

# عایق ها و روش های حرارتی

- ❖ مقدمه
- ❖ عایق های چند لایه
- ❖ کاربردهای عایق های چند لایه
- ❖ عملکرد عایق های چند لایه
- ❖ مدل سازی عایق های چند لایه
- ❖ اجزای عایق های چند لایه
- ❖ طراحی و ساخت عایق های چند لایه

## عایق ها و روش های حرارتی

## عایق ها و روش های حرارتی



### ❖ عایق های چند لایه (multi-layer insulation) یا MLI

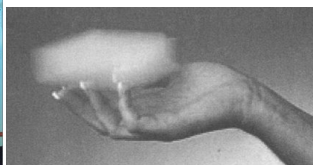
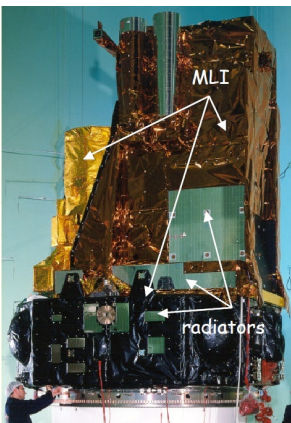
- پوشش کامل ماهواره برای جلوگیری از ورود و خروج شار حرارتی
- برشی قسمتی از پوشش برای تعبیه رادیاتور
- حفاظت از تانک های سوخت داخلی (propellant tank)
- حفاظت از خطوط سوخت (propellant line)
- حفاظت از موتورهای سوخت جامد (solid rocket motor)
- محفظه های عایق حرارتی دوجداره برودتی (cryogenic dewars)

### ❖ حفاظت های تشعشعی تک لایه (single-layer radiation barrier)

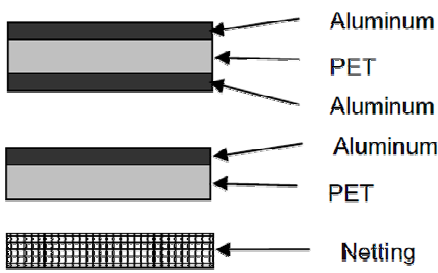
- وزن کمتر نسبت به عایق های چند لایه
- قابلیت عایق سازی کمتر
- قیمت پایین تر و ساخت راحت تر

### ❖ انواع عایق های هدایتی مانند foam, batt, aerogel

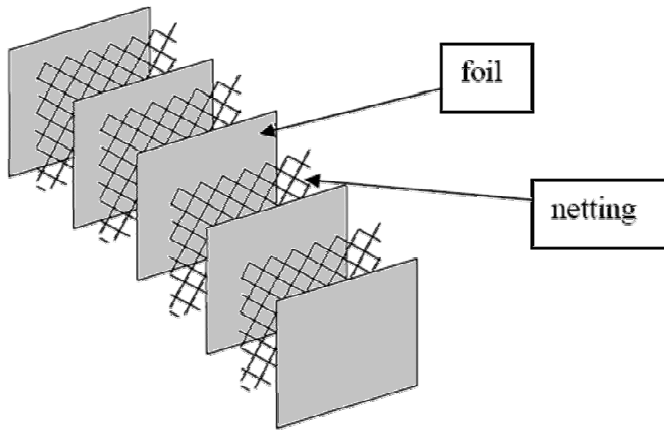
- عایق سازی در شرایط اتمسفر



❖ عایق های چند لایه (multi-layer insulation) یا MLI

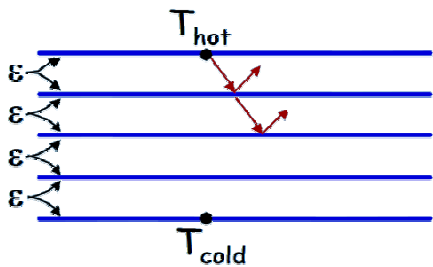


- متشکل از چند لایه فیلم های دارای ضریب جذب و صدور پایین
- لایه های میلار پوشیده شده از آلومینیومی در یک یا دو سمت
- ایجاد فاصله بین لایه ها
- استفاده از لایه های برجسته (embossed Mylar sheet)
- برجستگی های حدود ۷۵ میکرون با فاصله ۳ میلیمتر

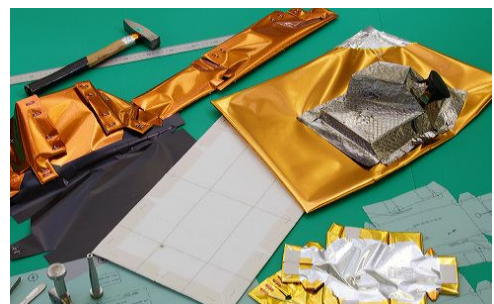
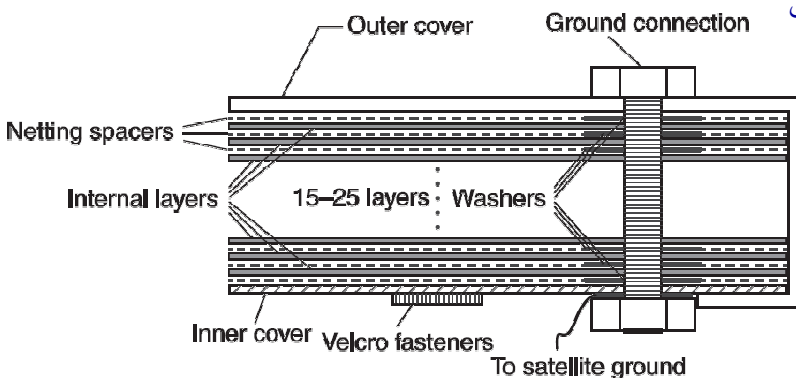


- استفاده از فاصله دهنده (net spacer)
- داکرونی (Dacron)
- پلی استر (Polyester)
- ابریشمی (silk)
- نومکس (Nomex)

❖ کاهش میزان انتقال حرارت هر یک از مکانیزم های انتقال حرارت در عایق های چند لایه



- کاهش انتقال حرارتی تشعشعی، استفاده از لایه های منعکس کننده متعدد
- انتقال حرارتی هدایتی از طریق جامدات، استفاده از فاصله دهنده های دارای ضریب هدایتی پایین و ایجاد حالت پف کرده (fluffy) برای حداقل کردن تماس لایه ها
- انتقال حرارت هدایتی از طریق گاز (در شرایط اتمسفر)، اجازه خروج هوا در حین پرتاب و تزریق مداری



