

Modeling and Calculating the Albedo and the IR Heat Flux Applied to Satellite Based on the Geographic Position of Satellite

B.MohaselAfshari^{1*}, J. Haghshenas², M.Abedi³ and M. Khoshsim⁴

1, 2, 3, 4. Satellite Systems Research Center, Iran Space Research Institute

*Postal Code: 1997994313, Tehran, IRAN

b.afshari@isrc.ac.ir

In this paper a precise approach for the calculation of albedo and IR heat flux applied to a satellite is proposed. Albedo and IR heat flux are calculated by determining a point on the surface of the Earth in which solar flux is reflected from that point. Hence albedo heat flux towards the satellite is a function of longitude, latitude, and altitude of satellite which is obtained by assuming absorption level of atmospheric environment in all frequency spectrum. In addition, total IR heat flux towards the satellite is the sum of emitting heat fluxes from different points on the Earth's surface towards the satellite. Furthermore, atmospheric transparency allows one to model and calculate albedo and IR heat for sun light and IR spectrum based on the MODTRAN algorithm in PcModWin software. IR and albedo heat fluxes are calculated in a time period for a satellite in a specific orbit and compared with those of reference values of a generic LEO satellite. Calculated heat fluxes can be used to obtain temperature variation of satellite components during its mission.

Keywords: Satellite, Albedo, Heat flux, Atmospheric transparency, IR heat, MODTRAN algorithm, Time period, Generic LEO satellite

1. PhD (Corresponding Author)
2. PhD
3. PhD
4. Assistant Professor

مدل سازی و محاسبه شار حرارتی ناشی از اعمال آلبدو و تابش مادون قرمز وارد شده به ماهواره بر حسب موقعیت جغرافیایی

بهزاد محصل افشاری^{۱*}، جواد حق شناس^۲، محسن عابدی^۳ و مسعود خوش سیمای^۴

۱-۴. پژوهشکده سامانه های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران

*تهران، کدپستی: ۱۹۹۷۹۹۴۳۱۳

b.afshari@isrc.ac.ir

در این مقاله، یک روش محاسباتی دقیق برای تعیین شار حرارتی آلبدو و مادون قرمز (IR) تابیده شده بر ماهواره ارائه شده است. برای محاسبه شار آلبدو وارد شده به ماهواره، نقطه ای از سطح زمین که نور خورشید از آن مکان بازتابیده شده است به صورت دقیق تعیین شده و مقدار شار حرارتی آلبدو وارده بر ماهواره به صورت تابعی از طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع ماهواره و با در نظر گرفتن مقدار جذب ناشی از محیط اتمسفر در تمامی بازه طیف فرکانسی مورد نظر به دست آورده می شود. همچنین شار حرارتی کل IR وارده به ماهواره، مجموع شارهای حرارتی است که از نقاط مختلف سطح زمین به ماهواره وارد شده است. برای یک ماهواره در مدار دایروی مشخص، شار حرارتی IR و آلبدو در یک بازه زمانی محاسبه شده است. به منظور به دست آوردن تغییرات دمایی اجزای ماهواره در طول مأموریت، مقادیر شارهای حرارتی محاسبه شده در طراحی حرارتی ماهواره مورد استفاده قرار می گیرد. برای مدل سازی و محاسبه پارامترهای اصلی اتمسفر از الگوریتم MODTRAN و نرم افزار PcModWin استفاده شده است.

واژه های کلیدی: ماهواره، اتمسفر، شار خورشیدی، آلبدو، تشعشع مادون قرمز، ضریب دید، ضریب عبور، الگوریتم MODTRAN

r_p

نشان دهنده بردار موقعیت نقطه ی P نسبت به زمین

R

شعاع زمین

φ

و عرض جغرافیایی مرکز سطح امان

$F_{P,Sat}$

متغیر ضریب دید نقطه ی Pi نسبت به ماهواره

علائم و اختصارات

IR	Infra Red
MODTRAN	Moderate resolution atmospheric Transmission
N	N
ASTM	American Society for Testing and Materials
LEO	Low Earth Orbit
r_{Sat}	بردار موقعیت ماهواره نسبت به مرکز زمین

مقدمه

به منظور اطمینان از صحت عملکرد هر یک از اجزای ماهواره در زمان مأموریت، دامنه تغییرات دمایی هر یک از قطعات می بایست در محدوده ی مجاز تعیین شده قرار گرفته شود. شار حرارتی که بر سطوح ماهواره وارد می شوند شامل شار حرارتی خورشیدی، شار آلبدو و شار حرارتی فروسرخ (IR) تابیده شده از زمین است. شار

۱. دکتری (نویسنده مخاطب)

