

# مروری بر بهینه‌سازی عملکرد ماهواره‌های مکعبی سنجش از دور با استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی: کنترل وضعیت، انتقال داده و مدیریت حرارتی

مهدی فرهنگي<sup>۱</sup>، امیر آقابالائي<sup>۲\*</sup>، یحیی جمور<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی  
ma.farhangi@mail.sbu.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)  
remotesensing@ihu.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی  
y\_djamour@sbu.ac.ir

(دریافت: آبان ۱۴۰۳، تصویب: دی ۱۴۰۳)

## چکیده

ماهواره‌های مکعبی سنجش از دور به دلیل اندازه کوچک و هزینه پایین، به عنوان ابزارهای ارزشمندی در مأموریت‌های فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مقاله به بررسی چالش‌ها و نوآوری‌های کلیدی در سه حوزه اساسی این نوع ماهواره‌ها شامل سیستم‌های تعیین و کنترل وضعیت (ADCS)، انتقال داده به زمین، و مدیریت حرارتی می‌پردازد. در بخش سیستم‌های ADCS، به تحلیل چالش‌های محدودیت اندازه و وزن، دقت بالا و نیاز به پاسخگویی سریع پرداخته شده است. استفاده از هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای بهبود عملکرد این سیستم‌ها، شامل استفاده از شبکه‌های عصبی و فیلترهای کالمن توسعه یافته، در کنترل وضعیت ماهواره‌های مکعبی مورد بررسی قرار گرفته و تأثیرات مثبت آن‌ها بر افزایش دقت و کاهش خطاها تحلیل شده است. در بخش انتقال داده، مشکلات مربوط به پهنای باند، مدیریت حجم داده‌ها، و تأخیر در انتقال مورد بررسی قرار گرفته است. بهینه‌سازی فرآیند انتقال داده با استفاده از الگوریتم‌های فشرده‌سازی و تکنیک‌های هوش مصنوعی برای مدیریت و دسته‌بندی داده‌ها، به کاهش حجم داده‌های غیرضروری و افزایش کارایی ارتباطات پرداخته شده است. بخش مدیریت حرارتی به تحلیل چالش‌های کنترل دما در ماهواره‌های مکعبی و راهکارهای پیشنهادی مانند استفاده از مواد و پوشش‌های حرارتی و شبیه‌سازی دقیق رفتار حرارتی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداخته است. این مطالعه به بررسی روش‌های بهینه‌سازی و پیش‌بینی وضعیت حرارتی برای حفظ کارایی سیستم‌های حساس در شرایط فضایی پرداخته و نتایج آن نشان‌دهنده کاهش زمان پردازش و هزینه‌های محاسباتی است. این مقاله همچنین به بررسی پروژه‌های نوآورانه مانند Amazonia-1 و IPEX پرداخته و تأثیر فناوری‌های هوش مصنوعی بر بهبود عملکرد و کارایی ماهواره‌های مکعبی را تحلیل می‌کند. نتایج حاصل از این بررسی‌ها می‌تواند به بهبود فناوری‌های فضایی و ارتقاء مأموریت‌های سنجش از دور کمک کند.

**واژگان کلیدی:** ماهواره مکعبی، سنجش از دور، هوش مصنوعی، بهینه‌سازی عملکرد، کنترل وضعیت ماهواره، مدیریت حرارتی

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

ماهواره‌های مکعبی، به عنوان نمونه‌های فشرده و کم‌هزینه از فناوری‌های فضایی، به طور فزاینده‌ای در زمینه‌های مختلف سنجش از دور مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ماهواره‌ها، که از واحدهای ۱۰ سانتی‌متر مکعبی (۱U) ساخته می‌شوند، به دلیل وزن سبک و هزینه پایین، به گزینه‌ای جذاب برای مأموریت‌های فضایی تبدیل شده‌اند [۱]. با این حال، برای دستیابی به عملکرد مطلوب در مأموریت‌های سنجش از دور، این ماهواره‌ها با چالش‌های متعددی مواجه هستند. یکی از این چالش‌ها، بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های مختلف ماهواره‌های مکعبی سنجش از دوری از جمله سیستم‌های تعیین و کنترل وضعیت<sup>۱</sup>، مدیریت حرارتی و انتقال داده‌ها است [۲]. این مسائل به ویژه در ماهواره‌های مکعبی با توجه به محدودیت‌های فضایی و منابع انرژی، پیچیده‌تر می‌شود.

تکنیک‌های هوش مصنوعی، به عنوان یک ابزار پیشرفته، قادر به ارائه راه‌حل‌های مؤثر برای بهینه‌سازی این سیستم‌ها هستند. از جمله کاربردهای هوش مصنوعی می‌توان به بهبود دقت و کارایی سیستم‌های تعیین و کنترل وضعیت، افزایش کارایی انتقال داده‌ها و بهینه‌سازی مدیریت حرارتی اشاره کرد [۳]. این تکنیک‌ها با تحلیل داده‌های دریافتی، پیش‌بینی شرایط آینده و ارائه راهکارهای خودکار می‌توانند به بهبود عملکرد کلی ماهواره‌های مکعبی کمک کنند [۴].

اهمیت بهینه‌سازی عملکرد ماهواره‌های مکعبی در مأموریت‌های سنجش از دور از دو جنبه اصلی قابل توجه است. نخست، با توجه به افزایش روزافزون کاربردهای سنجش از دور در زمینه‌های مختلف علمی، نظامی و تجاری، بهبود عملکرد این ماهواره‌ها می‌تواند به ارتقاء کیفیت داده‌های جمع‌آوری شده و بهبود دقت تحلیل‌ها منجر شود. به عنوان مثال، در پایش منابع طبیعی، تغییرات اقلیمی و نقشه‌برداری، دقت و صحت داده‌های به‌دست‌آمده از اهمیت بالایی برخوردار است و بهینه‌سازی عملکرد ماهواره‌ها می‌تواند به افزایش قابلیت اعتماد این داده‌ها کمک کند [۵].

دوم، از نظر فنی و اقتصادی، بهینه‌سازی عملکرد ماهواره‌های مکعبی می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری منجر شود [۶]. ماهواره‌های مکعبی به دلیل هزینه‌های پایین تولید و راه‌اندازی، به گزینه‌ای مناسب برای

آزمایش و پیاده‌سازی فناوری‌های نوین تبدیل شده‌اند. با استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی برای بهبود عملکرد این ماهواره‌ها، می‌توان به کاهش نیاز به راهبری دستی، بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش خطاهای سیستمی دست یافت. این بهینه‌سازی‌ها نه تنها به افزایش طول عمر عملیاتی ماهواره‌ها کمک می‌کند بلکه می‌تواند به کاهش هزینه‌های مرتبط با مأموریت‌های فضایی نیز منجر شود.

