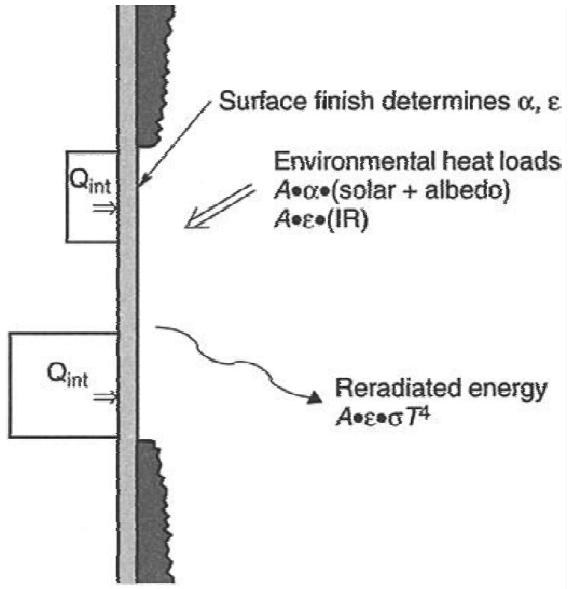
به نام پروردگار یکتا

رادیاتورها

- تعریف رادیاتور
- انواع رادیاتورها
- توان تشعشع رادیاتورها
- طراحی ابعاد رادیاتور
- رادیاتورهای فعال و غیرفعال
- یخ زدگی رادیاتورها
- کارآیی رادیاتورها

تعریف رادیاتور

- سیستمی که بارهای حرارتی داخلی و خارجی را از طریق تشعشع (مادون قرمز) به محیط فضای بیرون ساتع می‌کند
- بارهای حرارتی شامل:
  - انرژی حرارتی اتلافات اجزای داخل ماهواره (satellite waste heat)
  - بارهای حرارتی محیط بیرونی و بارهای حرارتی ناشی از سطوح خود ماهواره که توسط سطح رادیاتور جذب شده است
- استفاده از پوشش‌های دارای ضریب صدور بالا (0.8) و ضریب جذب پایین (0.2)
  - Quartz mirrors
  - Silvered Teflon
  - Aluminized Teflon
  - White paint

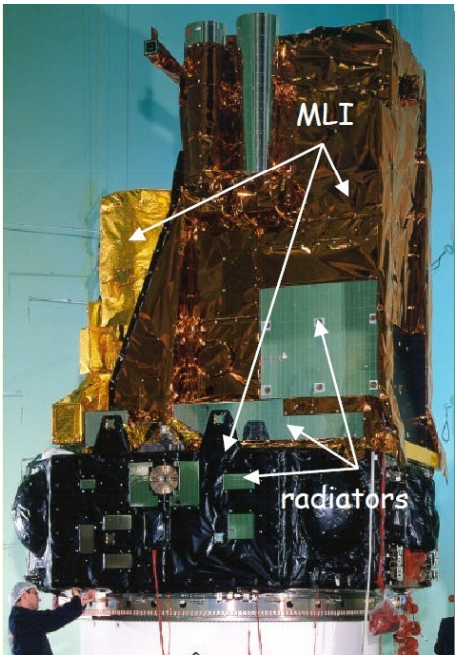


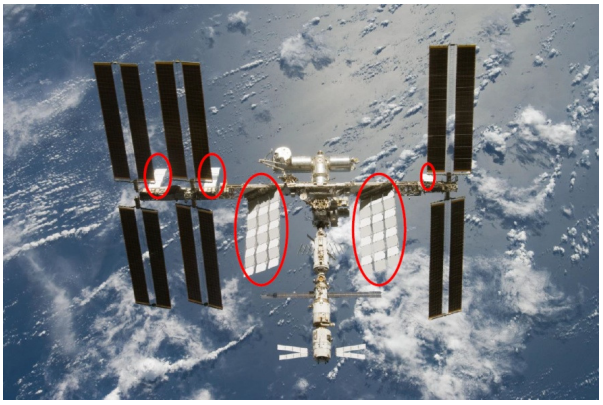
Environmental loads $+\Sigma Q_{int}$ = Reradiated energy

(Steady state)