۲. دکتری

۳. دکتری

۴. استادیار

فصل‌ها و قاره‌های مختلف بدست آورده‌اند [۹]. تاوو و همکاران، تغییرات مقدار ضریب آلبدو اندازه‌گیری شده از ماهواره‌های مختلف در طول سال‌های مختلف را بررسی کرده و با استفاده از نتایج به‌دست آمده، تغییرات آب و هوایی کره زمین را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۰]. ووتر با بررسی تغییرات مقدار ضریب آلبدو در مناطق قطبی گرینلند، وسعت مناطق یخی را در این منطقه بررسی کرده است [۱۱]. وانگ با استفاده از مدل معرفی شده، ضریب آلبدو در مناطق قطبی را پیش‌بینی نموده و نتایج را با استفاده از نتایج به‌دست آمده از ماهواره‌های سنجندهی مورد بررسی قرار داده است [۱۲]. مارتین در بررسی‌ای که بر نیروهای وارد شده بر ماهواره انجام داده است، تأثیر ضریب آلبدو را بر مقدار نیروی اغتشاشی وارد شده بر ماهواره^۷ لاجیوس^۸ مورد بررسی قرار داده است [۱۳]. ددیو از یک مدل فیزیکی برای به‌دست آوردن مقدار آلبدو در مدل‌سازی حرارتی استفاده کرده و مقادیر به‌دست آمده برای شارهای حرارتی را از شبیه‌سازی و مدل‌سازی برای نواحی مختلف زمین را بررسی کرده‌اند [۱۴]. در این تحقیق یک روش دقیق برای محاسبه‌ی شارهای حرارتی زمین به ماهواره ارائه شده است. برخلاف روش‌های قبلی که سطح زمین را با خواص تشعشعی ثابت در نظر گرفته شده است، در این تحقیق خواص تشعشعی سطح زمین را به صورت تابعی از طول و عرض جغرافیایی زمین در نظر گرفته و با توجه به موقعیت ماهواره و نحوه قرارگیری قاره‌ها، مقدار شار حرارتی محاسبه می‌گردد. از مزایای در نظر گرفتن یک روش دقیق برای محاسبه شارهای حرارتی وارده به ماهواره در این است که با بهبود فرآیند طراحی، می‌توان حاشیه اطمینان‌های در نظر گرفته شده در طراحی اجزای ماهواره را کاهش داد. به عنوان مثال مقدار گرمکن‌های استفاده شده در ساختار ماهواره را به حداقل مقدار ممکن رسانید و بدین ترتیب موجبات کاهش وزن ماهواره را فراهم نمود.

مدل‌سازی شار حرارتی IR

به‌منظور بدست آوردن مقدار کل شار حرارتی وارده به ماهواره، کلیه‌ی نقاطی از سطح زمین که در نقطه‌ی دید ماهواره هستند باید یافته شده و به دقت ضریب دید هر نقطه نسبت به ماهواره تخمین زده شوند. این ضرایب دید بیانگر بخشی از امواج تشعشعی است که از سطح مورد نظر در زمین به ماهواره اعمال می‌شود. در زمان عبور شار تشعشعی از اتمسفر، مقداری از شار حرارتی مادون قرمز توسط عناصر و ترکیبات موجود در ساختار اتمسفر جذب می‌شود. به منظور بدست آوردن مقدار کل شار حرارتی وارده به ماهواره، میانگین ده ساله‌ی شار IR از سطح زمین در نقاط مختلف از مرجع کتابخانه‌ای ناسا استخراج شده است [۱۵]. با در نظر گرفتن ضریب عبور و

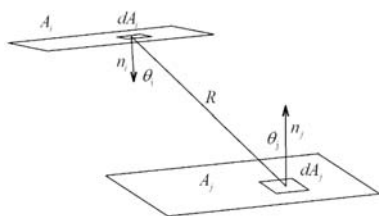
حرارتی آلبدو بخشی از شار حرارتی خورشیدی است که به‌صورت بازتابش نور خورشید از سطح زمین به ماهواره وارد می‌شود. مقدار شار حرارتی مادون قرمز تابیده شده به ماهواره تابعی از دما و ضریب تشعشع (اپسیلون) سطح زمین است. این شار حرارتی ناشی از مجموع آثار شار حرارتی هر یک از نقاطی است که در نقطه‌ی دید ماهواره هستند. شار حرارتی آلبدو و IR بعد از تضعیف و پراکنده‌شدن توسط اتمسفر به سطح ماهواره وارد می‌شوند. هدف از انجام این تحقیق، به‌دست آوردن مقدار دقیق شار حرارتی IR و آلبدو وارد شده بر یک ماهواره با در نظر گرفتن موقعیت ماهواره بر حسب طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع ماهواره و مقدار جذب اتمسفر با در نظر گرفتن توزیع فرکانسی نور تابیده شده است.

در مطالعات انجام شده توسط وارک و همکاران [۱] با استفاده از ماهواره‌ی هواشناسی تیروس-۲^۹ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و روش معرفی شده، مقدار شار حرارتی مادون قرمز منتشر شده از سطح زمین به‌دست آورده شده است [۱]. اوزونوف و همکاران با بررسی شار حرارتی تشعشعی حرارتی در گسل‌های زمین، تغییرات شار حرارتی مادون قرمز زمین را قبل و بعد از وقوع زلزله‌های بزرگ بررسی نموده‌اند. مطابق این تحقیق، توزیع شار حرارتی زمین قبل از زلزله در مناطق نزدیک وقوع دارای کانتورهای ناهمگونی دما می‌شود [۲]. چن و همکاران در تحقیقی که در زمینه‌ی محاسبه‌ی شار حرارتی تشعشعی از زمین انجام داده‌اند، مقدار شار تشعشعی مادون قرمز زمین را با استفاده از نتایج ماهواره‌ی ایرس^{۱۰} به‌دست آورده شده است [۳]. در تحقیقات انجام شده توسط هی ریو و همکاران، وجود ابر در آسمان با استفاده از مقدار شار حرارتی تشعشعی زمین بررسی شده است [۴]. دکتر خانیکی و همکاران مقدار شار تشعشعی وارده به ماهواره را با استفاده از داده‌های دمایی سنسورهای متصل به ماهواره و موقعیت و وضعیت ماهواره تخمین زده است [۵]. پرایس در تحقیق انجام داده شده با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی شار حرارتی مادون قرمز، مقدار تبخیر سطحی در مناطق مختلف کره زمین را بدست آورده است [۶]. گیلومر با استفاده از نتایج نیمه تحلیلی برای ماهواره‌ها با مدارهای متفاوت، مقادیر متوسط برای شار حرارتی IR و آلبدو را برای تحلیل حرارتی فضایی‌ها پیشنهاد داده است [۷]. در بررسی‌های انجام شده توسط کونور، مقدار ضریب آلبدو توسط ماهواره تیروس بررسی شده و تأثیر وجود ابر و عوارض زمینی بر مقدار آلبدو بازتابش شده به‌دست آورده شده است [۸]. در زمینه‌ی مدل‌سازی آلبدو تحقیقات مختلفی انجام شده است. ایان و همکاران با استفاده از داده‌های ماهواره‌های سنجندهی در نواحی مختلف زمین، ضریب آلبدو با طیف فرکانسی ۶۰ میکرون را مورد بررسی قرار داده‌اند و تغییرات شدت تشعشع را در

