زمان بسته شدن آنها بیشتر است و دلیل این پدیده، اختلاف سطح مقطع سیلندر در زمان بازشدن و بسته شدن است. این موضوع منجر به اتلاف زمان به خصوص در موقع بازشدن سیلندر بوم می شود. برای رفع این نقیصه، در طراحی سیستم هیدرولیک جدید (شکل های ۴ و ۵) از شیرهای پرکن برگشت سریع استفاده شد تا سرعت بازشدن سیلندر افزایش یابد.



شکل ۸- پاسخ رویه پیش بینی شده.

۲-۳- نتایج شبیه سازی با نرم افزار FluidSIM

دیاگرام حالت^{۱۲} سیستم هیدرولیک بیل جلوی تراکتور مربوط به مدار شکل ۳، شامل دیاگرام وضعیت شیرها و سیلندرها و سرعت سیلندرها در شکل ۹ نشان داده شده است. با تحریک شیر 1s1، سیلندرهاى بوم (سیلندر 1A و 2A) به طور هم زمان شروع به بازشدن کرده و پس از گذشت ۱۸ ثانیه به انتهای کورس خود رسیدند. با رهاسازی دسته شیر 1s1، سیلندرها در انتهای کورس خود ثابت مانده و با

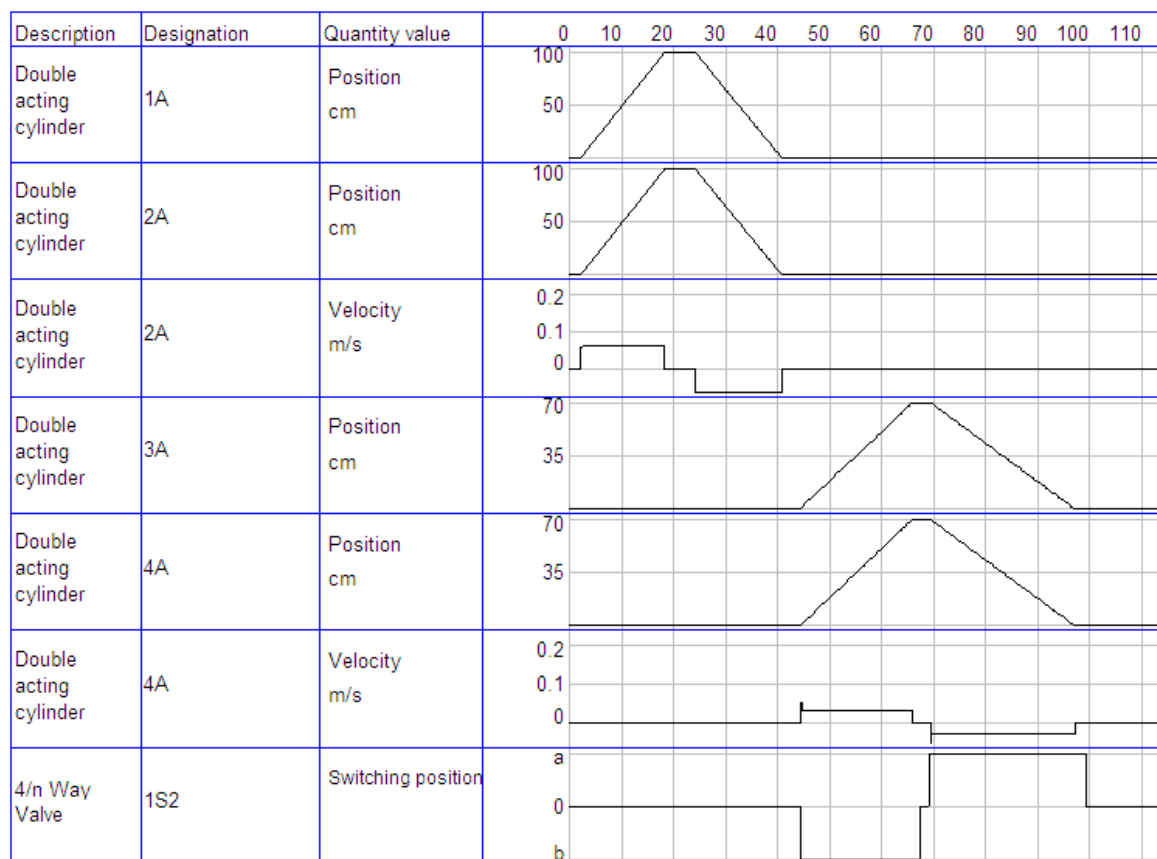


شکل ۹- دیاگرام حالت مدار هیدرولیک بیل جلوی تراکتور موجود توسط نرم افزار FluidSIM.

¹² State diagram