انواع رادیاتورها

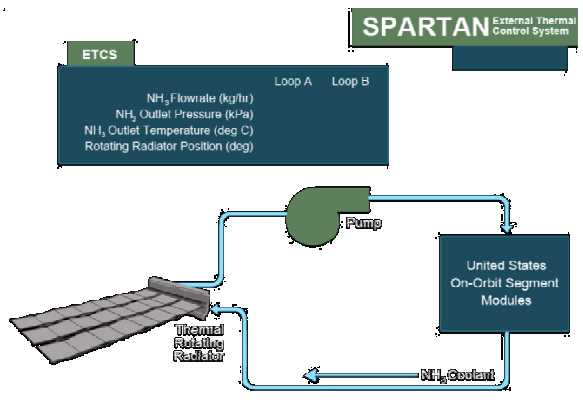
- **طبقه‌بندی رادیاتورها بر اساس شکل و نصب**
  - خود پنل‌های سازه ماهواره (structural panel radiators)
  - صفحات تخت مستقل از سازه ماهواره نصب شده بر روی یکی از وجوه ماهواره (body-mounted radiators)
  - پنل‌های مستقل بازشونده بعد از قرارگیری ماهواره در مدار (Deployable radiator panels)





انواع رادیاتورها

- **طبقه‌بندی رادیاتورها بر اساس نحوه انتقال حرارت از منبع حرارتی به سطح رادیاتور**
  - رادیاتورهای غیرفعال (Passive radiators)
    - ارتباط مستقیم منبع حرارتی و سطح رادیاتور
    - ارتباط از طریق هیت پایپ یا مواد تغییر فازدهنده
  - رادیاتورهای فعال (Active radiators)
    - استفاده از لوپ‌های سیال یا ترکیبی از هیت پایپ و لوپ سیال
    - نیازمند توان برای پمپ نمودن سیال

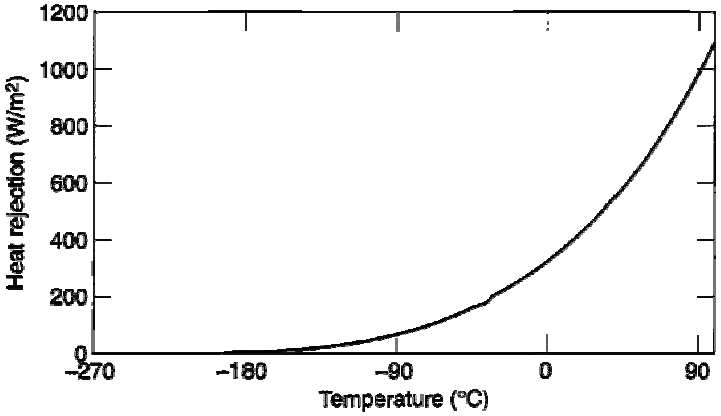


توان تشعشع رادیاتور

- **توان تشعشع (radiating power) تابعی از**
  - ضریب صدور سطح رادیاتور
  - دمای سطح رادیاتور

$$\dot{Q}_{rad} = A\varepsilon\sigma\left(T^4 - T_0^4\right) \cong A\varepsilon\sigma T^4$$

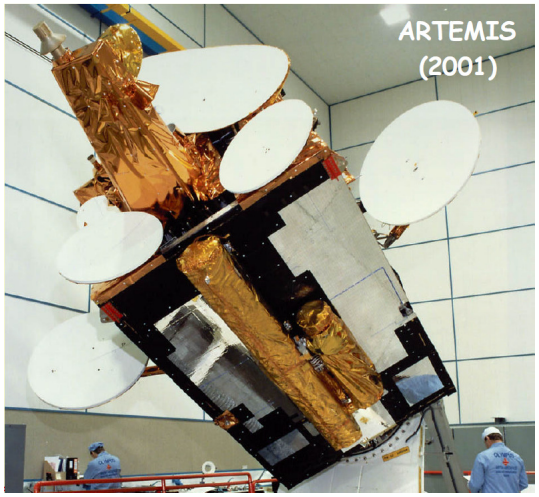
- توان تشعشع در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد در حدود ۲ برابر توان تشعشع در دمای صفر درجه
- توان تشعشع در دمای ۷۰ کلوین ۳۰۰ برابر کمتر از توان تشعشع در دمای اتاق
- اغلب رادیاتورها انرژی بین ۱۰۰ تا ۳۵۰ وات از اتلافات حرارتی اجزای داخلی را به محیط فضا ساتع می‌کنند



- **حساسیت‌های نصب رادیاتورهای برودتی**
  - بارهای حرارتی محیط
  - نشت حرارت از عایق‌ها (insulation)
  - نشت حرارت از نگهدارنده‌ها (support)