در مجموع، به کارگیری هوش مصنوعی در بهینه‌سازی عملکرد ماهواره‌های مکعبی سنجش از دور به عنوان یک راه‌حل نوآورانه و مؤثر، می‌تواند به بهبود کیفیت و کارایی مأموریت‌های فضایی و همچنین کاهش هزینه‌ها و پیچیدگی‌های فنی مرتبط با آنها منجر شود [۷]. این موضوع به ویژه در دوران حاضر که فناوری‌های فضایی به سرعت در حال پیشرفت و گسترش هستند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در زمینه هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، کاربرد این تکنیک‌ها در بهینه‌سازی عملکرد ماهواره‌های مکعبی به یک حوزه پژوهشی فعال تبدیل شده است. پروژه‌هایی مانند توسعه ماهواره مکعبی با ابعاد ۱U توسط دانشگاه Cal Poly کالیفرنیا و تحقیقات انجام‌شده توسط Maximilian Preisinger و J. D. Reis Junio به بررسی کاربردهای شبکه‌های عصبی و شبیه‌سازی رفتار حرارتی پرداخته‌اند [۸][۹]. این مطالعات و تحقیقات پیشرفت‌های قابل توجهی در بهینه‌سازی عملکرد ماهواره‌های مکعبی سنجش از دور به‌ویژه با استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی ارائه داده‌اند. با این حال، هنوز فضای زیادی برای پیشرفت و تحقیق در این زمینه وجود دارد [۱۰]. این مقاله به بررسی و تحلیل جامع تأثیر تکنیک‌های هوش مصنوعی بر بهینه‌سازی عملکرد این ماهواره‌ها می‌پردازد و به تجزیه و تحلیل روندها، روش‌ها و نتایج پژوهش‌های موجود می‌پردازد. هدف از این مطالعه، استخراج بینش‌های کلیدی از مطالعات انجام‌شده و شفاف‌سازی جهت‌های تحقیقاتی آینده است که می‌تواند به پیشرفت‌های بیشتر در این حوزه منجر شود.

## ۲- سیستم تعیین و کنترل وضعیت ماهواره (ADCS)

سیستم تعیین و کنترل وضعیت در ماهواره‌های مکعبی سنجش از دور، نقش مهمی در جهت‌گیری صحیح ماهواره

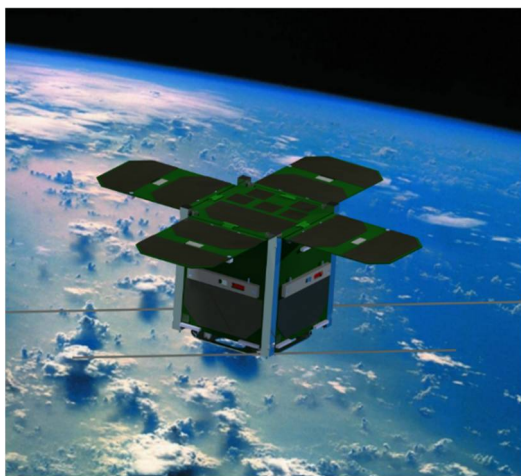
<sup>۱</sup> Attitude and Determination Control System (ADCS)

برای جمع‌آوری داده‌های دقیق و مؤثر دارند. این سیستم‌ها با استفاده از سنسورها و محرک‌های مختلف، وضعیت ماهواره را تعیین کرده و آن را در جهت مطلوب قرار می‌دهند [۲]. چالش‌های اصلی در این زمینه شامل محدودیت‌های اندازه و وزن در ماهواره‌های مکعبی است که فضای کافی برای استفاده از سنسورهای پیشرفته و محرک‌های قوی را محدود می‌کند. علاوه بر این، نیاز به دقت بالا در تعیین وضعیت، به ویژه در مأموریت‌های سنجش از دور با دقت بالا، و پاسخگویی سریع به تغییرات محیطی (مانند تغییرات ناگهانی در فشار تابش خورشیدی یا نیروی جاذبه) از دیگر چالش‌ها هستند [۱۱]. کنترل دقیق وضعیت ماهواره در مدار برای جمع‌آوری داده‌های سنجش از دور از اهمیت حیاتی برخوردار است، زیرا حتی انحرافات جزئی می‌تواند منجر به کاهش دقت داده‌های جمع‌آوری شده شود.

هوش مصنوعی می‌تواند به طور قابل توجهی به بهبود عملکرد سیستم‌های کنترل وضعیت در ماهواره‌های مکعبی سنجش از دور کمک کند. با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین، هوش مصنوعی می‌تواند الگوهای پیچیده در داده‌های سنسورهای وضعیت را شناسایی کرده و پیش‌بینی‌هایی با دقت بالا ارائه دهد. این پیش‌بینی‌ها می‌تواند به تنظیم خودکار وضعیت ماهواره بر اساس تغییرات محیطی کمک کند. همچنین، هوش مصنوعی می‌تواند با کاهش نیاز به دخالت‌های انسانی و اتوماسیون بیشتر، مصرف انرژی و خطاهای ناشی از دخالت انسانی را کاهش دهد. در یک مطالعه بر روی کاربرد شبکه‌های عصبی در کنترل وضعیت ماهواره، به افزایش دقت نشانه‌گیری<sup>۱</sup> در ماهواره مکعبی سنجش از دوری MOVE-II به عنوان هدف اصلی پرداخته شده است. نشانه‌گیری یا (اشاره) به عملیات دقیق هدایت سیستم اپتیکی ماهواره مکعبی به سمت هدف مشخص اشاره دارد. این فرآیند برای تهیه داده‌های سنجش از دوری دقیق و مطمئن از زمین یا اجرام فضایی ضروری است [۸].

کنترل‌کننده قبلی به تغییرات میل مداری حساس بود و دقت اشاره مورد نظر (۵.۸ درجه به طور متوسط) را برآورده نمی‌کرد. به همین منظور به حل این مسئله با کمک هوش مصنوعی، بویژه شبکه عصبی پرداخته شد. ماهواره‌ی مکعبی MOVE-II که توسط دانشجویان دانشگاه فنی مونیخ (TUM) ساخته شده است، برای کنترل وضعیت خود از یک

کنترل‌کننده‌ی بازخورد حالت چندبُعدی استفاده می‌کند. این کنترل‌کننده تنها از خروجی سنسور خورشیدی، ژيروسکوپ، و مغناطیس‌سنج بهره می‌برد. سیستم کنترل وضعیت تنها به القاگرهای مغناطیسی برای عملگرها متکی است. بنابراین، نمی‌توان یک بردار گشتاور موازی با بردار میدان مغناطیسی زمین اعمال کرد؛ که منجر به کاهش قابلیت کنترل می‌شود. با این حال، کنترل‌کننده‌ی فعلی نتایج رضایت‌بخشی در شبیه‌سازی‌های Hardware-in-the-Loop (HiL) نشان داده است. HiL، یک روش شبیه‌سازی است که برای تست و اعتبارسنجی سیستم‌های کنترلی در مراحل توسعه و پیش از پیاده‌سازی واقعی استفاده می‌شود [۸].



