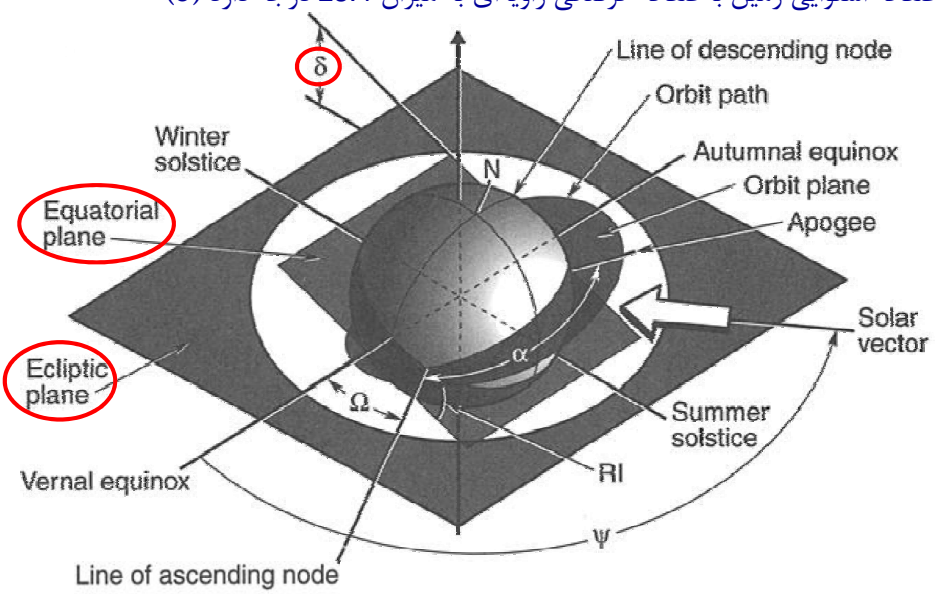
محیط حرارتی در شرایط مداری

- تعاریف
- مدار LEO
- مدار GEO
- مدار دایروی 12-Hour
- مدار Molniya
- شرایط حرارتی پرتاب تا تزریق مداری

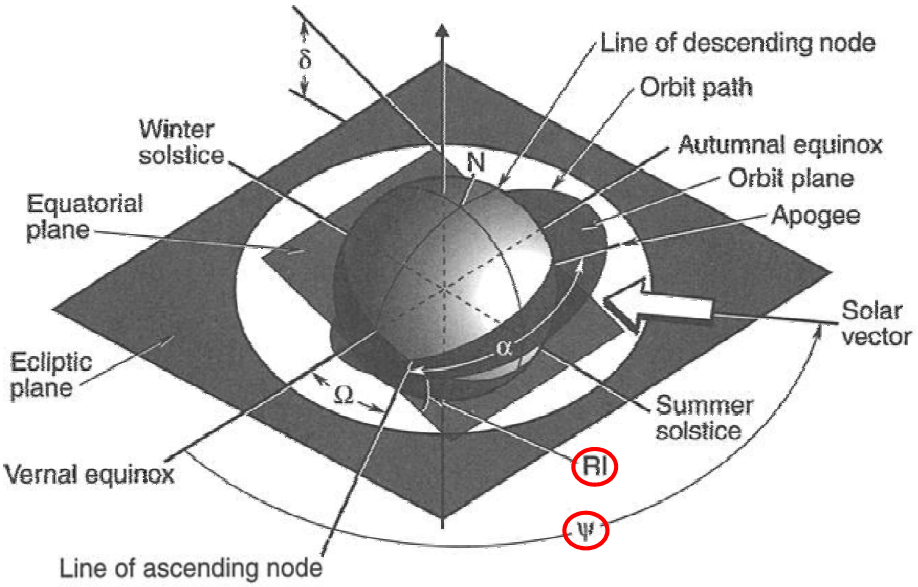
تعاریف

- **صفحه استوایی** (Equatorial Plane): صفحه استوایی زمین که بر محور چرخش زمین عمود است
- **صفحه گرفتگی** (Ecliptic Plane): صفحه مداری زمین به دور خورشید (در طول یک سال، خورشید به طور پیوسته در این صفحه به دور زمین می‌چرخد)
  - صفحه استوایی زمین با صفحه گرفتگی زاویه‌ای به میزان 23.4 درجه دارد (δ)

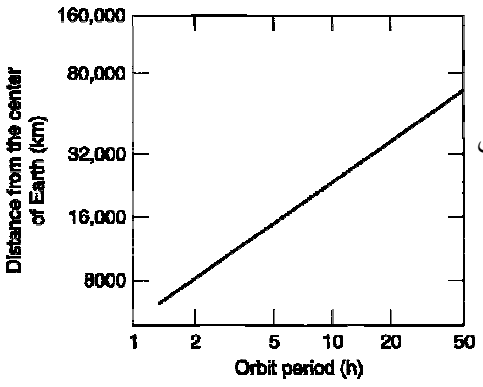


تعاریف

- **زاویه روز خورشیدی** (Sun Day Angle): زاویه موقعیت خورشید از نقطه اعتدال بهاری در صفحه گرفتگی (Ψ)
- **شیب مداری** (Orbit Inclination): زاویه بین صفحه مداری با صفحه استوایی (RI)
- **ارتفاع مداری** (Altitude): فاصله ماهواره از سطح زمین



تعاریف

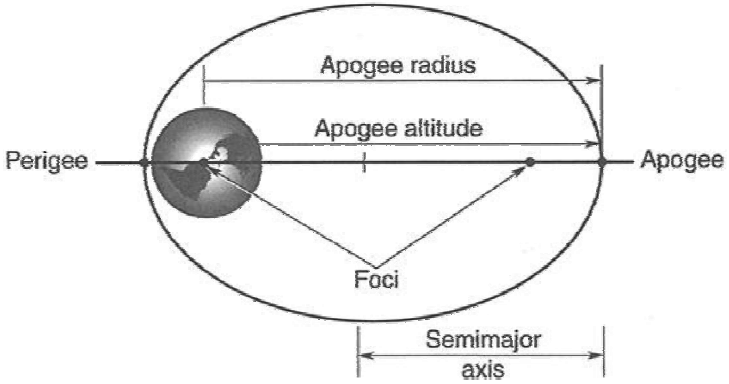


- **نقطه اوج** (Apogee): نقطه بیشترین ارتفاع ماهواره
- **نقطه حضیض** (Perigee): نقطه کمترین ارتفاع ماهواره
- **نیم قطر اصلی** (Semi-Major Axis): نیم قطر اصلی بیضی مداری
- **پریود** (Period): مدت زمان یک دور گردش ماهواره به دور زمین

$$P = 2\pi\left(\frac{a^3}{\mu}\right)^{1/2}$$

μ: ضریب ثابت جهانی گرانش در جرم سیاره

$3.98603\times10^{14}\ m^3/S^2$



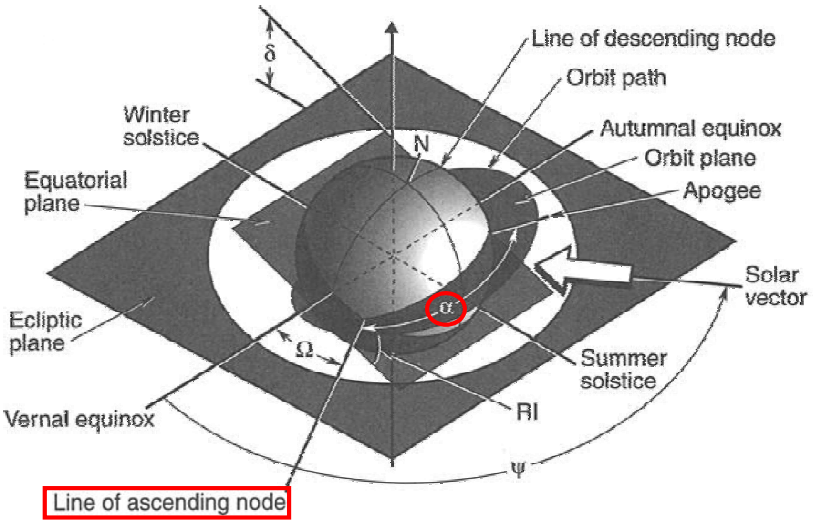
$$a = \frac{r_a + r_p}{2}$$

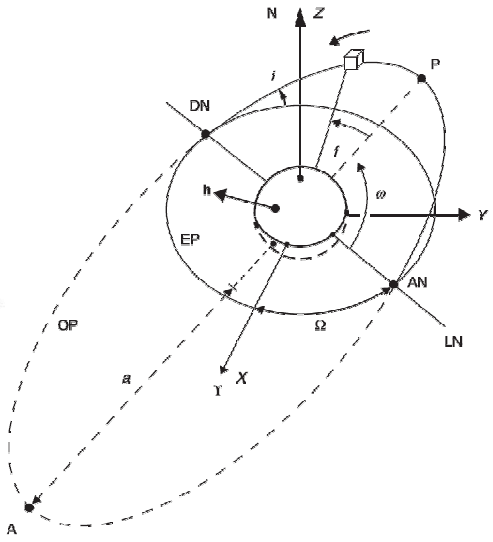
- **خروج از مرکز** (Eccentricity): درجه کشیدگی بیضی مدار ماهواره

$$r_a = a(1+e) \quad r_p = a(1-e)$$

تعاریف

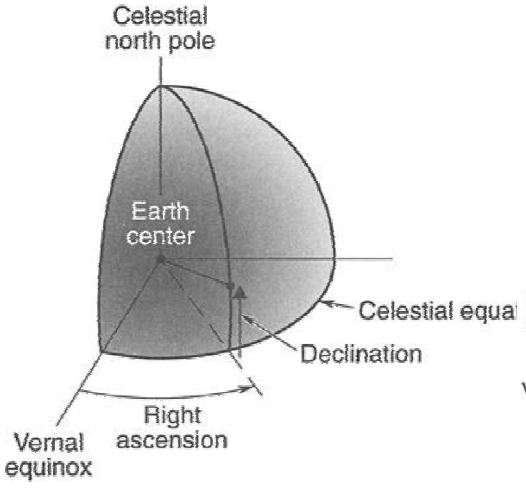
- **نقطه صعود** (Ascending Node): نقطه‌ای روی مدار که ماهواره در هنگام عزیمت به سمت شمال صفحه استوایی را قطع می‌کند
- **نقطه نزول** (Descending Node): نقطه‌ای که ماهواره هنگام عزیمت به جنوب خط استوا را قطع می‌کند
- **پارامتر اوج** (Argument of Apogee): زاویه بین نقطه صعود و نقطه اوج

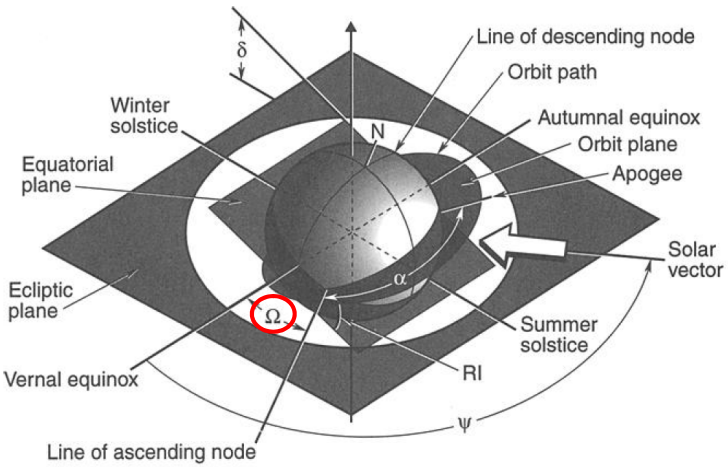




تعاریف

- **زاویه عروج** (Right Ascension): موقعیت زاویه‌ای در صفحه استوایی، اندازه‌گیری شده از نقطه اعتدال بهاری
- **زاویه میل** (Declination): زاویه بین نقطه جسم در مختصات سماوی و صفحه استوایی
- **زاویه عروج نقطه صعود** (Right Ascension of the Ascending Node): زاویه بین نقطه صعود و نقطه اعتدال بهاری در صفحه استوایی (Ω)
- **پیشرفت گرهی** (Nodal Regression): حرکت پیوسته نقطه صعود در هر چرخش ماهواره به دور زمین (کره کامل نبودن زمین)