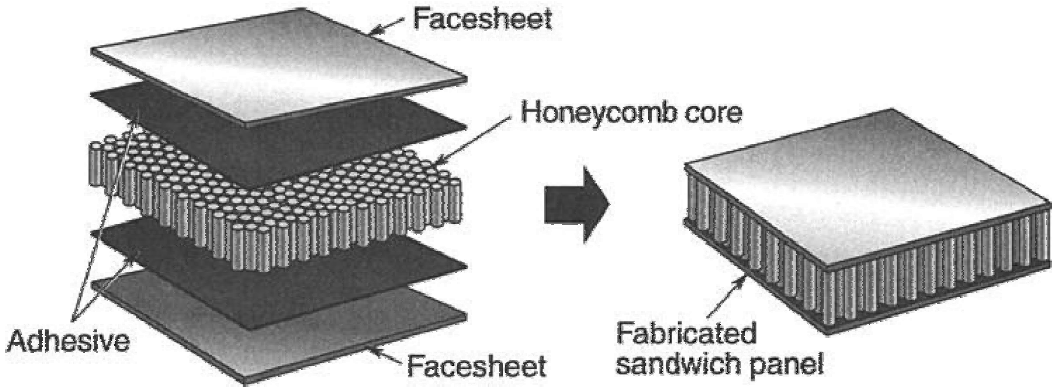
طراحی ابعاد رادیاتور

- **طراحی و تعیین ابعاد رادیاتور (Radiator sizing)**
  - تعیین دمای عملکرد (desired operating temp.)
  - بدترین و حادترین شرایط اتلافات داخلی (worst-case satellite waste heat)
  - شرایط حرارتی محیط (environmental heating)
  - تقابل انتقال حرارت تشعشعی و هدایتی سطح رادیاتور با دیگر سطوح ماهواره (radiative & conductive interactions with other spacecraft surfaces)



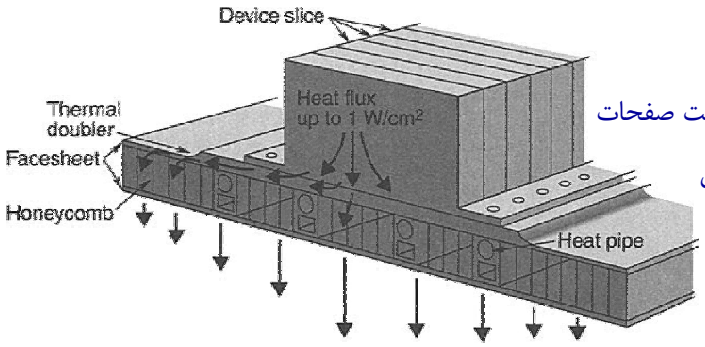
رادیاتورهای غیرفعال سازه‌ای

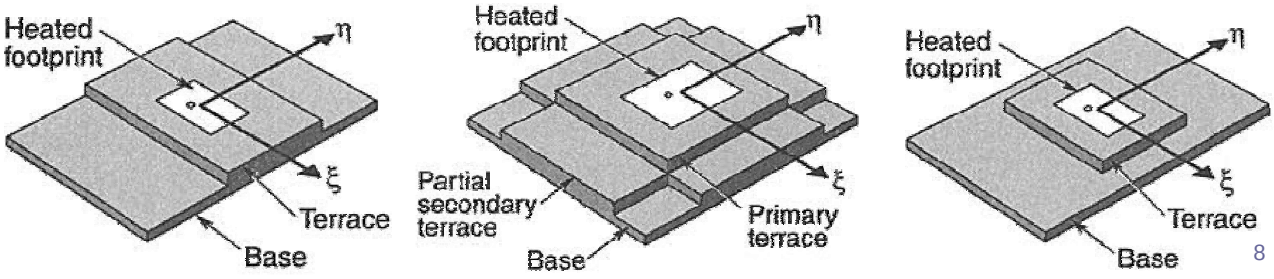
- **رادیاتورهای غیرفعال (passive structure radiators)**
  - استفاده از پنل هانی کامب آلمینیومی موجود در سازه ماهواره به عنوان رادیاتور (جرم پنل هانی کامب در بودجه وزنی سازه محاسبه می‌گردد)
  - توزیع و انتشار حرارت اجزای الکترونیکی توسط صفحه آلمینیومی (panel face-sheet) داخلی پنل
  - انتقال شار حرارتی اجزاء از طریق هسته هانی کامب به صفحات خارجی پنل (سطح رادیاتور)



