

مقاله علمی - پژوهشی

طراحی و تحلیل حساسیت یک مدار عملیاتی برای کاربردهای پایش زمین در نبود امکان تزریق به مدار خورشید آهنگ

اسد صاغری^۱، امیررضا کوثری^{۲*} و مسعود خوش سیما^۳

۱ و ۲- دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

*kosari_a@ut.ac.ir

در این مقاله به بررسی، طراحی و تحلیل حساسیت یک مدار عملیاتی برای مأموریت‌های پایش زمین در مدار غیر خورشیدآهنگ پرداخته شده است. مدارهای خورشیدآهنگ گزینه اصلی استقرار ماهواره‌های پایش زمین هستند، اما در نبود امکان دستیابی به چنین مدارهایی گزینه‌های دیگری نیز قابل بررسی هستند که شامل مدارهای چند خورشیدآهنگ با قابلیت تکرار رد زمینی می‌شوند. در اینجا با توجه به ارتفاع و شیب مداری در دسترس، مجموعه‌ای از این نوع مدارها با در نظر گرفتن مأموریت تعریف شده طراحی می‌شوند. به این منظور، با تشکیل یک مسئله جستجو مقید و با در نظر گرفتن قیدهای مربوط به ویژگی چند خورشیدآهنگی و تکرار شونده‌گی رد زمینی، به جستجوی مشخصه‌های مداری پرداخته شده است. در ادامه، با هدف شناسایی محدوده مجاز در خطای تزریق مداری تحلیل حساسیت ویژگی‌های این مدارها نسبت به عدم قطعیت‌های دقت تزریق طی مطالعه موردی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: مدار چند خورشیدآهنگ، مأموریت پایش زمین، تکرار رد زمینی، تحلیل حساسیت، عدم قطعیت

علائم و اختصارات

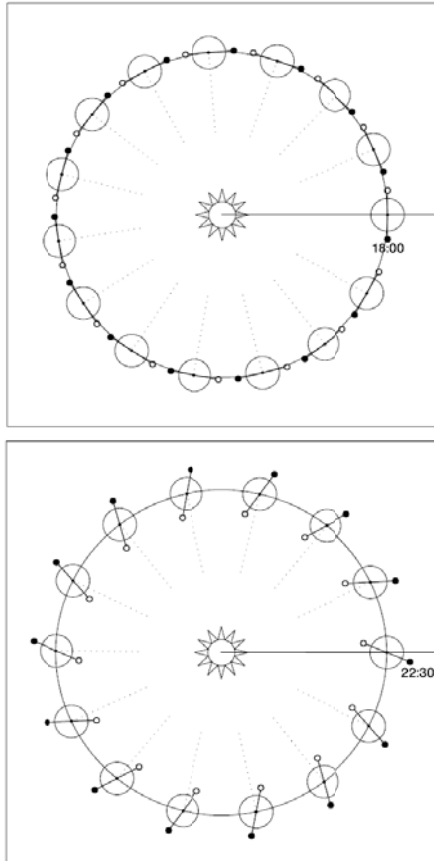
$\dot{\Omega}_n$	نرخ تغییرات موقعیت گره صعودی مدار		
$\dot{\Omega}_s$	سرعت زاویه‌ای خورشید نسبت به زمین		
D_n	روز نودال	a	نیم قطر بزرگ
ω_e	سرعت دورانی زمین به دور خودش	h	ارتفاع مداری
T_n	دوره مداری نودال	h_{RGT}	ارتفاع مداری برای خاصیت تکرار رد زمینی
J_2	ضریب منطقه‌ای مرتبه دو زمین	h_{MSS}	ارتفاع مداری برای خاصیت چند خورشیدآهنگی
μ	ثابت جاذبه زمین	i	شیب مداری
		e	خروج از مرکزیت مدار
		LTAN	زمان محلی گره صعودی

مقدمه

سنجش از دور فضاپایه یکی از مهمترین کاربردهای سامانه‌های فضایی است. به طوری که تا نیمه سال ۲۰۱۹ بیش از ۵۵ درصد ماهواره‌های مستقر در مدار کم ارتفاع زمین را شامل شده

۱. دانشجوی دکتری
۲. دانشیار (نویسنده مخاطب)
۳. استادیار

باشد [۲]. در چنین شرایطی به طور تقریبی همیشه زاویه بین بردار نرمال صفحه مدار و راستای تابش خورشید ثابت باقی می‌ماند [۳] و تکرار گذرهای ماهواره از هر نقطه زمین در زمان محلی تقریباً یکسان اتفاق می‌افتد [۴]. این به معنای این است که تصاویر گرفته شده در شرایط نوردهی تقریباً یکسانی تکرار می‌شوند و می‌توان با مقایسه تصاویر تغییرات را دنبال کرد [۵]. در شکل ۱ مفهوم خورشیدآهنگی در دو زمان محلی متفاوت نشان داده شده است.



شکل ۱- دو مدار خورشیدآهنگ با زمان محلی متفاوت ۱۸ و ۲۲:۳۰ [۶]

روابط مورد استفاده در طراحی یک مدار خورشیدآهنگ با در نظر گرفتن اثر J_2 به صورت زیر است [۷]:

$$\Omega_{ns} = \Omega_n - \Omega_s \quad (1)$$

$$LTAN = 12 + \frac{\Omega_{ns}}{15} \quad (2)$$

$$\dot{\Omega}_n = -\frac{3}{2} J_2 \left(\frac{R_e^2 \sqrt{\mu}}{a^2 (1-e^2)^2} \right) \cos i \quad (3)$$

$$\dot{\Omega}_s = \frac{360}{365.242 \text{ days}} \quad (4)$$

$$\Omega_n = \dot{\Omega}_s \quad (5)$$

رابطه (۵) به عنوان شرط خورشیدآهنگی مطرح است. با در نظر گرفتن رابطه (۵) به عنوان یک قید برای شرط خورشیدآهنگی،