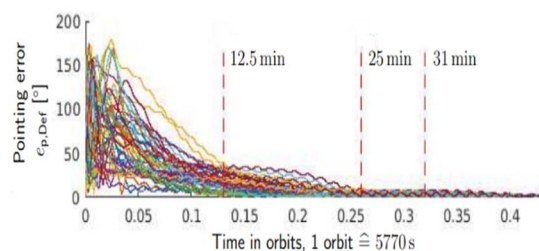
شکل ۱- طرح گرافیکی از ماهواره مکعبی MOVE-II

توسعه‌های اخیر تیم MOVE-II منجر به ایجاد یک فیلتر کالمن توسعه‌یافته (EKF)<sup>۲</sup> برای تخمین وضعیت و یک روش برای جبران گشتاور اختلال ناشی از دوقطبی پارازیتی ماهواره شده است. این روش‌ها قبل از اینکه بتوان آن‌ها را بر روی مدل پروازی ماهواره اجرا کرد باید در یک مجموعه‌ی یکپارچه مورد ارزیابی و آزمایش قرار گیرند [۸]. کنترل‌کننده‌های جایگزین ممکن است برای کنترل وضعیت با ویژگی‌های غیرخطی و کاهش قابلیت کنترل بسیار مناسب‌تر باشند. انواع مختلفی از رویکردهای کنترل باید برای اجرای آن‌ها بر روی MOVE-II مورد ارزیابی قرار گیرند [۸]. نیازهای بالای قابلیت اطمینان یک مأموریت ماهواره‌ای مستلزم آزمایش‌های دقیق در محیط‌های Software-in-the-Loop (SiL) و Hardware-in-the-Loop (HiL) است. اگر این آزمایش‌ها موفقیت‌آمیز باشند، کنترل‌کننده‌ی

<sup>۲</sup> Extended Kalman Filter (EKF)

<sup>۱</sup> Pointing

داد. نتایج بهره گیری از کنترل کننده شبکه عصبی LQR در شکل (۴) آمده است [۸].



شکل ۴- مقایسه پیامدهای رفتار اسمی با کنترل کننده کنترل کننده LQR توسعه یافته

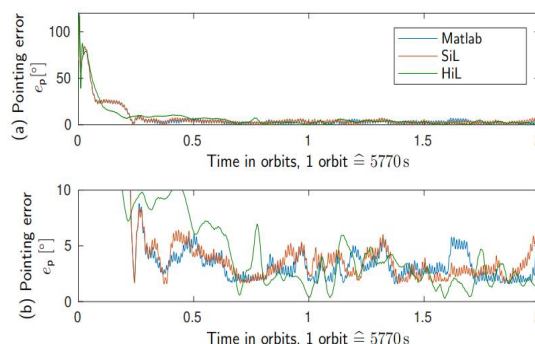
بنابراین، فضای حالت می‌تواند به چندین بخش تقسیم شود که برای هر یک یک کنترل کننده LQR خطی شده توسعه می‌یابد. این کنترل کننده‌های خطی شده داده‌هایی را برای آموزش شبکه عصبی تولید می‌کنند که سپس قادر به درونیابی بین این قوانین کنترل خطی شده و تقلید از کنترل کننده خطی شده مناسب در هر بخش از فضای حالت می‌باشد. کنترل کننده خطی با بهره و توسعه‌های جدید به دقت نشانه‌گیری ۳ درجه با واریانس ۰.۳۸ درجه مربع رسید. این کنترل کننده در ۸۰ درصد موارد همگرا می‌شود. نامزد پیاده‌سازی غیرخطی در تمام شبیه‌سازی‌های نرم افزار مونت کارلو همگرایی را نشان می‌دهد و به دقت نهایی ۳.۳ درجه با واریانس ۲.۳ درجه مربع دست می‌یابد. شبیه‌سازی مونت کارلو یک تکنیک ریاضی است که برای مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌ها و فرآیندهای پیچیده که دارای عناصر تصادفی و عدم قطعیت هستند، استفاده می‌شود [۸].

استفاده از هوش مصنوعی در سیستم‌های تعیین و کنترل وضعیت می‌تواند منجر به بهبود عملکرد کلی ماهواره‌ها، کاهش ریسک‌ها و افزایش کارایی مأموریت‌های فضایی شود [۱۲]. این دستاورد نشان می‌دهند که هوش مصنوعی می‌تواند نقشی حیاتی در توسعه نسل بعدی ماهواره‌های مکعبی و دیگر سیستم‌های فضایی ایفا کند.

### ۳- انتقال داده به زمین

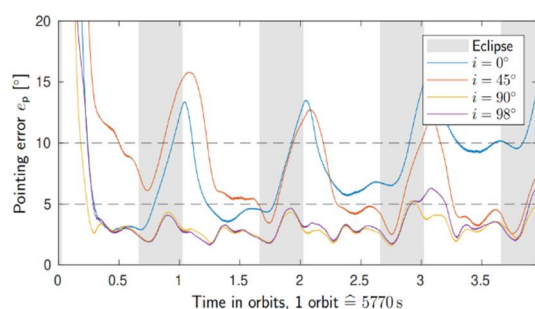
در ماهواره‌های مکعبی سنجش از دور، انتقال داده‌های جمع‌آوری شده به ایستگاه‌های زمینی یکی از چالش‌های کلیدی است. داده‌هایی که توسط سنسورهای مختلف (مانند سنسورهای نوری، حرارتی، یا راداری) جمع‌آوری می‌شوند، باید به صورت کارآمد و با حداقل تأخیر به زمین ارسال شوند [۱۳]. چالش‌های موجود در این زمینه شامل

پیاده‌سازی شده، می‌تواند بر روی ماهواره مکعبی بارگذاری شده و در پرواز ارزیابی شود.



