

## (علمی-ترویجی)

# بررسی انواع روش‌های کنترل دما در ماهواره‌های مقیاس کوچک

زیرسیستم کنترل دمای هر ماهواره وظیفه تأمین و حفظ دمای مجاز تجهیزات آن ماهواره را برعهده دارد. طبیعی است که اگر این زیرسیستم از ماهواره به‌درستی طراحی نشود، سایر زیرسیستم‌ها از جمله محموله قادر نخواهند بود وظیفه خود را انجام دهند. به طور کلی، برای طراحی سیستم‌های کنترل دما دو روش فعال و غیرفعال وجود دارد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که المان‌هایی می‌توانند برای کنترل دمای یک ماهواره مقیاس کوچک مناسب باشند که دارای وزن، حجم و توان مصرفی پایین باشند. از این رو، تجهیزات کنترل دمای غیرفعال در ماهواره‌های مقیاس کوچک بسیار استفاده می‌شود. رایج‌ترین این تجهیزات پوشش‌ها، عایق‌ها و رنگ‌ها می‌باشند. اما معمولاً برای طراحی حرارتی ایمن‌تر ماهواره‌های کوچک از برخی المان‌های فعال هم استفاده می‌شود. در میان المان‌های فعال حرارتی، گرمکن‌ها رایج‌تر می‌باشند، چرا که گرمکن‌ها نسبت به سایر تجهیزات فعال حجم و وزن کمی را به خود اختصاص داده و همچنین توان کمتری نسبت به سایر المان‌ها مصرف می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: ماهواره، کنترل دما، روش فعال، روش غیرفعال

زینب حاجی بابایی طاهری<sup>۱\*</sup>، جاماسب پیرکندی<sup>۱\*\*</sup> و یوسف عباسی<sup>۱\*\*\*</sup>

۱- دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی هوافضا، تهران، ایران، کدپستی: ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵

\* دانشجوی کارشناسی ارشد

\*\* دانشیار (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:

jpirkandi@mut.ac.ir

\*\*\* استادیار

## Investigation of Thermal Control Methods in Small Scale Satellites

The thermal control subsystem (TCS) of satellites is responsible for providing and maintaining the allowable temperature of that satellite equipment. Naturally, if this subsystem is not properly designed, other subsystems, including the payload, will not be able to do their duties. In general, there are two active and inactive methods for designing TCS. Studies show that the elements can be suitable for controlling the temperature of a small-scale satellite (SSS) which has low weight, volume, and power consumption. Therefore, passive temperature control this equipment is widely used in SSS. The most common of these equipment are coatings, insulators, and paints. But some active elements are commonly used to make the thermal design of small satellites safer. Heaters are more common among thermally active elements, because they have less volume and weight than other active equipment, and consume less power than other elements.

**Keywords:** Satellite, Thermal Control, Active Method, Passive Method

Z. Haji Babae Taheri<sup>۱\*</sup>, J. Pirkandi<sup>۱\*\*</sup>, and Y. Abbasi<sup>۱\*\*\*</sup>

1- Faculty of Aerospace, Malek Ashtar University of Technology, Iran, Postal Code: 15875-1774, Tehran, IRAN

\* M.Sc. Student

\*\* Associate Professor  
(Corresponding Author): Email:

jpirkandi@mut.ac.ir

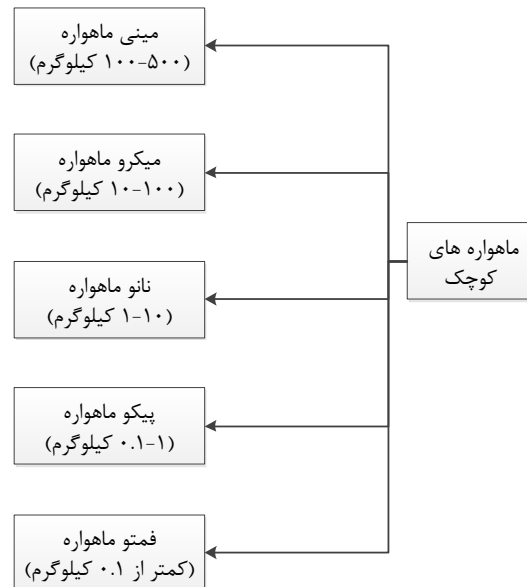
\*\*\* Assistant Professor

## (علمی-ترویجی)

زینب حاجی بابایی طاهری، جاماسب پیرکندی و یوسف عباسی

## ۱- مقدمه

هر ماهواره ساخته شده که دارای جرم و حجم پایینی باشد را می‌توان به عنوان یک ماهواره کوچک در نظر گرفت. ماهواره‌های کوچک نیز دارای بازه گسترده‌ای از تغییرات جرمی بوده و بر این اساس به چندین دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. این نوع ماهواره‌ها به ماهواره‌های مینیاتوری نیز شناخته می‌شوند [۱]. در شکل ۱ دسته‌بندی این ماهواره‌ها نشان داده شده است. مأموریت بیشتر ماهواره‌های مقیاس کوچک به خصوص ماهواره‌هایی که در دسته نانو ماهواره‌ها، پیکو ماهواره‌ها و فمتو ماهواره‌ها قرار می‌گیرند، در محدوده مدارهای لئو است. مدارهای مختلفی برای مأموریت‌های گوناگون در اطراف زمین بکار گرفته می‌شوند که به ترتیب ارتفاع شامل مدار لئو، مولنیا<sup>۲</sup> و ژئو<sup>۳</sup> می‌باشند. مدارهای لئو با ارتفاع کمتر از ۲۰۰۰ کیلومتر از سطح زمین و دوره گردش در حدود یک ساعت و نیم هستند که زاویه بین خط استوا با صفحه مداری آنها بین ۰ تا ۹۰ درجه تغییر می‌کند. مدارهای مولنیا به شکل بیضی با شعاع کوچک ۵۵۰ و شعاع بزرگ ۳۸۹۰۰ کیلومتر هستند. مدارهای ژئوسنکرون نیز مدارهایی دایروی شکل هستند که ارتفاعی بزرگتر از ۳۵۷۸۶ کیلومتر دارند. سرعت چرخش یکسان این مدارها با زمین باعث شده است ماهواره همواره در یک نقطه ثابت در مقابل زمین قرار بگیرد.



شکل (۱): دسته‌بندی انواع ماهواره‌های کوچک [۱].