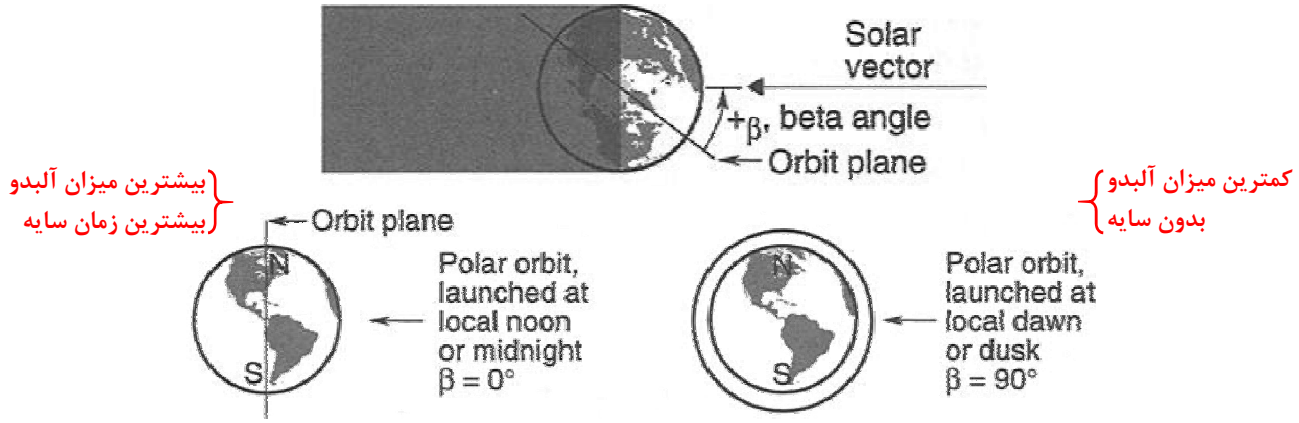
تعاریف

❖ **زاویه بتا** (Orbit Beta Angle): حداقل زاویه بین صفحه مداری و تابش نور خورشید

$$\beta = Arcsin\,[\cos(\delta_s)\sin(RI)\sin(\Omega - \Omega_S) + \sin(\delta_s)\cos(RI)]$$

δ_s: *declination of the sun*
RI: *orbit inclination*
Ω: *right ascension of the ascending node*
Ω_S: *right ascension of the sun*

از نگاه خورشید:
- $\beta < 0$ clockwise
- $\beta > 0$ counter-clockwise



شرایط مداری

تعاریف

❖ **محاسبه مدت زمان سایه**

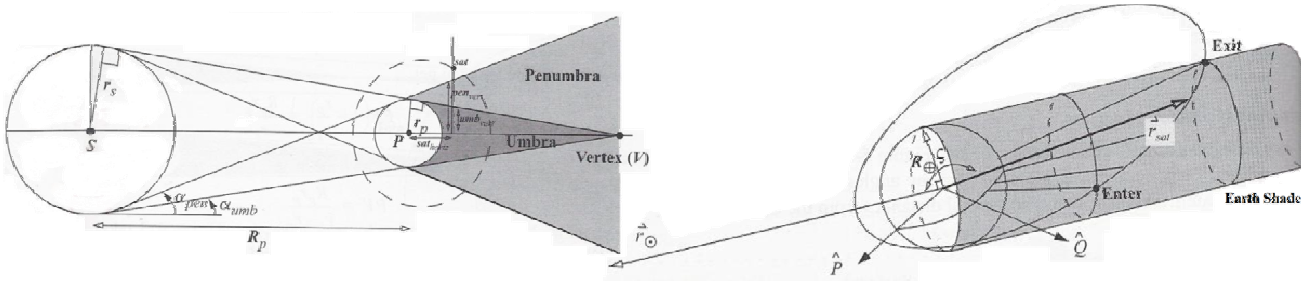
- فرض استوانه‌ای بودن سایه زمین
- فرض تفاوت نامحسوس سایه و نیم‌سایه
- ارتفاع مداری پایین

$$f_E = \frac{1}{180^\circ}\cos^{-1}\left[\frac{(h^2 + 2Rh)^{1/2}}{(R+h)\cos\beta}\right] \quad \text{if } |\beta| < \beta^*$$

$$= 0 \quad \text{if } |\beta| \geq \beta^*$$

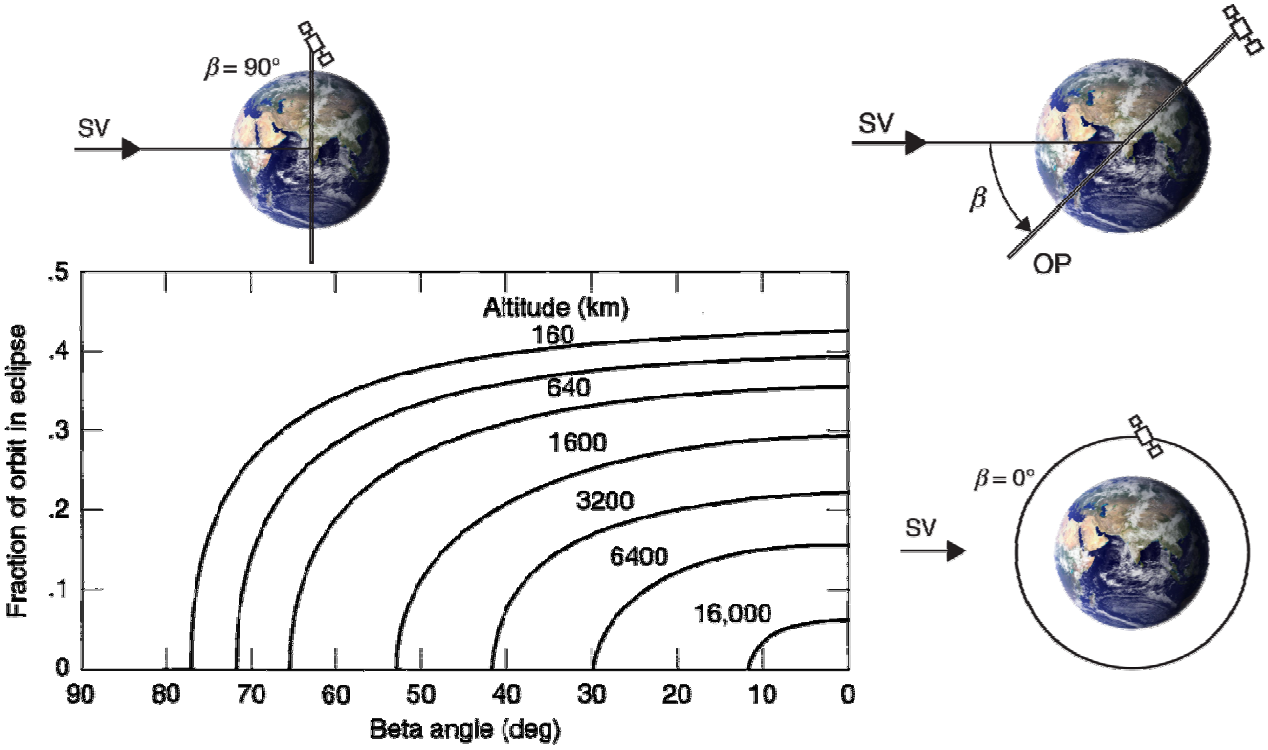
R: *Earth's radius (6378 km)*
h: *Orbit altitude*
β: *Orbit beta angle*
β^*: *The beta angle at which eclipses begin*

$$\beta^* = \sin^{-1}\left[\frac{R}{(R+h)}\right] \quad 0^\circ \leq \beta^* \leq 90^\circ$$



تعاریف

- تغییرات مدت زمان سایه با زاویه بتا برای مدارهای دایروی با ارتفاع مداری مختلف

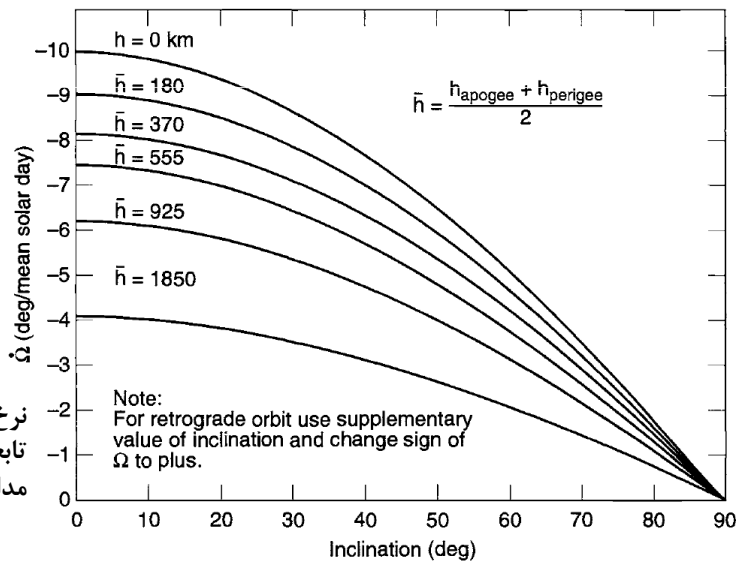


تعاریف

- تغییرات زاویه بتا با زمان برای برخی از مدارها
  - orbital nodal regression
  - sun's right ascension and declination over the year

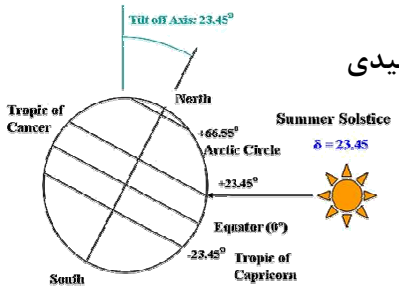
$$\beta = Arcsin\,[\cos(\delta_s)\sin(\mathcal{RI})\sin(\Omega - \Omega_S) + \sin(\delta_s)\cos(\mathcal{RI})]$$

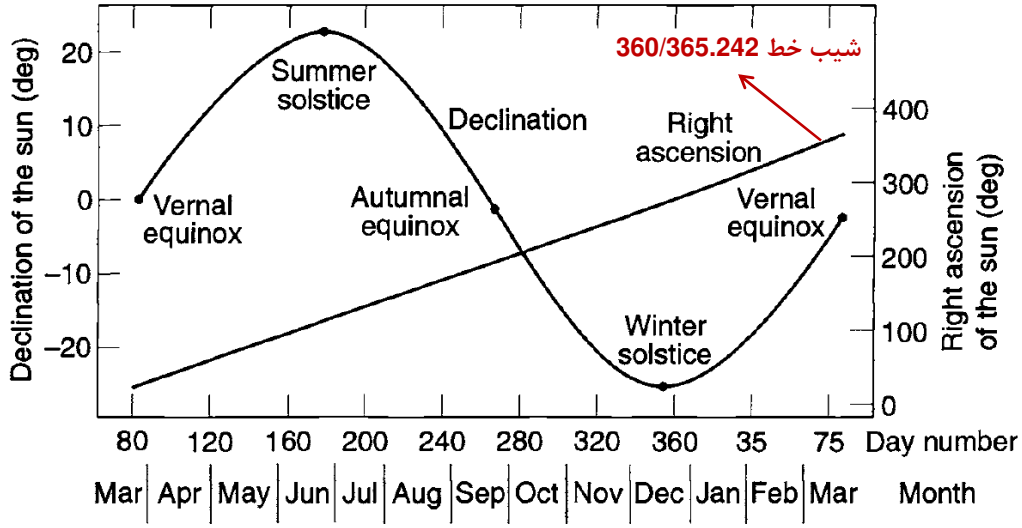
نرخ پیشرفت گرهی به عنوان تابعی از شیب مداری و ارتفاع مداری متفاوت