شکل ۲- مقایسه پیاده‌سازی کنترل کننده Delta-H در Matlab، تنظیمات HiL و SiL

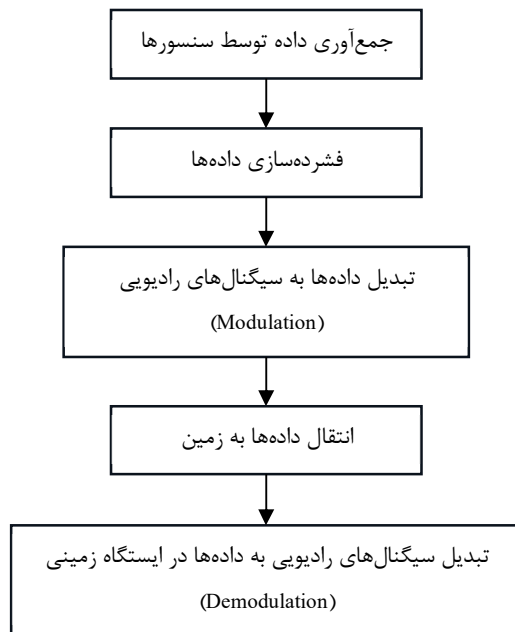
ماهواره مکعبی MOVE-II، هنوز مشخص نیست که به کدام مدار پرتاب خواهد شد؛ یعنی ماهواره می‌تواند در یک مدار کاملاً غیرمنتظره و نامناسب قرار گیرد. بنابراین، بایستی اطمینان حاصل شود که ماهواره در مدارهای مختلف چگونه عمل می‌کند و آیا نسبت به تغییرات پارامتری مقاوم است یا خیر. خطای نشانه‌گیری چهار شبیه‌سازی در طول بیش از ۳.۵ مدار با انحراف‌های مختلف در شکل (۳) آمده است [۸].



شکل ۳- خطای نشانه‌گیری به دست آمده با کنترل کننده پیش‌فرض برای مدارهایی با انحراف‌های مختلف. نمودارها با یک فیلتر میانگین متحرک هموار شده‌اند.

علاوه بر این، شبیه‌سازی Hardware-in-the-Loop نشان می‌دهد که این کنترل کننده در حضور تأخیرهای بزرگ و با دقت عددی پایین پایدار است. همچنین، نشان داده شده که با فریمور موجود MOVE-II سازگار است. پارامترهای کنترلی که به صورت پویا قابل به‌روزرسانی هستند، این پیاده‌سازی را برای اپراتورهای ماهواره جذاب می‌کنند [۸].

Maximilian، با الهام از کنترل کننده شبکه عصبی که توسط Shanmugam و Sivaprakash پیشنهاد شده است، یک مفهوم کنترل دیگری با نام LQR را نیز مورد بررسی قرار



شکل ۵- مراحل مخابره داده از ماهواره مکعبی به زمین

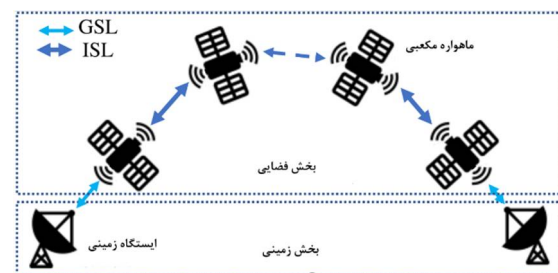
استفاده از هوش مصنوعی در انتقال داده از ماهواره‌های مکعبی سنجش از دور به زمین، نقش مهمی در بهبود عملکرد و افزایش کارایی این فرآیند ایفا می‌کند. هوش مصنوعی می‌تواند با بهینه‌سازی مدیریت داده‌ها، دسته‌بندی خودکار اطلاعات دریافتی از سنسورها و ابزارهای مختلف را انجام داده و بر اساس اهمیت و اولویت، تعیین کند که کدام داده‌ها باید به زمین ارسال شوند [۱۷]. این قابلیت می‌تواند به کاهش حجم داده‌های غیرضروری و افزایش کارایی انتقال داده‌ها کمک کند.

همچنین، هوش مصنوعی در بهبود فشرده‌سازی داده‌ها نقش مهمی دارد. الگوریتم‌های یادگیری عمیق می‌توانند برای فشرده‌سازی داده‌های پیچیده به کار گرفته شوند که این امر می‌تواند پهنای باند مورد نیاز برای انتقال داده‌ها را کاهش داده و در نتیجه، هزینه‌ها و زمان انتقال را بهبود بخشد. علاوه بر این، تکنیک‌های هوش مصنوعی قادر به شناسایی و تصحیح خطاهای موجود در داده‌های انتقالی هستند که این امر به افزایش دقت و قابلیت اطمینان داده‌های دریافتی در زمین منجر می‌شود.

هوش مصنوعی همچنین می‌تواند به مدیریت بهتر انرژی در ماهواره‌های مکعبی کمک کند. با توجه به محدودیت‌های انرژی در این ماهواره‌ها، بهینه‌سازی مصرف انرژی در زمان انتقال داده‌ها می‌تواند به افزایش عمر عملیاتی آن‌ها بیانجامد. از سوی دیگر، الگوریتم‌های هوش مصنوعی با پیش‌بینی

محدودیت‌های پهنای باند، مدیریت حجم بالای داده‌ها، و نیاز به اطمینان از صحت و کامل بودن داده‌های انتقال یافته است. به دلیل اندازه کوچک ماهواره‌های مکعبی و منابع محدود انرژی، بهینه‌سازی فرآیند انتقال داده به زمین اهمیت ویژه‌ای دارد. این محدودیت‌ها می‌تواند منجر به افت کیفیت انتقال داده، به‌ویژه در شرایطی که ماهواره در حال دور شدن از ایستگاه زمینی است، شود. بهینه‌سازی این فرآیندها برای کاهش تداخلات و افزایش سرعت انتقال داده، از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۴].

انتقال داده‌ها به زمین یکی از راهکارهای مهم برای بهینه‌سازی ذخیره‌سازی داده در سیستم‌های اپتیک ماهواره‌های مکعبی است که به دو روش ارتباطات فضایی زمینی<sup>۱</sup> و ارتباطات بین ماهواره‌ای<sup>۲</sup> صورت می‌پذیرد. شکل (۴)، انواع ارتباطات ماهواره‌ای جهت انتقال داده به زمین را نشان می‌دهد [۱۴].



شکل ۴- انواع ارتباط در ماهواره: ارتباطات فضایی و زمینی (GSLs)، ارتباطات بین ماهواره‌ای (ISLs)

از مزایای انتقال داده‌ها به زمین می‌توان به کاهش نیاز به حافظه، بهینه‌سازی ذخیره‌سازی و پردازش سریع‌تر داده‌ها اشاره کرد. کاهش نیاز به حافظه باعث می‌شود وزن و مصرف برق ماهواره کمتر شود و داده‌ها به‌طور بهینه در زمین ذخیره شوند که دسترسی به آن‌ها نیز آسان‌تر می‌شود. همچنین، پردازش سریع‌تر داده‌ها در زمین منجر به دستیابی سریع‌تر به نتایج تحلیل داده‌ها می‌شود. اما این روش‌ها نیز معایبی دارند؛ از جمله آن، نیاز به پهنای باند بالا و تأخیر در انتقال داده است که می‌تواند هزینه‌بر باشد و برای برخی کاربردها مناسب نباشد [۱۵].

