

Design and Construction of a Water-Free Cleaning Robot for Solar Panels with the Ability to Adjust the Height**Mohammad Reza Miveh, Assistant Professor, Amirhossein Ahmadi, M.Sc., Mojtaba Pishvaei, Assistant Professor**Department of Electrical Engineering- Tafresh University, Tafresh, Iran
miveh@tafreshu.ac.ir, amirhosseinahmadi08@gmail.com, pishvaei@tafreshu.ac.ir**Abstract**

Today, with the depletion of fossil fuels, the trend towards using renewable energies has increased. Among the various types of renewable energy resources, solar systems received more attention due to technical, environmental and economic reasons. However, the efficiency of solar panels is not high due to several reasons. In addition to using high-efficiency control equipment such as maximum power point tracking (MPPT) methods, cleaning the surface of solar panels is one of the best and easiest ways to improve their efficiency and performance. In this paper, to increase the efficiency of solar panels, a robot for cleaning solar panels with the ability to adjust the height with the help of tank wheel technology has been developed. Moreover, due to water shortages in the country, the design of this robot has been done without the use of water. Considering that the designed robot has a telecommunication system with remote control capability, the speed of cleaning is very high and there is no need for the operator. The used software in the robot provides proper scheduling for the cleaning of solar panels. In addition to the aforementioned advantages, the proposed robot has a much lower price than foreign products. The performance of this robot on the five kW solar power plant of Tafresh University has been evaluated. Increasing the efficiency of the power plant, more revenue from the sale of energy to the grid and significant savings in water consumption are the main advantages of this intelligent robot.

Keywords: cleaning robot, efficiency, renewable energy, solar panels**Received:** 30 July 2021**Revised:** 20 September 2021**Accepted:** 9 October 2021**Corresponding Author:** Dr. Mohammad Reza Miveh

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1401.13.51.4.7>

مقاله پژوهشی

طراحی و ساخت یک ربات تمیزکننده صفحات خورشیدی بدون نیاز به آب و با قابلیت تنظیم ارتفاع

محمدرضا میوه، استادیار، امیرحسین احمدی، کارشناسی ارشد، مجتبی پیشوایی، استادیار

دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

miveh@tafreshu.ac.ir, amirhosseinahmadi08@gmail.com, pishvaei@tafreshu.ac.ir

چکیده: امروزه با رو به اتمام بودن سوخت‌های فسیلی، گرایش به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بیش از پیش شده است. در میان انواع منابع تولید انرژی تجدیدپذیر، نیروگاه‌های خورشیدی به دلایل فنی، زیست محیطی و اقتصادی از جایگاه مهمی برخوردار هستند. با این وجود، راندمان پنل‌های خورشیدی به دلایل مختلف در سطح بالایی قرار ندارند. در کنار استفاده از تجهیزات کنترلی پیشرفته مانند روش‌های ردیابی نقطه حداکثر توان، پاک‌سازی سطح پنل‌های خورشیدی یکی از بهترین و ساده‌ترین روش‌های بهبود راندمان تولید در این نیروگاه‌ها است. در این مقاله، جهت افزایش بازدهی و عمر مفید صفحات خورشیدی، یک ربات هوشمند تمیزکننده صفحات خورشیدی با قابلیت تنظیم ارتفاع به کمک تکنولوژی چرخ تانک طراحی شده است. با توجه به جدی بودن مشکل کم آبی در کشور، طراحی این ربات بر اساس تکنیک تمیزکاری بدون آب صورت گرفته است. با توجه به اینکه ربات طراحی شده دارای سیستم مخابراتی بوده و قابلیت کنترل از راه دور را دارد، سرعت تمیز کاری در آن بسیار بالا بوده و نیازی به وجود اپراتور در آن نیست. نرم‌افزار اختصاصی به کار رفته در ربات، برنامه‌ریزی زمان-بندی شده‌ای را جهت تمیزکاری دوره‌ای در ربات فراهم می‌کند. علاوه بر مزایای ذکر شده، ربات پیشنهادی نسبت به تمامی نمونه محصولات خارجی قیمت بسیار کمتری دارد. عملکرد این ربات بر روی نیروگاه خورشیدی پنج کیلواتی دانشگاه تفرش مورد ارزیابی قرار گرفته است. افزایش بازده تولید نیروگاه، درآمد بیشتر ناشی از فروش انرژی به شبکه، عدم استفاده از اپراتور و صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف آب از مزایای اصلی این ربات هستند.

کلمات کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، بازده، ربات تمیزکننده، پنل‌های خورشیدی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۵/۸

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۶/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۷/۱۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمدرضا میوه

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تفرش-کیلومتر ۵ جاده تهران- دانشگاه تفرش- دانشکده مهندسی برق-گروه قدرت

۱- مقدمه

امروزه با کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی^۱، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به دلایل فنی، اقتصادی و زیست محیطی، نقش پر رنگی را در سید انرژی کشورهای مختلف جهان به دست آورده است [۳-۱]. محدود بودن منابع انرژی فسیلی، رشد بار و مشکلات ناشی از انتشارات گازهای گلخانه‌ای^۲، توجه بیش از پیش به انرژی‌های تجدیدپذیر را بر همگان روشن و ضروری کرده است. با توجه به برخورداری از پتانسیل مطلوب و مناسب انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورمان به ویژه تابش مناسب خورشید، توسعه منطقی این منابع ارزشمند و خدادادی موجه به نظر می‌رسد، چرا که از این طریق می‌توان در جهت اهداف توسعه پایدار نیز گام برداشت.

خورشید عظیم‌ترین منبع انرژی در جهان هستی است که این کره نورانی سهم عمده‌ای را در فراهم آوردن انرژی‌های مورد نیاز بشر دارد. لذا با استفاده بهینه از این منبع انرژی، بسیاری از نیازهای بشر مرتفع می‌گردد. در این راستا، امروزه پنل‌ها یا صفحات خورشیدی^۳ به منظور تامین برق در بسیاری از مراکز صنعتی، تجاری و مسکونی به منظور تولید برق پاک نصب می‌گردند. این صفحات نور خورشید را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند و با تنظیم زاویه مناسب این صفحات و نظافت منظم، بازدهی بهینه این صفحات به ارمغان می‌آید. از آنجایی که انرژی خورشیدی یک تکنولوژی قابل دسترس است به یک سرمایه‌گذاری محبوب برای شرکت‌ها و نیز کاربران مسکونی تبدیل شده است. در نتیجه، این تقاضا موجب تحریک تحقیقات برای افزایش توان خروجی کلی سیستم‌های خورشیدی شده و باعث شده آزمایشگاه‌ها در سراسر جهان سخت تلاش کنند تا فناوری‌های مربوطه را کارآمدتر کنند. صرف نظر از تلاش صنعت برق برای کوتاه کردن مدت زمان بازگشت سرمایه‌گذاری انجام شده مانند خرید تضمینی برق، اغلب تلفات قابل پیشگیری همچون کثیف شدن سطح پنل‌ها نادیده گرفته می‌شوند. یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش بازده نیروگاه‌های خورشیدی را می‌توان عدم تمیزکاری پنل‌ها به‌طور منظم دانست. در صورت وجود گرد و غبار و یا عوامل دیگر یک لایه آلودگی روی پنل قرار می‌گیرد که باعث کاهش جذب نور پنل‌های خورشیدی شده و در نتیجه کاهش توان خروجی کل سیستم حاصل می‌شود [۴]. نرخ افت توان در طول زمان نسبتاً غیر قابل پیش‌بینی است، زیرا به عوامل مختلف محیطی مانند نوع خاک، فعالیت کشاورزی، بارش، باد و فصولات پرنده‌ها بستگی دارد.

همان‌طور که در بالا بیان شد، یکی از مهم‌ترین چالش‌های اصلی مالکان نیروگاه‌های خورشیدی تمیز نگه داشتن سطح پنل‌ها است، چرا که گرد و غبار و کثیفی به شدت موجب کاهش بازده تولید می‌شود [۵]. این چالش به خصوص در نیروگاه‌هایی که در حومه شهر و بیابان‌ها ساخته شده‌اند چشم‌گیر است، چرا که دسترسی به آب کافی برای شست‌وشوی پنل‌ها مشکل است. انواع آلودگی‌های محیطی همچون گرد و غبار، فصولات پرنده‌گان و حشرات سطح سلول‌های خورشیدی را در گذر زمان می‌پوشاند. از سویی دیگر، تحقیقات نشان داده است که ایجاد آلودگی‌ها بر سطح سلول خورشیدی میزان جذب نور خورشید را کاهش داده و سبب می‌شود تا انرژی تولید شده توسط این سلول‌ها کاهش پیدا می‌کند که در نتیجه کارایی این صفحات نیز کاهش می‌یابد [۶]. بنابراین نظافت سلول‌های خورشیدی به منظور دستیابی به کارایی بهینه و تولید انرژی بیشتر ضرورت می‌یابد. با این وجود، پاک‌کردن پنل‌های خورشیدی کار ساده‌ای نیست. پنل‌های خورشیدی اغلب در مکان‌های خاصی قرار دارند و تمیزکاری به‌صورت دستی به دلیل وسعت نیروگاه‌های خورشیدی دشوار بوده و نیازمند صرف مدت زمان زیادی است. علاوه بر این، پاک‌کردن پنل به‌صورت محدود در یک سال ممکن است تأثیر قابل توجهی بر عملکرد انرژی سالانه نداشته باشد. اگر تمیزکاری به‌صورت هفتگی و مطابق برنامه باشد، مطمئناً تأثیر قابل توجه بر روی عملکرد تولید سالانه انرژی نیروگاه خواهد داشت. همچنین اگر نیروگاه نیاز به اپراتور برای تمیزکردن پنل داشته باشد، ممکن است از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نباشد. با این حال، رهاکردن پنل‌ها بدون تمیز کردن ممکن است عاقلانه نباشد، زیرا خاک می‌تواند باعث آسیب دائمی به سطح پنل شود در نتیجه طول عمر پنل را محدود کند. در نهایت، چون به تمیز کردن پنل به ندرت پرداخته می‌شود و ممکن است تجهیزات برای تمیز کردن قابل دسترس نباشند، راه حل منطقی تمیزکاری به‌طور خودکار به کمک ربات‌های شستشوی هوشمند است.

در این راستا تاکنون ربات‌های تمیزکننده مختلفی در خارج از کشور مانند ربات‌های سولاربراش، اکوپ، سربوت، جترو، ایندی سولار و غیره ساخته شده‌اند [۷-۹]. معمولاً برای پاک‌کردن هر ردیف از پنل‌های خورشیدی از یک ربات استفاده می‌شود

[۱۰،۱۱]. استفاده از این ربات‌های سبک باعث افزایش بازده و طول عمر صفحات خورشیدی و همچنین کاهش خطرات جانی پرسنل، مصرف آب و نیز هزینه‌های نیروی انسانی می‌گردد [۱۲،۱۳]. تاکنون طرح‌های متنوعی برای طراحی ربات‌های تمیزکننده پنل‌های خورشیدی ارائه شده است [۱۴،۱۵]. در بعضی از این طراحی‌ها، ربات قابلیت حرکت دلخواه روی صفحات خورشیدی را دارد، اما در برخی دیگر، ربات در یک مسیر مشخص، شبیه حرکت روی ریل، از ابتدا تا انتهای پنل را تمیز می‌کند [۱۶،۱۷]. ربات‌ها معمولاً پنل‌های خورشیدی را با حرکت یک برس به صورت افقی پاک می‌کنند. برخی از ربات‌ها شستشوی پنل را با آب و برخی دیگر این کار را بدون آب انجام می‌دهند [۱۸].