دیگرام حالت سیستم هیدرولیک بیل جلوی تراکتور یک دسته مربوط به مدار شکل (۴)، در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این روش طراحی، از شیر پرکن برگشت سریع استفاده شد تا در هنگام باز شدن سیلندر، روغن برگشتی از سیلندر به روغن ارسالی از پمپ اضافه شود و سرعت باز شدن سیلندر افزایش یابد. همان‌طور که از نمودار موقعیت سیلندرها 1A و 2A مشخص است سرعت باز شدن سیلندرها، افزایش یافته است و به سرعت ۶/۶۶

سانتی‌متر بر ثانیه رسیده است. همچنین با اضافه کردن شیر کنترل دبی به مدار هیدرولیک باکت، سرعت باز شدن و بسته شدن سیلندرها ی باکت (سیلندر 3A و 4A) قابل تنظیم شده است و با کاهش سرعت سیلندرها، سرعت چرخش باکت با کنترل بیشتری همراه شده است. با تنظیم شیر کنترل دبی، مشاهده می‌شود که سرعت باز شدن و بسته شدن سیلندر باکت ۳/۵ سانتی‌متر بر ثانیه است.



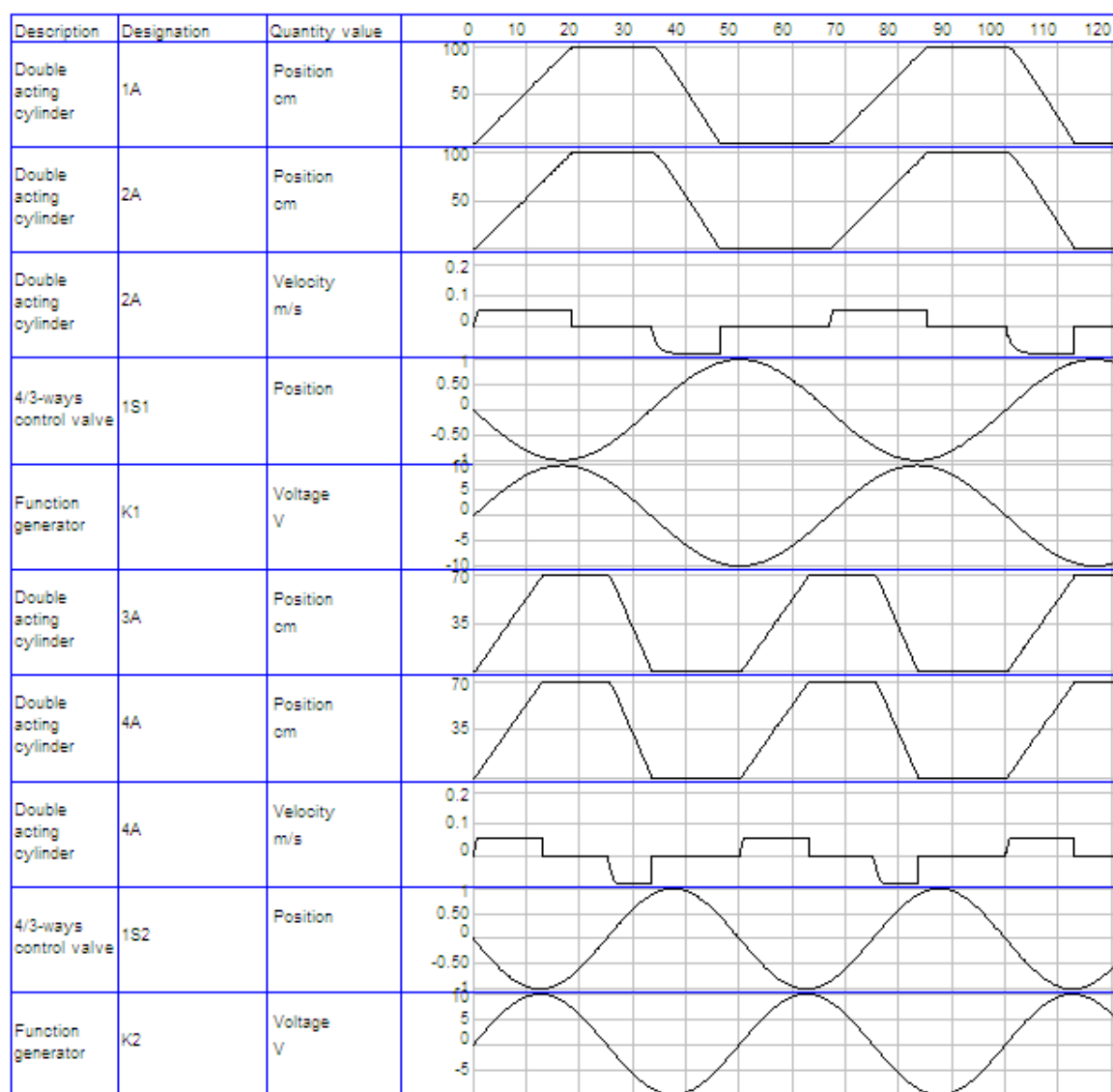
شکل ۱۰- دیگرام حالت مدار هیدرولیک بیل جلوی تراکتور جدید توسط نرم‌افزار FluidSIM.

