

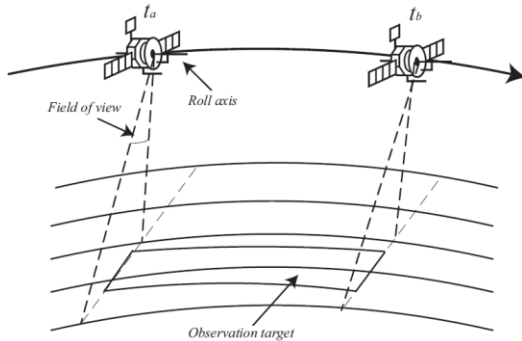
## برنامه‌ریزی یک ماهواره رصد زمین چابک برای یک ماموریت معین

اردا افزلی<sup>۱\*</sup>، بهمن قربانی واقعی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی فن‌آوری ماهواره، دانشگاه علم و صنعت ایران، ardaafzali@gmail.com

۲- استادیار دانشکده مهندسی راه‌هن/ فن‌آوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، bahman\_gh@iust.ac.ir

ماهواره‌های رصد زمین چابک با قابلیت مانور وضعیت قوی‌تر در راستای سه محور، نسل جدید ماهواره‌های رصد زمین هستند [۵]. ماهواره‌های چابک به دلیل سبک وزن بودن و حذف قطعات افزونه دارای قابلیت مانور وضعیت سریع هستند و زمان مانور آن‌ها تا یک پنجم ماهواره‌های سنتی می‌تواند کاهش پیدا کند. در مقایسه با ماهواره‌های رصد زمین سنتی که فقط حول محور رول قابل کنترل هستند، ماهواره‌های رصد زمین چابک به صورت بالقوه بهره‌وری برنامه‌ریزی وظایف رصدی را افزایش می‌دهند. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد، ماهواره‌ی رصد زمین سنتی فقط می‌تواند هدف را در یک پنجره زمانی قابل رصد ثابت رصد کند [ta, tb]. بازه پنجره زمانی قابل رصد به وسیله ماهواره و هدف رصد تعیین می‌شود. علاوه بر این، تا زمانی که همه‌ی محدودیت‌های عملیاتی برآورده شوند، ماهواره‌های رصد زمین چابک احتمالاً دو یا چند وظیفه‌ی رصدی را در یک پنجره زمانی قابل رصد طولانی‌تر اجرا می‌کنند [۱].



شکل ۱- تصویر بازه ثابت رصدی برای یک ماهواره سنتی رصد زمین [۶].

تفاوت بارز بین توانایی رصد ماهواره‌ی رصد زمین سنتی و ماهواره‌ی رصد زمین چابک در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در سمت چپ نشان داده شده است، یک ماهواره‌ی رصد زمین سنتی دارای یک پنجره زمان مشاهده مشخص می‌باشد [ta, tb] که برای اجرای وظیفه همان پنجره زمانی قابل رصد خواهد بود. در حالی که هیچ تفاوتی بین پنجره زمانی قابل رصد و پنجره زمان مشاهده برای ماهواره‌ی رصد زمین سنتی وجود ندارد، پنجره زمانی قابل رصد برای ماهواره‌ی رصد زمین چابک به دلیل توانایی ماهواره در نگاه به جلو و نگاه به عقب در امتداد محور پیچ، معمولاً طولانی‌تر از پنجره زمان مشاهده مربوطه است. در نتیجه در قسمت سمت راست شکل ۲، ماهواره‌ی رصد زمین چابک می‌تواند یک وظیفه‌ی رصدی را برای یک هدف در  $t_c$  شروع کند و یا می‌تواند رصد را به اندازه  $t_e$  بعد از  $t_a$  شروع کند. به این ترتیب، برنامه

### چکیده

امروزه با گسترش صنعت فضایی در کشور، توسعه کاربردهای فضاپایه مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین یافتن بهترین برنامه‌ریزی ممکن جهت جهت حداکثر نمودن مشاهدات تصویری و انتقال آن‌ها به ایستگاه زمینی، به عنوان تابعی از مشخصات ماهواره، مدار حرکتی ماهواره، سیستم کنترل وضعیت، میدان دید و اهداف رصدی اهمیت فراوانی دارد. ترکیب خاصیت چابکی ماهواره با توجه به قابلیت انتقال وضعیت سریع آن در راستای سه محور رول، پیچ و یابو که امکان جهت‌گیری افزون‌برندیر را به ماهواره می‌بخشد، با یک نرم افزار مناسب می‌تواند به شکل قابل توجهی نرخ پاسخ دهی، زمان بازدید و سطح پوشش ماهواره را بهبود بدهد. در این راستا، طراحی یک برنامه‌ریزی جامع که به طور خودکار یک توالی عملی بهینه، جهت بهره‌برداری حداکثری از ماهواره‌های چابک رصد زمین را در طول یک بازه زمانی معین در راستای پاسخ به نیازها و اولویت‌های کاربران و برآورده نمودن محدودیت‌های عملیاتی و فیزیکی ماهواره‌ها، یک نیاز اساسی می‌باشد. بنابراین در این مقاله طرح یک نرم افزار خودکار برنامه‌ریزی ماهواره‌های رصد زمین ارائه می‌شود، که پس از دریافت اهداف رصدی از کاربر و اختصاص اولویت رصد به هر هدف، قابلیت پیاده‌سازی و اجرای وظایف رصدی توسط سیستم کنترل وضعیت و مکانیک مداری بررسی می‌گردد و در ادامه گراف سیستم انتقال حالت ماموریت برای اهداف قابل دسترس ساخته می‌شود. در نهایت به کمک یک الگوریتم جستجوگر بهینه مبتنی بر روش بلمن فورد توالی برنامه بهینه جهت بهره‌برداری حداکثری از ماهواره ضمن برآورده شدن محدودیت‌های عملیاتی ماموریت بدست می‌آید.