سولاربراش یک ربات سبک وزن و نیمه هوشمند برای تمیز کردن بدون آب صفحات خورشیدی در محیط خشک است [۱۴]. با استفاده از تراک‌های ساخته شده در این ربات، جفت مکنده آن روی پنل حرکت می‌کند تا امکان عبور از فاصله تا ۳۰ میلی متر را داشته باشد و بر روی سطوح شیب‌دار تا ۳۵ درجه کار می‌کند. انواع برس‌های مختلف را می‌توان به جلو ربات متصل کرد تا گرد و خاک و دیگر آلودگی‌ها را از بین ببرد. این ربات برق لازم خود را از یک باتری قابل شارژ تامین می‌کند. از معایب اصلی این ربات می‌توان به ضرورت حضور اپراتور، نیاز به پشتیبانی با طناب در محیط با شیب زیاد و سیستم مکنده آن اشاره نمود. اکوپیا یک ربات کاملاً سبک است که با استفاده از برس میکروفیبر برای جارو کردن گرد و غبار پنل‌ها استفاده می‌شود. این ربات تنها برای آرایه‌های بزرگ به صرفه است و تعداد زیادی ادوات نصبی دارد و لذا هزینه این ربات بسیار بالا است. در مرجع [۱۷]، یک ربات هوشمند در کشور امارات ساخته شده که قابلیت تمیز کاری پنل‌ها را بدون استفاده از آب دارد. در مرجع [۱۹]، یک ربات با کنترل از راه دور جهت تمیز کردن پنل‌های خورشیدی پیشنهاد شده است. یک پیشنهاد جهت شستشوی ربات‌ها از راه دور در مرجع [۲۰] ارائه شده است. در مرجع [۲۱]، یک ربات ساده جهت پاک‌سازی نیروگاه‌های خورشیدی پیشنهاد شده است. در عربستان نیز اخیراً رباتی هوشمند جهت تمیز کاری پنل‌ها بدون نیاز به آب پیشنهاد شده است [۲۲]. در جدول (۱)، ویژگی‌های معروف‌ترین ربات‌های ساخته شده در سراسر دنیا با ربات پیشنهادی در این مقاله مقایسه شده است.

مطابق جدول بالا، اگرچه تاکنون ربات‌های بسیاری جهت تمیز کاری پنل‌های خورشیدی در کشورهای مختلف ساخته شده‌اند. با این وجود، قیمت بالا، کمبود آب و عدم هم سطحی پنل‌ها در نیروگاه‌های خورشیدی کشور از مشکلات اصلی عدم امکان استفاده از ربات‌های خارجی در ایران است. عموماً محصولات خارجی دارای هزینه بسیار بالایی هستند و اغلب امکان تهیه آنها در داخل کشور وجود ندارد. به‌طور مثال بر اساس داده‌های سایت‌های خارجی یک نمونه محصول چینی دارای قیمت ۱۵ هزار دلار است. از طرفی ربات ساخته شده در این پروژه دارای ویژگی تنظیم ارتفاع است که در هیچ‌کدام از محصولات خارجی به دلیل مطرح نبودن مسئله عدم هم سطحی پنل‌ها در ایران چنین ویژگی وجود ندارد. همچنین، با توجه به اینکه ربات طراحی شده دارای دانگل مخابراتی بوده و قابلیت کنترل از راه دور را دارد، سرعت تمیز کاری آن بسیار بالا بوده و نیازی به وجود اپراتور در آن نیست. نرم‌افزار اختصاصی این ربات برنامه‌ریزی زمان‌بندی شده جهت تمیز کاری دوره‌ای را در این ربات فراهم می‌کند. در مقایسه با نمونه محصولات خارجی با داشتن تمامی امکانات ذکر شده، ربات پیشنهادی نسبت به تمامی نمونه محصولات خارجی قیمت بسیار کمتری را دارا است.

Table (1): Comparison between proposed robots in other countries and the suggested robot in this paper [14]

جدول (۱): مقایسه بین ربات‌های ساخته شده در کشورهای دیگر و ربات ساخته شده در این مقاله [۱۴]

مدل ربات	هزینه	روش تمیز کاری	کنترل از راه دور	تنظیم ارتفاع
اکوپیا	بالا	بدون آب	ندارد	ندارد
سربوت	بالا	با آب	ندارد	ندارد
جترو	بالا	بدون آب	ندارد	ندارد
ایندی سولار	بالا	بدون آب	ندارد	ندارد
سولاربراش	بالا	بدون آب	ندارد	ندارد
ربات پیشنهادی	پایین	بدون آب	دارد	دارد

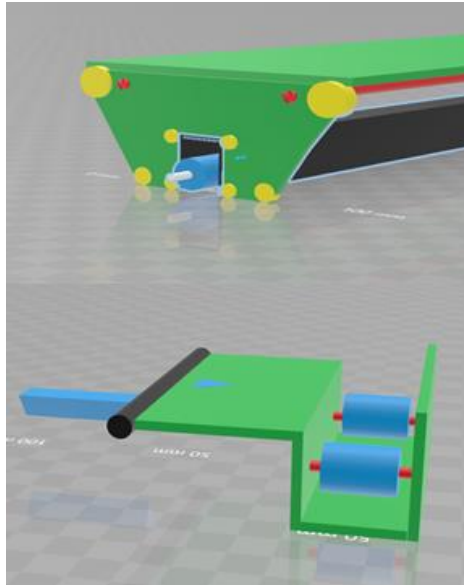
هدف این مقاله طراحی و ساخت یک ربات تمیزکننده هوشمند صفحات خورشیدی بدون نیاز به آب و دارای قابلیت تنظیم ارتفاع با توجه به عدم هم سطحی موجود در بعضی از آرایه‌های خورشیدی در نیروگاه‌های ایران است. در این ربات، جهت کاهش هزینه شست‌وشو اعم از کاهش هزینه مصرفی آب و هزینه نیروی انسانی از روش‌های تمیزکاری بدون آب بهره برده شده است تا در جهت رفع مشکل کم آبی کشور نیز گامی موثر برداشته شود. در جهت تحقق این هدف، رباتی کاملاً هوشمند طراحی شده که توانایی تمیز کردن صفحات را بدون دخالت نیروی انسانی دارد. اجرای این طرح، تاثیر بسزایی در افزایش بازده تولید نیروگاه‌های خورشیدی خواهد داشت و در حفظ و نگهداری صفحات نیز تاثیر بسزایی خواهد داشت. از دیگر مزایای اقتصادی این ربات می‌توان به هوشمند بودن آن اشاره کرد به طوری که ربات نیاز به تامین برق ندارد و برق مصرفی خود را توسط یک پنل خورشیدی که بر روی آن تعبیه شده تامین می‌کند. این ربات دارای یک سیستم ارتباطی مخابراتی است که می‌تواند توسط اتاق کنترل اطلاعاتی چون میزان درصد انجام پروژه و یا میزان بازده صفحات را اطلاع دهد. همچنین امکان کنترل جهت شروع و توقف کار تمیز کاری طبق تاریخ و ساعت معین به‌طور متناوب فراهم شده است.

در ادامه اصول اولیه طراحی ربات تمیزکننده خورشیدی در بخش دوم بیان شده است. در بخش سوم طراحی الکترونیکی، کنترلی و مکانیکی ربات بیان شده است. در بخش چهارم به ارزیابی محصول نیمه صنعتی پرداخته شده است. در بخش پنجم بحث و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- اصول اولیه طراحی ربات تمیزکننده خورشیدی

ربات تمیزکننده خودکار پنل‌های خورشیدی بدون نیاز به آب و با قابلیت عبور از ناهمواری‌ها، یک ربات با هزینه ساخت پایین و کنترل آسان است که بر روی سطح صفحات خورشیدی باهر ابعادی (ابعاد دستگاه بر اساس سفارش مشتری و توان خروجی پنل) قابل تغییر است. البته براساس استانداردهای موجود و ابعاد تعریف شده معمولاً چند سایز مختلف دستگاه ساخته می‌شود و با هرمیزان زاویه (شیب آرایه خورشیدی) قرار می‌گیرد. مشخصات اصلی دستگاه در ادامه بیان شده است. ابعاد دستگاه: متناسب با ابعاد ماژول خورشیدی در نیروگاه خورشیدی (ابعاد ماژول ۲۰۰ وات: ۹۵*۱۳۵)، وزن دستگاه: با باتری ۲۰ کیلوگرم و بدون باتری ۸ کیلوگرم، جنس بدنه: آلومینیوم، تعداد چرخ‌ها: دو شنی تانک، تعداد برس: ۱ برس با پارچه میکروفیبر. تجهیزات ربات نیز شامل ۸ سنسور مجاورتی، پردازنده شامل یک هسته آردوینو مگا ۲۵۶۰، دو موتور پله‌ای و یک موتور dc دوازده ولتی، درایور موتور پله‌ای و dc، مجهز به دو چنگک L شکل در بالا و پایین ربات، دانگل مخابراتی (رادیبوی) با برد ۱ کیلو متر، مجهز به NodeMCU (جهت ارتباط بی‌سیم)، دو باتری ۱۸ آمپری و چرخ با مکانیزم تانک، برس دارای پارچه میکروفیبر و نرم‌افزار اختصاصی جهت کنترل ربات است. طرح سه بعدی ربات طراحی شده در شکل (۱) نشان داده شده است. در ابتدا با توجه به بررسی نمونه‌های خارجی و امکان‌سنجی اقتصادی و فنی پیاده‌سازی آنها در داخل، یک نمونه نیمه صنعتی طراحی شده است. سپس مدل سه بعدی طرح اصلی پیشنهاد شده است. طراحی طوری صورت گرفته تا کارکرد دستگاه ساده باشد و نیاز به آب نداشته باشد. دستگاه بر روی آرایه خورشیدی قرارداد می‌شود و با نصب چنگک‌های آن از استحکام دستگاه اطمینان حاصل می‌شود. سپس با نرم‌افزار طراحی شده ارتباط برقرار کرده و حالت کاری مورد نظر به دستگاه اعمال می‌شود. دستگاه بر اساس اطلاعات دریافتی از کاربر فعالیت خود را در ساعت مشخص شروع کرده و در ساعتی معین به پایان می‌رساند. ربات به هیچگونه مراقبتی در حین عملیات تمیزکاری نیاز ندارد. پس از اتمام فعالیت، ربات به‌صورت خودکار به محل تعیین شده جهت شارژ باتری‌ها باز می‌گردد.

دستگاه برای کنترل و شروع به کار دارای سه حالت تعریف شده پیش فرض است: الف) کنترل دستی از طریق خود دستگاه، ب) کنترل دستگاه توسط ارتباط رادیویی، دانگل مخابراتی و کنترل به واسطه اینترنت اشیا و درگاه وب با آدرس مشخص، ج) کنترل هوشمند توسط خود دستگاه به واسطه دریافت یک برنامه زمان‌بندی برای تمیز کردن دوره‌ای پنل‌ها بر اساس روز، هفته و ماه توسط نرم‌افزار طراحی شده، دریافت ورودی از سنسورهای تشخیص لبه و سنسورهای تشخیص نقطه شروع و پایان مسیر جهت حرکت در مسیر درست و جلوگیری از سقوط دستگاه و همچنین تنظیم مصرف انرژی دستگاه به‌طور بهینه جهت دست-یابی به حداکثر زمان قابل استفاده از دستگاه برای فرایند تمیزکاری تنها با یک بار شارژ باتری.