مراحل انتقال داده‌ها از ماهواره‌های مکعبی به زمین در شکل (۵) آمده است که در این فرایند، داده‌ها به‌طور مستقیم (GSLs) یا از طریق رله (ISLs) به زمین ارسال می‌شوند [۱۶].

۲ inter-satellite links (ISLs)

۱ Ground-to-satellite links (GSLs)

شرایط جوی و فضایی، می‌توانند بهترین زمان و شرایط برای انتقال داده‌ها را تعیین کرده و به کاهش تداخلات و افزایش کارایی ارتباطات کمک کنند.

با به‌کارگیری هوش مصنوعی، ماهواره‌های مکعبی می‌توانند تا حد زیادی به صورت خودمختار عمل کنند و نیاز به دخالت انسانی را کاهش دهند. این خودمختاری به ویژه در مأموریت‌های دوردست که ارتباط مستقیم با ماهواره‌ها دشوار است، اهمیت بالایی دارد. پروژه‌هایی مانند IPEX صراحتاً نشان داده‌اند که استفاده از تکنیک‌های یادگیری عمیق در ماژول بار هوشمند (IPM)، می‌تواند منجر به بهبود فرآیند انتقال داده‌ها و متعاقباً کاهش زمان تأخیر و افزایش نرخ انتقال داده‌های سنجش از دوری شود [۱۷].



شکل ۵- ماهواره مکعبی IPEX

هدف این ماژول، پشتیبانی از مأموریت HypIRI در برنامه دهه زمین‌شناسی ناسا با کاهش بیست برابری حجم داده‌ها و تولید داده فوری با تأخیر کم است. HypIRI شامل طیف‌سنج تصویربرداری فراطیفی VSWIR و تصویربرداری مادون قرمز حرارتی است که روزانه حدود ۵ ترابایت داده تولید می‌کنند. IPEX زیرساخت‌های لازم برای تولید و ارسال مستقیم این داده‌ها را با استفاده از یادگیری ماشینی، بینایی کامپیوتری و برنامه‌ریز AI Continuous Activity Scheduler Planner Execution and Re-planner برای مدیریت منابع ماهواره مانند ذخیره‌سازی فایل، CPU و پهنای باند ارسال و حتی استفاده بهینه از منابع انرژی مانند باتری‌ها و پنل‌های خورشیدی را فراهم می‌کند [۱۷].

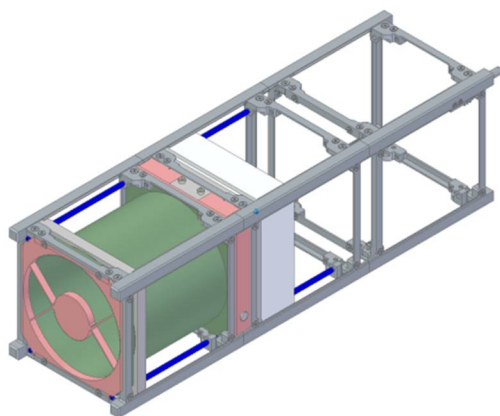
به طور کلی، بهره‌گیری از هوش مصنوعی در انتقال داده از ماهواره‌های مکعبی به زمین نه تنها کارایی و دقت این

فرآیند را بهبود می‌بخشد، بلکه می‌تواند به توسعه فناوری‌های جدید و کاهش هزینه‌ها نیز کمک کند.

#### ۴- مدیریت حرارتی

مدیریت حرارتی در ماهواره‌های مکعبی سنجش از دور به دلیل اندازه کوچک، با چالش‌های حرارتی قابل توجهی مواجه هستند. فضای محدود این ماهواره‌ها امکان استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده فعال مانند رادیاتورها را محدود می‌کند، بنابراین کنترل دما و حفظ شرایط حرارتی مطلوب برای عملکرد صحیح تجهیزات داخلی ماهواره به یکی از چالش‌های اساسی تبدیل شده است. این مسئله به ویژه در سیستم‌های اپتیکی این ماهواره‌ها به علت عدم تخلیه کامل حرارت، نمود بیشتری پیدا می‌کند. عدم تخلیه مناسب حرارت می‌تواند منجر به گرم شدن بیش از حد سیستم‌های اپتیکی و کاهش کارایی آنها شود.

بنابراین چالش‌های مدیریت حرارتی در ماهواره‌های مکعبی سنجش از دوری، شامل کنترل نوسانات دما در طول دوره‌های مداری (مانند عبور از سایه زمین به نور خورشید)، جلوگیری از داغ شدن بیش از حد تجهیزات حساس، و اطمینان از انتقال حرارت کارآمد در داخل ماهواره است که نیاز به راه‌حل‌های خلاقانه و مبتنی بر علم برای حل این مشکلات، افزایش می‌یابد [۱۸].



شکل ۶- ساختار دوربین اپتیکی CCAM در ماهواره ۳U [۶]

برای مقابله با این چالش‌ها، استفاده از مواد و پوشش‌های مناسب برای سیستم اپتیکی و همچنین شبیه‌سازی دقیق اتلاف حرارتی در مراحل اولیه طراحی مفهومی بسیار حیاتی است [۱۱]. به عنوان مثال، در ماهواره مکعبی ASTERIA، از سیستم اپتیکی CCAM که شامل یک دستگاه کنترل



حرارتی غیرفعال است، استفاده شده است. این سیستم از چسب حرارتی و تسمه حرارتی مسی برای کنترل دمای حسگر CMOS استفاده می‌کند. این راهکار به دفع شار حرارتی ناشی از حسگر کمک می‌کند و دمای حسگر را در محدوده مطلوب زیر ۲۵ درجه سانتیگراد حفظ می‌کند، که برای عملکرد بهینه آن ضروری است.