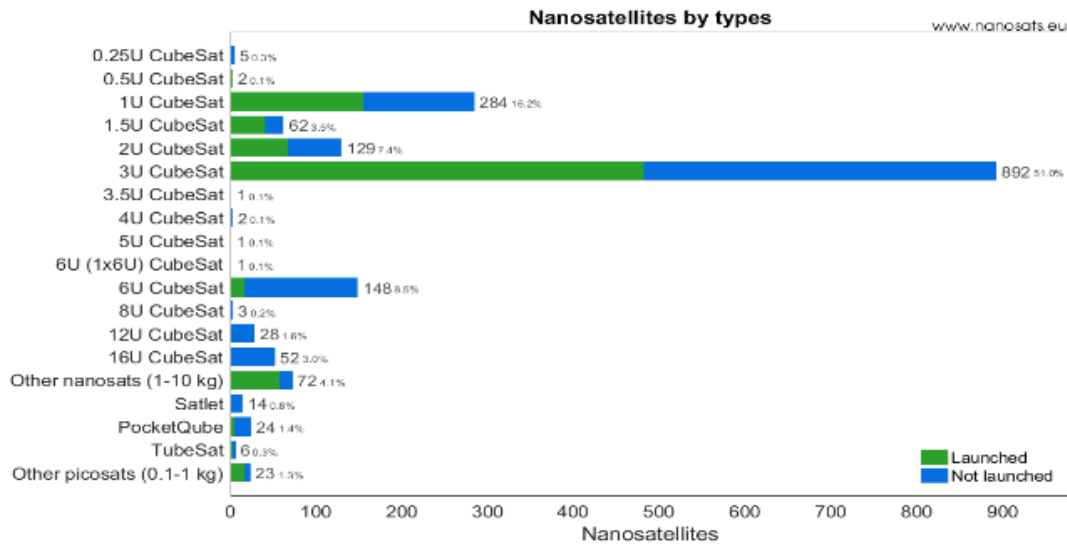
فناوری موجود در این ماهواره‌ها با ماهواره‌های بزرگ تفاوتی نمی‌کند. استقبال از این دو دسته نسبت به سایر دسته‌های ماهواره‌های کوچک بسیار کمتر است. نانوماهواره‌ها، ماهواره‌هایی با جرم ۱ تا ۱۰ کیلوگرم هستند. در این نوع ماهواره‌ها، تمامی تجهیزات باید با جرم و حجم کم قرار گیرند. همچنین، ماهواره‌های نانو از سیستم پیشران بی‌نیاز خواهند بود [۱]. ماهواره‌های مکعبی<sup>۵</sup> نیز نمونه‌ای از ماهواره‌های نانو هستند. ماهواره‌های مکعبی در ابعاد مختلف و به شکل مکعب مستطیل ساخته می‌شوند. اما رایج‌ترین آن‌ها در ابعاد ۱U، ۲U و ۳U هستند. هر یک U نماد مکعبی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر است. در شکل ۲ نشان داده شده که میزان استقبال از ماهواره مکعبی سایز ۱U و ۳U بسیار بیشتر از سایزهای دیگر است، [۲]. در سال‌های اخیر، استقبال از نانو ماهواره‌ها و سایر ماهواره‌های کوچک به شدت افزایش یافته و این موضوع به خوبی در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. پیکوماهواره‌ها به ماهواره‌هایی با جرم ۰/۱ تا ۱ کیلوگرم گفته می‌شود که برای ساخت آنها نیاز به فناوری‌های بسیار جدید و پیچیده می‌باشد. آمارها نشان می‌دهد که سالانه استقبال برای ساخت پیکوماهواره‌ها و نانوماهواره‌ها افزایش پیدا کرده است. هدف اصلی بسیاری از نانوماهواره‌ها و پیکوماهواره‌ها آزمایش تکنولوژی-های جدید در فضا است. شکل ۴ نشان می‌دهد که بیش از ۷۵٪ این نوع ماهواره‌ها برای هدف ترغیب دانشجویان به کارهای سیستمی ساخته شده‌اند، [۱]. فتموماهواره‌ها، ماهواره‌هایی با جرم زیر ۱۰۰ گرم هستند. این نوع ماهواره‌ها به ماهواره‌های ریز<sup>۶</sup> هم معروف شده‌اند. فمتو ماهواره‌ها اکثراً برای مأموریت‌هایی در فضا که نیاز به پخش تعداد زیادی از ماهواره‌ها باشد، استفاده می‌شوند، [۱].

وظیفه اصلی زیرسیستم کنترل دما، حفظ دمای تمامی تجهیزات در محدوده دمایی مجاز آن می‌باشد. همچنین، این سیستم باید گرادیان و پایداری دمایی مجاز تجهیزات را فراهم کند، [۴]. با توجه به استقبال بسیار زیاد از ماهواره‌های کوچک، تکنولوژی‌های ماهواره نیز نیاز به کوچک شدن دارد. سیستم کنترل دما نیز از این قضیه مستثنی نیست. به همین دلیل تجهیزات مربوط به این زیرسیستم روز به روز سبکتر و کم-حجم‌تر شده است. هدف عمده این تحقیق معرفی تمامی روش‌های فعال و غیرفعال استفاده شده در زیرسیستم کنترل دمای ماهواره‌های مقیاس کوچک می‌باشد.

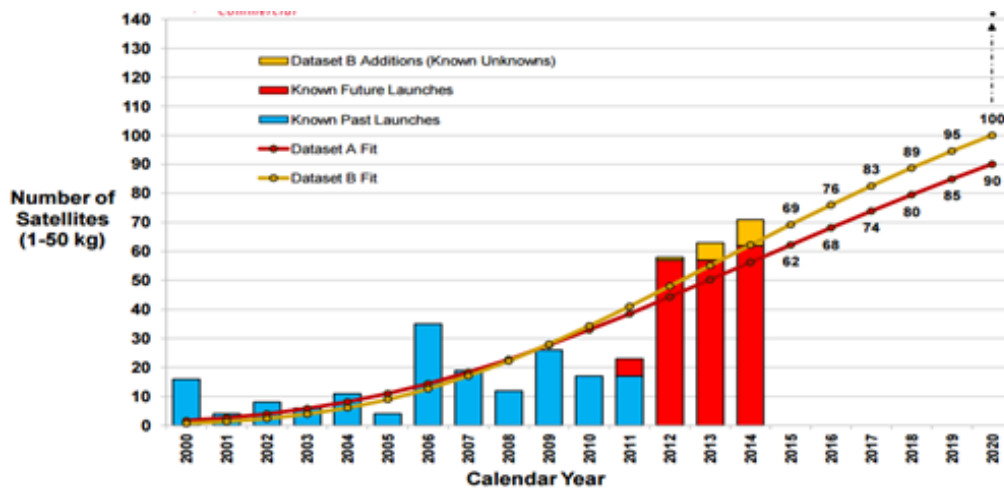
4. Nano  
5. Cubesat  
6. Pico  
7. Femto  
8. Tiny

1. Leo  
2. Molnya  
3. Geo

(علمی-ترویجی)  
بررسی انواع روش‌های کنترل دما در ماهواره‌های مقیاس کوچک

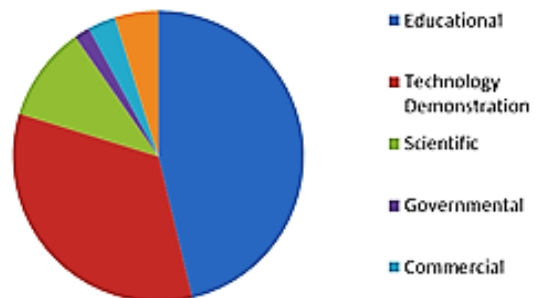


شکل (۲): میزان تولید انواع نانوماهواره‌ها [۳].



شکل (۳): تعداد ماهواره‌های سبک ساخته شده در هر سال [۳].

بدون صرف توان قادر به کنترل دمای تجهیزات ماهواره خواهد بود. پوشش‌ها و رنگ‌ها نمونه‌ای از تجهیزات غیرفعال هستند. اما همیشه این روش جوابگو نخواهد بود، بخصوص در ماهواره‌های پیچیده‌تر که نیاز به استفاده از روش فعال کنترل دما است. در روش فعال با استفاده از توان خارجی، دمای ماهواره کنترل می‌شود. در بسیاری از ماهواره‌ها با ترکیبی از این دو روش دمای ماهواره و تجهیزات آن را کنترل می‌کنند [۴].



شکل (۴): هدف‌های تعیین شده برای ساخت نانوماهواره‌ها و پیکو ماهواره‌ها [۳].

۲-۱- روش کنترل دمای غیر فعال

در روش کنترل دمای غیرفعال با استفاده از مکانیزم انتقال حرارت تشعشع و هدایت، دمای ماهواره کنترل می‌گردد. کنترل دما به صورت غیرفعال توسط انتخاب صحیح وضعیت هندسی سطح و خواص تشعشعی انجام می‌شود. برای مثال رادیاتورهای ماهواره توسط یک لایه پوشش کنترل حرارتی پوشیده می‌شوند

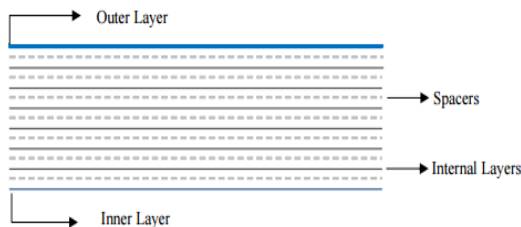
۲-۲ روش‌های کنترل دما در ماهواره

به طور کلی برای طراحی سیستم‌های کنترل دما دو روش فعال و غیرفعال وجود دارد. در روش غیرفعال، زیرسیستم کنترل دما

## (علمی-ترویجی)

زینب حاجی بابایی طاهری، جاماسب پیرکندی و یوسف عباسی

نمونه از این موارد هستند. نمونه دیگر، عایق‌های چند لایه‌ای<sup>۵</sup> هستند که در میان هر لایه خلاء وجود داشته و دارای ضریب صدور پایین می‌باشند. عایق‌های چند لایه برای کاهش نوسانات دما در تجهیزات ماهواره به کار می‌روند. این عایق‌ها گریان دما را در اجزایی که تحت حرارت خارجی غیریکنواخت قرار دارند، به کمترین مقدار می‌رسانند [۸]. عایق‌های چند لایه از تعدادی سپر حرارتی با خاصیت بازتاب بالا تشکیل شده‌اند که این سپرها به وسیله اسپیسرهای ساخته شده از موادی با رسانایی گرمای پایین، از هم جدا می‌شوند. سپرهای حرارتی نیز از صفحات نازک پلاستیکی ساخته شده‌اند که یک طرف یا در دو طرف آن را فلز پوشانده باشد. شکل ۵ نمونه‌ای از یک عایق چند لایه حرارتی استاندارد را نشان داده است [۹].



