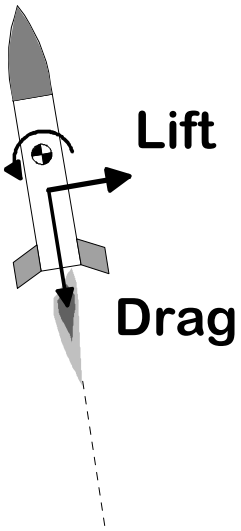
بسم الله الرحمن الرحيم

بحث مقدم من مهندس محيي

مكتب تولا لتصميم الاسلحة

الديناميكا الهوائية Aerodynamic

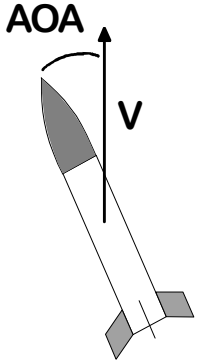
إن القوى الأساسية التي تؤثر في طيران صاروخ ما هي مقاومة الهواء و القوة الرافعة (القوة التي تحمل الطائرة في الهواء) ، أما مقاومة الهواء فهي تؤثر سلبا في تسارع و سرعة الصاروخ ، أما القوة الرافعة الهوائية Lift فهي تؤثر في اتجاه الصاروخ .



مقاومة الهواء Drag force هي إحدى مكونات القوى الديناميكا الهوائية و التي تؤثر مباشرة في سرعة الصاروخ . فهي تعمل فعل الكابح في حركة الصاروخ وتقليل مداه ، أما القوة الدافعة فهي كذلك إحدى مكونات القوى الديناميكا الهوائية و التي

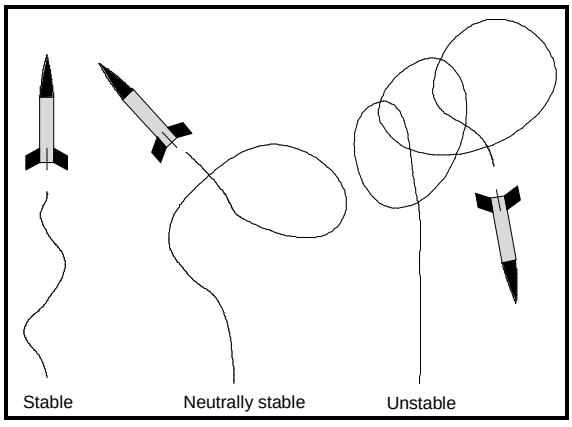
تؤثر بشكل متعامد على سرعة الصاروخ فتعمل على إمالة الصاروخ حول محوره العرضي (حول مركز ثقله)

زاوية الهبوب (الهجوم) AOA Angle of attack



هي الزاوية المتشكلة مابين اتجاه تقدم الصاروخ و المحور الطولي له.

الثباتية Stability : الثباتية هي اسم يطلق على سلوك الصاروخ أثناء الطيران في عدة زوايا هبوب . عندما يطير الصاروخ على زاوية هبوب ما فإنه يعدل ويرجع إلى مساره ذاتيا فنسميه صاروخا مستقرا . أما الصاروخ غير المستقر فإن زاوية الهبوب تزيد في حالة تأثره خارجيا أي زيادة التفلت بمعني أن مسار طيرانه لا يمكن توقعه . الصاروخ المستقر نوعا ما هو الصاروخ الذي عند تأثره خارجيا فإنه يضيع زاوية الهبوب لكن لا ينجر إلى التفلت أكثر ثم يطير مستقرا في حالة توقف المؤثر الخارجي .



بعض القيم المهمة في

الديناميكاالهوائية :

رقم الماغ Mach number :يجب أن نتعامل مع الديناميكا الهوائية للصواريخ على أساس ديناميكا السوائل Fluid dynamic (أي أن الهواء سائل غروي غليظ) . سرعة الماغ تعني سرعة الصوت في السائل و تتأثر هذه السرعة بالتغير في درجة الحرارة . بالنسبة للهواء الجاف النظيف يمكن الزعم أن سرعة الصوت في ذلك الوضع تساوي $c = 20.055\sqrt{T}$

حيث أن T بالكلفين . حيث أن c هي سرعة الصوت بالمتر/ثا و M=v/c و v هي سرعة الشئ في ذلك المكان. فنقول مثلا أن الطائرة تطير بسرعة ماغ ٣ لأن سرعتها تساوي ثلاث مرات سرعة الصوت في تلك الظروف.