تعاریف

- تغییرات زاویه عروج (Right Ascension) و میل (Declination) خورشیدی در طول سال



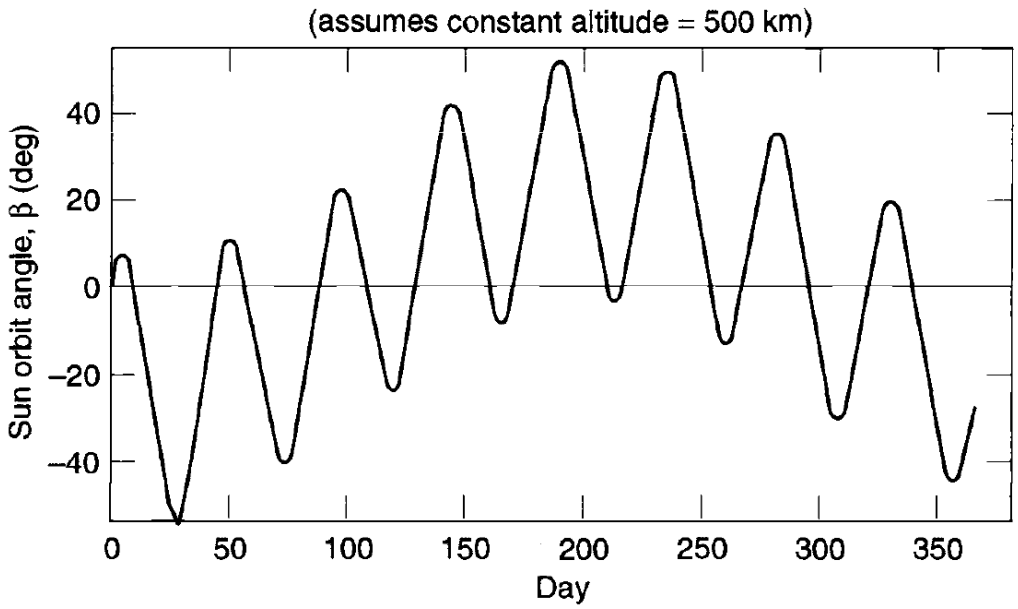


شرایط مداری

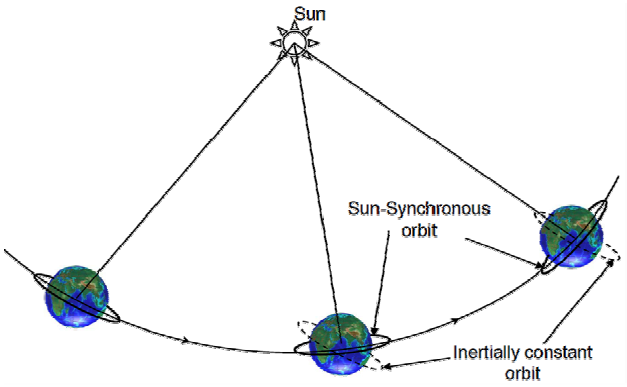
تعاریف

- تغییرات زاویه بتا در طول سال برای ماهواره‌ای در مدار دایروی با ارتفاع ۵۰۰ کیلومتر
  - تغییر مقدار مطلق بتا از صفر تا مقداری برابر با شیب مداری + حداکثر زاویه میل خورشیدی (23.4 deg)

$$0 \le |\beta| \le \delta_s + RI$$

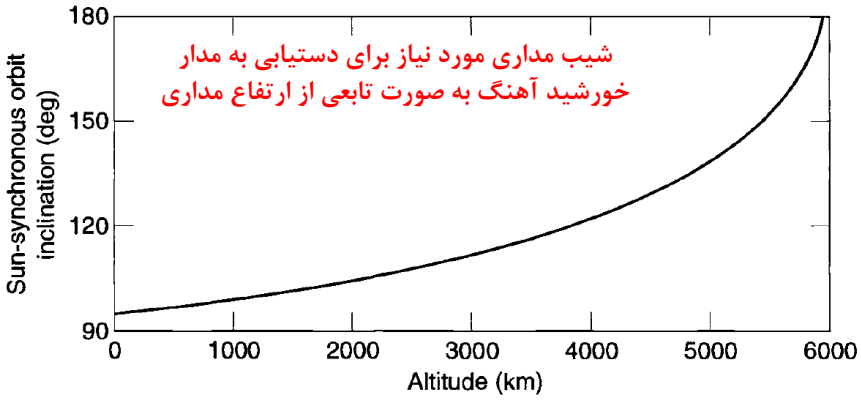


تعاریف



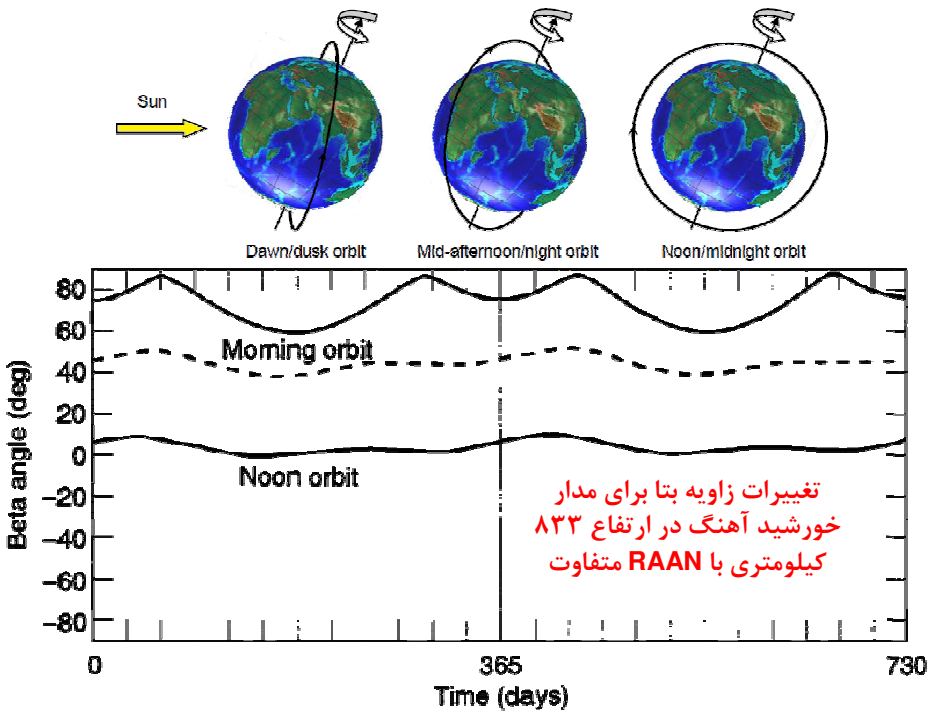
- مدار خورشید آهنگ: پیشرفت گرهی مدار به سمت شرق با نرخی که زاویه عروج خورشید در طول سال تغییر می‌کند.
- نرخ پیشرفت گرهی مدار خورشید آهنگ

$$\dot{\Omega} = 0.9856 \frac{\text{deg}}{\text{day}}$$



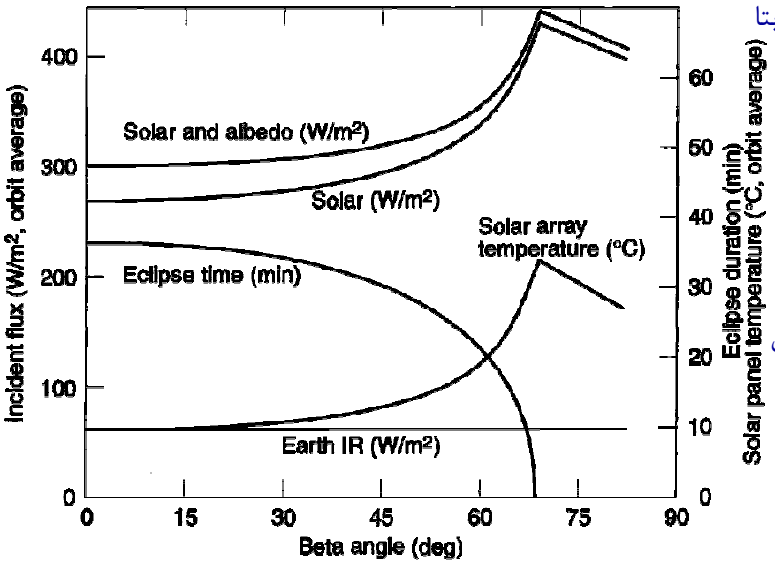
تعاریف

- تغییر محدود زاویه بتا در مدار خورشید آهنگ



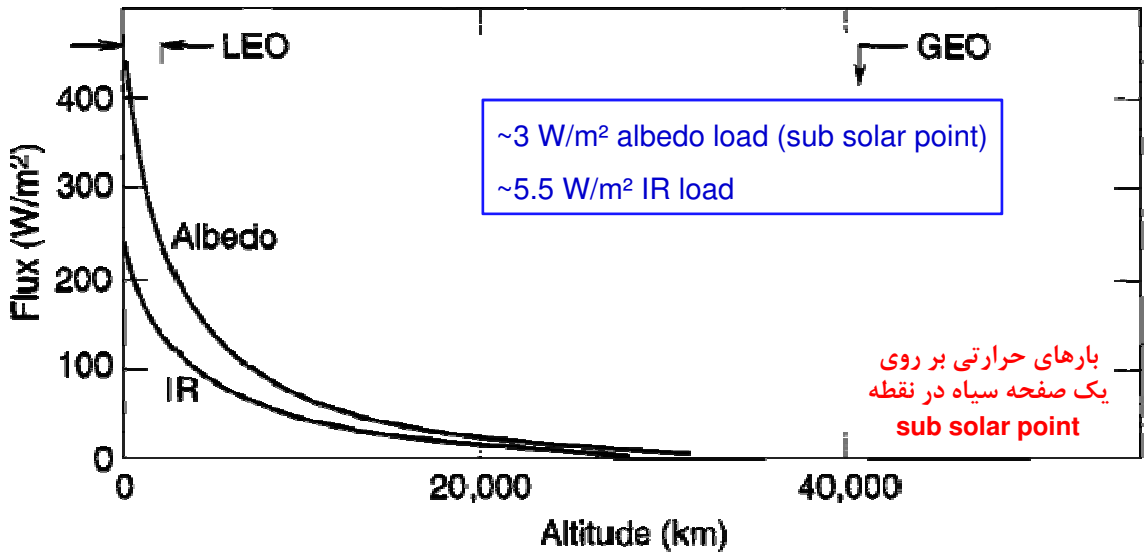
مدار ارتفاع پایین

- ماهواره استوانه‌ای چرخان در ارتفاع ۵۵۵ کیلومتری
  - تحلیل حرارتی ماهواره در چند زاویه بتا به جای استفاده از ترکیب‌های مختلف RAAN و Sun day angle
  - عدم تغییر شار IR با تغییرات RAAN، شیب مداری و زاویه بتا
  - کاهش مدت زمان سایه با افزایش زاویه بتا (افزایش متوسط بار حرارتی خورشیدی)
  - کاهش بار حرارتی آلبدو با افزایش بتا
- دمای متوسط مداری صفحات خورشیدی برای این ماهواره خاص
  - در β=0 حداقل دمای صفحات
  - در β=65 حداکثر دمای صفحات
  - صفحات خورشیدی به عنوان چاه حرارتی (heat sink) اجزای داخلی ماهواره عمل می‌نمایند

