

## مدلسازی دینامیکی و کنترل یک ربات پاک کننده برای مزارع خورشیدی

فریما حاجی احمدی<sup>۱</sup>، پیام زر افشان<sup>۲\*</sup>، محمد دهقانی<sup>۳</sup>، سید علی اکبر موسویان<sup>۴</sup>، سید رضا حسن بیگی<sup>۱</sup>

- ۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران
- ۲- گروه مهندسی ماشین‌های صنایع غذایی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران
- ۳- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۱  
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۰  
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۴  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۱/۰۸

### کلمات کلیدی:

ربات پاک کننده صفحات فتوولتائیک  
مزارع خورشیدی  
مدلسازی دینامیکی  
کنترل مدل مینا  
شبیه سازی

**خلاصه:** در این مقاله به معرفی و مدلسازی دینامیکی و کنترل یک ربات پایه متحرک برای پاک کردن صفحات فتوولتائیک مزارع خورشیدی پرداخته می‌شود. با توجه به قرارگیری صفحات فتوولتائیک در محیط‌هایی که عملیات کشاورزی در آن‌ها انجام می‌شود، همواره مشکل تجمع گرد و خاک بر روی سطح صفحات فتوولتائیک، منجر به کاهش بازده انرژی می‌گردد. به همین دلیل و با توجه به موقعیت قرارگیری صفحات فتوولتائیک بایستی به صورت دوره‌ای در زمان‌های معین به پاک کردن این صفحات پرداخته شود. برای پاک کردن صفحات فتوولتائیک می‌توان از ربات‌های خودکار پاک کننده استفاده نمود. برای جابجایی ربات پاک کننده بین ردیف‌های صفحات فتوولتائیک در مزارع خورشیدی، از یک ربات متحرک برای جابجایی استفاده می‌گردد. در این طرح، پایه متحرک ربات به یک بازوی ساده مجهز شده است تا بتواند پاک کننده را در بین ردیف‌های مختلف جابه‌جا نماید. این امر باعث می‌شود تا برای پاک کردن صفحات فتوولتائیک یک نیروگاه از یک سیستم خودکار بهره جست و بر خلاف طرح‌های موجود نیازی به استفاده از یک ربات برای هر ردیف نمی‌باشد. بنابراین، ضمن معرفی این سیستم رباتیک، و به عنوان بخشی از تحلیل و طراحی اولیه، به مدلسازی دینامیکی و کنترل آن پرداخته می‌شود. در پایان، مزایا و معایب هر روش برای ربات طراحی شده در انجام عملیات پاک کردن صفحات فتوولتائیک بررسی می‌گردد.

### ۱- مقدمه

استفاده فراوانی قرار گرفته است. این امر باتوجه به قرارگیری صفحات فتوولتائیک در مزارع کشاورزی موجب افزایش دوچندان گرد و خاک نشست‌شده بر روی این صفحات فتوولتائیک می‌گردد که خود لزوم پاکسازی آن‌ها را پررنگ تر می‌نماید، [۱-۲]. همان‌طور که در (شکل ۱) مشاهده می‌شود، ابتدا به عنوان معیار، برای یک هکتار زمین کشاورزی استاندارد، ظرفیت تولید محصول کشاورزی را یک واحد و بازدهی آن را ۱۰۰٪ در نظر می‌گیریم. همچنین برای یک هکتار زمین نیروگاه خورشیدی معمولی، ظرفیت استاندارد تولید انرژی را یک واحد و بازدهی آن را ۱۰٪ در نظر می‌گیریم. به این ترتیب، در مجموع از یک هکتار کشاورزی و یک هکتار نیروگاه، یک واحد محصول کشاورزی و یک واحد انرژی تولید می‌گردد. در حالت دوم، با استفاده ترکیبی از این دو هکتار زمین، بصورت همزمان محصولات کشاورزی کشت شده و همچنین صفحات فتوولتائیک بر روی آن قرار داده می‌شوند. در این حالت ترکیبی، هم بازدهی تولید محصول کشاورزی و هم بازدهی تولید انرژی در هر هکتار، از ۱۰٪ به ۸۰٪

در دهه‌های اخیر و با توجه به خطر تمام شدن سوخت‌های فسیلی، توسعه منابع انرژی‌های تجدیدپذیر بیشتر مدنظر قرار گرفته است. که این امر کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی را منجر شده است. انرژی‌های تجدیدپذیر شامل انرژی خورشیدی، انرژی زمین گرمایی، انرژی باد، انرژی زیست توده، انرژی هیدروالکتریک، انرژی جزرومد می‌باشند. انرژی خورشیدی یکی از مهم‌ترین منابع انرژی‌های تجدیدپذیر بوده که در سرتاسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد و آلودگی تولیدی انرژی خورشیدی در محیط زیست تقریباً برابر با صفر می‌باشد. یکی از مشکلات عمده که منجر به کاهش بازده صفحات فتوولتائیک می‌گردد، گرد و خاک نشست‌شده بر روی این صفحات می‌باشد. از طرفی، مزارع برقی-کشاورزی<sup>۱</sup> که معرف استفاده دوگانه زمین برای تولید انرژی از صفحات فتوولتائیک و کشاورزی در همان محل می‌باشد (شکل ۱)، در سال‌های اخیر مورد توجه و

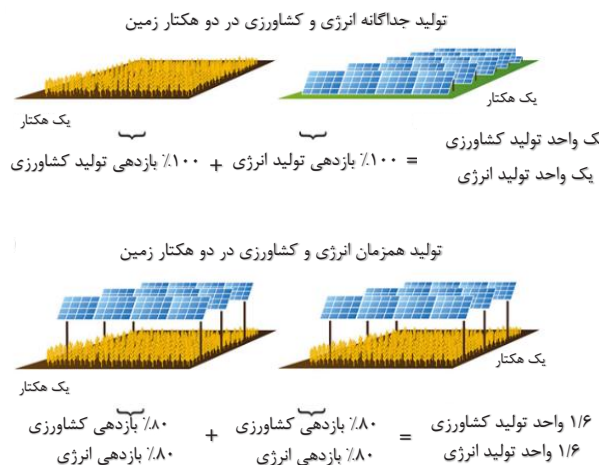
1 Agro Photovoltaic, APV

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: p.zarafshan@ut.ac.ir





شکل ۲. استفاده از ماشین‌آلات پیچیده برای پاک کردن صفحات، با دسترسی‌های دشوار [۵]  
**Fig. 2. Using complicated machines to clear solar panels with difficult access [5]**



شکل ۱. استفاده هم زمان از یک زمین کشاورزی برای تولید محصول و انرژی [۳-۴]

**Fig. 1. Simultaneous usage of agricultural land for crop production and energy [3-4]**

طور چشم‌گیری پایین می‌آورد. به منظور جلوگیری از کاهش راندمان صفحات فتوولتائیک در اثر انباشت گرد و غبار محیطی، لازم است با توجه به منطقه جغرافیایی، در زمان‌های معین و به‌طور دوره‌ای سطح این صفحات پاک شوند. از طرفی پاک کردن صفحات فتوولتائیک به صورت سنتی برای ردیف‌های مختلف در سطوح گسترده، کاری سخت، پرهزینه و پرخطر می‌باشد و در بعضی موارد حتی می‌تواند منجر به برق‌گرفتگی و مصدومیت‌های شدید برای کارگران و عوامل انسانی گردد. همچنین در این روش‌های پاکسازی، کیفیت پاک‌کنندگی پایین بوده و حتی در مواردی از ماشین‌آلاتی بدین منظور استفاده گردیده است، (شکل ۲). در بسیاری از موارد به دلیل نصب و قرارگیری صفحات فتوولتائیک در ارتفاع بالا و با زوایای تقریباً ۴۰ درجه‌ای، به منظور پاک کردن سطوح علاوه بر محدودیت استفاده از نیروی انسانی، از ماشین‌آلات پیچیده‌ای استفاده می‌گردد که گاه به یک بازوی سنگین و کم‌انعطاف مجهز هستند که می‌تواند موجب آسیب‌رسانی به صفحات فتوولتائیک گردند، [۳-۴]

استفاده از ربات به عنوان یک ماشین مکانیزه برای پاک کردن صفحات فتوولتائیک در مزارع خورشیدی که از ردیف‌های چند ده‌تایی تا چندصدتایی تشکیل شده‌اند در پژوهش‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش‌ها، برای پاک کردن هر ردیف از صفحات فتوولتائیک از یک ربات بهره گرفته شده است. از این رو، به کمک ربات‌های سبک و کم حجم که عملیات پاک کردن این صفحات فتوولتائیک را به صورت هوشمند و قابل کنترل از راه دور و بدون استفاده از نیروی انسانی انجام دهند، توانسته است علاوه بر افزایش