رادیاتورهای غیرفعال سازه‌ای

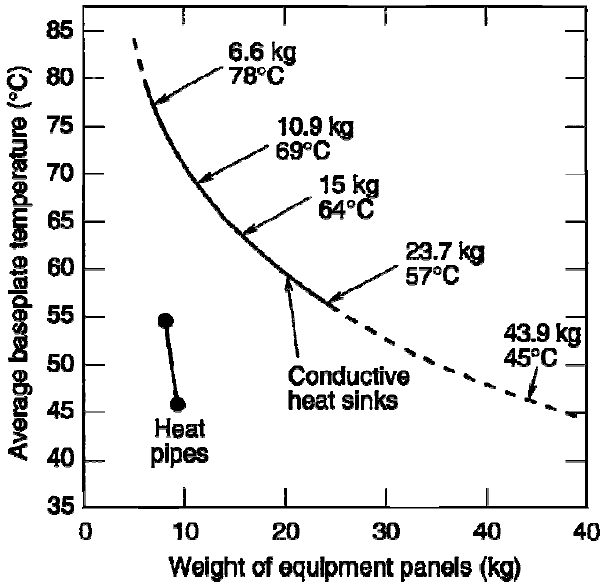
- **راهکارهای افزایش انتقال حرارت در رادیاتورهای غیرفعال (passive structure radiators)**
  - افزایش ضخامت صفحه آلمینیومی داخلی (inner face-sheet)
  - استفاده از doublers
  - استفاده از هیت پایپ (heat pipe)
  - محاسبه افزایش وزن ناشی از افزایش ضخامت صفحات آلمینیومی و استفاده از دابلر در بودجه وزنی کنترل حرارت

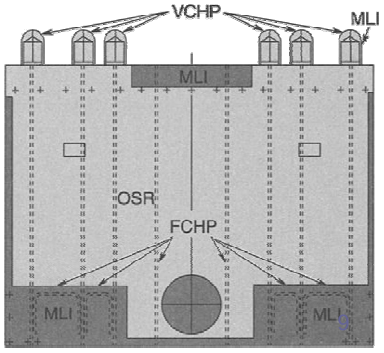




رادیاتورهای غیرفعال سازه‌ای

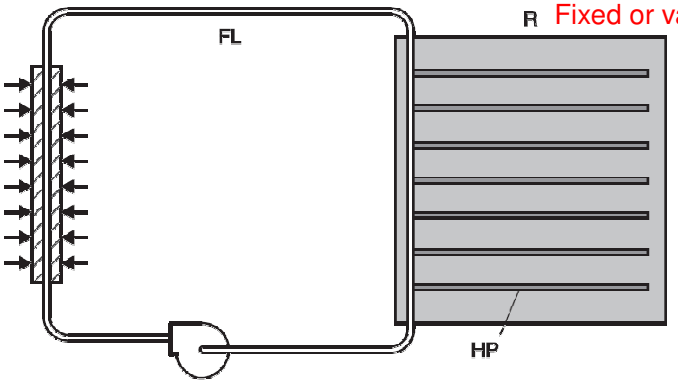
- **رادیاتورهای غیرفعال با هیت پایپ (structural panels with heat pipe)**
  - جلوگیری از ایجاد گرادیان‌های شدید در face-sheet
  - افزایش میزان انتقال حرارت با استفاده از هیت پایپ بدون افزایش شدید وزن در اثر افزایش ضخامت صفحه آلمینیومی و استفاده از دابلر
  - استفاده از هیت پایپ‌های متغیر (VCHP)
    - وجود گستره وسیعی از بارهای حرارتی
    - حداقل‌سازی توان گرمکن‌ها در حالت سرد
    - کنترل دمای تجهیزات در بازه بسیار کوچک





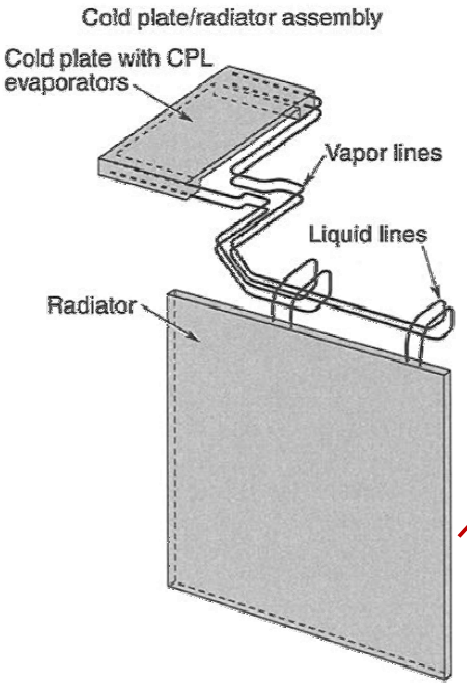
رادیاتورهای غیرفعال و فعال متصل به سازه

- **رادیاتورهای متصل به سازه ماهواره (body-mounted radiators)**
  - دمای عملکرد رادیاتور در دمایی غیر از دمای سازه ماهواره
  - نامناسب بودن پنل‌های سازه برای استفاده به عنوان رادیاتور
  - استفاده از یک پنل ساده یا هانی کامب مستقل از سازه ماهواره
  - استفاده از مواد با ضریب انتقال حرارت هدایتی پایین برای نصب و MLI برای عایق نمودن پنل رادیاتور از سازه ماهواره
  - استفاده از مکانیزم‌های فعال یا غیرفعال برای انتقال حرارت از منبع حرارتی به سطح رادیاتور
    - Fixed or variable-conductance heat pipes
    - Loop heat pipes
    - Capillary pumped loops