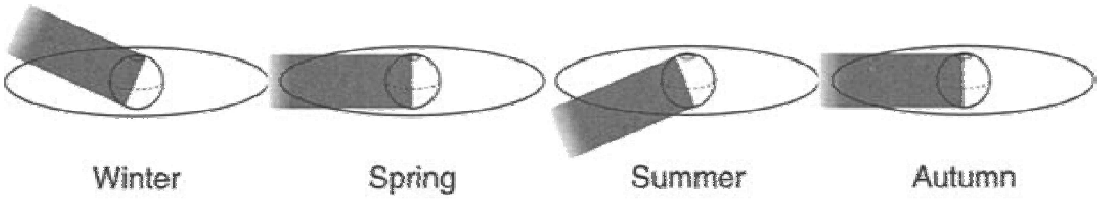


مدار زمین آهنگ

- خورشید به عنوان اصلی‌ترین منبع حرارتی ماهواره‌های GEO
- کاهش بارهای حرارتی آلبدو و IR با افزایش ارتفاع مداری
- عدم اهمیت بارهای حرارتی آلبدو و IR برای ماهواره‌های GEO، بدون سیستم‌های برودتی



- بیشترین مدت زمان سایه ۷۲ دقیقه از ۲۴ ساعت مداری
- شیب مداری اغلب پایین‌تر از ۴ درجه برای ماهواره‌های GEO
- وقوع ناحیه سایه تنها در نقاط اعتدال بهاری و پاییزی، سایه فصلی (Eclipse seasons)
- قرارگیری ناحیه سایه در ناحیه بالا یا پایین مدار با توجه به زوایه میل خورشیدی
- احتمال وقوع ناحیه سایه در نواحی غیر از نقاط اعتدال برای مدارهای GEO با شیب مداری بالاتر

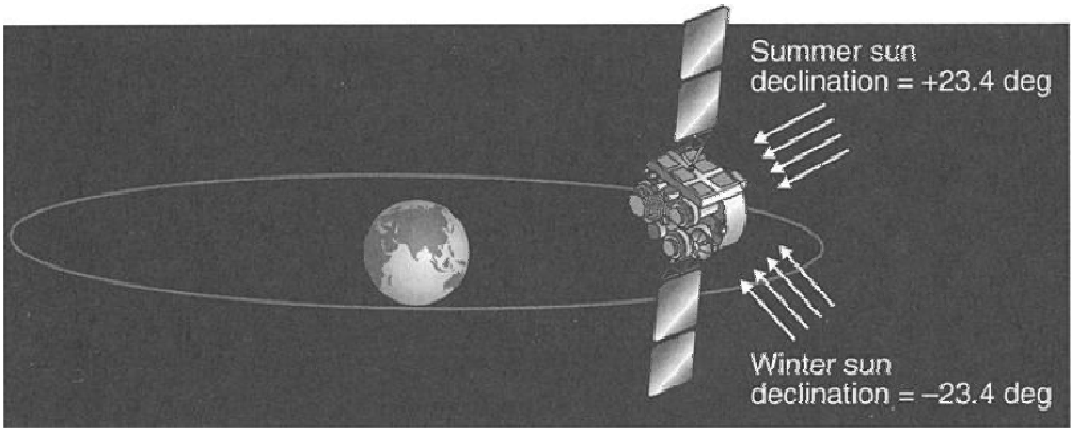


مدار زمین آهنگ
شرایط مداری

- پایداری سه محوره همراه با نشانه‌روی پیوسته به سمت زمین برای اغلب ماهواره‌های GEO
- حداقل شار حرارتی برخوردی در وجوه شمالی و جنوبی ماهواره‌ها
- تابش شار خورشیدی به وجه شمالی تنها در تابستان
- تابش شار خورشیدی به وجه جنوبی تنها در زمستان
- تغییر شار وجوه جانبی از صفر تا حداکثر مقدار آن
- نصب زیرسیستم‌های دارای اتلاف بالا بر روی وجوه شمالی و جانبی

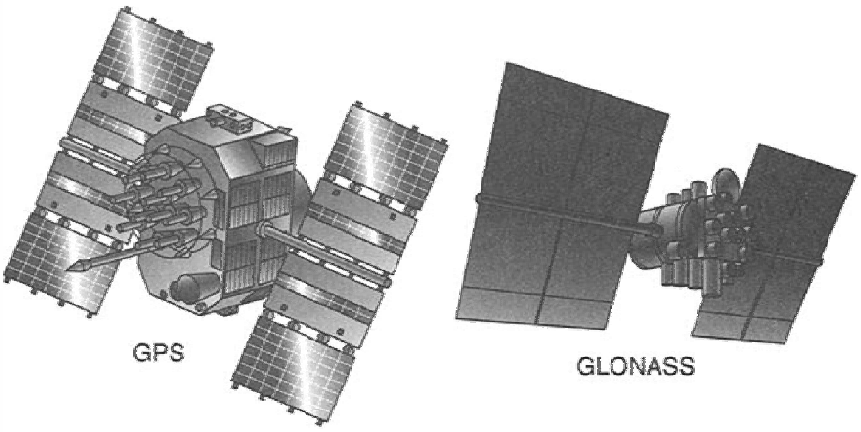
$$\text{flux}_{\text{N.\&S.face}} = Q_{sol} \sin(23.4^\circ)$$

$$\text{flux}_{\text{Side face}} = Q_{sol} \cos(\theta)$$



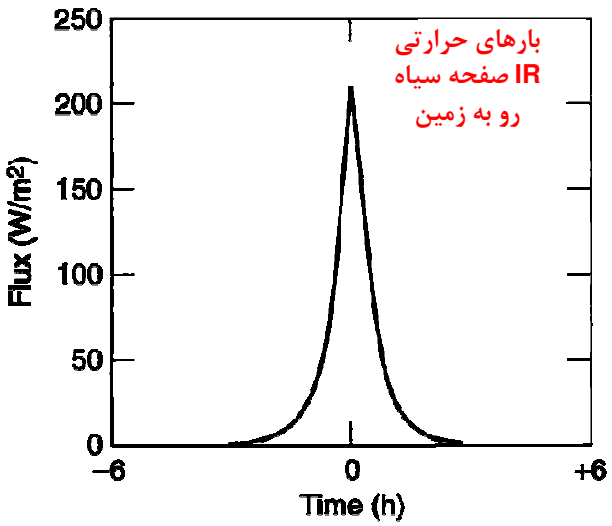
مدار دایروی دوازده ساعته

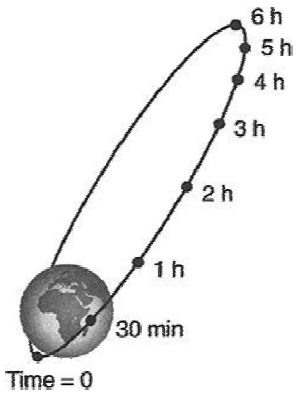
- محیط حرارتی مشابه با مدار GEO
- شار حرارتی IR و آلبدو ناچیز برای سیستم‌های غیر برودتی (Non- cryogenic)
- مدار مورد استفاده در سیستم‌های ناوبری مانند GPS، و GLONASS (حدود ۲۴ ماهواره با شیب‌های مداری متفاوت)
- تغییر زاویه تابش خورشید به سطوح ماهواره با توجه به تغییرات شیب مداری
- حداکثر زمان سایه برای مدارهای دایروی ۱۲ ساعته برابر با ۵۶ دقیقه



مدار مولنیا

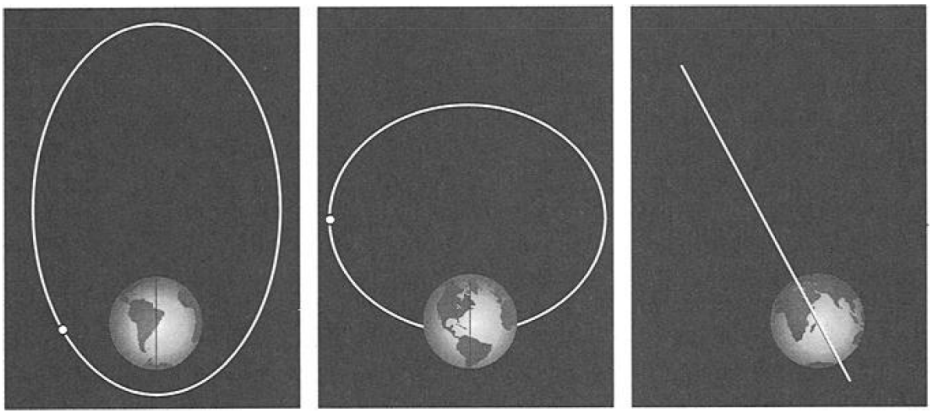
- مداری غیر معمول با درجه دوری از مرکز بسیار بالا
- نقطه حضیض مشابه با مدار LEO، ۵۵۰ کیلومتر و نقطه اوجی مشابه مدار GEO، حدود ۳۸۹۰۰ کیلومتر
- محیط حرارتی بسیار متغیر، در اوج بار حرارتی خورشیدی و در حضیض بار حرارتی کلیه منابع حرارتی
- زمان کم حضور در محیط حرارتی بخش حضیض با توجه به سرعت زیاد ماهوار در این بخش
- تغییرات شدید زمان سایه با تغییرات فصلی





مدار مولنیا

- در تابستان، بهار، و پاییز، سایه زمین به بخش جنوبی مدار منتقل می‌شود، در این ناحیه ماهواره در پایین‌ترین ارتفاع و بیشترین سرعت مداری قرار دارد (زمان سایه کم)
- در زمستان، سایه زمین به بخش عمده شمالی منتقل می‌شود، در این ناحیه ماهواره در بیشترین ارتفاع و کمترین سرعت قرار دارد (بیشترین زمان سایه)
- تغییر زمان سایه برای مدار **Molniya**، از صفر (برای بتاهای بالا) تا ۷۲ دقیقه برای سایه زمستانی



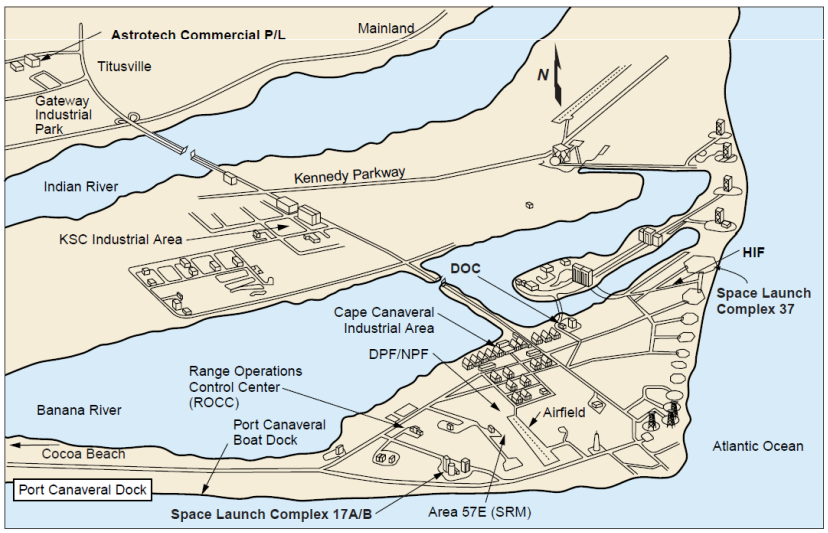
- No eclipse
- Winter
- High beta angles