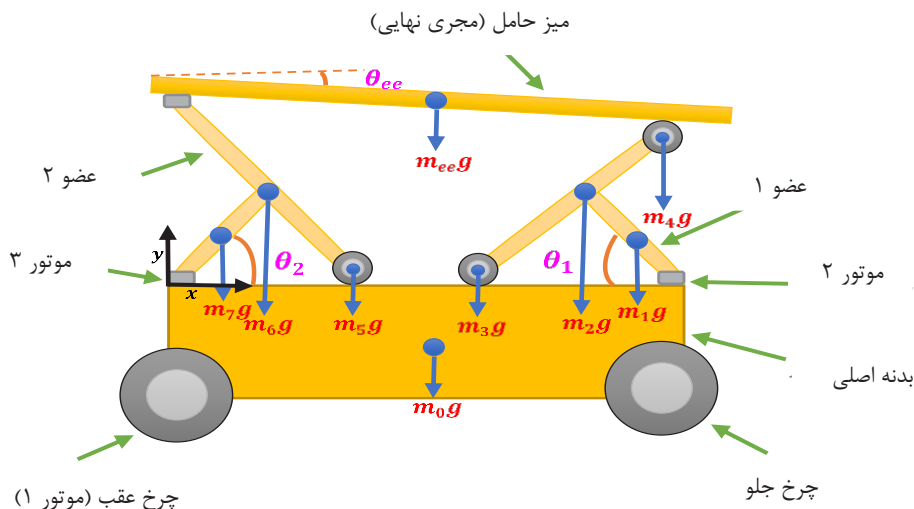
کاهش می‌یابد. به این ترتیب، مجموع تولید دو هکتار زمین برابر با ۱/۶ واحد محصول کشاورزی و ۱/۶ واحد محصول انرژی الکتریکی خواهد بود. به این ترتیب، در مجموع بازدهی کل اقتصادی از ۱۰۰٪ در حالت اولیه به ۱۶۰٪ افزایش می‌یابد، [۳-۴]. این دستاورد مهم در استفاده بهینه از زمین، به شرطی محقق می‌شود که زمین‌های اطراف صفحات خورشیدی، تا حد امکان تبدیل به مسیر رفت و آمد نشده و قابل کشت باقی بمانند. در ادامه خواهیم دید که با استفاده از ایده مورد بحث این مقاله در بکارگیری سامانه رباتیک برای تجهیزات تمیزکننده صفحات، زمین اطراف صفحات خورشیدی دست‌نخورده باقی مانده و به ظرفیت تولید کشاورزی آسیبی نمی‌رسد.

صفحات فتوولتائیک به سه صورت در مزارع کشاورزی قرار می‌گیرند. در نوع اول، صفحات فتوولتائیک بین محصولات قرار می‌گیرند. در نوع دوم، صفحات فتوولتائیک بر بالای محصولات کشاورزی قرار می‌گیرند و در نوع سوم، اگر محصولات کشاورزی در گلخانه کشت شوند صفحات فتوولتائیک در بالای سقف گلخانه نصب می‌شوند که امروزه نوع دوم بیشتر مورد توجه می‌باشد. سیستم‌های مزارع برقی-کشاورزی، به دو علت عمده مورد توجه قرار می‌گیرند؛ اولاً در مناطقی که محدودیت مساحت زمین وجود داشته باشد؛ ثانیاً در مواردی که محصولات کشاورزی و گیاهان نیاز به سایه یا سقف محافظ داشته باشند. انباشت گرد و غبار بر سطح صفحات فتوولتائیک مانع رسیدن نور به سلول خورشیدی شده و در نتیجه، کاهش جریان الکتریکی در سلول‌های خورشیدی را دربرداشته و راندمان تولید را به

داخل کارخانه به مداخله اپراتور نیاز دارند، [۲۰]. ربات اکوپیا ایی چهار که یک ربات کاملاً مستقل است که از برس‌های میکروفایبر برای جارو کردن گرد و خاک در صفحه‌ها استفاده می‌کند. این ربات برای ردیف‌های بزرگی از صفحات خورشیدی واقع در محیط‌های خشک و شنی طراحی شده است، [۲۱]. ربات سولار برآش که یک ربات سبک وزن و مستقل برای پاک کردن صفحات خورشیدی یا شیشه در محیط‌های خشک است. با استفاده از فنجان‌های مکش، روی صفحات خورشیدی حرکت می‌کند و امکان عبور از شکاف‌ها تا ۳۰ میلی‌متر و کار بر روی سطوح کج‌شده تا ۳۵ درجه را ممکن می‌سازد، [۲۲] شرکت میراکی ربات‌های سبک وزن با باتری را طراحی می‌کند که می‌توانند به صورت مستقل آرایه‌های صفحه خورشیدی در مقیاس بزرگ را پاک کنند. پاک‌کننده ربات با چرخ‌های کوچک که از فناوری سنسور استفاده می‌کند تا به طرز ماهرانه‌ای بتواند کل آرایه‌های خورشیدی را با استفاده از برس‌های چرخان به حرکت درآورد تا گرد و خاک و شن را از بین ببرد، [۲۳] ربات نوماد یک سیستم پاک‌کننده صفحات خورشیدی بیابانی است. این ربات دارای قابلیت‌های مکانیکی منحصر به فردی دارد که به آن اجازه می‌دهد در حالی که ۹۹/۶٪ گرد و خاک را با پاک کردن روزانه از بین می‌برد. این ربات فقط سه قسمت متحرک دارد، [۳۴].

با توجه به قرارگیری ردیف‌های زیادی از صفحات خورشیدی در نیروگاه‌ها برای صرفه‌جویی در هزینه باید بتوان با استفاده از یک ربات تمام ردیف‌های صفحات خورشیدی را پاک نمود. برای غلبه بر مشکلات مطرح‌شده در بالا و با استفاده از حاشیه ردیف‌ها، این امکان وجود دارد که یک مسیر مناسب برای حرکت ربات حامل پاک‌کننده صفحات در نظر گرفته شود. بنابراین در این پژوهش، به بررسی یک ربات حامل پاک‌کننده صفحات فتوولتائیک پرداخته می‌شود که در یک مسیر ریل گزاری شده بتواند سیستم پاک‌کننده را بین ردیف‌های مختلف صفحات فتوولتائیک جابجا نماید. در ادامه، به طراحی این سیستم رباتیک و سپس به مدلسازی سینماتیک، سینتیک آن پرداخته می‌شود. همچنین با شبیه‌سازی چند کنترلر مناسب، به بررسی عملکرد ربات طراحی‌شده در انجام عملیات پاک کردن صفحات فتوولتائیک قبل از شروع به ساخت پرداخته می‌شود. این ربات دارای سه درجه آزادی که شامل یک درجه حرکت روی ریل و دو درجه برای تنظیم ارتفاع و زاویه است می‌باشد. در نهایت، با توجه

کیفیت پاک‌کنندگی، موجبات کاهش خطرات جانی و افزایش طول عمر صفحات فتوولتائیک و همین‌طور کاهش مصرف آب و سایر منابع انرژی و نیز هزینه‌های نیروی انسانی را موجب شود. همچنین علاوه بر پاک کردن ذرات گرد و غبار، برای مواردی همچون برف‌روبی و رفع فضولات و لاشه پرندگان نیز می‌توان از چنین سیستمی‌هایی استفاده نمود. مطالعات در مناطق خشک نشان می‌دهد که این تلفات می‌تواند تا ۱۵ درصد از کل ظرفیت تولید در روز را شامل شود و در طول یک ماه راندمان را تا ۵۰٪ کاهش دهد، [۸-۶]. طرح‌های متنوعی برای ربات‌های پاک‌کننده صفحات فتوولتائیک ارائه شده است، [۹] برخی از این ربات‌ها، قابلیت حرکت دلخواه روی صفحات فتوولتائیک را داشته [۱۰]، برخی دیگر در یک مسیر مشخص، شبیه حرکت روی ریل، از ابتدا تا انتهای صفحات را پاک می‌نمایند، [۱۱-۱۲] از آنجایی‌که، صفحات فتوولتائیک در ردیف‌های چند ده یا چند صد متری قرار می‌گیرند و انتقال بین این ردیف‌ها دشوار می‌باشد، در تمامی روش‌های فوق برای پاک کردن هر ردیف از این صفحات، یک ربات مورد استفاده قرار گرفته است، [۱۳-۱۶]. در این راستا ربات‌های متعددی وجود دارند که بر مبنای استراتژی پاک کردن، تعدادی از سیستم‌های معروف در ادامه شرح داده شده‌اند. برخی ربات‌های کاملاً مکانیزه، صفحات خورشیدی فتوولتائیک را با حرکت یک برس به صورت افقی پاک می‌کنند. با داشتن طول ۱ تا ۱۶ متر و داشتن باتری ۱۲ ولت می‌تواند به صورت اتوماتیک مستقر شود، [۱۷]. سیستم دیگر، ربات پی‌وی اسپین می‌باشد که ربات مکانیزه که از میله‌های تلسکوپی با برس پاک‌کننده در قسمت بالا تشکیل شده است. این ربات اولین نوع از یک سیستم پاک‌کننده با میله‌ی تلسکوپی همراه با فشار آب است. ربات پی‌وی اسپین بر اساس دو برس لاستیکی با دوام که در جهت‌های مخالف می‌چرخند کار می‌کند، خاک و سایر آلاینده‌ها را از سطح ماژول پاک می‌کند، [۱۸]. ربات رزولا سینفونیا یک ربات کاملاً هوشمند می‌باشد. این ربات به جای اینکه به ریل متصل شود، قادر است از یک صفحه‌ی خورشیدی به صفحه‌ی دیگر حرکت کند، تا بتواند فضولات و کثیفی صفحه‌های خورشیدی را کاملاً از بین ببرد. این ربات مجهز به برس پاک‌کن، برف پاک‌کن و مواد شوینده است و همچنین آب ذخیره‌شده در مخزن خود را آب‌پاش می‌کند، [۱۹] ربات هکتور نیز نوع دیگر ربات کاملاً مکانیزه می‌باشد. ربات‌های هکتور فقط برای پرکردن مخزن آب، تعویض باتری و توزیع آن در



