به نام خداوند جان و خرد

فصل دوم:
بارگذاری

استاد درس: سعید محمودخانی

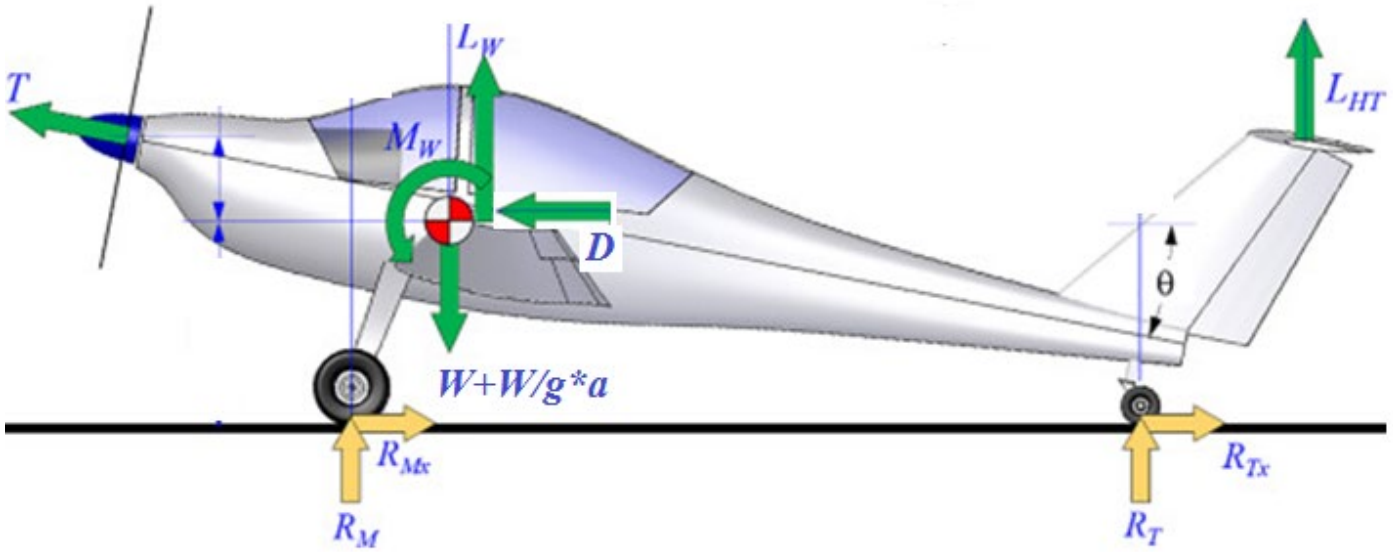
نیمسال اول ۱۴۰۲-۱۴۰۳

مقدمه

- انواع بارهای اعمالی به هواپیما
  - بارهای آیرودینامیکی، شامل:

    نیروی برا در بال (L_W)، ممان بال (M_W)، نیروی بازدارنده (D)، نیروی برا در دم افقی (L_{HT})

