

Effects of Solar Activities, Drag Coefficient and Atmospheric Wind on Altitude Loss of a LEO Satellite

T. Abdollahi^{1,*}, A. Jahangirian² and A. Naghash²

1. Iranian Space Agency
2. Amirkabir Univ. of Tech.

* Iranian Space Agency
t-abdollahi@itrc.ac.ir

In this paper, the effects of future solar activities, drag coefficient and atmospheric wind on altitude loss and life time of a LEO satellite is investigated. For this purpose, an orbit propagator is used whose results have been verified by STK software. To analyze the satellite position, the effect of no spherical earth is also considered. In this investigation, simulation of the atmosphere, estimation of wind, and prediction of future solar activity have been implemented using MSIS-90, HWM-93, and 13-month Zurich smoothed models, respectively. Our investigation shows that the effect of future solar activity on satellite life time is a function of the predicted percentile. The effect of drag coefficient is almost linear while the effect of atmospheric wind is a function of inclination.

Keywords: Nonsingular parameters, MSIS-90 model, HWM-93 model, 13-month Zurich smoothed indices, Satellite tool kit

بررسی تأثیر فعالیت‌های خورشیدی، ضریب پسا و جریان‌های اتمسفری بر نرخ کاهش ارتفاع یک ماهواره کم‌ارتفاع

ط. عبدالهی^{۱*}، ع. جهانگیریان^۲ و ا. نقاش^۲

۱. سازمان فضایی ایران

۲. دانشگاه صنعتی امیرکبیر

* سازمان فضایی ایران

t-abdollahi@itrc.ac.ir

در این مقاله تخمین فعالیت‌های آتی خورشیدی، ضریب پسا و جریان‌های اتمسفری بر نرخ کاهش ارتفاع و عمر مداری یک ماهواره کم‌ارتفاع بررسی می‌شود. برای این منظور از تخمین‌گر مداری استفاده شده که صحت عملکرد آن توسط نرم‌افزار Satellite Tool Kit شده است. در تحلیل موقعیت از پارامترهای غیرتکین مدار استفاده شده و با توجه به ارتفاع پروازی ماهواره‌های کم‌ارتفاع، شتاب اغتشاشی ناشی از توزیع غیرکروی جرم زمین محاسبه شده است. در این تحقیق تخمین چگالی اتمسفر توسط مدل MSIS-90، شبیه‌سازی جریان‌های اتمسفری توسط مدل HWM-93 و پیش‌بینی فعالیت‌های آتی خورشیدی توسط نمایه‌های سیزده‌ماهه هموار زوریخی انجام شده است. بررسی انجام‌شده نشان می‌دهد که تخمین فعالیت‌های آتی خورشیدی بر عمر ماهواره تابعی از پرستابیل پیش‌بینی بوده و ضریب پسا خطی است در حالی که جریان‌های اتمسفری تابعی از مدار است.

واژه‌های کلیدی: تخمین‌گر مدار، پارامترهای غیرتکین مدار، مدل چگالی MSIS-90، مدل باد HWM-93، نمایه‌های سیزده‌ماهه هموار زوریخی

مقدمه

در طبقه‌بندی ماهواره‌ها از لحاظ ارتفاع، عموماً ماهواره‌هایی را که ارتفاع پروازی آنها کمتر از ۱۰۰۰ کیلومتر است، ماهواره‌های کم‌ارتفاع^۱ می‌نامند. امروزه پیش‌بینی نرخ کاهش ارتفاع ماهواره‌های کم‌ارتفاع یکی از موضوعات بسیار مهم و پیچیده در پروژه‌های فضایی است که اطلاع از آن باعث تخمین عمر مدار ماهواره شده و با توجه به این نرخ کاهش و مأموریت در نظر گرفته شده برای ماهواره ضرورت کنترل یا عدم نیاز به کنترل مدار مشخص می‌گردد. در ضمن، اطلاع از نرخ کاهش ارتفاع ماهواره، برای انتخاب عملگر مناسب جهت کنترل یا اصلاح موقعیت ضروری است. پیش‌بینی دقیق نرخ کاهش ارتفاع یک ماهواره به

علت عدم قطعیت‌های موجود در محاسبه ضریب پسا، تخمین چگالی در اتمسفر فوقانی، جریان‌های اتمسفری، فعالیت‌های آتی خورشیدی و اغتشاشات مداری دارای پیچیدگی‌های زیادی است [۱]. لذا در این تحقیق پس از تخمین دقیق موقعیت با احتساب اغتشاشات مداری مؤثر در ارتفاع پروازی ماهواره‌های کم‌ارتفاع، تخمین فعالیت‌های آتی خورشیدی، تغییر ضریب پسا و مدل‌سازی جریان‌های اتمسفری بر نرخ کاهش ارتفاع ماهواره بررسی می‌گردد.

در این تحقیق جهت تخمین موقعیت از تخمین‌گر مداری^۲ استفاده شده که صحت عملکرد آن توسط نرم‌افزار STK شده است. برای این منظور در ابتدا با توجه به محدودیت موجود در

بهره می‌برد. اولین نسخه از این مدل در سال ۱۹۷۷ با نام MSIS-77 منتشر شد و در ادامه با افزایش اطلاعات ماهواره‌های هواشناسی و ایستگاه‌های اندازه‌گیر زمینی این مدل اصلاح شده و مدل‌های MSIS-83 و MSIS-86 منتشر گردید. در این تحقیق از آخرین نسخه این مدل یعنی MSIS-90 استفاده شده که قادر به محاسبه چگالی تا ارتفاع ۱۰۰۰ کیلومتری بوده و تغییرات فصلی، عرضی، روزانه و سالانه مشاهده شده در چگالی را دربر می‌گیرد [۴].

در این مقاله به منظور تخمین جریان‌های اتمسفری از مدل تجربی HWM-93^۵ استفاده شده که نظیر مدل MSIS-90 علاوه بر بررسی ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی، تشعشعات ماورای بنفش خورشید و توفان‌های ژئومغناطیسی، از روز مورد نظر در سال، زمان مرجع جهانی^۶ و زمان محلی ظهور خورشید^۷ به منظور شبیه‌سازی تغییرات اتمسفر با زمان استفاده می‌کند. اولین مدل از این کلاس با نام HWM-87 در سال ۱۹۸۷ به کمک داده‌های حاصل از ماهواره‌های هواشناسی منتشر شد که ارتفاعات بالای ۲۲۰ کیلومتری را پوشش می‌داد. بعدها با گنجانیدن اطلاعات حاصل از ایستگاه‌های زمینی و استفاده از روش‌های آماری، مدل HWM-93 منتشر گردید که قادر به تخمین داده‌های اتمسفری از سطح زمین تا ارتفاع ۲۰۰۰ کیلومتری است [۵].