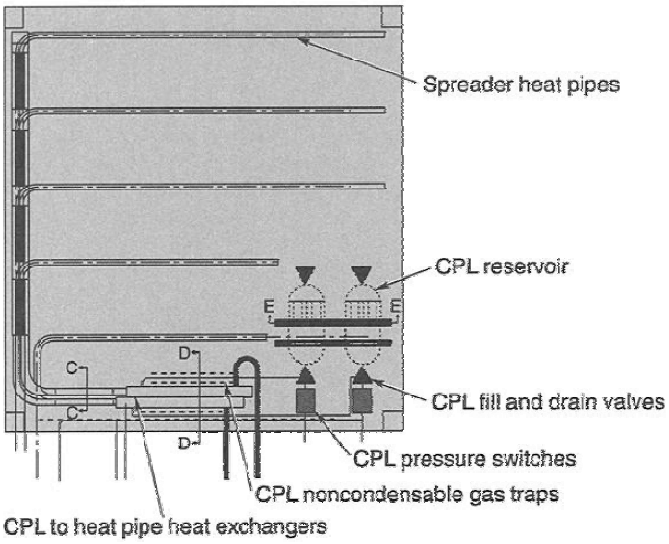


رادیاتورهای غیرفعال و فعال متصل به سازه

- رادیاتورهای متصل به سازه ماهواره

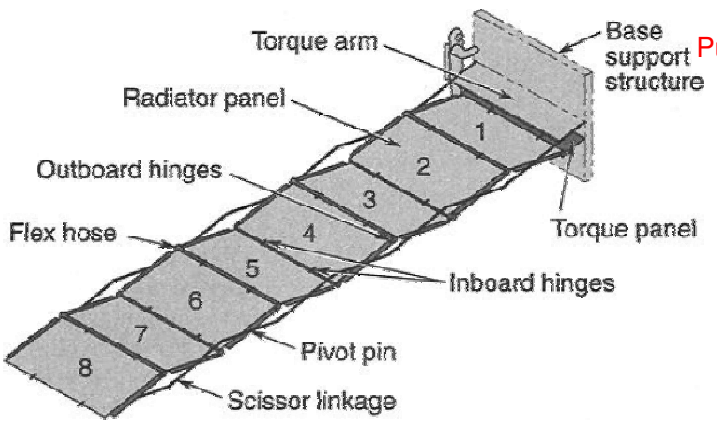


Body-mounted radiator for Earth Observing System



رادیاتورهای فعال بازشونده

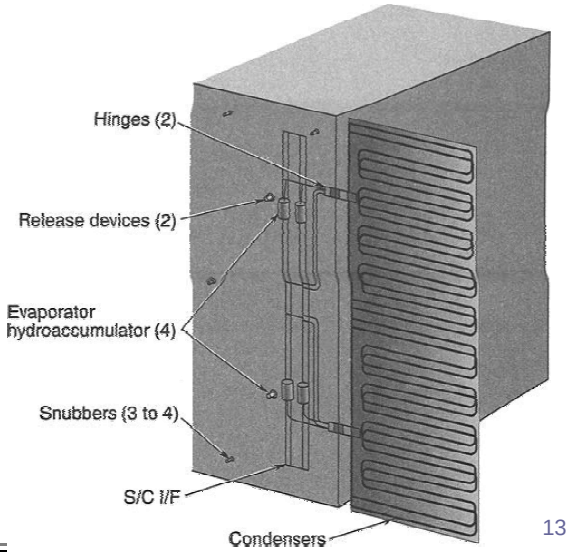
- رادیاتورهای بازشونده (**Deployable radiators**)
  - استفاده از رادیاتورهای بازشونده برای افزایش سطح قابل در دسترس برای رادیاتور
    - بالا بودن سطح اتلافات حرارتی اجزاء داخل ماهواره
    - فشردگی تجهیزات الکتریکی و حجم کم ماهواره
    - عدم کفایت سطوح و پنل‌های سازه‌ای موجود در ماهواره (باس) برای نصب رادیاتور
  - رادیاتورهای بازشونده ایستگاه بین المللی
    - ظرفیت 16kw برای هر رادیاتور
    - Pumped liquid ammonia loop