واژه‌های کلیدی: رصد زمین - ماهواره چابک - برنامه‌ریزی

### ۱- مقدمه

ماهواره‌های رصد زمین برای جمع‌آوری تصاویر از طریق سنسورهای خود طراحی شده‌اند. با توجه به مزایای متعدد آن‌ها از جمله سطح پوشش رصدی بزرگ، ماهواره‌های رصد زمین به طور گسترده در حوزه‌های نظارت بر حوادث، نظارت بر محیط زیست و اکتشاف منابع مورد استفاده قرار می‌گیرند. در همین حال، تعداد ماهواره‌های رصد زمین فعال در مدار به طور مداوم در حال افزایش است و در مارس ۲۰۱۹ به ۷۶۹ عدد رسیده است و بخش بزرگی از آن‌ها با یکدیگر همکاری می‌کنند [۱]، [۲] بنابراین مشکل برنامه‌ریزی ماهواره‌های رصد زمین از اهمیت بالایی برخوردار است و طی ۲۰ سال گذشته مورد توجه بسیاری قرار گرفته است [۳]، [۴].

برنامه ریزی کاربردی ماهواره‌ها شامل محدودیت‌های عملیاتی پیچیده‌ای است که می‌توانند به دو دسته تقسیم شوند: محدودیت‌های زمانی و محدودیت‌های منابع داخلی (برای محدودیت‌های مشابه در مدل‌های مسئله برنامه ریزی ماهواره‌ی رصد زمین چابک می‌توان به [۱۵]–[۱۸] مراجعه کرد).

محدودیت‌های انتقال وظایف، که در بخش قبلی به آن پرداخته شد، متعلق به محدودیت‌های زمانی نیز هستند. از آنجایی که ماهواره‌ی رصد زمین چابک به عنوان منابع رصد مورد استفاده قرار می‌گیرند، مدت زمان مشخصی برای تنظیم میدان دید تصویربرداری از هدف، نسبت به وضعیت قبلی مورد نیاز می‌باشد. در صورتی که مشاهدات متوالی برنامه ریزی شده، زمان انتقال کافی نداشته باشند باید به دقت با این نوع از محدودیت‌های زمانی مقابله شود.

در مورد محدودیت منابع روی برد ماهواره‌ی رصد زمین چابک، می‌توان گفت که قابلیت ذخیره انرژی و ذخیره سازی داده برای عملکرد سیستم سنجش از راه دور بسیار مهم است. [۶]، [۱۹] بررسی شده است. با توسعه فناوری رصد زمین، مشکل برنامه‌ریزی ماموریت ماهواره‌های رصدی را می‌توان برای انجام ماموریت‌های رصد پیچیده‌تر به وسیله الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک [۲۰]، [۲۱]، الگوریتم جستجوی تابو [۲۲]، [۲۳] و الگوریتم اکتشافی بازگشتی [۲۴]، [۲۵] حل کرد.

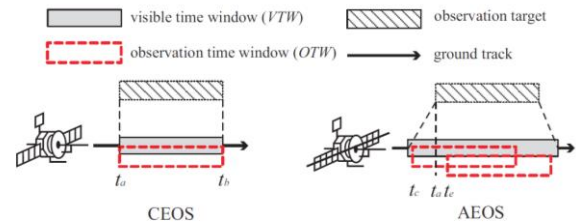
ماهواره‌های رصدی چابک می‌توانند با استفاده از مانور وضعیت به یک پنجره زمان رصد طولانی‌تر و انتخاب‌های انعطاف‌پذیر برای رصد زمین دست یابند. قابلیت چابکی نیز دشواری زمان‌بندی ماهواره‌ی رصد زمین چابک را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد، زیرا ترتیب مشاهده بین وظایف ثابت نیست و تضاد بین وظایف آشکار می‌شود و نه تنها باید تصاویر اهداف مشخص شود، بلکه ترتیب تصاویر نیز باید تعیین شود و حتی زمان شروع رصد هر تصویر نیز باید تحت محدودیت‌های عملیاتی آن تعیین شود [۲۶]–[۲۸].

به عنوان مثال، آزمایشگاه پیش‌ران جت یک چارچوب کاربردی ماژولار به نام محیط برنامه ریزی/زمان‌بندی خودکار (ASPEN) برای مقابله با انواع مشکلات برنامه ریزی و زمان بندی توسعه داده است [۲۹].

[۳] مسئله انتخاب و زمان‌بندی ماهواره‌ی رصد زمین چابک را مورد مطالعه قرار داده و مقایسه‌ای جامعی بین الگوریتم حریص، برنامه‌نویسی پویا، برنامه‌نویسی محدود و الگوریتم جستجوی محلی انجام داد و به این نتیجه رسید که الگوریتم حریص و برنامه‌نویسی پویا قادر به پرداختن به محدودیت‌های پیچیده نیستند. برنامه نویسی محدودیت برای بیان هر نوع محدودیت انعطاف پذیر است و الگوریتم جستجوی محلی عملکرد بهتری را ارائه می‌دهد. در [۳۰] یک راه حل مبتنی بر منطق زمانی خطی برای زمان‌بندی خودکار ماموریت یک ماهواره‌ی رصد زمین چابک پیشنهاد می‌شود. که به ماهواره‌ی رصد زمین چابک اجازه می‌دهد از اهداف قبل یا بعد از عبور عمودی آن‌ها تصویربرداری کند.

در این مقاله با توجه به ماموریت هدف مسئله برنامه ریزی ماهواره‌ی رصد زمین چابک مدل سازی شده است. طرح یک نرم افزار خودکار برنامه ریزی ماهواره‌های رصد زمین با قابلیت پشتیبانی از ماهواره‌های رصد زمین چابک ارائه می‌شود، که پس از دریافت اهداف رصدی از کاربر و اختصاص اولویت رصد به هر هدف، آن‌ها را بر اساس

ریزی ماهواره‌ی رصد زمین سنتی به عنوان یک انتخاب پنجره زمانی قابل رصد در نظر گرفته می‌شود [۶]. در واقع هر پنجره زمانی قابل رصد شامل چندین پنجره زمان مشاهده بالقوه برای ماهواره‌ی رصد زمین چابک است. اگرچه ویژگی چابکی قابلیت رصد ماهواره‌ی رصد زمین را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد، اما پیچیدگی مسئله برنامه ریزی ماهواره‌ی رصد زمین چابک در مقایسه با مشکل برنامه ریزی ماهواره‌ی رصد زمین سنتی به طرز چشمگیری افزایش می‌یابد [۷]، [۸].