چگالی و سرعت باد در اتمسفر فوقانی تابعی از سطح فعالیت‌های آتی خورشیدی است لذا در این بررسی از پیش‌بینی‌های آماری بلندمدت (سالانه) و کوتاه‌مدت (ماهانه) نمایه‌های هموار سیزده‌ماهه زوریخی ژئومغناطیسی دامنه روزانه سیاره‌ای^۸ و شار رادیویی خورشیدی^۹ که توسط مرکز پرواز فضایی مارشال ارائه شده، استفاده شده است [۶].

تخمین گر مدار

چون در مدارات دایروی و استوایی، تغییر پارامترهای کپلری مدار در اثر اغتشاشات دارای نقاط تکین است و مشتق این پارامترها برحسب زمان قابل محاسبه نیست، لذا در تحلیل موقعیت به منظور بررسی اغتشاشات، از پارامترهای غیرتکین مدار استفاده شده است.

این پارامترها برخلاف بردارهای سرعت و مکان ماهواره، فقط در اثر نیروهای اغتشاشی تغییر کرده و برخلاف پارامترهای کپلری، فاقد نقاط تکین در مدارهای دایروی و استوایی‌اند. این پارامترها برخلاف

نرم‌افزار STK از مدل‌سازی جریان‌های اتمسفری و تخمین فعالیت‌های آتی خورشیدی صرف‌نظر شده و در محیط Matlab/Simulink تخمین گر مداری تهیه شد که با توجه به ارتفاع پروازی ماهواره‌های کم‌ارتفاع شتاب اغتشاشی ناشی از نیروی پسا و توزیع غیرکروی جرم زمین را محاسبه می‌کرد تا پس از مقایسه نتایج و اطمینان از صحت عملکرد تخمین گر مدار تهیه شده، مدل‌سازی چگالی با تخمین فعالیت‌های آتی خورشیدی و محاسبه شتاب اغتشاشی ناشی از نیروی پسا با مدل‌سازی جریان‌های اتمسفری انجام شده و آنها بر عمر مدار یک ماهواره کم‌ارتفاع بررسی گردد. چون محاسبه ضریب پسا مستلزم تعیین وضعیت ماهواره و حل معادله بولتزمن است لذا در این مقاله این ضریب محاسبه نشده و مقادیر ثابت آن بر عمر مدار یک ماهواره بررسی شده است.

در تخمین گر مدار تهیه شده برای این تحقیق، در تحلیل موقعیت به جای انتگرال‌گیری از بردارهای سرعت و موقعیت، از پارامترهای غیرتکین مدار^۱ استفاده شده است زیرا موقعیت و سرعت ماهواره، هم در اثر نیروی گرانشی زمین و هم در اثر نیروی اغتشاشی تغییر می‌کنند در حالی که پارامترهای مدار فقط در اثر نیروهای اغتشاشی تغییر می‌کنند و نرخ تغییر کمتری نسبت به موقعیت و سرعت دارند. با استفاده از این ویژگی می‌توان با بزرگ‌تر گرفتن گام‌های دیفرانسیلی، در زمان محاسبات صرفه‌جویی کرد [۲]. در این مقاله محاسبه شتاب اغتشاشی ناشی از توزیع غیرکروی جرم زمین با توسعه روش ارائه شده در مرجع [۳] تا ضریب هارمونیک منطقه‌ای درجه پنج^۲ با مقادیر محاسبه شده توسط مدل World Geodetic Survey 1984 انجام گرفته است.

یکی از مشکلات اساسی در محاسبه نیروی پسا، محاسبه چگالی است. زیرا در اتمسفر فوقانی زمین، چگالی علاوه بر ارتفاع، تابعی از طول و عرض جغرافیایی و فعالیت‌های خورشیدی بوده و در طول سال و حتی شب و روز تغییر می‌کند. به همین منظور در این مقاله به منظور تخمین چگالی از مدل MSIS^۳ استفاده شده که علاوه بر بررسی ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی، تشعشعات ماورای بنفش خورشیدی و توفان‌های ژئومغناطیسی، از تاریخ مورد نظر به منظور شبیه‌سازی تغییرات چگالی با زمان نیز استفاده می‌کند. این مدل برخلاف مدل ژاکچی^۴ که برای محاسبه چگالی از سرعت بالای رایانه‌های امروزی و حل معادلات حاکم بر رفتار گاز استفاده می‌کند از یک مخزن اطلاعاتی وسیع برای محاسبه چگالی

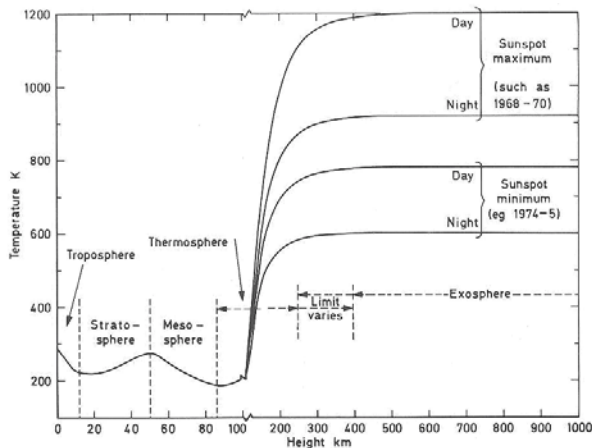
5. Horizontal Wind Model
 6. Greenwich Mean Time
 7. Local Apparent Solar Time
 8. 13-month Zurich Smoothed Planetary Daily Amplitude Geomagnetic Indices
 9. 13-month Zurich Smoothed Planetary Solar Radio Flux Indices

1. Nonsingular Parameters
 2. Zonal Harmonic Coefficient of Degree 5
 3. Mass Spectrometer and Incoherent Scatter
 4. Jacchia

۲۴. هموسفر^۷ که از سه بخش تروپوسفر^۸ (۰ تا ۱۲ کیلومتر)، استراتوسفر^۹ (۱۲ تا ۵۰ کیلومتر) و مزوسفر^{۱۰} (۵۰ تا ۹۰ کیلومتر) تشکیل شده است.

۲۵. ترموسفر^{۱۱} که از ۹۰ تا ۲۵۰ یا ۴۰۰ کیلومتری (متناسب با سطح فعالیت‌های ژئومغناطیسی و خورشیدی) توسعه یافته است.

۲۶. اگزوسفر^{۱۲} که پس از ترموسفر آغاز شده و در فضا امتداد می‌یابد.