رادیاتورهای فعال بازشونده

Characteristic	Description
Radiator	
Heat-rejection capacity	1250 W
Size	1.27 m × 3.18 m
Coating	Silver Teflon or quartz mirrors
Loop heat pipes	
Number of LHPs	4
Single pipe capacity at 65°C	>600 W @ 1 m adverse tilt
Evaporator length	457 mm
Condenser type	Direct condensation serial
Ground test elevation	>1 m with 1 failed LHP
Mechanisms	
Flex lines	Flex hose, 6.4 mm ID
Release device	G&H NEA
Hinge	Spherical bearing, torsion spring
Mass	
LHPs	9.5 kg
Radiator	10.2 kg w/silver Teflon, 11.3 kg w/quartz mirrors
Mechanisms	2.0 kg
Total	21.7 to 22.8 kg
Specific heat rejection	57.6 to 54.8 W/kg

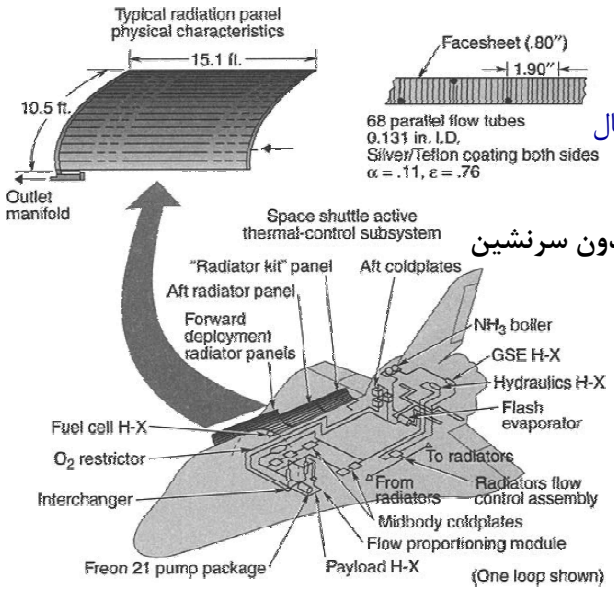
Alpha Radiator Characteristics



رادیاتورهای فعال بازشونده

- **استفاده از رادیاتورهای بازشونده برای سیستم‌های سرنشین دار**
  - وجود پمپ‌های مکانیکی در اغلب سیستم‌ها
  - احتمال بالای خرابی در اکثر پمپ‌های مکانیکی
  - امکان تعمیر توسط خدمه پرواز
  - مدت کم مأموریت
  - مزیت وزنی و کارآیی بالای سیستم‌ها دارای لوپ سیال پمپ شده
- **استفاده کمتر از پمپ‌های مکانیکی در سیستم‌های بدون سرنشین**
  - پروژه Mars pathfinder & Mars Exploration
  - افزایش قابلیت اطمینان پمپ‌های مکانیکی
  - کارآیی بالاتر و وزن کمتر سیستم

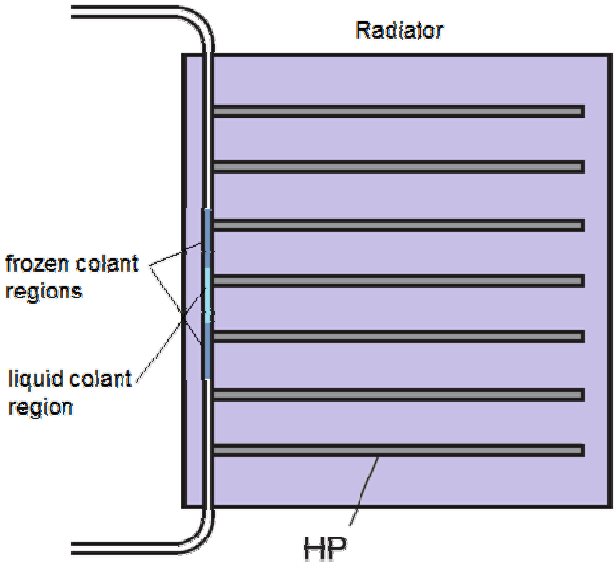
Space shuttle active cooling system



Mechanically pumped Freon heat-transport loop

یخ زدگی رادیاتورها

- **یخ‌زدگی رادیاتورها (Radiator Freezing)**
  - رادیاتورهای دارای لوپ‌های سیال پمپ شده فعال یا غیرفعال
  - احتمال یخ زدگی موضعی با توجه به جرم کم و سطح بزرگ در معرض محیط رادیاتور
  - احتمال یخ زدگی و ذوب شدن سیال کاری در شرایط محیطی
    - Cold case operating
    - Safe-mode condition
  - افزایش حجم اغلب سیال‌های کاری در هنگام ذوب شدن (برخلاف آب)
  - ترکیدگی خطوط انتقال سیال کاری در اثر افزایش فشار محلی ناشی از ذوب سیال حبس شده در بین دو ناحیه یخ زده

