مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISSN: 1605-9719
سال ۲۶، شماره ۱۱۶، صفحات ۷۵–۸۲

ساخت و ارزیابی سامانهٔ ترازکن خودکار چهارطرفه با قابلیت تنظیم شیب عرضی و طولی

مسعود تیموری بک

مربی گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

teymouri.m@uut.ac.ir

◄ چکیده

در این مقاله یك سیستم ترازکن خودکار چهارطرفه با قابلیت تنظیم شیب عرضی و طولی معرفی شده است که قادر است با نصب روی شاسی ماشین، شیب زمین را با دقت ۰/۲± درجه در راستای طولی و عرضی اندازه‌گیری کرده و براساس داده‌های به‌دست آمده، شاسی ماشین مربوطه را با شیب تعریفی کاربر با دقت ۰/۵± درجه در دو راستای عرضی و طولی تراز کند. دستگاه ساخته‌شده از سه بخش مدل ساده‌ای از ماشین، شیب‌سنج الکترومکانیکی و واحد کنترل تشکیل شده است. دستگاه پایداری مناسبی در مقابل عوامل محیطی مانند تغییرات دما، رطوبت و نویز دارد، لذا می‌تواند کاربردهای صنعتی داشته باشد. عملکرد واقعی دستگاه روی سکوی شیب‌دار در راستای عرضی و طولی و همچنین راستای ترکیبی عرضی ـ طولی مورد آزمون قرار گرفت. نتایج آزمون عمکرد واقعی دستگاه نشان می‌دهد که سیستم در بدترین شرایط توانایی تراز با سرعت ۰/۸ درجه در واحد زمان در فشار روغن ۱۵۰ بار را دارد.

◄ واژگان کلیدی

سامانهٔ ترازکن
میکروکنترلر، شیب سنج
واحد کنترل
هیدرولیك

◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۳/۰۶
تاریخ پذیرش ۱۳۹۶/۱۱/۰۶

۱ مقدمه

سامانهٔ ترازکن خودکار[1] به دستگاهی گفته می‌شود که شیب زمین ماشین را در دو راستای طولی و عرضی اندازه‌گیری کرده و با کنترل ارتفاع آن، در نهایت ماشین را به تراز مورد نظر کاربر می‌رساند. امروزه سامانه‌های تراز خودکار کاربردهای زیادی در صنعت و ادوات نظامی دارند [۱–۳]. سامانه‌های خودتراز از دو قسمت الکترونیکی و مکانیکی تشکیل می‌شوند؛ به‌طوری‌که وظیفهٔ سیستم الکترونیکی این است که اندازهٔ شیب زمین را از شیب‌سنج[2] به‌دست آورده و با توجه به اطلاعات از پیش تعریف شده برای تراز، طوری سامانهٔ تنظیم ارتفاع را کنترل می‌نماید که در نهایت دستگاه به تراز مطلوب برسد. قسمت مکانیکی دستگاه نیز به نوبهٔ خود این امکان را به‌وجود می‌آورد که با دریافت فرمان از سوی سیستم الکترونیکی، با کمترین میزان نوسان و در حداقل زمان ممکن، دستگاه مورد نظر را به موقعیت سطحی تعریف شده از لحاظ شیب طولی و عرضی برساند. سیستم‌های خودتراز با تراز کردن دستگاه‌های حساس به شیب زمین، راندمان و عملکرد آنان را می‌توانند بهبود قابل توجهی دهند. به‌عنوان نمونه با نصب سامانهٔ ترازکن روی ماشین‌آلات کشاورزی از قبیل کمباین و تراکتور می‌توان از وارد شدن صدمه به محصول در حین برداشت یا از واژگون شدن ماشین در شیب‌های بحرانی جلوگیری کرد [۴، ۵]. سامانه‌های خودتراز براساس اینکه در چه راستایی کار می‌کنند به دو بخش تقسیم می‌شوند:

۱. تمام تراز: در دو راستای طولی و عرضی دستگاه تراز می‌شود
۲. نیمه‌تراز: دستگاه فقط در راستای عرضی و یا طولی تراز می‌شود

در این مقاله یک سامانهٔ ترازکن خودکار چهارطرفه با قابلیت تنظیم شیب عرضی و طولی معرفی شده است که می‌تواند شیب زمین را با استفاده از شیب‌سنج پیشنهادی در دو راستای طولی و عرضی با دقت ۰/۲± درجه اندازه‌گیری کرده و اطلاعات شیب را در اختیار واحد کنترل قرار دهد. واحد کنترل که مبتنی بر میکروکنترلر[3] است می‌تواند فرمان‌های لازم برای تنظیم و کنترل تراز را همزمان برای هر دو راستای عرضی و طولی تولید نماید. برای آزمایش عملکرد شیب‌سنج معرفی شده و الگوریتم تراز واحد کنترل، یک مدل کوچکی از ماشین با قابلیت تنظیم ارتفاع هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت عملکرد واقعی دستگاه روی سکوی آزمون مورد سنجش قرار گرفته و نتایج ارائه شده است.

۲ مواد و روش‌ها

سامانهٔ ترازکن خودکار چهارطرفه از سه قسمت اصلی شیب‌سنج، واحد کنترل و سامانهٔ تنظیم ارتفاع تشکیل شده است. شیب‌سنج و سامانهٔ کنترل می‌تواند به‌صورت مکانیکی یا الکترومکانیکی ساخته شود. برای تنظیم ارتفاع دستگاهی که ترازکن روی آن نصب می‌شود نیز می‌توان از سیستم هیدرولیکی، پنوماتیکی یا برقی استفاده نمود. مطمئناً استفاده از سیستم‌های الکترونیکی برای اندازه‌گیری شیب زمین و کنترل دستگاه می‌تواند عملکرد سیستم تراز را از لحاظ دقت و سرعت ارتقا بخشد.