شکل ۱. دمای میانگین اتمسفر تا ارتفاع ۱۰۰۰ کیلومتری [۱]

هموسفر به علت جریان‌های اتمسفری، ترکیبی نسبتاً همگن با نسبت حجمی ۷۸٪ از نیتروژن (N_2)، ۲۰٪ از اکسیژن (O_2) و ۱٪ از آرگون (Ar) است. در این ناحیه طبق شکل ۱ با افزایش ارتفاع دما از ۲۹۰ کلوین در سطح دریا تا ۲۲۰ کلوین در انتهای تروپوسفر کاهش می‌یابد. سپس به علت جذب تشعشعات ماورای بنفش خورشید توسط لایه ازن تا یک ماکزیمم موضعی در انتهای استراتوسفر (۲۸۰ کلوین) افزایش یافته و سپس تا یک مینیمم موضعی دیگر در انتهای مزوسفر (۱۵۰ کلوین) کاهش می‌یابد [۱].

با آغاز ترموسفر، اثر پخشی جریان‌های اتمسفری کاهش یافته و گرادیان دما و جاذبه پروفیل غلظت ذرات O_2 ، N_2 ، O ، He ، H و Ar را در اتمسفر تعیین می‌کند. پروفیل دما در این ناحیه از یک مقدار نسبتاً ثابت در انتهای مزوسفر آغاز شده و به سرعت تا ابتدای اگزوسفر (۲۵۰ تا ۴۰۰ کیلومتر) به یک مقدار حدی (T_∞) که دیگر تابعی از ارتفاع نیست، افزایش می‌یابد. این ارتفاع و دمای حدی تابعی از انرژی دریافت‌شده از فضا بوده و این انرژی

پارامترهای کپلری فاقد مفهوم فیزیکی بوده و طبق رابطه (۱) توسط پارامترهای کپلری تعریف می‌شوند [۷]:

$$\begin{aligned} a &= a & h &= e \sin(\omega + \Omega) \\ k &= e \cos(\omega + \Omega) & p &= \tan(i/2) \sin(\Omega) \\ q &= \tan(i/2) \cos(\Omega) & \lambda &= M + \omega + \Omega \end{aligned} \quad (1)$$

در این رابطه a نیم‌قطر اصلی^۱، e خروج از مرکز^۲، i زاویه^۳ طول سماوی گره صعود^۴، ω زاویه^۵ حضیض و M آنومالی متوسط^۶ است. در این صورت برای محاسبه پارامترهای کپلری از پارامترهای غیرتکین از رابطه (۲) استفاده می‌شود [۷].

$$\begin{aligned} a &= a \\ e &= (h^2 + k^2)^{1/2} \\ i &= 2 \tan^{-1}(p^2 + q^2)^{1/2} \\ \Omega &= \tan^{-1}(p/q) \\ \omega &= \tan^{-1}(h/k) - \tan^{-1}(p/q) \\ M &= \lambda - \tan^{-1}(h/k) \end{aligned} \quad (2)$$

در این تحقیق تغییر پارامترهای غیرتکین مدار در اثر شتاب‌های اغتشاشی طبق معادلات گوس موجود در مرجع [۲]، شتاب اغتشاشی ناشی از توزیع غیرکروی جرم زمین طبق روش به کار رفته در مرجع [۸] و شتاب اغتشاشی ناشی از نیروی پسا (\bar{A}_d) طبق رابطه (۳) محاسبه شده است.

$$\bar{A}_d = -\frac{1}{2} C_d S_r \rho \frac{V \bar{V}}{m} \quad (3)$$

در این رابطه ρ چگالی، V سرعت نسبی بین ماهواره و اتمسفر، C_d ضریب پسا، S_r سطح مرجع پسا و m جرم ماهواره است.

نمای کلی اتمسفر فوقانی

مطالعات انجام‌شده در مورد اتمسفر فوقانی زمین نشان می‌دهد که گرادیان چگالی اجزای گوناگون تشکیل‌دهنده اتمسفر متفاوت بوده و به منظور محاسبه دقیق چگالی می‌بایست توزیع اجزای تشکیل‌دهنده اتمسفر لحاظ شده و تغییرات دمای آنها مشخص گردد. به همین منظور اتمسفر زمین طبق شکل ۱ به سه ناحیه زیر تقسیم می‌گردد [۱]:

7. Homosphere
8. Troposphere
9. Stratosphere
10. Mesosphere
11. Thermosphere
12. Exosphere

1. Semi Major Axis
2. Eccentricity
3. Inclination
4. Right Ascension of Ascending Node
5. Argument of the Perigee
6. Mean Anomaly

روزه می‌شوند. با وجود در دسترس بودن اطلاعات فراوان حاصل از اندازه‌گیری چگالی، فرایند فیزیکی این تغییرات به‌خوبی شناخته نشده است. با وجود این، برهم‌کنش بادهای خورشیدی با میدان مغناطیسی زمین نقش اساسی در اغتشاشات ایجادشده در میدان مغناطیسی زمین ایفا می‌کند [۴].

به منظور بررسی کمی این تغییرات از نمایه‌های ژئومغناطیسی متفاوتی استفاده می‌گردد که نشانگر میزان تغییرات در میدان مغناطیسی زمین در مقایسه با یک روز آرام‌اند، که این روز به‌عنوان مبنا انتخاب شده است. نمایه ژئومغناطیسی سه ساعته محلی^۳ یا K عددی صحیح بین ۰ تا ۹ و متناسب با بیشترین انحراف مشاهده‌شده در میدان مغناطیسی زمین در مقایسه با روز مبناست. چون این انحراف در نقاط گوناگون متفاوت است، این نمایه مقداری محلی بوده و در ۱۳ رصدخانه گوناگون که در عرض ۴۴ تا ۶۰ درجه واقع‌اند، اندازه‌گیری می‌گردد. در هر روز با آغاز زمان مرجع جهانی در بازه‌های سه ساعته، مغناطیس‌سنج‌های موجود در این رصدخانه‌ها، بیشترین انحراف مشاهده‌شده را در مقایسه با منحنی ثبت‌شده برای روز مبنا، ثبت کرده و طبق جدول ۱ آن را به کدهای K تبدیل می‌کنند. با میانگین‌گیری وزنی از این مقادیر محلی، نمایه ژئومغناطیسی سه ساعته سیاره‌ای^۴ یا K_p به دست می‌آید [۹].