شکل ۲- مقایسه قابلیت رصد یک ماهواره سنتی رصد زمین و یک ماهواره سنتی رصد زمین [۱].

روش‌های دقیق محاسبه پنجره زمانی قابل رصد در [۹]–[۱۱] مورد بررسی قرار گرفته است. در عین حال، ماهواره‌ی رصد زمین چابک مجبور است داده‌ها را در یک ایستگاه زمینی بارگیری کند، یا از ماهواره‌های رله برای دستیابی به این منظور استفاده کند [۱۲]، [۱۳]. پنجره‌های مورد نیاز داندلود داده‌ها باید از قبل به دست بیایند و این موضوع پیچیدگی برنامه ریزی ماهواره را تا حد زیادی افزایش می‌دهند اما در اکثر مقالات فرض می‌شود، به تعداد کافی ماهواره رله و یا ایستگاه زمین جهت انتقال داده وجود دارد و این موضوع به عنوان یک محدودیت در برنامه ریزی ماهواره‌های رصد زمین در نظر گرفته نمی‌شود [۱].

به طور کلی منظور از مسئله برنامه ریزی ماهواره‌ی رصد زمین چابک انتخاب و برنامه ریزی وظایف رصدی ماهواره با هدف به حداکثر رساندن سود کل رصد و برآورده شدن همه‌ی محدودیت‌های عملیاتی پیچیده می‌باشد. تحقیقات مسئله برنامه ریزی ماهواره‌ی رصد زمین چابک با الهام از خواسته‌های عملی در برنامه ریزی موثر و کارآمد ماهواره‌ی رصد زمین چابک در ۲۰ سال گذشته و به ویژه در سه سال گذشته پدیدار شده اند. طبق بررسی‌های انجام شده به نظر می‌رسد گبریل و همکاران [۱۴] برای اولین بار در سال ۱۹۹۷ به مسئله برنامه ریزی ماهواره‌ی رصد زمین چابک پرداخته بودند. بیش از نیمی از مقالات بررسی شده از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ منتشر شده اند، و این موضوع نشان می‌دهد که مسئله برنامه ریزی ماهواره‌ی رصد زمین چابک توجه بیشتری را نسبت به گذشته به خود جلب کرده است. از نظر عملی، مسئله برنامه ریزی ماهواره‌ی رصد زمین چابک یک مسئله سیستم فضایی با سابقه مهندسی هوافضا است. در حالی که از نقطه نظر تئوری، مسئله برنامه ریزی ماهواره‌ی رصد زمین چابک معمولاً به عنوان یک مسئله بهینه سازی ترکیبی شامل روش‌های مختلف مدل سازی و تکنیک‌های حل مسئله در نظر گرفته می‌شود. مسئله برنامه ریزی ماهواره‌ی رصد زمین چابک را حتی می‌توان به عنوان کاربرد تجهیزات سنجش از راه دور توصیف کرد [۱].

۲-۲- مدل سازی مسئله برنامه ریزی ماموریت

برنامه ریزی مأموریت مشاهده شامل تعارض‌های کار و محدودیت‌های پیچیده زیادی است، محدودیت های اصلی برنامه ریزی ماموریت ماهواره‌ی رصد زمین چابک را به شرح زیر ارائه می شود [۳۰]:

(۱) محدودیت زاویه‌ی تصویر. زاویه‌ی تصویر زاویه نسبی بین خط دید وظیفه رصدی و نقطه ندیر ماهواره است. کیفیت تصویر وظایف رصدی مختلف به زاویه رصد ماهواره نسبت به آن‌ها وابسته می‌باشد. برای به دست آوردن بهترین نتایج تصویر، زاویه‌ی رصد ماهواره‌ها بایستی محدوده مشخص شده را برآورده کند. زاویه تصویربرداری هر وظیفه به صورت  $\alpha_i$  تعریف می شود:

$$\alpha_i^{max} \geq |\alpha_i| \quad (1)$$

$\Theta_i^{max}$  حداکثر زاویه‌ی تصویر وظیفه  $i$  می‌باشد که با توجه به آن پنجره زمانی قابل رصد بودن وظیفه مشخص می‌گردد  $[t_{s_i}, t_{e_i}]$ . محدودیت بیهه زمان دید. ماهواره تنها زمانی می‌تواند رصد را اجرا کند که بر فراز هدف زمینی پرواز کند.

(۲) محدودیت پنجره‌ی زمانی قابل مشاهده: ماهواره تنها زمانی می‌تواند رصد را اجرا کند که بر فراز هدف زمینی پرواز کند. این محدودیت دوره مشاهده هر هدف را محدود می‌کند. اما پنجره‌ی زمانی قابل مشاهده برای ماهواره رصد زمین چابک به دلیل قابلیت مانور نگرش چابک، انتخاب گسترده تری وجود دارد. که به صورت  $[t_{vs_i}, t_{ve_i}]$  پنجره زمانی رصد بایستی در پنجره زمانی قابل مشاهده مربوطه گنجانده شود:

$$\begin{cases} t_{s_i} \geq t_{vs_i} \\ t_{e_i} \leq t_{ve_i} \end{cases} \quad (2)$$

(۳) محدودیت مانور ماهواره: انتقال بین دو ماموریت مشاهده مستلزم زمان مانور کافی است. یعنی زمان انتقال زاویه دید ماهواره بایستی کمتر از فاصله زمانی دو ماموریت باشد. با توجه به زمان تصویربرداری و قابلیت مانور وضعیت، محدودیت مانور ماهواره به صورت تعریف می شود:

$$t_{s_{i+1}} - t_{e_i} \geq T_s \quad (3)$$

در اینجا  $T_s$  مدت زمان مانور ماهواره است. محدودیت (۳) فاصله بین زمان شروع کار بعدی و زمان پایان کار قبلی را توصیف می کند که نباید کمتر از زمان لازم برای مانور وضعیت باشد.