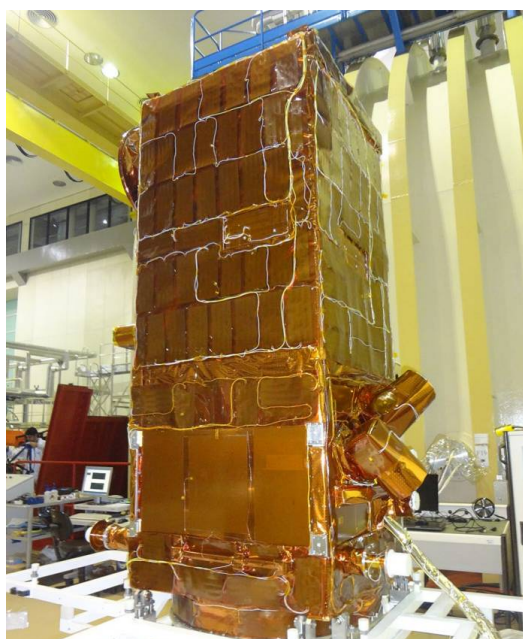
مدیریت حرارتی در ماهواره‌های مکعبی یکی از جنبه‌های حیاتی است که به کمک هوش مصنوعی می‌تواند بهبود یابد. این مدیریت به منظور حفظ دمای عملیاتی بخش‌های مختلف سیستم، از جمله سیستم اپتیک، باتری، سنسورها و دیگر اجزا، ضروری است [۹]. با توجه به محدودیت‌های فضایی و نیازمندی‌های مختلف ماهواره‌های مکعبی، هوش مصنوعی می‌تواند به عنوان یک ابزار کلیدی در این زمینه عمل کند. هوش مصنوعی در مدیریت حرارتی ماهواره‌های مکعبی می‌تواند به دو صورت اصلی مورد استفاده قرار گیرد. الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی می‌توانند بر اساس داده‌های زنده از سنسورها، تغییرات در تابش خورشیدی و سایر شرایط محیطی را پیش‌بینی کرده و سیستم‌های خنک‌کننده یا تابش گرما را به طور خودکار تنظیم کنند. این کار بهینه‌سازی مصرف انرژی و حفظ دمای عملیاتی مناسب ماهواره را ممکن می‌سازد.

همچنین هوش مصنوعی می‌تواند در تشخیص و مدیریت ناهنجاری‌های حرارتی نقش داشته باشد. این فناوری با تحلیل داده‌های حسگرها و سیستم‌های نظارتی، ناهنجاری‌های دمایی را شناسایی کرده و به صورت خودکار اقدامات اصلاحی مانند تنظیم مجدد سیستم‌های حرارتی یا فعال‌سازی سیستم‌های خنک‌کننده را اجرا می‌کند [۱۹]. این رویکرد باعث افزایش اطمینان‌پذیری و کارایی ماهواره در برابر نوسانات دما و شرایط غیرمنتظره فضایی می‌شود.

در پروژه Amazonia-1 از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)<sup>۱</sup> برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی ماهواره استفاده شد [۹].

جهت انجام این مطالعه ابتدا لازم است داده‌هایی برای آموزش شبکه‌های عصبی در دسترس باشد. این داده‌ها می‌توانند از آزمایشات یا از شبیه‌سازی‌های عددی به‌دست آیند، به شرطی که مدل حرارتی عددی ماهواره با استفاده از داده‌های تجربی اعتبارسنجی شده باشد. در واقع، یک مدل

حرارتی عددی دقیق و اعتبارسنجی‌شده از ماهواره مناسب‌تر است، زیرا می‌تواند به تعداد دلخواه یا لازم سناریوهای آموزشی برای ANN تولید کند، که اگر داده‌های تجربی مورد استفاده قرار گیرند، این کار بسیار پرهزینه و حتی غیرعملی خواهد بود. به این منظور در این مطالعه از برای بدست آوردن داده‌های آموزشی، از سیستم‌های تفاضل عددی پیشرفته<sup>۲</sup> استفاده شده است [۹].



شکل ۷- مدل فیزیکی تعادل حرارتی ماهواره مکعبی Amazonia-1

در مرحله بعد، معماری ANN، همراه با پارامترهای ورودی، خروجی و داخلی تعریف می‌شود. داده‌های ورودی شامل بارهای حرارتی داخلی و خارجی که بر روی ماهواره عمل می‌کنند، است، در حالی که داده‌های خروجی دمای نقاط مورد نظر، مانند تجهیزات، در سطح ماهواره می‌باشد. توجه داشته باشید که هم بارهای حرارتی و هم دماها توابع زمان هستند، زیرا در مدار ماهواره تحت شرایط حرارتی متغیر قرار دارد که منجر به توزیع دما به‌صورت متغیر با زمان می‌شود.

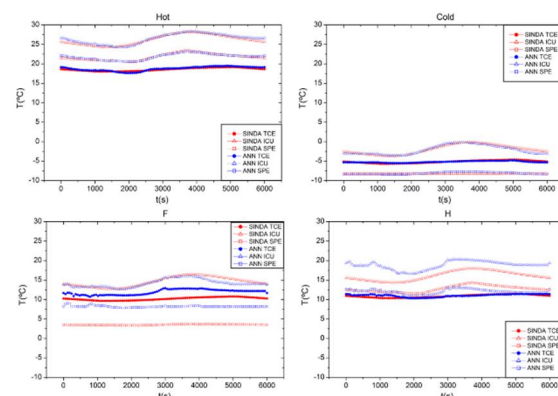
مرحله بعدی آموزش ANN است، که در آن وزن‌های شبکه در یک فرآیند تکراری به‌روزرسانی می‌شود تا خطا در خروجی نسبت به مقادیر مورد انتظار کاهش یابد. پس از آن نتایج تحلیل می‌شود و قابلیت تعمیم آن با مقایسه با داده‌هایی که در آموزش ارائه نشده‌اند، بررسی می‌شود. اگر ANN قادر به پیش‌بینی صحیح نتایج مورد انتظار نباشد،

<sup>۲</sup> Systems improved numerical differencing (SINDA)

<sup>۱</sup> Artificial Neural Networks (ANN)

معماری یا پارامترهای داخلی ANN دوباره تعریف می‌شود تا زمانی که تنظیمات مناسب برای ANN یافت شود.

پس از آموزش شبکه بر روی دو حالت دمای گرم (Hot) و دمای سرد (Cold)، بدلیل محدودیت‌هایی موجود در این مطالعه، از مجموعه سناریوهای (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J) در نظر گرفته شده در این مطالعه، تنها دو سناریو (H, F) مورد ارزیابی قرار گرفته است. رفتار حرارتی سه بخش از ماهواره مکعبی (واحد کنترل اینرسی سنسور<sup>۱</sup>، کنترل محرک الکترونیکی<sup>۲</sup> و پردازشگر سیگنال الکترونیکی<sup>۳</sup>) با استفاده از نتایج بدست آمده از سیستم تفاضل عددی پیشرفته و پیش‌بینی مدل شبکه عصبی در شکل (۸) آمده است. [۹]



شکل ۸- مقایسه منحنی‌های دما تولیدشده توسط SINDA و ANN آموزش‌دیده

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که زمان پردازش مورد نیاز برای تولید رفتار حرارتی ماهواره مکعبی Amazonia-1 با مدل ANN حدود ۵ مرتبه از زمان مورد نیاز برای بدست آوردن نتایج از طریق سیستم‌های تفاضل عددی پیشرفته، کوتاه‌تر است [۹].

همچنین باید اشاره کرد که هزینه محاسباتی برای به‌دست آوردن مدل ANN آموزش‌دیده، ممکن است بالا باشد، به عنوان مثال در این مطالعه، حدود ۱۰۰ ساعت برای آموزش مدل صرف شده است. با این حال، این تلاش ارزشمند است زیرا تنها یک بار انجام می‌شود و پس از آن مدل آموزش‌دیده می‌تواند برای شبیه‌سازی بسیار سریع رفتار حرارتی ماهواره استفاده شود [۹].

## ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

این مقاله به بررسی عمیق سه جنبه کلیدی فناوری‌های ماهواره‌های مکعبی سنجش از دور و نقش حیاتی هوش مصنوعی در بهبود عملکرد این سیستم‌ها پرداخته است: سیستم‌های تعیین و کنترل وضعیت (ADCS)، انتقال داده و مدیریت حرارتی. نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام‌شده نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه هوش مصنوعی بر بهینه‌سازی و ارتقاء کارایی این فناوری‌ها است و نقش کلیدی آن در توسعه و پیشرفت مأموریت‌های فضایی را برجسته می‌کند.

سیستم‌های تعیین و کنترل وضعیت در ماهواره‌های مکعبی نقش حیاتی در حفظ دقت و صحت جمع‌آوری داده‌ها دارند. هوش مصنوعی، به ویژه با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی، توانسته است به شکل مؤثری عملکرد این سیستم‌ها را بهبود بخشد. این الگوریتم‌ها قادرند الگوهای پیچیده در داده‌های سنسورهای وضعیت را شناسایی کرده و با پیش‌بینی دقیق وضعیت ماهواره بر اساس تغییرات محیطی، امکان تنظیم خودکار وضعیت را فراهم کنند. این بهینه‌سازی نه تنها دقت کنترل وضعیت را افزایش داده، بلکه با کاهش نیاز به دخالت انسانی، کارایی سیستم‌های ADCS را نیز ارتقاء داده است. با این حال، هوش مصنوعی می‌تواند فراتر از کنترل وضعیت، در بهینه‌سازی سایر زیرسیستم‌های ماهواره مانند مصرف انرژی و مدیریت خطاها نیز مؤثر باشد.

انتقال داده‌ها از ماهواره‌های مکعبی به ایستگاه‌های زمینی به دلیل محدودیت‌های پهنای باند و حجم بالای داده‌ها یکی از چالش‌های اصلی است. در این مقاله، بهبودهای قابل توجهی که هوش مصنوعی می‌تواند در این زمینه ایجاد کند، مورد بررسی قرار گرفته است. الگوریتم‌های فشرده‌سازی پیشرفته و تکنیک‌های بهینه‌سازی مدیریت داده‌ها، توانسته‌اند حجم داده‌های غیرضروری را کاهش دهند و سرعت انتقال داده‌ها را بهبود بخشند. علاوه بر این، پیش‌بینی شرایط جوی و فضایی به کمک هوش مصنوعی، بهترین زمان و شرایط برای انتقال داده‌ها را تعیین کرده و به کاهش تداخلات و افزایش کارایی ارتباطات منجر شده است. این تکنیک‌ها همچنین به

۳ Signal processing electronics (SPE)

۱ inertial control unit (ICU)

۲ Thruster control electronics (TCE)



بهینه‌سازی مصرف انرژی در فرآیند انتقال داده‌ها و افزایش عمر عملیاتی ماهواره‌ها کمک کرده‌اند.

مدیریت حرارتی در ماهواره‌های مکعبی به دلیل فضای محدود و نیاز به حفظ شرایط دمایی مناسب برای عملکرد بهینه تجهیزات، یکی از چالش‌های بزرگ است. استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی ماهواره به طور قابل توجهی زمان پردازش را کاهش داده و امکان شبیه‌سازی سریع و دقیق‌تر را فراهم کرده است. این نتایج نشان‌دهنده توانایی ANN در پیش‌بینی دقیق رفتار حرارتی و شناسایی ناهنجاری‌های دمایی است که می‌تواند به بهبود مدیریت حرارتی و جلوگیری از مشکلات ناشی از تغییرات دما کمک کند. استفاده از ANN به طور کلی به افزایش کارایی و اعتمادپذیری ماهواره‌ها در شرایط مختلف فضایی و کاهش هزینه‌های محاسباتی کمک کرده است.

تحقیقات حاضر نشان می‌دهد که هوش مصنوعی به عنوان یک ابزار کلیدی در بهبود عملکرد ماهواره‌های مکعبی در زمینه‌های مختلف فناوری، نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند. با پیشرفت‌های بیشتر در الگوریتم‌های هوش مصنوعی و توسعه روش‌های نوین، می‌توان به تحقق قابلیت‌های جدید و بهبود عملکرد مأموریت‌های فضایی دست یافت.

براساس تحلیل‌های ارائه‌شده و نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق در زمینه‌های سیستم‌های تعیین و کنترل وضعیت، انتقال داده و مدیریت حرارتی ماهواره‌های مکعبی، پیشنهادات زیر می‌تواند به بهبود عملکرد و کارایی این فناوری‌ها و ارتقاء مأموریت‌های فضایی کمک کند:

## ۵-۱- تقویت الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای بهبود ADCS

- توسعه مدل‌های یادگیری عمیق: استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای بهبود پیش‌بینی وضعیت ماهواره و تنظیم خودکار سیستم‌های ADCS می‌تواند به دقت و سرعت بیشتری در کنترل وضعیت منجر شود. پژوهش‌های آینده باید به بررسی و آزمایش مدل‌های پیچیده‌تر و بهینه‌تر توجه کنند.

- ادغام داده‌های چندمنظوره: ادغام داده‌های دریافتی از انواع مختلف سنسورها و منابع اطلاعاتی به کمک تکنیک‌های هوش مصنوعی می‌تواند به بهبود دقت تعیین وضعیت و واکنش به تغییرات محیطی کمک کند. این ادغام داده‌ها می‌تواند به شناسایی الگوهای پیچیده‌تر و کاهش خطاها منجر شود.

## ۵-۲- بهینه‌سازی فرآیند انتقال داده

- توسعه الگوریتم‌های فشرده‌سازی پیشرفته: تحقیق بر روی الگوریتم‌های فشرده‌سازی داده‌های پیچیده و تکنیک‌های جدید برای کاهش حجم داده‌های منتقل‌شده می‌تواند به بهینه‌سازی استفاده از پهنای باند و کاهش هزینه‌ها کمک کند. همچنین، این تکنیک‌ها می‌توانند به افزایش سرعت انتقال داده‌ها و کاهش تأخیر در ارتباطات فضایی منجر شوند.

- افزایش قابلیت‌های مدیریت داده‌ها: توسعه روش‌های هوش مصنوعی برای دسته‌بندی و اولویت‌بندی داده‌های جمع‌آوری‌شده می‌تواند به افزایش کارایی فرآیند انتقال داده و کاهش بار اطلاعاتی بر روی سیستم‌های ارتباطی کمک کند. این بهبودها می‌تواند به افزایش قابلیت اطمینان و کارایی مأموریت‌های فضایی منجر شود.

