



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology &
Applications (Persian)

Vol. 5, No. 1, pp.:163-171
2025

DOI:

10.22034/jssta.2025.495183.1222

Article Info

Received: 1403-10-08
Accepted: 1404-02-16

Keywords

Earthquake prediction, electron density, seismological satellite, space-based seismology, thermal analysis, tri-band beacon

How to cite this article

E. Kishani Farahani, A. Anvari, F. Farhani, and Sh. Amiri, "Thermal Design and Modeling of Tri-Band Beacon Payload for a Seismological Satellite", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol. 5, no. 1, pp. 163–171, 2025.

Original Article

Thermal Design and Modeling of Tri-Band Beacon Payload for a Seismological Satellite

Esmat Kishani Farahani^{1*}, Azar Anvari², Foad Farhani³, Shervin Amiri⁴

^{1*} Institute of Electrical Engineering and Information Technology, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran
e.kishani@irost.ir

² Department of Mechanical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran
a.anvari@irost.ir

³ Department of Mechanical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran
f.farhani@irost.ir

⁴ Institute of Electrical Engineering and Information Technology, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran
amiri@irost.ir

* Corresponding Author

Abstract

Extensive research has been conducted for predicting earthquakes using satellites and space-based methods in recent decades. In pursuit of this goal, the correlation between the ionosphere's total electron content (TEC) distribution and earthquake events has been studied and analyzed. Tri-band beacon transmitters (TBB) transmit coherent-phase signals to receivers. The primary objective of using TBB is to study electron density in the Earth's ionosphere through TEC data analysis. This approach enables the creation of two-dimensional maps or one-dimensional electron density profiles. This article focuses on the thermal analysis of the beacon transmitter payload in a typical seismological satellite under different space environmental conditions. The findings indicate that, in the satellite's thermal design, implemented using passive thermal control hardware, the transmitter payload maintains its operational temperature range under worst-case hot and cold orbital conditions. The results can be used in designing a thermal control system to monitor and control the TBB temperatures under different conditions in the satellite orbit.

طراحی و مدلسازی حرارتی محموله بیکن سه فرکانسه در یک ماهواره زلزله‌شناسی

عصمت کیشانی فراهانی*^۱، آذر انوری^۲، فواد فرحانی^۳، شروین امیری^۴

۱- پژوهشکده مهندسی برق و فناوری اطلاعات، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران،

تهران، e.kishani@irost.ir

۲- پژوهشکده مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران،

a.anvari@irost.ir

۳- پژوهشکده مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران،

f.farhani@irost.ir

۴- پژوهشکده مهندسی برق و فناوری اطلاعات، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران،

تهران، amiri@irost.ir

* نویسنده مسئول

چکیده

به منظور پیش‌بینی وقوع زلزله با استفاده از ماهواره‌ها و روش‌های فضاپایه، تحقیقات گسترده‌ای در دهه‌های اخیر انجام شده است. در راستای تحقق این هدف، ارتباط توزیع چگالی الکترون (TEC) در لایه یونسفر با رویدادهای زمین‌لرزه‌ای مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. فرستنده‌های بیکن سه فرکانسه (TBB) سیگنال‌هایی با فاز هم‌دوس را برای گیرنده‌ها ارسال می‌کنند. هدف اصلی استفاده از TBB مطالعه چگالی الکترون در یونسفر زمین با تجزیه و تحلیل داده‌های محتوای الکترون کل (TEC) است. با این روش امکان استخراج نقشه دو بعدی و یا پروفایل یک بعدی از چگالی الکترون فراهم می‌شود. مقاله حاضر، به بررسی محموله فرستنده بیکن در یک ماهواره زلزله‌شناسی نوعی اختصاص داشته و نتایج تحلیل حرارتی برای محموله این ماهواره را در شرایط مختلف محیط فضا، به طور خاص مورد تحلیل قرار می‌دهد. نتایج حاصل نشان می‌دهد، در طرح حرارتی ماهواره که با استفاده از سخت‌افزارهای کنترل حرارت غیرفعال صورت گرفته، محموله فرستنده در بدترین شرایط گرم و سرد مداری، در محدوده مجاز دمایی کاری خود قرار می‌گیرد. نتایج بدست آمده می‌تواند در طراحی سامانه کنترل حرارت برای پایش و کنترل دمای محموله فرستنده بیکن در شرایط مختلف مداری مورد استفاده قرار گیرد.



دسترس‌پذیر در نشانی:

Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه

علوم، فناوری و کاربردهای

فضایی

سال پنجم، شماره ۱، صفحه ۱۶۳-۱۷۱

بهار و تابستان ۱۴۰۴

DOI:

10.22034/jssta.2025.495183.1222

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

واژه‌های کلیدی

بیکن سه فرکانسه، چگالی الکترون، زلزله‌شناسی فضاپایه، تحلیل حرارتی، ماهواره زلزله‌شناسی، پیش‌بینی زمین لرزه

نحوه استناد به مقاله

عصمت کیشانی فراهانی، آذر انوری، فواد فرحانی و شروین امیری، "طراحی و مدلسازی حرارتی محموله بیکن سه فرکانسه در یک ماهواره زلزله‌شناسی"، دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد پنجم، شماره اول، صفحات ۱۶۳-۱۷۱، ۱۴۰۴.