(۴) محدودیت زوایای مانور: زاویه رول  $\varphi$  و زاویه پیچ  $\Theta$  به ترتیب محدوده مشاهده جانبی و پیشرو/پسرو را مشخص می‌کنند که بایستی محدودیت های زیر را برآورده نمایند:

$$\varphi_i^{max} \geq |\varphi_i| \quad (5)$$

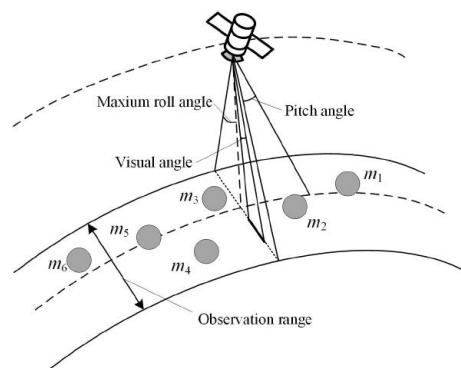
$$\Theta_i^{max} \geq |\Theta_i| \quad (6)$$

پنجره زمانی قابل رصد مرتب می‌کند. سپس به کمک یک الگوریتم برنامه ریزی، گراف سیستم انتقال ماموریت برای اهداف قابل دسترس ماهواره ایجاد می‌شود. در نهایت به کمک یک الگوریتم جستجوگر بهینه‌ی مبتنی بر روش بلمن فورد توالی برنامه بهینه جهت بهره‌برداری حداکثری از ماهواره ضمن برآورده شدن محدودیت‌های عملیاتی ماموریت بدست می‌آید. قابل توجه است که برای انجام برنامه ریزی بهینه با هدف کسب بازده حداکثری از ماهواره قابلیت پیاده سازی و اجرای وظایف توسط بلوک‌های کنترل وضعیت و مداری بایستی مورد تایید قرار بگیرد. در ادامه کار، بخش دوم ابتدا به معرفی مسئله برنامه‌ریزی ماهواره رصد زمین چابک و مدل‌سازی آن می‌پردازد و در ادامه نحوه ساخت سیستم انتقال حالت ماموریت را بیان می‌کند. در بخش سوم طرح برنامه ریزی به یک ماموریت ویژه اعمال شده و نتایج آن گزارش می‌گردد. نتیجه گیری کار و پیشنهادات ادامه کار در بخش چهارم گزارش شده است.

۲- فرموله کردن مسئله

۲-۱- توصیف مسئله

ماهواره‌های رصد زمین چابک می‌توانند به کمک مانور وضعیت اهداف اطراف رد پای ماهواره را نیز مشاهده کنند. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، اهداف زمینی در محدوده میدان وسعت دید ماهواره که توسط مسیر زیرماهواره و حداکثر زاویه چرخش ماهواره‌ها تعیین می‌شود، قابل مشاهده هستند. پنجره زمانی قابل رصد برای یک هدف زمینی برای یک ماهواره سنتی فقط یک دوره کوتاه مشاهده (چند ثانیه) می‌باشد، اما پنجره پنجره زمانی قابل رصد برای یک ماهواره رصد زمین چابک می‌تواند دوره طولانی تری (چند دقیقه) باشد.



شکل ۳- نمایش یک ماهواره رصد زمین چابک به همراه اهداف رصدی [۱].

برنامه ریزی ماموریت پیچیده‌ی ماهواره‌های رصد زمین چابک تنها شامل الزامات دنباله مشاهدات متوالی نمی‌باشد، بلکه شامل الزامات خاص مشاهده نیز می‌باشد، مانند "مشاهده یکی از چندین کار"، "برخی وظایف باید حتماً مشاهده شوند" و "بعضی از وظایف را نمی‌توان مشاهده کرد مگر اینکه وظایف خاص دیگری قبل از آن مشاهده شوند. مدل‌سازی این الزامات مشاهداتی خاص در الگوریتم‌های برنامه‌ریزی ماموریت سنتی دشوار است. بنابراین، چگونگی فرمول بندی این الزامات خاص و حل یک دنباله دلخواه کار اصلی این پژوهش می‌باشد.

با توجه محدودیت‌های تعریف شده متغیرهای تصمیم‌گیری به صورت زیر مشخص می‌گردند:

گام اول: برای هر حالت  $q_i \in Q_T$ ، وظیفه  $m_i$  بررسی می‌شود که آیا محدودیت زاویه رول ( $\delta$ ) برآورده می‌کند و یا خیر. در صورت برآورده شدن،  $l_i$  برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود.

گام دوم: برای هر حالتی که محدودیت زاویه رول را برآورده کند، وظیفه  $m_i$  بررسی می‌شود که آیا محدودیت زاویه رول ( $\phi$ ) برآورده می‌کند و یا خیر. در صورت برآورده شدن،  $l_i$  برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود.

گام سوم: برای هر حالتی که محدودیت قبلی را برآورده کند، وظیفه  $m_i$  بررسی می‌شود که آیا محدودیت پنجره زمانی قابل مشاهده (۳) برآورده می‌کند و یا خیر. در صورت برآورده شدن،  $l_i$  برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود.

گام چهارم: با توجه به محدودیت زاویه تصویربرداری (۲) هر وظیفه، زمان مانور ماهواره را بین هر دو وظیفه متوالی محاسبه می‌گردد. اگر زمان مانور محدودیت (۴) را برآورده کند،  $l_{ij}$  برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود.