- Short eclipse
- Summer
- High beta angles

- Maximum eclipse
- Winter
- Low beta angle

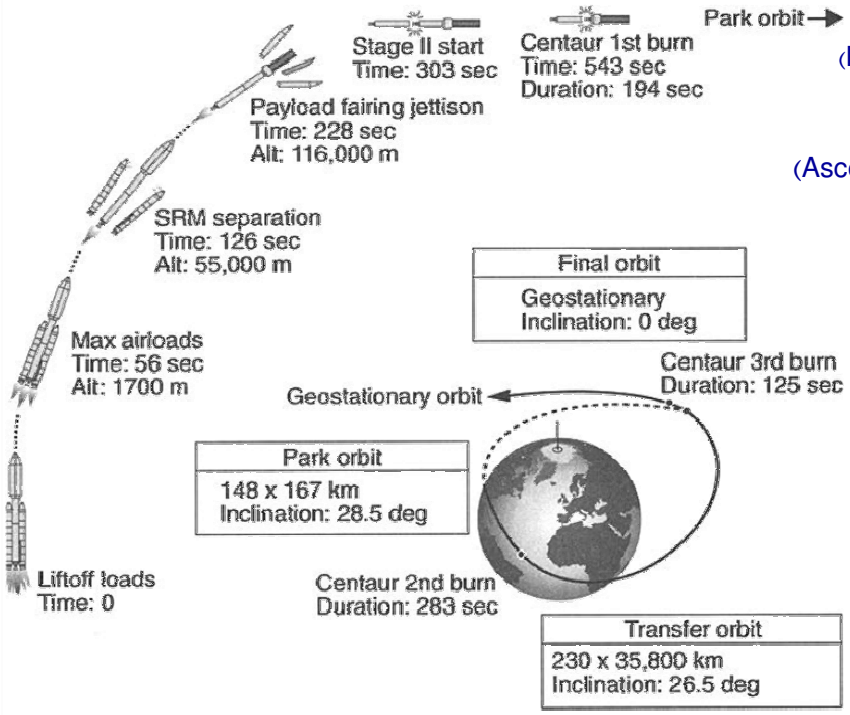
محیط پرتاب تا صعود

- کنترل دمای ماهواره در فازهای مختلف شامل:
  - انتقال (Transportation)
  - پیش از پرتاب (Prelaunch)
  - برخاست (Lift off)
  - صعود یا عروج (Ascent phase)
  - مدار نهایی (Final orbit)



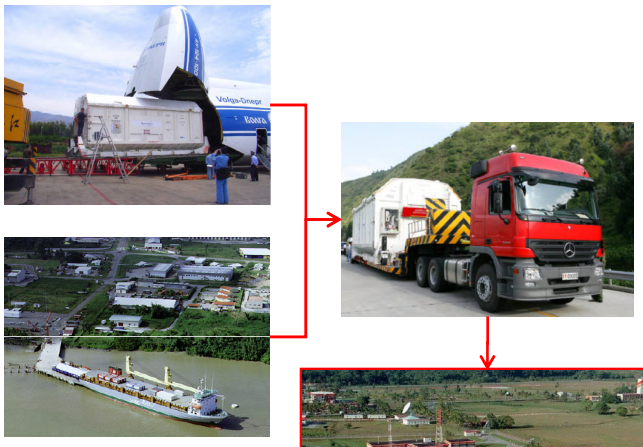
محیط پرتاب تا صعود

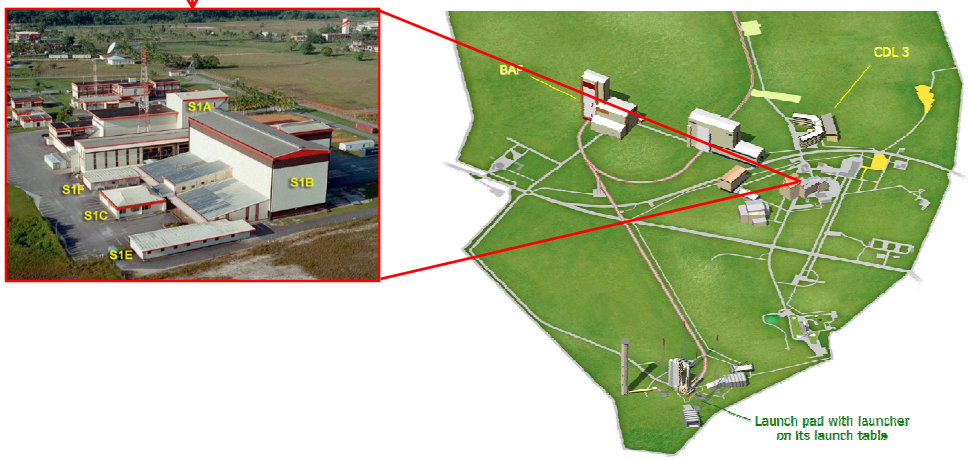
- کنترل دمای ماهواره در فازهای مختلف شامل:
  - انتقال (Transportation)
  - پیش از پرتاب (Prelaunch)
  - برخاست (Lift off)
  - صعود یا عروج (Ascent phase)
  - مدار نهایی (Final orbit)



محیط پرتاب تا صعود

فاز انتقال





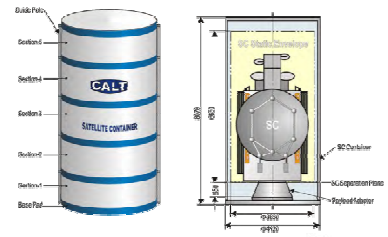
- انتقال (**Transportation**)
  - حمل و نقل (Shipping)
  - آماده‌سازی (Preparations)
  - تست در اتاق تمیز سایت پرتاب (Testing)

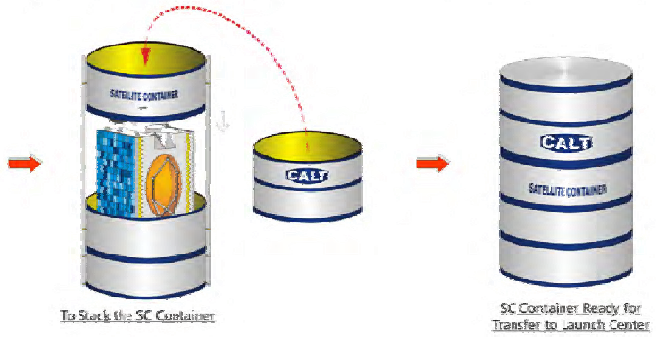
فاز انتقال

- **کنترل حرارت ماهواره با کنترل حرارت محیط (دما و رطوبت)**
  - **فاز حمل و نقل و آماده‌سازی**: ماهواره خاموش، حفظ دما و رطوبت محیط در شرایط غیرعملکردی قطعات
  - **فاز تست در اتاق تمیز سایت پرتاب**: حفظ دمای محیط تست در محدوده مجاز، استفاده از سیستم تهویه مطبوع برای دمیدن هوای سرد به داخل ماهواره

فاز پیش از پرتاب

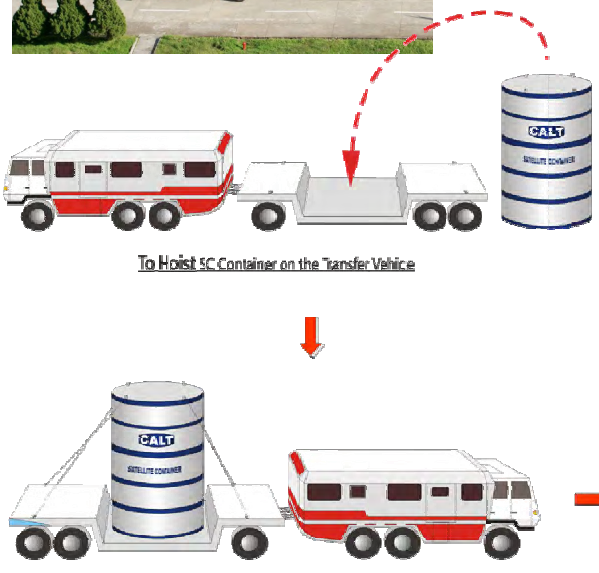
- **پیش از پرتاب (Prelaunch):**
  - روش اول: انتقال ماهواره از طریق محفظه‌های مخصوص با قابلیت کنترل دما و رطوبت به سکوی پرتاب (Launch pad)

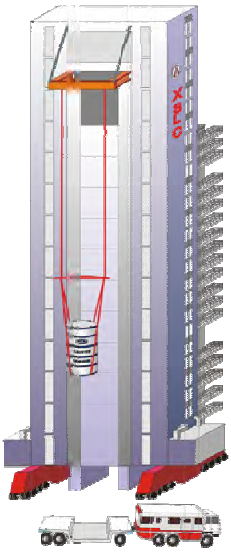


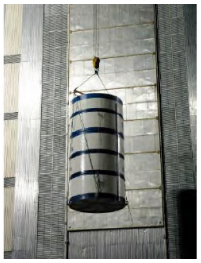


فاز پیش از پرتاب

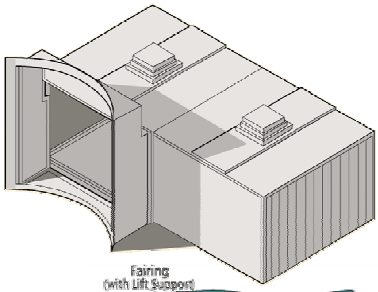
- **پیش از پرتاب (Prelaunch):**
  - روش اول: انتقال ماهواره از طریق محفظه‌های مخصوص با قابلیت کنترل دما و رطوبت به سکوی پرتاب (Launch pad)



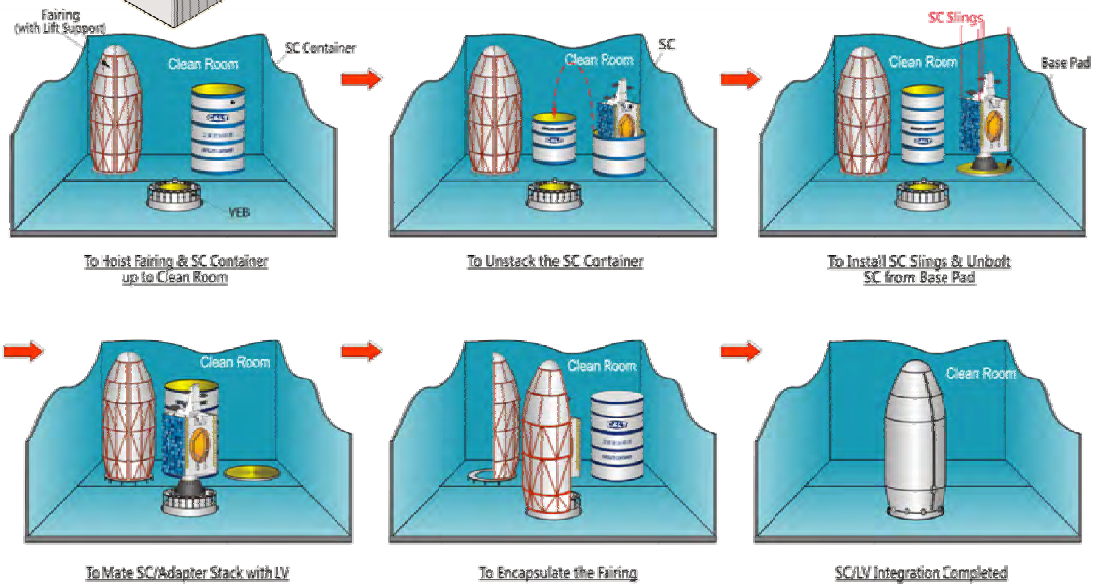




فاز پیش از پرتاب



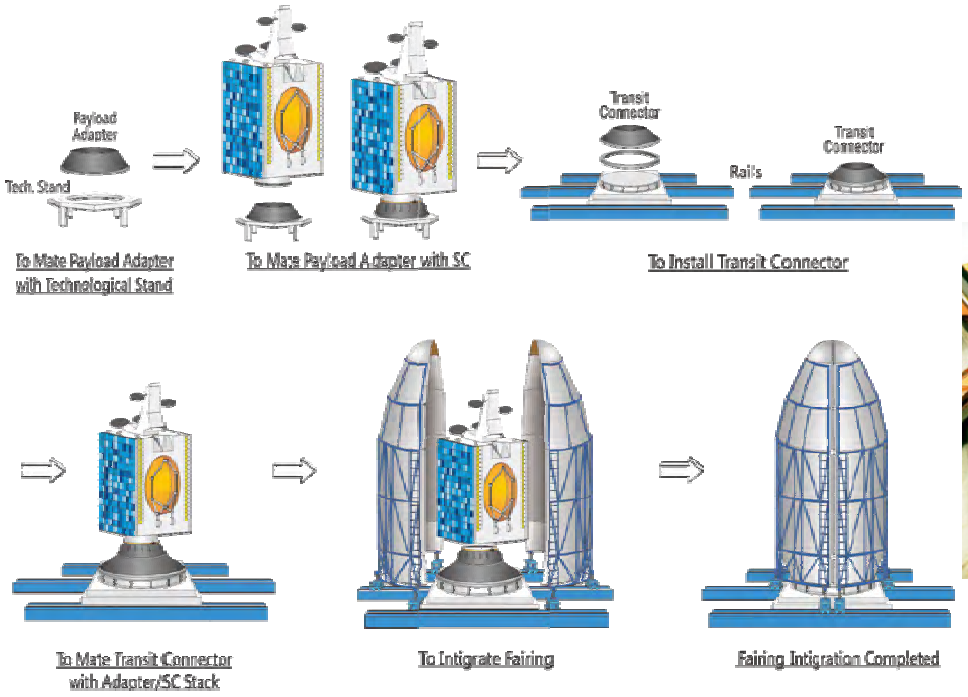
- **پیش از پرتاب (Prelaunch):**
  - نصب ماهواره در داخل فیرنگ پرتابگر در محل سکوی پرتاب (روش اول)
  - استفاده از اتاق تمیز قابل انتقال با قابلیت کنترل دما و رطوبت بر روی سکوی پرتاب