رقم Reynold`s : كذلك هو مقياس آخر للسرعة . و يستعمل بشكل خاص لتحديد ما إذا كان الدفق انسيابيا على سطح الصاروخ أو دواميا (مضطربا) turbulent و بالتالي يسمح لنا بمعرفة مدى احتكاك تيار الهواء مع سطح الصاروخ . فمن أجل صاروخ بطول L و يطير بسرعة v في هواء كثافته ρ . قيمة اللزوجة الديناميكية للهواء μ منه عدد الرينولد

$$\mathrm{Re} = \frac{vL\rho}{\mu}$$

هذه بعض القيم

$\mu = 1.8*10^{-5}$ kg/(ms)
$\rho = 1.2$ kg/m^3

نتحصل على أرقام مابين
$10^5 - 10^8$

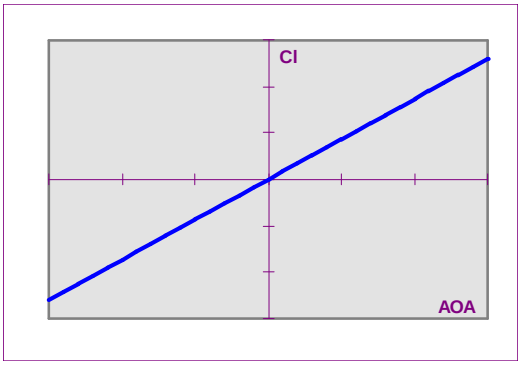
معامل قوة الرفع Lift و مقاومة الهواء Drag

من أجل صاروخ يطير بسرعة v في هواء بكثافة ρ فإن معامل الرفع Cl و معامل مقاومة الهواء Cd و A مساحة مرجعية يساوي:

$$Lift = \tfrac{1}{2} A \rho C l v^2$$

$$Drag = \tfrac{1}{2} A \rho C d v^2$$

يتم مزج القيمتين كالتالي: ننتخب A بشكل عشوائي لكن بعدها يتم قياس Cl و Cd على أساس قيمة A . أكثر الطرق استعمالا يتم انتخاب A من قيمة أكبر مساحة مقطع عرضي للصاروخ. عندما تكون زاوية الهبوب صغيرة فإن Cl تكون في تناسب مطرد مع زاوية الهبوب



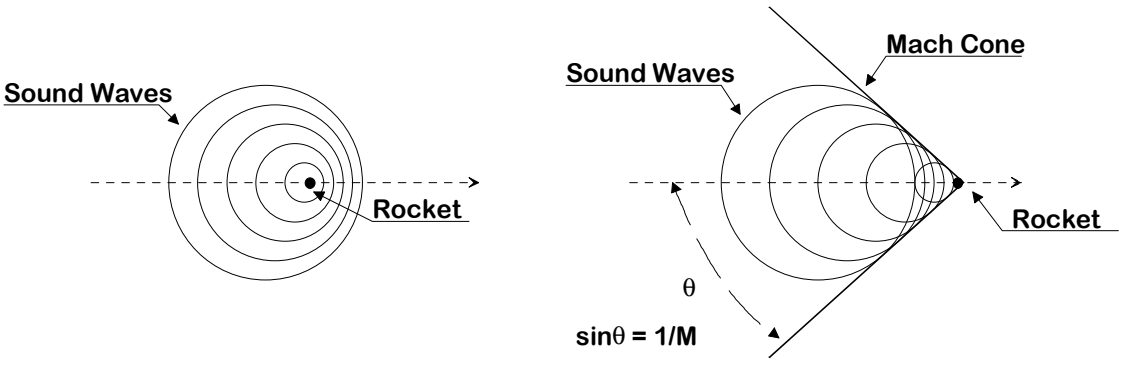
يعني ذلك أن الصاورخ الذي يطير في زاوية هبوب صفر فإن معامل قوة الرفعCl يساوي صفر . فلو زادت زاوية الهبوب لأي سبب ما، زاد معامل الرفع فيؤثر في الصاروخ ليحاول إمالته عن مساره.