گام پنجم: با توجه به اولویت داده شده توسط کاربران، اولویت حالت  $q_i$  مشخص می‌شود.

در نهایت، بر اساس مراحل فوق، وزن گذار (لبه‌ها) بین  $q_i$  و  $q_j$  با استفاده از فرمول زیر مشخص می‌گردد:

$$\omega_T(q_i, q_j) = -\lambda_i \lambda_j l_{ij} (p_i + p_j) - \varepsilon \quad (9)$$

$\varepsilon$  یک عدد مثبت بین صفر یک می‌باشد تا از صفر شدن وزن گذرها جلوگیری کند و انتقال حالت‌ها مسدود نشوند. توجه داشته باشید که وزن انتقال شامل پارامتر اولویت و متغیرهای تصمیم‌گیری هر وظیفه است، هدف یافتن طولانی‌ترین مسیر از  $q_0$  تا  $q_f$  است. در ادامه شبه کد الگوریتم ساخت سیستم انتقال آمده است [۳۰]:

بر اساس محدودیت‌های بالا، هدفی آنست که مجموع سود رصد کل وظایف مشاهده شده حداکثر گردد.  $x_i$  به عنوان یک متغیر منطقی تعریف می‌شود که اگر وظیفه درصدی  $i$  قابل اجرا باشد برابر با ۱ است، در غیر این صورت برابر با ۰ خواهد بود. سپس، تابع هدف به صورت تعریف می‌شود:

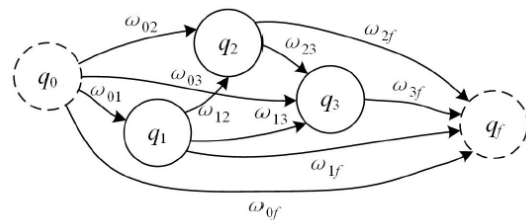
$$\max \left( \sum_{i=1}^N P_i x_i \right) \quad (7)$$

جایی که  $P_i$  اولویت وظیفه درصدی  $i$  است. تابع هدف (۷) می‌تواند مجموع سود رصد را حداکثر کند.

در نهایت، مسئله برنامه‌ریزی ماموریت ماهواره رصد زمین چابک به این صورت توصیف می‌شود: تابع هدف (۷) با توجه به الزامات خاص درصدی سناریو ماموریت و محدودیت‌های (۲)-(۶) به حداکثر برسد.

### ۳-۲- مدلسازی ماموریت

یک سیستم انتقال برای انتزاع مدل برنامه‌ریزی ماموریت با در نظر گرفتن محدودیت‌های (۲)-(۶) براساس نظریه اتوماتا ساخته می‌شود. ابتدا، وظیفه اولیه  $m_0$  و وظیفه نهایی  $m_f$  به مجموعه وظایف  $M$  اضافه می‌گردد تا یک سیستم انتقال ساخته شود  $T = (Q_T; q_{0,T}; \delta_T; \Pi_T; h_T; \omega_T)$  که در آن مجموعه حالت‌های  $T$  برابر است با  $Q_T = U\{m_0, m_f\}$  . با توجه به اینکه الزام تصویربرداری در هر حالت وجود دارد، گزاره  $\{image\} = \Pi_T$  و  $h_T = \pi$  را برای همه حالت‌ها تعریف می‌گردد. در مرحله بعد، رابطه انتقال بین حالت‌ها به گونه‌ای تعریف می‌شود. که وزن  $\omega_T$  لبه بین وظایف مربوطه باشد. در سیستم انتقال، رابطه گذار نقش مهمی برای جستجوی یک مسیر امکان پذیر ایفا می‌کند. به منظور ایجاد آسان رابطه بین هر دو حالت، سیستم انتقال را می‌توان به عنوان یک نمودار جهت دار در نظر گرفت که در شکل ۴ نشان داده شده است. حالت‌ها بر اساس ترتیب زمانی لحظه‌ی شروع پنجره زمانی قابل مشاهده مرتب می‌شوند. برای توضیح واضح تر مسئله،  $q_0$  و  $q_f$  حالت‌های مجازی را نشان می‌دهند که راس اولیه و راس نهایی در نمودار هستند. لازم به ذکر است که محاسبات این فرآیند مدلسازی تنها شامل عملیات جبری و قضاوت منطقی می‌شود، افزایش حالت‌های مجازی باعث افزایش محاسباتی فرآیند مدل‌سازی سیستم انتقال نمی‌شود.



شکل ۴- نمایش سیستم انتقال حالت ماهواره رصد زمین چابک [۳۰].

برای محاسبه وزن  $\omega_T$ ، به ازای هر وظیفه یک متغیر تصمیم‌گیری  $\lambda_i$  و برای هر انتقال بین دو وظیفه  $l_{ij}$  تعریف می‌شود. سپس

قسم	۲۶,۸۱۱۹N, 55.8913° E	۹۰
قم	۲۴,۶۴۱۶□□, ۵۰,۸۷۴۶□□	۷۰
مشهد	۲۶,۲۹۷۲□□, ۵۹,۶۰۶۷□□	۹۰
کرمانشاه	۳۴,۳۲۷۷□□, ۴۷,۰۷۷۸□□	۵۰

در جدول ۲ اهداف رصدی به ترتیب پنجره زمانی قابل مشاهده توسط ماهواره فهرست شده اند. سپس سیستم انتقال مربوط به ماموریت ساخته می‌شود.