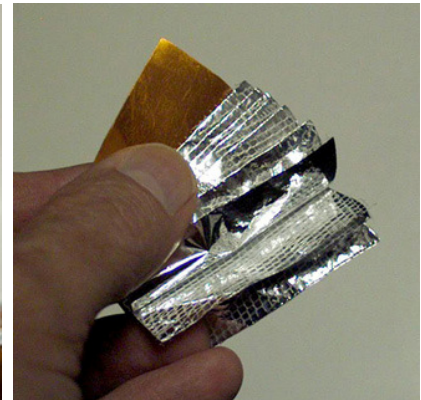
❖ مقایسه کارایی انواع عایق های چند لایه

- تست های انجام شده در JPL (jet propulsion laboratory) برای ضریب مؤثر صدور

Blanket (flat, aluminized Mylar / Dacron spacer)

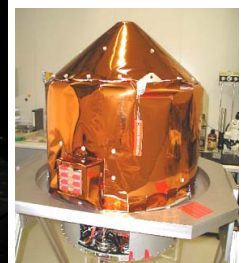
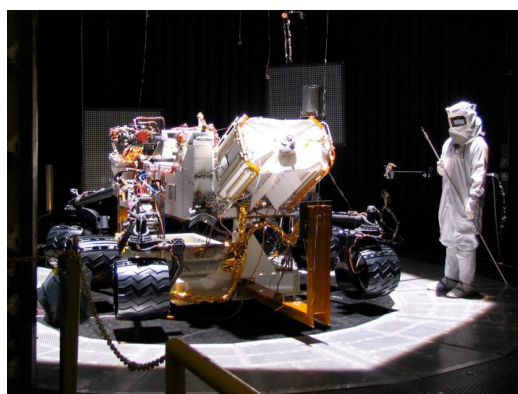
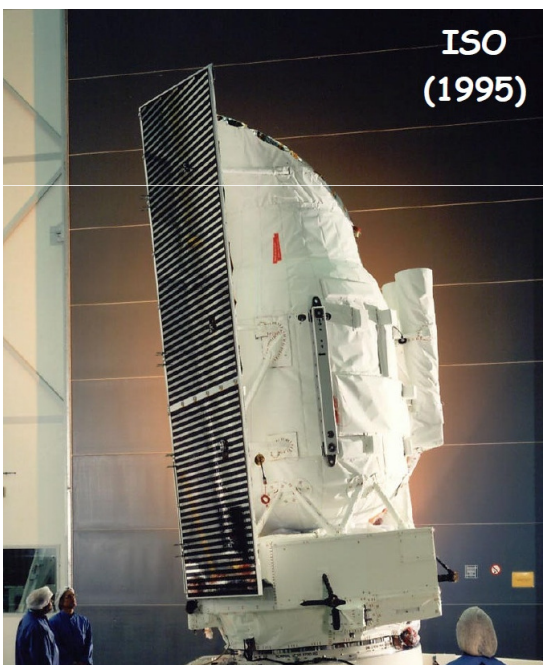
↓ increasing effective emittance by 19%

Blanket (embossed, aluminized Kapton / no spacer)



❖ کاربردهای فضایی عایق های چند لایه (multi-layer insulation) یا MLI

- کنترل شارهای حرارتی ورودی و خروجی
- حفاظت در برابر خرده شهاب سنگ ها
- حفاظت در برابر اتم اکسیژن
- حفاظت در برابر انباشت ذرات باردار
- حفاظت در برابر اصابت شعله موتور راکت



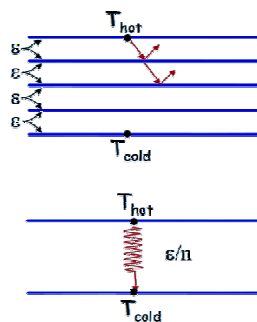
### ❖ کاربردهای غیرفضایی عایق های چند لایه (MLI یا multi-layer insulation)

- عایق کردن سیستم های سرمایشی و برودتی در دماهای بسیار پایین
- عایق کردن سیستم های پیشرانشی مورد استفاده در ارتفاعات بالا
- تجهیزات کوهنوردی
- چادرهای صحرایی
- عایقکاری ساختمانی



### ❖ تخمین عملکرد عایق های چند لایه (MLI)

- عدم امکان ارائه یک مدل ریاضی و تحلیلی برای تعیین عملکرد عایق
- تعیین عملکرد عایق ها با استفاده از معادله سازی آن با یک عایق ساده