شکل ۳. شماتیک سیستم به همراه مشخصات هندسی

Fig. 3. Schematic of the system with geometric specifications

در نظر گرفته می‌شوند. از آن جا که موقعیت و زاویه‌ی میز حامل پاک‌کننده به عنوان خروجی نهایی در نظر گرفته می‌شود ابتدا به استخراج مقادیر آن پرداخته می‌شود.

### ۱-۲ استخراج معادلات سینماتیکی سیستم:

موقعیت و زاویه‌ی میز حامل پاک‌کننده یا  $x_{ee}, y_{ee}, \theta_{ee}$  در معادلات ۱-۳ استخراج گردیده است:

$$x_{ee} = x + \frac{l_{ee}}{2} \times \cos \theta_{ee} = x + l_{ee} \times \frac{a}{2\sqrt{(2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2 + a^2}} \quad (1)$$

$$y_{ee} = 2l_2 \sin \theta_2 + \frac{l_{ee}}{2} \times \sin \theta_{ee} = 2l_2 \sin \theta_2 + l_{ee} \times \frac{(2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)}{2\sqrt{(2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2 + a^2}} \quad (2)$$

$$\theta_{ee} = \tan^{-1} \left( \frac{2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2}{a} \right) \quad (3)$$

که در آن  $l_{ee}$  طول میز حامل (مجری نهایی)،  $a$  طول بدنه اصلی،  $l_1$  طول عضو ۱،  $l_2$  طول عضو ۲،  $\theta_1$  زاویه‌ی قیچی اول و  $\theta_2$  زاویه‌ی قیچی دوم می‌باشند. به منظور خلاصه‌سازی، به جای  $\sin \theta_i$  و  $\cos \theta_i$  از  $s_i$  و  $c_i$  استفاده شده است. سپس ژاکوبین‌های تمام مراکز جرم‌ها با استفاده از جابه‌جایی در جهت‌های  $X$  و  $Y$  تمام مرکز جرم‌ها محاسبه شده و سپس به منظور محاسبه‌ی سرعت‌ها، با مشتق‌گیری از معادله‌های فوق، ماتریس‌های ژاکوبین محاسبه می‌گردد. در نهایت برای ژاکوبین مجری نهایی داریم:

به حساسیت‌های شرایط ربات‌های پاک‌کننده، به طراحی و مقایسه عملکرد چند کنترلر مدل مبنا بر روی مسیر مطلوب طراحی شده پرداخته می‌شود. برای کاهش محاسبات کنترلی از روش‌های مختلف بهره جسته شده است. علاوه بر کاهش محاسبات، خطای ایجاد شده نیز کاهش پیدا کرده است. به دلیل این که سیستم مورد نظر باید حرکت نرم و آرام و بدون شتاب داشته باشد از کنترلر مدل مبنا استفاده شده است که در ابتدا از روش کنترل گشتاور محاسبه شده بهره گرفته شده است و سپس به شبیه‌سازی روش کنترل ژاکوبین مبنا پرداخته می‌شود. در ادامه و به منظور بهبود عملکرد، به طراحی و شبیه‌سازی یک کنترلر ژاکوبین مبنا اصلاح شده<sup>۲</sup> پرداخته شده است. در پایان، مقایسه و بحث بر روی نتایج شبیه‌سازی کنترلرها ارائه گردیده است.

### ۲- مدل‌سازی دینامیکی با استفاده از روش لاگرانژ

در این بخش، به استخراج معادلات دینامیکی ربات پرداخته می‌شود. بدین منظور، ابتدا متغیرهای سینماتیکی مشخص شده و سپس به مدل‌سازی دینامیک ربات پرداخته می‌شود. یک شمای کلی از ربات طراحی شده به همراه مشخصات سینماتیکی تمامی اجزاء و مشخصات هندسی پارامترهای آن در (شکل ۳) آورده شده است. باتوجه به محل نصب موتورها،  $(\theta_1, X, \theta_2)$  به عنوان متغیرهای کنترلی

- 1 Computed Torque Method, CTM
- 2 Transposed Jacobian, TJ
- 3 Modified Transposed Jacobian, MTJ

$$\frac{1}{2} \dot{q}^T M \dot{q} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (m_i v_{c_i}^T v_{c_i} + \omega_i^T I_{c_i} \omega_i) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (m_i \dot{q}^T J_{v_i}^T J_{v_i} \dot{q} + \dot{q}^T J_{\omega_i}^T I_{c_i} J_{\omega_i} \dot{q}) \quad (9)$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} \dot{q}^T M \dot{q} = \frac{1}{2} \dot{q}^T [ \sum_{i=1}^n (m_i J_{v_i}^T J_{v_i} + J_{\omega_i}^T I_{c_i} J_{\omega_i}) ] \dot{q}$$

که در آن  $I_{c_i}$  ممان اینرسی هر عضو،  $m_i$  جرم هر عضو،  $M$  ماتریس جرمی سیستم می‌باشند. همچنین، مختصات عام سیستم بصورت  $q = [x \ \theta_1 \ \theta_2]^T$  تعریف می‌گردد. بنابراین:

$$M = \sum_{i=1}^n (m_i J_{v_i}^T J_{v_i} + J_{\omega_i}^T I_{c_i} J_{\omega_i}) \quad (10)$$

همچنین انرژی پتانسیل به صورت زیر محاسبه شده است:

$$G = -(J_{v_1}^T (m_1 g) + J_{v_2}^T (m_2 g) + \dots + J_{v_n}^T (m_n g)) \quad (11)$$

در نتیجه، مقدار  $G$  یک ماتریس  $3 \times 1$  خواهد بود. ماتریس  $V$  نیز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V = c \times \dot{q} \quad (12)$$

در پایان معادلات فرم بسته سیستم برابر خواهد بود با:

$$M(q) \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + B(q) \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \dot{q}_2 \\ \dot{q}_1 \dot{q}_3 \\ \dot{q}_2 \dot{q}_3 \end{bmatrix} + C(q) \begin{bmatrix} \dot{q}_1^2 \\ \dot{q}_2^2 \\ \dot{q}_3^2 \end{bmatrix} + G(q) = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

از طرفی، مختصات کاری موردنظر سیستم مفروض از  $X = [x_{ee} \ y_{ee} \ \theta_{ee}]^T$  که برابر است با مختصات و زاویه‌ی مجری نهایی. برای تبدیل سرعت از فضای مفصلی به فضای کاری از ماتریس ژاکوبین به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\dot{X} = J_{ee} \times \dot{q} \quad (14)$$