۱- مقدمه

ایران در بخشی از کمربند هیمالیا-آلپ واقع شده که یکی از مستعدترین مناطق زلزله خیز در جهان است و بیش از ۱۳۰ زلزله شدید را در قرن گذشته تجربه کرده است. از سوی دیگر شرایط آب و هوایی در ایران در بخش اعظم سال، پایدار و نسبتاً بدون پوشش ابر بوده و این کشور را یک منطقه مناسب برای تحقیقات و مطالعات ماهواره‌ای می‌سازد. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای به منظور پیش‌بینی وقوع زلزله بر اساس روش‌های علمی و با استفاده از ماهواره‌ها و روش‌های فضاپایه صورت گرفته است [۷-۱]. در این راستا، طراحی و ساخت یک ماهواره ویژه زلزله‌شناسی در ایران نیز اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند.

جو فوقانی زمین حاوی پلاسمای یونیزه شده جزئی است که به‌طور دائم در اثر تشعشعات ماوراء بنفش خورشیدی، بازترکیب، بادهای خنثی و میدان‌های الکتریکی در حال تغییر است. یونسفر از ارتفاع ۵۰ کیلومتری زمین شروع شده و با تغییر چگالی یون‌ها به بالای ۱۰۰۰ کیلومتری زمین هم می‌رسد. فرستنده بیکن سه فرکانسه، سیگنال‌های رادیویی با فرکانس‌های مختلف و با فاز همدوس را به گیرنده‌های زمینی می‌فرستد که با حرکت ماهواره در راستای افق، لایه یونسفر را اسکن می‌کند. سپس توزیع محتوای الکترون (TEC^۱) در طول یک سری از پرتوها بازسازی می‌شود. این روش با ارسال بیکن از فرستنده ماهواره‌ای و قرارگیری گیرنده‌های رادیویی در اطراف گسل‌های کشور، می‌تواند به عنوان یک ابزار مفید در تعیین ناهنجاری‌های پیش از وقوع زلزله مورد استفاده قرار گیرد. توموگرافی مبتنی بر ارسال و دریافت سیگنال ماهواره با استفاده از فرستنده‌های فضاپایه و همچنین انتقال سیگنال رادیویی ماهواره‌ای و دریافت زمینی در چند دهه گذشته مورد مطالعه قرار گرفته است [۸].

TBB^۲ یک بیکن سه فرکانسه است که برای انتقال در باندهای VHF/UHF و L (۱۵۰/۴۰۰/۱۰۶۷ مگاهرتز) توسعه یافته است. هدف اصلی آن، مطالعه چگالی الکترون در یونسفر و تولید نقشه‌های دوبعدی و پروفایل‌های یک بعدی از چگالی الکترون است. این ابزار همچنین اجازه می‌دهد تا تأثیر بی‌نظمی‌های یونسفر بر انتقال باند VHF، UHF و L از فضا به زمین مورد مطالعه قرار گیرد [۹].

آزمایش توموگرافی رادیویی الکترومغناطیسی منسجم با نام CERTO^۳ روی ماهواره تحقیقات پیشرفته و رصد جهانی با نام ARGOS^۴ اولین آزمایش از مجموعه‌ای از بیکن‌های رادیویی بوده است که در فضا برای نظارت بر مقیاس بزرگ (بیش از ۱۰ کیلومتر) و مقیاس کوچک (۱ یا کمتر از ۱ کیلومتر) با استفاده از تکنیک‌های رادیویی قرار داده شده است [۱۰].

فرستنده‌های TBB می‌توانند توسط یک زنجیره از آرایه‌های گیرنده مشاهده شوند. این فرستنده‌ها در بسیاری از ماهواره‌ها از جمله ماهواره زلزله‌شناسی CSES^۵ [۱۱] و ماهواره‌های منظومه‌ای COSMIC استفاده شده است. همه اندازه‌گیری‌های TBB در COSMIC، بر اندازه‌گیری تغییرات فاز امواج رادیویی منتشر شده از ماهواره تا گیرنده زمینی استوار است. این تغییرات ناشی از نوسانات ضریب شکست اتمسفر و نیز حرکت ماهواره هستند [۹، ۱۰].

زیرسیستم کنترل حرارت ماهواره، وظیفه نگهداری دمای کلیه اجزاء و محموله‌های ماهواره را در محدوده‌های مجاز، در طول ماموریت آن برعهده دارد. روش‌های کنترل حرارت ماهواره به دو نوع فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. در روش کنترل حرارت فعال از سخت‌افزارهایی که به مصرف توان نیاز دارند استفاده شده و در کنترل حرارت غیرفعال، به استثناء هیترهای روشن/خاموش، از سخت‌افزارهای بدون نیاز به توان، نظیر رنگ‌های سفید و سیاه، پرداخت سطوح (آلوداین و آنودایز)، پوشش‌های عایق چندلایه، دابلرها، لایه‌ها و غیره استفاده می‌شود [۱۲]. مقاله حاضر، به مدلسازی و تحلیل حرارتی فرستنده TBB در یک ماهواره زلزله‌شناسی اختصاص داشته و نتایج تحلیل را برای مدل این محموله در شرایط محیطی فضا، ارائه می‌دهد. در پژوهش حاضر، مدلسازی برای شرایط گذرا و بدترین شرایط گرم و سرد مداری انجام شده و بر اساس نتایج تحلیل حرارتی، طراحی حرارتی نهایی محموله ماهواره تعیین می‌شود.