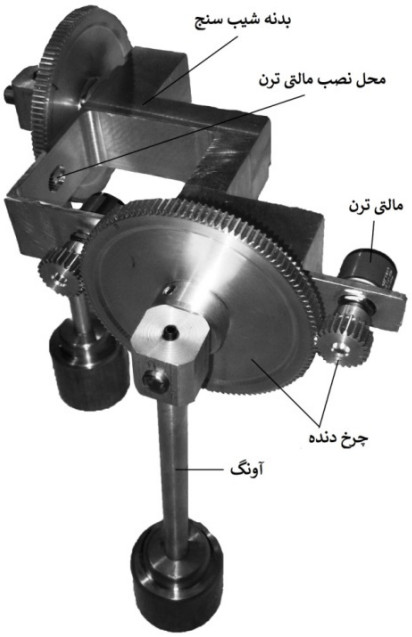
۱.۲ شیب‌سنج الکترومکانیکی پیشنهادی

شیبسنج‌های الکترومکانیکی رایج از یک آونگ[4] متصل به پتانسیومتر[5] برای اندازه‌گیری شیب استفاده می‌کنند. در واقع با اتصال انتهای محور آونگ به

[1] automatic self leveling [2] inclinometer [3] microcontroller [4] pendulum [5] potentiometer

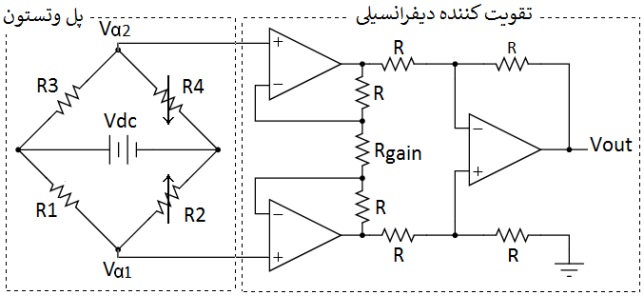
محور پتانسیومتر و ثابت‌کردن بدنهٔ پتانسیومتر می‌توان تغییرات زاویه‌ای بازوی آونگ که تابع شیب زمین می‌باشد را به محور پتانسیومتر انتقال داده و در نهایت به سیگنال الکتریکی تبدیل کرد [۶]. در این روش اندازهٔ سیگنال الکتریکی تولیدشده توسط پتانسیومتر با اندازهٔ شیب زمین رابطهٔ مستقیم دارد. لذا هر گونه نویز یا هر عامل دیگری سبب تغییر اندازهٔ سیگنال الکتریکی شود باعث خطا در اندازه‌ـ گیری شیب خواهد داشت و این تأثیر نامطلوبی بر تراز نهایی دستگاه خواهد گذاشت.

در این مقاله شیب‌سنجی معرفی شده است که با استفاده از دو آونگ و چهار عدد پتانسیومتر توانایی اندازه‌گیری شیب زمین را در دو راستای عرضی و طولی داشته و عملکرد آن از لحاظ دقت بهتر از شیب‌سنج‌های رایج می‌باشد. تصویر شیب‌سنج پیشنهادی در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱: شیب‌سنج پیشنهادی بدون نصب مالتی‌ترن‌های یک راستا

همان‌طور که مشاهده می‌شود، راستای حرکت آونگ‌ها نسبت به هم متعامد است. لذا تغییرات شیب عرضی و طولی باعث تغییرات زاویه‌ای آونگ مربوط به آن راستا می‌شود. محور هر آونگ از طریق چرخ دنده‌هایی به محور دو عدد پتانسیومتر متصل شده است. تعداد دنده‌های چرخ دنده متصل به محور آونگ (چرخ‌دندهٔ مرکزی) پنج برابر تعداد دنده‌های چرخ‌دندهٔ متصل به محور پتانسیومترها است. با این کار پنج برابر تغییرات زاویه‌ای محور آونگ به محور پتانسیومترها اعمال می‌شود که این باعث افزایش دقت خواندن شیب می‌گردد. در واقع اگر هر یک از آونگ‌ها یک درجه جابجا شوند، در این‌صورت محور پتانسیومترها ۵ درجه جابه‌جا خواهند شد. از طرفی واضح است محور پتانسیومترها در خلاف جهت هم حرکت می‌کنند. در این شیب‌سنج از دو عدد مقاومت متغییر از نوع مالتی‌ترن[1] به‌عنوان پتانسیومتر برای تبدیل تغییرات زاویه‌ای هر آونگ به سیگنال‌های الکتریکی استفاده شده است. با نصب شیب‌سنج به شاسی ماشینی که قرار است تراز شود نیروی گرانش زمین، آونگ‌ها را در راستای شعاع زمین نگه می‌دارد، لذا تغییرات شیب زمین سبب تغییرات زاویه‌ای بین بازوی آونگ‌ها و بدنهٔ شیب‌سنج می‌شود. این جابه‌جایی از طریق چرخ‌دنده‌ها به محور مالتی‌ترن‌ها انتقال یافته و باعث چرخش محور آنها می‌شود. لذا مقاومت داخلی مالتی‌ترن‌ها متناسب با تغییرات زاویه‌ای تغییر میابند و از این طریق به‌راحتی می‌توان زاویهٔ بین بدنهٔ شیب‌سنج و بازوی آونگ‌ها را اندازه‌گیری نمود. چون دو عدد مالتی‌ترن متصل به آونگ در خلاف جهت هم چرخش پیدا می‌کنند، لذا مقاومت آنها نیز برخلاف هم تغییر پیدا می‌کند. در واقع اگر مقاومت یکی از آنها افزایش یابد دیگری کاهش پیدا می‌کند و همچنین بالعکس. پس سیگنال‌های الکتریکی تولیدی این دو مالتی‌ترن قرینه هم خواهند بود. برای اتصال این دو مالتی‌ترن به منبع تغذیه از ساختار پل وتستون استفاده شده است [۷]. مدار پل وتستون[2] همراه با تقویت‌کنندهٔ دیفرانسیلی مربوط به یک راستا (مثلا راستای عرضی α) و نحوهٔ اتصال مالتی‌ترن‌های مربوطه (R1R2 و R3R4) در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲: پل وتستون برای راه‌اندازی مالتی‌ترن‌ها

گفتنی است یک پتانسیومتر مانند مالتی‌ترن توسط دو مقاومت سری (مانند R1R2) مدل می‌شود که با چرخش محور پتانسیومتر یکی از مقاومت‌ها مثلاً R1 کاهش و دیگری R2 افزایش پیدا می‌کند، اما همواره حاصل‌جمع آن دو مقاومت ثابت و برابر اندازه‌ای است که روی مالتی‌ترن نوشته شده است.