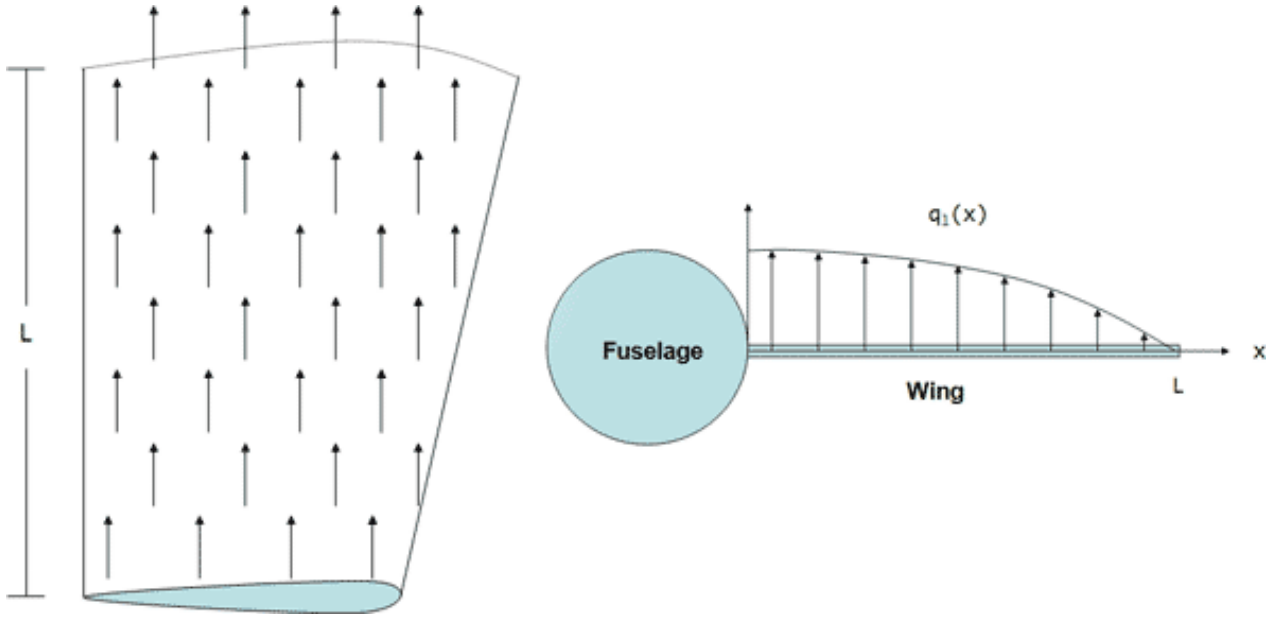
    نیروی تندباد (Gust)
- نیروی اینرسی=حاصلضرب شتاب در جرم هواپیما به اضافه وزن ($W + W/ga$)
- نیروی پیشران (T)
- نیروهای اعمالی از زمین در لحظه



مقدمه

❖ انواع بارهای اعمالی به هواپیما

توجه: بارهای آیرودینامیکی و اینرسی در اصل به شکل گسترده در طول بال و بدنه اعمال می شوند.



مقدمه

- از بین نیروهای ذکر شده، تعیین نیروهای آیرودینامیکی نیازمند طی مراحل زیر است:
  - تعیین بارهای آیرودینامیکی متمرکز با استفاده از منحنی پوش و ضرایب آیرودینامیکی بال در سرعت های مختلف
  - تعیین نیروی برای دم افقی با استفاده از معادلات دینامیک پرواز
  - تخمین توزیع بار آیرودینامیکی بر روی بال

- تعیین توزیع نیروی اینرسی که در صورت معلوم بودن توزیع جرم به راحتی با ضرب در شتاب هواپیما قابل محاسبه است.

مقدمه

- با معلوم شدن توزیع بارهای آیرودینامیکی و اینرسی، توزیع نیروها و گشتاورهای داخلی با استفاده روش ارایه شده در درس استاتیک قابل محاسبه خواهد بود.

- هریک از نیروهای نشان داده شده ممکن است به شکل دینامیکی و یا استاتیکی اعمال شوند.

منظور از بار استاتیکی باری است که نرخ تغییرات زمانی آن ناچیز بوده و موجب ارتعاش سازه نشود. در مقایب بار دینامیکی نرخ تغییرات زمانی قابل توجهی داشته و ممکن است موجب ایجاد ارتعاش در سازه شوند. از میان نیروهای ذکر شده، نیروی تندباد، نیروی پیشران، نیروی برخورد با زمین بیتشر از از باقی موارد از خاصیت دینامیکی برخوردار هستند.

- در بارگذاریهای این درس، تنها بارهای استاتیکی مورد توجه قرار خواهند گرفت.

سرفصل مطالب

۲-۱- تعیین ضرایب متمرکز آیرودینامیک بر روی بال (نیروی برا، بازدارنده، گشتاور)

۲-۲- نمودار پوش پرواز (V-n diagram)