است^۴. یکی از الزامات کلیدی در سنجش از دور، قابلیت تشخیص و مقایسه تصاویر گرفته شده در بازه‌های زمانی مشخص از یک مکان مشخص است. این الزام منجر به الزام مأموریتی «یکسان ماندن زمان محلی در تصویربرداری می‌شود» و «تکرار رد زمینی» می‌شود. به طور مشخص و متداول الزام اول از طریق استفاده از مدارهای خورشیدآهنگ قابل مرتفع شدن است. الزام دوم شرط مدار با رد زمینی تکرار شونده^۵ را به قیدهای طراحی مدار اضافه می‌نماید. این دو الزام مأموریتی برای تمامی مأموریت‌های سنجش از دور دارای اهمیت هستند. بخصوص برای آن دسته از ماهواره‌های سنجش از دور که وظیفه پایش منظم تغییرات زمین با استفاده از محموله‌های نوری در طیف مرئی را دارند الزام اول بسیار حیاتی است. به طوری که با بررسی ماهواره‌های سنجشی در طیف مرئی بیش از ۹۵ درصد از آنها در مدارهای خورشیدآهنگ مستقر هستند. این مقدار در کل ماهواره‌های سنجش از دور بیش از ۷۹ درصد است. این اعداد و ارقام نشان‌دهنده اهمیت دستیابی به مدارهای خورشیدآهنگ برای مأموریت‌های سنجش از دور است. از طرفی، تزریق مستقیم به مدار خورشیدآهنگ از هر موقعیت جغرافیایی (همانند سایت‌های پرتاب فعال ایران) امکان‌پذیر نیست و تزریق غیرمستقیم نیز غیراقتصادی و غیرمتداول است.

عدم توانایی در تزریق به مدار خورشیدآهنگ یعنی عدم امکان تصویربرداری در شرایط نوردهی یکسان، که این به معنای از دست رفتن بخش زیادی از قابلیت‌های کاربردی و سنجشی تصاویر گرفته شده خواهد بود. یکی از راه‌حل‌های جایگزین حداقلی پیشنهاد شده برای این منظور استفاده از مدارهای چند خورشیدآهنگ^۶ با رد زمینی تکرارشونده است [۱]. این نوع مدارها این امکان را فراهم می‌کنند که در دوره‌های زمانی مشخصی شرایط نوردهی و رد زمینی عیناً تکرار شده و تصاویر گرفته شده قابلیت مقایسه داشته باشند. در این مقاله به طراحی و تحلیل الزامات دستیابی به یک مدار چند خورشیدآهنگ و تحلیل حساسیت آن نسبت به عدم قطعیت‌ها در ارتفاع و شیب مداری ناشی از خطای تزریق پرتابگر پرداخته شده است.

مدارهای با خاصیت خورشیدآهنگی

مدارهایی دارای ویژگی خورشیدآهنگی هستند که نرخ چرخش صفحه مداری آنها برابر متوسط نرخ چرخش زمین به دور خورشید

۴. آمارهای ارائه شده در این مقاله بر اساس پایگاه اطلاعات گردآوری شده تا نیمه اول سال ۲۰۱۹ است و مقادیر ارائه شده فقط شامل ماهواره‌های عملیاتی سنجش از دور بدون در نظر گرفتن ماهواره‌های توسعه و اثبات تکنولوژی سنجش از دور است.

5. Repeat Ground Track Orbits (RTGO)
6. Multi Sun-Synchronous Orbit (MSSO)

ازای آن در دوره‌های زمانی مشخصی زمان محلی گذر گره صعودی/نزولی تکرار شود. به مدارهایی با چنین ویژگی، مدارهای چند خورشیدآهنگ گفته می‌شود [۱۰-۱۳].

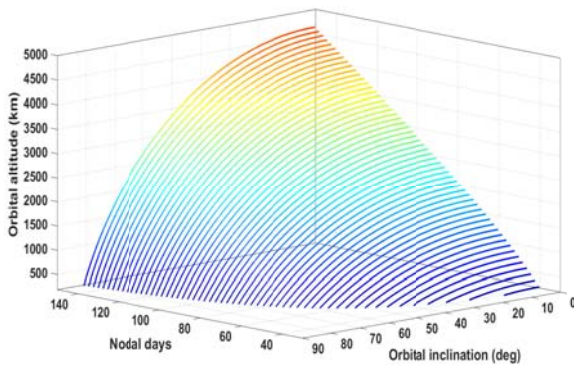
استفاده از چنین مدارهایی می‌تواند به نوعی محدودیت‌های ناشی از موقعیت جغرافیای سایت پرتاب را کاهش داده و امکان تعریف مأموریت‌های سنجش از دور در دامنه وسیعی از شیب‌های مداری را فراهم سازد [۱۰]. معادلات حاکم بر طراحی مدارهای چند خورشیدآهنگ به صورت زیر است [۱۰-۱۳]:

$$n \cdot D_n = \frac{2\pi}{|\dot{\Omega}_S - \dot{\Omega}_n|} \quad (6)$$

$$D_n = \frac{2\pi}{\omega_e - \dot{\Omega}_n} \quad (7)$$

$$n = \frac{\omega_e - \dot{\Omega}_n}{|\dot{\Omega}_S - \dot{\Omega}_n|} \quad (8)$$

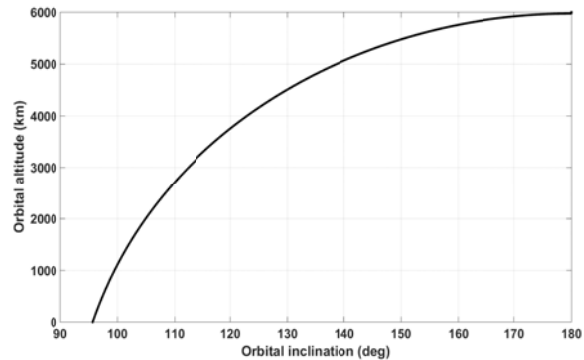
با توجه به رابطه (۶) در تعداد n روز نودال، زمان محلی تکرار می‌شود. به ازای مقادیر مختلف n با حل معادلات فوق مقادیر متناظر شیب و ارتفاع مداری برای هر تعداد روز نودال تکرار زمان محلی همانند شکل ۳ قابل استخراج است. در شکل ۳ مقادیر شیب و ارتفاع مداری به ازای تعداد روزهای نودال تکرار زمان محلی برای شیب‌های مداری کمتر از ۹۰ درجه نشان داده شده است.