شکل (۵): نمایی از ساختار عایق‌های چندلایه [۹].

عایق‌های چند لایه، مؤثرترین عایق‌های به کار برده شده در ماهواره‌ها می‌باشند. این عایق‌ها از چندلایه صفحه بسیار نازک همراه با لایه‌های فاصله‌انداز<sup>۶</sup> ساخته می‌شوند. این نوع ساختار بندی باعث می‌شود که میان لایه‌های نازک تماس مستقیم وجود نداشته باشد و در نتیجه انتقال حرارت هدایتی برقرار نخواهد شد. در برخی موارد دیده شده که به جای اسپیسرها از لایه‌های برجسته برای کاهش انتقال حرارت هدایتی بین لایه‌ها استفاده شده است. بازده یک عایق چند لایه به طور زیادی به کم بودن میزان انتقال حرارت هدایتی میان صفحات بستگی دارد. در این میان یکی از پارامترهایی که تأثیر زیادی بر کارکرد عایق‌های چند لایه دارد، ضریب صدور مؤثر آن است، که از معادله ۱ به دست می‌آید. طبق بررسی‌های انجام شده بر روی مدل‌های آزمایشگاهی ضریب صدور عایق‌های چندلایه، به  $0.05$  نیز رسیده است. همچنین، برای کاربردهای فضایی نیز توانسته‌اند این عدد را به بازه  $0.015$  تا  $0.03$  نزدیک کنند. شکل ۶ نمونه‌ای از عایق‌های چندلایه ساخته شده برای استفاده در ماهواره را نشان می‌دهد [۱۰].

$$\varepsilon_{eff} = \frac{q_{tot}}{\sigma(T_{hot}^4 - T_{cold}^4)} \quad (1)$$

تا جذب شار حرارتی تابیده شده به مینیمم رسیده و تشعشع حرارتی به فضا بیشینه شود. این پوشش‌ها دارای ضریب جذب کم و ضریب صدور زیادی هستند. از جمله ابزارهای کنترل غیرفعال دما می‌توان به پوشش‌های حرارتی، عایق‌های حرارتی، چاه‌های حرارتی، دابلرها، آینه‌های سطحی ثانویه و نوارها اشاره کرد [۵].

**پوشش‌های حرارتی:** سطوح خارجی با توجه به دمای تقریباً پایین محیط، فقط به صورت تشعشع با محیط پیرامون خود تبادل حرارت می‌کنند. از سوی دیگر، چون این سطوح در معرض منابع خارجی انرژی قرار دارند، خواص تشعشعی آن‌ها می‌بایست به گونه‌ای انتخاب شود که در نهایت دمای مورد نظر قطعات تأمین شود. دو خاصیت مهم هر سطحی در ماهواره که از اهمیت زیادی برخوردار است، که شامل ضریب صدور سطح و ضریب جذب تابش خورشیدی می‌باشد. عموماً ضریب صدور تابعی از دما بوده و برای اکثر مواد در محدوده دمایی  $300$  کلوین مورد استفاده قرار می‌گیرد که دقت قابل قبولی را دارا است. پوشش‌های حرارتی در عین داشتن مزایایی از قبیل حجم و جرم کم دارای معایبی نیز می‌باشند. مهم‌ترین عیب این پوشش‌ها این است که در شرایط فضا دستخوش تغییر قرار می‌گیرند و خاصیت خود را از دست می‌دهند. به طور کلی، پوشش‌ها در فضا تحت تأثیر عواملی از قبیل ذرات باردار، تابش فرابنفش، خلاء بسیار و آلودگی‌هایی که بر روی آن‌ها قرار می‌گیرد، هستند. همه این عوامل موجب افزایش گسترده ضریب جذب و تغییر ناچیز در ضریب صدور می‌شوند. این تغییرات موجب شده است در بسیاری از ماهواره‌ها از رادیاتورهای بزرگ برای خنک کاری در پایان عمر پوشش‌ها استفاده شود. این در حالی است که وجود این رادیاتورها نیز ممکن است در آغاز عمر عملیاتی موجب سرد شدن بیش از اندازه تجهیزات شود. پایداری خواص اپتیکی پوشش‌ها نکته بسیار مهمی است که موجب می‌شود تغییرات دما و یا توان مورد نیاز گرمکن‌ها در ابتدا و پایان مأموریت دچار تغییر گسترده‌ای نشوند [۶]. یکی از پوشش‌های حرارتی مهم و پرکاربرد برای کنترل دمای ماهواره‌های کوچک رنگ‌ها هستند.

**عایق‌های حرارتی:** عایق‌های حرارتی باعث کاهش نرخ انتقال حرارت بر واحد سطح بین دو سطح مرزی که در دمای معینی قرار دارند، می‌شوند. عایق‌ها معمولاً از یک ماده همگن ساخته می‌شوند و فوم‌ها با ضریب هدایت حرارتی پایین یک

1. Thermal Cover
2. Thermal Insulation
3. Heat Sink
4. Doubler

5. Multy Layer Insulation (MLI)
6. Spacer

طبق ارزیابی‌های انجام شده توسط تریف مشخص شد که ژل‌های هوایی توانایی جایگزین شدن به جای عایق‌های چند لایه را دارند. پوشش‌های کامپوزیتی ژل‌های هوایی از نظر بازده کاری شبیه عایق‌های چندلایه هستند. نوع فوق سبک این پوشش‌ها به چگالی  $0.3/0$  گرم بر سانتی متر مکعب به ضریب هدایتی  $0.74/0$  میلی وات بر متر بر کلون در دمای  $160$  درجه سانتی گراد و در وضعیت خلأ نسبی رسیده است. به علاوه پوشش‌های ژل‌های هوایی می‌توانند فشاری به میزان  $200$  پی‌اس‌آی را بدون آنکه بر خواص حرارتی آن‌ها اثرگذار باشد، تحمل کنند. یکی دیگر از مزیت‌های پوشش‌های ژل هوایی نسبت به عایق‌های چندلایه، قیمت کمتر آن‌ها است. همچنین، این صفحه‌ها دارای پارمترهای تخلیه هوای مطلوب‌تری می‌باشند. اما نسبت به عایق‌های چندلایه بسیار کمتر در فناوری‌های فضایی استفاده شده اند. نکته جالب توجه این است که تجهیزات مورد استفاده در مریخ از صفحات ژل‌های هوایی سیلیکونی کدر شده کربن برای پوشش تجهیزات الکترونیکی حساس در موقعیت‌های شب مداری استفاده می‌کنند. ژل‌های هوایی نیاز به محیط با خلأ بالا ندارند و در نتیجه قابلیت تولید زمینی آن بالا خواهد بود. با توجه به کم بودن ضریب هدایتی ژل‌های هوایی، می‌توانند مناسب‌ترین پوشش برای خنک کردن تجهیزات باشد. اوامر<sup>۵</sup> در سال  $2007$  در تحقیقات خود به این نتیجه رسیده بود که ژل‌های هوایی بهترین پوشش برای محفظه‌های آب داغ خواهند بود. اگر سعی شود بر مبنای عملکرد پوشش‌ها، پوشش مناسبی را انتخاب کرد. واضح است که ژل‌های هوایی می‌توانند پوشش مناسبی برای کاربردهای زمینی باشند، اما در کاربردهای فضایی به دلیل تصمیم‌گیری سخت‌گیرانه دربارهٔ میزان هزینه‌ها ممکن است استفاده از ژل‌های هوایی محدودیت داشته باشد.