۲- مروری بر چند ماهواره زلزله‌شناسی

توموگرافی رادیویی الکترومغناطیسی منسجم با نام CERTO یک بیکن رادیویی است که پارامترهای یونسفر را به طور همزمان با دریافت سیگنال توسط گیرنده‌های زمینی اندازه‌گیری می‌کند.

^۴ Advanced Research and Global Observation Satellite

^۵ China Seismo-Electromagnetic Satellite

^۱ Total Electron Content

^۲ Tri-Band Beacon

^۳ Coherent Electromagnetic Radio Tomography

۳- مدلسازی حرارتی

مقاله حاضر به مدلسازی و تحلیل حرارتی فرستنده TBB در یک ماهواره زلزله‌شناسی اختصاص دارد. این فرستنده سه سیگنال در باندهای فرکانسی VHF (۱۵۰ مگاهرتز)، UHF (۴۰۰ مگاهرتز) و L (۱۰۶۷ مگاهرتز) را به آرایه‌ای خطی از گیرنده‌های زمینی ارسال می‌کند تا با استفاده از تکنیک‌های توموگرافی، تصاویری از چگالی الکترون در یونوسفر حاصل شود. مشخصات این ماهواره با توجه به عوامل متعدد از جمله محدودیت‌های پرتاب، مشخصات و ابعاد محموله برای انجام این ماموریت و همچنین ویژگی و محدودیت‌های زیرسیستم‌های مختلف در پلتفرم ماهواره تعیین و انتخاب شده است.

ماهواره مورد بررسی در این پژوهش، یک ماهواره کوچک به شکل مکعب مستطیل است که چهار آرایه خورشیدی بر روی دیواره‌های جانبی آن قرار گرفته‌اند. این ماهواره، در مدار پایین (LEO) قرار دارد و سیستم کنترل حرارت آن از نوع غیرفعال است. در ماهواره مورد نظر، از سخت‌افزارهای کنترل حرارت غیرفعال نظیر رنگ‌ها و پوشش‌ها برای حفاظت دمایی اجزاء استفاده شده است. تحلیل‌های حرارتی برای شرایط گذرا و در بدترین شرایط گرم و سرد مداری انجام شده است.

ماهواره مورد نظر شامل ۶ زیرسیستم و چند محموله است. پلتفرم ماهواره شامل زیرسیستم‌های: توان الکتریکی (EPS)، سازه (SMS)، ارتباط از دور (TT&C)، کامپیوتر پردازنده (C&DH)، کنترل حرارت (TCS) و کنترل وضعیت (ACS) است. سازه اصلی ماهواره شامل ۳ صفحه آلومینیومی صلب افقی است که تجهیزات و محموله‌ها بر روی آن قرار می‌گیرند. این صفحات ماهواره را به دو بخش فوقانی و تحتانی تقسیم می‌کنند.

زیرسیستم کنترل وضعیت، مجهز به سخت‌افزار کنترل فعال (سیم‌پیچ‌های مغناطیسی) و سخت‌افزار کنترل غیرفعال (بوم گرادیان جاذبه) بوده که این بوم در بخش میانی ماژول بالایی سازه قرار گرفته است. زیرسیستم تغذیه نیز شامل سلول‌های خورشیدی، باتری‌ها و واحد توزیع و تنظیم توان است که توان ماهواره را تامین می‌کنند. باتری‌ها، به صورت دو بسته بر روی صفحه میانی و در دو طرف بدنه بوم گرادیان قرار گرفته‌اند. جعبه الکترونیکی و ماژول‌های مخابراتی در بخش پایینی سازه قرار گرفته‌اند. در مدل این ماهواره، صفحه فوقانی سازه رو به

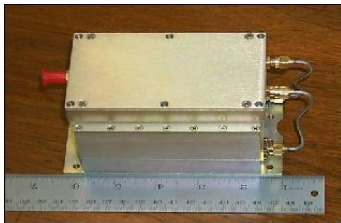
CERTO نقشه‌های جهانی یونوسفر را برای کمک به پیش‌بینی پراکندگی امواج رادیویی ارائه می‌دهد. ابزار CERTO برای نصب بر روی تجهیزات فضایی و ماهواره‌ها، برای نظارت بر یونوسفر با استفاده از انتشار سیگنال‌های موج پیوسته در فرکانس‌های باند UHF, VHF و L ساخته شد. اولین بیکن CERTO در سال ۱۹۹۹ در ماهواره تحقیقاتی پیشرفته و رصد جهانی ARGOS تحت حمایت نیروی هوایی آمریکا به مدار قطبی و همزمان با خورشید پرتاب شد. متعاقباً، ابزار CERTO در بخشی از محموله‌های ماهواره‌های DMS/F15, PICOSAT و برنامه موشکی SEEK2 تحت حمایت ژاپن و شش ماهواره COSMIC^f تحت حمایت تایوان، پرتاب شده است. در ادامه نیز ابزارهای CERTO بر روی ماهواره C/NOFS تحت حمایت نیروی هوایی ایالات متحده، NPSAT1 توسط دانشکده تحصیلات تکمیلی نیروی دریایی، CASSIOPE کانادا، و ماهواره‌های تحت حمایت برزیل EQUAR^y اجرا شده‌اند. شکل (۱) سری اول ماهواره‌های دارای سامانه CETRO را نشان می‌دهد که برای پایش یونوسفر کاربری داشته‌اند [۱۳].