شکل ۳- رابطه بین شیب و ارتفاع مداری برای دوره‌های تکرار زمان محلی مختلف

با توجه به شکل ۳ به ازای مقادیر مختلف شیب و ارتفاع مداری با طیف وسیعی از دوره‌های تکرار زمان محلی روبرو هستیم. برای مقادیر مشخص دوره‌های تکرار (برحسب روز نودال) با کاهش شیب مداری، ارتفاع مداری معادل افزایش می‌یابد و به ازای شیب مداری مشخص با افزایش دوره‌های تکرار ارتفاع مداری معادل افزایش خواهد یافت. بر اساس کاربرد تعریف شده برای تصاویر و محدودیت‌های تزریق مداری می‌توان اقدام به انتخاب دوره زمانی تکرار زمان محلی کرد [۱۰]. ارتباط بین ارتفاع مداری و تعداد روز نودال تکرار زمانی محلی برای شیب ۵۵ درجه مداری به صورت شکل ۴ است.

مقادیر شیب و ارتفاع به ازای حفظ خاصیت خورشیدآهنگی به صورت شکل ۲ به دست خواهند آمد.



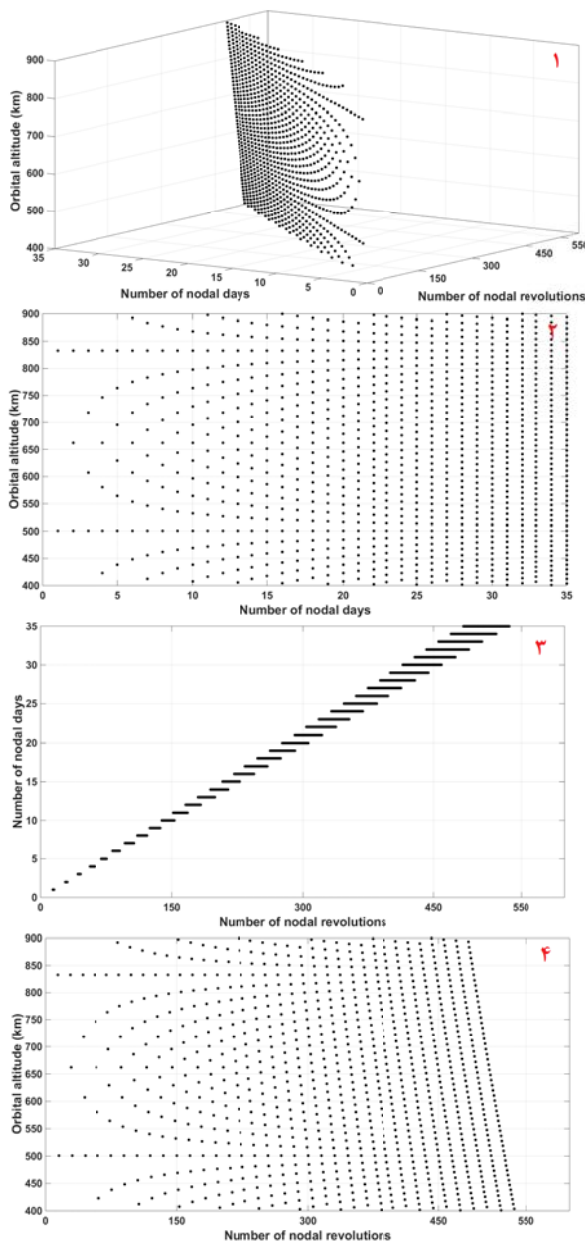
شکل ۲- رابطه بین شیب و ارتفاع مداری در مدارهای خورشیدآهنگ دایروی

همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود و در مراجع نیز ذکر شده است، حداقل شیب ممکن تئوری برای حفظ شرط خورشیدآهنگی ۹۵/۷ درجه است که به ازای ارتفاع مداری صفر نتیجه می‌شود [۸]. البته لازم به توضیح است که محدوده عملیاتی رایج برای مدارهای خورشیدآهنگ ارتفاع بین ۴۰۰ تا ۹۰۰ کیلومتر و شیب ۹۷ تا ۹۹ درجه است [۹]. مقدار شیب مداری برای حفظ شرط خورشیدآهنگی در یک مدار دایروی با ارتفاع ۵۰۰ کیلومتر حدود ۹۷/۴ درجه است، این درحالی است که با توجه به موقعیت جغرافیایی و کریدور پروازی مربوط به پایگاه‌های پرتاب فعال بومی محدوده شیب مداری قابل دستیابی در محدوده ۵۵ درجه قرار دارد. ذکر دو نکته در مورد مدارهای خورشیدآهنگ ضروری است:

- خاصیت خورشیدآهنگی مختص مدارهای دایروی نیست و به ازای مقادیر مشخصی از شیب مدار، خارج از مرکزیت مدار و نیم قطر بزرگ مدار، مدارهای بیضوی نیز می‌توانند خاصیت خورشیدآهنگی داشته باشند [۸].
- به دلیل خارج از مرکزیت مدار زمین به دور خورشید، در مدارهای خورشیدآهنگ در طول سال زمان محلی واقعی اندکی دچار تغییر می‌شود و روابط بیان شده در مراجع براساس نرخ چرخش میانگین زمین به دور خورشید یعنی ۰/۹۸۵۶ درجه بر روز بیان شده‌اند [۷].

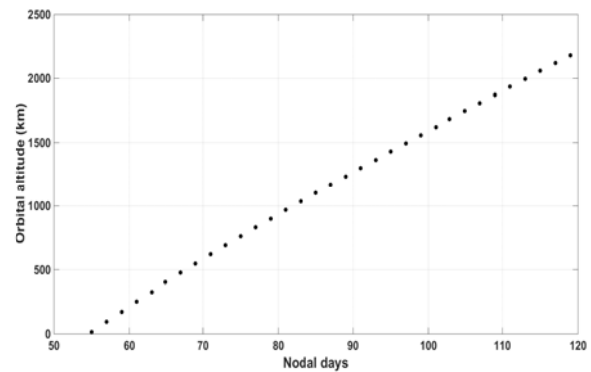
مدارهای دارای ویژگی چند خورشیدآهنگی

در مدارهای خورشیدآهنگ به ازای مقادیر معینی از شیب، ارتفاع و خروج از مرکزیت مدار، زمان محلی گذر گره صعودی/نزولی تقریباً ثابت باقی می‌ماند. که با توجه به شکل ۲ در هر صورت این ویژگی به ازای شیب‌های مداری بیش از ۹۵ درجه رخ می‌دهد. اما می‌توان مقادیر دیگری از شیب، ارتفاع و خروج مرکزیت مدار را یافت که به



شکل ۵- رابطه بین ارتفاع مداری، تکرار رد زمینی در تعداد روز نودال و تعداد دوره‌های نودال مداری برای شیب مداری ۵۵ درجه