جدول ۵- نتایج تجمیعی سرعت سیلندرها در سیستم هیدرولیک موجود و سیستم هیدرولیک جدید.

درصد	سیستم جدید	سیستم موجود
سیلندر بوم		
باز شدن	۶/۶۶	۵/۵۹
بسته شدن	۶/۶۶	۹/۰۱
سیلندر باکت		
باز شدن	۳/۵	۵/۸۳
بسته شدن	۳/۵	۸/۷۵

دیگرام حالت سیستم هیدرولیک بیل جلوی تراکتور با اهرم جوی‌استیک مربوط به مدار شکل (۵)، در شکل (۱۱) نشان

نتایج استخراج شده از شکل‌های (۹) و (۱۰) در جدول ۵ تجمیع شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از شیرهای پرکن برگشت سریع در مدار هیدرولیک جدید بوم نسبت به روش موجود، سرعت باز شدن سیلندر بوم را ۱۹/۱ درصد افزایش داده و مشکل کند بودن سرعت باز شدن سیلندر بوم را مرتفع کرده است. همچنین استفاده از شیر کنترل دبی در مدار هیدرولیک جدید باکت نسبت به روش موجود، سرعت باز شدن و بسته شدن سیلندر باکت را بین ۴۰/۷ تا ۶۰ درصد کاهش داده و مشکل عدم دقت در کنترل سیلندر باکت را رفع کرده است.



شکل ۱۱- دیاگرام حالت مدار هیدرولیک بیل جلوی تراکتور با شیر کنترل پروپورشنال توسط نرم افزار FluidSIM.

پروپورشنال و تناسب با میزان حرکت آن، سرعت سیلندرها افزایش یافته و به یک مقدار حداکثر رسیده است.