شکل (۱): طرح سه بعدی ربات پیشنهادی

Figure (1): Three-dimensional design of the proposed robot

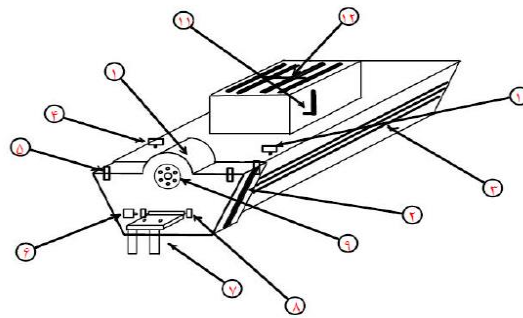
مکانیزم حرکتی سیستم در شکل (۱) یک طرح اولیه از مکانیزم حرکتی شنی است. اصطلاح شنی در مواقعی استفاده می‌شود که مجموعه‌ای از شنی‌ها با کمک هم یک سیستم حرکتی را راه‌اندازی می‌کنند. تانک‌ها بارزترین تجهیزاتی هستند که دارای سیستم حرکتی شنی هستند. در این طرح، تسمه اصلی توسط چندین هرزگرد و با اعمال نیرو از یک موتور استپر به حرکت در خواهد آمد. دو میله فولادی در بالا و دو میله فولادی در پایین به عنوان چهارچوب ربات در نظر گرفته شده است. در قسمت پایین ربات نیز یک برس به صورت طولی تعبیه شده است. به‌طور میانگین، پنل‌های خورشیدی در هر متر مربع توان تحمل ۵۵۰ کیلوگرم وزن را دارند. درحالی که ربات طراحی شده با احتساب وزن باتری، موتورها و تمامی قطعات بدنه کمتر از ۲۲ کیلوگرم وزن دارد. بنابراین، ربات طراحی شده می‌بایست به واسطه مکانیزم حرکتی حداقل ۱۳۰۰ الی ۱۴۰۰ سانتی‌متر مربع با پنل‌ها سطح اتکا داشته باشد. شنی‌های ربات هرکدام عرضی برابر با ۱۰ سانتی‌متر و طولی برابر ۸۰ سانتی‌متر (قابل اتکا به پنل‌ها) دارند. سطح اتکا ربات بر روی پنل حدود ۱۶۰۰ سانتی‌متر مربع است. یعنی ربات قابلیت تحمل فشار مضاعف تا حداکثر حدود ۱۵ درصد وزن خود ربات را به صورت استاندارد دارد. در ربات تمیزکننده پنل‌های خورشیدی زاویه دار بودن پنل‌ها نه تنها یک مشکل تلقی نمی‌شود، بلکه برای امر تمیزکاری بدون آب بسیار لازم است.

الیاف برس‌های انتخابی برای تمیزکاری بدون آب در ربات از نوع طرح میکروفیبر است. این برس در الیاف خود دارای حفره‌های بسیاری است که در شرایط تمیزکاری آلودگی‌های سطح را در خود جای می‌دهد. این مدل از الیاف، نسبت به الیاف‌های دیگری که در این زمینه به‌کار گرفته می‌شوند، ده‌ها برابر قدرت تمیزکنندگی بیشتری دارد. واضح است که اگر بنا باشد که تمام غبار ناشی از سطح پنل‌ها را در خود جای دهد، نمی‌تواند مدت زیادی به عمل تمیزکنندگی ادامه دهد و برس به‌طور مداوم باید تمیز شده و مجدداً تمیزکاری پنل‌ها را ادامه دهد. اما با توجه به شیب‌دار بودن سطح پنل‌ها و ماریج بودن الیاف از بالا به سمت پایین، اکثر آلودگی‌های سطح پنل‌ها به سمت پایین رانده شده و از پنل به پایین آن می‌ریزند. از طرفی به‌وسیله دو سنسور مجاورتی، ربات همواره فاصله خود را با لبه‌های بالایی و پایینی تنظیم می‌کند. برای شرایطی که ممکن است زاویه کار، شیب تندی را به ربات تحمیل کند؛ دو چنگک نگهدارنده بر روی سطح بالایی تعبیه خواهد شد که وظیفه آنها گرفتن لبه بالایی پنل به‌منظور جلوگیری از واژگون شدن ربات است. در طراحی سعی شده است تا ربات در تمامی زاویه‌ها و شیب‌های مختلف پنل‌ها به‌کار خود ادامه دهد و هرگز متوقف نشود. از قابلیت‌های دیگر این ربات به جلوگیری از هدر رفت آب، کاهش هزینه نیروگاه ناشی از مصرف آب بها و نیروی انسانی، افزایش بازدهی نیروگاه خورشیدی در مناطق خشک و کویری، سازگاری با محیط‌زیست، عدم تولید هیچگونه آلاینده‌ای، قیمت کمتر از نمونه‌های مشابه خارجی، قابلیت تشخیص لبه ماژول‌های نیروگاه خورشیدی و قابلیت استفاده در هر گونه شیب می‌توان اشاره نمود.

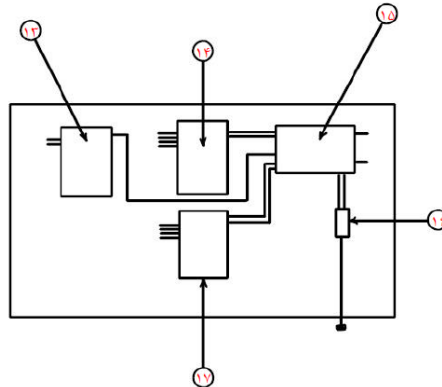
دستگاه طراحی شده قادر است در هر ساعت آرایه‌ای از پنل‌ها به طول ۸۰ متر را تمیز کند. سرعت دستگاه ۱/۳ متر بر دقیقه است. در برابر بادهای شدید نیز مقاوم خواهد بود. برای شارژ باتری از پنل‌هایی که جمعا جریانی حدود یک آمپر در خروجی دارند استفاده می‌شود و به‌وسیله مدارات واسط به‌منظور تنظیم سطح ولتاژ و جریان، باتری شارژ می‌گردد. در این شرایط یک باتری نیمه خالی را می‌توان در زمانی که حدود دو روز تخمین زده می‌شود، کاملا شارژ کرد تا برای دوره بعدی آماده شود. پنل‌های خورشیدی و مدارهای واسط بر روی ایستگاه کنار پنل‌ها نصب می‌شوند. در شکل (۲) ساختار کلی ربات نشان داده شده است. ربات با استفاده از چرخ‌های مدل چرخ تانک و مکانیزم قفل مغناطیسی و چنگک طراحی شده قابل استفاده در هر شرایطی است. در شکل (۳) نمای داخلی جعبه مدار فرمان دستگاه نشان داده شده است که از دو بخش کلی تشکیل شده است. بخش اول مربوط به قسمت پردازش اطلاعات و سیستم پردازنده اصلی است که متشکل از یک پردازنده مبتنی بر آرم به همراه ماژول‌های ارتباطی از نوع رادیویی NRF24L01 و ماژول NodeMCU جهت برقراری ارتباط اینترنتی از طریق وای‌فای است. اطلاعات ناشی از حسگرهای نوری در این بخش پردازش می‌شود و با توجه به ارتباط بدون سیم ربات با نرم‌افزار اختصاصی و براساس داده‌های ورودی از سمت نرم‌افزار میزان سرعت و نوع حالت کاری ربات توسط این بخش تنظیم و اعمال می‌شود. در بخش دوم برای تنظیم جهت حرکتی و میزان سرعت حرکت چرخ‌ها از یک درایور موتور پله‌ای استفاده شده و همچنین برای برس از یک درایور موتور dc استفاده شده است. شکل‌های (۴) و (۵) نیز به ترتیب نمای سه بعدی از طرح اصلی ربات و نمونه اولیه طراحی شده ربات را در آزمایشگاه دانشگاه تفرش نشان می‌دهند. جزئیات شکل‌های (۲) و (۳) به شرح زیر است:

- چرخ مدل تانک ربات
- تسمه با پهنای ۱۰ سانتی متر (شنی چرخ ربات از مدل چرخ تانک)
- برس با پارچه میکروفیبر
- سنسور نوری جهت تعیین محدوده حرکتی سمت چپ
- سنسور نوری تشخیص لبه آرایه پنل‌ها سمت چپ
- قفل مغناطیسی جهت ثابت نگه داشتن چنگک
- چنگک طراحی شده جهت حرکت بر روی هر مسیر شیب دار
- سروو موتور نود درجه جهت ایجاد حرکت دوارانی چنگک طراحی شده
- فولی چرخ ربات
- سنسور نوری جهت تعیین محدوده حرکتی سمت راست
- آنتن ماژول NRF24L01 جهت برقراری ارتباط از راه دور از نوع رادیویی
- پنل خورشیدی تعبیه شده در ربات جهت تامین برق مصرفی ربات
- درایور موتور dc از نوع L298 (بخش درایور)
- درایور موتور پله‌ای (بخش درایور)
- پردازنده مبتنی بر آرم و ماژول اینترنتی و قطعات الکترونیک (بخش پردازشگر)
- ماژول NRF24L01 به همراه آنتن
- درایور موتور پله‌ای (بخش درایور)

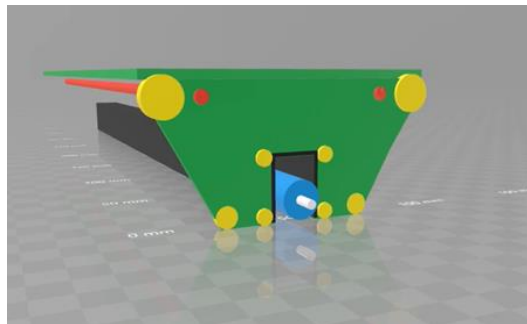
قابل ذکر است که مدل سلول خورشیدی استفاده شده در ربات جهت تامین برق مصرفی آن پلی کریستال و مدل پنل‌های موجود در نیروگاهی که ربات بر روی آن تست شده است از نوع مونوکریستال است. سلول‌های پلی کریستال از دانه‌های ریزسیلیکون تک کریستالی ساخته شده‌اند. بازده این سلول‌ها نسبت به تک کریستال‌ها پایینتر است، اما هزینه ساخت کمتری دارند. در حالی که مونوکریستال‌ها یکی از رایج‌ترین انواع سلول‌های خورشیدی در صنعت فتوولتائیک بوده و دارای بازده بالایی هستند.