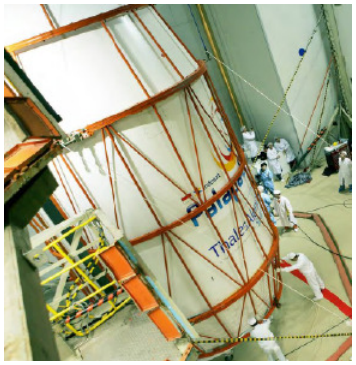


فاز پیش از پرتاب

❖ **پیش از پرتاب (Prelaunch):**

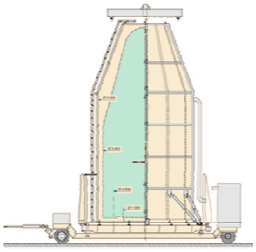
- روش دوم: نصب ماهواره در داخل فیرنگ در مرکز اسمبلی و تست





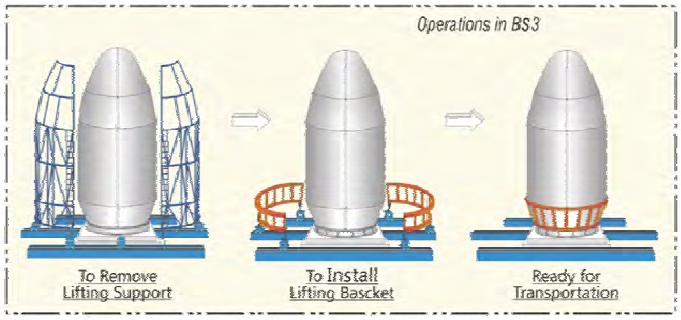
محیط پرتاب تا صعود

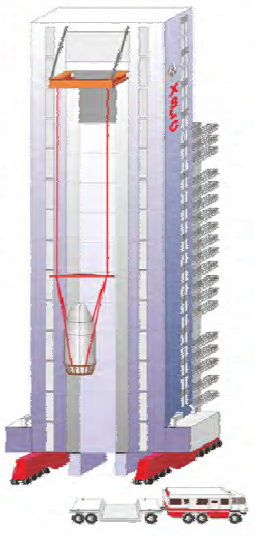
فاز پیش از پرتاب

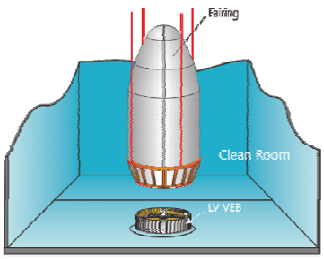


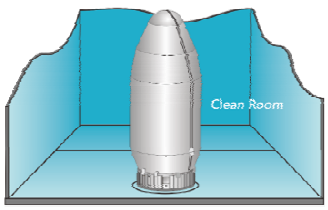
❖ **پیش از پرتاب (Prelaunch):**

- انتقال ماهواره در داخل فیرینگ به سکوی پرتاب و نصب بر روی پرتابگر (روش دوم)
- کنترل دما و رطوبت در داخل فیرینگ









فاز پیش از پرتاب

- **پیش از پرتاب (Prelaunch):**
  - روش سوم: نصب ماهواره در داخل فیرنگ متصل به بوستر پرتاب در مرکز اسمبلی و تست
  - انتقال بوستر و فیرینگ محموله به سکوی پرتاب

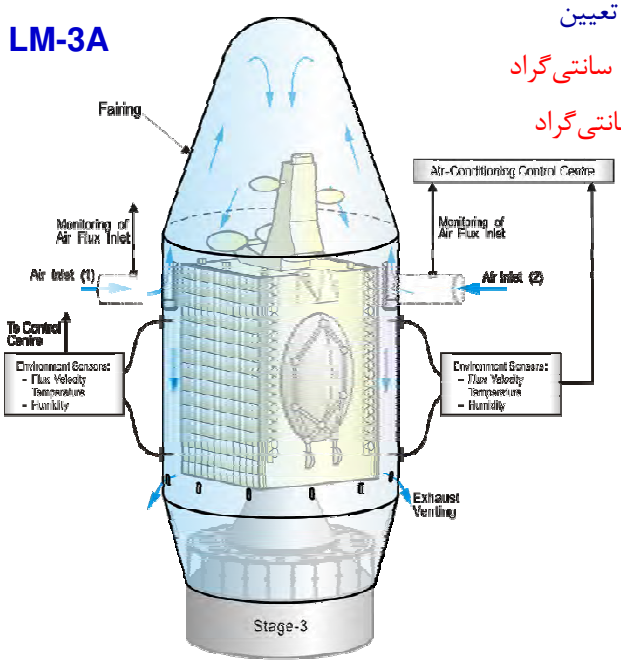
ARIANE 5

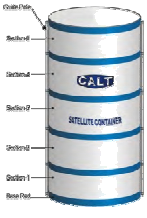
محیط پرتاب تا صعود

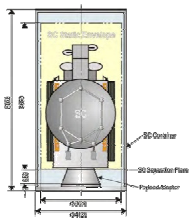
فاز پیش از پرتاب

- **پیش از پرتاب (Prelaunch):**
- **کنترل حرارت ماهواره با دمش هوا یا نیتروژن با دمای مناسب به داخل فیرینگ**
  - کنترل دمای هوای ورودی در یک بازه اسمی قابل تعیین
    - پرتابگر Titan-IV در حدود ۱۰ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد
    - پرتابگر Atlas-5 در حدود ۴ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد
    - پرتابگر Soyuz قابل تعریف توسط مشتری
    - شاتل در حدود ۷ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد
  - استفاده از لوپ‌های هوا یا سیال خنک‌کننده
    - افزایش پیچیدگی و هزینه
    - خاموش کردن برخی قطعات

LM-3A

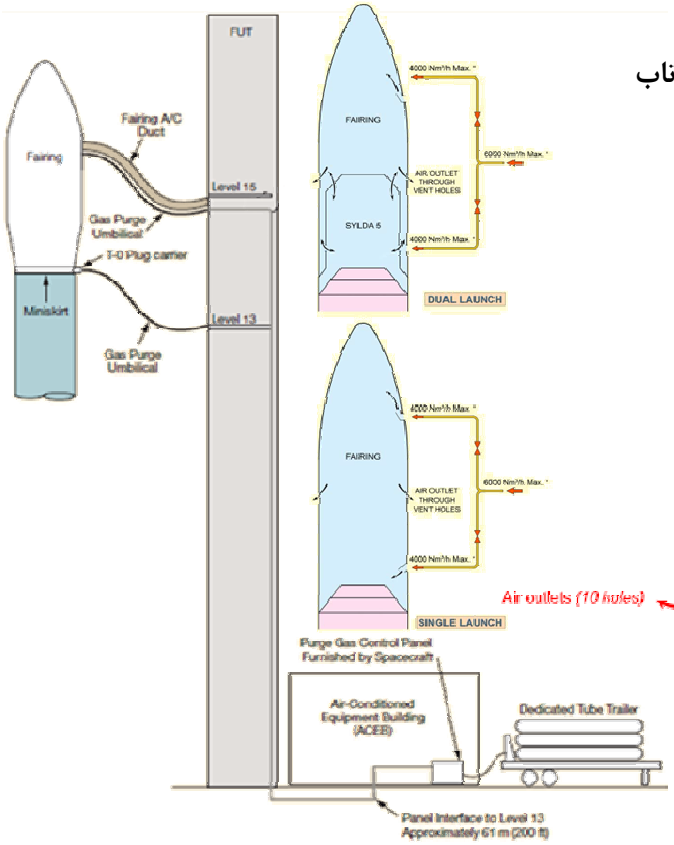


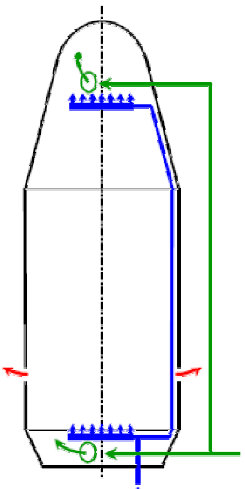


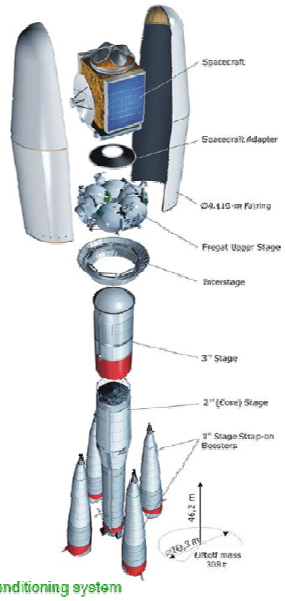


محط پرتاب تا صعود

❖ دمش هوا یا نیتروژن با دمای مناسب پیش از پرتاب







Soyuz

Low pressure air-conditioning system
4 air inlets :
- *2 hatches in the intermediate bay (TBD Nm³/h)*
- *2 hatches the conical part of the fairing (TBD Nm³/h)*

High pressure air-conditioning system
2 air inlet collectors :
- *1 in the intermediate bay (TBD Nm³/h)*
- *1 in the conical part of the fairing (TBD Nm³/h)*

فاز پیش از پرتاب

محط پرتاب تا صعود

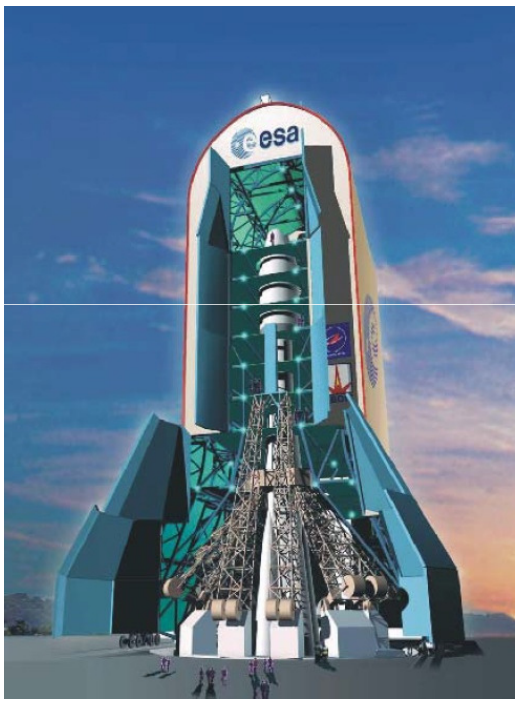
Table 9.6 - Air Conditioning under the Fairing

Phase	Air-conditioning system	Temperature	Relative Humidity	Flow, Nm³/h	Duration
Operations in UCIF	UCIF air-conditioning system	23 ± 1°C	50%±5%	"ICE" system if necessary	2 weeks max
Transfer from UCIF to Launch Pad	CARAVAN	16°C	< 60%	1500	~3 h
Upper composite hoisting and mating on the LV		< 27°C	< 60%	No venting, overpressure	1 h
Launch preparation	"High mode" venting	Any value specified between 11°C and 25°C* Accuracy: ± 2°C	≤ 20%	≤6000 (**)	4 days
Final countdown	"Low mode" venting	Any value specified between 11°C and 25°C* Accuracy: ± 2°C	≤ 20%	≤ 1600 (**)	H0-45 min up to lift-off
Aborted launch	"Low mode" venting	Any value specified between 11°C and 25°C* Accuracy: ± 2°C	≤ 20%	≤ 1600 (**)	A few minutes after abort up to High flow mode reconnection (H0+4h00m)

Note:

(*) - The air temperature before lift-off shall be agreed on a case-by-case basis in order to take into account the Fregat's constraints and the spacecraft's heat dissipation.