۲-۳- تعیین بارهای متمرکز آیرودینامیکی روی بال و دم

۲-۴- تعیین توزیع بارهای آیرودینامیکی روی پهنه (span) بال

۲-۵- تعیین توزیع نیروی اینرسی

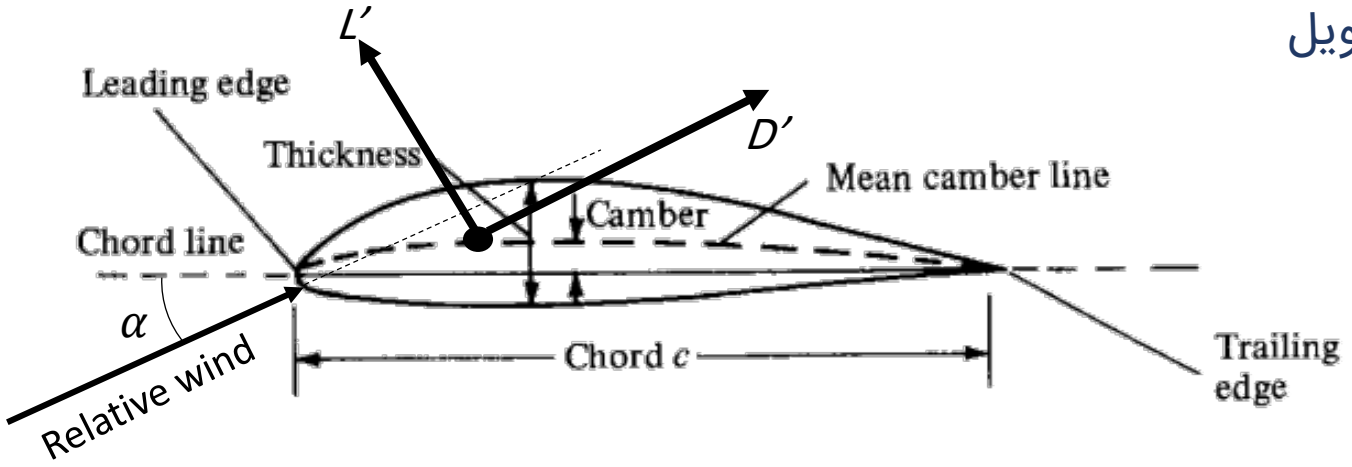
۲-۶- مجموع نیروهای خارجی

۲-۷- تعیین نیروها و گشتاورهای داخلی

۲-۱-تعیین ضرایب متمرکز آیرودینامیکی

۲-۱-۱- نکات مهم در رابطه با ایرفویل دوبعدی

- منظور از ایرفول دوبعدی ایروفویلی است که در آن جریان سیال در جهت عمود بر صفحه ایرفویل وجود نداشته و در نتیجه جریان دوبعدی است. در عمل، چنین ایرفویلی برای بال با طول بینهایت حاصل می شود.
- پارامترهای مشخصه ایرفویل



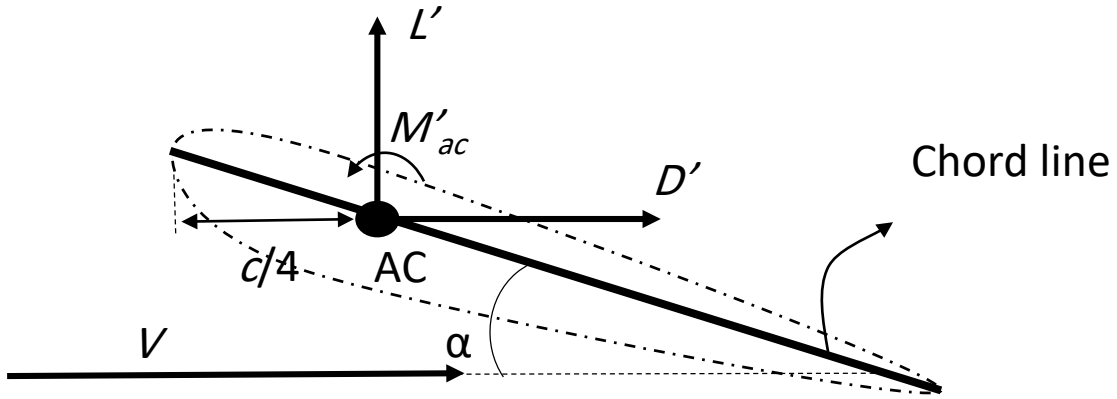
- زاویه حمله (α) زاویه بین راستای سرعت جریان نسبت به ایرفویل و راستای خط وتر ایرفویل است.
- نیروی برا عمود بر راستای جریان و نیروی درگ همراستا با جریان است.
- در صورتی که نیروی برا بر مرکز فشار اعمال شود ممان آیرودینامیکی حول مرکز فشار صفر خواهد بود.
- نیروها و ممان در ایرفویل با پرایم نشان داده می شوند که به معنای نیرو یا ممان در واحد طول است.