شکل (۲): طرح اولیه ربات پیشنهادی
Figure (2): Prototype of the proposed robot



شکل (۳): نمای داخل جعبه فرمان ربات
Figure (3): Inside view of the robot control box

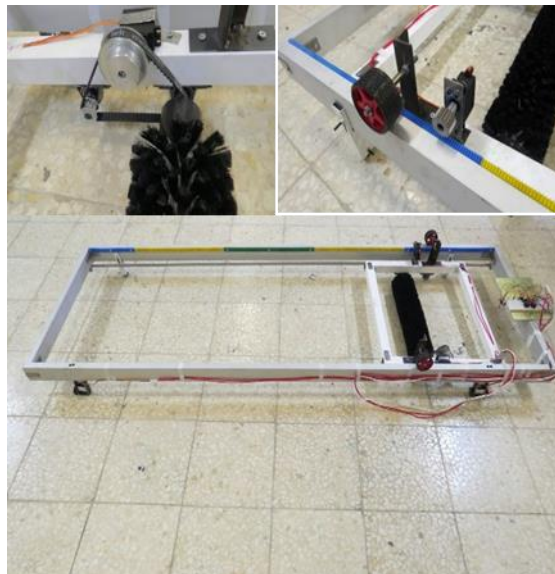


شکل (۴): نمای سه بعدی از طرح اصلی ربات
Figure (4): Three-dimensional original design of the robot

مطابق شکل (۶)، سلول خورشیدی در این مقاله به صورت یک منبع جریان موازی با یک دیود مدل‌سازی شده است. در شرایطی که نوری برای تولید جریان وجود ندارد، سلول به صورت یک دیود عمل می‌کند، در حالی که در شرایطی که شدت نور تابیده به سلول زیاد شود، جریانی متناسب با شدت نور ورودی به وسیله سلول خورشیدی تولید می‌شود. در یک سلول ایده‌آل، کل جریان I با جریان تولید شده توسط اثر فتوالکتریک، I_{pv} ، منهای جریان دیود، I ، برابر است. رابطه مربوط سلول خورشیدی به صورت زیر نوشته می‌شود که n ضریب ایده‌آل دیود و R_s و R_{sh} به ترتیب مقاومت‌های سری و موازی (شنت) را نشان می‌دهد [۲۳]:

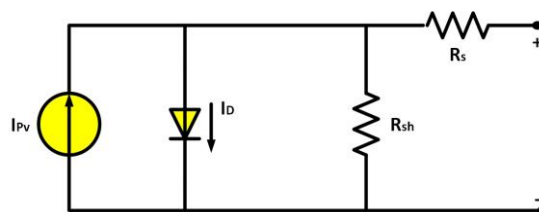
$$I = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{aV_t}} - 1 \right) - \left(\frac{V+IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (1)$$

$$V_t = n \frac{k_t}{q} \quad (2)$$



شکل (۵): نمونه اولیه طراحی شده در آزمایشگاه دانشگاه تفرش

Figure (5): Prototype of the designed robot in the laboratory of Tafresh University



شکل (۶): مدار معادل سلول خورشیدی [۲۴]

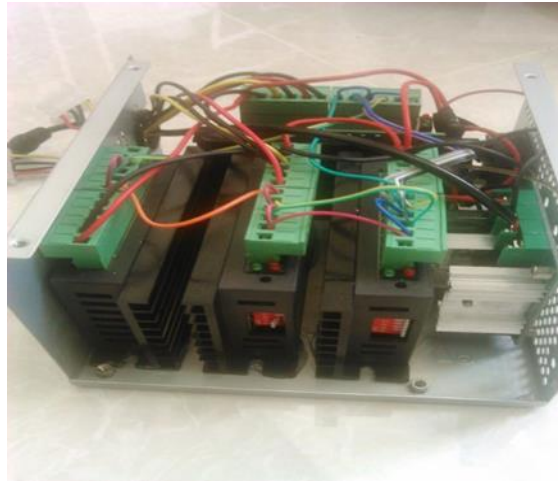
Figure (6): Equivalent circuit of the solar cell [24]

۳- طراحی الکترونیکی، کنترلی و مکانیکی ربات تمیزکننده صفحات خورشیدی

در این بخش، چگونگی طراحی بخش‌های الکترونیکی، کنترلی و مکانیکی ربات تشریح می‌گردد. طراحی رباتی هوشمند بدون نیاز به منبع تغذیه خارجی، طراحی اتاق اتوماسیون، پنل کنترل از راه دور، بخش مانیتورینگ اطلاعات و قسمت مکانیکی ربات از اهداف اصلی طراحی‌ها در این بخش هستند.

۳-۱- طراحی بخش الکترونیکی

در این زیربخش، به بررسی مباحث الکترونیکی برای سیستم پرداخته خواهد شد. به‌طور کلی ربات تمیزکننده صفحات خورشیدی شامل دو جعبه مدار فرمان شامل یک شماره یک [شکل (۷)] و یک شماره دو است. یک شماره یک شامل درایورهای استپر موتورها (موتورهای حرکتی) و موتور dc (محرک برس) است. درایور موتور dc پنج برابر قوی‌تر از حداکثر توان مورد نیاز موتور انتخاب گردیده و دارای فیوز محافظتی است. همچنین درایورهای استپر موتورها همواره در ۵۰ درصد توان خود کار می‌کنند. مادامی که درایورهای موتور در حال استفاده هستند، سیستم تهویه هوا را به جریان می‌دهد و هوای گرم داخل یک را خارج می‌کند. این شرایط مطلوب همواره ضامن عملکرد صحیح قطعات و درایورهای موجود در یک شماره یک است. خروجی یک شماره یک مطابق شکل (۸) از طریق سه سوکت به موتورهای حرکتی و موتور dc متصل می‌شود. ورودی این یک شامل یک سوکت پاور برای انتقال توان از یک دو به یک یک به‌منظور تغذیه درایورها و موتورها و یک سوکت vga برای انتقال اطلاعات و دستورات از یک دو به یک یک است.



شکل (۷): نمای پک شماره یک
Figure (7): View of pack number one



شکل (۸): نمای اتصالات پک شماره دو
Figure (8): View of connections pack number two

پک شماره دو مطابق شکل (۹) شامل برد کنترلی، برد پردازنده، برد وای‌فای، برد کنترل از راه دور و مدار فرمان سروموتورها است. برد کنترلی شامل دو رگولاتور ۵ ولتی با تمام متعلقات برای تغذیه سنسورهای مجاورتی و باقی قطعاتی است که با این ولتاژ کار می‌کنند. این رگولاتورها به وسیله خمیر سیلیکون به هیت‌سینک مناسب الحاق شده‌اند. یک ماژول ساعت با کیفیت به انضمام یک باتری پشتیبان نیز بر روی برد کنترلی موجود است که ساعت و تاریخ را به صورت دقیق نمایش می‌دهد و در صورت حرکت ربات به صورت زمان از قبل مشخص شده زمان را از این آی‌سی دریافت می‌کند.

مدارهای راه‌انداز و نویزگیر سنسورهای مجاورتی نیز بر روی این برد تعبیه شده‌اند. یکی از مهمترین قطعات متصل به برد کنترلی رله‌های ذخیره نیرو است. این رله در صورت عدم نیاز، برخی از قطعات را از مدار خارج می‌کند تا انرژی مصرفی آنها در حالت آماده به کار را صرفه جویی کند. دو کاهنده ولتاژ دیودی نیز بر روی برد کنترلی تعبیه شده است که یکی از آنها برای تنظیم ولتاژ مبنا (۱۲ ولت) به ولتاژ مناسب برای استفاده برد وای‌فای و دیگری برای استفاده برد پردازنده است.

پردازنده شامل یک هسته آردوینو مگا ۲۵۶۰ است که در قسمت کناری پک طوری ثابت شده تا در دسترسی کامل باشد. این برد شامل ۵۴ ورودی و خروجی است و وظیفه دستور دادن و هماهنگی بین سایر قطعات را دارد. برد کنترل از راه دور یک ماژول nrf بوده و دارای یک آنتن کوچک ضد آب است. به منظور ارتباط بهتر آنتن این ماژول از کنار پک دو بیرون آمده و قابلیت چرخش در نیمکره بیرونی پک را دارد. این ماژول می‌تواند با دانگل طراحی شده از فاصله‌ای حدود یک کیلومتر ارتباط برقرار کند. به دلیل گرم شدن قطعاتی مانند رگولاتورها برد وای‌فای و خطرات احتمالی دیگر بر روی این پک، یک فن ۱۰ پره به منظور خنک‌سازی و تهویه هوا نصب گردید.



شکل (۹): تجهیزات پک شماره دو
Figure (9): Equipment of pack number two

از طریق یک سیم ۴ رشته‌ای باتری به پک دو متصل می‌شود و پک دو پس از ملاحظات لازم توان را از طریق یک سیم پاور به پک یک انتقال می‌دهد. فرمان‌های پک دو از طریق سوکت vga و کابل رابط آن به پک یک انتقال می‌یابد. سنسورهای مجاورتی از طریق ۶ سوکت سفید آداپتوری به پک دو متصل می‌شوند. دستگاه شامل ۱۰ سنسور مجاورتی ضد آب است که موقعیت دستگاه را به دقت مورد بررسی قرار می‌دهند و اطلاعات به‌دست آمده را به پک دو منتقل می‌کنند. برای ارتباط از راه دور ربات یک دانگل طراحی و ساخته شده که شامل یک برد nrf، یک پردازنده بسیار با کیفیت و یک مبدل تی‌تی است. این دانگل دارای یک آنتن خارجی است که در نیمکره بیرونی قابلیت چرخش دارد.

۳-۲- طراحی بخش کنترل ربات

فلوچارت شکل (۱۰) چگونگی کنترل ربات را برای تمیزکاری صفحات نشان می‌دهد. در شکل (۱۱) نیز بلوک دیاگرام سیستم کنترلی ربات نشان داده شده است. جهت پیکربندی ربات از دو روش می‌توان با نرم‌افزار مربوطه ارتباط برقرار کرد، الف) ارتباط رادیویی و دانگل مخابراتی و ب) کنترل به واسطه اینترنت اشیاء و درگاه وب با آدرس مشخص. در روش اول با استفاده از ماژول nrf و فرکانس رادیویی اتصال برقرار می‌گردد. این روش دارای محدودیت فاصله ۵۰۰ متری در محیطی بدون مانع و ۲۰۰ متری در محیطی با وجود موانع (مانند ساختمان، درخت و...) است. در روش دوم به جهت اتصال با سیستم مربوطه می‌توان از اینترنت استفاده نمود که این امر توسط ماژول NodeMCU صورت می‌پذیرد. تازمانی که این ارتباط برقرار گردد، ربات قادر به انجام حرکت نیست.

پس از اتصال به نرم‌افزار مربوطه چنگک‌های ربات تغییر حالت داده و ربات نسبت به لبه‌های پنل ثابت می‌گردد. با استفاده از این چنگک‌ها امکان فعالیت ربات در هرگونه شیبی وجود خواهد داشت. سپس نوبت به اعمال تنظیمات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری ربات می‌رسد. در ابتدا متناسب با نظر کارفرما بین سه مد کاری تعریف شده، یکی از حالت‌های کاری را انتخاب نموده و به راه‌اندازی ربات پرداخته می‌شود.

شایان ذکر است در حالت تمام اتوماتیک باید برای ربات زمان‌بندی مشخصی را تعیین نمود. همچنین اطلاعاتی اعم از میزان سرعت ربات، سرعت و گشتاور چرخش برس را نیز باید وارد نمود و در انتها با وجود سنسورهای نوری در اطراف بدنه ربات، ابتدا و انتهای مسیر تشخیص داده شده و ربات طی برنامه‌ای تعیین شده به فعالیت تمیزکاری بپردازد. در حالت دستی به دو طریق می‌توان ربات را کنترل نمود. در حالت اول، در نرم‌افزار مربوطه، بخشی جهت کنترل دستی ربات تعبیه شده تا بتوان در مواقع موردنیاز ربات را به میزان مناسب جابجا نمود و یا دستور توقف فعالیت را اعمال نمود. همچنین دکمه‌ای بر روی دستگاه تعبیه شده که در صورت فشردن آن ربات با ۵۰ درصد توان خود شروع به فعالیت می‌نماید. در این حالت تنظیمات پیش‌فرض ربات مدنظر قرار می‌گیرد. در انتها پس از اتمام تمیزکاری و رسیدن به انتهای مسیر (تشخیص توسط سنسورهای نوری) پردازنده ربات دستور توقف موتور مربوط به برس را وارد نموده و با اعمال فرامین لازم کنترلی ربات با تمام سرعت در جهت

عکس حرکت نموده تا به پارکینگ رسیده و در آنجا متوقف می‌گردد. پس از توقف، تمامی تجهیزات به حالت انتظار رفته و باتری‌های ربات برای فعالیت مجدد شارژ می‌گردند.