جدول ۱. نحوه تولید کدهای K [۱۰]

K	nT	K	nT
۰	۰-۵	۵	۷۰-۱۲۰
۱	۵-۱۰	۶	۱۲۰-۲۰۰
۲	۱۰-۲۰	۷	۲۰۰-۳۳۰
۳	۲۰-۴۰	۸	۳۳۰-۵۰۰
۴	۴۰-۷۰	۹	>۵۰۰

چون نمایه K عددی شبه‌لگاریتمی است، با میانگین‌گیری از مقادیر سه ساعته نمی‌توان به مقدار روزانه رسید. لذا در هر بازه سه ساعته، نمایه K محاسبه‌شده در هر رصدخانه طبق جدول ۲ به مقدار معادل a ، که نمایه ژئومغناطیسی دامنه سه ساعته محلی^۵ است، تبدیل می‌گردد. در هر رصدخانه با میانگین‌گیری از ۸ نمایه a تولیدشده در یک روز، نمایه ژئومغناطیسی دامنه روزانه محلی^۶ یا A به دست می‌آید. به طور مشابه، با میانگین‌گیری وزنی از مقادیر a یا A محاسبه‌شده در رصدخانه‌های گوناگون می‌توان به نمایه ژئومغناطیسی دامنه سه ساعته سیاره‌ای یا a_p و نمایه ژئومغناطیسی

عمدتاً ناشی از جذب تشعشعات ماورای بنفش خورشید توسط اکسیژن اتمی است، به گونه‌ای که متناسب با سطح فعالیت‌های خورشیدی بین ۶۰۰ تا ۲۰۰۰ کلوین در نوسان است [۱].

در ارتفاع ۴۰۰ کیلومتری و بالاتر از آن، مسیر آزاد متوسط مولکول‌ها به اندازه‌ای افزایش می‌یابد که سبک‌ترین عضو اتمسفر، H - که در این ارتفاع از غلظت بالایی برخوردار است - می‌تواند با رسیدن به سرعت گریز، از میدان جاذبه زمین خارج گردد. لذا این ناحیه را اگر سفر می‌نامند. با مشخص شدن دمای حدی این ناحیه می‌توان پروفیل دمای اتمسفر را مشخص کرد؛ این واقعیت اهمیت این دما را در مدل‌سازی اتمسفر نشان می‌دهد [۱].

تشعشعات خورشیدی سه تأثیر عمده بر اتمسفر فوقانی زمین دارند. اولین اثر ناشی از گرمایش حاصل از تشعشعات ماورای بنفش خورشید (طول موج ۱۰۰ nm تا ۳۰۰ nm) بوده و باعث تغییرات روزانه در چگالی اتمسفر می‌گردد، به گونه‌ای که ماکزیمم مقدار چگالی دو ساعت بعد از ظهر محلی و تقریباً در عرض جغرافیایی حاصل از خط واصل خورشید و مرکز زمین مشاهده می‌گردد، در حالی که مینیمم مقدار آن سه ساعت بعد از نیمه‌شب و تقریباً در منفی عرض جغرافیایی ماکزیمم مقدار چگالی رخ می‌دهد. بدین ترتیب این تغییرات در چگالی تابعی از عرض جغرافیایی است [۴].

اثر دیگر ناشی از تشعشعات ماورای بنفش، فرکانس بالای خورشید^۲ با طول موج ۱۰ nm تا ۱۰۰ nm بوده و دارای یک پریود کوتاه ۲۷ روزه ناشی از چرخه دوران خورشید و یک پریود بلندمدت ۱۱ ساله به علت چرخه لکه‌های خورشیدی است. این لکه‌ها دارای دمای کمتری در مقایسه با سایر نقاط خورشید بوده و افزایش تعداد آنها باعث افزایش تشعشعات خورشیدی می‌گردد. مطالعات نشان می‌دهد که تغییرات ایجادشده در شار رادیویی خورشید تابعی از تشعشعات ماورای بنفش فرکانس بالای خورشید است. لذا برای بررسی میزان این تشعشعات، تشعشعات خورشیدی دارای طول موج 10^7 cm یا فرکانس ۲۸۰۰ MHz را که جزء امواج رادیویی بوده و در سطح زمین قابل اندازه‌گیری است، بررسی می‌کنند. بدین ترتیب نمایه تشعشع 10^7 cm که با $F_{10.7}$ نشان داده می‌شود، برای اندازه‌گیری اثر تشعشعات ماورای بنفش فرکانس بالا معرفی می‌گردد که واحد آن $10^{-22} \text{ W/m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ Jansky}$ است [۴].

در پایان، اثر سوم معرفی می‌گردد، که ناشی از بادهای خورشیدی بوده و باعث تغییراتی اندک در چگالی اتمسفر می‌گردد. تأثیر توفان‌های ژئومغناطیسی بر لایه ترموسفر در طول سال‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. این توفان‌ها باعث تغییرات در ترکیب شیمیایی اتمسفر، افزایش دما و چگالی در یک بازه زمانی یک یا دو

3. Local Three-hourly Geomagnetic Index
4. Planetary Three-hourly Geomagnetic Index
5. Local Three-hourly Amplitude Geomagnetic Index
6. Local Daily Amplitude Geomagnetic Index

1. Mean Free Path
2. Extreme Ultraviolet Radiation of the Sun

پروفیل غلظت اجزاء، منحصرأ در اثر جاذبه زمین و پخش مولکولی توسعه می‌یابد. لذا داریم [۵]:

$$\frac{1}{n_i} \frac{dn_i}{dh} + \frac{1}{H_i} + \frac{1 + \alpha_i}{T} \frac{dT}{dh} = 0 \quad (4)$$

که در رابطه (۴) i از ۱ تا ۷ تغییر کرده و به ترتیب نماینده N_2 ، O_2 ، Ar ، O ، He ، H و N است. T دمای محلی، n_i دانسیته عددی جزء i ام، H_i مقیاس ارتفاع جزء i ام و α_i ضریب پخش گرمایی جزء i ام است. در ضمن برای $T(h)$ داریم [۵]:

$$T = T_\infty - (T_\infty - T_{120}) \exp[-s(h - h_{120})] \quad (5)$$

که در رابطه (۵) T_∞ بیانگر شرایط در آغاز لایه اگزوسفر، T_{120} بیانگر شرایط در ارتفاع ۱۲۰ کیلومتری و s پارامتر گرادیان دماست. به کمک روابط (۴) و (۵) داریم [۵]:

$$n_i = n_{i,120} \exp(-\sigma\gamma_i z) \{ (1 - c) / (1 - c \exp(-\sigma z)) \}^{1 + \alpha_i + \gamma_i} \quad (6)$$

$$T = T_\infty [1 - c \exp(-\sigma z)] \quad (7)$$

که برای محاسبه مقادیر c ، σ ، γ_i و z از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$z = (h - h_{120})(R_e + h_{120}) / (R_e + h)$$

$$c = 1 - T_{120} / T_\infty$$

$$\sigma = s + (R_e + h_{120})^{-1}$$

$$\gamma_i = 1 / (H_i \sigma)$$

$$H_i = \bar{R}T / (M_i g)$$

که در روابط فوق M_i جرم مولکولی ذرات تشکیل‌دهنده اتمسفر، R_e شعاع زمین، g ثابت شتاب جاذبه و \bar{R} ثابت جهانی گازها بوده و T_∞ ، T_{120} ، $n_{i,120}$ و s تابعی از ۹ پارامتر اولیه‌اند که توسط ضرایب موجود در مدل به داده‌های اندازه‌گیری شده منطبق می‌شوند. بدین ترتیب با محاسبه این مقادیر چگالی و فشار محلی طبق روابط زیر محاسبه می‌گردد [۵]:

$$\rho = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^7 n_i M_i \quad (8)$$