اگر نسبت تعداد دوره نودال مداری به تعداد روز نودال عددی صحیح شود به این نوع مدار، مدار با جابجایی رد زمینی صفر^۷ گفته می‌شود. در این مدارها زمان تکرار رد زمینی برابر یک روز نودال است و به این علت که در طول یک روز نودال، تعداد صحیح دوره نودال مداری اتفاق می‌افتد، رد زمینی همیشه از موقعیت جغرافیایی مشخصی عبور می‌کند. این نوع مدارها برای برقراری ارتباط رادیویی و یارصد روزانه مناطق خاص همچون گذرگاه‌های دریایی یا مناطق حساس از زمین مناسب خواهند بود. شایان ذکر است که با استفاده



شکل ۴- رابطه بین ارتفاع مداری و دوره تکرار زمان محلی برای شیب مداری ۵۵ درجه

مدارهای دارای ویژگی تکرار رد زمینی

همانطور که پیشتر اشاره شد یکی از الزامات در کاربردهای سنجش از دور قابلیت تکرار رد زمینی در دوره‌های زمانی تعریف شده است. در واقع به منظور مقایسه و تحلیل تصاویر، بایستی تصاویر از موقعیت جغرافیایی یکسان در شرایط نوردهی یکسان گرفته شده باشند. همانند دوره تکرار زمان محلی، دوره تکرار رد زمینی مورد نیاز تابعی از نوع کاربرد تصاویر، اهمیت و نرخ تغییرات مشخصه‌های مورد سنجش، موقعیت جغرافیایی تحت پایش است. معادلات حاکم بر مدارها با رد زمینی تکرارشونده به صورت زیر است [۵، ۷، ۱۴-۱۶]:

$$T_n = \left(2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \right) \left[1 - \frac{3}{2} J_2 \left(\frac{R_e}{a} \right)^2 (3 - 4 \sin^2 i) \right] \quad (9)$$

$$mD_n = kT_n \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) مقادیر m و k اعداد صحیح هستند. با توجه به ارتفاع و شیب مداری به ازای هر تعداد m روز نودال چندین جواب برای تعداد k دوره نودال مداری وجود خواهد داشت. در شکل ۵ مقادیر m و k برای شیب مداری ۵۵ درجه به ازای ارتفاع مداری نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ (زیرشکل ۲) دیده می‌شود برای دستیابی به تعداد روزهای نودال مشخص در یک شیب مداری، گزینه‌های ارتفاع مداری مختلفی وجود خواهد داشت و به ازای تعداد روز نودال مشخص نیز تعداد دوره‌های نودال مداری مختلفی وجود خواهد داشت (شکل ۵ (زیرشکل ۳)). در نهایت برای تعداد دوره‌های نودال مداری مشخص می‌توان ارتفاع‌های مداری متفاوتی را به عنوان گزینه طراحی در اختیار داشت (شکل ۵ (زیرشکل ۴)). از طرفی، برخی جواب‌های بدست آمده برای مقادیر m و k تکراری خواهند بود، به عنوان مثال ارتفاع مداری معادل ۱۴/۵ دوره نودال مداری و یک روز نودال با ارتفاع مداری معادل ۲۹ دوره مداری و دو روز نودال یکسان است [۵].

زمین و دیگر اجرام آسمانی همگی باعث تغییر در مشخصه‌های مداری می‌شوند. برخی از این عوامل تابعی از مدت زمان مأموریت و مشخصه‌های ماهواره بوده و به مرور زمان باعث تغییر در المان‌های مداری می‌شوند. اما بعضی دیگر همچون عدم قطعیت‌های دقت تزریق در مدار وابسته به پرتابگر بوده و به‌عنوان یک پارامتر غیرقطعی در لحظه صفر مأموریتی می‌توانند مشخصه‌های مدار طراحی شده را دستخوش تغییر نمایند. عدم قطعیت‌ها در دقت تزریق شامل ارتفاع، شیب، خارج از مرکزیت و زمان محلی مدار می‌شود که عموماً با معیار سه سیگما بیان می‌شود. از میان پارامترهای بیان شده، با توجه به معادلات حاکم، شیب و ارتفاع مداری بیشترین تاثیر را روی خاصیت تکرار شونده‌گی رد زمینی و چند خورشیدآهنگی مدار دارند. از این رو، اثر عدم قطعیت‌های دقت تزریق در این دو پارامتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در جدول ۲ مقادیر عدم قطعیت‌های دقت تزریق یک پرتابگر نوعی آورده شده است.

جدول ۱- جواب‌های موجود در محدوده شیب مداری ۵۵ تا ۵۶ درجه و ارتفاع مداری ۴۷۰ تا ۵۳۰ کیلومتر

شماره	تعداد روزهای نودال تکرار زمان محلی و رد زمینی	ارتفاع مداری (کیلومتر)	شیب مداری (درجه)
۱	۶۸	۴۹۵/۹۷	۵۵/۰۹
۲	۶۸	۴۹۱/۵۵	۵۵/۱۸
۳	۶۸	۴۸۷/۱۱	۵۵/۲۷
۴	۶۸	۴۸۲/۶۶	۵۵/۳۶
۵	۶۸	۴۷۸/۲	۵۵/۴۵
۶	۶۸	۴۷۳/۷۲	۵۵/۵۴
۷	۶۹	۵۲۸/۳	۵۵/۱۶
۸	۶۹	۵۲۳/۸۵	۵۵/۲۵
۹	۶۹	۵۱۹/۳۷	۵۵/۳۴
۱۰	۶۹	۵۱۴/۸۹	۵۵/۴۳
۱۱	۶۹	۵۱۰/۴	۵۵/۵۲
۱۲	۶۹	۵۰۵/۸۹	۵۵/۶۱
۱۳	۶۹	۵۰۱/۳۷	۵۵/۷
۱۴	۶۹	۴۹۶/۸۳	۵۵/۷۹
۱۵	۶۹	۴۹۲/۲۹	۵۵/۸۸
۱۶	۷۰	۵۲۸/۶۷	۵۵/۸۶
۱۷	۷۰	۵۲۴/۰۹	۵۵/۹۵

جدول ۲- عدم قطعیت‌های موثر در پارامترهای تزریق مداری

پارامتر	تابع چگالی احتمال	مقدار پراکندگی (سه سیگما)
عدم قطعیت در ارتفاع مداری تزریق	نرمال	۲۰ کیلومتر
عدم قطعیت در شیب مداری تزریق	نرمال	۰/۱۵ درجه

از تعداد بیشتری از این نوع مدارها در قالب منظومه‌های ماهواره‌ای می‌توان به پوشش‌دهی فراگیرتری دست یافت.