در این مدار ولتاژ منبع تغذیهٔ $V_{dc} = ۱۲V$ و حاصل‌جمع مقاومت های سری $R_۱R_۲$ و $R_۳R_۴$ که مدل مالتی‌ترن‌ها می‌باشد $۱k\Omega$ است. اندازهٔ مقاومت‌ها رابطهٔ خطی با زاویهٔ چرخش محور مالتی‌ترن‌ها و درپی آن با شیب عرضی و طولی دارند، لذا رابطهٔ ولتاژ خروجی با تغییرات زاویه‌ای راستای عرضی α در پل وتستون شکل ۲ به‌صورت زیر می‌باشد.

$$R_۱ + R_۲ = R_۳ + R_۴ = ۱\,k\Omega \quad (۱)$$

$$V_{\alpha ۱} = Vdc \times \frac{R_۲}{R_۱ + R_۲} + V_{\text{noise}} = ۱۲ \times \frac{R_۲}{۱k} + V_{\text{noise}} \quad (۲)$$

$$V_{\alpha ۱} = K \cdot R_۲ + V_{\text{noise}} = K' \cdot \alpha_۱ + V_{\text{noise}}$$

$$V_{\alpha ۲} = Vdc \times \frac{R_۴}{R_۳ + R_۴} + V_{\text{noise}} = ۱۲ \times \frac{R_۴}{۱k} + V_{\text{noise}} \quad (۳)$$

$$V_{\alpha ۲} = K \cdot R_۴ + V_{\text{noise}} = K' \cdot \alpha_۲ + V_{\text{noise}}$$

$$V_{\alpha ۱} - V_{\alpha ۲} = K' \cdot (\alpha_۱ - \alpha_۲) \quad (۴)$$

$$V_{\text{out}} = \left(۱ + \frac{۲R}{R_{\text{gain}}}\right) \cdot (V_{\alpha ۱} - V_{\alpha ۲}) \quad (۵)$$

$$V_{\text{out}} = K' \cdot \left(۱ + \frac{۲R}{R_{\text{gain}}}\right) \cdot (\alpha_۱ - \alpha_۲) \quad (۶)$$

$$\Rightarrow V_{\text{out}} = K'' \cdot (\alpha_۱ - \alpha)$$

[1] multi turn [2] wheatstone Bridge

در معادلات اخیر K، K' و K'' ضرایب ثابت، α_1 و α_2 زاویهٔ چرخش مالتی‌ترن‌های چپ و راست، R_1R_2 و R_3R_4 مقاومت‌های معادل مالتی‌ترن‌های چپ و راست، α زاویهٔ بین محور آونگ و بردار عمود بر بدنهٔ آن و یا همان شیب عرضی، $V_{\alpha1}$ و $V_{\alpha2}$ ولتاژهای خروجی مالتی‌ترن‌های چپ و راست و V_{out} ولتاژ خروجی تقویت‌کنندهٔ دیفرانسیلی می‌باشند.

معادلهٔ (۶) نشان می‌دهد که ولتاژ خروجی رابطهٔ مستقیم و خطی با تغییرات زاویه‌ای راستای عرضی دارد، لذا به‌راحتی می‌توان از روی اندازهٔ این ولتاژ زاویه محور مالتی‌ترن‌ها و درپی آن شیب زمین را محاسبه نمود. با توجه به اینکه مدارات و محاسبات راستای طولی β نیز دقیقاً مشابه راستای عرضی α است، از رسم مدارات و نوشتن معادلات آن خودداری شده است. با توجه به رابطهٔ (۵) مشاهده می‌شود که سیگنال الکتریکی حاوی اطلاعات شیب از طریق اختلاف (دیفرانسیل) سیگنال الکتریکی دو مالتی‌ترن چپ و راست تولید می‌شود. در روش‌های رایج که از یک آونگ و پتانسیومتر استفاده می‌شود امکان حذف نویز وجود ندارد و فقط با استفاده از مدارات فیلتر می‌توان سیگنال‌های ناخواستهٔ القاشده توسط محیط را کاهش داد. اما در این روش، ایده‌ای مطرح شده است که می‌توان نویز و سیگنال‌های ناخواسته القاشده توسط محیط را حذف نمود.

می‌دانیم که در شیب‌سنج پیشنهادی با تغییرات زاویهٔ آونگ‌ها مثلاً راستای عرضی، ولتاژهای $V_{\alpha1}$ و $V_{\alpha2}$ قرینهٔ هم تغییر پیدا می‌کنند؛ از طرفی به‌دلیل تقارن دو طرف (مالتی‌ترن چپ و راست) و همسان بودن خود مالتی‌ترن‌ها، نویز و سیگنال‌های القاشده محیط تأثیر یکسانی بر خروجی هر دوی آنها خواهد گذاشت و هر دو ولتاژ $V_{\alpha1}$ و $V_{\alpha2}$ به یک اندازه دچار نویز V_{noise} خواهند شد.

از طرفی چون خروجی نهایی حاصل تفریق و دیفرانسیل دو ولتاژ $V_{\alpha1}$ و $V_{\alpha2}$ است، لذا نویز و کلیهٔ سیگنال‌های الکتریکی که از طرف محیط به خروجی مالتی‌ترن‌ها اضافه شده بود از خروجی نهایی حذف خواهد شد و این باعث کاهش خطای شیب‌سنج نسبت به شیب‌سنج‌های رایج می‌شود [۸]. یکی دیگر از عواملی که می‌تواند کارکرد شیب‌سنج‌های الکترومکانیکی را دچار چالش کند، نوسانات ناخواسته آونگ در تغییرات ناگهانی شیب‌ها می‌باشد که این نوسانات باعث چرخش سریع محور پتانسیومترها و نوسانی شدن سیگنال‌های الکتریکی خروجی شوند. لذا تا زمان پایداری کامل، اطلاعات به‌دست آمده از شیب‌سنج نوسانی بوده و قابل استفاده نخواهد بود و باید منتظر ماند تا آونگ‌ها به پایداری کامل برسند. در شیب‌سنج پیشنهادی از دو روش برای غلبه بر این مشکل استفاده شده است: روش الکترونیکی که در آن یک فیلتر پایین گذر[1] با فرکانس قطع ۱۰ هرتز به خروجی تقویت‌کننده دیفرانسیلی متصل شده است و نوسانات بیش از ۱۰ هرتز را حذف می‌کند. و روش مکانیکی که در آن جهت تسریع عمل پایداری، آونگ‌ها در یك نوع سیال میراکنندهٔ نوسانات، (واسکازین نمرهٔ ۴۰) قرار داده شده‌اند. اجزای مکانیکی شیب‌سنج پیشنهادی وابستگی بسیار ناچیزی به دما و رطوبت دارد، از طرفی قطعات الکترونیکی آن به‌گونه‌ای انتخاب شده است که دستگاه به‌راحتی بتواند در محدودهٔ دمایی ۳۰− تا ۶۰+ درجهٔ سانتی‌گراد کار کند. لذا شیب‌سنج پیشنهادی می‌تواند کاربرد صنعتی و تجاری داشته باشد.