**واشرهای حرارتی:** در بسیاری از تحلیل‌های حرارتی، برای کنترل دمای تجهیزات ماهواره لازم است میزان انتقال حرارت هدایتی میان تجهیزات با صفحات اصلی ماهواره کم شود. یکی از ابزارهای مناسب برای انجام این کار، واشرهای حرارتی هستند. واشرهای حرارتی، واشرهایی دارای ضریب رسانندگی بسیار پایینی هستند. مشهورترین آن‌ها واشرهای حرارتی FR4 G10 است که ضریب رسانندگی آن به  $0.34/0$  وات بر متر بر کلون می‌رسد. این نوع واشر در ماهوارهٔ مکعبی STEP Cube Lab به کار برده شده است. نحوهٔ قرارگیری واشرها در شکل‌های ۸ و ۹ نمایش داده شده است [۱۲].



شکل (۶): نمونه‌ای از عایق‌های چندلایه ساخته شده برای استفاده در ماهواره [۱۰].

فلزاتی که در سپرهای تشعشی مورد استفاده قرار می‌گیرند، فلزاتی با تابش بسیار پایین هستند که برای کاهش ورود حرارت تابشی استفاده می‌شوند. آلومینیوم، طلا و نقره از رایج‌ترین فلزات هستند. صفحه‌های نازک پلاستیکی طی فرآیند خلأ یک طرف و یا هر دو طرف آن‌ها از فلزات پوشانده می‌شود. در میان انواع صفحات پلاستیکی نازک موجود، میلر<sup>۱</sup>، کیتون<sup>۲</sup> و تفلون<sup>۳</sup> بیشتر در کاربردهای فضایی انتخاب می‌شوند. میلرها گروهی از پلی‌استرها هستند که با وجود داشتن مزایایی از قبیل ارزان بودن، در صورت قرار گرفتن در معرض اشعه UV در طولانی مدت تجزیه می‌شوند. به همین دلیل بیشتر در صفحات داخلی عایق‌های چند لایه و یا برای آزمون‌هایی نظیر آزمون خلأ حرارتی استفاده می‌شوند [۹]. برای به کار گیری عایق‌های چندلایه در محیط فضا، حتماً باید به این موضوع توجه داشت که عایق مورد نظر بر مبنای استانداردهای ناسا طراحی و ساخته شود تا بتواند در شرایط محیطی فضا به خوبی کار خود را انجام دهد. در این استاندارد مواد مناسب برای تمامی پوشش‌ها ذکر شده است. طبق شکل ۷ هر عایق چندلایه از چهار قسمت، پوشش بیرونی، پوشش داخلی، لایه‌های بازتاب کننده و صفحه‌های فاصله‌انداز تشکیل شده است.

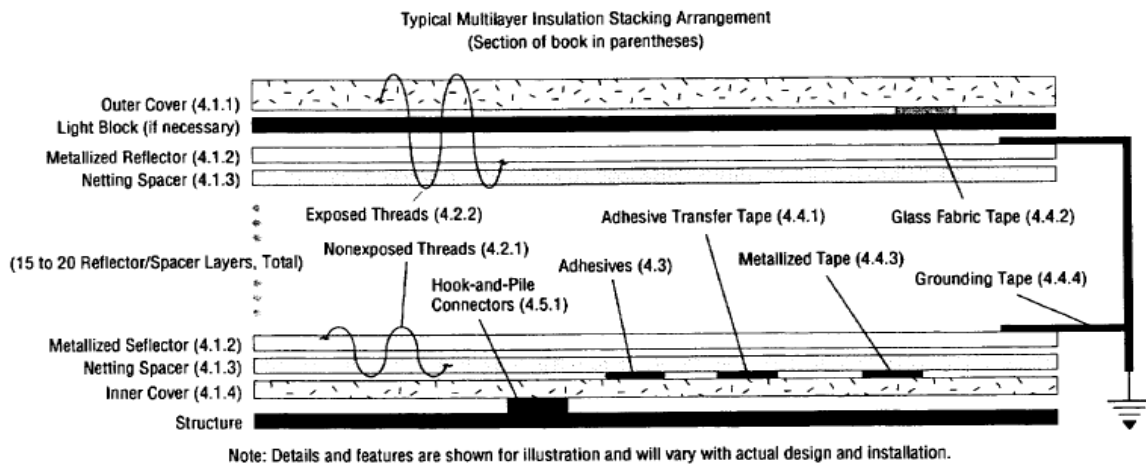
**ژل‌های هوایی:** علی‌رغم مزایای عایق‌های چند لایه از معایبی مانند اثر تنش خستگی و شکننده بودن نیز برخوردار هستند. در این میان ژل‌های هوایی<sup>۴</sup> می‌توانند جایگزین مناسبی برای عایق‌های چند لایه باشند. ژل‌های هوایی موادی هستند که برای اولین بار در سال  $1930$  با جایگزین کردن هوا به جای فاز مایع در ژل‌های سیلیکاتی به وجود آمده‌اند. در سال  $2004$

1. Mylar
2. Kapton
3. Teflon
4. Aero Gel

5. Omer

## (علمی-ترویجی)

زینب حاجی بابایی طاهری، جاماسب پیرکندی و یوسف عباسی



شکل (۷): اجزای تشکیل دهنده عایق‌های چند لایه [۱۱].



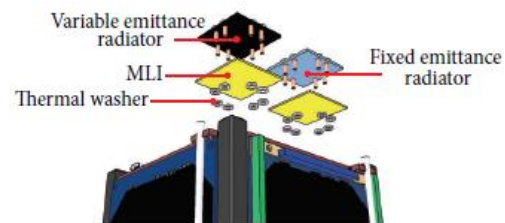
شکل (۱۰): نمونه‌ای از چاه‌های حرارتی آلومینیومی.



شکل (۸): نمونه‌ای از واش‌های حرارتی [۱۳].

دابلرها صفحات ضخیم با قابلیت هدایت حرارتی بالا می‌باشند که برای بهبود انتقال حرارت در داخل ماهواره مورد استفاده قرار می‌گیرند. این صفحات به منظور توزیع حرارت تولید شده، به کار می‌روند. مسلماً اگر حرارت تولیدی روی این صفحات دابلر توزیع شود بهتر از زمانی است که کل حرارت تولیدی روی خود قطعه متمرکز شود. دابلرهای حرارتی زمانی به کار برده می‌شوند که نرخ گرمای زیادی (بیشتر از یک وات بر اینچ مربع) بر سطح کوچکی شناسایی شود. این پدیده در کاربردهای هوافضایی نظیر هواپیماها و ماهواره‌ها بسیار مشاهده می‌شود. با توجه به مشخصه‌های فیزیکی (وزن کم و پخش گرمای بالا) و مزایای اقتصادی (هزینه کم و قابلیت اطمینان بالا)، دابلرها یکی از گزینه‌های مهم برای خنک کردن تجهیزات الکتریکی است. دابلرهای حرارتی بر روی صفحاتی قرار می‌گیرند که دمای پایینی دارند. معمولاً صفحات چاه‌های حرارتی از جنس کامپوزیت به علت وزن پایین آن ساخته می‌شوند [۱۴].