5. TIROSS II
6. AIRS

7. LAGEOS

در این رابطه، A_i و A_j مساحت سطح جسم i و j و زاویه θ_i و θ_j برابر با زاویه ای ایجاد شده مابین بردار نرمال سطح i و j با خط واصل مرکز سطوح است. در شکل ۲ زاویه های ذکر شده نشان داده شده است.



شکل ۲- معرفی بردارهای نرمال و زاویه ها در فاکتور دید

در این مقاله به دلیل ناچیزبودن مساحت اجزای ماهواره نسبت به فاصله ی ماهواره از زمین، ماهواره به صورت یک نقطه در نظر گرفته شده است. لذا برای محاسبه ی ضریب دید خواهیم داشت.

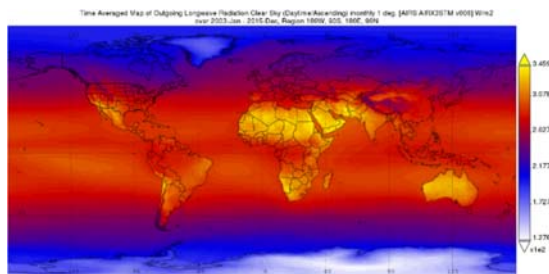
$$F_{i,j} = \int_{A_j} \frac{\cos(\theta_i) \cos(\theta_j)}{\pi R^2} dA_j \quad (2)$$

به منظور محاسبه ی شار حرارتی کل وارد شده به ماهواره، سطح زمین به تعدادی نقطه تقسیم شده است به گونه ای که در راستای طول جغرافیایی به N قسمت مساوی و در جهت عرض جغرافیایی به M قسمت مساوی تقسیم گردد. مساحت هر یک از المان های تقسیم شده برابر است با

$$dA = \frac{R^2 \cos(\varphi)}{M \times N} \quad (3)$$

که در آن R شعاع زمین و φ عرض جغرافیایی مرکز سطح المان در نظر گرفته شده می باشد.

در شکل ۳، مقدار متوسط تابش مادون قرمز به صورت مقدار میانگین ده ساله در نقاط مختلف کره ی زمین نشان داده شده است [۸]. همان طور که مشاهده می شود، مقدار این متغیر در مناطق قطبی دارای کمترین مقدار بوده و در مناطق کویری نزدیک خط استوا بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. به صورت کلی با فاصله گرفتن از خط استوا، مقدار شار تشعشی کاهش می یابد.

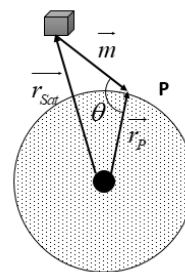


شکل ۳- مقادیر متوسط مادون قرمز برای نقاط مختلف کره ی زمین

ضریب دید هر یک از نقاط متناظر بر روی زمین نسبت به ماهواره، مقدار کل شار حرارتی مادون قرمز به ماهواره محاسبه می گردد.

در این مقاله یک روش جدید برای مدل سازی حرارتی ماهواره با در نظر گرفتن شرایط اتمسفر و خصوصیات بازتابش طیفی نقاط مختلف سطح زمین ارائه شد. به منظور استفاده از روش معرفی شده، یک ماهواره نوعی در مدار دایروی با ارتفاع ۵۰۰ کیلومتری و زاویه ی میل مداری ۵۵ درجه در نظر گرفته شده است. برای ماهواره مورد نظر با استفاده از این روش شار حرارتی IR و آلبدو محاسبه شده است.

برای یک ماهواره با موقعیت مشخص، بخشی از سطح زمین از ماهواره قابل رؤیت است. برای به دست آوردن مقدار کل شار حرارتی IR وارده بر ماهواره، این بخش از سطح زمین می بایست به صورت دقیق تعیین شده و تأثیر هر جزء بر روی شار کل مادون قرمز وارد شده به ماهواره محاسبه گردد. در شکل ۱ موقعیت یک ماهواره نوعی و نقطه ی P به عنوان یک نقطه ی نمونه بر روی سطح زمین نشان داده شده است. بردار r_{Sat} نشان دهنده ی بردار موقعیت ماهواره نسبت به مرکز زمین و بردار r_p نشان دهنده ی بردار موقعیت نقطه ی P نسبت به زمین است.



شکل ۱- بردار موقعیت نقطه P و مکان ماهواره

زمانی که نقطه ی P در دید ماهواره باشد، زاویه ی θ دارای مقدار بزرگ تر از ۹۰ درجه خواهد شد. به منظور محاسبه ی نقاطی از زمین که در تابش IR به ماهواره تأثیرگذار هستند، سطح کره ی زمین به تعداد محدود نقطه تقسیم شده است و برای کلیه ی نقاط در نظر گرفته شده، در صورتی که $r_{Sat} \cdot r_p < 0$ برقرار باشد، نقطه P در محدوده ی دید ماهواره قرار خواهد گرفت و در محاسبه شار مادون قرمز وارده بر ماهواره در نظر گرفته می شود.