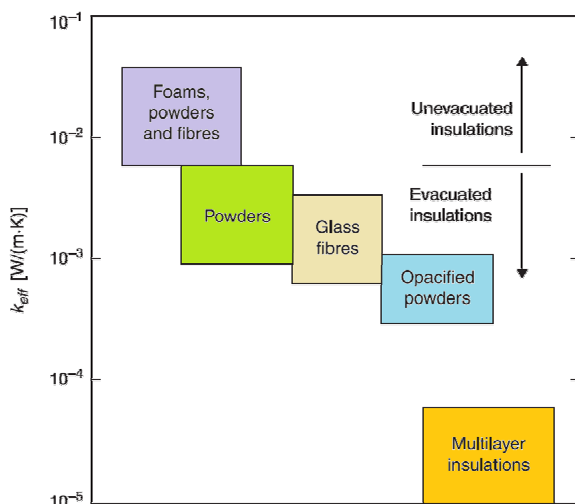


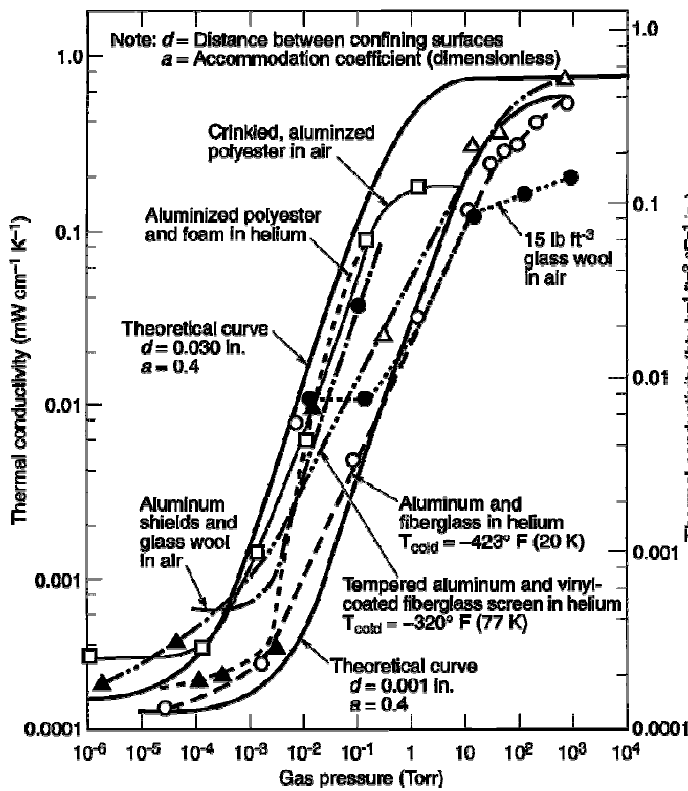
- معادله سازی با یک جسم یکپارچه با ضریب هدایت حرارتی مؤثر که حرارت را به روش هدایت منتقل می کند

effective conductivity ( $K_{eff}$ )

- معادله سازی با دو صفحه جدا از یکدیگر که با یک ضریب انتشار مؤثر با هم تبادل تشعشعی دارند

effective emissivity ( $\epsilon_{eff}$ )





❖ عملکرد عایق‌های چند لایه

- وابستگی میزان ضریب هدایت حرارتی مؤثر به فشار هوا
- تقسیم انتقال حرارت هدایتی گاز به سه ناحیه
- فشارهای بالاتر از 1 Torr
- عدم تأثیر فشار در انتقال حرارت
- فشارهای بین 1 الی 10<sup>-4</sup> Torr
- عدم تأثیر فشارهای کمتر از 10<sup>-4</sup> Torr
- میزان ضریب انتقال حرارت هدایتی مؤثر ناشی از انتقال حرارت تشعشعی بین لایه‌ها و انتقال حرارت هدایتی لایه‌ها

❖ اندازه‌گیری ضریب صدور مؤثر عایق‌های چند لایه در فشار کمتر از 10<sup>-5</sup> Torr

- پارامتر Q شار حرارتی عبوری از عایق چند لایه
- پارامتر A مساحت عایق چند لایه
- دمای T<sub>H</sub>، دمای مرز گرم
- دمای T<sub>C</sub>، دمای مرز سرد

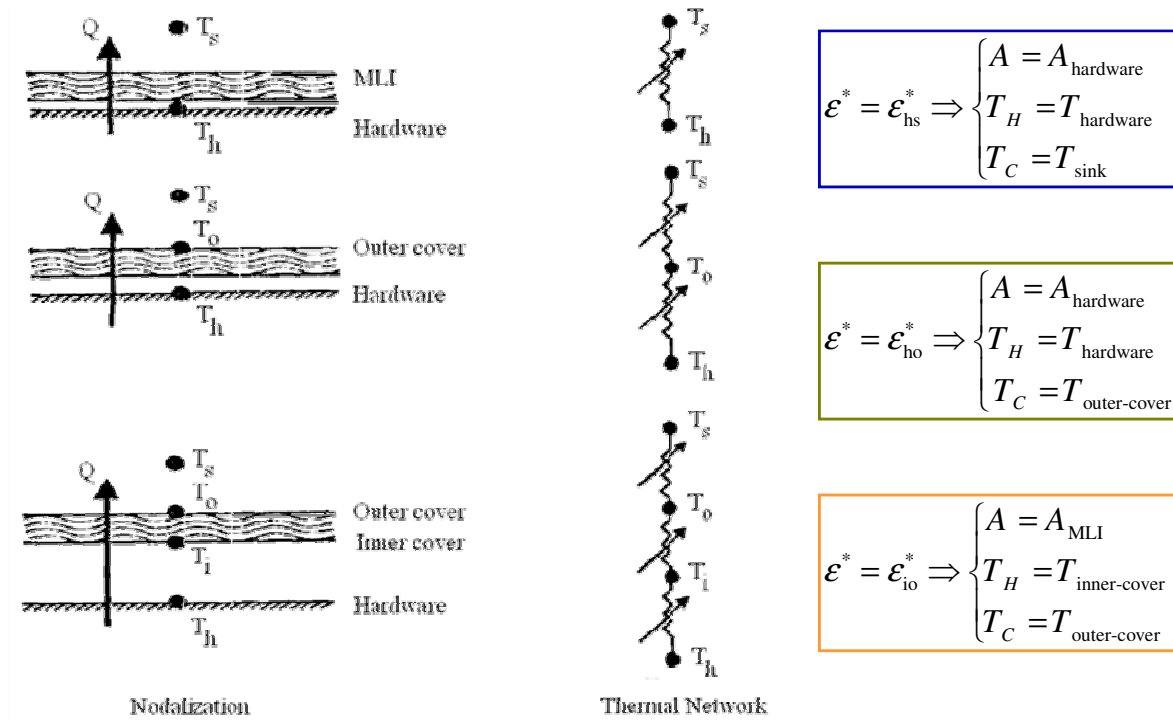
$$\epsilon_{eff} = \epsilon^* = \frac{Q}{A\sigma(T_H^4 - T_C^4)}$$

❖ اندازه‌گیری ضریب هدایت مؤثر عایق‌های چند لایه در فشار کمتر از 10<sup>-5</sup> Torr

- پارامتر t ضخامت عایق چند لایه

$$K_{eff} = \frac{tQ}{A(T_H - T_C)}$$

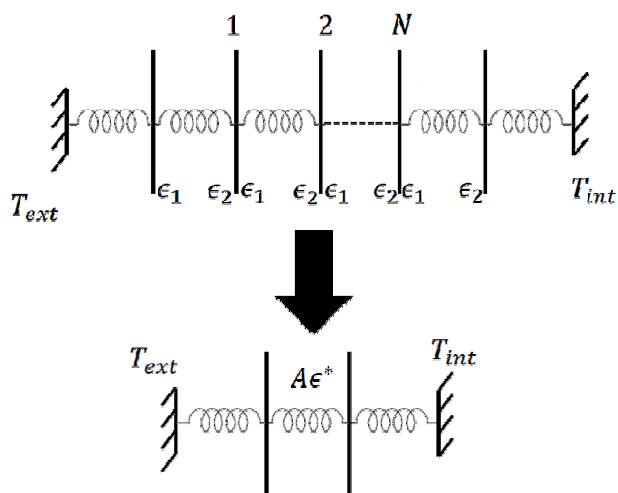
❖ تعریف مختلف دمای سرد و گرم برای تعیین ضریب صدور مؤثر