سپس، با استفاده از ماتریس ژاکوبین می‌توان روابط دینامیکی سیستم را در فضای کاری بصورت زیر بیان نمود:

$$M_X \ddot{X} + V_X + G_X = F_X \quad (15)$$

$$J_{ee} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{l_1 l_{ee} \cos \theta_1 (2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)}{a^2 \left( \frac{(2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^2} + 1 \right)^{\frac{3}{2}}} \\ 0 & \frac{l_1 l_{ee} \cos \theta_1}{a \left( \frac{(2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^2} + 1 \right)^{\frac{1}{2}}} - \frac{l_2 l_{ee} \cos \theta_1 (2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^3 \left( \frac{(2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^2} + 1 \right)^{\frac{3}{2}}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{l_2 l_{ee} \cos \theta_2 (2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)}{a^2 \left( \frac{(2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^2} + 1 \right)^{\frac{3}{2}}} \\ 2l_2 \cos \theta_2 - \frac{l_2 l_{ee} \cos \theta_2}{a \left( \frac{(2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^2} + 1 \right)^{\frac{1}{2}}} - \frac{l_2 l_{ee} \cos \theta_2 (2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^3 \left( \frac{(2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^2} + 1 \right)^{\frac{3}{2}}} \end{bmatrix}$$

همچنین ژاکوبین‌های دورانی برای تمام مراکز جرم محاسبه شده است. به این ترتیب سرعت‌های مرکز جرم هر عضو، با ضرب ژاکوبین‌ها در  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}$  سرعت‌ها به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$V_{c_i} = J_{v_i} \dot{q} \quad (5)$$

$$\omega_{c_i} = J_{\omega_i} \dot{q}$$

که در آن  $J_{v_i}$  و  $J_{\omega_i}$  بترتیب ژاکوبین سرعت خطی و ژاکوبین سرعت دورانی هر عضو می‌باشند و بردار  $\dot{q} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta}]^T$  می‌باشد. بنابراین داریم:

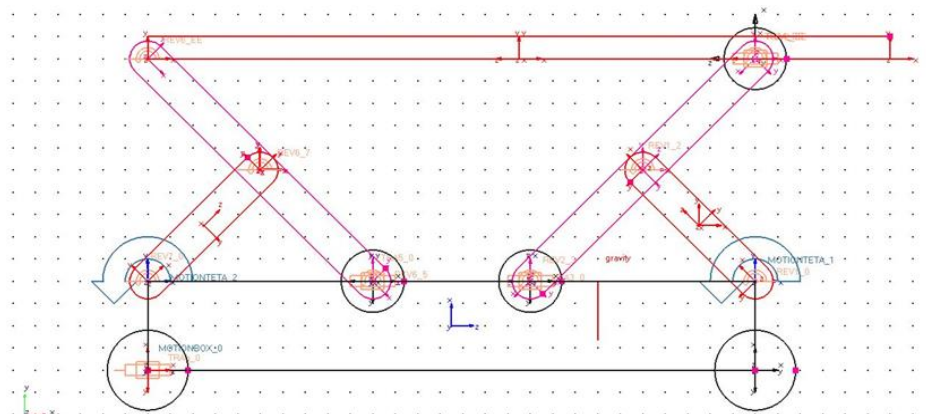
$$\dot{x}_{ee} = \dot{x} - \frac{(l_1 l_{ee} \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + l_2 l_{ee} \cos \theta_2 \dot{\theta}_2) \times (2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)}{a^2 \left( \frac{(2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^2} + 1 \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

$$\dot{y}_{ee} = \dot{y} + \frac{l_1 l_{ee} \cos \theta_1}{a \sqrt{\left( \frac{(2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^2} + 1 \right)}} - \frac{l_2 l_{ee} \cos \theta_1 (2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^3 \left( \frac{(2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^2} + 1 \right)^{\frac{3}{2}}} + \dot{\theta}_2 (2l_2 \cos \theta_2 - \frac{l_2 l_{ee} \cos \theta_2}{a \sqrt{\left( \frac{(2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^2} + 1 \right)}} - \frac{l_2 l_{ee} \cos \theta_2 (2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^3 \left( \frac{(2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^2} + 1 \right)^{\frac{3}{2}}}) \quad (7)$$

$$\dot{\theta}_{ee} = \frac{2l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1}{a \left( \frac{(2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^2} + 1 \right)} - \frac{2l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2}{a \left( \frac{(2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)^2}{a^2} + 1 \right)} \quad (8)$$

## ۲-۲ استخراج معادلات سینتیکی سیستم:

با استفاده روش لاگرانژ، معادلات دینامیکی ربات به فرم زیر استخراج می‌گردد، [۲۶-۲۵]:



شکل ۴. صحنه‌گذاری مدل دینامیک، شبیه‌سازی دینامیک توسط نرم افزار آدامز

Fig. 4. Dynamic model verification, dynamic simulation by ADAMS software

نتایج شبیه‌سازی این آزمون نیز در (شکل ۵) آمده است. مقایسه و تطبیق دو نمودار، حاکی از درستی و دقت بالای مدل دینامیکی استخراج شده برای سیستم مفروض در برابر نتایج شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار می‌باشد. توجه داریم که پارامترها و مشخصات هندسی و دینامیکی ربات مفروض در جدول ۱ آورده شده است.

#### ۴- کنترلر تناسبی-مشتقگیر-انتگرالی<sup>۱</sup>:

در این بخش، با استفاده از مدل دینامیک بدست‌آمده، به طراحی یک کنترلر برای رساندن ربات به موقعیت مورد نظر پرداخته می‌شود. بدین منظور، از یک کنترلر تناسبی-مشتقگیر-انتگرالی استفاده می‌گردد که دباگرام بلوک کنترلی آن در (شکل ۶) نشان داده شده است. مطابق این شکل، موقعیت میز (مجری‌نهایی ربات) توسط سنسورها اندازه‌گیری شده و با مقدار مطلوب مقایسه می‌گردد. کنترلر سعی در به صفر رساندن خطا می‌کند. ابتدا با ساده‌سازی مدل دینامیکی و با توجه به ابعاد و ویژگی‌های آن، با هدف رسیدن به زمان نشست حدود چهار ثانیه و به‌صفر رساندن فراجهدش، مقدار

#### جدول ۱. مشخصات هندسی و دینامیکی ربات مفروض

Table 1. Geometric and dynamic characteristics of the assumed robot

لینک	طول (متر)	عرض (متر)	ضخامت (متر)	وزن (کیلوگرم)	IZZ
۱	۰/۳۵۳	۰/۰۸	۰/۰۵	۱/۵	۰/۹۳۴
۲	۰/۷۰۷	۰/۰۸	۰/۰۵	۳	۰/۱۷
۶	۰/۷۰۷	۰/۰۸	۰/۰۵	۳	۰/۱۷
۷	۰/۳۵۳	۰/۰۸	۰/۰۵	۱/۵	۰/۹۳۴

1 PID controller

که در آن مقادیر  $M_X, V_X, G_X$  با توجه به رابطه زیر بیان می‌گردد.

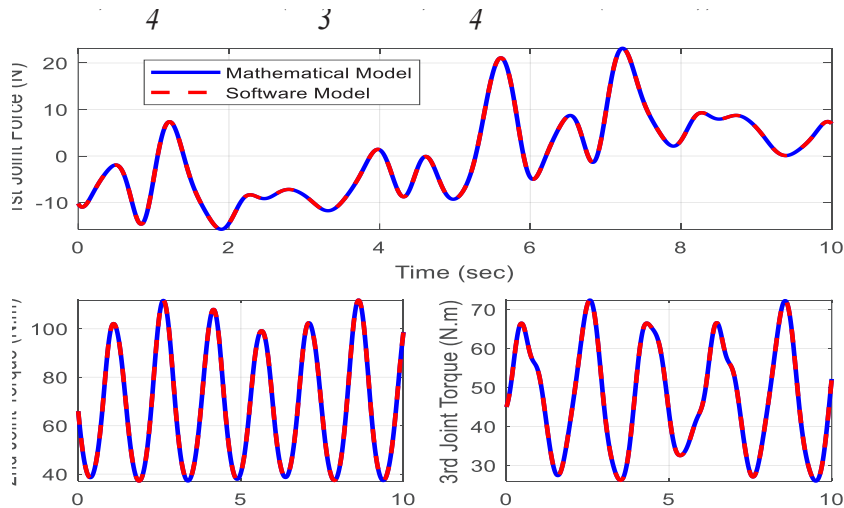
$$\begin{aligned} M_X(q) &= J_{ee}^{-T}(q) \times M(q) \times J_{ee}^{-1}(q) \\ V_X(q, \dot{q}) &= J_{ee}^{-T}(q) \times (V(q, \dot{q}) - M(q) \times J_{ee}^{-1}(q) \dot{J}_{ee} \times \dot{q}) \\ G_X(q) &= J_{ee}^{-T}(q) \times G(q) \end{aligned} \quad (16)$$

#### ۲-۳ صحنه‌گذاری مدل دینامیک استخراج‌شده:

در این بخش، به منظور راستی‌آزمایی مدل دینامیک بدست‌آمده، به شبیه‌سازی ربات پرداخته و نتایج با مدل طراحی شده در نرم‌افزار آدامز مقایسه می‌شود، (شکل ۴). بدین منظور و برای انجام شبیه‌سازی‌ها، حرکت مشخصی به ربات داده می‌شود و نیروهای عملگری لازم در آن حرکت یک‌بار توسط مدل دینامیکی و یک‌بار توسط نرم‌افزار آدامز محاسبه می‌گردند، [۲۷]. برای استفاده از نرم‌افزار آدامز، ابتدا مدل سیستم مورد نظر در آن طراحی می‌شود. سپس، تمامی قیدها و نیروها برای مدل تعریف می‌گردد. در نهایت ویژگی‌های مدل به صورت یک بلوک به محیط سیمولینک متلب منتقل می‌شود. در محیط سیمولینک ورودی‌های سیستم تعیین شده و از طریق بلوک آدامز محاسبات دینامیکی انجام می‌شود، [۲۸].