به کسری از شار تشعشی تابیده شده از سطح i که به سطح j وارد می شود، ضریب دید (F_{ij}) گفته می شود. این متغیر تابعی از هندسه و وضعیت قرارگیری دو سطح نسبت به یکدیگر است که برای دو سطح i و j با استفاده از رابطه ی زیر به دست آورده می شود.

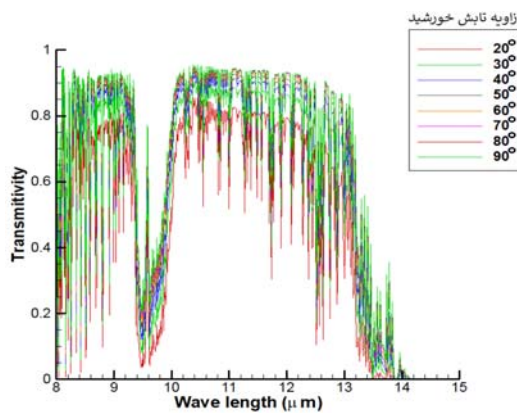
$$F_{i,j} = \frac{1}{A_i} \iint_{A_i A_j} \frac{\cos(\theta_i) \cos(\theta_j)}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (4)$$

با کاهش زاویه‌ی تابش خورشیدی، مقدار ضریب عبور از اتمسفر کاهش می‌یابد که به دلیل افزایش طول مسیر عبوری نور خورشید و همچنین پدیده‌ی تفرق می‌باشد. به دلیل تغییر سرعت نور در لایه‌های مختلف اتمسفر به دلیل تغییر در چگالی، راستای نور خورشیدی وارد شده تغییر می‌نماید. در تحلیل‌های انجام شده، تاثیر زاویه‌ی مذکور در نظر گرفته شده است. به منظور به دست آوردن مقدار شار حرارتی کل وارد شده به ماهواره، خواهیم داشت.

$$Q_{IR(earth-satellite)} = \int_{A_{seen\ surface}} q''_{P_i} F_{P_i, Sat} Tr(P_i) dA \quad (4)$$

که در این رابطه، q''_{P_i} مقدار شار حرارتی مادون قرمز منتشر شده از زمین در نقطه‌ی P_i ، متغیر $F_{P_i, Sat}$ ضریب دید نقطه‌ی P_i نسبت به ماهواره و $Tr(P_i)$ مقدار ضریب عبور شار حرارتی IR در حین عبور از اتمسفر است. انتگرال مورد نظر می‌بایست بر روی کلیه نقاطی از سطح زمین که در دید ماهواره می‌باشد می‌بایست محاسبه شوند.

در شکل ۶ مقدار ضریب عبور در ناحیه‌ی مادون قرمز بر حسب فرکانس نشان داده شده است.

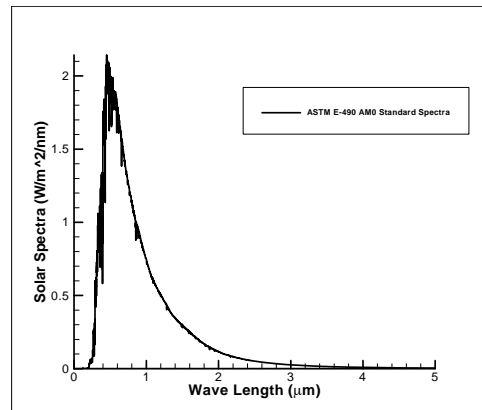


شکل ۶- تغییرات ضریب عبور نور مادون قرمز برای زوایای تابش مختلف بر حسب طول موج نور

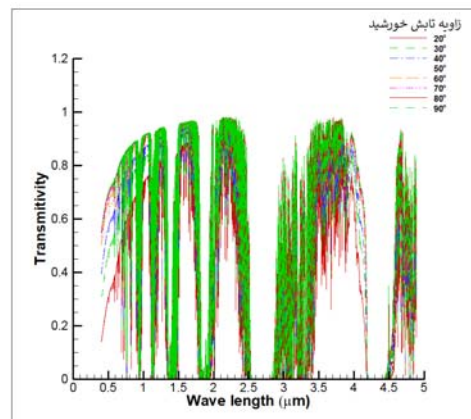
محاسبه‌ی شار حرارتی آلبدو

شار حرارتی آلبدو بخشی از شار خورشیدی است که با بازتابش از سطح زمین به سطح ماهواره وارد می‌شود. مقدار بازتابش نور خورشید به پوشش سطحی، شرایط اتمسفر در زمان تابش و زاویه‌ی تابش بستگی دارد. ضریب آلبدو سطوح مختلف زمین ثابت نیست. مقدار این ضریب از ۰/۷۵ در مناطق قطبی تا مقدار ۰/۰۶ در اقیانوس‌ها متغیر است. مقدار متوسط سالیانه ضریب آلبدو برای طول و عرض‌های جغرافیایی مختلف در شکل ۷، نشان داده شده است.