دامنه روزانه سیاره‌ای یا A_p رسید که واحد a_p و A_p و $2nT$ بوده و دامنه تغییراتش در مقایسه با میدان مغناطیسی زمین که در حدود 30000 nT است، ۰ تا 800 نانوتسلا است. در جدول ۳ مقادیر ماکزیمم، متوسط و مینیمم نمایه شار رادیویی خورشیدی روزانه ($F_{10.7}$) و متوسط آن در بازه ۸۱ روزه ($F_{10.7A}$) و نمایه ژئومغناطیسی سه ساعته سیاره‌ای (K_p) مشاهده می‌گردد [۹].

جدول ۲. رابطه بین نمایه‌های a و K [۱۰]

K	a(2nT)	K	a(2nT)
۰	۰	۵	۴۸
۱	۳	۶	۸۰
۲	۷	۷	۱۴۰
۳	۱۵	۸	۲۴۰
۴	۲۷	۹	۴۰۰

جدول ۳. مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر نمایه‌های $F_{10.7}$ ، $F_{10.7A}$ و K_p [۴]

	$F_{10.7} (10^4 \text{ Jn})$	$F_{10.7A} (10^4 \text{ Jn})$	K_p
حداقل	۷۰	۷۰	۰
متوسط	۲۰۰	۱۵۵	۴
حداکثر	۳۳۰	۲۴۰	۸

مدل چگالی MSIS-90

طبق این مدل دانسیته عددی ذرات تشکیل‌دهنده اتمسفر، دما، فشار و چگالی آن تابعی از ۹ پارامتر h (ارتفاع)، ϕ (عرض جغرافیایی)، t_{is} (زمان محلی ظهور خورشید)، t_{ut} (زمان مرجع جهانی)، θ (طول جغرافیایی)، t_d (روز مورد نظر در سال با شروع از اول ژانویه)، $F_{10.7}$ (نمایه شار رادیویی روزانه خورشیدی با طول موج 10.7 cm)، $F_{10.7A}$ (نمایه شار رادیویی متوسط خورشیدی با طول موج 10.7 cm) که با میانگین‌گیری بر روی مقادیر حاصل از سه دوران قبلی خورشید، که ۸۱ روز طول می‌کشد، حاصل می‌گردد) و A_p (نمایه ژئومغناطیسی دامنه روزانه سیاره‌ای) است [۵].

به کمک این مدل و در صورت معلوم بودن پارامترهای فوق، چگالی اتمسفر با احتساب تغییرات ناشی از فعالیت‌های خورشیدی توسط $F_{10.7}$ ، $F_{10.7A}$ و A_p ، تغییرات روزانه توسط t_{is} و ϕ ، تغییرات ناشی از طول و عرض جغرافیایی توسط t_{ut} و θ ، تغییرات عرضی - فصلی توسط t_d و ϕ با دقت $\pm 10\%$ تا $\pm 15\%$ محاسبه می‌گردد. در این مدل در ارتفاع بالاتر از ۱۲۰ کیلومتر، فرض می‌گردد که اجزای تشکیل‌دهنده اتمسفر در تعادل پخشی بوده و

مقادیر آتی پارامتر فرضی P، مقادیر هموار سیزده ماهه زوریکشی آن که به علامت (\bar{P}) نشان داده می‌شود، پیش‌بینی می‌گردد. این تکنیک برای اولین بار در سال ۱۹۶۱ میلادی توسط والدیمیر^۲ در رصدخانه فدرال سوئیس در زوریخ ابداع گردید. در این روش با استفاده از یک پایگاه اطلاعاتی از مقادیر قبلی پارامتر P، برحسب زمان مقادیر هموار آن (\bar{P}) طبق رابطه (۱۲) ایجاد می‌شود [۱۱]:

$$\bar{P}_i = \frac{1}{12} \left[\sum_{k=i-5}^{i+5} P_k + \frac{P_{i-6} + P_{i+6}}{2} \right] \quad (12)$$

سپس به کمک این مقادیر هموار شده، روش‌های آماری و رگرسیون خطی لاگرانژی مقادیر هموار آتی پیش‌بینی می‌گردد. لذا در این تحقیق از پیش‌بینی مقادیر هموار نمایه ژئومغناطیسی دامنه روزانه سیاره‌ای (\bar{A}_p) و نمایه شار رادیویی خورشیدی ($\bar{F}_{10.7}$) استفاده شده است. این پیش‌بینی از آگوست سال ۲۰۰۳ میلادی تا مارس سال ۲۰۱۸ میلادی و با پرستایل^۳ ۵٪، ۵۰٪ و ۹۵٪ انجام شده است [۶]. پرستایل طبق تعریف بیانگر درصد احتمال وقوع یک متغیر تصادفی کمتر از یک مقدار مشخص است. به این ترتیب اگر مثلاً مقدار $F_{10.7}$ با پرستایل ۹۵ درصد ۲۰۰ واحد پیش‌بینی گردد بدین معنی است که ۹۵٪ احتمال دارد که مقدار $F_{10.7}$ کمتر از ۲۰۰ واحد شود [۱۱].

نتایج شبیه‌سازی

به منظور اطمینان از صحت عملکرد تخمین‌گر تهیه‌شده برای این تحقیق، از بین تخمین‌گرهای گوناگون موجود در نرم‌افزار STK، تخمین‌گر HPOP^۴ جهت مقایسه انتخاب گردید. این تخمین‌گر از تخمین‌گرهای عددی موجود در نسخه حرفه‌ای نرم‌افزار STK است که با انتگرال‌گیری عددی به روش رانج-کوتا-فلبرگ^۵ با مرتبه خطای ۷-۸ به تحلیل موقعیت می‌پردازد. لذا به منظور انتگرال‌گیری در Simulink از Solver گام‌ثابت ode4(Runge-Kutta) با زمان نمونه‌برداری ۱ ثانیه استفاده گردید.