۲.۲ واحد کنترل

واحد کنترل خودتراز وظیفهٔ خواندن سیگنال‌های خروجی شیب سنج و ارسال فرمان به واحد تنظیم ارتفاع جهت تراز کامل بر اساس شیب مطلوب را دارد. بلوك‌دیاگرام کلی واحد کنترل خودتراز در شکل ۳ نمایش داده شده است. از شیب‌سنج پیشنهادشده در بخش قبلی برای اندازه‌گیری شیب زمین در دو راستای عرضی و طولی استفاده شده است. در واقع توسط این حسگر الکترومکانیکی می‌توان زاویهٔ سطح زمین نسبت به راستای افق را به سیگنال آنالوگ تبدیل نمود.

با تولید سیگنال‌های آنالوگ حاوی اطلاعات شیب زمین نوبت به پردازش روی این سیگنال‌ها می‌رسد. چون پردازش در حوزهٔ دیجیتال راحت‌تر از حوزهٔ آنالوگ می‌باشد. لذا پس از فیلتر کردن سیگنال‌ها و تقویت سیگنال اصلی از مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال[2] جهت تبدیل این سیگنال‌ها به دیجیتال استفاده شده است. با فراهم‌شدن اطلاعات دیجیتال می‌توان از انواع کنترل‌کننده‌های دیجیتال جهت پردازش روی اطلاعات استفاده کرد که در طراحی این سیستم از میکروکنترلر استفاده شده است. با استخراج اطلاعات مربوط به شیب زمین و پردازش توسط میکروکنترلر فرمان‌های لازم برای تراز دستگاه صادر می‌شود که این فرمان‌ها بعد از تقویت توان الکتریکی به شیرهای برقی ارسال می‌گردند. در حالت کلی واحد کنترل می‌تواند مجموعهٔ اعمال زیر را انجام دهد.

۱. قادر است اطلاعات مربوط به شیب عرضی و طولی را به‌صورت سیگنال‌های آنالوگ از شیب‌سنج الکترومکانیکی دریافت نموده و اندازهٔ شیب را در نمایشگر[3] مربوطه نمایش دهد.

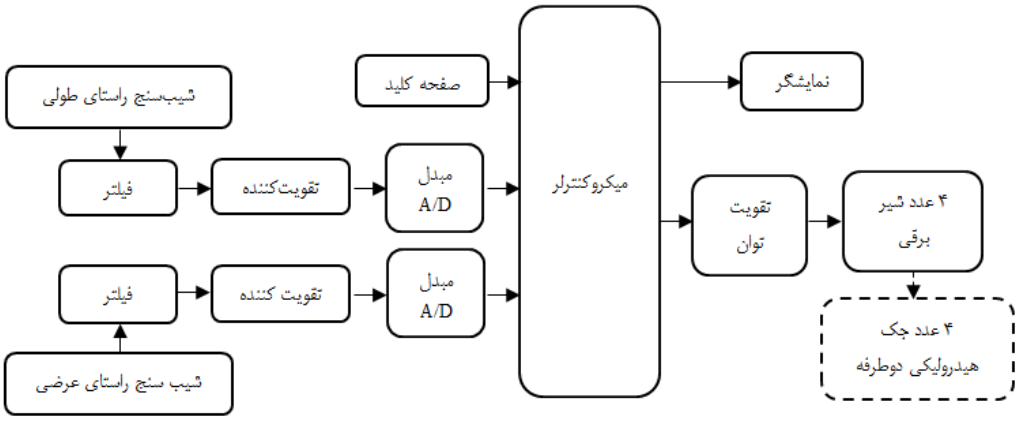
۲. وضعیت کلیه میکروسوئیچ‌های[4] مشخص‌کنندهٔ کورس جك‌ها را دریافت کرده و در نمایشگر نشان دهد.

۳. با استفاده از اطلاعات شیب، می‌تواند کورس جك‌ها را به‌صورت دستی یا خودکار به‌گونه‌ای کنترل کند که ماشین با دقت ±۰/۵ درجه در راستای عرضی و طولی به تراز نهایی برسد و در صورت عدم تراز هشدارهای لازم را به اپراتور بدهد.

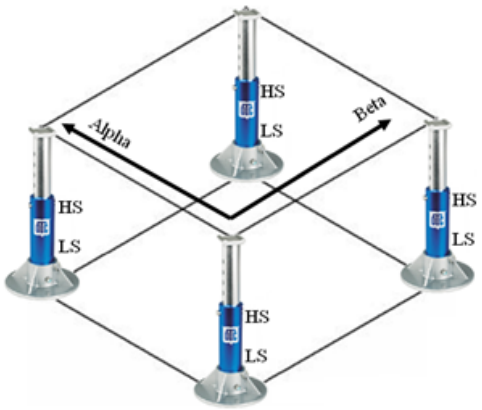
۳.۲ جك‌ها و میکروسوئیچ‌های متصل‌شده

برای پیاده‌سازی سامانهٔ خودتراز روی یک ماشین نیاز است علاوه بر شیب‌سنج و واحد کنترل، بخش تنظیم ارتفاع نیز روی آن نصب گردد. چون سامانهٔ خودتراز خودکار قابلیت تراز در دو راستای عرضی و طولی را دارد، لذا باید بخش تنظیم ارتفاع توانایی تغییر ارتفاع چهار گوشهٔ ماشین را داشته باشد. بنابراین در این دستگاه با نصب چهار جک هیدرولیک به چهارگوشهٔ دستگاه همانند شکل ۴ می‌توان ارتفاع ماشین را تنظیم نمود. بعد از نصب جک‌ها، باید از وضعیت جک‌ها اطلاع حاصل نمود که آیا جک‌ها به انتهای کورس خود رسیده‌اند یا خیر؟ لذا برای هر جک ۲ عدد میکروسوئیچ قابل رگلاژ بنام‌های میکروسوئیچ‌های LS مربوط به حد پایین جک‌ها و میکروسوئیچ‌های HS انتهای کورس جک‌ها نصب شده است. شکل ۴ محل میکروسوئیچ‌های مربوطه را نشان می‌دهد [۹].