به منظور محاسبه‌ی مقدار حرارت جذب شده در اتمسفر، شدت تابش نور خورشید بر حسب فرکانس در نظر گرفته شده است و مقدار عبور اتمسفر در فرکانسهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار PcModWin و الگوریتم MODTRAN به صورت تابعی از فرکانس و زاویه‌ی تابش به صورت دقیق مدلسازی شده است. شکل ۴ نشان‌دهنده‌ی توزیع رادیانس شار خورشیدی بر حسب فرکانس تشعشع مطابق استاندارد ASTM-E490 می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار شار خورشیدی در فرکانس ۰/۶۵ میکرومتر بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است و تقریباً کل شار خورشیدی مابین دو فرکانس ۰/۲ و ۴ میکرومتر قرار دارد. تغییرات ضریب عبور برای فرکانس‌ها و زوایای تابش مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در برخی از فرکانس‌ها، ضریب عبور در یک ناحیه‌ی پنجره‌ای مقدار صفر را به خود اختصاص داده است که نشان‌دهنده‌ی جذب نور خورشید در فرکانس مورد نظر توسط اتمسفر است. بیشترین شار مادون قرمز انتشار داده شده از زمین در بازه فرکانسی Longwave IR قرار دارد که دارای طول موج ۸ تا ۱۵ میکرون است.



شکل ۴- توزیع رادیانس خورشیدی بر حسب طول موج مطابق استاندارد ASTM-E490



شکل ۵- تغییرات ضریب عبور نور از اتمسفر بر حسب طول موج برای زوایای تابشی مختلف به زمین

به منظور تعریف معیار هم راستایی دو بردار ذکر شده، زاویه‌ی ما بین بردار یک‌ه‌ی بردار بازتابش \vec{r}_{ref} و بردار یک‌ه‌ی بردار \vec{r}_{ref} را n_{ref} و بردار یک‌ه‌ی راستای خط واصل سطح زمین به ماهواره n_{p-s} (زاویه‌ی انحراف) در نظر گرفته می‌شود. بنابراین خواهیم داشت.

$$\theta_{dev} = \cos^{-1} \frac{\vec{e}_{ref} \cdot \vec{e}_{p-s}}{|\vec{e}_{ref}| |\vec{e}_{p-s}|} = \cos^{-1} (\vec{e}_{ref} \cdot \vec{e}_{p-s}) \quad (6)$$

اگر مقدار زاویه‌ی انحراف صفر باشد، به این مفهوم است که بازتابش نور خورشید در نقطه P بر روی سطح زمین به ماهواره وارد می‌شود. برای پیدا نمودن نقطه‌ی بازتابنده، زاویه‌ی انحراف برای همه‌ی نقاط در نظر گرفته شده بر روی زمین محاسبه شده و مقدار کمینه‌ی این زاویه به عنوان نقطه‌ی بازتابش در نظر گرفته خواهد شد.

به منظور محاسبه‌ی شار حرارتی آلودگی وارد شده به ماهواره، با در نظر گرفتن ضریب بازتابش و توزیع شدت تابش خورشیدی در فرکانس‌های مختلف خواهیم داشت.

$$q_{alb} = \alpha_{alb} (X_p) \int_0^{\infty} q(\lambda) \tau(\lambda, \theta) d\lambda \quad (7)$$

در این رابطه، $q_i(\lambda)$ مقدار شدت تشعشع خورشید (رادیناس) در طول موج مورد نظر و $\tau(\lambda, \theta)$ ضریب عبور نور از اتمسفر (مجموع تاثیر در ورود و خروج) به صورت تابعی از طول موج و زاویه اعمال شار خورشیدی می‌باشد. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، قسمت اعظم شار خورشیدی در بازه‌ی طول موج ۰.۵ تا ۴ میکرومتر می‌باشد. بنابراین این ضریب آلودگی نهایی برای ماهواره برابر خواهد بود با

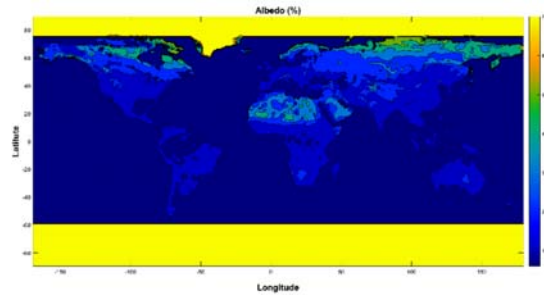
$$\alpha_{alb-Tot} = \alpha_{alb} (P) Tr(\theta) \quad (8)$$

$$Tr(\theta) = \frac{\int_{0.5\mu m}^{4\mu m} q(\lambda) \tau(\lambda, \theta) d\lambda}{\int_{0.5\mu m}^{4\mu m} q(\lambda) d\lambda} \quad (9)$$

در معادله فوق P نشان دهنده‌ی مکان جغرافیایی نقطه بر روی سطح زمین است که نور خورشید در آن نقطه بازتابیده می‌شود. با استفاده از داده‌های عددی برای ضریب عبور و شار خورشیدی که قبلاً به آنها اشاره گردید، مقدار ضریب آلودگی کلی بدست آورده می‌شود که تابعی از نقطه‌ی بازتابش دهنده و زاویه‌ی ورودی خورشید می‌باشد.

در شکل ۹ مدل‌سازی اپتیکی انجام شده در نرم‌افزار PcModwin نشان داده شده است که با استفاده از آن ضریب عبور در بازتابش نور خورشید بدست آمده است. نتایج بدست آمده از این

به دلیل کمبود اطلاعات در نواحی قطبی، از مقدار متوسط ضریب آلودگی سطوح برفی در نواحی قطبی استفاده شده است.