مركز الضغط Center of pressure

هو الموضع الذي يكون فيه محصلة (مجموع) قوى الرفع على الصاروخ. تولد الأجنحة عامة القسم الأعظم من قوة الرفع Lift . و لهذا من أجل صاروخ لديه مجموعة واحدة من الأجنحة في مكان واحد فإن مركز الضغط يكون بجوارها.

شرح لحالة الصاروخ عندما يطير في سرعة أعلى أو أقل من سرعة الصوت:

حينما يطير صاروخ في الهواء فإن تيار الهواء حول الصاروخ يتوقف على سرعته، كذلك سرعة انتشار موجات صوت الصاروخ تتشوه .بالإضافة إلى أن حقل تدفق الهواء له علاقة بسرعة الصاروخ بدلالة سرعة الصوت (عدد الماغ لديه). تكوّن حركة الصاروخ في الهواء موجات صوتية ، و بما أن الصوت ينتقل بنفس السرعة في كل الاتجاهات فإن الصوت المنبعث يولد موجات كروية (تشبه الموجات على سطح الماء المرمي فيه حجر)



Rocket at subsonic speed

Rocket at supersonic speed

فإذا طار الصاروخ بسرعة أقل من سرعة الصوت فإن الموجات الصوتية بإمكانها الهروب من الصاروخ فتولد صوتا عاديا. لكن إذا طار الصاروخ بشكل أسرع من سرعة الصوت فإن موجات الصوت لا تتمكن من التفلت من الصاروخ بالطريقة العادية بالعكس فإنها تتزايد و تتجمع لتشكل موجات بشكل مخروطي مع الصاروخ و تسمى قيمة مخروط الماغ ، يلاحظ أن هذه المقدمة في الشكل تشبه شكل مقدمة البواخر . كلما زاد عدد الماغ أي سرعة الصاروخ كلما احتجنا إلى مقدمة أحدّ بحيث يتولد عن تجمع الموجات انفجار يسمع عند الطائرات التي تطير بسرعة فوق سرعة الصوت.

تسمى سرعة صاروخ ما عند طيرانه بسرعة أقل من سرعة الصوت أي M<1 بـ Subsonic أما في حالة كونها فوق سرعة الصوت M>1 بـ Supersonic. جريان الموجات في كلتا المرحلتين يكون مختلفا اختلافا حقيقيا . حيث أن لكل منهما مناطق سلوك مختلفة. تكون الموجات في حالة Subsonic غير منضغطة Incompressible ، حيث أن الهواء لديه الوقت الكافي لينطبق و يولد جريانا انسيابيا على جسم الصاروخ بدون زيادة في الضغط . أما عندما تزيد السرعة فوق نصف قيمة سرعة الصوت فإن الهواء ليس لديه الوقت لإنشاء نمط و شكل مثالي لجريان التيار. فيضغط في مقدمة الصاروخ عند بداية الزيادة في السرعة عن نصف قيمة سرعة الصوت فتزيد قيمة معامل مقاومة الهواء وكذلك معامل الرفع بحوالي $1/\sqrt{M^2-1}$ ، هذه المنطقة تسمى بمنطقة ما دون سرعة الصوت و يكون التيار فيها منضغطا . فتكون سرعة الهواء في مناطق أسرع و في مناطق أبطأ من سرعة الصوت و تكون قيمة معامل الرفع و مقاومة الهواء في أعلى قيمة لها (أي Transonic ٠.٨-١.٢ من سرعة الصوت). أما في منطقة مافوق الصوت بكثير أي من M=5 Hypersonic فإن معامل الرفع و مقاومة الهواء تقل بقيمة $1/\sqrt{M^2-1}$ من أقصى قيمة لها .