❖ انتخاب تعریف مناسب برای ضریب صدور مؤثر بر اساس نحوه نصب عایق

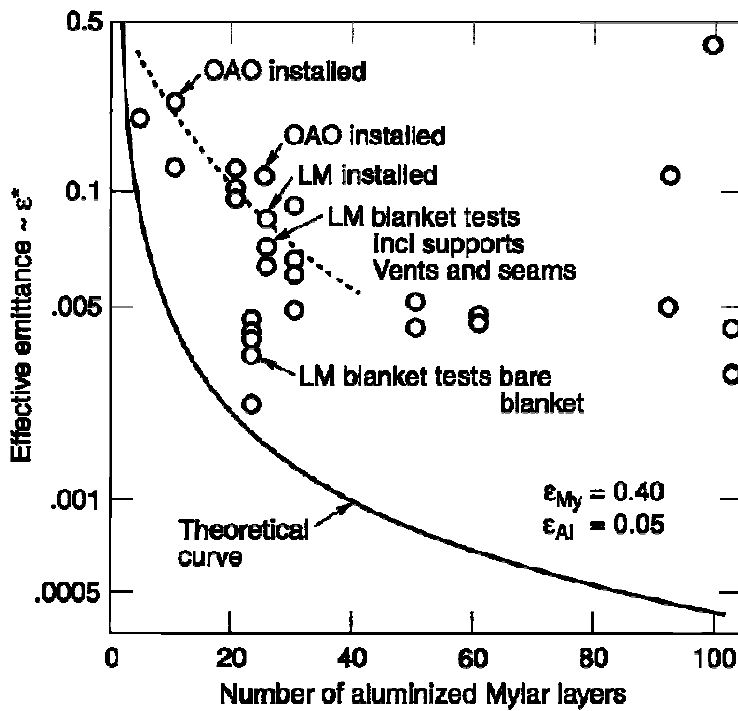
- نصب عایق بدون فاصله و چسبیده به سخت افزار (تعریف اول یا دوم)
- نصب لایه محافظ بین سخت افزار و عایق (تعریف اول یا دوم)
- نصب عایق به صورت خیمه وار و فاصله دار به دور سخت افزار (تعریف سوم)

❖ ضریب صدور مؤثر عایق‌های چند لایه در فشار کمتر از  $10^{-5}$  Torr با N لایه بدون اتصال



$$\epsilon_{io}^* = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \left( \frac{1}{N-1} \right)$$

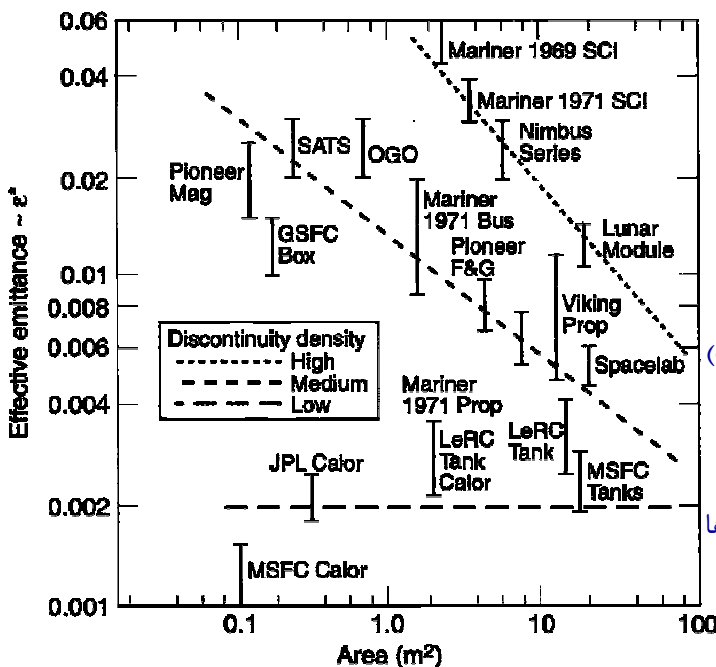
❖ تغییرات ضریب صدور مؤثر عایق‌های چند لایه با تعداد لایه‌ها



- لایه‌های مایلر برجسته با پوشش آلومینیومی یک طرفه بدون فاصله دهنده
- کاهش میزان انتقال حرارت تشعشعی در برابر انتقال حرارت هدایتی با افزایش تعداد لایه‌ها
- عدم تأثیر افزایش تعداد لایه‌های بیش از ۲۰ الی ۲۵ لایه، بر ضریب صدور مؤثر (نتایج تجربی)

$$\epsilon_{io}^* = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \left( \frac{1}{N-1} \right)$$

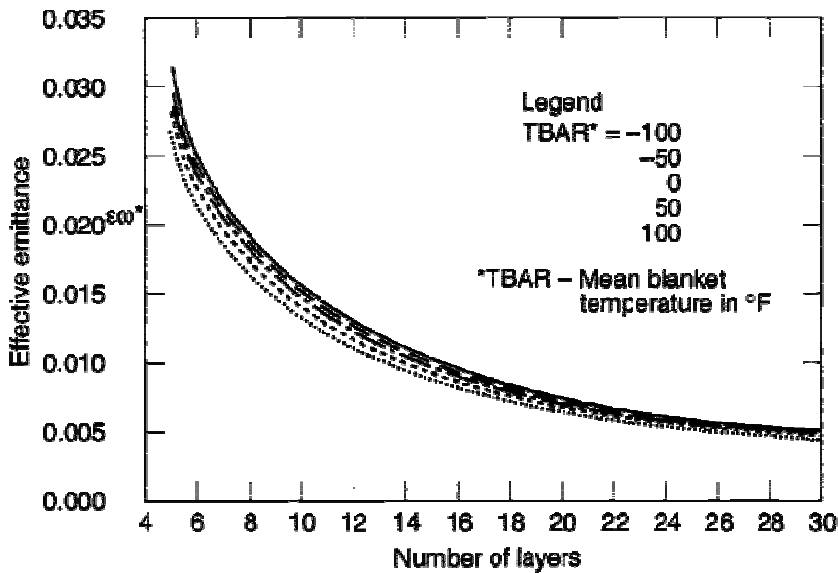
❖ افزایش ضریب صدور مؤثر عایق‌های چند لایه در کاربردهای عملی و خارج از آزمایشگاهی