در ماهواره‌های COSMIC اندازه‌گیری تأثیر بی‌نظمی‌های یونوسفر در انتقال امواج VHF (۱۵۰ مگاهرتز)، UHF (۴۰۰ مگاهرتز) و باند L (۱۰۶۷ مگاهرتز) از فضا به زمین انجام می‌شود. یکی از اهداف استفاده از TBB تعیین دقیق موقعیت ماهواره COSMIC با رهگیری داپلر است. با اندازه‌گیری شیفت داپلر سیگنال‌های L-band, UHF, VHF نسبت به یک فرکانس مرجع در گیرنده‌های زمینی، می‌توان فاصله و سرعت نسبی ماهواره را استنتاج کرد. دو سیگنال در فرکانس‌های مختلف، استفاده می‌شوند تا اثر شکست یونوسفر روی انتشار سیگنال را تصحیح کنند. همه اندازه‌گیری‌های TBB در COSMIC، بر اندازه‌گیری تغییرات فاز امواج رادیویی منتشر شده از ماهواره تا گیرنده زمینی استوار است. این تغییرات ناشی از نوساناتی است که در ضریب شکست اتمسفر زمین و با حرکت ماهواره ایجاد می‌شود. در صورت حذف فرکانس داپلر ناشی از حرکت ماهواره نسبت به ایستگاه زمینی، می‌توان نوسانات در ضریب شکست اتمسفر را از باقیمانده تغییرات فاز محاسبه کرد [۹].

^y Ecuadorian Satellite for Advanced Research

^f Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate

تعدیل شده و بسته به نرخ چرخش ماهواره، تغییرات دما متفاوت خواهد بود. متناظر با این شرایط، دیواره‌های جانبی سازه نیز که به‌طور مستقیم با پانل‌های خورشیدی تبادل تشعشعی دارند، متاثر شده و در طول روز و شب مداری تغییرات دما خواهند داشت. برای اینکه اجزاء داخلی ماهواره از جمله جعبه فرستنده، انتقال حرارت تشعشعی کمتری با سطوح اطراف داشته باشد، از پوشش آلوداین طلایی استفاده شده است. به منظور کاهش تبادل تشعشعی بین این واحد و دیواره‌های جانبی، سطوح داخلی سازه نیز با پوشش آلوداین طلایی پوشانده شده است. در طرح حرارتی این ماهواره، هر دو سطح بالایی و زیرین سازه مکعبی، به عنوان رادیاتور انتخاب شده و دفع تلفات حرارتی داخلی ماهواره را به عهده دارند.



شکل (۴). تصویر محموله TBB برای پایش یونوسفر [۱۴].

در جدول (۱) محدوده دمایی مجاز اجزای اصلی ماهواره ارائه شده است.

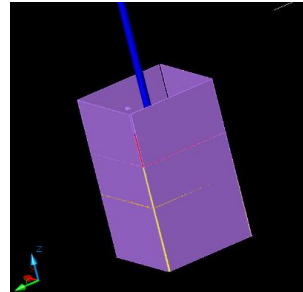
جدول (۱). محدوده دمایی مجاز اجزای اصلی ماهواره

محدوده دمایی غیرکاری (°C)	محدوده دمایی کاری (°C)	واحد
-	-۷۰، +۱۲۰	پانل‌های خورشیدی
-۲۰، +۴۰	-۱۰، +۲۵	بسته باتری
-۴۰، +۸۰	-۱۰، +۵۰	جعبه الکترونیکی
-۵۰، +۵۰	-۵، +۵۰	ماژول‌های مخابراتی
-۵۰، +۷۰	-۵۰، +۷۰	سیم‌پیچ‌های مغناطیسی
-	-۸۰، +۸۰	سازه

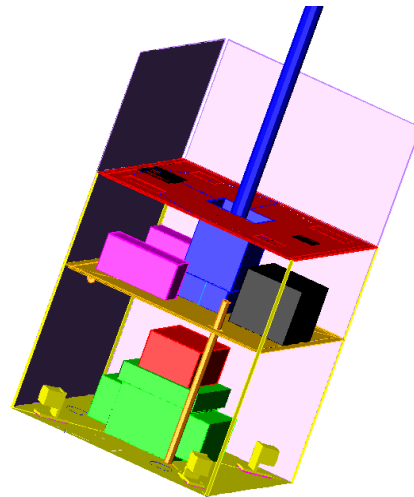
از دیدگاه کنترل حرارت، مدار ماهواره به دلیل تاثیر بر روی شارهای حرارتی محیطی حائز اهمیت است. به این جهت، تحلیل حرارتی مدار برای تعیین شارهای حرارتی و تعیین بدترین شرایط سرد و گرم، انجام شده است. به دلیل غیرهمزمان بودن مدار ماهواره با خورشید، تغییرات زاویه بتا، نیز مورد توجه قرار گرفته

سمت‌الرأس بوده و صفحه زیرین آن به سوی زمین یا سمت‌القدم است.