۲-۱-تعیین ضرایب متمرکز آیرودینامیکی

۲-۱-۱- نکات مهم در رابطه با ایرفویل دوبعدی

- مرکز ایرودینامیکی (AC) نقطه ای از ایرفویل است که ممان آیرودینامیکی حول آن، وابسته به زاویه حمله نیست. این نقطه معمولا در حدود ¼ اندازه وتر از لبه حمله فاصله دارد.

- در صورت اعمال نیروی برا به مرکز آیرودینامیکی بارگذاری روی ایرفویل دوبعدی به شکل زیر خواهد بود:



L': نیروی برا در واحد طول

M_{ac}': ممان در واحد طول

D': نیروی درگ در واحد طول

۲-۱-تعیین ضرایب متمرکز آیرودینامیکی

۲-۱-۲- ضرایب آیرودینامیکی برای ایرفویل دوبعدی

- ضرایب آیرودینامیکی برای ایرفویل دو بعدی در این درس به شکل زیر نشان داده می شوند:

ضریب برای دوبعدی (2D Lift coefficient): c_l

ضریب درگ (نیروی بازدارنده) (2D drag coefficient): c_d

ضریب ممان دوبعدی حول مرکز آیرودینامیکی (2D moment coefficient): $c_{m,ac}$

- رابطه ضرایب با نیروی برا (لیفت) و گشتاور:

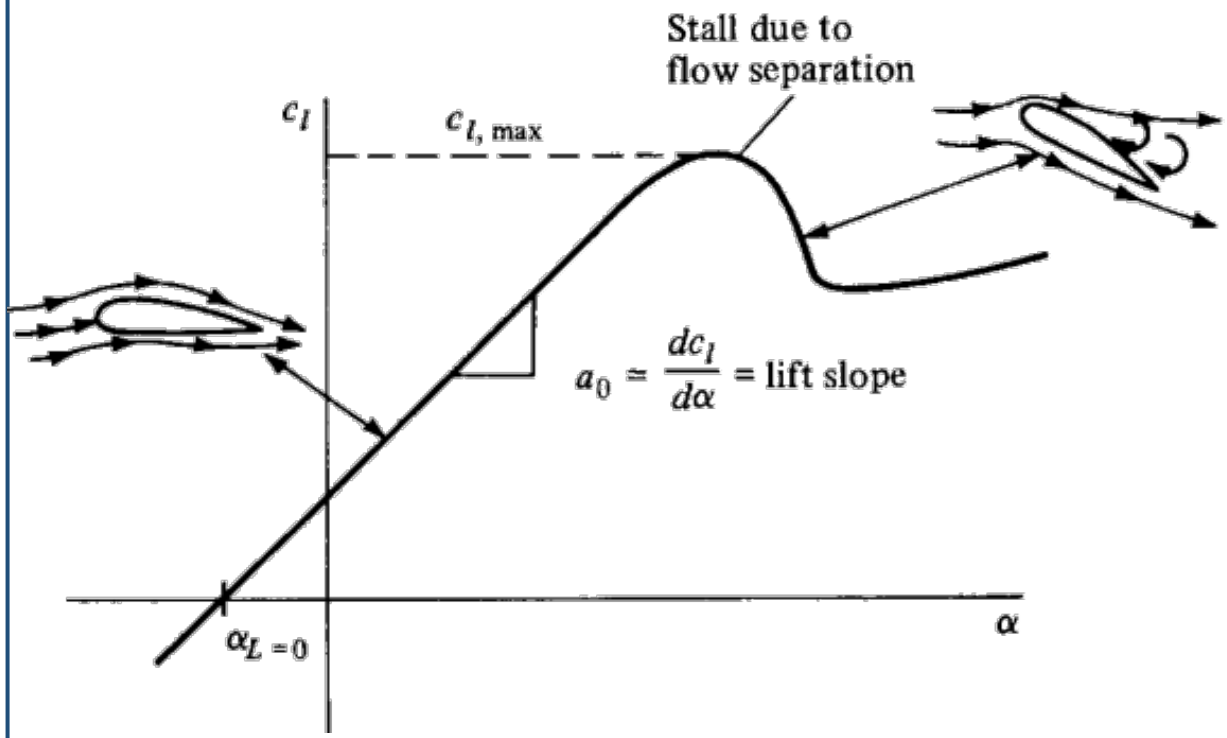
$$c_l = \frac{L'}{qc}, \qquad c_d = \frac{D'}{qc}, \qquad c_{m,ac} = \frac{M'_{ac}}{qc^2}$$