- ضریب صدور مؤثر در شرایط آزمایشگاهی 0.005 و کمتر از آن
- ضریب صدور مؤثر در شرایط واقعی بین 0.015 تا 0.03
- کاهش میزان ضریب صدور مؤثر با افزایش سطح MLI
- ❖ عوامل افت کارایی عایق‌ها
  - نشت حرارت در اثر لبه‌ها (edge effects)
  - نشت حرارت در محل اتصالات و دوخت (seams)
  - نشت حرارت در محل عبور کابل‌ها و لوله‌ها
  - نشت از محل بریدگی‌ها

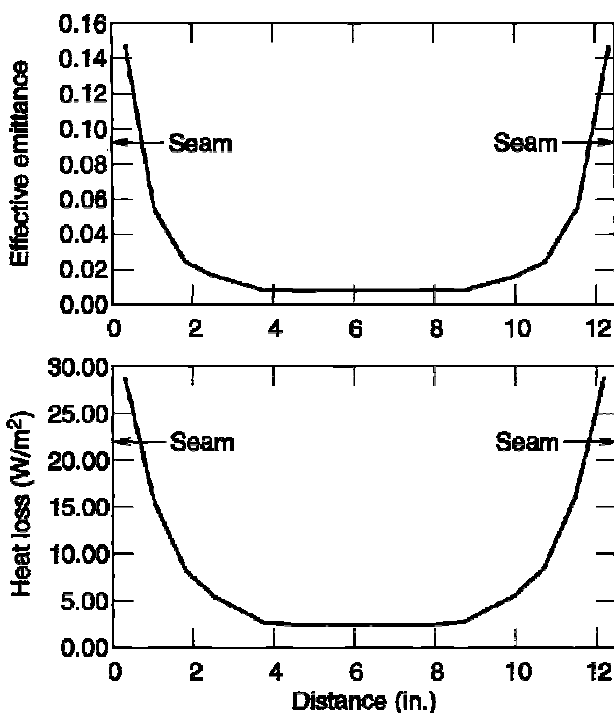
❖ ضربیب صدور مؤثر عایق‌های چند لایه مورد استفاده در آزمایشگاه فضایی (SpaceLab)

- ضربیب صدور مؤثر اندازه‌گیری در شرایط آزمایشگاهی حدود 0.005 با تعداد ۳۰ لایه
- سطح بسیار بزرگ عایق
- حداقل تعداد منفذ و اتصال



❖ بررسی اثر دوخت و اتصالات در پروژه کاسینی (Cassini) در مرکز JPL

- نمونه تست، عایق چند لایه با ۲۰ لایه
- فاصله دهنده از جنس داکرون
- اندازه‌گیری دما در نقاط مختلف عایق
- تغییر ضربیب صدور مؤثر از 0.006 در مرکز عایق تا 0.15 در نزدیکی محل اتصال و دوخت





❖ استفاده از روابط تجربی برای تخمین ضریب صدور مؤثر عایق‌های چند لایه

- نتایج تجربی گزارش شده توسط J. Doenecke
- ارتباط ضریب صدور با تعداد لایه‌ها، اندازه عایق، دمای متوسط لایه‌های عایق، و درصدی از سطح عایق که سوراخ شده است (penetrations)

$$\epsilon_{io}^* = \left( 0.000136 \times \frac{1}{4\sigma T_m^2} + 0.000121 \times T_m^{0.667} \right) \cdot f_N \cdot f_A \cdot f_P$$

○ اعتبار رابطه برای  $-140 < T_m < +140 \text{ } ^\circ\text{C}$

○ پارامتر A سطح عایق بر حسب مترمربع

○ اعتبار رابطه برای  $0.05 < A < 3 \text{ m}^2$

○ تأثیر ضریب صدور مؤثر بر دماهای گرم و سرد

$$f_A = 10^{-0.373 \times \log A}$$

$$4T_m^3 = \frac{T_H^4 - T_C^4}{T_H - T_C} = (T_H^2 + T_C^2)(T_H + T_C)$$

❖ تخمین پارامترها بر اساس نتایج تجربی

Correction Factors to be Used in Equation

Number of Layers	$f_N$
5	2.048
10	1.425
15	1.164
20	1.000
25	0.905
30	0.841

Penetrations (%)	$f_P^b$ ( $\epsilon_i = 0.04$ )	$f_P^b$ ( $\epsilon_i = 0.03$ )
0.1	0.756	0.704
0.2	0.783	0.737
0.5	0.865	0.837
1.0	1.000	1.000
1.5	1.133	1.161
2.0	1.266	1.322

Surface emittance of internal layers. Use 0.04 for layers with 1000 Å vapor-deposited aluminum and 0.03 for layers with 750 Å vapor-deposited gold (typical for Sheldahl)

## مدل سازی عایق های خندلایه

### عایق نانو روکش های حرارتی

❖ نحوه به کارگیری ضریب صدور مؤثر در تحلیل حرارتی

1. تخمین دماهای سرد و گرم دو طرف عایق ( $T_C$  و  $T_H$ )

$$4T_m^3 = \frac{T_H^4 - T_C^4}{T_H - T_C} = (T_H^2 + T_C^2)(T_H + T_C)$$

2. محاسبه دمای متوسط ( $T_M$ )

3. تعیین ضرایب تصحیح  $f_N$  و  $f_P$  با استفاده از جدول

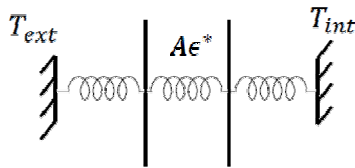
4. تعیین  $f_A$  با استفاده از رابطه  $f_A = 10^{-0.373 \times \log A}$

$$\varepsilon_{io}^* = \left( 0.000136 \times \frac{1}{4\sigma T_m^2} + 0.000121 \times T_m^{0.667} \right) \cdot f_N \cdot f_A \cdot f_P$$

5. استفاده از رابطه ضریب صدور برای یافتن آن

6. اعمال ضریب صدور مؤثر به دست آمده در مدل حرارتی ماهواره و یافتن مقادیر جدید  $T_C$  و  $T_H$