شکل (۲) نمای بیرونی از مدل ماهواره مورد نظر با بوم باز شده را نشان می‌دهد. شکل (۳) نیز مدل حرارتی سازه و اجزاء اصلی ماهواره را نشان می‌دهد.



شکل (۲). مدل ماهواره مکعب مستطیلی با بوم باز شده



شکل (۳). مدل حرارتی ماهواره و موقعیت محموله فرستنده TBB (جعبه قرمز رنگ)

مطابق شکل (۳)، محموله بیکن سه فرکانسه TBB بر روی جعبه الکترونیکی EBOX در ماژول پایین سازه قرار گرفته است. در شکل (۴) نیز تصویر محموله فرستنده TBB نشان داده شده است. در مدل حرارتی ماهواره، پوشش جعبه محموله، آلوداین طلایی در نظر گرفته شده که ضریب انتشار تشعشعی آن ۰/۲ است. قابل ذکر است که دیواره‌های جانبی سازه که چهار وجه مکعب را تشکیل می‌دهند، با پانل‌های خورشیدی پوشیده شده‌اند. این پانل‌ها که در معرض تابش شارهای حرارتی محیطی هستند، به دلیل قرار گرفتن در روز و شب مدار، تغییرات شدید دمایی را تجربه می‌کنند. با چرخش وضعی ماهواره به دور خود، این تغییرات دمایی به شدت

G_{ji} کانداکتور تشعشعی (radiation conductor) برای اتصال گره

حرارتی i به گره حرارتی j

C_i ظرفیت گرمایی گره حرارتی i و

Q_i منبع حرارتی / چاه حرارتی برای گره حرارتی i است.

این روش دقت مرتبه دوم را نسبت به زمان و دقت مرتبه اول را نسبت به مکان دارا است. سیستم معادلات فوق برای کل شبکه حرارتی ماهواره با استفاده از روش (Iterative Relaxation) و یا روش ماتریس همزمان حل می‌شود.

SINDA یک سیستم نرم‌افزاری با قابلیت حل مسائل فیزیکی به روش توده‌ای Lumped Method است. این نرم‌افزار قادر به حل معادله دیفرانسیل غیرخطی درجه چهارم است که در مسائل کنترل حرارتی ماهواره استفاده می‌شود. نرم افزار SINDA، یک مشابه‌ساز حرارتی به روش شبکه^۸ (قابل قیاس با مدار خازن-مقاومت^۹) است. روند حل به این صورت است که کاربری که با یک مسئله انتقال حرارت مواجه است، یک شبکه اختیاری از نقاط دمایی (گره‌ها) را ایجاد می‌کند. این گره‌ها بوسیله مسیرهای جریان حرارتی به یکدیگر متصل شده‌اند.

در مدلسازی حرارتی ماهواره، نخست ضرایب شکل و شارهای حرارتی محیطی اعمالی به سطوح ماهواره نظیر البیدو، شار حرارتی خورشیدی و تشعشع مادون قرمز (IR) زمین محاسبه شده است. این مقادیر به عنوان اطلاعات ورودی برای مدل ریاضی حرارتی، جهت محاسبه مقادیر دما در نقاط مختلف ماهواره مورد استفاده قرار گرفته‌اند. جزئیات مدلسازی شامل مشخصات کلیه گره‌ها و کانداکتورهای هدایتی، تشعشعی و تماسی برای جعبه سخت‌افزاری و بردهای الکترونیکی محموله فرستنده است. هم‌چنین، با توجه به توزیع تلفات حرارتی در اجزاء مختلف، این تلفات نیز در مدل حرارتی واحد اعمال می‌شود. متناظر با هر وضعیت کاری ماهواره، مقادیر تلفات حرارتی اجزاء مرتبط در مدل ریاضی حرارتی اعمال شده و نتایج تحلیل استخراج شده است.

در سطح تماس بین جعبه‌های الکترونیکی و پک باتری‌ها با صفحات سازه‌ای، کانداکتورهای تماسی در مدل حرارتی تعریف شده است. این کانداکتورها به سطح تماس جعبه و ضریب هدایت تماسی اجزاء با یکدیگر بستگی دارند. به منظور افزایش تبادل حرارت به طریقه هدایت و کاهش مقاومت حرارتی در بین سطح تماس، از لایه‌های حرارتی استفاده شده است.