$q = \frac{\rho V^2}{2}$: فشار دینامیکی، c: اندازه وتر (Chord)،

۲-۱-تعیین ضرایب متمرکز آیرودینامیکی

۲-۱-۲- ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل دوبعدی

- نمودار تغییرات ضریب برا با زاویه حمله
  - تغییرات ضریب برا با زاویه حمله برای زوایای کوچک خطی است. اما با افزایش زوایه حمله تغییرات غیرخطی شده و در نقطه استال به مقدار بیشینه می رسد.
  - پس از نقطه استال به علت جدایش در جریان نیروی لیفت و درنتیجه ضریب لیفت کاهش می یابد. زاویه حمله همواره باید کمتر از زاویه استال باشد. در صورت استال امکان سقوط هواپیما هست.



۲-۱-تعیین ضرایب متمرکز آیرودینامیکی

۲-۱-۲- ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل دوبعدی

- پارامترهای اثر گذار روی ضریب لیفت، c_l
- زاویه حمله (α)، عدد ماخ (M)، عدد رینولدز

- وابستگی به زاویه حمله در صورت کوچک بودن زاویه (کوچک تر ۶ درجه) به شکل زیر است:

$$c_l = c_{l,\alpha}(\alpha - \alpha_{L0})$$

$c_{l,\alpha} \equiv a_0$, α_{L0}: زاویه لیفت صفر

α_{L0} برای ایرفویل مقارن برابر با صفر است.

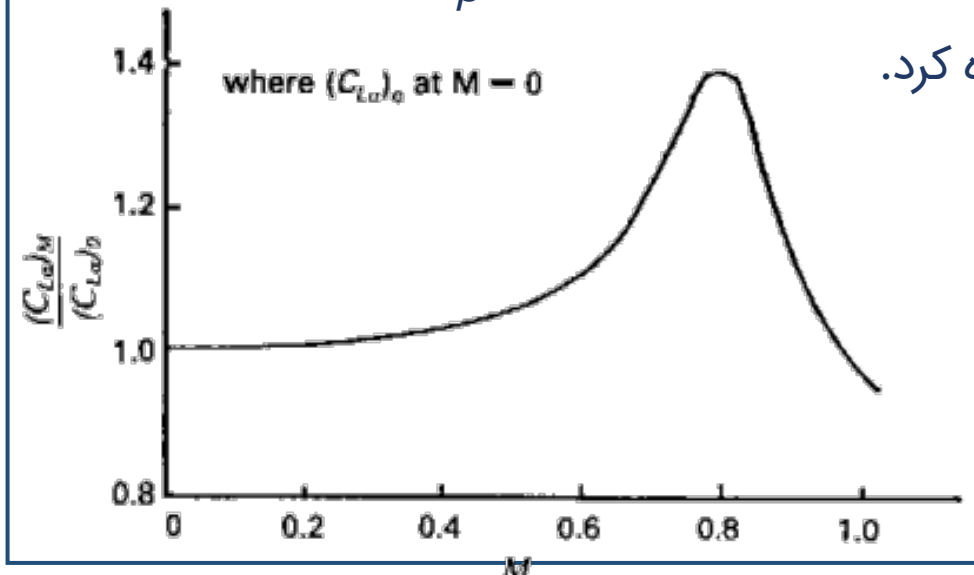
$c_{l,\alpha}$ برای جریان غیرویسکوز برابر با 2π است. دقت کنید که این ضریب تغییر به ازای رادیان (per radian) است.