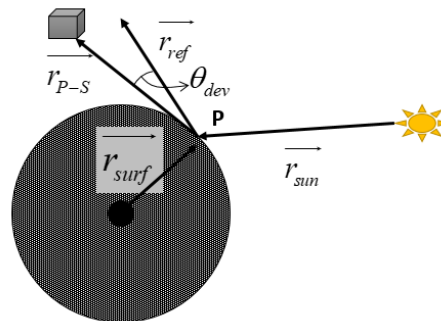


شکل ۷- کانتور توزیع ضریب آلودگی در نقاط مختلف سطح کره زمین

به منظور بررسی شار حرارتی آلودگی تابیده شده به ماهواره، بازتابش نور خورشید از سطح زمین به صورت کاملاً آینه‌ای در نظر گرفته شده است. بدین منظور، در ابتدا محل جغرافیایی بازتابش نور خورشید در روی سطح زمین به دست آورده شده است. مقدار ضریب آلودگی اعمال شده به ماهواره حاصلضرب ضریب آلودگی در مکان بازتابش کننده در ضریب عبور اتمسفر است. به منظور پیدا کردن نقطه‌ی مورد نظر، راستای بازتابش نور خورشید در هر یک از نقاط روی سطح زمین به دست آورده می‌شود. اگر راستای بازتابش نور در راستای خط واصل نقطه به ماهواره باشد، نقطه‌ی مورد نظر در سطح زمین به دست آورده می‌شود. با در نظر گرفتن بردار واصل نقطه‌ی سطح زمین (P) نسبت به مرکز زمین، \vec{r}_{surf} و بردار واصل خورشید به نقطه مورد نظر، \vec{r}_{sun} بردار بازتاب شده برابر خواهد بود با

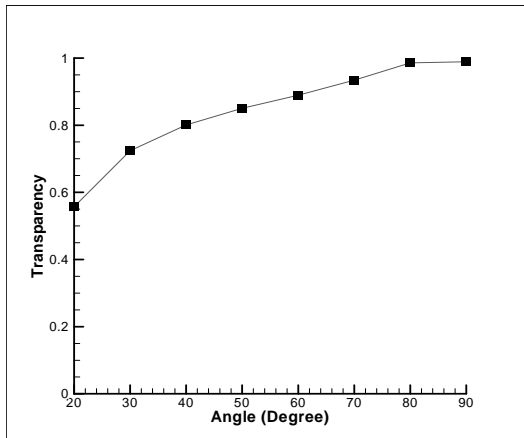
$$\vec{r}_{ref} = 2\vec{r}_{surf} - \vec{r}_{sun} \quad (5)$$

اگر جهت بردار بازتابش و بردار واصل ماهواره به نقطه در یک راستا باشند، نقطه‌ی بازتاب کننده بدست آورده می‌شود و ضریب آلودگی متناظر با آن نقطه در محاسبات حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۸ بردارهای فوق نشان داده شده‌اند.



شکل ۸- بردارهای تابش و بازتابش نور خورشید

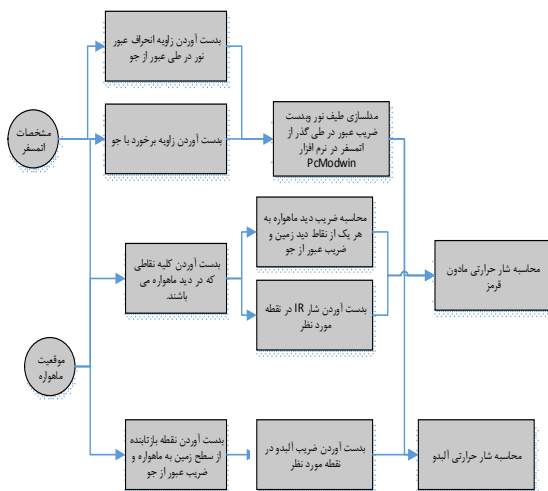
نرم‌افزار برای ارتفاع مداری بالای ۱۰۰ کیلومتر به دلیل کاهش شدید غلظت اتمسفر تغییر قابل ملاحظه‌ای ندارد. بنابراین برای مدل‌سازی نرم‌افزاری، ارتفاع ماهواره ۱۰۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است.



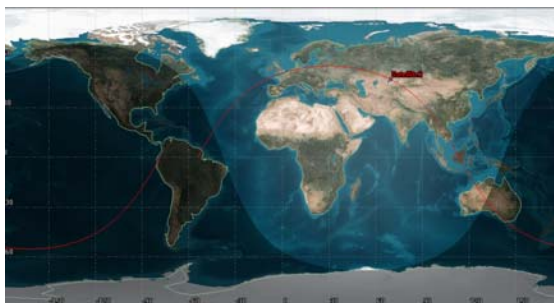
شکل ۱۱- تغییرات ضریب عبور میانگین بر حسب زاویه تابش

نتایج

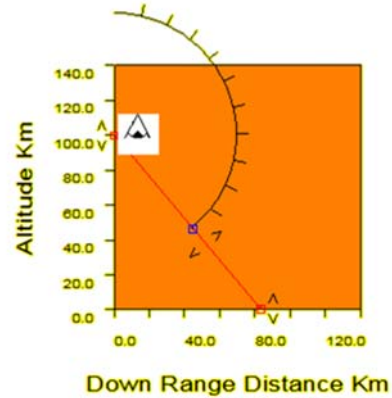
نحوه محاسبه‌ی تغییرات شار حرارتی مادون قرمز و آلبدو که در بخش قبل اشاره شد به صورت خلاصه در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همچنین شکل ۱۳ نشان دهنده‌ی رد زمینی مسیر حرکت ماهواره‌ی در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۲- فلوجارت نحوه محاسبه‌ی شار حرارتی مادون قرمز و آلبدو