7. تکرار مراحل ۲ تا ۶، تا همگرا شدن نتایج



❖ تعیین گره های مدل حرارتی بر اساس تعریف ضریب صدور مؤثر

❖ اعمال خواص ترموپاتیکی عایق چند لایه به سطح خارجی سخت افزار

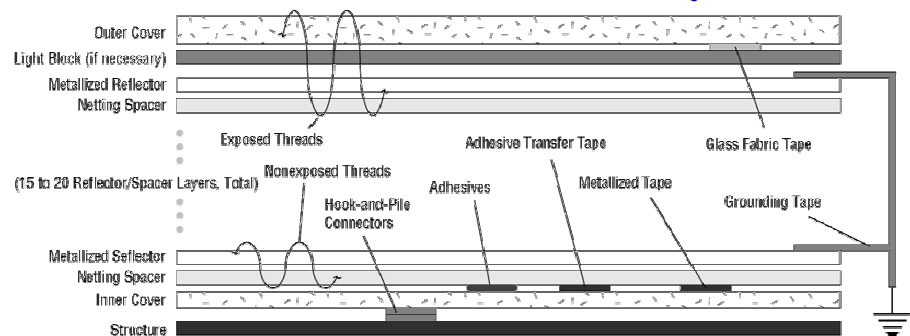
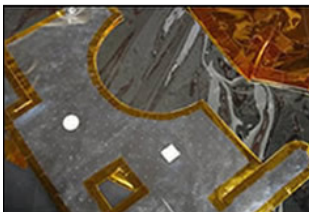
$$\alpha^s \equiv \frac{\alpha_o^s \varepsilon_{ho}^*}{\varepsilon_o (A_o / A_h) + \varepsilon_{ho}^*}, \quad \varepsilon \equiv \frac{\varepsilon_o \varepsilon_{ho}^*}{\varepsilon_o (A_o / A_h) + \varepsilon_{ho}^*}$$

## اجزای عایق های خندلایه

### عایق نانو روکش های حرارتی

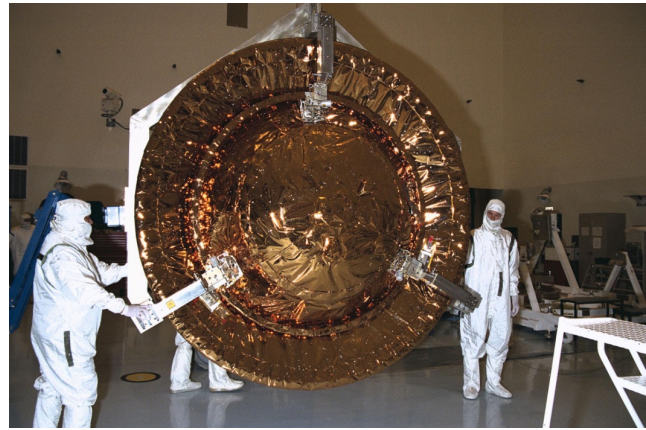
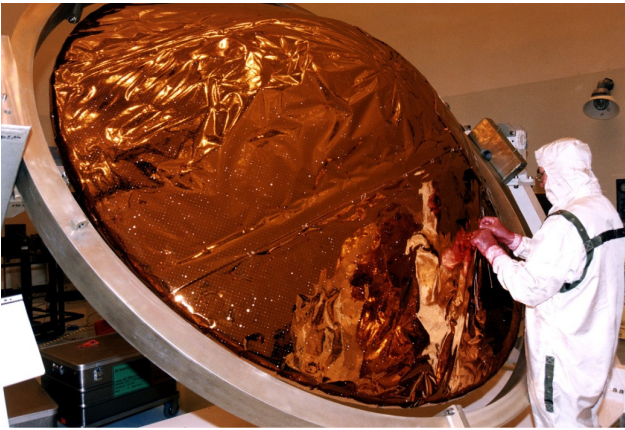
❖ اجزای عایق های چند لایه

- لایه محافظتی خارجی (Outer cover)
- لایه های انعکاس دهنده یا لایه های داخلی (interior layers)
- شبکه های جداکننده یا فاصله دهنده (spacers or separators)
- لایه محافظتی داخلی (inner cover)
- نخ دوخت (Threads)
- نوار چسب (Adhesive tape)
- دکمه ها و بندها (Fasteners)



❖ لایه محافظتی خارجی (Outer cover)

- خارجی ترین لایه به سمت فضا
- مقاومت کششی، مقاومت در برابر ورقه شدن و اشعه UV
- جلوگیری از تجمع بار الکتریکی
- کاپتون (Kapton)، تدلار (Tedlar)، تفلون (Teflon)، پارچه بتا (Beta cloth)



❖ لایه های انعکاس دهنده یا لایه های داخلی (interior layers)

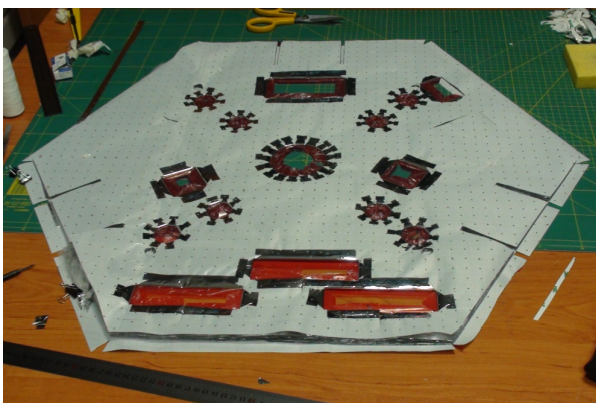
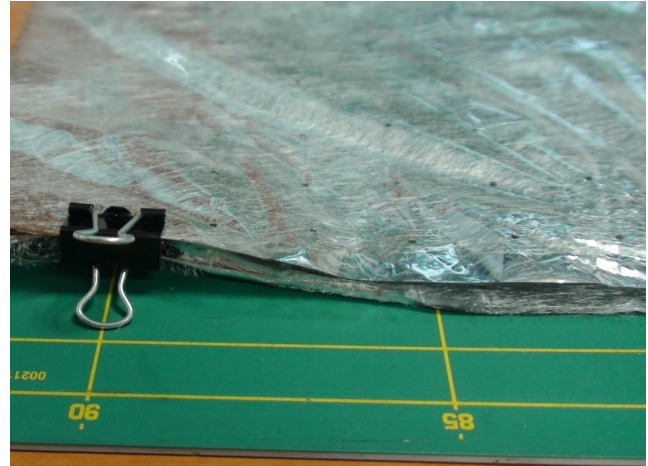
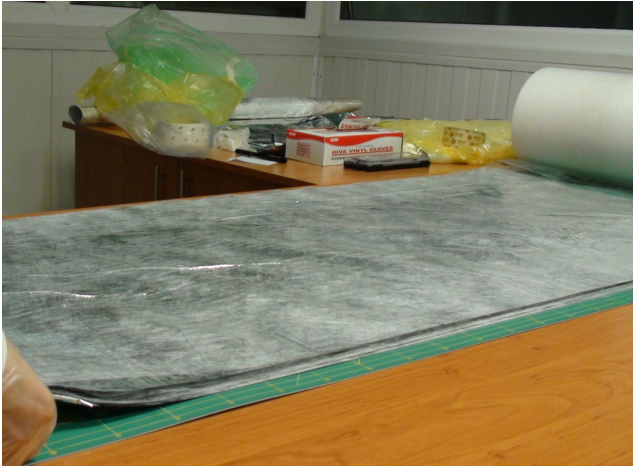
- لایه های قرار گرفته در زیر حفاظ خارجی
- بین ۱۵ تا ۲۰ لایه
- پوشش فلزی در یک یا دو طرف (پوشش دهی فلز با خلوص 99.99% به روش لایه نشانی در خلاء روی لایه پلیمری)
- مایلار با پوشش آلومینیومی