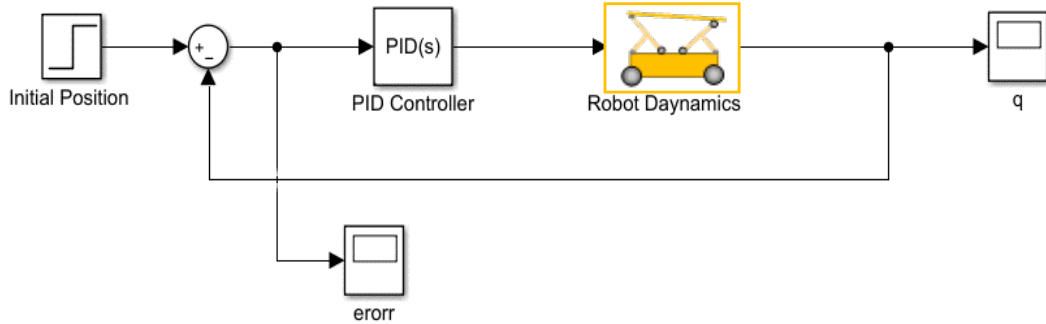
در این شبیه‌سازی مطابق رابطه زیر هر سه موتور در حال حرکت می‌باشد. بنابراین داریم:

$$q = (0.3 \times \sin(0.2 \times \pi \times \text{time}), \frac{\pi}{4} + 0.3 \times \sin(\frac{4 \times \pi}{3} \times \text{time}), \frac{\pi}{4} - 0.3 \times \sin(\pi \times \text{time})) \quad (17)$$



شکل ۵. مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی در نرم‌افزار آدامز و معادلات دینامیکی استخراج شده

Fig. 5. Comparison of modeling results in ADAMS software and extracted dynamic equations



شکل ۶. دیاگرام بلوکی کنترلر PID برای ربات مورد نظر

Fig. 6. PID controller block diagram for the assumed robot

جدول ۲. ضرایب کنترلر PID

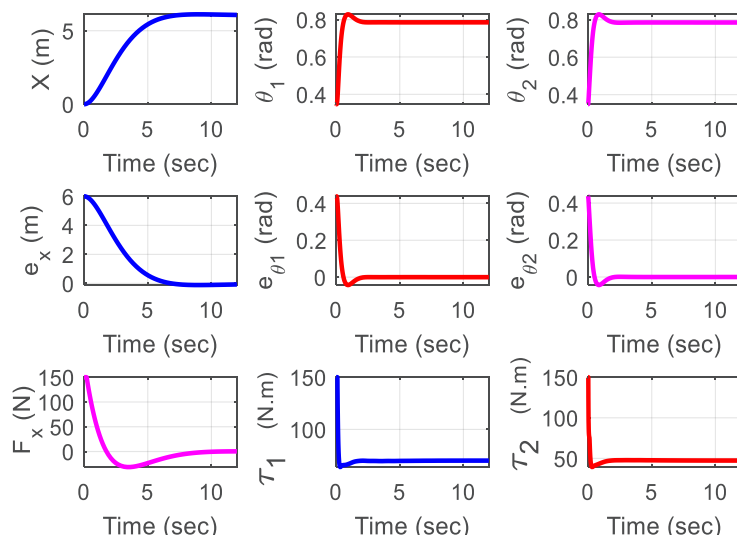
Table 2. PID controller gains

ضرایب کنترلر $PID_x$		
$k_p$	$k_D$	$k_I$
۳۰	۸۰	۰/۹۹
ضرایب کنترلر $PID_{\theta_1}$		
$k_p$	$k_D$	$k_I$
۵۰۰	۱۰۰	۸۰۰
ضرایب کنترلر $PID_{\theta_2}$		
$k_p$	$k_D$	$k_I$
۵۰۰	۱۰۰	۸۰۰

$\theta_1$ ،  $\theta_2$  و برای  $\theta_3$   $(-150, 150)$  و برای عملگرهای دورانی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که کنترلر طراحی شده، خطا را در زمان مناسب به صفر رسانده است و عملکرد مطلوبی برای ربات با مشخصات مورد نیاز دارد.

اولیه‌ای برای ضرایب کنترلر در نظر گرفته شد. سپس با سعی و خطا، این ضرایب اصلاح گشتند. در ادامه برای مشاهده عملکرد کنترلر، به شبیه‌سازی یک سناریو کنترلی پرداخته می‌شود. موقعیت اولیه ربات، به صورت  $(0, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$  در نظر گرفته می‌شود. موقعیت مطلوب نیز به صورت  $(6, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4})$  مشخص شده است. با انتخاب ضرایب کنترلی در جدول ۲ نتایج شبیه‌سازی کنترلی به صورت (شکل ۷) حاصل شده است.

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، خطا مقدار قابل قبولی را دربر گرفته است. همچنین مقادیر نیرو و گشتاور عملگرها (ورودی‌های سیستم) نیز در (شکل ۷) نمایش داده شده‌اند. برای اطمینان از قابل انجام بودن فرآیند کنترلی، متناسب با قدرت عملگرهای مورد نظر، حد اشباع در جهت X برابر  $(-150, 150)$  و برای



شکل ۷. نتایج شبیه‌سازی کنترلر PID در سه جهت  $x, \theta_1, \theta_2$  (بالا) موقعیت‌ها، (وسط) خطا، (پایین) نیرو و گشتاور

Fig. 7. PID controller simulation results in three directions  $x, \theta_1, \theta_2$ , (Top) Positions, (Middle) Errors, (Bottom) Force and Torque

### جدول ۳. ضرایب کنترلر TJ

Table 3. TJ controller gains

$k_{px} = 10000 \text{ N/m}$	$k_{py} = 30000 \text{ N/m}$	$k_{p\theta} = 500 \text{ N.m/rad}$
$k_{vx} = 10000 \text{ Ns/m}$	$k_{vy} = 30000 \text{ Ns/m}$	$k_{v\theta} = 500 \text{ N.ms/rad}$

۸) نشان شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، گشتاورهای عملگری در محدوده مناسبی قرار دارند. نمودارهای خطا نیز حاکی از رفتار قابل قبولی از لحاظ نوسانات و فراجهدش می‌باشند. با این حال، خطای ماندگار به خصوص در زوایا دیده می‌شود. این موضوع از ویژگی‌ها و محدودیت‌های کنترل ژاکوبین مبنا می‌باشد. توجه داریم که مقادیر اولیه برای شبیه‌سازی کنترلر ژاکوبین مبنا برابر با  $(-0.1, 0.175 + \frac{\pi}{9}, -0.35 + \frac{\pi}{9})$  در نظر گرفته شده است.