كيف يمكن الفحص إذا كان الصاروخ مستقرا؟

نحتاج إلى تحديد موضع مركز الضغط Cp للصاروخ وكذلك مركز ثقله CG عبر كل ظروف الطيران. Cp هو محصلة القوى الرافعة المؤثرة على جسم الصاروخ. لو كان مركز الثقل أمام مركز الضغط (تكون الرؤية من الخلف) عبر كل مراحل الطيران فإن الصاروخ يكون مستقرا. الملاحظ أن مركز الثقل و مركز الضغط موضعان لا يكونان دائما في نفس المكان و إنما يتأثران بتغير الظروف حيث أن مركز الثقل مثلا

ينتقل إلى الأمام كلما استهلك الوقود الصاروخي. و مركز الضغط ينتقل أماما وخلفا مع تغير سرعة الصاروخ و زاوية الهبوب.

كيف يمكن تحديد موقع مركز الضغط Cp ؟

للصواريخ التي تطير بسرعة منخفضة أي أقل من ١٨٣م/ثا (٦٠٠قدم /ثا) توجد طريقتان لحساب مركز الضغط : طريقة Barrowman و طريقة الورق المقوى المفصل على شكل المقطع العرضي للصاروخ. حيث أن الطريقة الأولى تحسب القوى الرافعة و مركز الضغط لأي قطعة من قطعات الصاروخ على حدة ثم تحسب محصلة تلك القوى مع بعض لإيجاد مركز الضغط الكلي. أما في طريقة الورق المقوى فإننا نقطع ورق مقوى على شكل المقطع العرضي للصاروخ ثم نبحث عن مركز ثقل هذا الورق و يمثل ذلك الموضع مركز ضغط الصاروخ لكن في زاوية هبوب تساوي ٩٠درجة ، أما طريقة Barrowman فهي تحسب مركز الضغط في زاوية هبوب ٠ درجة ، و بما أن الصواريخ تحلق على زاوية هبوب أقل من ١٠درجات فإن طريقة Barrowman تتوافق بشكل أكثر مع الحقيقة .

توجد برامج كمبيوترية لحساب مركز الضغط بإحدى أو بكلتي الطريقتين منها VCP, Rocketcad,Rocksim,Aerolab .

أما بالنسبة للصواريخ التي تطير بسرعة أكبر من ١٨٣م/ثا تصبح حسابات مركز الضغط فيها أكثر تعقيدا و لا توجد برامج تجارية لحساب ذلك . بشكل عام فإن الصواريخ التي تكون مستقرة في السرعات المنخفضة تكون كذلك مستقرة في حدود ماغ =٢ أي أقل من ٦٦٠م /ثا ، لكن الصواريخ التي لديها أجنحة بنسبة سماكة عالية فيمكن أن تتعرض لمشاكل استقرار في سرعة مابين ٠.٨-١.٢ ماغ.

يتقدم موضع مركز الضغط بالزيادة الحاصلة في زاوية الهبوب كأن يغادر الصاروخ منصة الإطلاق في سرعة منخفضة مع وجود رياح قوية فلا يكون الصاروخ مستقرا. كذلك حركة الصاروخ و فتله يؤثران في مركز الضغط.

كيف يمكن إيجاد موضع مركز الثقل ؟

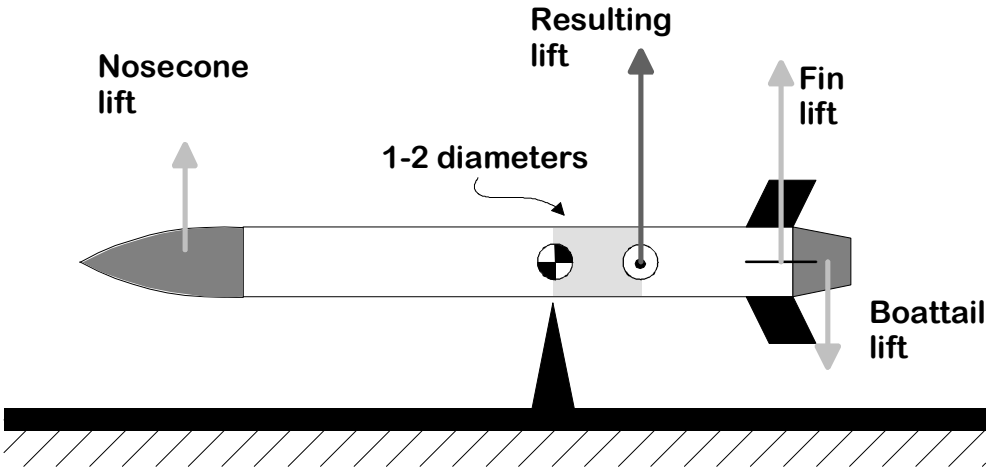
أفضل طريقة لفعل ذلك قبل تصنيع الصاروخ أن نرسم الصاروخ في برامج المحاكاة لنعلم موضع مركز الثقل ثم التأكد من ذلك بالتصنيع.