❖ شبکه‌های جداکننده یا فاصله دهنده (spacers or separators)

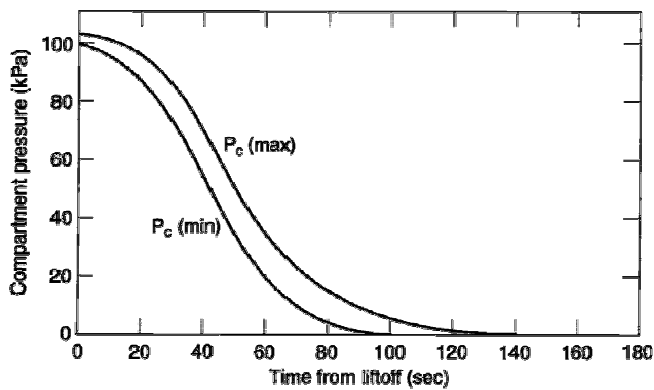
- قرارگیری بین تمامی لایه‌ها
- ضریب هدایت پایین
- وزن بسیار کم
- داکرونی (Dacron)، پلی‌استر (Polyester)، ابریشمی (silk)، نومکس (Nomex)



❖ لایه محافظتی داخلی (inner cover)

- داخلی ترین سطح به سمت بدنه ماهواره
- معمولاً از جنس نسوز
- عدم پوشش‌دهی فلزی سطح رو به بدنه ماهواره
- مقاومت کششی برای محل اتصال



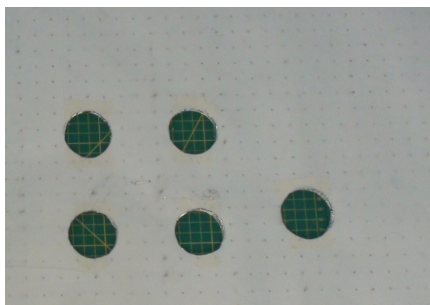


❖ علل جلوگیری از حبس شدن هوا در داخل عایق

- افزایش کارایی عایق
- جلوگیری از تورم و پاره شدن عایق

❖ تمهیدات خروج هوا

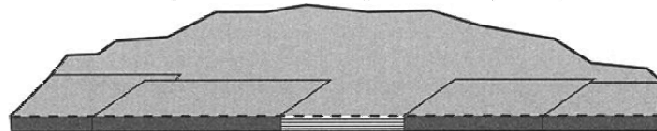
- مسیرهای خروج هوا به گونه‌ای باشد که در چند ساعت اول پرتاب فشار به کمتر از  $10^{-4}$  Torr برسد
- مسیرهای تخلیه نباید به سمت بخش‌های حساس به آلودگی‌ها باشد
- تخلیه هوای بین لایه‌ها با نرخ‌های همپای نرخ کاهش فشار فیرینگ پرتابگر باشد
- نرخ کاهش فشار برای پرتابگر Titan IV حدود  $1.7 \text{ kPa/sec}$
- نرخ معمول تخلیه هوا در عایق‌ها حدود  $10 \text{ kPa/sec}$



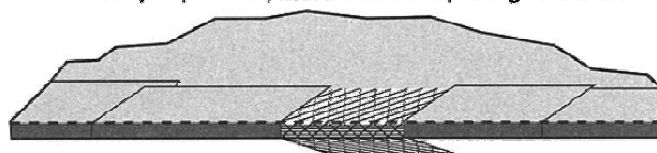
❖ روش‌های تخلیه هوای داخل عایق چند لایه

- ایجاد سوراخ‌هایی با قطری  $0.8 \text{ mm}$  و  $6 \text{ mm}$  از یکدیگر
- برش لبه‌های عایق به شکل X

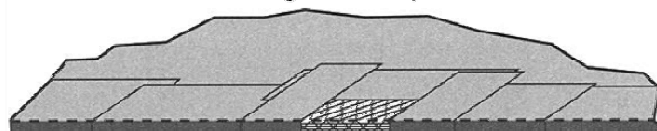
Tape removed from edge of blanket (2.5 cm)