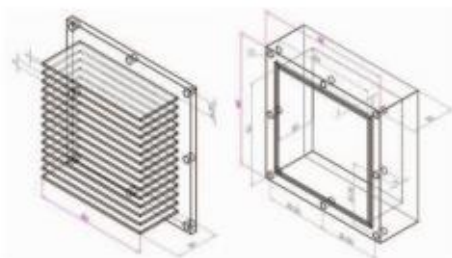
**مواد تغییر فاز دهنده:** مواد تغییر فاز دهنده (موادی هستند که می‌توانند در یک دمای ثابت از یک شکل فیزیکی به شکلی



شکل (۹): نحوه قرارگیری واش‌های حرارتی در ماهواره STEP Cube Lab [۱۲]

**چاه‌های حرارتی:** چاه‌های حرارتی، جرم حرارتی و ظرفیت نسبتاً بالایی دارند. چاه‌های حرارتی معمولاً در تماس حرارتی با تجهیزات می‌باشند که دمای آنها باید کنترل شود. وقتی که حرارت در تجهیزات تولید می‌شود، این حرارت به وسیله انتقال حرارت هدایتی یا تشعشعی از طریق چاه‌های حرارتی به محیط اطراف منتقل شده و این مسأله باعث افزایش دما در تجهیزات می‌شود. همچنین، چاه‌های حرارتی می‌توانند برای جلوگیری از سرمای سخت در تجهیزات ماهواره در زمان‌هایی که جذب و یا تولید حرارت کم می‌باشد، به کار برده شوند. شکل ۱۰ نمونه‌ای از یک چاه حرارتی آلومینیومی را نشان داده است.

نمونه‌ای از ماهواره‌های کوچکی است که توسط کشور تایوان ساخته شده است. تصویر سه نمونه اولیه از محفظه‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده در شکل ۱۲ نشان داده است. این محفظه‌ها از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ است [۱۶].



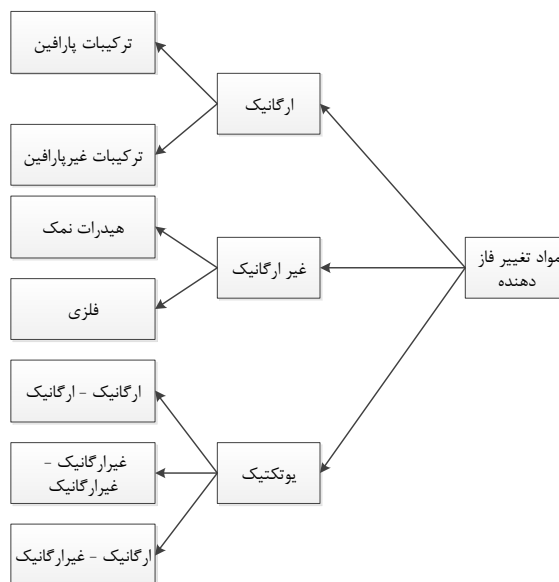
شکل (۱۲): سه نمونه از محفظه‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده در ماهواره FORMOSAT-5 [۱۶].

**جداکننده‌ها:** جداکننده‌ها، انتقال حرارت هدایتی بین اجزا و قطعات به کار برده شده در ماهواره را کاهش می‌دهند. از جمله موادی که به عنوان جداکننده در ماهواره مورد استفاده قرار می‌گیرند، فایبرگلاس‌ها و سیل‌ها هستند. نیازهای ساختاری ماهواره ایجاد می‌کند که فلزاتی با ضریب هدایت حرارتی نسبتاً پایین، مانند تیتانیوم یا فولاد ضد زنگ، برای این منظور مورد استفاده قرار گیرند.

## ۲-۲- روش کنترل دمای فعال

کنترل دما به روش فعال دارای محدودیت‌هایی است. این نوع کنترل‌کننده‌ها معمولاً باعث افزایش جرم و سطح می‌شوند. روش‌های غیرفعال در مواردی که دمای تجهیزات به‌طور قابل ملاحظه‌ای تنزل می‌یابد، اصلاً نتیجه خوبی نمی‌دهند. برای غلبه بر این محدودیت‌ها باید از روش‌های کنترل دمای فعال استفاده شود. در این روش، دمای اجزاء به‌طور پیوسته برداشت می‌شود و سخت افزار کنترل دما، هنگامی که محدوده دمای از پیش تعیین شده در اجزاء را حس کرد، خاموش و یا روشن می‌شود تا در نتیجه اجزاء در محدوده مطلوب دمایی قرار گیرند.

دیگر مثلاً از حالت جامد به مایع درآیند. دمای ذوب مواد تغییر فاز دهنده که برای کنترل دما در اجزاء ماهواره مورد استفاده قرار می‌گیرند، نزدیک به دمای مطلوب اجزاء ماهواره می‌باشد. مواد تغییر فاز دهنده، انرژی حرارتی تولید شده توسط قطعه مورد نظر در ماهواره را جذب کرده و از ایجاد تنش گرمایی در آن جلوگیری می‌کند. زمانی که دمای اجزایی که به مواد تغییر فاز دهنده متصل اند از نقطه ذوب بگذرد، گرمای نهان مواد تغییر فاز دهنده زیاد می‌شود. این مواد در سیستم‌های کنترل دمای تجهیزات، برای اینکه دمای آن‌ها تقریباً ثابت بماند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مشکلات عمده و از محدودیت‌های مواد تغییر فاز دهنده این است که باید در محفظه‌هایی قرار گیرد که اصلاً نشستی در آن‌ها وجود نداشته باشد. مواد تغییر فاز دهنده انواع مختلفی دارند که در شکل ۱۱ معرفی شده‌اند [۱۵].



شکل (۱۱): دسته‌بندی انواع مواد تغییر فاز دهنده [۱۵].

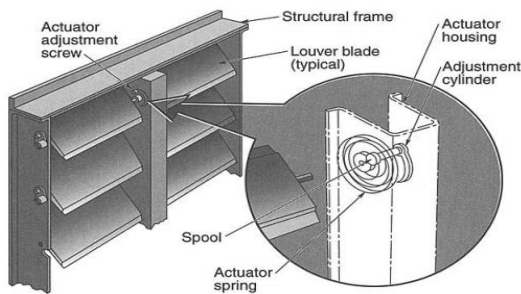
مواد تغییر فاز دهنده از نوع هیدرات نمک در مقایسه با مواد ارگانیک و یوتکتیک برای کاربرد در ماهواره مناسب‌تر هستند. مواد تغییر فاز دهنده ارگانیک دارای هدایت گرمایی پایین بوده و از این رو برای کاربرد در ماهواره‌ها مناسب نخواهند بود. همچنین، مواد تغییر فاز دهنده متالیک نیز دارای وزن بالا بوده و این مسأله موجب خواهد شد برای استفاده در ماهواره‌ها مورد مناسبی نباشند. از سوی دیگر هیدرات نمک دارای مزایایی از قبیل ایمنی، قابل پیش بینی بودن، هزینه‌ای بسیار پایین، هدایت گرمایی بالا، گرمای نهان تبخیر بالا و تغییرات اندک در نقطه ذوب می‌باشد [۱۵]. یکی از ماهواره‌هایی که از مواد تغییر فاز دهنده برای کنترل دمای خود استفاده می‌کند، ماهواره FORMOSAT-5 است. این ماهواره،

## (علمی-ترویجی)

زینب حاجی بابایی طاهری، جاماسب پیرکندی و یوسف عباسی

کاملاً بسته باشند؛ مقدار شار حرارتی دفع شده برابر با ۵۴ وات بر متر مربع خواهد بود. پس با توجه به مقدار شاری که از فضا به ماهواره می‌تابد یا مقدار حرارتی که باید به فضا دفع شود، این دریچه‌ها طراحی می‌شوند. در جاهایی که نیاز باشد، حفاظ-های خورشیدی به این دریچه‌ها اضافه می‌شوند تا اثرات تابش خورشید را بر روی صفحات کم کنند.