(**) – To be shared between the intermediate bay and fairing air inlets (see fig. 3.5)

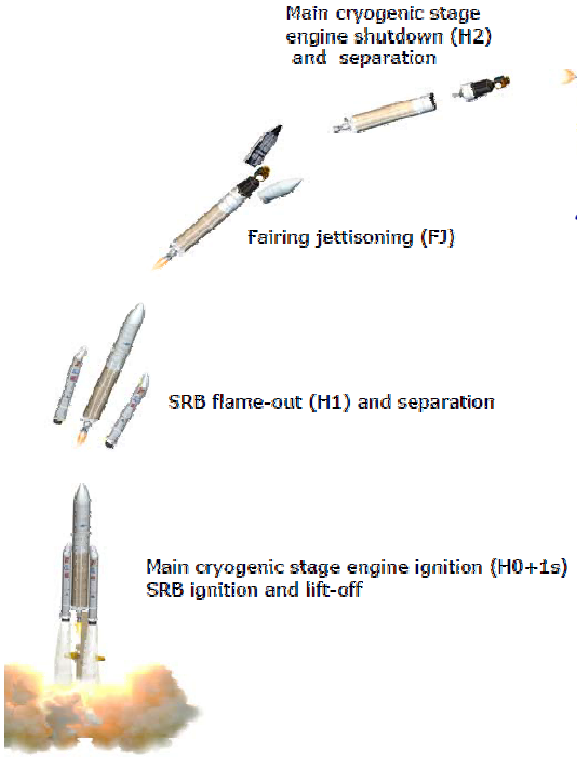


Soyuz

فاز برخاست

❖ **برخاست (Lift off):**

- فاز برخاست شامل، بلند شدن تا تزریق در مدار
  - قبل از جدایش فیرینگ
  - بعد از جدایش فیرینگ
- تخمین دماهای ماهواره در حالت‌های سرد و گرم با توجه به قیود و ملاحظاتی مانند:
  - حداکثر زمان سایه در مسیر پرتابگر
  - حداکثر گرمایش ملکولی
- اعمال اصلاحات در طراحی حرارتی در صورت نیاز
  - اعمال قیود شدید و حاد به پرتابگر
  - تغییر طراحی حرارتی ماهواره



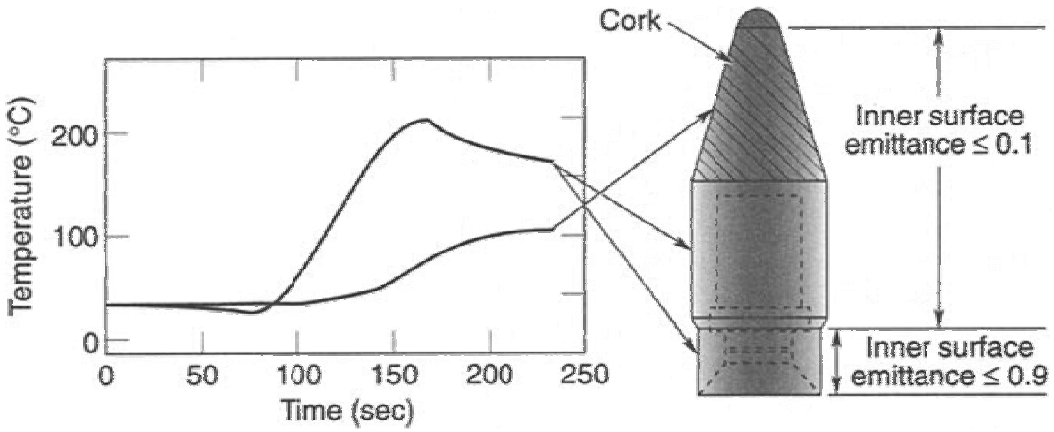
محط پرتاب تا صعود

فاز برخاست

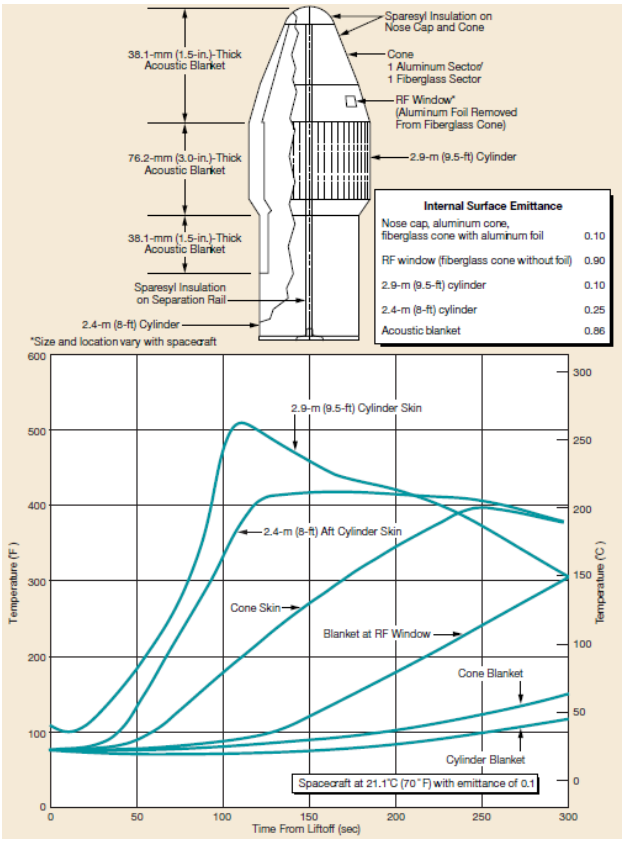
❖ **قبل از جدایش فیرینگ (تا ارتفاعی حدود ۱۵۰ کیلومتر و زمانی در حدود ۲ الی ۵ دقیقه)**

- افزایش دمای فیرینگ در طول پرتاب، شار حرارتی داخل فیرینگ کمتر از 1000 W/m^2 برای ARIAN و Vega، و کمتر از 800 W/m^2 برای Soyuz
- کاهش فشار داخل فیرینگ، کاهش اثر انتقال حرارت همرفتی

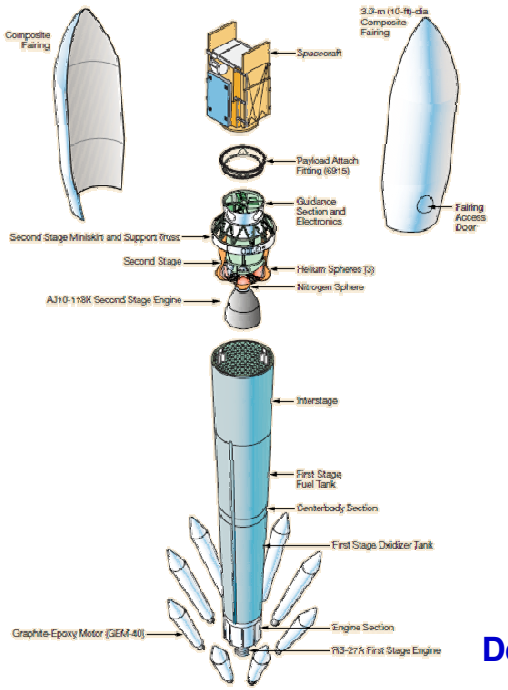
Atlas V 500



محیط پرتاب تا صعود

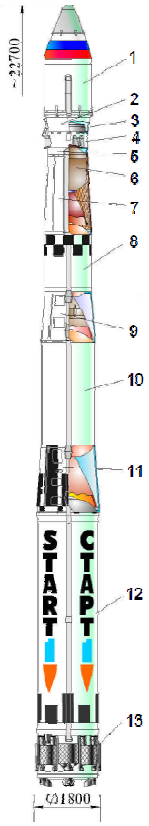


- ضریب صدور و حداکثر دما دیواره‌های داخلی

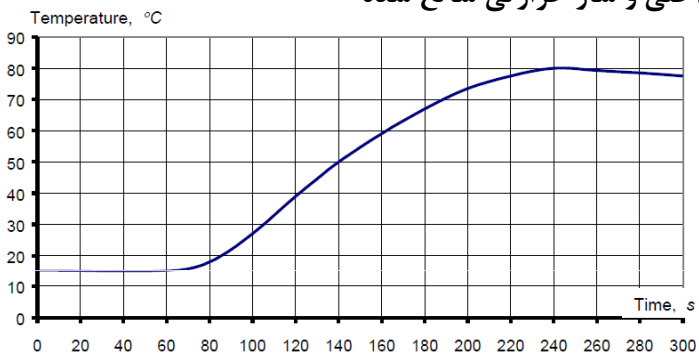


Delta II

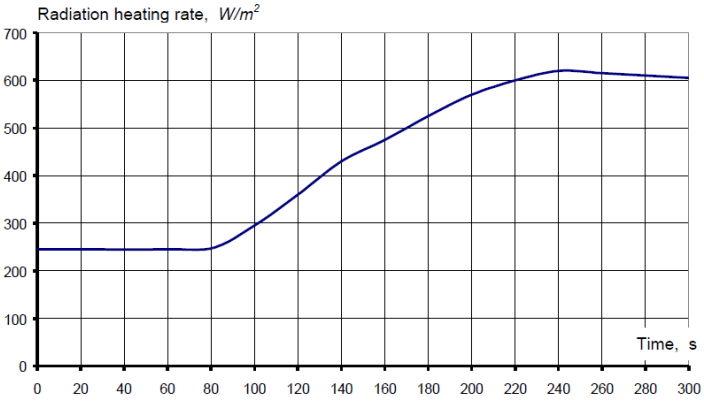
محیط پرتاب تا صعود



- حداکثر دما دیواره‌های داخلی و شار حرارتی ساتع شده



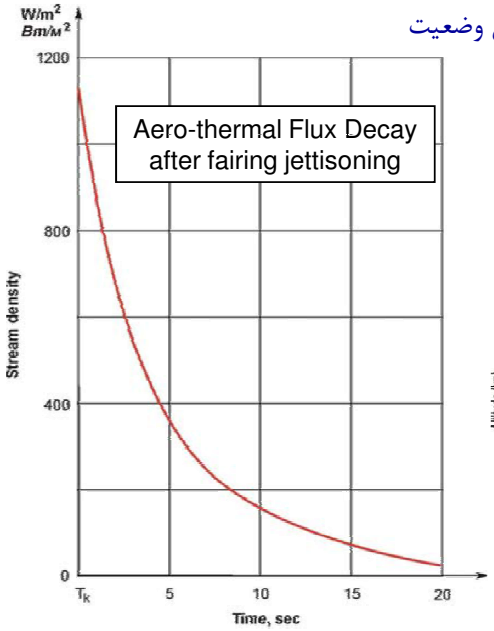
The fairing internal surface temperature versus the LV flight time



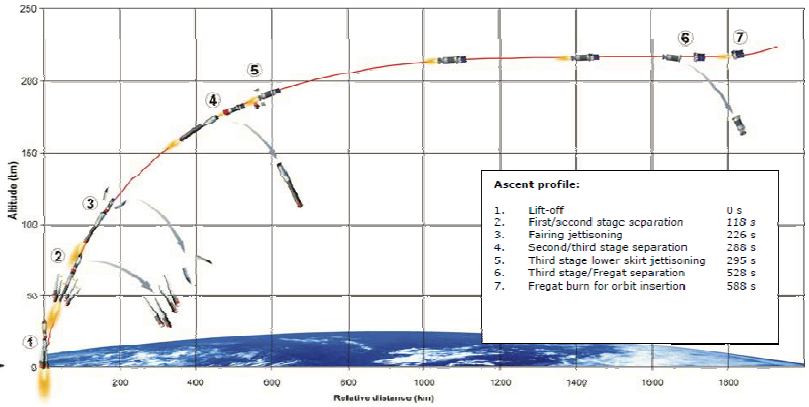
START –1

The radiation heating flow from the fairing internal surface versus the flight time.