۲-۱-تعیین ضرایب متمرکز آیرودینامیکی

۲-۱-۲- ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل دوبعدی

- پارامترهای اثر گذار روی ضریب لیفت، c_l
- برای سرعت جریان با ماخ زیر 0.3 جریان تراکم ناپذیر بوده و وابسته به عدد ماخ نیست. اما برای سرعتهای بالای ماخ 3. تا 8. می توان از ضریب پرانتل-گلارت ($\beta = \sqrt{1-M^2}$) برای شیب نمودار ضریب لیفت استفاده کرد. در نتیجه:

$$a_{0,comp} = \frac{1}{\beta} a_0$$



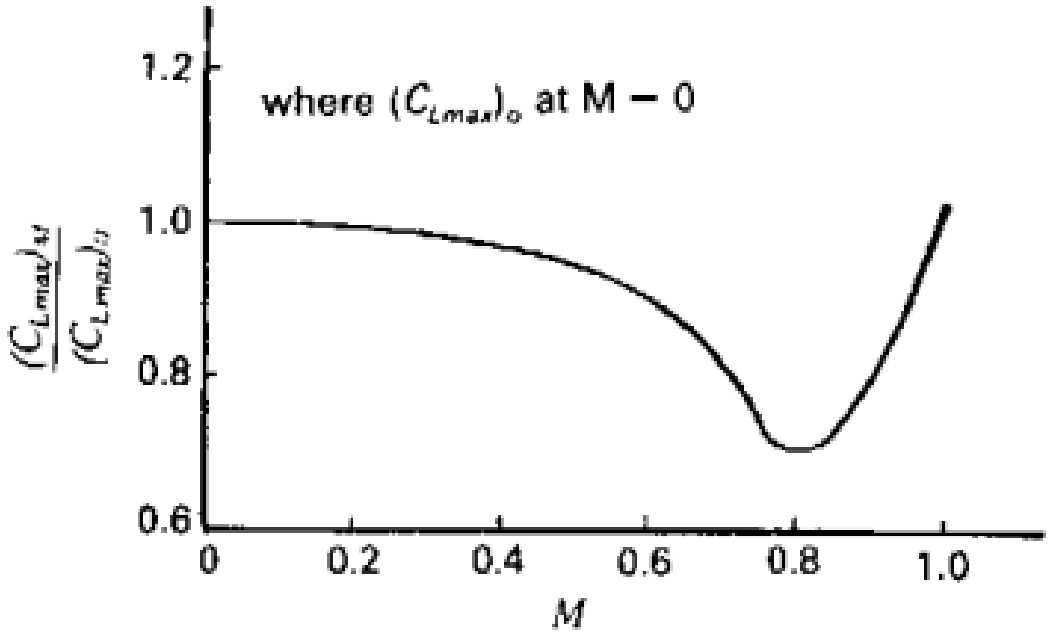
- به جای استفاده از رابطه بالا می توان از نمودار زیر استفاده کرد. عددی که از نمودار خوانده می شود را باید در ضریب مربوط به حالت تراکم ناپذیر (در حالت M=0) ضرب کرد.

From Niu, Page 76

۲-۱-تعیین ضرایب متمرکز آیرودینامیکی

۲-۱-۲- ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل دوبعدی

- پارامترهای اثر گذار روی ضریب لیفت، c_l
- از رابطه یا نمودار اسلاید قبل نمی توان برای تعیین $c_{l,max,comp}$ استفاده کرد. در این حالت استفاده از نمودار زیر توصیه



From Niu, Page 76

۲-۱-تعیین ضرایب متمرکز آیرودینامیکی

۲-۱-۲- ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل دوبعدی

- پارامترهای اثر گذار روی ضریب لیفت، c_l
- عدد رینولدز روی $c_{l,max}$ به مقداری اثرگذار است. اما اثر آن بر روی $c_{l,\alpha}$ ناچیز است.

۲-۱-تعیین ضرایب متمرکز آیرودینامیکی

۲-۱-۲- ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل دوبعدی

- پارمترهای اثرگذار بر سایر ضرایب آیرودینامیکی
  - ضریب ممان حول AC ($c_{m,ac}$) وابسته به زاویه حمله نیست.
  - ضریب درگ برای جریان غیرویسکوز (رینولدز بالا) برابر با صفر است.
- می توان از ضریب پرانتل-گلارت و یا نمودارهای داده شده در اسلایدهای قبل برای اعمال اثر تراکم پذیری روی ضرایب درگ و ممان استفاده کرد.