همانگونه که در شکل ۱۴ نشان داده شده، دریچه‌های حرارتی از پنج قسمت اصلی صفحه پایه، تیغه‌ها، عملگرها، سنسورها و تجهیزات سازه‌ای تشکیل شده‌اند. صفحه پایه، صفحه‌ای است که نسبت ضریب جذب به صدور آن پایین بوده و وظیفه آن پوشاندن قسمت‌هایی از تجهیزات است که دمای آنها از کنترل خارج است. تیغه‌ها که به وسیله عملگرها چرخانده می‌شوند، باعث می‌شوند میزان تابش متفاوتی از منبع حرارتی به صفحه پایه برسد. زمانی که این تیغه‌ها بسته باشند، شار حرارتی به بدنه رادیاتورها نخواهد رسید اما زمانی که این دریچه‌ها باز می‌شوند شار حرارتی به آنها تابیده می‌شود. خواص تابشی صفحه پایه با حرکت این تیغه‌ها تغییر می‌کند. عملگرها مطابق دمای صفحه اصلی، تیغه‌ها را حرکت می‌دهند. عملگرهایی که در دریچه‌های حرارتی استفاده می‌شوند به صورت ماریچ‌های دوفلزی و یا سیلندری می‌باشند. لازم به ذکر است عملگرهای دیگری مانند عملگرهای الکتریکی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سیستمی که به صورت تنها راه‌اندازی می‌شود، تمامی تیغه‌ها با استفاده از یک عملگر حرکت می‌کنند، اما در سایر سیستم‌ها نیاز به چندین عملگر خواهد بود. عملگرها با تغییر دمای صفحه پایه تیغه‌ها را حرکت می‌دهند. یک تماس بسیار قوی میان عملگرها و صفحه پایه وجود دارد که باعث می‌شود کمترین گرادیان دمایی را نیز حس کند.



شکل (۱۴): اجزای دریچه‌های حرارتی به کار رفته در ماهواره‌ها.

**لوله حرارتی:** لوله‌های حرارتی ضریب انتقال حرارت بیشتری نسبت به کنترل کننده‌های غیرفعال از قبیل فلزاتی مانند آلومینیوم، نقره و مس دارند. مثلاً یک لوله حرارتی ۲۰۰ تا ۳۰۰ برابر یک میله جامد مسی با قطری برابر قطر لوله حرارتی از

گرم‌کننده‌ها، ترموستات‌ها، دریچه‌های حرارتی<sup>۳</sup> و پمپ‌های حرارتی<sup>۴</sup> نمونه‌هایی از اجزاء کنترل دمای فعال هستند که در ماهواره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

**گرمکن‌ها و ترموستات‌ها:** برای حفظ کمینه دمای مجاز در طول شرایط سرد، گرمکن‌هایی که به صورت لایه نازک بوده و به صورت ترموستاتیکی کنترل می‌شوند، به اجزاء کنترل شونده چسبانده می‌شوند. این گرمکن‌ها، باریکه‌هایی از مقاومت‌های حرارتی فلزی می‌باشند که در لایه‌های نازکی از کپتون قرار گرفته‌اند. در شکل ۱۳ نمونه‌ای از این گرمکن‌ها نشان داده شده است. در تمام کاربردها مجموعه‌ای از گرمکن‌های اصلی و ذخیره تکراری<sup>۵</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرند. این گرمکن‌ها توسط ترموستات‌های مکانیکی با نقاط تنظیمی که از پیش تعیین گردیده‌اند، کنترل می‌گردند.



شکل (۱۳): نمونه‌ای از گرمکن‌های از جنس پلی‌ماید [۱۷۴].

**دریچه‌های حرارتی:** دریچه‌های حرارتی یک روش ساده فعال و قابل اطمینان برای کنترل دمای ماهواره‌ها می‌باشند. در این روش، کنترل دما به وسیله تغییر ضریب صدور رادیاتور انجام گرفته و دریچه‌ها شبیه به پرده‌های کرکره‌ای هستند که بین سطح رادیاتور و فضا نصب شده‌اند. نرخ انتقال حرارت به فضا توسط دریچه‌های حرارتی بستگی به میزان باز و بسته شدن تیغه‌های دریچه‌های نصب شده بر روی رادیاتورها دارد. به عنوان مثال شار حرارتی دفع شده توسط دریچه حرارتی که دمای سطح رادیاتورهای نصب شده بر روی آن ۳۰۴ کلوین و تیغه‌های آن کاملاً باز باشد؛ معادل ۴۳۵ وات بر متر مربع خواهد بود و در صورتی که دمای سطح رادیاتور ۲۸۳ کلوین و تیغه‌ها

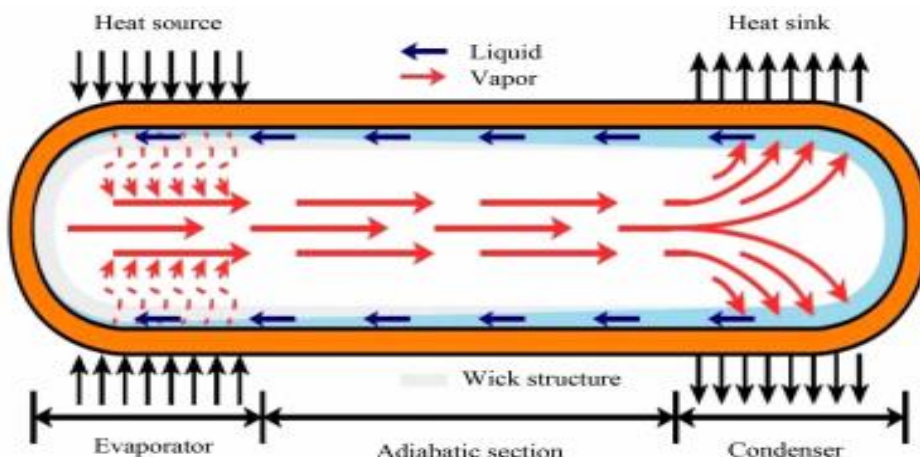
1. Heater
2. Thermostat
3. Thermal Louver
4. Heat Pipe
5. Redundant
6. Polymide



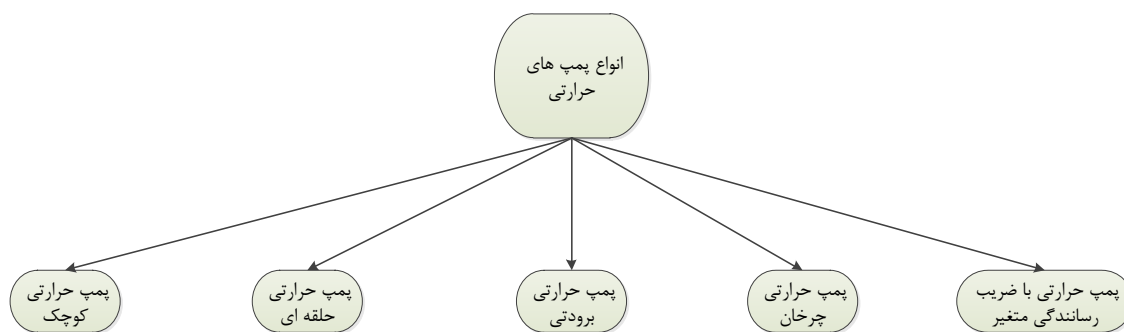
را از این قسمت انتقال داده و به سمت کندانسور می‌برد. چون قسمت کندانسور لوله حرارتی در فضا یا روی رادیاتورهای بزرگ است، بخار را تقطیر کرده و حرارت را به دیواره لوله حرارتی منتقل می‌نماید. سپس حرارت منتقل شده به طریق هدایت از دیوار به محیط اطراف یا به رادیاتوری که به قسمت کندانسور متصل است، منتقل می‌گردد. آنگاه مایع تقطیر شده با استفاده از خاصیت موئینگی از سوراخ‌های کوچک، به قسمت اُپراتور منتقل می‌گردد. ملاحظه می‌گردد که در لوله‌های حرارتی احتیاجی به پمپ کردن سیال نیست. هنگام نصب لوله‌های حرارتی به ماهواره می‌بایست دقت لازم برای تراز بودن آنها انجام گیرد تا در زمان آزمایش، عمل موئینگی تحت تأثیر اثرات ثقل قرار نگیرد. استفاده از تکنولوژی دوفازی مانند لوله‌های حرارتی، اصلی‌ترین نوآوری در حوزه کنترل دمای ماهواره در دهه‌های اخیر است، [۱۸]. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب قسمت‌های مختلف یک پمپ حرارتی و انواع مختلف آن مشخص شده است.