### ۶- کنترلر ژاکوبین مبنا اصلاح شده<sup>۲</sup>:

الگوریتم کنترلی ژاکوبین مبنا اصلاح شده در ردیابی مسیرهای سرعت بالا عملکرد بهتری از خود نشان داده است. این الگوریتم، با حفظ مزایای الگوریتم ژاکوبین مبنا در استفاده از ماتریس ژاکوبین برای محاسبات سریع، می‌تواند به منظور کاهش نوسانات کنترلی و از بین بردن خطای حالت ماندگار به کار گرفته شود، [۳۰]. از طرفی، کنترل ژاکوبین مبنا اصلاح شده هم بر اساس مدل سینماتیکی می‌باشد. در کنترل ژاکوبین مبنا حجم محاسباتی کم‌تر می‌باشد ولی

### ۵- کنترلر ژاکوبین مبنا<sup>۱</sup>:

کنترل ژاکوبین مبنا یکی از روش‌های کنترل بر مبنای سینماتیک است. در این روش، گشتاورها و نیروهای کنترلی بر مبنای ماتریس ژاکوبین و خطای کنترلی محاسبه می‌شوند. از این روش به منظور ساده‌سازی استفاده می‌شود و عملکرد آن می‌تواند به صورت تصویری از فنر تعمیم‌یافته و دمپر باشد، [۲۹]. همچنین قبل از شبیه‌سازی کنترلی، نیاز به یک مسیر برای حرکت ربات مفروض در طی عملیات پاک کردن صفحات فتوولتائیک می‌باشد. بدین منظور، موقعیت اولیه ربات، به صورت  $(0, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$  در نظر گرفته می‌شود. موقعیت مطلوب نیز به صورت  $(6, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4})$  مشخص شده است. بنابراین داریم:

$$\begin{aligned} x &= 0.0347t^3 - 0.0043t^4 + 0.0001t^5 \\ \theta_1 &= 0.349 + 0.0025t^3 - 0.0003t^4 \\ \theta_2 &= 0.349 + 0.0025t^3 - 0.0003t^4 \end{aligned} \quad (18)$$

که در آن  $t$  نشان‌دهنده‌ی زمان می‌باشد. توجه داریم که قانون کنترلی در این روش بصورت زیر بیان می‌شود:

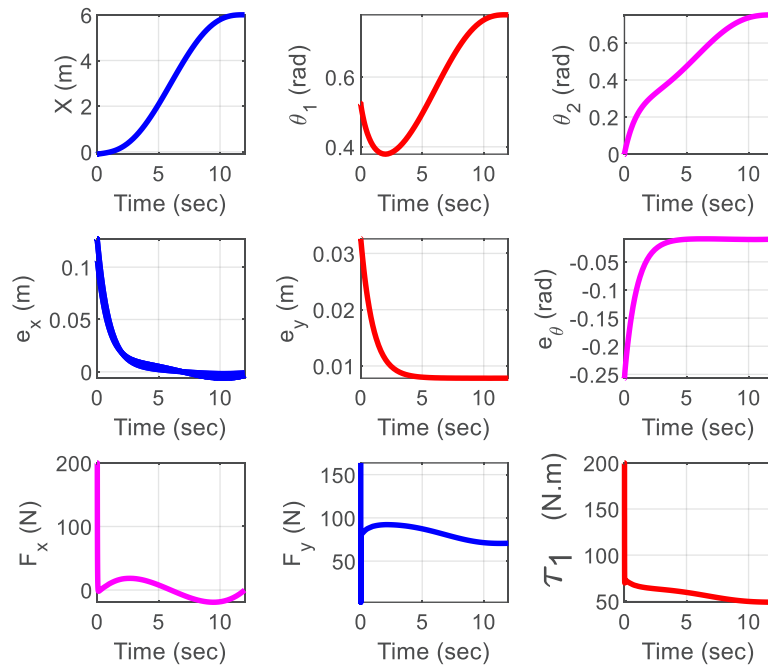
$$\tau = J_{ee}^T (k_v \dot{e}_X + k_p e_X) \quad (19)$$

با انتخاب ضرایب کنترلی در جدول ۳ نتایج شبیه‌سازی در (شکل

2 Modified Transpose Jacobian, MTJ

1 Transpose Jacobian, TJ





شکل ۸. نتایج شبیه‌سازی کنترلر TJ در جهت  $(x, \theta_1, \theta_2)$ ، بالا) موقعیت‌ها، وسط) خطا، پایین) نیرو و گشتاور

Fig. 8. TJ controller simulation results in three directions  $x, \theta_1, \theta_2$ , Top) Positions, Middle) Errors, Bottom) Force and Torque

بدین ترتیب دستور کنترلی از لحظه‌ی قبل برای آشنایی با چگونگی رفتار یک سیستم در کنترلر بهره می‌برد، بدیهی است که اگر مقادیر خطا و نرخ آن بزرگ باشد، رابطه‌ی فوق بیانگر دینامیک سیستم نخواهد بود، اما برای خطاهای ناچیز می‌توان دستور کلی را معرف ماهیت دینامیک سیستم قرار داد. با این حال گنجاندن این سیگنال نیاز به اندازه‌گیری شتاب دارد و ممکن است در عمل بدست آوردن آن دشوار باشد. بدین ترتیب می‌توان تقریب خوبی را برای  $h(t)$  فرض نمود که در این صورت مقدار آن برابر با  $F$  در یک استپ زمانی کوچک می‌شود. یعنی داریم:

$$h(t) = F \int_{t-\Delta t}^t dt \quad (23)$$

با لحاظ کردن این ترم ممکن است نتیجه به گشتاور مفصلی بیشتری منجر شود برای زمانی که  $e$  نسبتاً زیاد باشد یا در مشتق دوم اختلالات زیاد وجود داشته باشد. برای جلوگیری از این مشکل احتمالی، الگوریتم استاندارد TJ لحظه‌ای قابل استفاده است. بنابراین، یک عامل تنظیم‌کننده  $k$  با توجه به رابطه زیر به کار گرفته می‌شود:

$$h(t) = Fk \int_{t-\Delta t}^t dt \quad (24)$$

مقداری خطا نیز وجود دارد برای ازبین بردن این خطا روش کنترلی دیگری به اسم ژاکوبین مبنا اصلاح‌شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش همانند کنترل به روش ژاکوبین مبنا بار محاسباتی کم‌تر شده همچنین مقدار خطایی که در کنترل قبل دیده می‌شد از بین رفته است. اساس کار کنترل ژاکوبین مبنا اصلاح شده همانند کنترل به روش ژاکوبین مبنا می‌باشد با این تفاوت که گشتاور ژاکوبین مبنا در یک تاخیری ضرب می‌شود. همچنین قانون کنترلی در این روش بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau = J_{ee}^T (k_v \dot{e} + k_p e + h(t)) \quad (20)$$

که در آن  $h(t)$  برای جبران‌سازی اثرات دینامیکی می‌باشد. با توجه به رابطه  $\tau = J^T(q)F$  می‌توان نوشت:

$$F = k_v \dot{e} + k_p e + h(t) \quad (21)$$

از طرفی باتوجه به رابطه ۲۱ اگر سمت راست آن برابر صفر شود، بنابراین خطای ردیابی همگرا به صفر می‌شود، یعنی:

$$k_v \dot{e} + k_p e = F - h(t) \quad (22)$$

$$k_v \dot{e} + k_p e \cong 0 \quad (28)$$

بنابراین با استفاده از رابطه فوق می‌توان به نتایج کنترلی منظم‌تری دست یافت. با انتخاب ضرایب کنترلی در جدول ۴ نتایج شبیه‌سازی کنترلی به صورت (شکل ۹) حاصل شده است. توجه داریم که مقادیر اولیه برای کنترلر ژاکوبین مینا اصلاح‌شده برابر است با:  $(-0.1, 0.0875 + \frac{\pi}{9}, -0.175 + \frac{\pi}{9})$

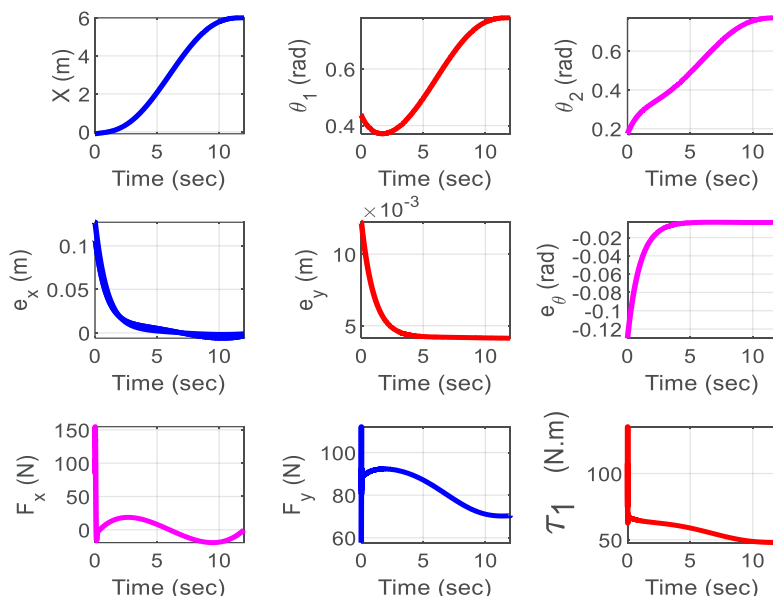
### ۷- کنترل روش گشتاور محاسبه‌شده:

در این بخش، به طراحی یک کنترلر به روش گشتاور محاسبه‌شده پرداخته می‌شود. این کنترلر، بر مبنای حل کامل مدل دینامیکی سیستم عمل می‌کند. به این ترتیب که با حل معادلات دینامیکی گشتاور مورد نیاز را بدست آورده و به این ترتیب ورودی مورد نیاز سیستم را به‌طور دقیق محاسبه می‌کند. پس می‌توان سیستم را با خطاها و نوسان‌های کم، در مسیر مطلوب کنترل نمود، [۳۱]. برای