طراحی مدار چند خورشیدآهنگ با رد زمینی تکرار شونده

به منظور طراحی یک مدار عملیاتی با کاربرد سنجشی در مدار غیرخورشیدآهنگ بایستی به طور همزمان سه شرط زیر را ارضاء شوند:

- ۱- مدار دارای ویژگی چند خورشیدآهنگی باشد یا به عبارتی در رابطه (۶) صدق کند.
- ۲- مدار دارای ویژگی تکرار رد زمینی باشد یا به عبارتی در رابطه (۱۰) صدق کند.
- ۳- مقدار n روز نودال تکرار زمان محلی بایستی مضرب صحیحی از مقدار m روز نودال تکرار رد زمینی باشد $[n, 1]$.

این مسئله طراحی را می‌توان در غالب یک مسئله جستجوی مقید به صورت زیر تعریف کرد:

Find all $(n \& m)$ for:

$$g_1(n, m) : n \cdot D_n \cdot (|\dot{\Omega}_s - \dot{\Omega}_n|) - 2\pi = 0$$

$$g_2(n, m) : m \cdot D_n - k \cdot T_n = 0$$

$$g_3(n, m) : n - c \cdot m = 0; c: \text{Integer}$$

$$g_4(n, m) : h_{RGT} - h_{MSS} \leq 200$$

با حل این مسئله مقید برای محدوده شیب مداری بین ۵۵ تا ۵۶ درجه و درجه و محدوده ارتفاع بین ۴۷۰ تا ۵۳۰ کیلومتر جواب‌های ممکن به صورت جدول ۱ به دست می‌آیند. این جواب‌ها با فرض گام‌های تغییر ۰/۱ درجه برای شیب مداری و محدوده اختلاف ارتفاع معادل دو خاصیت خورشیدآهنگی و تکرار شونده‌گی رد زمینی کمتر از ۲۰۰ متر بدست آمده‌اند. همانطور که در جدول ۱ مشخص است برای این محدوده از ارتفاع و شیب مداری، مدارها با ویژگی همزمان تکرار رد زمینی و زمان محلی در سه دوره ۶۸، ۶۹ و ۷۰ روز نودال قابل دستیابی هستند.

تحلیل حساسیت مدارهای چند خورشیدآهنگ با

رد زمینی تکرار شونده نسبت به

عدم قطعیت‌های ناشی از تزریق مداری

پس از تعیین مشخصات مدار مورد نظر، بایستی حساسیت آن نسبت به عدم قطعیت‌های موجود در دستیابی به مدار بررسی شود بر آن اساس تمهیدات لازم جهت تضمین دستیابی به مدار مناسب برای تصویربرداری پیش‌بینی شود. عواملی همچون خطای تزریق مداری، درگ اتمسفر، تشعشعات خورشید و عوامل اغتشاشی مربوط به کره

تحلیل اثرات عدم قطعیت در ارتفاع و شیب مداری روی ویژگی تکرار رد زمینی

جدول ۴- نمونه گزینه‌های مداری موجود در بازه عدم قطعیت در نظر گرفته شده برایشیب مداریه ازای دوره تکرار رد زمینی ۶۹ روز نودال و ۱۰۳۴ دوره نودال مداری

شیب مداری (درجه)	ارتفاع مداری (کیلومتر)	تعداد دوره نودال	تعداد روز نودال تکرار رد زمینی
۵۵/۴۶	۵۰۵/۶۸	۱۰۳۴	۶۹
۵۵/۴۹	۵۰۵/۷۱		۶۹
۵۵/۵۲	۵۰۵/۷۴		۶۹
۵۵/۵۵	۵۰۵/۷۷		۶۹
۵۵/۵۸	۵۰۵/۸۰		۶۹
۵۵/۶۱	۵۰۵/۸۳		۶۹
۵۵/۶۴	۵۰۵/۸۶		۶۹
۵۵/۶۷	۵۰۵/۸۹		۶۹
۵۵/۷۰	۵۰۵/۹۲		۶۹
۵۵/۷۳	۵۰۵/۹۵		۶۹
۵۵/۷۶	۵۰۵/۹۸		۶۹

نتایج تحلیل حساسیت ویژگی تکرار شونددگی رد زمینی نشان می‌دهد که این دستیابی به شرایط تکرار رد زمینی در تعداد مشخص روز نودال با وجود عدم قطعیت در ارتفاع و شیب مداری به ازای تصحیحات مداری اندک امکان‌پذیر خواهد بود. علت این امر وجود تعداد زیاد شرایط مداری در بازه عدم قطعیت شیب و ارتفاع مداری برای دستیابی به تعداد روزهای نودال مشخص برای دوره تکرار رد زمینی است. در جدول ۳ نمونه گزینه‌های مداری موجود در بازه عدم قطعیت در نظر گرفته شده برای ارتفاع مداری به ازای شیب ثابت برای مدار شماره ۱۲ در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۳- نمونه گزینه های مداری موجود در بازه عدم قطعیت در نظر گرفته شده برای ارتفاع مداری به ازای شیب ثابت

تعداد روز نودال تکرار رد زمینی	شیب مداری (درجه)	ارتفاع مداری (کیلومتر)	تعداد دوره نودال
۶۹	۵۵/۶۱	۴۸۳/۱۱	۱۰۳۹
۶۹		۴۸۷/۶۴	۱۰۳۸
۶۹		۴۹۲/۱۸	۱۰۳۷
۶۹		۴۹۶/۷۲	۱۰۳۶
۶۹		۵۰۱/۲۷	۱۰۳۵
۶۹		۵۰۵/۸۳	۱۰۳۴
۶۹		۵۱۰/۳۹	۱۰۳۳
۶۹		۵۱۴/۹۷	۱۰۳۲
۶۹		۵۱۹/۵۵	۱۰۳۱
۶۹		۵۲۴/۱۳	۱۰۳۰

همانطور که در جدول ۴ دیده می‌شود برای حفظ شرایط تکرار رد زمینی در هر ۶۹ روز نودال به ازای تغییر ۰/۱۵ درجه در شیب مداری به تغییر ارتفاع مداری معادل ۱۵۰ متر نیاز است. با توجه به نتایج و با بررسی معادلات مشخص می‌شود که خاصیت تکرار شونددگی رد زمینی در محدوده عدم قطعیت تزریق در شیب مداری چندان حساس نیست. همچنین، در محدوده عدم قطعیت تزریق در ارتفاع مداری نیز به علت وجود گزینه‌های مداری متعدد برای تکرار رد زمینی، با تغییر ارتفاع معادل ۲۶۵۰ متر می‌توان به مدار با خاصیت تکرار شونددگی رد زمینی در تعداد روز نودال تعیین شده دست یافت.