خود حرارت منتقل می‌کند. همچنین می‌توانند حرارت را از اجزاء داخلی به سطح رادیاتوری که در فاصله دوری قرار گرفته‌اند، منتقل کنند. این عمل باعث می‌شود حرارت در تمامی نقاط توزیع شود و تشعشع حرارتی در دمای مناسب و متعادلی صورت گیرد. یک لوله حرارتی شامل دو کانال داخلی است که یکی خیلی کوچکتر از دیگری است و تعداد زیادی سوراخ کوچک بین آن دو وجود دارد. در دو انتها کانال‌ها بسته شده‌اند و شامل یک سیال کاری از جنس متانول و یا آمونیاک است. لوله‌های حرارتی دارای سه قسمت اُپراتور (تبخیر کننده)، بخش نقل و انتقال و کندانسور (چگالنده) می‌باشد. در لوله‌های حرارتی قسمت اُپراتور بر روی صفحاتی قرار می‌گیرد که مقدار بسیار زیادی حرارت بر سطح کوچکی تولید می‌شود و قسمت کندانسور نیز در فضا یا در طرفی از ماهواره قرار می‌گیرد که رو به خورشید نیست.

وقتی یک جزء ماهواره مقدار قابل ملاحظه‌ای گرما تولید کند، سیال کاری پمپ حرارتی به دلیل جذب گرمای زیاد بخار می‌شود. به دلیل فشاری که ایجاد می‌کند، سیال کاری حرارت



شکل (۱۵): نمایی از قسمت‌های مختلف لوله‌های حرارتی [۱۸].



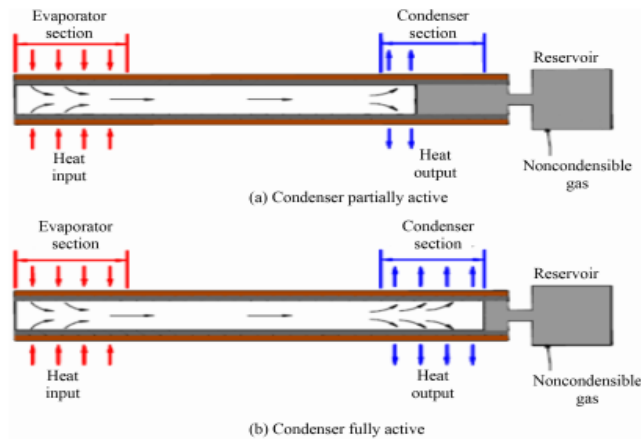
شکل (۱۶): انواع لوله‌های حرارتی [۱۸].

## (علمی-ترویجی)

زینب حاجی بابایی طاهری، جاماسب پیرکندی و یوسف عباسی

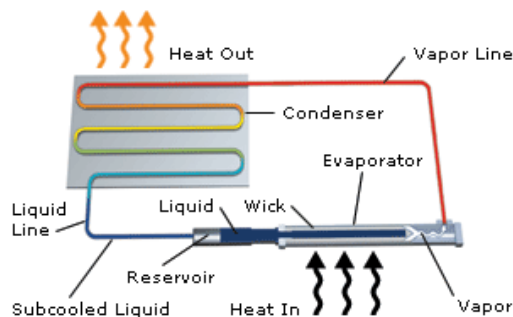
دمای بخار نیز افزایش یافته و باعث فشرده شدن گازهای تراکم ناپذیر شده و سطح بیشتری از کندانسور در اختیار سیال کاری قرار می‌گیرد. در نهایت ضریب رسانندگی لوله حرارتی افزایش یافته و دمای قسمت اوپراتور آن کمتر می‌شود. در طرف مقابل، اگر اوپراتور سرد شود فشار بخار کاهش یافته و گازهای تراکم ناپذیر انبساط می‌یابند. در نتیجه سیال کاری به محیط کمتری در کندانسور دسترسی داشته و ضریب رسانندگی آن کاهش خواهد یافت [۱۸].

**لوله حرارتی با ضریب رسانندگی متغیر:** لوله‌های حرارتی با ضریب رسانندگی متغیر، لوله‌هایی هستند که گازهای تراکم ناپذیر در آنها قرار می‌گیرد. عملکرد این نوع از لوله‌های حرارتی به گونه‌ای است که گازهای تراکم ناپذیر به وسیله سیال کاری آن به سمت انتهای لوله حرارتی (کندانسور) حرکت می‌کنند. این امر باعث می‌شود که سیال کاری لوله حرارتی نتواند به تمامی محدوده کندانسور دست یابد و میزان رسانندگی آن تغییر کند. زمانی که دمای اوپراتور افزایش می‌یابد، فشار و



شکل (۱۷): نحوه عملکرد لوله‌های حرارتی با رسانندگی متغیر [۱۸].

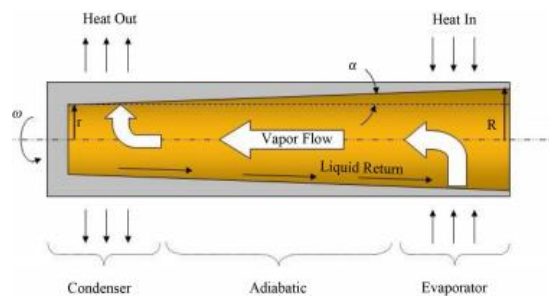
**لوله حرارتی حلقه‌ای:** لوله‌های حرارتی حلقه‌ای علاوه بر دفع گرما از محیط‌های گرم، آن را به محیط‌های سرد انتقال می‌دهند. این نوع لوله‌های حرارتی دارای مزایایی از قبیل قابلیت اطمینان بیشتر در مسیرهای طولانی و توانایی فعالیت برخلاف جاذبه زمین هستند. آنها می‌توانند حرارت بسیار را در مسیر طولانی با اختلاف دمای اندک جابه‌جا کنند و علاوه بر کندانسور و اوپراتور دارای قسمت‌های اصلی خط بخار، خط مایع و باتری هیدرولیک هستند. باقیمانده مسیر از لوله‌های با دیواره نازک تشکیل شده است (شکل ۱۹) [۱۸].



شکل (۱۸): نمونه‌ای از لوله حرارتی حلقه‌ای [۱۹].

امروزه لوله‌های حرارتی حلقه‌ای که با آمونیاک کار می‌کنند، مشهورترین وسیله برای کنترل دمای ماهواره‌های با قدرت ارتباطی

**لوله حرارتی چرخان:** لوله‌های حرارتی چرخان بیشتر در خنک‌کاری شفت‌های موجود در ماشین‌ها کاربرد دارند. در این نوع از لوله‌ها گرمای وارد شده به اوپراتور سیال کاری را تبخیر کرده و به سمت کندانسور حرکت می‌کنند و گرمای خود را از دست می‌دهند. این نوع از لوله‌ها کاربردی در ماهواره‌ها ندارند و بیشتر در توربوماشین استفاده می‌شوند (شکل ۱۸) [۱۸].



شکل (۱۸): نمونه‌ای از لوله حرارتی چرخان [۱۸].

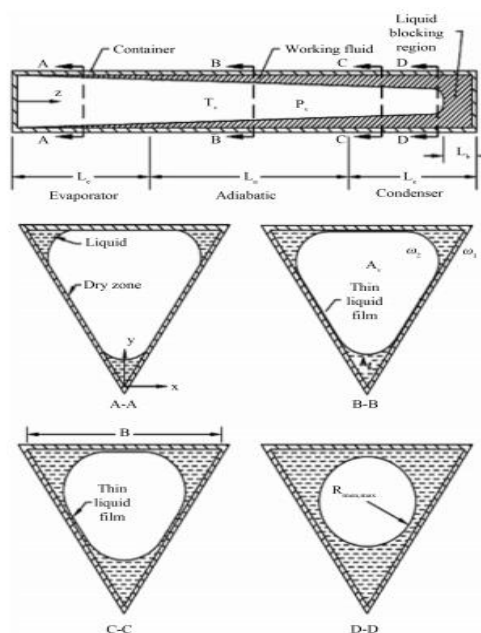
**لوله حرارتی بروودی:** لوله‌های بروودی یکی دیگر از انواع لوله‌های حرارتی پرکاربرد در ماهواره‌ها و سایر فناوری‌های مربوط به فضا است. به عنوان مثال، می‌توان به قرارگیری لوله حرارتی بروودی از جنس مس با سیال کاری استون در فضایی STS-60 اشاره کرد. این نوع از لوله‌های حرارتی قادر به دفع ۱۰ وات توان حرارتی در دماهای بین ۲۱۳ تا ۲۴۳ کلوین هستند.