است. با توجه به مشخصه‌های مدار نهایی، زاویه بتا در حدود ۲ درجه در روز تغییر می‌کند. بر اساس مدار مورد نظر، مقادیر ثابت خورشیدی، البیدو و تشعشع IR زمین در شرایط گرم و سرد مطابق با جدول (۲) در نظر گرفته شده است [۱۲]. این مقادیر در مدل حرارتی RADCAD ماهواره استفاده شده است.

جدول (۲). ثابت شارهای محیطی استفاده شده در مدل حرارتی

مقدار ثابت‌ها	داغ	سرد
ثابت خورشیدی [W/m ²]	۱۴۰۰	۱۳۰۹
تشعشع مادون قرمز [W/m ²]	۲۴۶/۱	۱۹۵/۶
ضریب آلبیدو	۰/۴۶	۰/۳

مدلسازی حرارتی ماهواره موردنظر، شامل ساخت مدل ریاضی هندسی (Geometrical Mathematical Model (GMM) و مدل ریاضی حرارتی (Thermal Mathematical Model (TMM) است. از مدل ریاضی هندسی برای محاسبه ضرایب دید (view factors) و شارهای حرارتی وارده به سطوح مختلف ماهواره استفاده شده است. مدلسازی و تحلیل حرارتی این ماهواره نیز با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی SINDA و Thermal Desktop انجام شده است. تحلیل حرارتی گذرا (Transient) با فرض متمرکز بودن کلیه خواص حرارتی نظیر دما و ظرفیت حرارتی در هر گره با روش عددی اختلاف محدود ضمنی (Implicit forward-backward) انجام شده است.

معادله تعادل حرارتی برای یک گره دیفیوژن عبارت است از:

$$\frac{2C_i}{\Delta t}(T_i^{n+1} - T_i^n) = 2Q_i + \sum_{j=1}^N [G_{ji}(T_j^n - T_i^n) + \hat{G}_{ji}\{T_j^{n4} - (T_i^n)^4\}] + \sum_{j=1}^N [G_{ji}(T_j^{n+1} - T_i^{n+1}) + \hat{G}_{ji}\{T_j^{n+14} - (T_i^{n+1})^4\}] \quad (1)$$

که:

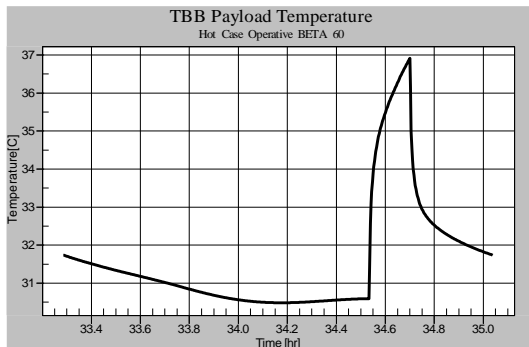
T_j^n دمای گره حرارتی j در زمان جاری t ،

T_j^{n+1} دمای گره حرارتی j در زمان بعد $t + \Delta t$ ،

G_{ji} کانداکتور خطی (linear conductor) برای اتصال گره حرارتی j به گره حرارتی i ،

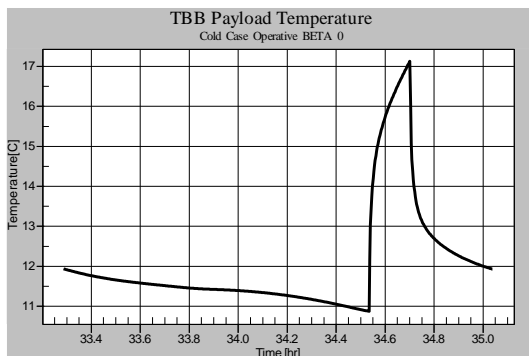
^۸ Capacitor-Resistor Circuit

^۹ Network- Style



شکل (۶). توزیع دما در بدترین شرایط گرم مدار و وضعیت کاری نامی

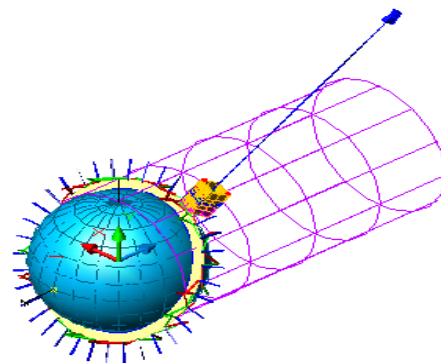
برای واحد فرستنده TBB



شکل (۷). توزیع دما در بدترین شرایط سرد مدار و وضعیت کاری

نامی برای واحد فرستنده TBB

شایان ذکر است، روش بکار رفته در این مقاله برای مدلسازی حرارتی ماهواره مورد نظر، پیش از این توسط نویسندگان برای مطالعه تأثیر چند پارامتر مهم بر سیستم کنترل حرارت ماهواره [۱۵] و برای مقایسه رنگ‌های فضایی برای استفاده در سیستم کنترل حرارت ماهواره [۱۶] مورد استفاده قرار گرفته است. تحلیل فوق برای مدار ماهواره دایروی با مشخصات زاویه میل ۸۳ درجه، ارتفاع ۱۰۰۰ کیلومتر و دور تناوب ۱۰۵ دقیقه انجام شده است. شکل (۵) مدل ماهواره را در مدار با زاویه بتا شصت درجه نشان می‌دهد.