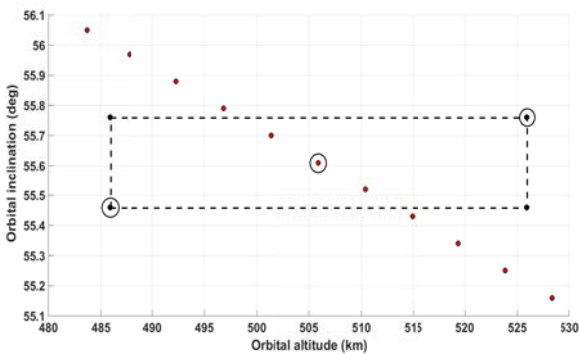
تحلیل اثرات عدم قطعیت در ارتفاع و شیب مداری روی خاصیت تکرار زمان محلی

از آنجاکه به منظور تکرار زمان محلی در تعداد روز نودال مشخص (بر خلاف ویژگی تکرار رد زمینی) به ازای هر شیب مداری فقط یک ارتفاع مداری متناظر وجود خواهد داشت. با تغییر ارتفاع مداری بایستی شیب مداری نیز تغییر نماید و با تغییر در شیب مداری بایستی ارتفاع مداری به ارتفاع مداری متناظر تغییر نماید. در جدول ۵ ارتفاع‌های متناظر به ازای بازه عدم قطعیت تزریق در شیب مداری ارائه شده است. همانطور که در جدول ۵ دیده می‌شود برای حفظ شرایط تکرار زمان محلی در هر ۶۹ روز نودال به ازای تغییر ۰/۱۵ درجه در شیب مداری به تغییر ارتفاع مداری معادل ۷/۵ کیلومتر نیاز است.

همانطور که در جدول ۳ مشهود است، به ازای شیب ثابت، گزینه‌های ارتفاع مداری برای دستیابی به مدارهایی با خاصیت تکرار رد زمینی در هر ۶۹ روز نودال با فاصله‌های کمتر از ۵ کیلومتر تکرار می‌شوند. از این رو، در بحرانی‌ترین حالت به ازای افزایش یا کاهش ارتفاع مداری به مقدار حدود ۲/۵ کیلومتر می‌توان به دوره تکرار رد زمین ۶۹ روز دست یافت. در جدول ۴ نمونه گزینه‌های مداری موجود در بازه عدم قطعیت شیب مداری به ازای دوره تکرار رد زمینی ۶۹ روز نودال و ۱۰۳۴ دوره نودال مداری و محدوده ارتفاع ۵۰۵/۸۳ کیلومتر ارائه شده است.

تحلیل اثرات عدم قطعیت در ارتفاع و شیب مداری روی ویژگی همزمان تکرار رد زمینی و زمان محلی

همانطور که پیشتر گفته شد در یک بازه مشخص از شیب و ارتفاع مداری، تعداد گزینه‌های مداری موجود دارای ویژگی تکرار رد زمینی در تعداد روز نودال مشخص بیشتر از تعداد گزینه‌های مداری موجود دارای خاصیت تکرار زمان محلی در تعداد روز نودال مشخص هستند. تعداد گزینه‌های مداری موجود در همان بازه که دارای هر دو ویژگی تکرار رد زمینی و تکرار زمان محلی در تعداد روز نودال مشخص هستند بسیار کمتر از تعداد گزینه‌های مداری دارای تنها یکی از دو ویژگی هستند. از این رو، قابل پیش‌بینی خواهد بود که دستیابی به مداری با دو ویژگی همزمان تکرار رد زمین و تکرار زمان محلی در شرایط وجود عدم قطعیت در ارتفاع و شیب مداری دشوار بوده و نیازمند انجام تصحیح‌هایی در ارتفاع و شیب مداری بیش از آنچه مورد نیاز برای دستیابی به مدارهای دارای تنها یکی از ویژگی‌ها هستند، خواهد بود. در شکل ۶ محدوده عدم قطعیت برای گزینه شماره ۱۲ در جدول ۱ و گزینه‌های مداری موجود در آن محدود شده است.



شکل ۶- محدوده عدم قطعیت برای گزینه شماره ۱۲ جدول ۱ و گزینه‌های مداری موجود در آن محدوده

همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود در بازه عدم قطعیت در نظر گرفته شده مطابق جدول ۲ گزینه‌های محدودی با ویژگی تکرار رد زمینی و زمان محلی در ۶۹ روز نودال وجود دارند (نقاط قرمز رنگ). مطابق شکل بحرانی‌ترین شرایط زمانی اتفاق خواهد افتاد که ارتفاع و شیب مدار تزریق همزمان در کران بالا یا پایین بازه عدم قطعیت در نظر گرفته شده قرار گیرند (نقاط مشکی علامت‌گذاری شده). در چنین حالتی نیازمند تصحیح ارتفاع مداری معادل ۲۹ کیلومتر و تصحیح شیب مداری معادل ۰/۰۳ درجه خواهیم بود.

جدول ۵- تغییرات شیب مداری در بازه عدم قطعیت تعیین شده و ارتفاع مداری معادل آن به منظور حفظ خاصیت تکرار زمان محلی در ۶۹ روز نودال

ارتفاع مداری متناظر (کیلومتر)	شیب مداری (درجه)	تعداد روز نودال تکرار زمان محلی
۵۱۳/۳۹	۵۵/۴۶	۶۹
۵۱۱/۸۹	۵۵/۴۹	۶۹
۵۱۰/۳۹	۵۵/۵۲	۶۹
۵۰۸/۸۹	۵۵/۵۵	۶۹
۵۰۷/۳۹	۵۵/۵۸	۶۹
۵۰۵/۸۸	۵۵/۶۱	۶۹
۵۰۴/۳۸	۵۵/۶۴	۶۹
۵۰۲/۸۷	۵۵/۶۷	۶۹
۵۰۱/۳۶	۵۵/۷۰	۶۹
۴۹۹/۸۵	۵۵/۷۳	۶۹
۴۹۸/۳۶	۵۵/۷۶	۶۹

در جدول ۶ شیب مداری متناظر با تغییرات ارتفاع در بازه عدم قطعیت تزریق ارتفاع مداری نشان داده شده است.