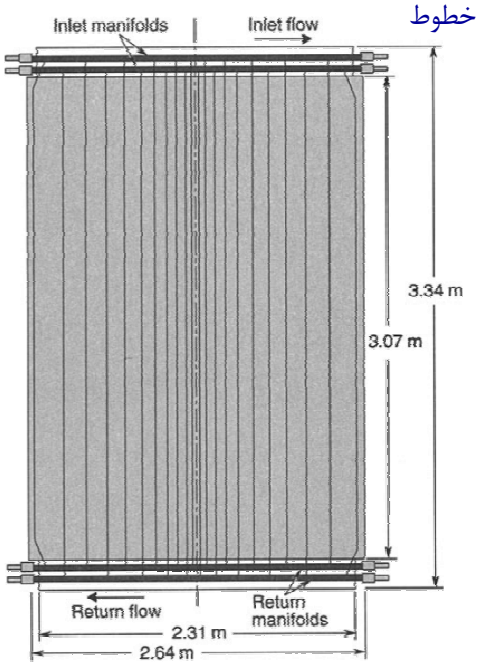


یخ زدگی رادیاتورها

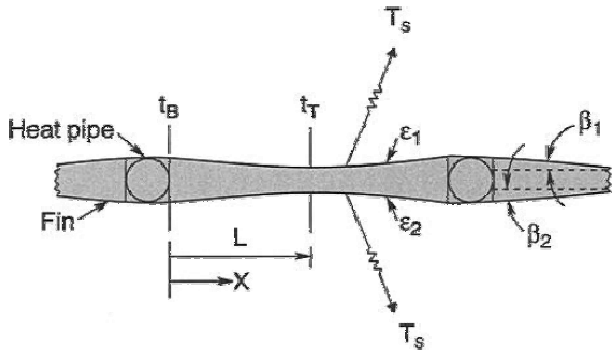
- **رادیاتورهای بازشونده ایستگاه فضایی بین المللی**
  - آمونیاک به عنوان سیال کاری و سردکننده رادیاتور
  - دمای انجماد آمونیاک -77 °C
  - افت دمای پنل‌ها تا دمای -94 °C
  - افزایش فشار داخل خطوط سردکننده ناشی از انجماد و ذوب آمونیاک تا 2.96×10^8 N/m^2
  - تنش تسلیم خطوط سیال از جنس استیل زده زنگ (stainless steel tubes) 2.06×10^8 N/m^2
- **راهکارهای جلوگیری از ترکیدگی لوله‌ها در اثر یخ زدگی**
  - پیش گرم کردن رادیاتورها (Preheating) قبل از ورود به ناحیه سایه
  - استفاده از بریلیوم (Beryllium) یا لیتیم (Lithium) به جای آلمینیوم
  - استفاده از مواد تغییر فاز دهنده برای افزایش ظرفیت حرارتی
  - استفاده از گرمکن‌های الکتریکی
  - جمع کردن رادیاتورها در شرایط سرد

یخ زدگی رادیاتورها

- **انتخاب راهکار نهایی برای رادیاتورهای ایستگاه فضایی بین المللی**
  - انتخاب کاراترین و ارزان‌ترین راه حل
  - انتخاب ماده‌ای با تنش تسلیم بالاتر از فشار موضعی ایجاد شده در خطوط
    - استفاده از inconel با تنش تسلیم 1.2×10^9 N/m^2
  - ایجاد فواصل متفاوت در بین تیوپ‌های هر یک از پنل‌ها
    - یخ زدگی تیوپ‌هایی که سطح تشعشع بزرگ‌تری دارند
    - جریان آمونیاک گرم‌تر در تیوپ‌هایی که فواصل کمتری دارند
    - جلوگیری از یخ زدگی کامل رادیاتور در بدترین شرایط سرد