## ۳- نتیجه‌گیری

علاوه بر پژوهش‌هایی که در تمام دنیا در زمینه طراحی کنترل دمای ماهواره صورت گرفته است. در ایران نیز در سال‌های اخیر در این زمینه کارهای تحقیقاتی زیادی انجام شده است. بیشتر زمینه‌های تحقیقاتی مربوط به طراحی زیرسیستم کنترل دما در فاز طراحی مفهومی و تعداد کمی از آن‌ها وارد فاز طراحی دقیق شده‌اند. با مطالعه بررسی‌های انجام شده، به این نتیجه رسیده شد که المان‌هایی می‌توانند برای کنترل دمای یک ماهواره مقیاس کوچک مناسب باشند که دارای وزن، حجم و توان مصرفی پایین باشد. از این رو، تجهیزات کنترل دمای غیرفعال در ماهواره‌های مقیاس کوچک بسیار استفاده می‌شود. رایج‌ترین این تجهیزات پوشش‌ها، عایق‌ها و رنگ‌ها می‌باشند. اما معمولاً برای طراحی حرارتی ایمن‌تر ماهواره‌های کوچک از برخی المان‌های فعال هم استفاده می‌شود. در میان المان‌های فعال حرارتی، گرمکن‌ها رایج‌تر می‌باشد، چرا که گرمکن‌ها نسبت به سایر تجهیزات فعال حجم و وزن کمی را به خود اختصاص می‌دهند و همچنین توان کمتری نسبت به سایر المان‌ها مصرف می‌کنند. نکته مهم دیگر نیز در انتخاب تجهیزات مناسب برای کنترل دمای ماهواره‌های کوچک، داشتن کمترین تعداد قطعه متحرک است. چرا که هرچه تعداد این قطعات متحرک بیشتر باشد، از قابلیت اطمینان ماهواره می‌کاهد. به همین دلیل می‌توان گفت رایج‌ترین تجهیزات حرارتی برای کنترل دمای ماهواره‌های کوچک عبارتند از: رنگ‌ها، عایق‌های چندلایه، واش‌های حرارتی، گریس‌ها، چسب‌های حرارتی و گرمکن‌ها هستند. سایر تجهیزات معرفی شده در این فصل مانند لوله‌های حرارتی و سایر آن‌ها بیشتر در ماهواره‌های مقیاس بزرگ و یا برخی در فضاپیماها استفاده شده‌اند.

بالا هستند. اولین کاربرد فضایی این لوله‌ها در سال ۱۹۸۹ برای ماهواره روسی رقم خورد. از دیگر کاربردهای فضایی می‌توان به ماهواره‌های گرانات<sup>۱</sup> روسی، فضاپیما ایزور<sup>۲</sup>، ماهواره مخابراتی بوئینگ ۷۰۲، ماهواره هواشناسی FY-1 چینی، شاتل‌های فضایی ناسا STS-84 و STS-93 در سال ۱۹۹۷ اشاره کرد [۱۸].

**لوله حرارتی کوچک:** فلسفه اصلی پدید آمدن لوله‌های حرارتی کوچک، کنترل دمای تجهیزات کوچک الکترونیکی بود. همانگونه که در شکل ۲۰ نشان داده شده، لوله‌های حرارتی به صورت محدب بوده و امتداد آن باریک می‌شود. به طوریکه قطر هیدرولیکی آن در بازه ۱۰ تا ۵۰۰ میکرومتر قرار دارد. قطر هیدرولیکی لوله‌های حرارتی مینیاتوری از ۰/۵ تا ۵ میلی‌متر تغییر می‌کند. تحقیقاتی که بر روی یک نوع از لوله‌های حرارتی کوچک با ابعاد  $120 \times 7 \times 2$  میلی‌متر و از جنس مس و سیال آب صورت گرفته، نشان داد می‌تواند ۹۰ تا ۱۲۰ وات گرما را دفع کند. میزان ظرفیت گرمایی یک لوله حرارتی کوچک به خاصیت مؤینگی لوله و میزان پیوستگی سیال بستگی دارد. با وجود مثلثی شکل بودن مقطع این نوع لوله‌های حرارتی، مناسب‌ترین سیال برای آنها متانول است. با توجه به این موضوع که بسیاری از ماهواره‌های کوچک برای استفاده از المان‌های فعال کنترل دما با محدودیت جرم، حجم و توان مواجه هستند، لوله‌های حرارتی می‌تواند گزینه مناسبی باشد که بسیاری از سازندگان ماهواره‌های کوچک به دنبال استفاده از آن هستند [۱۸].



شکل (۱۸): شماتیکی از لوله‌های حرارتی کوچک [۱۸].

1. Granat
2. Obzor

## (علمی-ترویجی)

زینب حاجی بابایی طاهری، جاماسب پیرکندی و یوسف عباسی

## ۶- مراجع

- [1] *small satellite, miniaturized satellite*. Online Available at: [http://en.wikipedia.org/wiki/small\\_satellite](http://en.wikipedia.org/wiki/small_satellite)
- [2] *A CubeSat (U-class spacecraft)*. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/cubesat>
- [3] D. Hinkley and B. Hardy, "Picosatellites and nanosatellites at the aerospace corporation," in *In-Space Non-Destructive Inspection Technology Workshop*, 2012.
- [4] J. Eickhoff, K. Klemich, U. Mohr, and A. B. Armitage, "Constellations Research using simulated FLP-based Satellites," in *14th International Conference on Space Operations*, 2016, p. 2544.
- [5] Online Available at: "http://thermal control design.com".
- [6] D. G. Gilmore, D. G. Gilmore, and M. Donabedian, *Spacecraft thermal control handbook* vol. 1: Aerospace Press El Segundo, CA, 2002.
- [7] *Specialists in materials and applications, "Spacecraft Thermal Control and Conductive/Paints/Coatings and Services Catalog", AZ Technology, 2008*. Online Available at: <http://www.aztechnology.com>
- [8] E. C. G. Douglas Felipe da Silva, "EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE EFFECTIVE THERMAL PROPERTIES OF A MULTI-LAYER INSULATION BLANKET," presented at the 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013) Ribeirão Preto, SP, Brazil, 2013.
- [9] C.-S. Kang, "Multilayer insulation for spacecraft applications," in *COSPAR colloquia series*, 1999, pp. 175-179.
- [10] *Multilayer\_insulation*. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Multilayer\\_insulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Multilayer_insulation)
- [11] Online Available at: "http://www.amazon.com".
- [12] S.-J. Kang and H.-U. Oh, "On-orbit thermal design and validation of 1 U standardized CubeSat of STEP cube lab," *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2016, 2016.
- [13] *Fasteners/Washers*. Online Available at: <https://us.misumi-ec.com>
- [14] D. F. d. S. a. E. C. Garcia, "Thermal Doubler Model " presented at the The 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 2011.
- [15] A. Kumar, A. Sekar, D. Siddhartha, and K. Govinda, "Phase change materials (PCM) for thermal control during spacecraft transportation," *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 3, pp. 28-32, 2013.
- [16] M.-H. Chen, J.-D. Huang, and C.-R. Chen, "An investigation on phase change device for satellite thermal control," in *2016 7th international conference on mechanical and aerospace engineering (ICMAE)*, 2016, pp. 100-104.
- [17] *Flexible heating element*. Online Available at: <https://www.directindustry.com/prod/minco/product-5076-12868.html>.
- [18] K. Shukla, "Heat pipe for aerospace applications—an overview," *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, vol. 5, p. 1, 2015.
- [19] Online Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Loop\\_heat\\_pipe](https://en.wikipedia.org/wiki/Loop_heat_pipe).