[1] low pass filter [2] analog to digital converter [3] display [4] micro switch



شکل ۳: بلوک دیاگرام واحد کنترل‌کنندهٔ سامانهٔ ترازکن



شکل ۴: جك‌ها و محل میکروسوئیچ‌های متصل‌شده

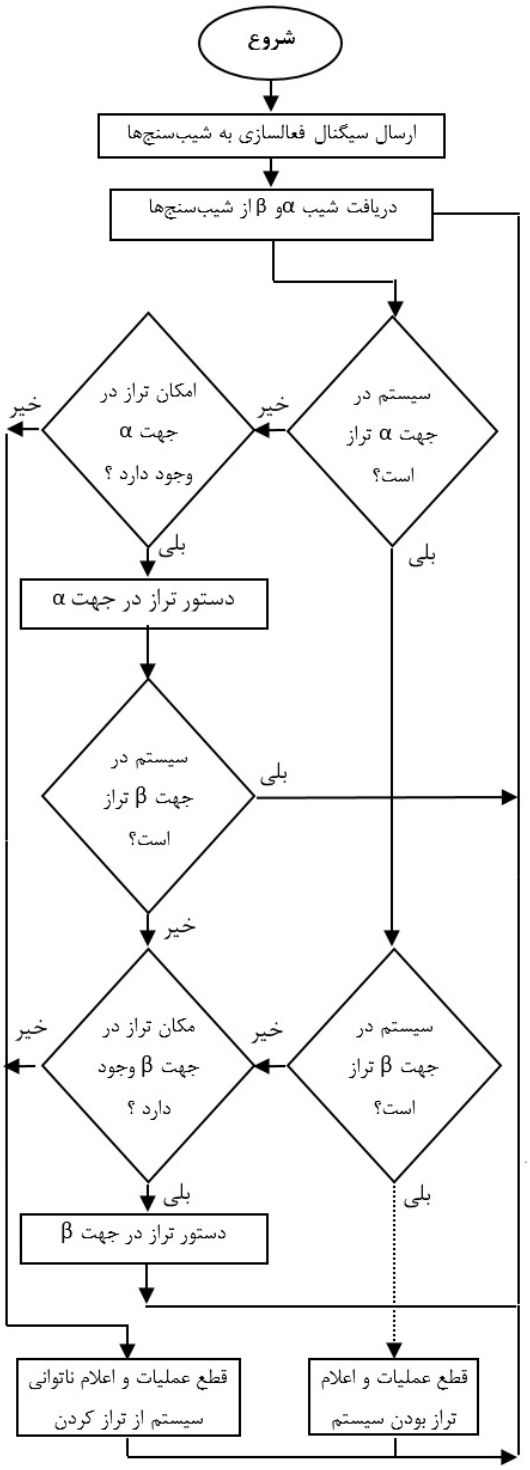
۴.۲ تئوری کنترل

سامانه‌ها به دو صورت پیشخورد[1] و پسخورد[2] (فیدبک‌دار) می‌توانند کنترل شوند در روش پیشخورد هیچ اطلاعی از خروجی سامانه وجود ندارد و ورودی سیستم بدون تأثیر از خروجی تنظیم می‌گردد که خطای این سیستم می‌تواند بسیار بزرگ باشد، اما در سیستم‌های فیدبک‌دار چون از خروجی سیستم فیدبک گرفته می‌شود، لذا سامانه می تواند با دقت بالایی کنترل شود. سیستم‌های فیدبک‌دار می‌تواند به دو صورت پیوسته و یا قطع و وصل کنترل شود. درحالت پیوسته، خروجی و ورودی سیستم سیگنال‌های آنالوگ می‌باشند. اما در روش دوم، خروجی در حالت قطع یا وصل برای شرایط مختلف قرار می‌گیرد. برای کنترل سامانهٔ تراز ارائه‌شده در مقاله از سیستم کنترلی فیدبک‌دار استفاده شده است، به‌طوری‌که میکروکنترلر با دریافت سیگنال شیب که توسط شیب‌سنج‌ها تولید می‌شود شیب ماشین را اندازه‌گیری کرده و با قطع و وصل شیرهای برقی جک‌های هیدرولیک ماشین را به تراز مطلوب می‌رساند. نحوهٔ کنترل تراز ماشین بر پایهٔ فلوچارت[3] شکل ۵ بوده که برنامه آن در محیط C نوشته‌شده و توسط میکروکنترلر AVR اجرا می‌گردد. همان‌طور که از فلوچارت برنامهٔ میکروکنترلر مشخص می‌باشد بعد از شناسایی شیب عرضی و طولی سیستم بررسی می‌کند که دستگاه در راستای عرضی تراز می‌باشد یا خیر؟ در صورت تراز نبودن، میکروسوییچ‌های متصل به جك‌ها را بررسی می‌کند که آیا جك‌ها امکان جابه‌جایی دارند یا خیر؟ در صورت امکان تراز در هر راستا، دستورات لازم جهت تراز صادر می‌شود تا دستگاه به تراز نهایی برسد و در صورت عدم تراز هشدارهای لازم به کاربر داده می‌شود. ایدهٔ به‌کار رفته در تولید دستورات تراز به این‌صورت می‌باشد که برای تراز هر راستا ابتدا جک‌های بالادستی جمع می‌شوند تا شیب آن راستا با کاهش ارتفاع به شیب تراز نزدیک شود. در صورت عدم امکان کاهش ارتفاع طرف بالادستی، جک‌های پایین دستی فعال شده و با افزایش ارتفاع طرف پایین دستی دستگاه به تراز مطلوب نزدیک می‌شود. در واقع در این روش اولویت تراز، کاهش ارتفاع طرف بالادستی است. فهمیدن اینکه امکان کاهش ارتفاع یک راستا وجود دارد یا نه؟ به عهده میکروسوییچ‌های حد پایین LS و امکان افزایش ارتفاع را نیز از روی میکروسوییچ‌های حد بالا HS می‌توان فهمید. اگر در حین عملیات تراز، هر کدام از میکروسوییچ‌های حد بالا فعال شود و دستگاه به تراز مطلوب نرسد در این‌صورت عملیات تراز قطع شده و هشدار لازم از لحاظ عدم تراز به کاربر داده می‌شود. چون در این روش تراز، دستورات تراز همزمان برای هر دو راستای عرضی و طولی صادر می‌شوند لذا عملیات تراز با سرعت بالا و چون اولویت بر پایهٔ کاهش ارتفاع طرف بالادستی است با پایداری بیشتر به تراز نهایی می‌رسد. این برنامه در یك حلقهٔ بینهایت دائما توسط میکروکنترلر در حال اجرا می‌باشد. لذا در عین‌حال که جك‌ها در حال جابه‌جاشدن هستند واحد کنترل با خواندن شیب عرضی و طولی دستورات تراز را به سرعت در صورت نیاز اصلاح می‌نماید.