جدول ۶- تغییرات ارتفاع مداری در بازه عدم قطعیت تعیین شده و شیب مداری معادل آن به منظور حفظ خاصیت تکرار زمان محلی در ۶۹ روز نودال

شیب مداری متناظر (درجه)	ارتفاع مداری (کیلومتر)	تعداد روز نودال تکرار زمان محلی
۵۶/۰۱	۴۸۵/۷	۶۹
۵۵/۹۳	۴۸۹/۷۶	۶۹
۵۵/۸۵	۴۹۳/۸	۶۹
۵۵/۷۷	۴۹۷/۸۴	۶۹
۵۵/۶۹	۵۰۱/۸۷	۶۹
۵۵/۶۱	۵۰۵/۸۸	۶۹
۵۵/۵۳	۵۰۹/۸۹	۶۹
۵۵/۴۵	۵۱۳/۸۹	۶۹
۵۵/۳۷	۵۱۷/۸۸	۶۹
۵۵/۲۹	۵۲۱/۸۶	۶۹
۵۵/۲۱	۵۲۵/۸۳	۶۹

با توجه به جدول ۶ به منظور حفظ شرایط تکرار زمان محلی در دوره ۶۹ روز نودال به‌ازای تغییر ۲۰ کیلومتری در ارتفاع مدار تزریق نیازمند تغییر شیب مداری به مقدار ۰/۴ درجه خواهیم بود. با مقایسه نتایج در خواهیم یافت که بحرانی‌ترین حالت ممکن برای حفظ شرایط تکرار زمان محلی، زمانی خواهد بود که ارتفاع و شیب مدار تزریق همزمان در کران بالا یا پایین بازه عدم قطعیت در نظر گرفته شده قرار گیرند. که در این صورت با توجه به جدول‌های ۵ و ۶ برای حفظ شرایط تکرار زمان محلی در ۶۹ روز نودال نیازمند تصحیح ارتفاع مداری حدود ۲۷ کیلومتر خواهیم بود.

با در نظر گرفتن شیفت زمان محلی در هر ۶۹ روز و قید تصویربرداری در بازه زمانی ساعات ۹:۳۰ تا ۱۴:۳۰ و تعداد دوره تکرار زمان محلی در طول یک سال مأموریت، دقت تزریق مدارای بایستی در محدوده ۱/۷ کیلومتر برای ارتفاع مدارای و ۰/۰۱۵ درجه برای شیب مدارای کنترل شود.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده در این تحقیق تأیید می‌کند که در نبود امکان دسترسی به مدار خورشیدآهنگ، می‌توان به مدارهایی دست یافت که در آنها رد زمینی و شرایط نوردهی در سیکل‌های مشخصی تکرارپذیر خواهند بود و در نتیجه تصاویر گرفته شده را با توجه به زمان محلی آنها می‌توان با هدف مقایسه تصاویر و کاربردهای سنجشی در گروه‌هایی دسته‌بندی کرد.

نکته مهم دیگر حساسیت این مدار به تغییرات ارتفاع و شیب مدار است. با توجه به تعدد گزینه‌های موجود برای مدارهای با ویژگی تکرار رد زمینی، می‌توان نتیجه گرفت که دستیابی به مدارای با این ویژگی در حضور عدم قطعیت‌های مربوط به ارتفاع و شیب مدارای چندان دشوار نبوده و با بودجه اختلاف سرعت اندکی قابل دستیابی است. اما در مورد ویژگی‌های توان تکرار رد زمینی و زمان محلی با توجه به محدود شدن گزینه‌های موجود به‌منظور دستیابی به مدارای با این دو ویژگی در حضور عدم قطعیت‌های مربوط به شیب و ارتفاع مدارای نیازمند بودجه اختلاف سرعت چشمگیری به‌منظور تصحیح ارتفاع و شیب مدارای خواهیم بود. با توجه به نتایج تحلیل عدم قطعیت صورت گرفته، با در نظر گرفتن شرایط نوری قابل قبول برای تصویربرداری و عمر مأموریتی می‌توان محدوده مجاز تغییرات شیب و ارتفاع مدارای را تعیین کرد و با حفظ ارتفاع و شیب مدارای در این محدوده قابلیت اخذ تصاویر قابل مقایسه و کاربردی را حفظ کرد.

در نهایت طراحی این نوع مدارهای چند خورشیدآهنگ می‌تواند به‌عنوان یک راه حل جایگزین موقت برای توسعه قابلیت‌های سنجش از دور فضا پایه در شرایط عدم دسترسی به مدار خورشیدآهنگ مطرح باشند.

کد توسعه داده شده در این تحقیق این امکان را برای طراحان فراهم می‌نماید که با مشخص کردن محدوده ارتفاع و شیب مدارای در دسترس توسط پرتابگر، گزینه‌های مدارهای چند خورشیدآهنگ را شناسایی نموده و با در نظر گرفتن دیگر عوامل گزینه مناسب مدارای را انتخاب نمایند. از طرفی با استفاده از ابزار تحلیل حساسیت نیز می‌توان محدوده مجاز تغییرات ارتفاع و شیب مدارای را شناسایی کرده و در کنار عمر مأموریتی به‌عنوان یک الزام برای زیرسیستم پیشران در نظر گرفته شود.

اکنون به بررسی این موضوع می‌پردازیم که اگر تصحیح‌های مدارای لازم انجام نگیرد، شرایط تکرار زمان محلی به‌عنوان ویژگی با حساسیت بالا نسبت به عدم قطعیت در شیب و ارتفاع مدارای چگونه تغییر خواهد کرد. به این منظور با اعمال عدم قطعیت به ارتفاع و شیب مدار تزریق به مقدار بیان شده در جدول ۲ و انجام فرایند شبیه‌سازی مونت‌کارلو به تعداد ۱۰۰۰۰۰ مرتبه، نتایج برای سه گزینه شماره ۳، ۱۲ و ۱۷ جدول ۲ به قرار زیر حاصل می‌شود.