کارآیی رادیاتورها



- **کارآیی رادیاتورها (radiator effectiveness)**
  - تعداد و فواصل بین تیوپ‌ها
  - سطح رادیاتور
  - ضخامت پره‌ها (fins)
  - وزن رادیاتور
  - ترکیب بهینه‌ای از تعداد تیوپ‌ها و فواصل آنها و ضخامت پره‌ها با حداقل وزن
- **معادله عمومی بالانس حرارتی یک پره با محیط**

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{(t_B - t_T)}{Lt_T + (t_B - t_T)(L-x)} \frac{dT}{dx} \frac{\sigma\left(\frac{\varepsilon_1}{\cos\beta_1} + \frac{\varepsilon_2}{\cos\beta_2}\right)L}{2K[Lt_T + (t_B - t_T)(L-x)]}(T^4 - T_s^4) = 0$$

T_s: effective sink temperature
L: heat-pipe spacing divided by 2
k: fin conductivity
t: fin thickness
σ: Stefan-Boltzmann constant
ε_1, ε_2: radiator emittance of side 1 and side 2

$$T|_{x=0} = T_B$$

$$\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=L} = 0$$

❖ حل عددی معادله عمومی بالانس حرارتی پره توسط **chang** برای کارآیی یک پره با ضخامت یکنواخت

$$\text{fin efficiency} = \frac{\textit{net heat rejected by the fin}}{\text{heat that would be rejected by an isothermal fin to a 0K sink}}$$

$$\eta_e = (1 - 1.125\zeta + 1.60\zeta^2)(1 - \theta^{*4}) \quad 0.01 \le \zeta \le 0.2$$

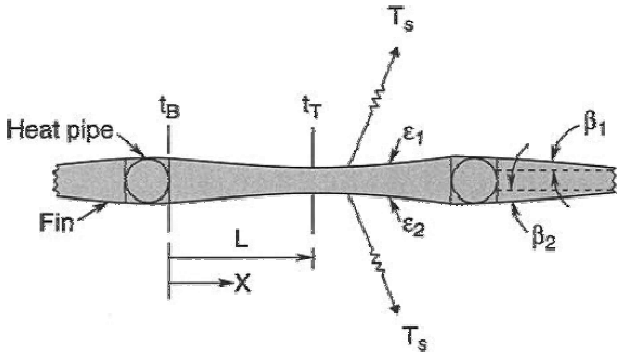
$$= (-0.405\log\zeta + 0.532)(1 - \theta^{*4}) \quad 0.2 \le \zeta \le 2.0$$

$$\zeta = \frac{\sigma L^2 T^3 B(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{kt}$$

$$\theta^* = \frac{T_s}{T_B}$$ T_B: fin base temperature

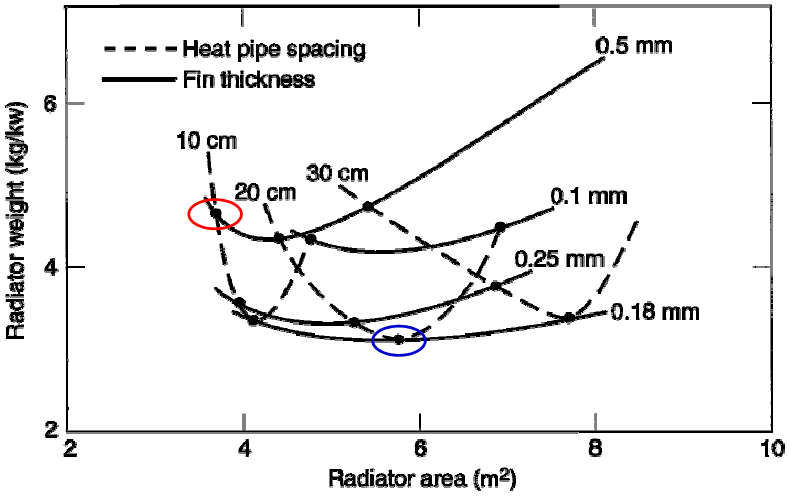
$$Q = A\varepsilon\eta_e\sigma(T_B^4 - T_s^4)$$

$$Q = A\varepsilon\eta_e\sigma T_B^4$$



❖ مثال: رادیاتور دو وجهی تخت آلمینیومی همراه با هیت پایپ

Parameter	Minimum weight	Higher effectiveness
Fin thickness	0.18 mm	0.51 mm
Heat pipe spacing	20 cm	10 cm
Overall fin effectiveness	0.5	0.78
size	A	0.64 A
Total weight	W	1.5 W



❖ مشخصات رادیاتور

- توان مورد نیاز رادیاتور 1000 W
- دمای عملکردی 21°C
- وزن هیت پایپها 0.11 kg/m
- دمای مؤثر چاه حرارتی -87°C