۳ مدل کوچك ماشین

برای پیاده‌سازی عملی سیستم ترازکن خودکار چهارطرفه و انجام آزمایشات مربوطه، یك مدل کوچك ماشین مورد استفاده قرار گرفت که این ماشین توانایی حرکت و تغییر ارتفاع در راستای عرضی و طولی را دارد. در شکل ۶ تصویر حقیقی ماشین آورده شده است. در این ماشین از جک و مدار هیدرولیک برای افزایش و کاهش ارتفاع چهار گوشه آن استفاده شده است [۱۰]. جک‌های هیدرولیک توسط شیرهای برقی کنترل می‌شوند. به این‌صورت که هر جک شامل یک شیر برقی دو طرفه می‌باشد که با برقراری جریان الکتریکی از هر بوبین آن، جهت جریان روغن هیدرولیک در داخل جک را تغییر می‌دهد و به این‌صورت می‌تواند کورس جک را تنظیم نمود.

[1] feedforward [2] feedback [3] flowchart

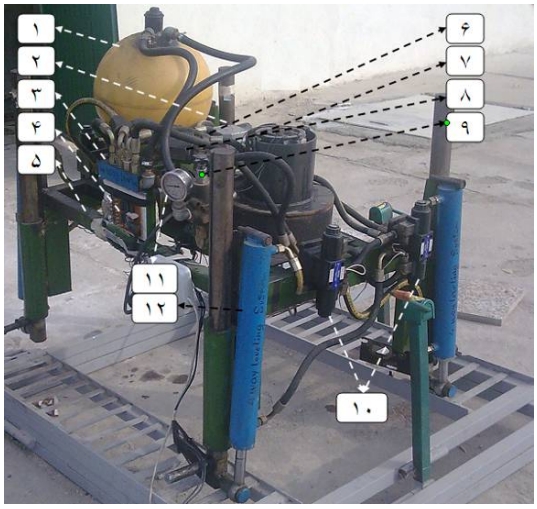


شکل ۵: فلوچارت الگوریتم برنامهٔ میکروکنترلر

ماشین مربوطه صرفاً جهت آزمایش تجهیزات تراز (شیب‌سنج و واحد کنترل) از لحاظ اندازه‌گیری شیب و کنترل تراز مورد استفاده قرار گرفته است.

نحوهٔ کار ماشین به این‌صورت است که با روشن‌شدن موتور الکتریکی، پمپ هیدرولیک نیز شروع به‌کار می‌کند. پمپ هیدرولیک روغن را از مخزن دریافت کرده و با فشاری که توسط فشارشکن قابل تنظیم بوده و در گیج روغن نیز قابل مشاهده است به مدار هیدرولیک تزریق می‌کند. جریان روغن توسط مقسم جریان به شیرهای برقی هر جک انتقال می‌یابد با اعمال سیگنال‌های فرمان به شیرهای برقی، هر جک به‌صورت مستقل می تواند ارتفاع آن گوشه از ماشین را کم یا زیاد کند. این ماشین شامل بخش‌هایی چون موارد ذیل می‌باشد:

۱. مخزن روغن
۲. الکتروموتور
۳. مقسم جریان روغن شیر برقی
۴. واحد کنترل
۵. شاسی دستگاه
۶. پمپ هیدرولیک
۷. شیب‌سنج
۸. شیرهای کنترل جهت روغن
۹. فشارسنج و شیلنگ‌های رابط
۱۰. شیر برقی
۱۱. گیج فشار روغن
۱۲. جک هیدرولیکی

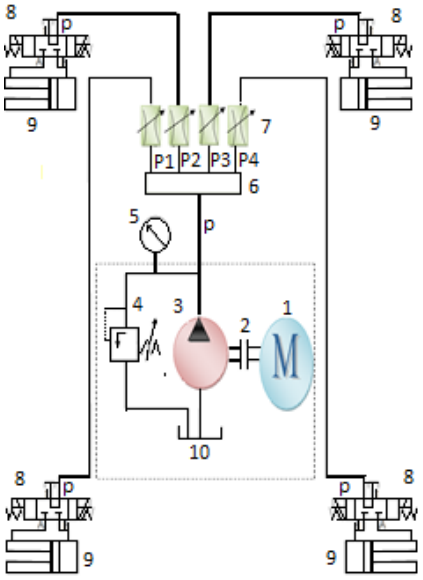


شکل ۶: تصویر حقیقی بدون چرخ ماشین

مدار هیدرولیک دستگاه در شکل ۷ نمایش داده شده است. عناصر تشکیل‌دهندهٔ مدار هیدرولیک از ۹ قسمت تشکیل شده که هرکدام با شماره روی تصویر نمایش داده شده‌اند. این عناصر به این ترتیب می باشند:

۱. موتور الکتریکی
۲. کوپلینگ شفت موتور
۳. پمپ هیدرولیک
۴. فشارشکن
۵. گیج فشار روغن
۶. مقسم جریان
۷. شیرهای کنترل جریان
۸. شیر برقی
۹. جک هیدرولیک
۱۰. مخزن روغن

مشخصات اجزای ماشین به این‌صورت است که مخزن روغن هیدرولیک به حجم ۱۶ لیتر، الکتروموتور مورد استفاده با توان اسمی ۲ اسب بخار،