جدول ۲- اهداف رصدی به ترتیب پنجره زمانی قابل رصد

نام	پنجره زمانی قابل رصد	وظیفه
شیراز	۰۸-Aug-2۰۲۲ ۰۹:۰۰:۰۰ ۰۸-Aug-2۰۲۲ ۰۹:۰۰:۴۸	$m_1$
اصفهان	۰۸-Aug-2۰۲۲ ۰۹:۰۰:۰۵ 08-Aug-2۰۲۲ ۰۹:۰۱:۱۶	$m_2$
یزد	۰۸-Aug-2۰۲۲ ۰۹:۰۰:۱۳ 08-Aug-2۰۲۲ ۰۹:۰۱:۳۵	$m_3$
مشهد	۰۸-Aug-2۰۲۲ ۰۹:۰۱:۵۷ ۰۸-Aug-2۰۲۲ ۰۹:۰۳:۱۴	$m_4$
تبریز	۰۸-Aug-2۰۲۲ ۱۷:۱۶:۴۵ ۰۸-Aug-2۰۲۲ ۱۷:۱۷:۴۸	$m_5$
تهران	۰۸-Aug-2۰۲۲ ۱۷:۱۷:۴۸ 08-Aug-2۰۲۲ ۱۷:۱۹:۱۲	$m_6$
کرج	۰۸-Aug-2۰۲۲ ۱۷:۱۷:۴۴ ۰۸-Aug-2۰۲۲ ۱۷:۱۹:۰۷	$m_7$
رشت	۰۸-Aug-2۰۲۲ ۱۷:۱۷:۱۴ ۰۸-Aug-2۰۲۲ ۱۷:۱۸:۳۸	$m_8$
کرمان	۰۸-Aug-2۰۲۲ ۱۷:۱۹:۴۷ ۰۸-Aug-2۰۲۲ ۱۷:۲۱:۱۱	$m_9$
قم	۰۸-Aug-2۰۲۲ ۱۷:۱۸:۰۴ 08-Aug-2۰۲۲ ۱۷:۱۹:۱۴	$m_{10}$

همانطور که در جدول ۲ دیده می‌شود برخی از اهداف رصدی (شهرهای کرمانشاه، قشم و ارومیه) درخواست شده توسط کاربران به دلیل آنکه طبق محاسبات زیر سیستم تعیین موقعیت در طول افق برنامه‌ریزی در محدوده پوشش ماهواره قرار ندارند، از فهرست وظایف رصدی تحت برنامه‌ریزی حذف شده اند. شکل ۵ یک لحظه نمونه از شبیه سازی زیرسیستم تعیین موقعیت و محاسبه قابلیت دسترسی ماهواره به اهداف را نشان می‌دهد.

**Input:** The set of observation task,  $m_n$ ; The constraint conditions;

**Output:** Transition system  $\mathcal{T}$  ;

1:  $Q_{\mathcal{T}} = \{M, m., m_f\}$ ; 2:  $q, \mathcal{T} = m$ .

3: for each  $i \in [1, N]$  do

4: Execute Step.1-Step.5 to compute the choice variable;

5: end for

6: for each  $i \in [1, N]$  do

7: for each  $j \in [1, N]$  do

8: if  $i \neq j$  then

9:  $\omega_{\mathcal{T}}(q_i, q_j) = \text{Weight\_fun}(q_i, q_j, \lambda_i, \lambda_j, l_{ij})$ ;

10: else

11:  $\omega_{\mathcal{T}}(q_i, q_j) = \bullet$

12: end if

13: end for

14: end for

15:  $\Pi_{\mathcal{T}}$  is the set of propositions satisfied at the states of  $\mathcal{T}$ ;

**return**  $\mathcal{T} = (Q_{\mathcal{T}}, m., \delta_{\mathcal{T}}, \Pi, h_{\mathcal{T}}, \omega_{\mathcal{T}})$ ;

در سیستم انتقال ساخته شده به کمک یک الگوریتم جستجوی

مسیر بلمن-فورد بهترین مسیر انتقال از وظیفه  $m$  به وظیفه  $m_f$  انتخاب می‌شود.

### ۳- پیاده سازی برنامه‌ریزی برای یک ماموریت معین

در این بخش، یک ماموریت مشاهده پیچیده جهت شبیه سازی در نظر گرفته می‌شود و الگوریتم برنامه‌ریزی ماموریت بر روی آن اعمال می‌گردد. در شبیه سازی محدودیت‌های ماهواره به صورت زیر عنوان شده اند:

(۱) حداکثر زاویه مانور در راستای محور رول و پیچ  $\pm 30^\circ$  درجه می‌باشد.

(۲) حداکثر زاویه تصویر برداری  $\pm 15^\circ$  درجه می‌باشد.

(۳) مدت زمان لازم جهت ثبت هر تصویر ۱ ثانیه می‌باشد.

(۴) میدان دید سنسور تصویربرداری ۶ درجه می‌باشد.

(۵) افق زمانی هر برنامه‌ریزی ماهواره ۲۴ ساعت می‌باشد.

(۶) هر هدف در هر بار برنامه‌ریزی حداکثر یکبار رصد می‌شود.

سیستم تعیین و کنترل وضعیت و همچنین سیستم تعیین موقعیت در نظر گرفته شده و به کمک نرم افزار متلب (Matlab) شبیه سازی می‌شود. اهداف رصدی درخواست شده توسط کاربر در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱- اهداف رصدی درخواست شده توسط کاربر

اولویت	موقعیت	نام
۵۰	۳۷,۵۴۹۸N, 45.0786° E	ارومیه
۷۰	۳۸,۰۷۹۲□□, ۴۶,۲۸۸۷□□	تبریز
۷۰	۲۹,۵۹۲۶°N, 52.5836° E	شیراز
۹۰	۳۵,۷۲۱۹N, 51.3347° E	تهران
۵۰	۳۵,۸۴۳۹N, 50.9715° E	کرج
۶۰	۳۲,۶۵۳۹N, 51.6660° E	اصفهان
۸۰	۳۷,۲۷۱۳N, 49.5921° E	رشت
۵۰	۳۱,۸۹۷۴N, 54.3569° E	یزد
۷۰	۳۰,۲۸۳۹N, 57.0834° E	کرمان

پیاده سازی و اجرای وظایف توسط زیرسیستم‌های کنترل وضعیت و مکانیک مداری جهت در هنگام انتخاب برنامه‌ریزی بهینه‌ی ماهواره مورد تایید قرار گرفت. کارایی طرح برنامه‌ریزی معرفی شده با اعمال آن به یک ماموریت ویژه، نشان داده شد.