مطابق دیاگرام سیستم کنترل، نحوه عملکرد ربات به این صورت است که در ابتدا با دریافت اطلاعات از سنسورهای نوری موقعیت قرارگیری ربات چک می‌گردد. سپس با اعمال فرمان تولید پالس مربعی^۴ (PWM)، سیگنال مربوطه ابتدا به راه‌انداز موتور dc ارسال شده و موتور مربوطه برس را به صورت نرم راه‌اندازی می‌نماید. با افزایش طول باند سیگنال پالس مربعی، سرعت گردش برس ربات نیز افزایش می‌یابد. در این حالت، جریان راه‌اندازی اولیه کمتری مصرف می‌گردد. پس از اینکه برس به سرعت مورد نظر رسید، پردازنده با ایجاد دو سیگنال PWM دیگر اقدام به راه‌اندازی موتورهای پله‌ای می‌نماید. این سیگنال‌ها به راه‌اندازهای موتور پله‌ای ارسال شده و موجب حرکت ربات به سمت راست (چپ) و مسیر با سرعت متناسب با میزان پهنای باند سیگنال PWM می‌گردد. شایان ذکر است در صورت رسیدن به انتهای مسیر سنسور نوری مربوط به محدودیت مکانی فعال‌گشته و سیگنالی به پردازنده ارسال می‌گردد. با دریافت سیگنال، پردازنده دستور توقف ربات را اعمال نموده و موجب توقف موتور مربوط به برس شده و موتورهای پله‌ای^۵ ربات را با تمام توان و سرعت جهت برگشت به نقطه شروع راه‌اندازی می‌نماید.

با رسیدن ربات به نقطه شروع پردازنده، دستور قطع تغذیه تمامی المان‌های موجود صادر می‌گردد تا باتری‌های ربات شارژ گردند. نیروی محرکه الکتریکی $e_a(\theta)$ که تابع سینوسی از موقعیت ربات است به صورت زیر تعریف می‌گردد [۲۵]:

$$e_a(\theta) = -\rho \psi_m \sin(\rho\theta) \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

ρ تعداد جفت قطب‌ها و ψ_m حداکثر شار مغناطیسی موتور است. گشتاور الکترومغناطیسی تولید شده نیز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$T_e = -\rho \psi_m i_a \sin(\rho\theta) - \rho \psi_m i_b \sin(\rho\theta - \frac{\pi}{2}) - T_{dm} \sin(2\rho\theta) \quad (4)$$

m تعداد فازهای موتور و Nr تعداد دندان‌های روی رتور است. همچنین، مدل حلقه باز سیستم کنترلی موتور پله‌ای در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در این مقاله از ربات‌های کنترلی دیفرانسیلی (تفاضلی) متشکل از دو چرخ موتوردار استفاده شده است. جهت حرکت خطی کافی است دو موتور با سرعت و جهت یکسان شروع به حرکت نمایند. همچنین در صورت ایجاد حرکت به سمت راست و یا چپ کافی است که چرخ در جهت موافق با سرعت بالاتری به نسبت چرخ مخالف شروع به حرکت کند. با طراحی الگوریتم کنترلی تفاضلی و تعیین نقطه هدف مطابق شکل (۱۳)، ربات می‌تواند از هر نقطه‌ای به هر نقطه دیگر حرکت کند. در شکل (۱۴) نتایج شبیه‌سازی سرعت چرخش چرخ‌های بالا و پایین ربات نشان داده شده است. از آنجایی که کنترل موتور ربات با پالس‌های مربعی صورت می‌پذیرد، نمودار به شکل پالس‌های مربعی شکل است. همان‌طور که مشخص است ربات علاوه بر تغییر مکان به صورت خطی، برای رسیدن به نقطه هدف دارای تغییرات مکانی زاویه‌ای نیز است (در بعضی از نقاط نسبت سرعت دو موتور با یکدیگر متفاوت بوده و در خلاف جهت یکدیگر راه‌اندازی گشته‌اند).

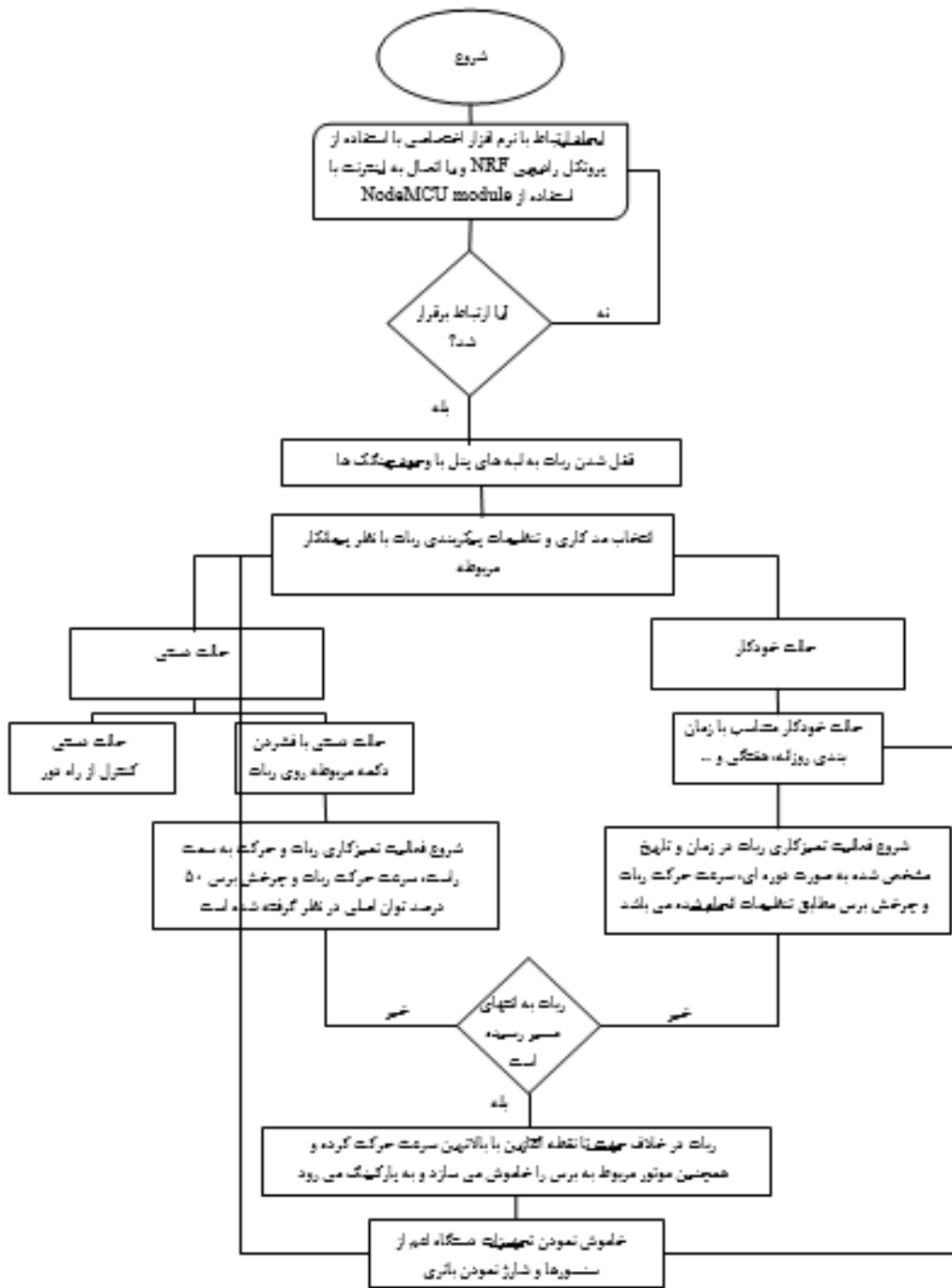
به منظور مدل‌سازی سینماتیکی ربات طراحی شده، نمای دیگری از ربات در شکل (۱۵) نشان داده شده است. به منظور مدل‌سازی جرم ربات با m ، ممان اینرسی آن حول محور Z که از مرکز جرم آن عبور می‌کند با J و همچنین بردار مختصات تعمیم یافته آن با q نشان داده می‌شود. مدل سینماتیکی ربات طراحی شده را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۲۶]:

$$q = [x \quad y \quad \phi]^T \quad (5)$$

$$\dot{q} = S(q)v \quad (6)$$

که ماتریس ژاکوبین $S(q)$ برابر است با:

$$S(q) = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 \\ \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$



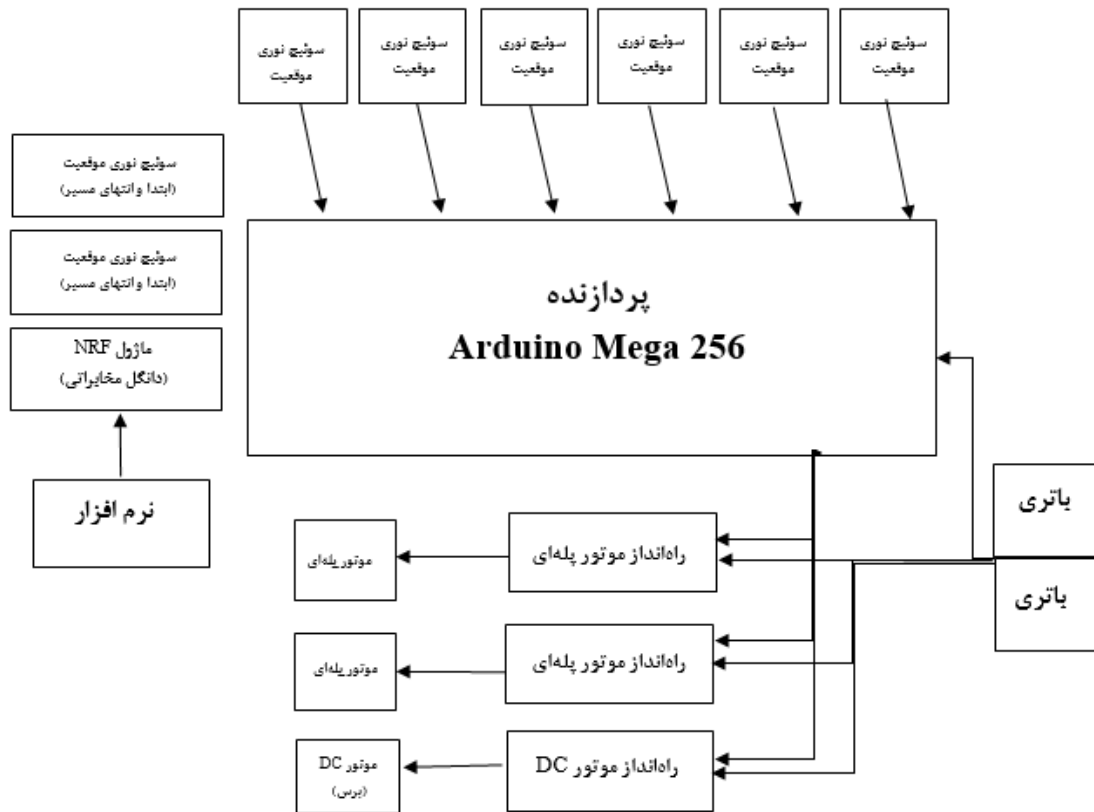
شکل (۱۰): فلوچارت کنترلی ربات
Figure (10): Flowchart of control of the robot