شکل ۷: مدار هیدرولیك دستگاه

۱۵۰۰ دور در دقیقه و تک فاز می باشد که به‌صورت کوپلینگ به یك پمپ هیدرولیکی از نوع چرخ‌دنده‌ای با دبی بیشینهٔ ۱۶ لیتر در دقیقه متصل گردید. شیر فشارشکن از نوع کنترل دستی می‌باشد و شیلنگ‌های مورد استفاده از نوع فشار قوی می‌باشد که توسط اتصال فشاری ـ مکانیکی نوع پرچی به مدار هیدرولیک متصل شدند. مقسم جریان، شامل دو مقسم مجزا از هم ۱ به ۴ که روغن تحت فشار در مسیر رفت را به چهار قسمت جهت هدایت به چهار جک تقسیم می‌کند و روغن برگشتی از چهار جک را به هم وصل کرده و توسط یک شیلنگ به مخزن منتقل می‌کند. در واقع فشار خروجی از پمپ در این قسمت به چهار قسمت تقسیم می‌شود. شیرهای کنترل جریان مورد استفاده در این سامانه از نوع گلوئی قابل تنظیم به تعداد چهار عدد، شیرهای کنترل جهت از نوع ۴/۲ شامل ۴ دهانه T، B، A، P و دو موضع سوئیچی باز، بسته با راه انداز برقی، ولتاژکاری ۱۲ ولت، شدت جریان کاری ۱ آمپر به تعداد چهار عدد بودند. در این سامانه از چهار جک دوطرفه با میلهٔ پیستون یک‌طرفه با کورس ۴۰ سانتی‌متر، قطر پیستون ۵۵ میلی‌متر و قطر بازوی ۲۵ میلی‌متر استفاده شد. واحد هیدرولیکی و کنترل‌کننده در روی یک شاسی در ابعاد ۸۵ × ۹۵ سانتی متر روی چهار عدد چرخ نصب گردید.

تصویر حقیقی از ماشین روی سکوی آزمون متحرك با قابلیت ایجاد شیب یك‌طرفه و دوطرفه در شکل ۸ نمایش داده شده است. سکوی آزمون متحرك در ابعاد ۲ × ۱/۵ متر از جنس پروفیل ۴ × ۴ سانتی‌متر، امکان ایجاد شیب دوجهته در محیط کارگاهی را فراهم می‌نماید. وقتی سامانهٔ ترازکن خودکار چهار طرفه روی این سکو قرار می‌گیرد، با تغییر شیب سکو در دو جهت امکان آزمون به‌طور کامل فراهم می‌شود. سکوی متحرک از سه قاب مجزا تشکیل شده که توسط دو عدد جک مکانیکی کنترل می‌شوند.

۴ کاربرد دستگاه

همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، سیستم‌های تراز خودکار این توانایی را دارند که شیب زمین را در راستای عرضی و طولی اندازه‌گیری کرده

شکل ۸: تصویر حقیقی از ماشین روی سکوی آزمون

و فرمان‌هایی به واحد کنترل ارتفاع اعمال کنند و در نهایت ماشین مجهز به آن به تراز مطلوب برسد. بعضی از ماشین‌آلات و ادوات کشاورزی، صنعتی و نظامی برای بهبود عملکرد خود یا جلوگیری از واژگون‌شدن نیاز دارند به این تجهیزات مجهز شوند. در شکل ۹، تصویر بالایی یک بیل مکانیکی و در تصویر پایین یک کمباین که در وضعیت تراز مشغول به کار هستند را نمایش می‌دهد. در این مقاله سامانهٔ جدیدی معرفی شده است که می تواند با حذف نویز با دقت بالایی شیب زمین را اندازه‌گیری کرده و ماشینی که با آن مجهز شده را در دو راستای عرضی و طولی به تراز نهایی برساند. در واقع کاربرد این دستگاه به این‌صورت می‌باشد که با نصب تجهیزات سامانه از قبیل شیب‌سنج پیشنهادی، سیستم هیدرولیک کنترل ارتفاع و واحد کنترل روی ماشین مورد نظر می‌توان آن را به‌صورت خودکار به تراز نهایی رساند.

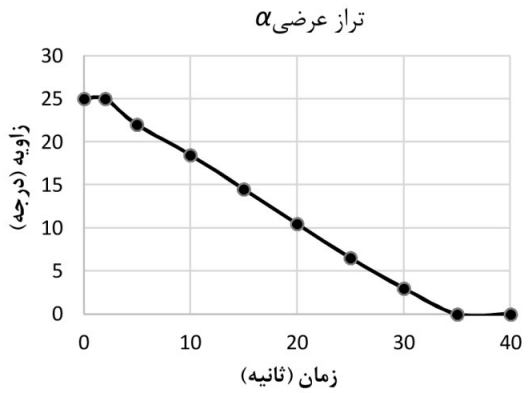
۵ نتایج و بحث

برای آزمایش عملی سامانهٔ ترازکن خودکار، وضعیت ترازشدن آن در شیب عرضی، شیب طولی و ترکیب شیب عرضی ـ طولی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای آزمایش تراز در راستای عرضی، ماشین روی سکوی آزمون قرار داده شد و به‌صورت دستی، راستای طولی سکوی آزمون تراز گردید ($\beta \approx 0$). شیب‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه به راستای عرضی اعمال گردید و مدت زمان ترازشدن دستگاه به ازای شیب‌های اشاره شده اندازه‌گیری شد که نتیجه آن در شکل ۱۰ آورده شده است. با توجه به نتیجهٔ آزمایش مشخص است که اگر شیب طولی حدوداً صفر و شیب عرضی ۲۵ درجه باشد در این شرایط ۳۵ ثانیه طول می‌کشد تا ماشین به تراز نهایی برسد. همانند راستای عرضی، آزمایش تراز راستای طولی نیز اجرا گردید و نتیجه آزمایش در شکل

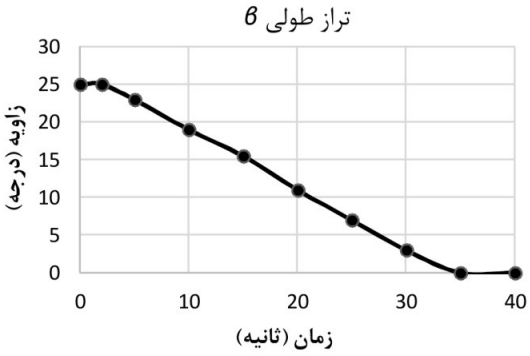
شکل ۹: تصویر نمونه‌ای از ماشین‌آلات مجهز به سیستم تراز

۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که رابطهٔ شیب و زمان تراز رابطه‌ای تقریباً خطی بوده و براساس تنظیم فشار روغن روی ۱۵۰ بار سرعت تراز تقریباً ۰/۸ درجه در واحد زمان به‌دست آمده است. همان‌طورکه از نتایج آزمایشات مشاهده می‌شود سرعت تراز در شیب عرضی و طولی حدوداً یکسان می‌باشد که دلیل آن تقارن تقریبی جهت عرضی و طولی ابعاد ماشین و عین هم بودن مدار هیدرولیک در هر راستا می‌باشد. بعد از آزمایش عملی ماشین تراز در شیب‌های فقط عرضی و فقط طولی آزمایش تراز در شیب ترکیبی طولی – عرضی انجام شد در این حالت به هر دو راستای عرضی و طولی به یک اندازه شیب مساوی ($\beta = ۲۵$ و $\alpha = ۲۵$) درجه اعمال گردید. با شروع عملیات تراز، اندازه شیب در راستای α و β با گذشت زمان یادداشت برداری شد که نتیجهٔ حاصل در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. لذا برای شیب عرضی و طولی یکسان ۲۵ درجه مدت زمان تراز کامل دستگاه ۷۰ ثانیه طول می‌کشد. در این حالت نیز رابطه شیب و زمان تراز یك رابطه تقریباً خطی بوده و براساس تنظیم فشار روغن روی ۱۵۰ بار سرعت تراز تقریباً ۰/۳ درجه در واحد زمان به‌دست آمده است.