### جدول ۴. ضرایب کنترلر MTJ

Table 4. MTJ controller gains

$k_{px} = 1000 \text{ N/m}$	$k_{py} = 20000 \text{ N/m}$	$k_{p\theta} = 500 \text{ N.m/rad}$
$k_{vx} = 1000 \text{ N.s/m}$	$k_{vy} = 20000 \text{ N.s/m}$	$k_{v\theta} = 500 \text{ N.ms/rad}$



شکل ۹. نتایج شبیه‌سازی کنترلی MTJ در جهت  $(x, \theta_1, \theta_2)$  (بالا) موقعیت‌ها، (وسط) خطا، (پایین) نیرو و گشتاور

Fig. 9. MTJ controller simulation results in three directions  $x, \theta_1, \theta_2$ , (Top) Positions, (Middle) Errors, (Bottom) Force and Torque

که مقادیر  $k$  در آن برابر است با:

$$k = \begin{cases} 0 & e \geq e_{max}, \dot{e} \geq \dot{e}_{max} \\ 1 & e \leq e_{max}, \dot{e} \leq \dot{e}_{max} \end{cases} \quad (25)$$

و یا برای ساده‌کردن ضریب  $k$  می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$k = \exp\left(-\left|\frac{e}{e_{max}}\right| - \left|\frac{\dot{e}}{\dot{e}_{max}}\right|\right) \quad (26)$$

$$k_{ii} = \exp\left(-\left|\frac{e_i}{e_{max_i}}\right| - \left|\frac{\dot{e}_i}{\dot{e}_{max_i}}\right|\right)$$

در عمل ضرایب  $k_p$  و  $k_v$  را می‌توان به عنوان ماتریس مورب انتخاب کرد. بنابراین ضریب  $k$  در رابطه ۲۰ را می‌توان با یک ماتریس مورب  $K$  جایگزین نمود، با قرار دادن مقدار  $h(t)$  از رابطه ۲۴ در رابطه ۲۰ داریم:

$$\tau_{MTJ} = J^T \times (k_v \dot{e} + k_p e) + k \times F \int_{t-\Delta t}^t \quad (27)$$

با انتخاب صحیح آستانه‌های حساسیت و مراحل زمانی کوچک، می‌توان خطای حاصل شده را بر حسب ماتریس افزایش مورب  $k_p$  و  $k_v$  نوشت:

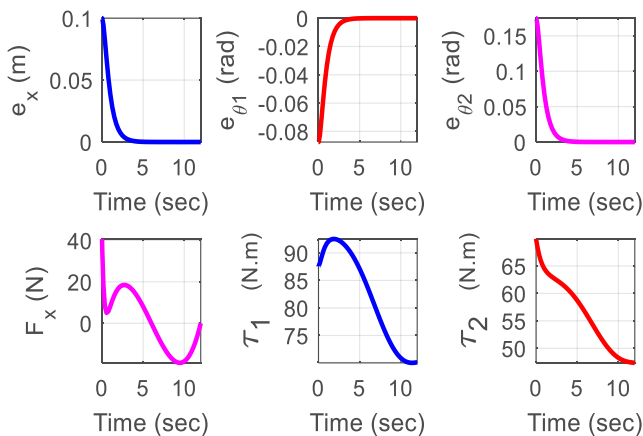
جدول ۵. ضرایب کنترلر CTM  
Table 5. CTM controller gains

$k_{px}=5$	$k_{vx}=5$	۱۵۰ = حد اشباع عملگرها
$k_{p\theta_1}=5$	$k_{v\theta_1}=5$	
$k_{p\theta_2}=5$	$k_{v\theta_2}=5$	

$x, \theta_1, \theta_2$  و نمودارهای نیرو-گشتاور مفاصل  $x, \theta_1, \theta_2$  شکل ۱۱ بدست آمده است. که مقادیر اولیه برای کنترلر روش گشتاور محاسبه شده برابر است با:  $(-0.175 + \frac{\pi}{9}, -0.175 + \frac{\pi}{9}, -0.10875 + \frac{\pi}{9})$  نتایج نشان می‌دهد که کنترلر طراحی شده، خطا را در زمان مناسب به صفر رسانده است و عملکرد مطلوبی برای ربات مفروض بر روی مسیر طراحی شده با مشخصات مورد نیاز دارد.

### ۸- نتیجه‌گیری:

در این مقاله، به مدلسازی دینامیکی و کنترل یک ربات پایه متحرک به منظور جابه‌جا کردن واحد پاک‌کننده صفحات فتوولتائیک مزارع خورشیدی پرداخته شد. بدین منظور، ابتدا معادلات سینماتیک ربات مفروض استخراج شد. سپس، با استفاده از روش لاگرانژ، معادلات دینامیکی ربات استخراج گشت. سپس، برای صحنه‌گذاری ربات از نرم‌افزار آدامز بهره گرفته شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی دو مدل ریاضی و نرم‌افزاری در شرایط متفاوت محاسبه شد که نتایج حاکی از دقت و صحت معادلات بود. با توجه به اینکه هدف اصلی از مدلسازی دینامیکی سیستم، اجرای عملیات کنترلی بود، به طراحی



شکل ۱۱. نتایج شبیه‌سازی کنترلر CTM در جهت  $(x, \theta_1, \theta_2)$  (بالا) موقعیت‌ها، (وسط) خطا، (پایین) نیرو و گشتاور

Fig. 11. CTM controller simulation results in three directions  $x, \theta_1, \theta_2$ , (Top) Positions, (Middle) Errors, (Bottom) Force and Torque

محاسبه خطا در فضای مفصلی، می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$e = q_d - q \quad (29)$$

مطابق (شکل ۱۰) که نشان‌دهنده بلوک دیاگرام کنترلر در سیمولینک متلب می‌باشد، خطاهای سیستم از مقایسه مقادیر واقعی  $q$  و  $\dot{q}$  با مقادیر مطلوب آن‌ها بدست می‌آیند. بنابراین داریم:

$$\ddot{q}_c = \ddot{q}_d + k_v \dot{e} + k_p e \quad (30)$$

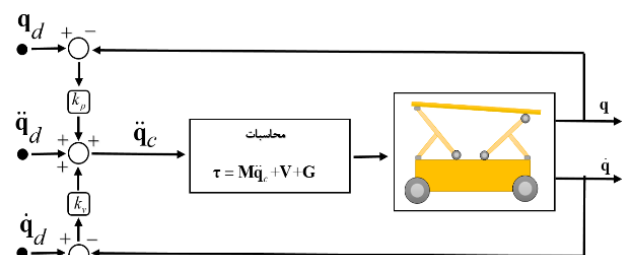
سپس، به کمک  $(\ddot{q}_c)$  و با استفاده از معادله بدست آمده از دینامیک سیستم، مقدار گشتاور مورد نیاز برای حرکت مطلوب، مطابق معادله زیر بدست می‌آید:

$$\tau = M\ddot{q}_c + G + V \quad (31)$$

به این ترتیب، با فرض کوچک بودن خطاهای محاسباتی و مدلسازی و صرف نظر از خطاهای احتمالی ناشی از سنسورها و عملگرها، معادله حاکم بر حلقه کنترلی به صورت زیر خواهد بود:

$$\ddot{e} + k_v \dot{e} + k_p e = 0 \quad (32)$$

به منظور انتخاب ضرایب  $k_p$  و  $k_v$ ، می‌توان از روش جایدهی قطب‌ها استفاده نمود. برای سیستم مورد نظر، با توجه به ابعاد، اینرسی و ویژگی‌های دینامیکی آن، با هدف رسیدن به زمان نشست حدود چهار ثانیه و به‌صفر رساندن فرجهش، مقدار اولیه‌ای برای ضرایب  $k_p$  و  $k_v$  در نظر گرفته شد. سپس با سعی و خطا و شبیه‌سازی‌های متعدد حلقه کنترلی، ضرایب اصلاح گشتند. مقادیر نهایی ضرایب در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. همچنین، مقادیر مورد نظر به عنوان حد اشباع عملگرها، بر اساس موتورهای انتخاب شده در طراحی اولیه، در جدول ۵ مشخص شده‌اند. نتایج حاصل از کنترل بصورت نمودارهای خطای