در محاسبه شتاب ناشی از پسا، ضریب پسا ثابت و برابر $C_d = 3$ فرض شده است زیرا STK نظیر بسیاری دیگر از تخمین‌گرهای مدار، به هنگام محاسبه نیروی پسا از ضریب پسا ثابت استفاده می‌کند. البته این ساده‌سازی در این نرم‌افزار ناشی از پیچیده بودن احتساب تغییرات ضریب پسا به هنگام محاسبه نیروی پسا نیست، بلکه علت صرف‌نظر بسیاری از تخمین‌گرها از این

$$p = \sum_{i=1}^7 p_i = kT \sum_{i=1}^7 n_i \quad (9)$$

در این روابط k ثابت بولتزمن و N عدد آووگادروست. طبق این مدل در ارتفاع کمتر از ۸۵ کیلومتر، اتمسفر زمین ترکیبی همگن و در حال تعادل بوده و خواص آن با فرض تعادل هیدروستاتیکی محاسبه می‌گردد. در ارتفاع ۸۵ تا ۱۲۰ کیلومتری پروفیل‌های غلظت و دما به کمک داده‌های تجربی و روش‌های درون‌یابی به دست می‌آیند تا نتایج حاصل هموار باشد. در این تحقیق برای اجرای کد فرتن مدل MSIS-90 در محیط سیمولینک از بلوک تابع اس^۱ استفاده شده است [۸].

مدل باد HWM-93

با استفاده از این مدل می‌توان مؤلفه نصف‌النهاری، V_x (مثبت به سمت شمال) و مؤلفه منطقه‌ای، V_y (مثبت به سمت شرق) و مؤلفه عمودی، V_z جریان‌های اتمسفری را در نقطه‌ای با طول جغرافیایی θ و عرض جغرافیایی ϕ ، از سطح زمین تا ارتفاع ۲۰۰۰ کیلومتری تخمین زد. با توجه به اینکه اکثر جریان‌های اتمسفری ناشی از گرادیان فشار اتمسفر بوده و تحت اثر شتاب کوریولیسی هستند، لذا در این مدل الگوی باد با استفاده از رابطه (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$V_x = \frac{1}{2\rho\omega_e \sin \phi} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (10)$$

$$V_y = \frac{1}{2\rho\omega_e \sin \phi} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (11)$$

که در این روابط ω_e سرعت دورانی زمین است. طبق این مدل در نواحی استوایی ($\phi \in [-15^\circ, +15^\circ]$) این فرض معتبر نبوده و در این نواحی، نتایج به کمک داده‌های تجربی و روش‌های درون‌یابی به دست می‌آید [۵]. در این تحقیق برای اجرای کد فرتن این مدل در محیط سیمولینک از بلوک تابع اس استفاده شده است [۱۰].

تخمین فعالیت‌های آتی خورشیدی

چون هیچ مدل فیزیکی قابل قبولی برای پیش‌بینی فعالیت‌های آتی خورشیدی در دسترس نیست، مرکز پرواز فضایی مارشال اقدام به توسعه روش تخمین آماری بلندمدت (سالانه) و کوتاه‌مدت (ماهانه) نمایه‌های هموار سیزده ماهه زوریکشی کرده است. در این تکنیک به جای تخمین

2. Waldmeier
3. Percentile
4. High Precision Orbit Propagator
5. Runge-Kutta-Fehlberg

1. S-function

نتیجه‌گیری

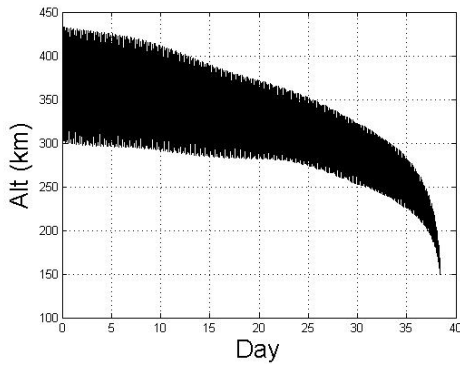
شکل ۱۲ نشان می‌دهد که تخمین فعالیت‌های آتی خورشیدی بر عمر مدار قابل توجه بوده و به پرستتایل به کار رفته در پیش‌بینی نمایه‌ها وابسته است. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که تأثیر ضریب پسا در نرخ کاهش ارتفاع ماهواره تقریباً خطی بوده و جهت تخمین دقیق عمر مدار محاسبه ضریب پسا ضروری است. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که تخمین جریان‌های اتمسفری در مدارات با زاویه انحراف کمتر از ۹۰ درجه باعث افزایش عمر مدار و در مدارات با زاویه انحراف بیشتر از ۹۰ درجه باعث کاهش عمر مدار می‌گردد. از آنجا که در مدارات با زوایای انحراف کمتر از ۹۰ درجه طبق شکل ۱۵ جهت چرخش ماهواره در مدار با جهت چرخش زمین به دور خود یکی است، لذا انتظار می‌رود که اضافه شدن جریان‌های اتمسفری باعث کاهش سرعت نسبی بین ماهواره و اتمسفر و به تبع آن باعث کاهش نیروی پسا شده و عمر مدار افزایش یابد. اما چون در مدارات با زوایای انحراف بزرگ‌تر از ۹۰ درجه جهت چرخش ماهواره در مدار با جهت چرخش زمین به دور خود یکی نیست لذا انتظار می‌رود که اضافه شدن جریان‌های اتمسفری باعث کاهش عمر مدار گردد [۱۲]. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که مدل‌سازی جریان‌های اتمسفری در مدارات قطبی بی‌تأثیر بوده ولی تأثیر افزایشی یا کاهش‌ی آن در مدارات استوایی تا ۱۲٪ عمر مدار است.

تغییرات، نبود مدلی کلی برای بیان نحوه تغییر ضریب پسا جهت انتخاب توسط کاربر است. در محاسبه چگالی توسط مدل MSIS-90 از نمایه‌های میانگین طبق جدول ۳ استفاده شده است. مدار شبیه‌سازی شده در این مقاله دارای شرایط اولیه $a = 6753137m$ ، $M = 0^\circ$ و $\omega = 0^\circ$ ، $\Omega = 0^\circ$ ، $i = 30^\circ$ ، $e = 0.011106$ اول ژانویه سال ۲۰۰۸ است. در این تحقیق جرم ماهواره ۱۰۰ کیلوگرم و سطح مرجع پسا $1m^2$ فرض شده است.