## ۵-۳- ارتقاء سیستم‌های مدیریت حرارتی

- پیشرفت مدل‌های شبیه‌سازی حرارتی: تحقیق در زمینه‌های مدل‌سازی حرارتی و به‌کارگیری روش‌های پیشرفته‌تر برای شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار حرارتی ماهواره‌ها می‌تواند به بهبود مدیریت حرارتی و افزایش کارایی سیستم‌های خنک‌کننده کمک کند. این مدل‌ها می‌توانند به شناسایی زود هنگام ناهنجاری‌های حرارتی و اجرای اقدامات پیشگیرانه کمک کنند.

## -مدیریت خودکار ناهنجاری‌های حرارتی

استفاده از هوش مصنوعی برای شناسایی و مدیریت خودکار ناهنجاری‌های حرارتی می‌تواند به بهبود اعتمادپذیری سیستم‌های حرارتی و جلوگیری از خرابی‌های غیرمنتظره کمک کند. این رویکرد می‌تواند به افزایش عمر مفید ماهواره‌ها و کاهش هزینه‌های نگهداری منجر شود.

در نتیجه، استفاده از هوش مصنوعی در ماهواره‌های مکعبی نه تنها موجب ارتقاء کارایی و دقت این فناوری‌ها شده است، بلکه به توسعه و پیشرفت مأموریت‌های فضایی نیز کمک کرده است. هوش مصنوعی به عنوان یک ابزار کلیدی در بهبود عملکرد ماهواره‌های مکعبی در زمینه‌های مختلف فناوری عمل می‌کند و با پیشرفت‌های بیشتر در این حوزه، می‌توان به تحقق قابلیت‌های جدید و بهبود عملکرد مأموریت‌های فضایی دست یافت.

## مراجع

- [۱] K. Khurshid, R. Mahmood, and Q. Ul Islam, "A survey of camera modules for CubeSats - Design of imaging payload of ICUBE-1," RAST 2013 - Proc. 6th Int. Conf. Recent Adv. Sp. Technol., pp. 875–879, 2013, doi: 10.1109/RAST.2013.6581337.
- [۲] M. Islam Bappy et al., "Advanced payload architecture for a hyperspectral earth imaging CubeSat based on Software Defined Radio and Deep Neural Network Cube Sat Ground Station View project CubeSat View project Advanced payload architecture for a hyperspectral earth imaging CubeS," no. July 2020, 2018, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/331534101>.
- [۳] N. Ivliev et al., "First Earth-Imaging CubeSat with Harmonic Diffractive Lens," Remote Sens., vol. 14, no. 9, 2022, doi: 10.3390/rs14092230.
- [۴] L. Feruglio, "Artificial Intelligence for Small Satellites Mission Autonomy," Dr. Diss. Politec. di Torino, 2017.
- [۵] P. A. Oche, G. A. Ewa, and N. Ibekwe, "Applications and Challenges of Artificial Intelligence in Space Missions," IEEE Access, vol. 12, pp. 44481–44509, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3132500.
- [۶] E. Allthorpe-Mullis et al., "CubeSat Camera: A Low Cost Imaging System for CubeSat Platforms," 7th Interplanet. CubeSat Work., pp. 1–9, 2018, [Online]. Available: [https://icubesat.files.wordpress.com/2018/05/b-35201805251613 paper.pdf](https://icubesat.files.wordpress.com/2018/05/b-35201805251613%20paper.pdf)
- [۷] M. N. Sarvi and H. Mahdipour, "Performance Evaluation of CubeSats for Remote Sensing Missions: A Review." Journal of Geoinformatics in Civil Engineering (JGCE), 2023.
- [۸] M. Preisinger, "Advancing the Attitude Determination and Control System for the CubeSat MOVE-II," 2019.
- [۹] J. D. Reis Junior, A. M. Ambrosio, F. L. de Sousa, and D. F. Silva, "Spacecraft real-time thermal simulation using artificial neural networks," J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng., vol. 43, no. 4, p. 198, Apr. 2021, doi: 10.1007/s40430-021-02908-7.
- [۱۰] L. Feruglio and S. Corpino, "Neural networks to increase the autonomy of interplanetary nanosatellite missions," Rob. Auton. Syst., vol. 93, pp. 52–60, 2017, doi: 10.1016/j.robot.2017.04.005.
- [۱۱] J. D. Liddle, A. P. Holt, S. J. Jason, K. A. O'Donnell, and E. J. Stevens, "Space science with CubeSats and nanosatellites," Nat. Astron., vol. 4, no. 11, pp. 1026–1030, 2020, doi: 10.1038/S41550-020-01247-2.
- [۱۲] J. Goodwill et al., "NASA SpaceCube Edge TPU SmallSat Card for Autonomous Operations and Onboard Science-Data Analysis," 35th Small Satell. Conf., 2021, [Online]. Available: [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210019764/downloads/SSC21-VII-08-TPU\\_v11.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210019764/downloads/SSC21-VII-08-TPU_v11.pdf)
- [۱۳] E. E. Secretariat, "Ecss-E-St-50-01C, Space data links - Telemetry synchronization and channel coding," Ecss, no. July, pp. 443–458, 2008.
- [۱۴] S. Nie, J. M. Jornet, and I. F. Akyildiz, "Deep-learning-based resource allocation for multi-band communications in cubesat networks," 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops 2019 - Proceedings. 2019. doi: 10.1109/ICCW.2019.8757157.
- [۱۵] A. Smith, "Space engineering, Communications," Sp. Sci., no. July, pp. 443–458, 2004, doi: 10.1142/9781860944574\_0014.
- [۱۶] A. Smith, "Space engineering, SpaceWire – Links, nodes, routers and networks," Sp. Sci., no. July, pp. 443–458, 2004, doi: 10.1142/9781860944574\_0014.

- [۱۷] S. Chien et al., "Onboard autonomy on the intelligent payload experiment CubeSat mission," J. Aerosp. Inf. Syst., vol. 14, no. 6, pp. 307–315, 2017, doi: 10.2514/1.I010386.
- [۱۸] J. Castellví Esturi and Jordi, "Feasibility Study of a Multispectral Remote Sensing Mission based on a 6U CubeSat Standard," Oct. 2014, Accessed: Feb. 09, 2024. ]Online.[ Available: <http://recercat.cat/handle/2072/242187>
- [۱۹] J. Junior, A. Ambrosio, and F. Sousa, "Real-Time Cubesat Thermal Simulation using Artificial Neural Networks," Journal of Computational Interdisciplinary Sciences, vol. 8, no. 2. 2017. doi: 10.6062/jcis.2017.08.02.0126.