شکل ۱۰. بلوک دیاگرام کنترلر CTM در فرم فضای مفصلی

Fig. 10. CTM controller block diagram in the joint space form

$\tau$	نیرو یا گشتاور	$\left(N, \frac{N}{m}\right)$
$g$	ضریب گرانش	$\frac{m}{sec^2}$
$J_{ee}$	ژاکوبین مجری نهایی	
$k_p$	ضریب موقعیت	
$k_v$	ضریب سرعت	
$e_x$	خطای ماندگار	$(m, rad)$
$\dot{e}_x$	سرعت خطای ماندگار	$\left(\frac{m}{sec}, \frac{rad}{sec}\right)$
$V_i$	سرعت خطی هر عضو	$\frac{m}{sec}$
$\omega_i$	سرعت دورانی هر عضو	$\frac{rad}{sec}$

یک کنترلر تناسبی-مشتقگیر-انتگرالی پرداخته شد. نمودارهای خطا و گشتاور حاصل از شبیه‌سازی‌های کنترلری، نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب آن می‌باشد. در ادامه و پس از طراحی مسیر مطلوب جهت جابجایی ربات پاک‌کننده، کنترلرهای مدل مبنا باتوجه به عملکرد مناسب آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، به شبیه‌سازی کنترلرهای ژاکوبین مبنا و ژاکوبین مبنا اصلاح‌شده که بر مبنای مدل سینماتیکی هستند و همچنین در ادامه به شبیه‌سازی کنترلر روش گشتاور محاسبه‌شده که بر مبنای مدل دینامیکی است پرداخته شد. در پایان نتایج عملکردی این کنترلرها با یکدیگر مقایسه و مزایا و معایب هریک بیان گردید.

### فهرست علائم:

[1] E. De Schepper, S. Van Passel, J. Manca, T. Thewys, Combining photovoltaics and sound barriers—A feasibility study, <i>Renewable energy</i> , 46 (2012) 297-303.	$a$	فاصله‌ی بین دو چرخ	$m$
[2] C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, Y. Ferard, Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes, <i>Renewable energy</i> , 36(10) (2011) 2725-2732.	$b$	عرض بدنه اصلی	$m$
[3] A. Syafiq, A. Pandey, N. Adzman, N. A. Rahim, Advances in approaches and methods for self-cleaning of solar photovoltaic panels, <i>Solar Energy</i> , 162 (2018) 597-619.	$q$	موقعیت سیستم	$(m, rad)$
[4] 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, <i>Procedia Computer Science</i> , 133(2018) 746-754.	$\dot{q}$	سرعت سیستم	$\left(\frac{m}{sec}, \frac{rad}{sec}\right)$
[5] J. Burgalet, A. Ternero, D. Vindel, I. Salbidegoitia, G. Azcarraga, Gemasolar, key points for the operation of the plant, <i>SolarPACES</i> , Marrakech, (2012).	$\ddot{q}$	شتاب سیستم	$\left(\frac{m}{sec^2}, \frac{rad}{sec^2}\right)$
[6] S. Bushong, Robot Cleans Solar Panels And Protects Efficiency, <i>Dust Wars</i> , (2013).	$\theta_1$	زاویه‌ی قیچی اول	$rad$
[7] D. Deb, N. L. Brahmhatt, Review of yield	$\theta_2$	زاویه‌ی قیچی دوم	$rad$
	$\theta_{ee}$	زاویه‌ی مجری نهایی	$rad$
	$l_1$	طول عضو اول	$m$
	$l_2$	طول عضو دوم	$m$
	$l_{ee}$	طول مجری نهایی	$m$
	$q_d$	موقعیت سیستم مطلوب	$(m, rad)$
	$\dot{q}_d$	سرعت سیستم مطلوب	$\left(\frac{m}{sec}, \frac{rad}{sec}\right)$
	$\ddot{q}_d$	شتاب سیستم مطلوب	$\left(\frac{m}{sec^2}, \frac{rad}{sec^2}\right)$
	$M$	ماتریس جرمی	
	$V$	ماتریس گریز از مرکز و کوریولیس	
	$G$	ماتریس گرانش	
	$m_i$	جرم هر عضو	$kg$
	$I_{ci}$	ممان اینرسی هر عضو	

- and Automation (ICRA), Paris, France, (2020).
- [17] Realizzazioni Robot, Oct 2019. Realizzazioni Wash panel; serie: wp\_ SEMOV; Alcuni esempi di soluzioni di lavaggio con sistemi washpanel semoventi, <http://www.washpanel.com/realizzazioni.php>.
- [18] pv SPIN, Oct 2019. pv SPIN, <https://www.yumpu.com/en/document/view/10629569/pv-spin-schletter-gmbh>.
- [19] Sinfonia Robot, Oct 2019. Sinfonia Robot, <https://www.renewableenergyworld.com/2014/11/10/from-module-cleaning-robots-to-flying-drones-japans-growing-solar-o-m-market/>.
- [20] Hector Robot, Oct 2019. Hector Robot, <http://WWW/AEROESPACIAL/ProjectsD/hectorcleaning-robot-system-for-heliostats/en>.
- [21] Ecoppia E4, Aug 2019. Ecoppia: EMPOWERING SOLAR, <https://www.ecoppia.com>.
- [22] Solarbrush Robot, Oct 2019. Solarbrush. <https://www.aerialpower.com/solarbrush/>.
- [23] Miraikikai Robot, Aug 2019. Miraikikai, <https://WWW/en/mjcompany/miraikikai.html>.
- [24] NOMADD Robot, Oct 2019. NOMADD, <http://www.nomaddesertsolar.com/>.
- [25] John J. Craig, Introduction to Robotics Mechanics and Control. 3rd ed., (2018).
- [26] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar, Robot Modeling and Control. 1st ed.
- [27] M. Hafezipour, E. Saffari, P. Zarafshan, S. A. A. Moosavian, Manipulation control of multi-body free-floating space robot based on software combination, in 2013 First RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), (2013) 271-276.
- [28] S. R. Larimi, P. Zarafshan, S. A. A. Moosavian, Stabilized supervising control of a two wheel mobile manipulator, in 2013 First RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), (2013) 265-270.
- [29] A. K. Khalaji, S. A. A. Moosavian, Modified increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82 (2018) 3306-3313.
- [8] A. Saini, A. Nahar, A. Yadav, D. S. Shekhawat, M. A. Vijayvargiya, Solar Panel Cleaning System, 3(5) (2017).
- [9] A. K. Mondal, K. Bansal, A brief history and future aspects in automatic cleaning systems for solar photovoltaic panels, Advanced Robotics, 29(8) (2015) 515-524.
- [10] Serbot Swiss Innovations. GEKKO Solar Robot; [cited 2019 Aug]. Available from: <http://WWW/en/solar-panels-cleaning/gekko-solar-robot.> (accessed).
- [11] M. Anderson, Robotic device for cleaning photovoltaic panel arrays, in Mobile Robotics: Solutions and Challenges: World Scientific, (2010) 367-377.
- [12] Ecoppia. EMPOWERING SOLAR; [cited 2019 Aug]. Available from: <http://WWW/products-and-services/> (accessed).
- [13] M. A. Jaradat, A fully portable robot system for cleaning solar panels, in 2015 10th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA), (2015) 1-6.
- [14] D. C. Tranca, D. Rosner, A. V. Palacean, Autonomous flexible low power industrial IoT controller for solar panels cleaning systems, in 2017 21st International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS), (2017) 106-112.
- [15] H. Wang, W. Ren, C. C. Cheah, Y. Xie S. Lyu, Dynamic Modularity Approach to Adaptive Control of Robotic Systems With Closed Architecture, IEEE Transactions on Automatic Control, 65(6) (2020) 2760-2767.
- [16] O. Christidi-Loumpasefski, G. Rekleitis, E. Papadopoulos, Concurrent Parameter Identification and Control for Free-Floating Robotic Systems during On-Orbit Servicing, IEEE International Conference on Robotics

- Robotics, 24(4) (2010) 605-626.
- [31] M. Eslamy, S. A. A. Moosavian, Dynamics and Cooperative Object Manipulation Control of Suspended Mobile Manipulators, Journal of Intelligent & Robotic Systems, 60 (2010) 181–199.
- transpose Jacobian control of a tractor-trailer wheeled robot, Journal of Mechanical Science and Technology, 29 (2015) 3961–3969.
- [30] M. Karimi, S. A. A. Moosavian, Modified transpose effective jacobian law for control of underactuated manipulators, Advanced

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:  
*F. Hajiahmadi, P. Zarafshan, M. Deghani, S. A. A. Moosavian, R. Hasan-beygi, Dynamic modeling and control of cleaning robot for agro-photovoltaic, Amirkabir J. Mech. Eng., 53 (6) (2021) 3465-3478.*  
DOI: [10.22060/mej.2021.18404.6810](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18404.6810)