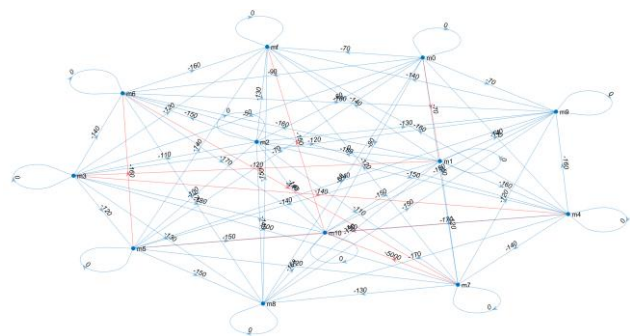
برای توسعه بیشتر کار انجام شده و افزایش دقت برنامه‌ریزی می‌توان محدودیت‌های منابع مانند حجم حافظه قابل دسترس جهت ذخیره تصاویر، محدودیت‌های ذخیره انرژی و توان قابل دسترس، محدودیت‌های انتقال داده به ایستگاه‌های زمینی و کاربران و یا سایر محدودیت‌های عملیاتی مانند تعداد دفعات رصد یک هدف در هر افق برنامه‌ریزی، مدت زمان رصد مداوم یک هدف جهت افزایش نوردهی به سنسور تصویربرداری، احتمال وجود پوشش ابر و... را به مدل ساخته شده افزود.

همچنین توسعه الگوریتم طرح برنامه‌ریزی جهت پشتیبانی از منظومه‌های رصد زمین چابک که در آن‌ها عملکرد هر ماهواره بر روی برنامه سایر ماهواره‌های همکار اثر گذار خواهد بود یکی از زمینه‌های قابل توجه می‌باشد.



شکل ۵- شبیه سازی مدار حرکتی ماهواره و محاسبه قابلیت دسترسی ماهواره به اهداف رصدی

همانطور که در شکل ۶ با رنگ قرمز نمایش داده شده است مسیر  $m_1 \rightarrow m_2 \rightarrow m_3 \rightarrow m_4 \rightarrow m_5 \rightarrow m_6 \rightarrow m_7 \rightarrow m_8 \rightarrow m_9 \rightarrow m_{10} \rightarrow m_{11} \rightarrow m_{12}$  با سود مجموع ۱۳۰۰ به عنوان بهترین مسیر انتخاب شده است. بین وظیفه رصدی  $m_3$  و  $m_4$  به دلیل اینکه طبق محاسبات زیرسیستم کنترل وضعیت مدت زمان لازم برای مانور وضعیت، محدودیت پنجره زمانی قابل رصد وظیفه را برآورده نمی‌کند. الگوریتم برنامه‌ریزی وظیفه  $m_2$  را به دلیل اولویت بالاتر آن انتخاب می‌کند. سیستم انتقال حالت ماموریت در شکل ۶ نمایش داده شده است که در آن انتقال از هر وظیفه به تمام وظایف بعد از آن امکان پذیر می‌باشد. الگوریتم برنامه‌ریزی اعمال شده طولانی ترین مسیر (بیشترین راس عبوری) با بیشترین سود ممکن ممکن را انتخاب می‌کند.



شکل ۶- سیستم انتقال حالت ماموریت

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله با توجه به ماموریت هدف، مسئله برنامه‌ریزی ماهواره‌ی رصد زمین چابک مورد تشریح و بررسی قرار گرفت. طرح یک نرم افزار خودکار برنامه‌ریزی ماهواره‌های رصد زمین با قابلیت پشتیبانی از ماهواره‌های رصد زمین چابک ارائه شد. پس از معرفی اهداف رصدی و اولویت درخواست‌ها توسط کاربر، توالی برنامه بهینه با هدف بهره‌برداری حداکثری از ماهواره، ضمن برآورده شدن محدودیت‌های عملیاتی ماموریت توسط الگوریتم برنامه‌ریزی استخراج شد. قابل توجه است که انجام قابلیت

#### ۵- مراجع

- [1] X. Wang, G. Wu, L. Xing, and W. Pedrycz, "Agile Earth Observation Satellite Scheduling Over 20 Years: Formulations, Methods, and Future Directions," IEEE Syst J, vol. 15, no. 3, pp. 3881–3892, 2021, doi: 10.1109/JSYST.2020.2997050.
- [2] S. Nag, J. LeMoigne, and O. de Weck, "Cost and risk analysis of small satellite constellations for earth observation," in 2014 IEEE Aerospace Conference, 2014, pp. 1–16. doi: 10.1109/AERO.2014.6836396.
- [3] M. Lemaître, G. Verfaillie, F. Jouhaud, J.-M. Lachiver, and N. Bataille, "Selecting and scheduling observations of agile satellites," Aerosp Sci Technol, vol. 6, no. 5, pp. 367–381, 2002.
- [4] A. Globus, J. Crawford, J. Lohn, and A. Pryor, "A Comparison of Techniques for Scheduling Earth Observing Satellites." [Online]. Available: www.stk.com
- [5] G. Verfaillie and M. Lemaître, "Selecting and scheduling observations for agile satellites: some lessons from the constraint reasoning community point of view," in International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, 2001, pp. 670–684.
- [6] X. Wang, G. Song, R. Leus, and C. Han, "Robust Earth Observation Satellite Scheduling With Uncertainty of Cloud Coverage," IEEE Trans Aerosp Electron Syst, vol. 56, no. 3, pp. 2450–2461, 2020, doi: 10.1109/TAES.2019.2947978.
- [7] X. Wang, R. Leus, and C. Han, "Fixed Interval Scheduling of Multiple Earth Observation Satellites with Multiple Observations," in 2018 9th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE), 2018, pp. 28–33. doi: 10.1109/ICMAE.2018.8467667.
- [8] X. Liu, G. Laporte, Y. Chen, and R. He, "An