۲-۱-تعیین ضرایب متمرکز آیرودینامیکی

۲-۱-۲- ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل دوبعدی

- خلاصه داده های مورد نیاز از ایرفویل دوبعدی برای طراحی سازه

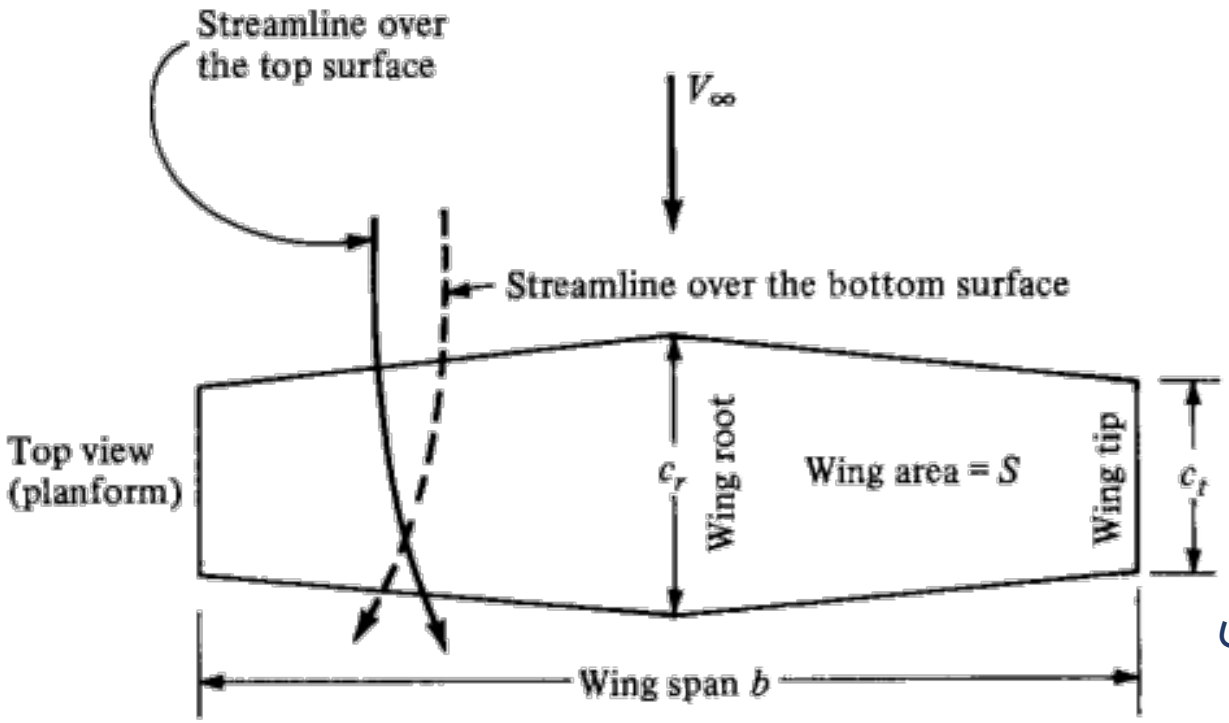
ضریب لیفت بیشینه	$c_{l,max}$
شیب نمودار لیفت	$c_{l,\alpha}$
ضریب درگ	c_d
ضریب ممان حول مرکز آیرودینامیکی	$c_{m,ac}$
فاصله مرکز آیرودینامیکی از لبه حمله	x_{ac}

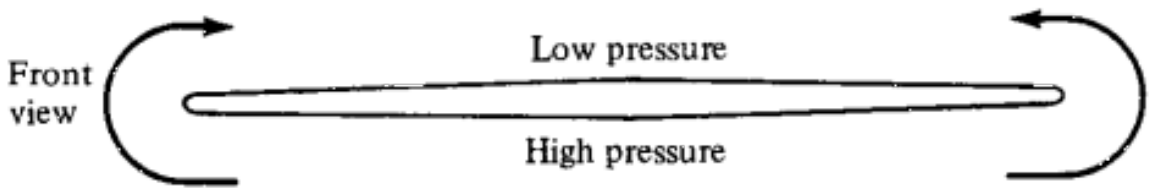
هریک از موارد بالا نیز با توجه به نوع و هندسه ایرفویل، عدد ماخ و عدد رینلودز مشخص می شوند. این ضرایب به طرق مختلف مثل مراجع موجود و یا نرم افزارهای موجود به راحتی قابل تعیین هستند.