بردار ورودی مدل سینماتیکی شامل سرعت خطی و زاویه‌ای نیز به صورت زیر بیان می‌شود:

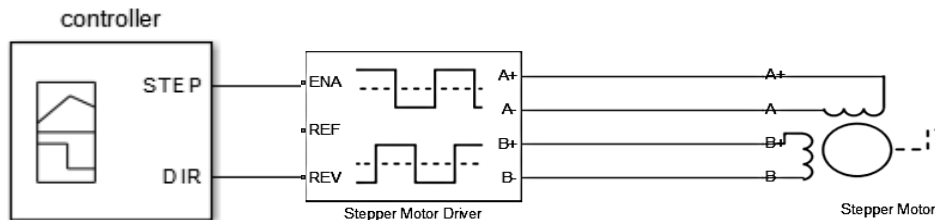
$$v = [v_1 \ v_2]^T \rightarrow \begin{cases} v_1 = \pm \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \\ v_2 = \dot{\phi} \end{cases} \quad (8)$$

همچنین معادله دینامیکی ربات را به کمک معادله لاگرانژ می‌توان به صورت زیر بدست آورد:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = B(q)\tau + A^T(q)\lambda \quad (9)$$



شکل (۱۱): دیاگرام سیستم کنترلی ربات پیشنهادی
Figure (11): Diagram of the controller for the proposed robot

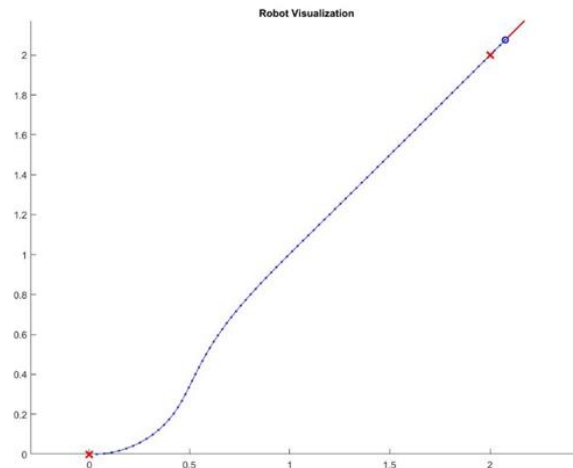


شکل (۱۲): مدل حلقه باز سیستم کنترلی موتور پله ای
Figure (12): Open-loop model of the stepper motor control system

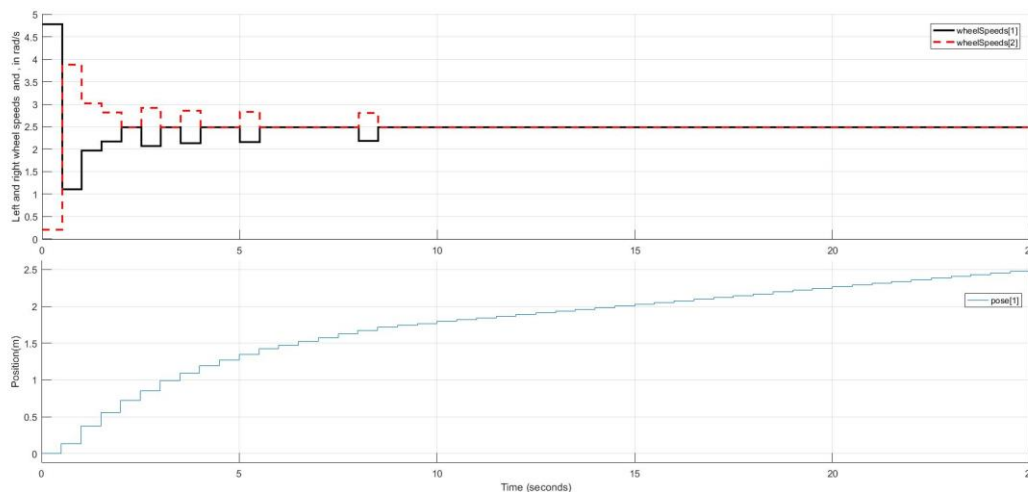
که عبات‌های اول و دوم از سمت چپ، به ترتیب ماتریس جرمی متقارن و ماتریس کریولیس هستند. همچنین، $B(q)$ ماتریس تبدیل ورودی، τ بردار گشتاورها و λ بردار ضرایب لاگرانژ است. سیستم مربوط به درایور موتورها از نگاه کنترل کننده یک سیستم حلقه باز بوده و افزایش و کاهش سرعت بر اساس نظر اپراتور از طریق نرم افزار قابل تنظیم خواهد بود. به منظور پایداری سیستم با طراحی چنگک‌ها شرایطی ایجاد شده است تا ربات قابلیت فعالیت در هر میزان شیبی از پنل‌های خورشیدی را داشته باشد.

از طرفی با طراحی یک سیستم کنترلی شرطی با استفاده از پردازنده و سنسورهای نوری قابلیت‌ی ربات ایجاد شده تا در صورتی که ربات در وضعیتی غیر از وضعیت A مشابه شکل (۱۶) قرار گیرد، کنترل کننده با اعمال فرامین کنترلی لازم ربات را به وضعیت A درآورده و سپس فعالیتش را از سرگیرد. در جهت تحقق این سیستم از ۸ سنسور نوری استفاده شده است. همان طور که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود، با توجه به وضعیت سوئیچ‌ها می‌توان وضعیت قرارگیری ربات‌ها را تشخیص و سپس متناسب با وضعیت قرارگیری آنها به تنظیم موقعیت ربات پرداخت. از طرفی با وجود دو سوئیچ دیگر در میانه ربات می‌توان ابتدا و انتهای مسیر را تشخیص داده و فرامین لازم جهت معکوس نمودن جهت حرکت ربات و یا دستور توقف را اعمال

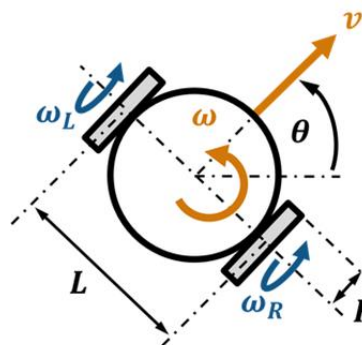
نمود. شایان ذکر است که با وجود این سیستم شرطی احتمال سقوط ربات به صفر رسیده و در صورت رخداد هرگونه مشکلی ربات کاملاً متوقف شده تا موقعیت قرارگیری ربات بر روی پنل های خورشیدی به درستی جانمایی گردد.



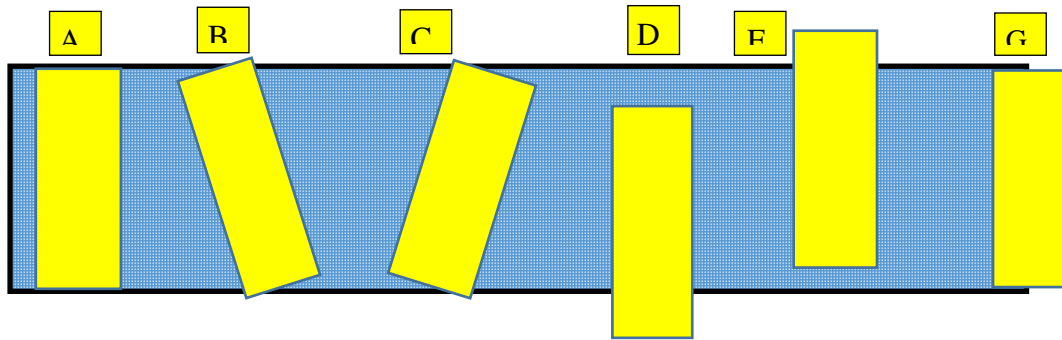
شکل (۱۳): نمودار تغییر مکان ربات
Figure (13): Robot relocation chart



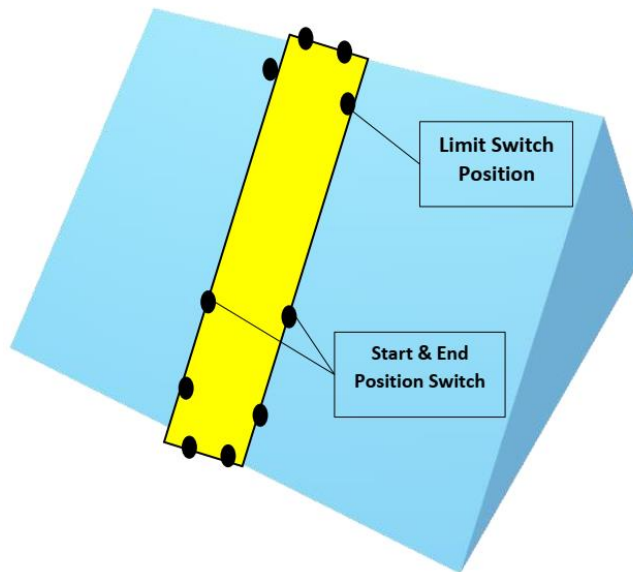
شکل (۱۴): سرعت چرخش چرخ‌های بالا و پایین و وضعیت مکانی ربات در جهت رسیدن به نقطه هدف
Figure (14): The speed of rotation of the up and down wheels and the location of the robot in order to reach the target point



شکل (۱۵): شمای دیگری از ربات طراحی شده
Figure (15): Another schematic of the designed robot



شکل (۱۶): وضعیت های مختلف قرارگیری ربات
Figure (16): Different positions of the robot



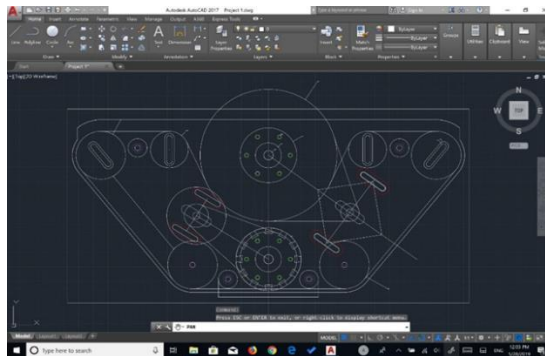
شکل (۱۷): وضعیت سوئیچ‌ها در ربات
Figure (17): Status of switches in the robot

۳-۳- طراحی بخش مکانیکی ربات

مکانیزم حرکتی برای ربات، الهام گرفته از مکانیزم حرکت تانک است. با توجه به مزایای چرخ‌های شنی این طرح انتخاب شده است. در دو طرف بدنه ربات صفحه آلومینیومی به شکل چرخ تانک قرار دارد که شنی‌ها با استفاده از دو لایه تسمه صد دندانه پهن ساخته شده است. دلیل استفاده از این تسمه پهن افزایش سطح اتکا سیستم است. برای اتصال دو طرف ربات به یکدیگر از میله‌های فولادی استفاده شده که موجب اتصال دو سمت ربات به یکدیگر خواهد شد و همچنین تکیه‌گاهی برای قراردادن باتری‌ها است. با توجه به ادوات استفاده شده باید یک سیستم انتقال قدرت و یک چهارچوب قوی طراحی گردد. از طرفی با وجود وزن کافی می‌توان از حرکت ربات روی سطح شیب‌دار مطمئن بود. البته برای سطح شیب‌دار نیز گیره‌هایی طراحی شده است که در سمت بالای ربات تعبیه خواهد شد و این امکان را به ربات می‌دهد تا در هر شیبی به فعالیت خود ادامه دهد. اجزاء این بخش شامل موتور پله‌ای، موتور دی‌سی، فرچه تمیزکننده، هرزگرد بلبرینگ، تسمه تایم و میله رابط دو طرف محورها است. طرح اصلی در برنامه اتوکد مطابق شکل (۱۸) کشیده شده است. این طراحی بر مبنای طول تسمه اصلی یعنی تسمه تایم طراحی شده است. فایل طراحی در ادامه ارائه شده است که جای‌گیری تک‌تک اجزا به صورت شماتیک بر روی آن مشخص شده است.