شکل (۵). مدل ماهواره در مدار با زاویه بتای شصت درجه

۴- نتایج تحلیل حرارتی

جهت استخراج نتایج دما، تحلیل حرارتی گذرا برای ۵۰ پرپود ماهواره در مدار برای رسیدن به حالت پایداری دمایی انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل حرارتی، توزیع دمای اجزای مختلف در بدترین وضعیت گرم و سرد مداری است. در شکل‌های (۶) و (۷)، نتایج تحلیل برای جعبه فرستنده TBB در وضعیت کاری نامی، به ترتیب در شرایط گرم و سرد مدار ارائه شده است. به آن دلیل که تلفات حرارتی این محموله، در یک پرپود ماهواره ثابت نیست و در حین فاز ارسال اطلاعات دارای بیشترین مقدار است، نتایج دما نشان می‌دهد حداکثر دما در فاز ارسال فرستنده محموله ایجاد شده است. با توجه به ملاحظات عدم قطعیت و حاشیه امنیتی ده درجه سانتیگراد برای حداکثر و حداقل دمایی، محموله فرستنده در محدوده مجاز دمایی کاری خود قرار می‌گیرد.

در شکل (۸) دمای جعبه الکترونیکی که بر روی صفحه زیرین سازه قرار گرفته و همچنین متوسط نتایج دمای این صفحه از سازه ماهواره در شرایط گرم مداری نشان داده شده است. پروفایل نتایج دمای صفحه زیرین سازه، که همواره رو به زمین قرار دارد و صرفاً شار حرارتی البیدو و مادون قرمز زمین را دریافت می‌کند، نشان می‌دهد در بخش شب مدار، که سهم البیدو دریافتی صفر شده است، دمای این صفحه نیز کاهش یافته است. همچنین، نتایج دما با حاشیه ایمنی بسیار خوبی در محدوده مجاز دمای جعبه الکترونیکی قرار دارد.

در شکل (۹) نیز نتایج دمای یکی از بسته‌های باتری و صفحه میانی سازه ارائه شده است. با توجه به اینکه صفحه میانی سازه در مقابل تابش خورشید و سایر شارهای حرارتی محیطی قرار ندارد و باتری‌ها نیز تلفات حرارتی بالایی ندارند، تغییرات دمای این صفحه قابل توجه نیست. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است، در این شرایط مداری، دمای باتری‌ها بین حداکثر (۱۹/۲ °C) و حداقل (۱۸/۴ °C) قرار دارد، که با توجه به حداکثر و حداقل دمای

در پژوهش حاضر، مدلسازی و تحلیل حرارتی یک ماهواره با محموله فرستنده بیکن برای شرایط گذرا و بدترین شرایط گرم و سرد مداری انجام شده است. این ماهواره، در مدار پایین (LEO) قرار دارد و سیستم کنترل حرارت آن از نوع غیرفعال است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که در بدترین شرایط گرم و سرد مداری و با رعایت حاشیه امنیتی، محموله فرستنده و اجزاء اصلی ماهواره در محدوده مجاز دمایی کاری خود قرار می‌گیرند.

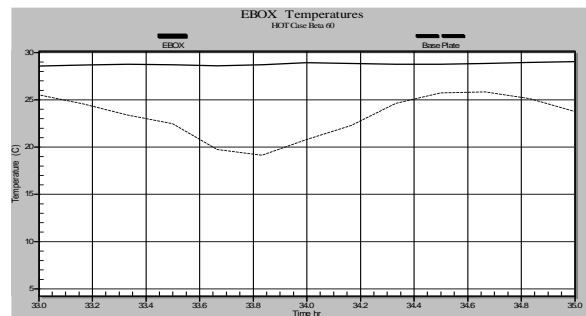
تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