۴- نتیجه گیری و پیشنهادها

در این تحقیق به منظور کنترل راحت تر بیل جلوی تراکتور توسط اپراتور و رفع نقایص موجود در عملکرد آن، یک سیستم هیدرولیکی جدید توسط نرم افزار FluidSIM4.2 بازطراحی و شبیه سازی شد. طراحی با دو رویکرد استفاده از مدار کاملاً هیدرولیکی و رویکرد مدار الکتروهیدرولیکی انجام شد. همچنین از روش پاسخ رویه برای پیش بینی نتایج استفاده شد. نتایج نشان داد که:

هم بستگی خوبی ($R^2 = 0.92$) بین مقادیر خروجی از نرم افزار FluidSIM و مقادیر پیش بینی شده به روش پاسخ رویه برقرار است.

داده شده است. همان طور که در شکل (۱۱) قابل مشاهده است، برای ایجاد اختلاف پتانسیل های مختلف ($+10V$ تا $-10V$) در بوبین شیر پروپورشنال، از نوسان ساز ولتاژ سینوسی (k_1 و k_2) استفاده شد. متناسب با میزان ولتاژ ارسالی به شیر، موقعیت اسپول شیر تغییر کرده و از موقعیت وسط به سمت راست یا چپ ($+1$ تا -1) حرکت می کند. متناسب با موقعیت اسپول در داخل شیر، سرعت و جهت حرکت سیلندر کنترل می شود. در این روش طراحی، حرکت اسپول، دبی ارسالی به سیلندر را کنترل می کند و نیازی به شیر کنترل دبی جداگانه ای مانند مدار قبل نیست. با ارسال ولتاژ مثبت از صفر تا $+10V$ ، سیلندرها باز و با ارسال ولتاژ منفی از صفر تا $-10V$ ، سیلندرها بسته شده اند. از نمودار سرعت سیلندرها مشهود است که با تحریک شیر

تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسنده متعهد می‌شود که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده است.

مشارکت‌های نویسندگان

کلیه مراحل شامل طرح اولیه، محاسبات آماری، شبیه‌سازی، نگارش و تدوین مقاله توسط حسن غفوری انجام شده است.

منابع مالی

در انجام این مقاله از هیچ منبع مالی خارجی استفاده نشده است.

استفاده از شیر کنترل دبی در مسیر سیستم هیدرولیک باکت، به‌منظور کاهش سرعت چرخش باکت، سرعت باز شدن و بسته شدن سیلندر باکت را بین ۴۰/۷ تا ۶۰ درصد مقدار اولیه کاهش داد.

به‌کارگیری شیر تغذیه برگشت سریع در مسیر سیستم هیدرولیک بوم، جهت رفع مشکل حرکت آرام بوم در زمان بلند کردن بار، سرعت بالا رفتن بوم را نسبت به‌روش موجود به‌میزان ۱۹/۱ درصد افزایش داد.

استفاده از مدار الکترو هیدرولیکی، امکان استفاده از اهرم جوی‌استیک را فراهم کرد که هم‌زمان قادر به کنترل جهت و کنترل سرعت سیلندرها بود.

پیشنهاد می‌شود سیستم هیدرولیک طراحی شده جدید، با استفاده از روش‌های کلاسیک و فراابتکاری بهینه‌سازی شود.