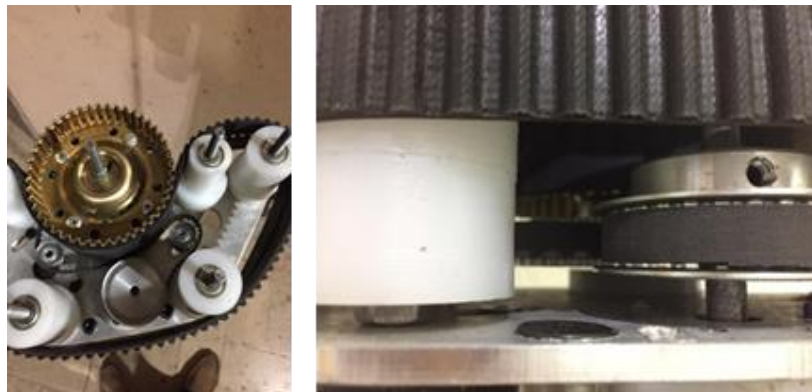
در هر محور شش عدد هرزگرد تعبیه شده است که می‌توان آنها در دو ابعاد کوچک و بزرگ تقسیم‌بندی کرد تا تسمه اصلی را در جای خود قرار دهند. هرزگردها از جنس پلی‌اتیلن هستند که توسط دستگاه سی‌ان‌سی تراشیده و پرداخت شده‌اند. بدنه اصلی از جنس آلومینیوم ورق ۵ میل تعبیه شده است. بدنه اصلی توسط دستگاه سی‌ان‌سی بریده و مته‌کاری شده است تا

رینگ‌هایی که یاتاقان‌ها را نگاه می‌دارند در آن جاشوند و دو طرف بدنه اصلی را به یکدیگر متصل نماید. شفت‌های اصلی هرزگردها و پولی تایم از جنس پیچ هستند تا به راحتی از دو طرف مهره شوند. سیستم انتقال قدرت مطابق شکل (۱۹) از سه عدد پولی تشکیل شده است که یک محور از وسط آن رد شده و از دو طرف به بدنه اصلی یاتاقان شده‌اند. یکی از پولی‌ها به موتور پله‌ای وصل شده است. این اتصال توسط یک تسمه‌تایم ایجاد شده است. موتور پله‌ای تسمه‌تایم را می‌چرخاند. تسمه‌تایم انتقال قدرت را توسط دوپولی دیگر که به پولی انتقال قدرت کوپل شده‌اند، انجام می‌دهد. این حرکت به تسمه اصلی انتقال پیدا می‌کند و باعث دور زدن تسمه به صورت مارپیچ می‌شود. این تسمه به زمین نیز مماس است و باعث به حرکت درآوردن هر محور به جلو می‌گردد.



شکل (۱۸): طرح اتوکد بخش مکانیکی ربات

Figure (18): AutoCAD design of the mechanical part of the robot



شکل (۱۹): چرخ طراحی شده و سیستم انتقال قدرت

Figure (19): Designed wheels and transmission power system

تنظیم‌کننده‌های تسمه اصلی روی بدنه تعبیه شده‌اند. جنس این هدایت‌کننده‌ها از جنس پلی‌اتیلن هستند که توسط پیچ به بدنه وصل شده‌اند. فرچه تمیزکننده از یک توپ پلی‌اتیلنی به قطر ۵ سانتی‌متر ساخته شده است که داخل آن شیارهایی زده شده تا در آن دستمال میکروفایبر قرار بگیرد. این فرچه توسط سیستم انتقال قدرت تسمه‌ای نیز به موتور دی‌سی وصل شده است. اتصال به گونه‌ای است که طرف موتور دی‌سی کوچکتر و طرف سرپولی بزرگتر قرار بگیرد تا گشتاور تولیدی افزایش پیدا کند. نمایی از قرارگیری موتور پله‌ای جهت اعمال نیرو و ایجاد حرکت در محور در شکل (۲۰) نشان داده شده است.

۴- ارزیابی محصول نیمه صنعتی ساخته شده

در ادامه به منظور اثبات کارایی ربات ساخته شده تست‌هایی در نظر گرفته شده است. در ابتدا عملکرد ربات طراحی شده بر روی صفحه شیشه‌ای ارزیابی شده است. سپس با توجه به اینکه ساخت تجهیز مورد نظر طی قرارداد تحقیقاتی با شرکت توزیع نیروی برق استان مرکزی بوده است، با هماهنگی‌های صورت گرفته با دانشگاه تفرش و شرکت توزیع، ربات تمیزکننده صفحات خورشیدی، بر روی نیروگاه خورشیدی دانشگاه تفرش مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل (۲۰): نحوه قرارگیری موتور پله‌ای جهت اعمال نیرو و ایجاد حرکت در محور
Figure (20): Positioning of the stepper motor to apply force and create movement in the axis

۴-۱- تست اولیه بر روی سطح شیشه ای شیب دار

مطابق شکل (۲۱)، عملکرد ربات طراحی شده در ابتدا بر روی یک سطح شیشه‌ای شیب‌دار مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق شکل ربات با استفاده از پنل خورشیدی و باتری موجود بر روی سیستم از نور خورشید در روز برای تغذیه و شارژ خود استفاده می‌کند. میزان مصرف انرژی ربات طوری است که با یک بار شارژ بتواند سه بار عملیات تمیزکاری را به طول یک کیلومتر انجام دهد. به این منظور در صورت نیاز می‌توان پارکینگی برای سیستم طراحی کرد که پس از اتمام عملیات به پارکینگ رفته و خود را شارژ کند و یا اینکه پنل خورشیدی بر روی خود ربات قرار گرفته شود. شکل (۲۲) نیز برس به‌کار رفته برای تمیزکاری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۲۳) نشان داده شده است، این ربات با استفاده از سنسورهای مجاورتی نسبت به لبه‌های مسیر هوشمند بوده و احتمال خطر سقوط روی آرایه‌ها به صفر رسیده است. سیستم طراحی شده می‌تواند در هنگام تشخیص وجود اختلاف ارتفاع توسط سنسورهای مجاورتی سرعت خود را کم کرده و با استفاده از تکنولوژی تنظیم ارتفاع و یا تکنولوژی به‌کار رفته در چرخ‌ها این ناهمواری را بدون هیچ آسیبی پشت‌سر بگذارد و به ادامه مسیر بپردازد. قابل ذکر است با توجه به اینکه طرح ارائه شده در مرحله تجاری‌سازی در پژوهشگاه نیرو است، بنابر درخواست کارفرما، ارزیابی درصد افزایش بازده نیروگاه در فصل‌های مختلف، قبل و پس از تمیزکاری، در سال ۱۴۰۰ انجام خواهد گرفت.

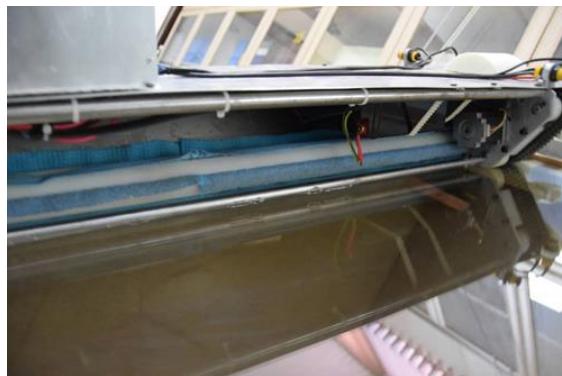
۴-۲- تست بر روی نیروگاه خورشیدی با سیستم مخابراتی

در این مرحله مطابق شکل (۲۴) به تست ربات به کمک باتری و تکنولوژی مخابراتی بر روی صفحات خورشیدی نیروگاه دانشگاه تفرش پرداخته شده است. ربات قادر به تمیزکاری صفحات خورشیدی نیروگاه شد و توانست با توجه به عدم هم‌سطحی ماژول-ها تمام مسیر را به سادگی طی کند. این کار به کمک کنترل از راه دور صورت پذیرفت. یکی از اهداف الکترونیکی در این پروژه طراحی سیستمی بود که بتوان از راه دور میزان زمان کارکرد ربات، موقعیت ربات، دستور حرکت در زمان و تاریخ مشخص به-صورت دوره‌ای، تنظیم سرعت و میزان دور چرخش برس ربات را اعمال کرد. به این منظور از برد وای‌فای که شامل یک پردازنده ۸۰ مگاهرتزی است استفاده شد. برنامه‌ریزی آن به شکلی است که به مودم معرفی شده متصل می‌شود و هر دستگاهی از طریق آن مودم می‌تواند به کمک وای‌فای به ربات دستور دهد تا از حرکت بایستد، شروع به‌کار کند و یا به مکان اولیه خود برگردد. این اعمال از طریق صفحه وب اعمال شد. همچنین، با استفاده از ماژول nrf، پنل کنترل از راه دور توانست از فاصله

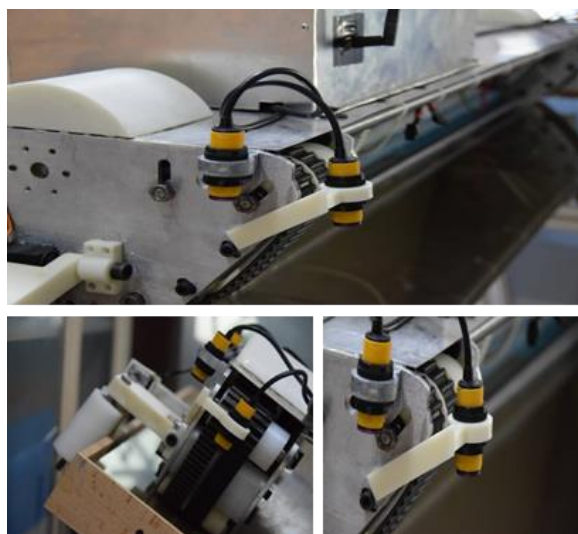
۱۰۰۰ متری سیستم را تحت کنترل قرار داده و اعمالی چون برگشت به مبدا حرکت، شروع به کار، تنظیم شروع عملیات به صورت دوره‌ای براساس ساعت و تاریخ و یا توقف عملیات را انجام دهد.