- جدایش فیرینگ (Jettisoning) با کاهش گرمایش آیرودینامیک
  - گرمایش ملکولی (FMH)، برای مدت زمانی در حدود ۳۰ دقیقه
    - زمان جدایش فیرینگ، کاهش گرمایش ملکولی به مقداری کمتر از $1135\ W/m^2$
  - شار حرارتی ناشی از شعله موتور اصلی راکت و تراسترهای کنترل وضعیت
  - شار خورشیدی
  - شار زمین
  - شار آلبدو



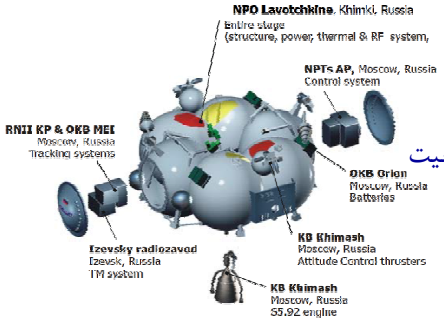
Soyuz

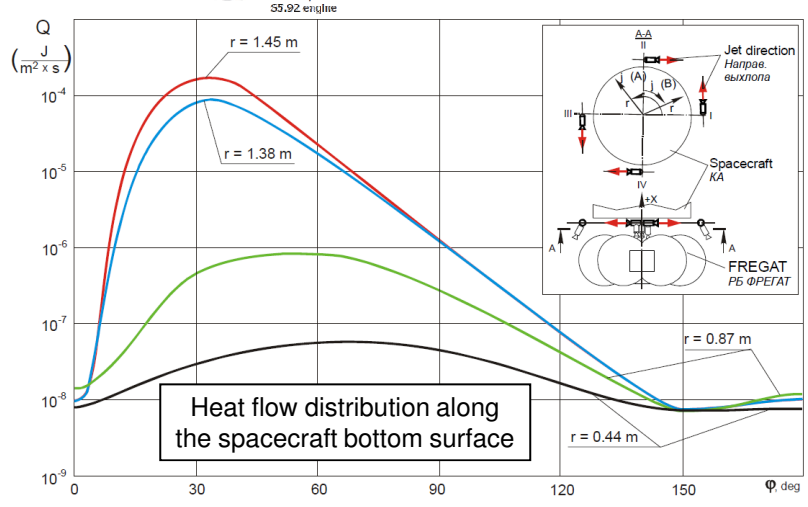


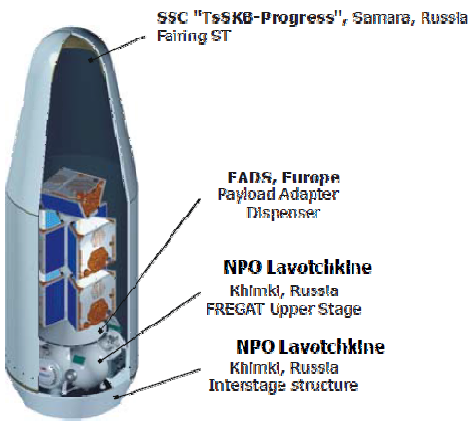
فاز برخاست

محیط پرتاب تا صعود

- جدایش فیرینگ (Jettisoning) با کاهش گرمایش آیرودینامیک
  - گرمایش ملکولی (FMH)، برای مدت زمانی در حدود ۳۰ دقیقه
  - شار حرارتی ناشی از شعله موتور اصلی راکت و تراسترهای کنترل وضعیت
  - شار خورشیدی
  - شار زمین
  - شار آلبدو



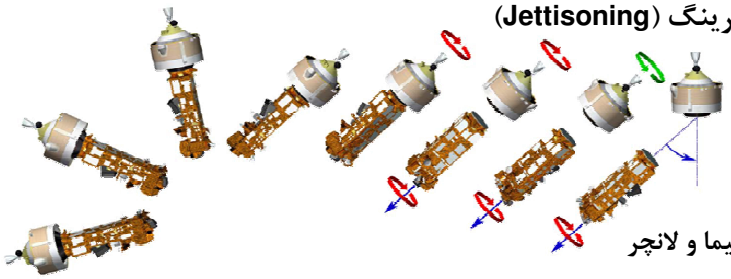


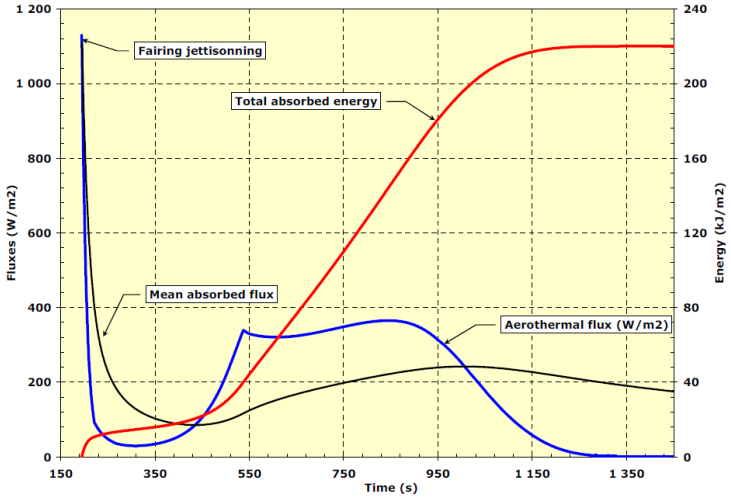


فاز برخاست

- گرمایش آیرودینامیک پس از جدایش فیرینگ (Jettisoning)
  - گرمایش ملکولی (FMH)
  - شار حرارتی ناشی از مراحل پرتابگر
  - شار خورشیدی
  - شار زمین
  - شار آلبدو

چرخش فضاپیما و لانچر



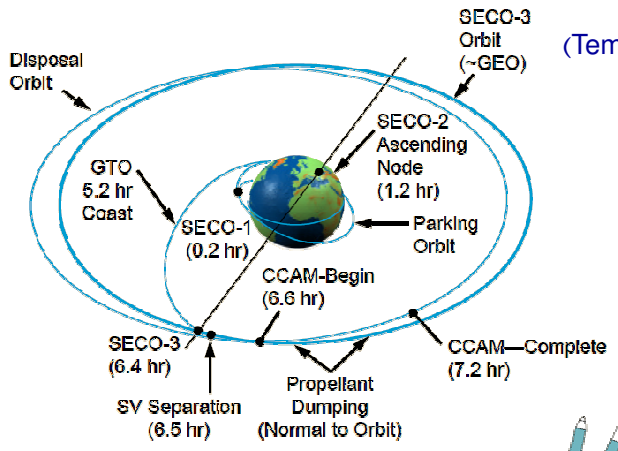


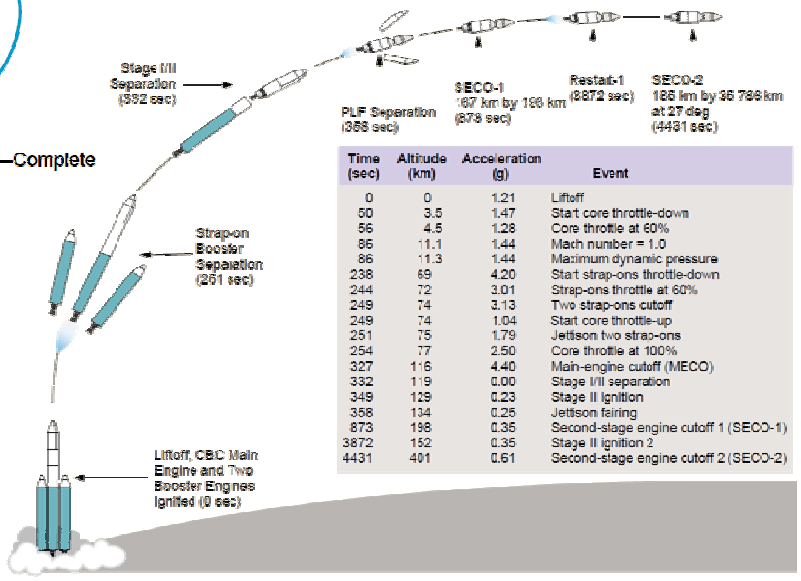
ARIANE 5

محیط پرتاب تا صعود

محیط پرتاب تا صعود

- صعود (Ascent) یا عروج حدود ۳۰ الی ۴۰ دقیقه
  - تزریق در مدار پارکینگ (Temporary parking orbit)
  - تزریق در مدار انتقال (Transfer orbit)
  - تزریق در مدار نهایی (Final mission orbit)





Time (sec)	Altitude (km)	Acceleration (g)	Event
0	0	1.21	Liftoff
50	3.5	1.47	Start core throttle-down
56	4.5	1.28	Core throttle at 60%
86	11.1	1.44	Mach number = 1.0
86	11.3	1.44	Maximum dynamic pressure
238	69	4.20	Start strap-ons throttle-down
244	72	3.01	Strap-ons throttle at 60%
249	74	3.13	Two strap-ons cutoff
249	74	1.04	Start core throttle-up
251	75	1.79	Jettison two strap-ons
254	77	2.50	Core throttle at 100%
327	116	4.40	Main-engine cutoff (MECO)
332	119	0.00	Stage I/II separation
349	129	0.23	Stage II ignition
358	134	0.25	Jettison fairing
873	198	0.35	Second-stage engine cutoff 1 (SECO-1)
3872	152	0.35	Stage II ignition 2
4431	401	0.61	Second-stage engine cutoff 2 (SECO-2)

- ✓ شار حرارتی خورشید، آلبدو، و IR
- ✓ افزایش زمان سایه تا ۳/۵ ساعت
- ✓ ماهواره در مود توان کاهش یافته
- ✓ تجهیزات جانبی مانند آرایه‌های خورشیدی در حالت بسته

محیط پرتاب تا صعود

❖ **مدار نهایی (Final orbit)**

- تثبیت وضعیت پایداری ماهواره (از چند ساعت تا چند هفته)
- باز شدن ملحقات مانند آرایه‌های خورشیدی و آنتن‌ها
- روشن شدن باس ماهواره و محموله الکترونیکی آن
- تحلیل و کنترل حرارت ماهواره در این فاز
  - تعیین و تنظیم زمان اتفاقات و سکانس‌های مختلف
  - استفاده از گرمکن‌های اضطراری
  - تعیین زمان دستیابی به یک وضعیت و موقعیت خاص
  - زمان روشن شدن محموله ماهواره