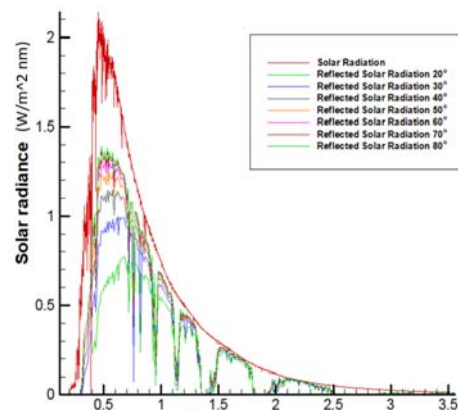


شکل ۱۳- مسیر حرکت یک ماهواره فرضی



شکل ۹- هندسه مدل‌سازی برای زاویه ۴۰ درجه در نرم‌افزار PcModwin

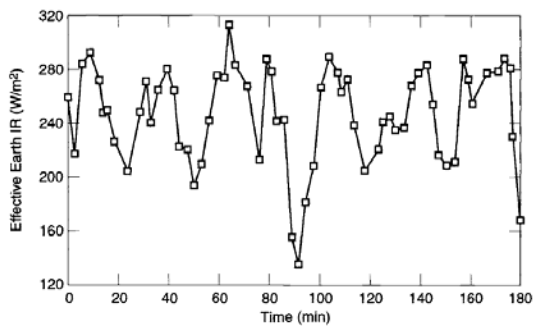
با توجه به روش فوق، مقدار متغیر آلبدو برای زوایای مختلف محاسبه شده است. شکل ۱۰ نشان دهنده‌ی تغییرات ضریب عبور بر حسب زاویه تابش است. در این شکل توزیع شار خورشیدی بر حسب طول موج نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقداری از شار حرارتی ورودی خورشیدی به سطح زمین وارد می‌شود. مقدار شار حرارتی ورودی خورشیدی با کاهش زاویه‌ی ورودی نور خورشید، کاهش پیدا می‌کند. در نمودار فوق، زاویه‌ی ۹۰ درجه نشان دهنده‌ی حالتی است که نور با طی کمترین مسیر و به صورت عمود بر سطح زمین وارد شده است.



شکل ۱۰- توزیع رادیانس بازتابیده شده بر حسب طول موج برای زوایای تابشی مختلف

با استفاده از نتایج شکل ۱۰، مقادیر متوسط ضریب عبور نور خورشید با در نظر گرفتن ضریب وزنی رادیانس خورشیدی در فرکانس‌های مختلف محاسبه شده است. این متغیر به صورت تابعی از زاویه θ محاسبه شده و در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

همان طور که نشان داده شده است، مقادیر شار IR دریافتی توسط ماهواره، ۶۵ تا ۲۹۵ وات بر متر مربع و مقدار متوسط بدست آمده ۲۰۱ وات بر متر مربع به دست آورده شده است. گیلومر [۷] برای ماهواره‌ای با مشخصات مداری فوق، مقدار تشعشع مادون قرمز متوسط را ۱۹۳ وات بر مترمربع پیشنهاد داده است. مقدار محاسبه شده و مقدار مرجع در تطابق بسیار خوبی با یکدیگر هستند. گیلومر یک ماهواره را به عنوان نمونه در نظر گرفته است و مقدار شار مادون قرمز را برای آن محاسبه کرده است. در شکل ۱۶ تغییرات شار حرارتی بر حسب زمان برای ماهواره مفروض را نشان داده شده است. دو نمودار را ۱۵ و ۱۶ تقریباً مشابه یکدیگر بوده و نحوه‌ی تغییرات شار حرارتی مادون قرمز در هر دو حالت مشابه می‌باشد. از آنجاکه ماهواره‌های در نظر گرفته شده در مرجع با ماهواره مورد اشاره دارای مشخصات مداری مکان پرتاب یکسان نیستند، بنابراین عدم تطابق کامل دو نمودار، منطقی است.



شکل ۱۶- مقادیر شار مادون قرمز زمین در بازه‌ی سه ساعت برای یک ماهواره LEO نمونه [۷]

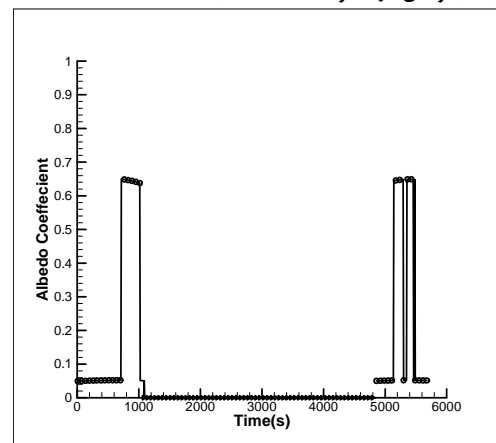
نتیجه‌گیری و مشاهدات

در این مقاله، یک روش محاسباتی برای بدست آوردن مقدار دقیق شار حرارتی مادون قرمز و آلبدو برای ماهواره یا هر نوع فضاپیما معرفی شد. با استفاده از روش معرفی شده، می‌توان مقدار شار حرارتی دقیق‌تری نسبت به حالتی که یک مقدار متوسط برای کل مدت مأموریت در نظر گرفته شده است را به دست آورد که سبب می‌شود با محاسبه‌ی دامنه‌ی تغییرات دمای اجزای داخلی و خارجی بخش‌های مختلف فضاپیما، مقدار دمای آن با دقت بهتری محاسبه شده که این امر سبب بهینه شدن طراحی حرارتی گردد.