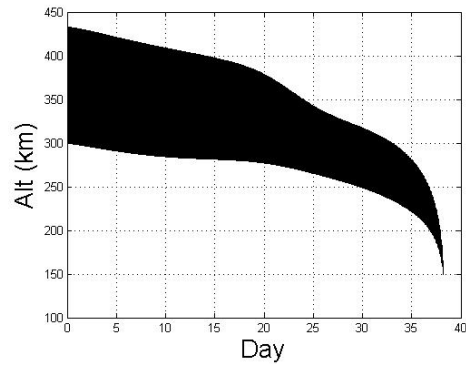
در این بررسی کاهش ارتفاع ماهواره در مدت زمان لازم برای رسیدن به ارتفاع ۱۵۰ کیلومتری بررسی شده است. زیرا این ارتفاع به عنوان حداقل ارتفاع لازم برای عملکرد مناسب ماهواره در نظر گرفته شده و مدت زمان لازم برای رسیدن به این ارتفاع عمر مدار ماهواره در نظر گرفته شده است. شکل ۲ کاهش ارتفاع ماهواره را با تخمین‌گر ایجادشده در Simulink بدون تخمین فعالیت‌های آتی خورشیدی و مدل‌سازی جریان‌های اتمسفری نشان می‌دهد. طبق این نمودار ماهواره در مدت ۳۸/۲۳ روز به ارتفاع ۱۵۰ کیلومتری می‌رسد.

طبق شکل ۳ شبیه‌سازی انجام‌شده در STK نشان می‌دهد که کاهش ارتفاع ماهواره تا این حد در مدت ۳۸/۳۷ روز رخ می‌دهد که بیانگر صحت عملکرد تخمین‌گر تهیه شده است. به منظور مقایسه بیشتر، تغییر پارامترهای غیرتکین k ، h ، p و q توسط Simulink طبق اشکال ۴، ۶، ۸ و ۱۰ و توسط STK طبق اشکال ۵، ۷، ۹ و ۱۱ محاسبه شده است. اختلاف اندک مشاهده‌شده در تخمین عمر، احتمالاً ناشی از اختلاف در مرتبه خطای انتگرال‌گیری عددی در Simulink (مرتبه ۵-۴) و STK (مرتبه ۸-۷) یا اختلاف در نحوه محاسبه چگالی در Simulink و STK است.

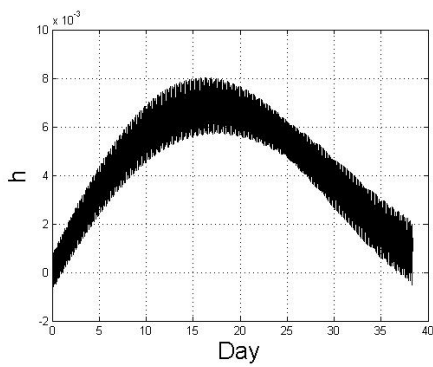
پس از اطمینان از صحت عملکرد تخمین‌گر ایجادشده در Simulink، به منظور بررسی تأثیر تخمین فعالیت‌های آتی خورشیدی بر عمر مدار، نرخ کاهش ارتفاع ماهواره با پرستتایل ۵٪، ۵۰٪ و ۹۵٪ در تخمین فعالیت‌های آتی خورشیدی محاسبه شده و طبق شکل ۱۲ به ترتیب عمر ۱۱۹/۹۸، ۱۰۶/۳۳ و ۹۶/۸۵ روز تخمین زده شده است. به منظور مشاهده تأثیر ضریب پسا بر عمر مدار، نرخ کاهش ارتفاع ماهواره با پرستتایل ۹۵٪ که بیانگر ضریب اطمینان بیشتری است و ضریب پسای ۱، ۲، ۳ و ۴ محاسبه شده و طبق شکل ۱۳ به ترتیب عمر ۳۰۳/۸۳، ۱۴۳/۹۲، ۹۶/۸۵ و ۷۴/۰۳ روز محاسبه شده است. در انتها به منظور بررسی تأثیر مدل‌سازی جریان‌های اتمسفری بر نرخ کاهش ارتفاع ماهواره، عمر مدار در زوایای انحراف گوناگون با احتساب و عدم احتساب تأثیر جریان‌های اتمسفری طبق شکل ۱۴ ترسیم شده است.



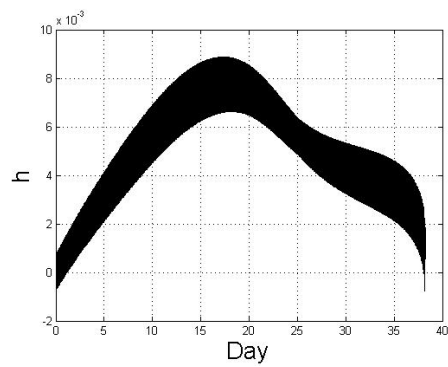
شکل ۳. کاهش ارتفاع (STK)



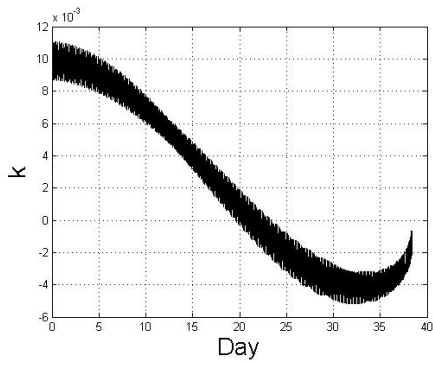
شکل ۲. کاهش ارتفاع (Simulink)



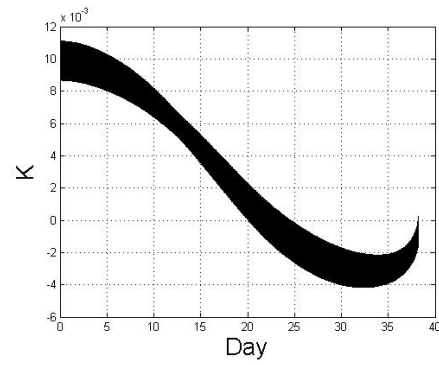
شکل ۵. تغییرات h (STK)



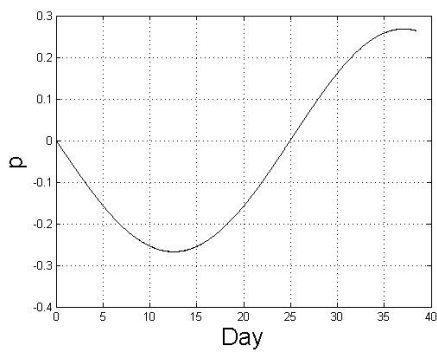
شکل ۴. تغییرات h (Simulink)