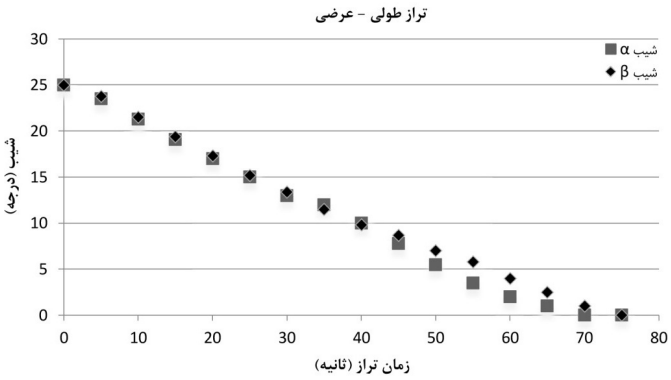
نتایج آزمون عمکرد واقعی دستگاه در روی سکوی شیب‌دار نشان می دهد که ماشین در بدترین شرایط ممکن (قرار گرفتن در شیب عرضی و طولی به‌صورت همزمان) با سرعت ۰/۳ درجه در واحد زمان به پایداری و تراز کامل می‌رسد و مدت زمان تراز نیز رابطه‌ای خطی با شیب دارد و شیب این رابطه با استفاده از کنترل دبی خروجی پمپ هیدرولیك قابل تنظیم می‌باشد. اگر سرعت حرکتی دستگاه و تغییرات شیب سطح زمین کمتر از ۰/۳ درجه در ثانیه باشد، دستگاه بدون تأخیر زمانی اقدام به تراز خود می‌نماید.



شکل ۱۰: نتایج آزمون تراز در راستای عرضی



شکل ۱۱: نتایج آزمون تراز در راستای طولی



شکل ۱۲: نتایج آزمون تراز ترکیبی با شیب $\beta = ۲۵$ و $\alpha = ۲۵$

۶ نتیجه‌گیری

هدف این مقاله معرفی یک سیستم جدید تراز خودکار می‌باشد که قادر است با نصب روی یک ماشینی که توانایی تنظیم ارتفاع دارد آن را به تراز مطلوب برساند. مهمترین بخش سامانهٔ ترازکن واحد شیب‌سنج و واحد کنترل آن است. شیب‌سنج پیشنهادی از دو عدد آونگ تشکیل شده است که میتواند اندازهٔ شیب عرضی و طولی را به سیگنال‌های آنالوگ دیفرانسیلی تبدیل کند. مزیت تولید سیگنال‌های آنالوگ دیفرانسیلی این است که می توان نویز حاصل را حذف کرد و دقت اندازه‌گیری شیب را ارتقا داد. برای واحد کنترل یک الگوریتم ترازی معرفی شد که همزمان با خواندن شیب میتواند در هر راستای

عرضی و طولی سیگنال‌های لازم برای تراز کامل ماشین را تولید کند. برای تست واحد شیب‌سنج و واحد کنترل، یک ماشین ساده که توانایی تنظیم ارتفاع دارد مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش عملی در فشار روغن ۱۵۰ بار در بدترین شرایط با سرعت ۰/۳ درجه در واحد زمان، دستگاه را به تراز مطلوب رساند. امروزه برای افزایش راندمان انواع ادوات صنعتی، کشاورزی و نظامی از قبیل جرثقیل، کمباین، تراکتور، سکوهای پرتاب موشک و غیره نیاز است به سامانهٔ تراز خودکار مجهز گردد. سامانهٔ تراز معرفی‌شده در مقاله قابلیت استفاده در انواع این ماشین‌آلات و ادوات را دارد. لذا پیشنهاد می‌شود جهت بررسی تأثیر آن روی عملکرد و افزایش راندمان عملیاتی انواع ماشین‌آلات و خودرو مورد آزمایش و ارزیابی قرار گیرد.

مراجع

[1] K. Li, J. Chen, Z. Xiao, M. Xu, An electrohydraulic system for synchronized roof erection, *Automation in Construction*, vol. 12, no. 1, pp. 29-42, 2003.

[2] Y. Huayong, S. Hu, G. Guofang, H. Guoliang, Electro-hydraulic proportional control of thrust system for shield tunneling machine, *Automation in Construction*, vol. 18, pp. 950-956, 2009.

[3] G. Qiang, P. Hong, Leveling Control Technology of Hydraulic System Based on Fuzzy Decoupling Algorithm, *International Conference on Networking and Information Technology*, pp. 314-318, 2010.

[4] M. Li, K. Imou, K. Wakabayashi, S. Yokoyama, Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 1–16, 2009.

[5] M. J. Stadtroda, W. B. Halle, D. L. Jena, Hill side combine harvesting, solutions for improving operations, *Land technik*, vol. 6, 256-261, 1991.

[6] C. H. Lin, S. M. Kuo, High-performance inclinometer with wide-angle measurement capability without damping effect, *IEEE* 20^{th} *International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 585-588, 2007.

[7] Stig Ekelof, The Genesis of the Wheatstone Bridge, *Engineering Science and Education Journa*l, vol. 10, no. 1, pp. 37–40, 2001.

[8] B. Razavi, Design of analog CMOS integrated circuit, Second Edittion, pp. 201-211, New York: McGraw-Hill, , 2001.

[9] B. Geranmehr, K. Vafaee, A. Sadeqi, High precision electro hydraulic self-leveling platform system, Second RSI/ISM *International Conference on Robotics and Mechatronics*, pp 29-34, 2014.

[10] P. Chapple, Principles of Hydraulic Systems Design, Second Edition, pp. 1-53, Momentum Press®, LLC, 2015.