جدول ۷ - مقادیر تغییرات زمان محلی ناشی از عدم قطعیت شیب و ارتفاع مدارای

ارتفاع مدارای (کیلومتر)	شیب مدارای (درجه)	مقدار شیفت زمان محلی (معیار سه سیگما)
۴۸۷/۱۱	۵۵/۲۷	۸۴۵ دقیقه در ۶۸ روز نودال
۵۰۵/۸۵	۵۵/۶۱	۸۵۳ دقیقه در ۶۹ روز نودال
۵۲۴/۱۲	۵۵/۹۵	۸۶۱ دقیقه در ۷۰ روز نودال

همانطور که در جدول ۷ مشهود است، در صورت در نظر نگرفتن تمهیدات لازم برای کنترل عدم قطعیت‌های دقت تزریق مدارای، شیفت زمان محلی بعد از یک سیکل تکرار ۶۹ روزه طور غیرقابل قبولی تا مقدار ۸۵۰ دقیقه می‌تواند افزایش یابد و در عمل خاصیت تکرار زمان محلی و در نتیجه قابلیت تصویربرداری در شرایط نوری یکسان در هر سیکل تکرار از بین خواهد رفت. به بیان دیگر، اگر در سیکل تکرار اول زمان محلی ساعت ۹ صبح بوده است، در سیکل تکرار بعدی که ۶۹ روز نودال بعد رخ خواهد داد زمان محلی ساعت ۲۳:۱۶ دقیقه خواهد بود. در حالی که بر اساس ویژگی مدار چند خورشیدآهنگ طراحی شده، بایستی این مقدار برابر زمان محلی سیکل قبلی یعنی ساعت ۹ صبح می‌بود. لازم به توضیح است که با توجه به اینکه در این تحقیق تمرکز بر روی لحظه صفر مأموریتی و اثرات خطای تزریق پرتابگر بوده است نتایج جدول ۷ بدون لحاظ کردن اثرات دینامیک اغتشاشات ناشی از زمین و اجرام آسمانی، تشعشعات خورشید، درگ اتمسفر و دیگر عوامل موثر بر پارامترهای مدارای که در طول مأموریت ماهواره‌روی مدار اثر می‌نمایند، حاصل شده است.

تعیین محدوده قابل قبول برای تغییر زمان محلی، تابعی از مأموریت ماهواره و مشخصه‌های محموله اپتیکی است. هرچه عمر مأموریتی ماهواره بیشتر باشد و یا بازه زمانی مناسب برای تصویربرداری محموله کوتاه‌تر باشد، محدوده قابل قبول شیفت زمان محلی در هر سیکل تصویربرداری باریک‌تر و در نتیجه محدوده عدم قطعیت‌های دقت تزریق مدارای محدودتر خواهد شد. به عنوان مثال، برای یک مأموریت سنجشی با عمر یک سال و سیکل تصویربرداری ۶۹ روز در بازه زمانی ۹:۳۰ تا ۱۴:۳۰ عدم قطعیت‌های

- [8] M. Capderou, *Handbook of satellite orbits: From kepler to GPS*: Springer Science & Business, 2014.
- [9] K. Bilimoria and R. Krieger, "Slot architecture for separating satellites in sun-synchronous orbits," in *AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition*, 2011, p. 7184.
- [10] R. Sandau, H.-P. Roeser, and A. Valenzuela, "Small satellite missions for earth observation," *New Developments and Trends*, 2010.
- [11] D. Mortari, M. P. Wilkins, and C. Bruccoleri, "On sun-synchronous orbits and associated constellations," in *Paper of the 6-th Dynamics and Control of Systems and Structures in Space Conference, Riomaggiore, Italy*, 2004, p. 43.
- [12] E. Ortore, C. Circi, C. Olivieri, and M. Cinelli, "Multi-sunsynchronous orbits in the solar system," *Earth, Moon, and Planets*, vol. 111, no. 3, pp. 157-172, 2014.
- [13] C. Circi, E. Ortore, F. Bunkheila, and C. Olivieri, "Elliptical multi-sun-synchronous orbits for Mars exploration," *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, vol. 114, no. 3, pp. 215-227, 2012.
- [14] X. Fu, M. Wu, and Y. Tang, "Design and maintenance of low-Earth repeat-ground-track successive-coverage orbits," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 35, no. 2, pp. 686-691, 2012.
- [15] S. W. Paek and S. Kim, "Space-based Earth remote sensing: Part 1. Satellite orbit theory," *Satellite Oceanography and Meteorology*, vol. 3, Issue 2, pp. 1-11, 2018.
- [16] X. Luo, M. Wang, G. Dai, and X. Chen, "A novel technique to compute the revisit time of satellites and its application in remote sensing satellite optimization design," *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2017, no. 6, pp. 1-6, 2017.

به‌عنوان ادامه و تکمیل این پژوهش، موضوع انتخاب مشخصه‌های مداری بهینه با در نظر گرفتن ابعاد و جرم ماهواره، عمر مأموریتی ماهواره، محدوده زمانی تصویربرداری، اغتشاشات مداری موجود در طول عمر مأموریتی ماهواره و الزامات مربوط به زیرسیستم‌های پیش‌رانش و مخابرات، پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- [1] C. Olivieri and L. Anselmo, "Multi-sun-synchronous (MSS) orbits for earth observation," *Astrodynamics 1991*, pp. 123-133, 1992.
- [2] C. D. Noyes, "Characterization of the Effects of a Sun-Synchronous Orbit Slot Architecture on the Earth's Orbital Debris Environment," Master Thesis, The Faculty of California Polytechnic State University San Luis Obispo, 2013.
- [3] G. R. Hintz, *Orbital mechanics and astrodynamics*: Springer, 2015.
- [4] Y. Zhang, Y. Xu, and H. Zhou, *Theory and Design Methods of Special Space Orbits*: Springer, 2017.
- [5] E. Watson, "Sun-synchronous orbit slot architecture analysis and development," M.Sc. Thesis, The Faculty of California Polytechnic State University San Luis Obispo 2012.
- [6] M. Capderou, *Satellites: Orbits and missions*: Springer Science & Business Media, 2006.
- [7] C.-Y. Wang, "Celestial mechanics and astrodynamics: theory and practice, by P. Gurfil and PK Seidelmann: Scope: textbook. Level: postgraduate, researcher, scientist," ed: Taylor & Francis, 2017.