شکل (۲۱): تست ربات بر روی سطح شیشه ای
Figure (21): Test of the robot on a glass surface



شکل (۲۲): برس تمیز کننده ربات طراحی شده
Figure (22): Designed robot cleaning brush



شکل (۲۳): سنسور های مجاورتی ربات و چنگک نگه دارنده
Figure (23): Proximity sensors of the robot and holder rake



شکل (۲۴): تست ربات با باتری بر روی نیروگاه خورشیدی
Figure (24): Test of the robot with the battery on the solar power plant

۵- نتیجه‌گیری

باتوجه به رشد روزافزون استفاده از نیروگاه‌های خورشیدی که یکی از پرکاربردترین روش‌های تولید انرژی الکتریکی پاک است، افزایش بازده این نیروگاه‌ها مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. از جمله مواردی که در بازده نیروگاه‌های خورشیدی موثر هستند تمیزکردن دوره‌ای سطح پنل‌های خورشیدی است. در این مقاله، به کمک دانش‌بومی یک ربات تمیزکننده صفحات خورشیدی بدون نیاز به آب طراحی و ساخته شد. این ربات در مقایسه با ربات‌های خارجی دارای مزایای بسیاری است. قابلیت تنظیم ارتفاع، عدم استفاده از آب و هوشمند بودن ربات در کنار هزینه ساخت پایین نسبت به نمونه‌های خارجی آن از مهمترین مزایای این ربات هستند. طراحی مکانیکی ربات به نحوی انجام شده که قیمت محصول حداقل باشد، ولی کیفیت آن در حد مطلوب باقی بماند. اجرای این طرح تاثیر بسزایی در افزایش بازده تولید نیروگاه‌های خورشیدی خواهد داشت. از دیگر مزایای این ربات می‌توان به هوشمند بودن آن اشاره کرد که نیاز به تامین برق از شبکه ندارد و برق مصرفی خود را توسط یک پنل خورشیدی که بر روی آن تعبیه شده تامین می‌کند. همچنین این ربات دارای یک سیستم ارتباطی مخابراتی است که می‌تواند توسط اتاق کنترل اطلاعاتی چون میزان انجام کار و یا میزان بازده صفحات را اطلاع رسانی کند. امکان کنترل جهت شروع و توقف کار تمیز کاری طبق تاریخ و ساعت معین به‌طور متناوب نیز در این ربات فراهم شده است. این موضوع هزینه نیروی انسانی را کاهش داده است و باعث افزایش بازدهی صفحات و همچنین طول عمر کاری نیروگاه‌ها می‌شود. مزیت اصلی این ربات نسبت به نمونه‌های خارجی، داشتن سیستم تنظیم ارتفاع جهت تمیزکاری بهتر و همچنین جهت رفع مشکل عدم هم‌سطحی آرایه‌ها در نیروگاه‌های خورشیدی کشور است. عملکرد ربات با نظارت واحد بازار برق شرکت توزیع نیروی برق استان مرکزی بر روی نیروگاه خورشیدی دانشگاه تفرش مورد ارزیابی و تایید قرار گرفت. امید است با تجاری‌سازی ربات تمیزکننده صفحات خورشیدی در پژوهشگاه نیرو گامی موثر در افزایش تولید نیروگاه‌های خورشیدی کشور برداشته شود.

سپاسگزاری

مقاله حاضر حاصل پروژه تحقیقاتی فیما بین دانشگاه تفرش و شرکت توزیع نیروی برق استان مرکزی است. از کلیه کارکنان محترم شرکت توزیع نیروی برق استان مرکزی مخصوصاً از آقایان مهندس محمد الله‌داد مدیرعامل محترم و مهندس علی‌اکبر بصیری مدیریت محترم تحقیقات شرکت که در انجام این پروژه محققین را یاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

References

مراجع

- [1] O.D.T. Odou, R. Bhandari, R. Adamou, "Hybrid off-grid renewable power system for sustainable rural electrification in Benin", *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 1279-1266, Jan. 2020 (doi: 10.1016/j.renene.2019.06.032).
- [2] M.R. Miveh, M.F. Rahmat, A.A. Ghadimi, M.W. Mustafa, "Control techniques for three-phase four-leg voltage source inverters in autonomous microgrids: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 1592-1610, Feb. 2016 (doi: 10.1016/j.rser.2015.10.079).
- [3] M.J. Hadidian Moghaddam, A. Kalam, M.R. Miveh, A. Naderipour, F.H. Gandoman, A.A. Ghadimi, Z. Abdul-Malek, "Improved voltage unbalance and harmonics compensation control strategy for an isolated microgrid", *Energies*, vol. 11, no. 10, Article Number: 2688, Oct. 2018 (doi.org/10.3390/en11102688).
- [4] M. Anderson, A. Grandy, J. Hastie, A. Swezey, R. Ranky, C. Mavroidis, Y. Markopoulos, "Robotic device for cleaning photovoltaic panel arrays", *Mobile Robotics*, pp. 367-377, Sept. 2010 (doi: 10.1142/97898-14291279_0047).
- [5] M.T. Grando, E.R. Maletz, D. Martins, H. Simas, R. Simoni, "Robots for cleaning photovoltaic panels: State of the art and future prospects", *Revista Tecnología Y Ciencia*, no. 35, pp.137-150, Nov. 2019 (doi: 10.33-414/RTYC.35.137-150.2019).
- [6] P. Patil, J. Bagi, M. Wagh, "A review on cleaning mechanism of solar photovoltaic panel", *Proceeding of the IEEE/ICECDS*, pp. 250-256, Chennai, India, Aug. 2017 (doi: 10.1109/ICECDS.2017.8389895).
- [7] A.K. Mondal, K. Bansal, "A brief history and future aspects in automatic cleaning systems for solar photovoltaic panels", *Advanced Robotics*, vol. 29, no. 8, pp. 515-524, April 2015 (doi: 10.1080/0169186-4.2014.996602).
- [8] K. Moharram, M. Abd-Elhady, H. Kandil, H. El-Sherif, "Influence of cleaning using water and surfactants on the performance of photovoltaic panels", *Energy Conversion and Management*, vol. 68, pp. 266-272, April 2013 (doi: 10.1016/j.enconman.2013.01.022).
- [9] A. Syafiq, A. Pandey, N. Adzman, N.A. Rahim, "Advances in approaches and methods for self-cleaning of solar photovoltaic panels", *Solar Energy*, vol. 162, pp. 597-612, March 2018 (doi: 10.1016/j.solener.2017.1-2.023).
- [10] K. Ilse, L. Micheli, B.W. Figgis, K. Lange, D. Daßler, H. Hanifi, F. Wolfertstetter, V. Naumann, C. Hagedorf, R. Gottschalg, J. Bagdahn, "Techno-economic assessment of soiling losses and mitigation strategies for solar power generation", *Joule*, vol. 3, no. 10, pp.2303-2321, Oct. 2019 (doi: 10.1016/j.joule.2-019.08.019).
- [11] M. Burke, R. Greenough, D. Jensen, E. Voss, "Project SPACE: Solar Panel Automated Cleaning Environment", *Mechanical Engineering Senior Theses*. 62, 2016.
- [12] N. M. Kumar, K. Sudhakar, M. Samykano, S. Sukumaran, "Dust cleaning robots (DCR) for BIPV and BAPV solar power plants-A conceptual framework and research challenges", *Procedia Computer Science*, vol. 133, pp.746-754, July 2018 (doi: 10.1016/j.procs.2018.07.123).
- [13] D. Deb, N.L. Brahmhatt, "Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3306-3313, Feb. 2018 (doi:10.1016/j.rser.2017.10.014).
- [14] R. Zahedi, P. Ranjbaran, G.B. Gharehpetian, F. Mohammadi, R. Ahmadiyahangar, "Cleaning of floating photovoltaic systems: A critical review on approaches from technical and economic perspectives", *Energies*, vol. 14, no. 7, pp. 2018, April 2021 (doi:10.3390/en14072018).
- [15] S. Yan, Y. Jian, L. Xu, "Research on design of intelligent cleaning robot for solar panel", *ICEB 2020 Proceedings (Hong Kong, SAR China)*. 22, 2020.
- [16] B. Parrott, P. C. Zanini, A. Shehri, K. Kotsovos, I. Gereige, "Automated, robotic dry-cleaning of solar panels in Thuwal, Saudi Arabia using a silicone rubber brush", *Solar Energy*, vol. 171, pp. 526-533, Sept. 2018 (doi:10.1016/j.solener.2018.06.104).
- [17] A. Al Baloushi, M. Saeed, S. Marwan, S. AlGhafri, Y. Moumouni, "Portable robot for cleaning photovoltaic system: Ensuring consistent and optimal year-round photovoltaic panel performance", *Proceeding of the IEEE/ASET*, pp. 1-4, Dubai, Sharjah, Abu Dhabi, United Arab Emirates, April 2018 (doi: 10.1109/ICASET.2018.8376781).
- [18] F. Hajiahmadi, P. Zarafshan, M. Dehghani, S.A.A. Moosavian, R. Hassanbeigi, "Dynamic modeling and control of cleaning robot for agro-photovoltaic", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 53, no. 6, pp. 3, Sept. 2021 (doi: 10.22060/MEJ.2021.18404.6810).
- [19] M.A. Jaradat, M. Tauseef, Y. Altaf, R. Saab, H. Adel, N. Yousuf, Y.H. Zurigat, "A fully portable robot system for cleaning solar panels", *Proceeding of the IEEE/ISMA*, pp. 1-6, Sharjah, United Arab Emirates, Dec. 2015 (doi: 10.1109/ISMA.2015.7373479).

- [20] A. Gheitasi, A. Almaliky, N. Albaqawi, "Development of an automatic cleaning system for photovoltaic plants", Proceeding of the IEEE/APPEEC, pp. 1-4, Brisbane, QLD, Australia, Nov. 2015 (doi: 10.1109/APPEEC.2015.7380938).
- [21] N. Savani, Z. Korat, H. Kikani, C. Khunt, "Design and analysis of integrated solar panel cleaning system", International Research Journal of Engineering and Technology, vol. 6, no. 4, pp. 2164-2168, April 2019 (doi: 10.1109/MNM.2019.7380).
- [22] M. Vaghani, J. Magtarpara, K. Vahani, J. Maniya, R.K. Gurjwar, "Automated solar panel cleaning system using IoT", International Research Journal of Engineering and Technology, vol. 6, no. 4, pp. 1392-1395, April 2019 (doi: 10.1109/IRJET.2019.7380).
- [23] S. Shongwe, M. Hanif, "Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods", IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 5, no. 3, pp. 938-946, May 2015 (doi: 10.1109/JPHOTOV.2015.2395137).
- [24] S. Dadfar, K. Wakil, M. Khaksar, A. Rezvani, M.R. Miveh, M. Gandomkar, "Enhanced control strategies for a hybrid battery/photovoltaic system using FGS-PID in grid-connected mode", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 44, no. 29, pp. -642-660, June 2019 (doi:10.1016/j.ijhydene.2019.04.174).
- [25] P.P. Acarnley, "Stepping motors: a guide to theory and practice", IET, 4th Edition, Chapter: 9, 2002 (doi: 10.1049/pbce063e).
- [26] T. Das, I.N. Kar, S. Chaudhury, "Simple neuron-based adaptive controller for a nonholonomic mobile robot including actuator dynamics", Neurocomputing, vol. 69, no. 16-18, pp. 2140-2151, Oct. 2006 (doi: 10.1016/j.neucom.2005.09.013).

زیرنویس

1. Fossil fuel
2. Greenhouse gases
3. Solar panels
4. Pulse-width modulation
5. Step motors
6. Open loop system