- multiple earth observation satellites under uncertainties of clouds,” *Comput Oper Res*, vol. 74, pp. 1–13, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.04.014>.
- [20] W. J. Wolfe and S. E. Sorensen, “Three scheduling algorithms applied to the earth observing systems domain,” *Manage Sci*, vol. 46, no. 1, pp. 148–166, 2000.
- [21] T. P. Bagchi, “Near Optimal Ground Support in Multi-Spacecraft Missions: A GA Model and its Results,” *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, vol. 45, no. 3, pp. 950–964, 2009, doi: [10.1109/TAES.2009.5259176](https://doi.org/10.1109/TAES.2009.5259176).
- [22] A. Sarkheyli, A. Bagheri, B. Ghorbani-Vaghei, and R. Askari-Moghadam, “Using an effective tabu search in interactive resources scheduling problem for LEO satellites missions,” *Aerosp Sci Technol*, vol. 29, no. 1, pp. 287–295, 2013.
- [23] C. Li, S. Chen, J. Li, and F. Wang, “Distributed multi-step subgradient optimization for multi-agent system,” *Syst Control Lett*, vol. 128, pp. 26–33, 2019.
- [24] Y. She and S. Li, “Optimal slew path planning for the Sino-French Space-based multiband astronomical Variable Objects Monitor mission,” *J Astron Telesc Instrum Syst*, vol. 4, no. 1, p. 017001, 2018.
- [25] F. Perea, R. Vazquez, and J. Galan-Viogue, “Swath-acquisition planning in multiple-satellite missions: an exact and heuristic approach,” *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, vol. 51, no. 3, pp. 1717–1725, 2015, doi: [10.1109/TAES.2015.130751](https://doi.org/10.1109/TAES.2015.130751).
- [26] Y. She, S. Li, and Y. Zhao, “Onboard mission planning for agile satellite using modified mixed-integer linear programming,” *Aerosp Sci Technol*, vol. 72, pp. 204–216, 2018.
- [27] B. Du, S. Li, Y. She, W. Li, H. Liao, and H. Wang, “Area targets observation mission planning of agile satellite considering the drift angle constraint,” *J Astron Telesc Instrum Syst*, vol. 4, no. 4, p. 047002, 2018.
- [28] J. Li, C. Gao, C. Li, and W. Jing, “A survey on moving mass control technology,” *Aerosp Sci Technol*, vol. 82, pp. 594–606, 2018.
- [29] A. Fukunaga, G. Rabideau, S. Chien, and D. Yan, “Aspen: A framework for automated planning and scheduling of spacecraft control and operations,” in *Proc. International Symposium on AI, Robotics and Automation in Space*, 1997, pp. 181–187.
- [30] J. Li, C. Li, and F. Wang, “Automatic Scheduling for Earth Observation Satellite With Temporal Specifications,” *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, vol. 56, no. 4, pp. 3162–3169, 2020, doi: [10.1109/TAES.2020.2966902](https://doi.org/10.1109/TAES.2020.2966902).
- adaptive large neighborhood search metaheuristic for agile satellite scheduling with time-dependent transition time,” *Comput Oper Res*, vol. 86, pp. 41–53, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.04.006>.
- [9] Y. Gu, C. Han, and X. Wang, “A Kriging Based Framework for Rapid Satellite-to-Site Visibility Determination,” in *2019 IEEE 10th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE)*, 2019, pp. 262–267. doi: [10.1109/ICMAE.2019.8880987](https://doi.org/10.1109/ICMAE.2019.8880987).
- [10] C. Han, S. Bai, S. Zhang, X. Wang, and X. Wang, “Visibility optimization of satellite constellations using a hybrid method,” *Acta Astronaut*, vol. 163, pp. 250–263, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.01.025>.
- [11] X. Wang, C. Han, P. Yang, and X. Sun, “Onboard satellite visibility prediction using metamodeling based framework,” *Aerosp Sci Technol*, vol. 94, p. 105377, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105377>.
- [12] D. L. Brandel, W. A. Watson, and A. Weinberg, “NASA’s advanced tracking and data relay satellite system for the years 2000 and beyond,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 78, no. 7, pp. 1141–1151, 1990, doi: [10.1109/5.56928](https://doi.org/10.1109/5.56928).
- [13] S. Rojanasoonthon, J. F. Bard, and S. D. Reddy, “Algorithms for parallel machine scheduling: a case study of the tracking and data relay satellite system,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 54, no. 8, pp. 806–821, Aug. 2003, doi: [10.1057/palgrave.jors.2601575](https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601575).
- [14] V. Gabrel, A. Moulet, C. Murat, and V. Th. Paschos, “A new single model and derived algorithms for the satellite shot planning problem using graph theory concepts,” *Ann Oper Res*, vol. 69, no. 0, pp. 115–134, 1997, doi: [10.1023/A:1018920709696](https://doi.org/10.1023/A:1018920709696).
- [15] X. Wang, C. Han, R. Zhang, and Y. Gu, “Scheduling Multiple Agile Earth Observation Satellites for Oversubscribed Targets Using Complex Networks Theory,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 110605–110615, 2019, doi: [10.1109/ACCESS.2019.2925704](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925704).
- [16] S. de Florio, “Performances optimization of remote sensing satellite constellations: a heuristic method,” in *Proc. of 5th Intern. Workshop on Planning and Scheduling for Space (IWSS 2006)*, 2006.
- [17] P. Wang, G. Reinelt, P. Gao, and Y. Tan, “A model, a heuristic and a decision support system to solve the scheduling problem of an earth observing satellite constellation,” *Comput Ind Eng*, vol. 61, no. 2, pp. 322–335, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.02.015>.
- [18] Z. Li and X. Li, “A multi-objective binary-encoding differential evolution algorithm for proactive scheduling of agile earth observation satellites,” *Advances in Space Research*, vol. 63, no. 10, pp. 3258–3269, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.01.043>.
- [19] J. Wang, E. Demeulemeester, and D. Qiu, “A pure proactive scheduling algorithm for