مراجع

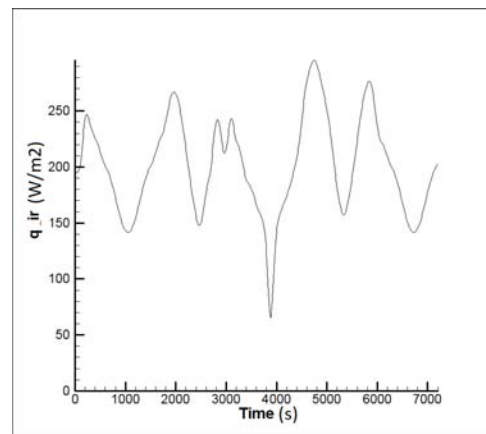
- [1] Wark, D.Q., Yamamoto, G. and Lienesch, J.H. "Methods of Estimating Infrared Flux and Surface Temperature from Meteorological Satellite," *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1962, Vol.19. pp. 369-384

برای این ماهواره، تغییرات ضریب آلبدو و شار حرارتی IR در مدت زمانی یک پرپود محاسبه شده و مقادیر شارهای حرارتی مادون قرمز و آلبدو با در نظر گرفتن ناهمگونی سطح زمین و تغییرات خواص تشعشعی در نقاط مختلف محاسبه شد. شکل ۱۴ نشان‌دهنده‌ی تغییرات ضریب آلبدو بر حسب زمان گذر ماهواره است. همان طور که نشان داده شده است، در زمانی که ماهواره در بخش تاریک زمین قرار گرفته باشد، مقادیر آلبدو صفر در نظر گرفته خواهد شد. از آنجاکه قسمت اعظم سطح کره زمین، محیط اقیانوسی است، بنابراین در بخش اعظم مسیر حرکت ماهواره، مقدار ضریب آلبدو کل در حدود ۰/۰۶ محاسبه شده است.



شکل ۱۴- تغییرات ضریب آلبدو وارد شده به ماهواره بر حسب زمان برای بازه زمانی پرپود یک ماهواره نمونه

تغییرات شار حرارتی مادون قرمز در بازه زمانی در نظر گرفته شده نیز با استفاده از رابطه‌ی (۷) برای این ماهواره محاسبه شده است. شکل ۱۵ نشان‌دهنده‌ی مقدار تابش مادون قرمز وارد شده به ماهواره در زمان مأموریت مداری ماهواره‌ی فوق است.



شکل ۱۵- مقادیر شار مادون قرمز دریافتی توسط ماهواره در نظر گرفته شده

- Observation at 0.6 Micrometer,” *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 26, 1986.
- [10] He, T., Liang, Sh., Xia Song, D., “Analysis of Global Land Surface Albedo Climatology and Spatial-Temporal Variation During 1981-2010 from Multiple Satellite Products,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 119, No. 10, 2014, pp 291-298.
- [11] H. Knap, W. and Oerleamans, J., “The Surface Albedo of the Greenland Ice Sheet: Satellite-Derived and In Situ Measurements in the Sondre Stromfjord Area During the 1991 Melt Season,” *Journal of Glaciology*, Vol. 42, No 141, 1996.
- [12] Wang, T., Peng, S., Krinner, G., Ryder, J., Li, Y., Dantec-Nédélec, S. and et al., “Impacts of Satellite-Based Snow Albedo, Assimilation on Offline and Coupled Land Surface Model Simulations,” *PLOS ONE* Vol. 10, No. 9, 2015
- [13] Chreston F. Martin and David P. Rubincam, “Effects of Earth Albedo on the LAGEOS I Satellite” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. B2, 1996, pp. 3215-3226.
- [14] Dedieu, G., Deshamps, P.Y., Keer, Y.H., “Satellite Estimation of Solar Irradiance at the surface of the Earth and of Surface Albedo Using a Physical Model Applied to Meteosat Data,” *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 26, 1987. pp. 79-87.
- [15] Available, [on line]: <https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/>
- [2] Ouzounov, D., Liu, D., Chunli, K. and Cervone, G., “Outgoing Long Wave Radiation Variability from IR Satellite Data Prior to Major Earthquakes,” *Journal of technophysiscs*, Vol. 431, 2007, pp. 211-220.
- [3] Chen, X. and Huang, X., “Deriving Clear-Sky Long Wave Spectral Flux from Spaceborne Hyperspectral Radiance Measurement: A Case Study with AIRS Observations,” *Journal of Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. 9 2016, pp. 6013-6023.
- [4] Ryu, Y. H., Hodzic, A., Descombes, G., Hall, S., Minnis, P., Spangenberg, D., Ullmann, K. and Madronich, S., “Improved Modeling of Cloudy-Sky Actinic Flux Using Satellite Cloud Retrievals,” *Geophysical Research Letters*, V.44, 2017, pp. 1592-1600.
- [5] Behrooz Khaniki H. and Hossein Karimian, S.M., Determining the Heat Flux Absorbed by Satellite Surfaces with Temperature Data, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 6, 2014, pp. 2393-2398.
- [6] C. Price, J., “Estimation of Regional Scale Evapotranspiration Through Analysis of Satellite Thermal-infrared Data,” *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 20, No. 3, July 1982.
- [7] G. Gilmore. D., *Spacecraft Thermal Control Handbook*, Vol. I: Fundamental Technologies.
- [8] H. Conover, J., “Cloud and Terrestrial Albedo Determination from TIROS Satellite Picture,” *Journal of Applied meteorology*, Vol. 4, Issue 3, 1965, pp. 378-386.
- [9] Matthews, E. and B. Rossow, W., “Regional and Seasonal Variation of Surface Reflectance from Satellite