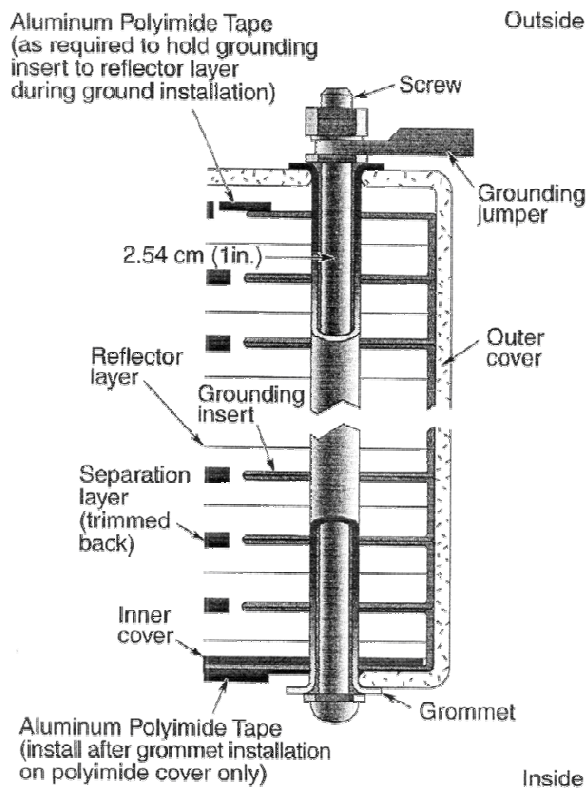


Filter (74- $\mu\text{m}$  mesh) folded around untaped edge of blanket



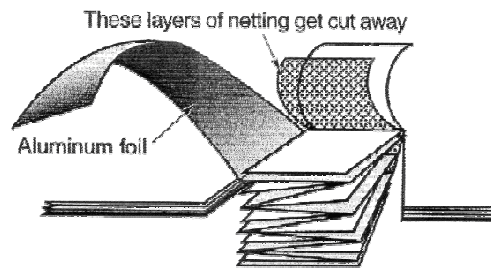
Edges of filter taped



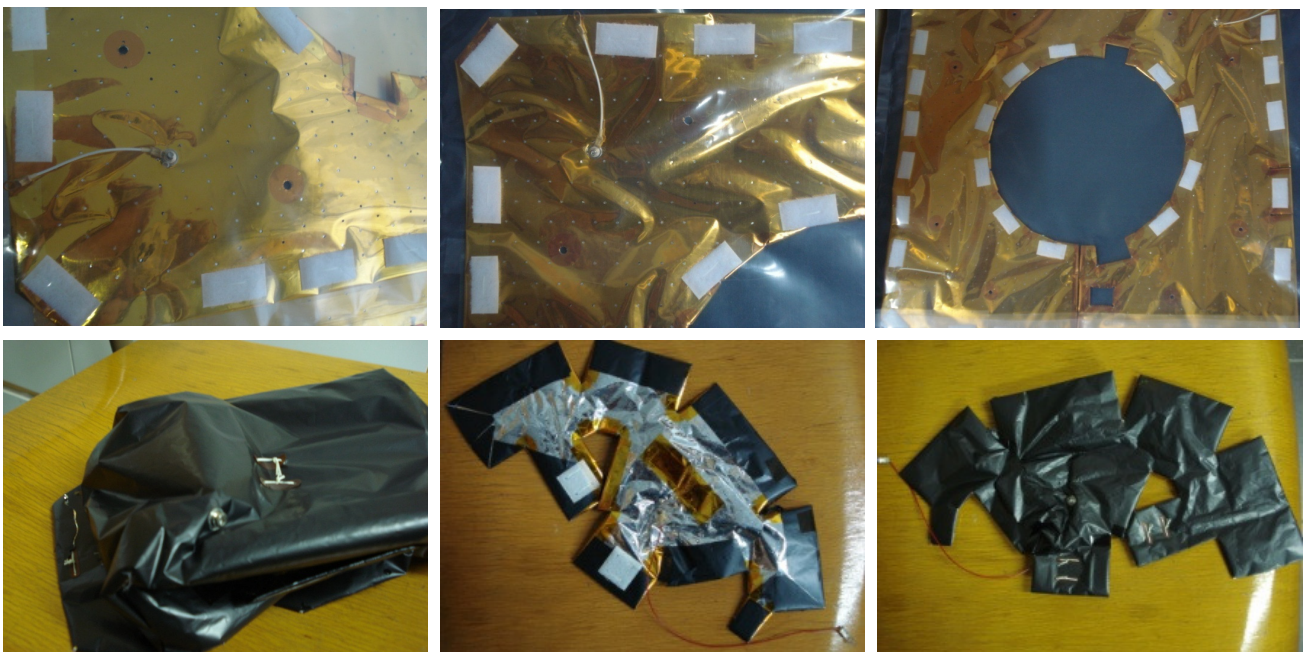


❖ اتصال الکتریکی لایه های پتو یا عایق چند لایه به سازه ماهواره

- قرار دادن نوار فویل آلومینیوم بین لایه ها در قسمت لبه پتو و نگه داشتن آن با یک پین سرتاسری
- قرار دادن نوارهای آلومینیومی بین لایه ها در زیر مسیرهای دوخت



❖ نمونه هایی از اتصال الکتریکی لایه های پتو یا عایق چند لایه به سازه ماهواره



## طراحی و ساخت عایق های خنثی

### عایق تابش گرمایی حرارتی

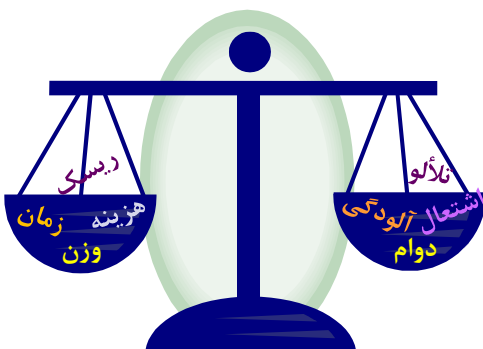


#### ❖ مراحل ساخت عایق های چند لایه

- الگوبرداری
- لایه چینی و الگوگذاری
- برش لایه های داخلی
- دوخت تمامی لایه ها
- نصب چسبها بر روی عایق
- نصب چسبها بر روی بدنه ماهواره

## طراحی و ساخت عایق های خنثی

### عایق تابش گرمایی حرارتی



#### ❖ ملاحظات طراحی و ساخت عایق های چند لایه

- دوام و ماندگاری (durability)
- قابلیت اشتعال (flammability)
- کنترل آلودگی ها (contamination)
- بارهای حین پرتاب (launch load)
- نرخ و نحوه کاهش فشار (pressure decay)
- نحوه تخلیه گازهای داخل ماهواره (spacecraft venting)
- حداقل نمودن تأثیر (glint minimization)
- محدودیت های مرتبط با مواد مغناطیسی (restriction on magnetic materials)
- مقاومت در برابر فرسایش عوامل مختلف مانند نمک (exposure to salt spray)

#### ❖ موازنه با ملاحظات

- حداقل نمودن وزن، هزینه، ریسک و زمان طراحی و ساخت