۲-۱-تعیین ضرایب متمرکز آیرودینامیکی

۲-۱-۳- تعریف ایرفویل سه بعدی

- منظور از ایرفویل سه بعدی، بال با طول محدود است.
- در این این حالت بعلت فشار بالاتر در زیر بال نسبت به روی آن، سیال در انتهای بال از سمت زیرین به سمت بالا در راستای طول (اسپن) بال جریان می یابد. در نتیجه جریان سیال سه بعدی است.
- این پدیده موجب ایجاد **نیروی درگ القایی** و **کاهش ضریب لیفت** در مقایسه با ایرفویل دوبعدی می شود.

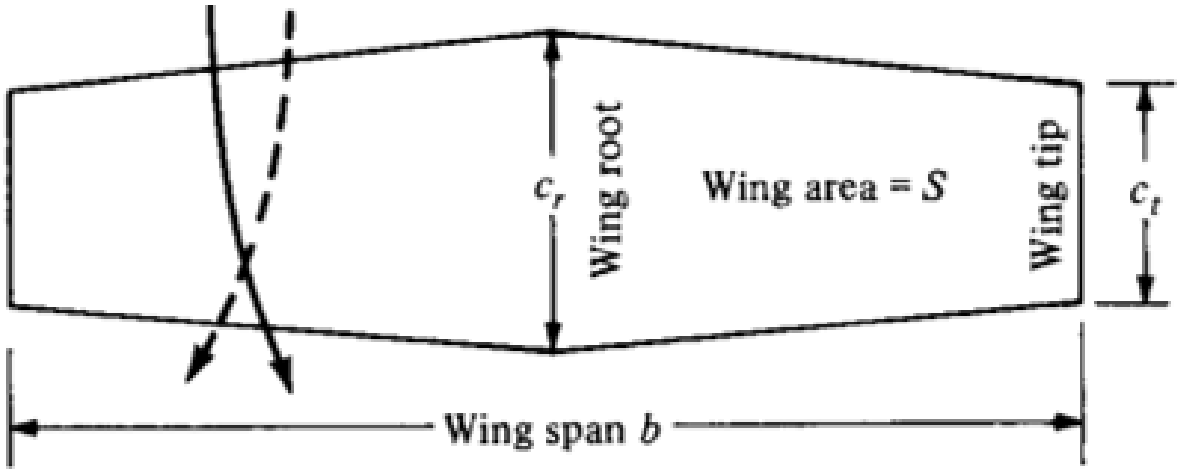




۲-۱-تعیین ضرایب متمرکز آیرودینامیکی

۲-۱-۳- تعریف ایرفویل سه بعدی

- پارامترهای مشخصه بال



اندازه وتر در ریشه بال	c_r
اندازه وتر در نوک بال	c_t
مساحت بال	S
طول (span) بال	b
نسبت مخروطی (taper ratio)	$\lambda = \frac{c_t}{c_r}$
نسبت منظری (Aspect ratio)	$AR = \frac{b^2}{S}$

۲-۱-تعیین ضرایب متمرکز آیرودینامیکی

۲-۱-۴- ضرایب ایرفویل سه بعدی (بال) در مقایسه با ایرفویل دوبعدی

ایرفویل دوبعدی	بال
$c_l = \frac{L'}{qc}$	$C_L = \frac{L}{qS}$
$c_d = \frac{D'}{qc}$	$C_D = \frac{D}{qS}$
$c_{m,ac} = \frac{M'_{ac}}{qc^2}$	$C_{M,ac} = \frac{M_{ac}}{qS\bar{c}}$
$c_{l,max}$	$C_{L,max}$
$c_{l,\alpha}$ یا a_0	$C_{L,\alpha}$ یا a

$\bar{c}$: میانگین هندسی وتر که برابراست با:

$$\bar{c} = \frac{S}{b}$$