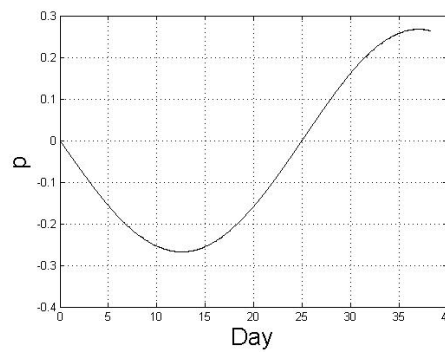
شکل ۷. تغییرات k (STK)



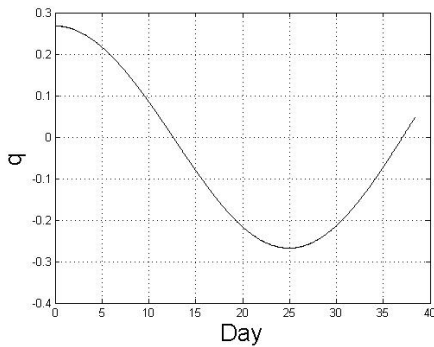
شکل ۶. تغییرات k (Simulink)



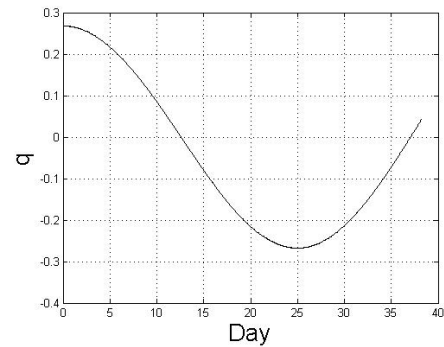
شکل ۹. تغییرات p (STK)



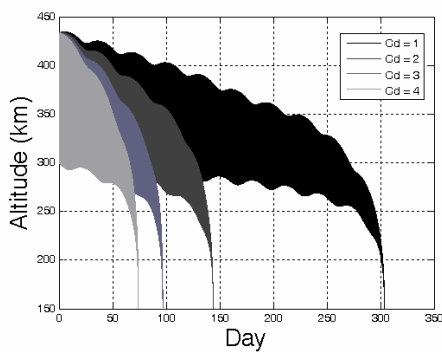
شکل ۸. تغییرات p (Simulink)



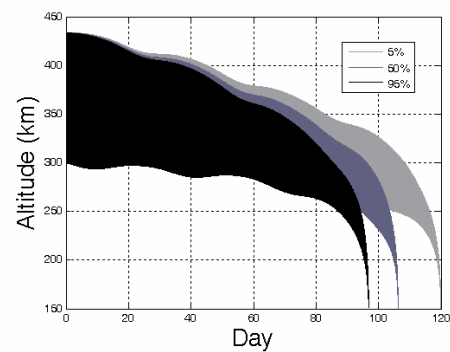
شکل ۱۱. تغییرات q (STK)



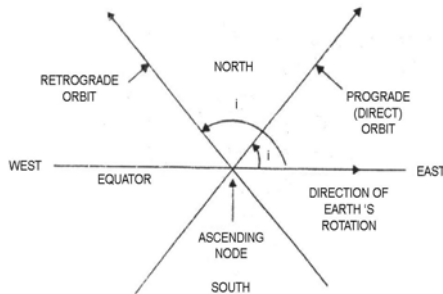
شکل ۱۰. تغییرات q (Simulink)



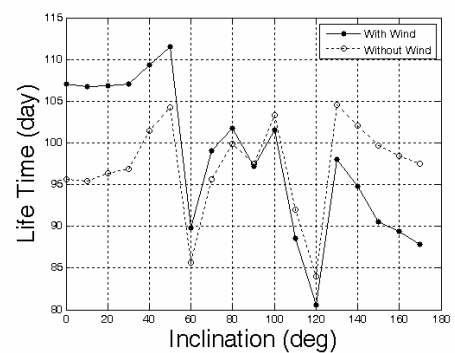
شکل ۱۳. تأثیر ضریب پسا بر عمر مدار



شکل ۱۲. تأثیر تخمین فعالیت‌های خورشیدی بر عمر مدار



شکل ۱۵. جهت چرخش ماهواره در مدار [۱۲]



شکل ۱۴. تأثیر زاویه انحراف بر عمر مدار شبیه‌سازی شده با جریان‌های اتمسفری

5. ECSS-E-10-04A, Space Engineering - Space Environment, The neutral Earth Atmosphere, 21/01/00, ESA Publications Division, 1028-396X, pp. 55-77
6. C. Harold, Jr. Euler, and W. Smith Steven, Future Solar Activity Estimates for Use in Prediction of Space Environmental Effects on Spacecraft, Marshall Space Flight Center, February 2004.
7. Chobotov, V.A., Orbital Mechanics, AIAA Series, 1996.

۸. عبدلهی ط، ع. جهانگیریان، و خ. شاهین، "بررسی تأثیر مدل‌سازی جریان‌های اتمسفری بر نرخ کاهش ارتفاع و پارامترهای کیلری مدار یک ماهواره کم‌ارتفاع"، ششمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، اسفند ۸۵.

مراجع

1. King-Hele, Satellite Orbits in Atmosphere: Theory and Applications, Desmond, Blackie and Son Ltd., 1987.
2. Kechichian, J.A., "Minimum-Time Constant Acceleration Orbit Transfer with First Order Oblateness Effect", *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 230, No. 4, July-August 2000, pp. 595-603.
3. Marcel J.S., *Spacecraft Dynamics and Control*, Cambridge University Press, 1997
4. Montenbruck, O., and E. Gill, *Satellite Orbits: Models, Methods and Application*, Springer, 2001.

11. Niehuss, K.O., Jr. Euler, and W.W. Vaughan, Statistical Technique for Intermediate and Long-Range Estimation of 13-Month Smoothed Solar Flux and Geomagnetic Index, NASA Technical Memorandum 4759, September 1996.
12. Wertz J.R., *Spacecraft Attitude Determination and Control*, D. Reidel Publishing Co., 1984.
9. ECSS-E-10-04A, Space Engineering - Space Environment, Solar and Earth Electromagnetic Radiation and Indices, 21/01/00, ESA Publications Division, 1028-396X, pp. 45-53.
۱۰. عبداللهی ط، ع. جهانگیریان، و ا. نقاش، "بررسی تأثیر زاویه انحراف مدار بر نرخ کاهش ارتفاع یک ماهواره کم‌ارتفاع به هنگام مدل‌سازی جریان‌های اتمسفری"، ششمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، اسفند ۸۵.