مراجع

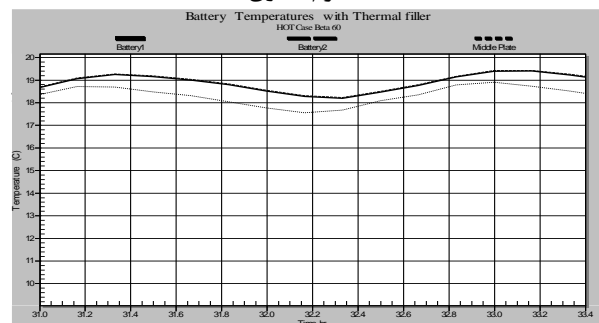
- [1] M. Li, H. Wang, J. Liu, and X. Shen, "Two Large Earthquakes Registered by the CSES Satellite during its Earthquake Prediction Practice in China," *Atmosphere*, vol. 13, no. 5, p. 751, 2022.
- [2] J. Huang, et. al., "Disturbance identification of electric field data observed by the CSES-01 satellite before earthquakes," *Science China Earth Sciences*, vol. 66, pp. 1814–1824, 2023.
- [3] C. Han, R. Yan, D. Marchetti, W. Pu, Z. Zhima, D. Liu, S. Xu, H. Lu, and N. Zhou, "Study on Electron Density Anomalies Possibly Related to Earthquakes Based on CSES Observations," *Remote sensing*, vol. 15, p. 3354, 2023.
- [4] M. Akhoondzadeh, "Analyses of data from the first Chinese seismo electromagnetic satellite (CSES-01) together with other earthquake precursors associated with the Turkey earthquakes (February 6, 2023)," *Journal of Applied Geodesy*, vol. 9, no. 1, pp. 11–12, 2024.
- [5] R. Yan, X. Shen, J.P. Huang, Q. Wang, W. Chu, D. Liu, Y. Yang, H. Lu, and S. Xu "Examples of unusual ionospheric observations by the CSES prior to Earthquakes," *Earth and Planetary Physics*, pp. 515–526, 2018.
- [6] M. Yang, X. Zhang, M. Zhong, Y. Guo, G. Qian, J. Liu, C. Yuan, Z. Li, S. Wang, L. Zhai, T. Li and X. Shen, "Spatio-Temporal Evolution of Electric Field, Magnetic Field and Thermal Infrared Remote Sensing Associated with the 2021 Mw7.3 Maduo Earthquake in China," *Atmosphere*, vol. 17, no. 77, 2024.
- [7] M. Akhoondzadeh, "Earthquake prediction using satellite data: Advances and ahead challenges," *Advances in Space Research*, vol. 74, no. 8, pp. 3539–3555, 2024.
- [8] T. A. Parrot, and M. Pulnits, "Variations of the ionospheric electron density, during the Bhuj seismic event," *Ann. Geophys.*, vol. 22, no. 12, pp. 4123–4131, 2004.

مجاز باتری‌ها در جدول (۱)، این واحد بسیار حیاتی ماهواره نیز در محدوده دمایی مجاز قرار دارد.



شکل (۸): دمای جعبه الکترونیکی و صفحه زیرین سازه در شرایط

گرم مداری



شکل (۹): دمای باتری‌ها و صفحه میانی سازه در شرایط گرم مداری

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به زلزله‌خیز بودن کشور ما و تحقیقات گسترده‌ای که در جهان به منظور پیش‌بینی وقوع زلزله با استفاده از روش‌های فضاپایه انجام شده است، طراحی و ساخت یک ماهواره ویژه زلزله‌شناسی در ایران اهمیت ویژه‌ای دارد. به‌منظور انتخاب و تصمیم‌گیری صحیح درباره محموله‌های مورد استفاده در ماهواره زلزله‌شناسی ایرانی، مطالعاتی روی چندین ماهواره زلزله‌شناسی صورت گرفته و محموله فرستنده TBB به عنوان یکی از گزینه‌های پیشنهادی مطرح شده است. با توجه به سابقه فضایی کشور در حوزه فناوری میکروماهواره‌ها، و با توجه به شرایط و محدودیت‌های موجود، این نکته در انتخاب یک الگوی بومی ماهواره زلزله‌شناسی ایرانی حائز اهمیت است که نمونه ماهواره انتخابی از پلتفرم‌های قبلی فناوری فضایی کشور باشد. همچنین ملاحظات کوچک بودن ابعاد و وزن و اقتصادی بودن آن برای آزمون فناوری‌های جدید در اولویت است.

- [9] P. A. Bernhardt, C. A. Selcher, and S. Basu, Reising, "Atmospheric Studies with the Tri-Band Beacon Instrument on the COSMIC Constellation," *TAO*, vol. 11, no. 1, pp.291-312, 2001.
- [10] P. A. Bernhardt, et al., "The Coherent Electromagnetic Radio Tomography (CERTO) experiment on ARGOS," in Space 2001: The odyssey continues conference & exposition, New Mexico, Aug. 2001.
- [11] X.H Shen, X.M Zhang, S.G Yuan, L.W. Wang, J.B. Cao, J.P. Huang, X.H. Zhu, P. Piergiorgio, and J.P. Dai, "The state-of-the-art of the China Seismo-Electromagnetic Satellite mission," *Science China Technology Science*, vol. 61, pp. 634–642, 2018.
- [12] D. G. Gilmore, *Spacecraft Thermal Control Handbook, Volume I: Fundamental Technologies*. EI Seundo, CA: Aerospace Press. 2002.
- [13] P. A. Bernhardt, and C. L. Sieftring, "New satellite-based systems for ionospheric tomography and scintillation region imaging", *Radio Science*, Volume 41, Issue 5, 2006.
- [14] "FORMOSAT-3/COSMIC-1." eportal. <https://www.eoportal.org/satellite-missions/formosat-3#certotbb-coherent-electromagnetic-radio-tomographytriband-beacon-transmitter> (Accessed Dec. 22, 2024).
- [15] F. Farhani, and A. Anvari, "Effects of Some Parameters on the Thermal Control of a Small L.E.O. Satellite," *Journal of Space Science and Technology (JSST)*, vol. 7, no. 1, 2014.
- [16] A. Anvari, F. Farhani, and K.S. Niaki, "Comparative Study on Space Qualified Paints Used for Thermal Control of a Small Satellite," *Iranian Journal of Chemical Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 50-62, 2009.



COPYRIGHTS

© 2025 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)