مراجع

- [1] Yu, Hongnian, Yang Liu, and Mohammad Shahidul Hasan. "Review of modelling and remote control for excavators." *International Journal of Advanced Mechatronic Systems* 2, no. 1-2 (2010): 68-80.
- [2] Barbieri, Giacomo, Cesare Fantuzzi, and Roberto Borsari. "A model-based design methodology for the development of mechatronic systems." *Mechatronics* 24, no. 7 (2014): 833-843.
- [3] Fu, S. Johnny, Mark Liffing, and Ishaque S. Mehdi. "Integrated electro-hydraulic system modeling and analysis." *IEEE aerospace and electronic systems magazine* 17, no. 7 (2002): 4-8.
- [4] Reedy, John, and Stephen Lunzmann. Model based design accelerates the development of mechanical locomotive controls. No. 2010-01-1999. SAE Technical Paper, 2010.
- [5] Xu, Jiaqi, Bradley Thompson, and Hwan-Sik Yoon. Automated grading operation for hydraulic excavators. No. 2014-01-2405. SAE Technical Paper, 2014.
- [6] Wang, Haifei, Shimin Yang, and Tan Lu. "Performance-Matching Optimization Design of Loader-Hydraulic System Based on Hydrodynamics Analysis." *Processes* 10, no. 8 (2022): 1524.
- [7] Kumar, Sanjeev, Virendra Kumar Tewari, Chandan Kumar Bharti, and Abhishek Ranjan. "Modeling, simulation and experimental validation of flow rate of electro-hydraulic hitch control valve of agricultural tractor." *Flow Measurement and Instrumentation* 82 (2021): 102070.
- [8] Le, Q. H., Y. M. Jeong, C. T. Nguyen, and S. Y. Yang. "Development of a Virtual Excavator using SimMechanics and SimHydraulic." *Journal of The Korean Society for Fluid Power & Construction Equipments* 10, no. 1 (2013): 29-36.
- [9] He, Qinghua, Daqing Zhang, Peng Hao, and Xinhai Zhang. "Study on motion simulation of hydraulic excavator's manipulator." *Journal of System Simulation* 18, no. 3 (2006): 735-738.
- [10] Park, Sung Hee, Khairul Alam, Young Man Jeong, Chang Don Lee, and Soon Yong Yang. "Modeling and simulation of hydraulic system for a wheel loader using AMESim." In 2009 ICCAS-SICE, pp. 2991-2996. IEEE, 2009.
- [11] Suwandi, A., N. F. Alamsyah, Dede Lia Zariatina, B. Sulaksono, and E. Prayogi. "Simulated design of hydraulic systems for fishing deck machinery hydraulic type with FluidSIM® software." In AIP Conference Proceedings, vol. 2227, no. 1, p. 020012. AIP Publishing LLC, 2020.
- [12] Duțu, I. C., T. Axinte, E. Maican, C. Nuțu, and M. Diaconu. "The use of double-acting cylinders in electro-hydraulic circuit." *Technium* 4, no. 5 (2022): 15-20.

- [13] Gasparetto, A., P. Boscariol, A. Lanzutti, and R. Vidoni. "Path Planning and Trajectory Planning Algorithms: A General Overview." *Mechanisms and Machine Science*, 29 (2006): 3-27.
- [14] Willms, Allan R., and Simon X. Yang. "Real-time robot path planning via a distance-propagating dynamic system with obstacle clearance." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* 38, no. 3 (2008): 884-893.
- [15] Opperswall, Tim, Ben Holter, and Simon Yardley. "Autonomous control of hydraulic mobile applications—a 21-ton excavator case study." (2020).
- [16] Ghodousian, A., and M. Sheikhi. *Azghandi Meta-heuristic Optimization Methods in Engineering*. Semnan University Press, 2014. (in Persian).
- [17] Sheikhi Azghandi, M., and A. Ghodousian. *Numerical Optimization Classical Methods: For Designing Engineering Problems*. Bozorgmehr University of Ghaenat Press, 2019. (in Persian).
- [18] Nugraha, Geralda Livia, Muhamad Ajis, Himmawan Sapta Adhi, and Diky Zakaria. "Performance Improvement of Hydraulic Excavator Efficiency: A Literature Review." *Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence* 1, no. 1 (2024): 27-44.
- [19] Dean, Angela, Daniel Voss, and Danel Draguljić. "Response surface methodology." In *Design and analysis of experiments*, pp. 565-614. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [20] Kleijnen, Jack PC. "Response surface methodology." In *Handbook of simulation optimization*, pp. 81-104. New York, NY: Springer New York, 2014.
- [21] Kogyo, Yuken. "Basic Hydraulic and Component." (2006).
- [22] Parr, Andrew. *Hydraulics and Pneumatics: A technician's and engineer's guide*. Oxford: Elsevier, 2013.
- [23] Merkle, D., B. Schrader, and M. Thomes. *Hydraulics: basic level*. Festo Didactic KG, 1990.