هل توجد علاقة مابين مركز الثقل و مركز الضغط ؟

هناك هامش الثباتية الاستاتية و يعرف على أنه نسبة المسافة و البعد بين مركز الضغط و مركز الثقل و أكبر قطر في الصاروخ. كقاعدة عامة يكون البعد مساويا لما بين ١ إلى ٢ من قطر الصاروخ. في حالة كون هذه النسبة صغيرة جدا قد يكون استقرار الصاروخ غير مؤكد بل و في خطر ، خاصة عند السرعات المنخفضة، أما إذا كان هذا البعد كبيرا جدا يكون الصاروخ حساسا بشكل واضح للرياح بالإضافة إلى زيادة في قيمة القوى الرافعة و مقاومة الهواء مما يزيد في الإجهاد على الأجنحة.

اعتبارات مهمة عند التصميم

طريقة Barrowman لا تأخذ بعين الاعتبار وجود عدة مجموعات من الأجنحة . ينبغي وضع الأجنحة في أبعد موقع من مقدمة الصاروخ . نستعمل مجموعة واحدة من الأجنحة . عند استعمال عدة طوابق نتأكد من أن الصاروخ ثابت في كل مكوناته .



عند إضافة boattail للتقليل من وجود Turbulence في مؤخرة الصاروخ (للتخفيف في الكبح) فإننا نتأكد من أن الأجنحة المستعملة مناسبة.

مقاومة الهواء

مقاومة الهواء للصاروخ له علاقة بسرعة و زاوية الهبوب و عدد ماغ و رقم رينولد.

تتشكل مقاومة الهواء على ثلاثة أوجه:

- الاحتكاك مع جسم الصاروخ الخارجي
- ممانعة مقاومة الضغط
- ممانعة مقاومة مؤخرة الصاروخ

عند سرعة ما دون سرعة الصوت يكون الاحتكاك في أكبر قيمة له كذلك الحال في السرعات العالية جدا . ممانعة الضغط (كبح) ناتج عن اختراق مقدمة الصاروخ للهواء ، في سرعة أقل من سرعة الصوت تكون هذه القيمة صغيرة . أما في سرعة الصوت تكون لممانعة الضغط قيمة معتبرة، خاصة عندما يكون الصاروخ له مقدمة غير حادة.

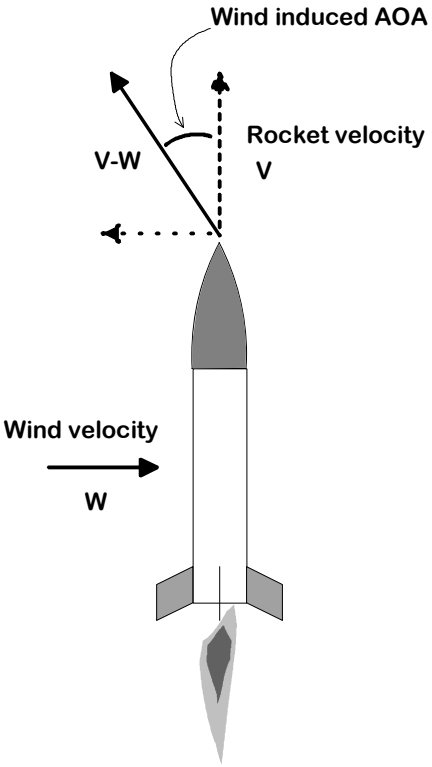
ممانعة القاعدة Boattail lift : تنتج هذه الممانعة (المقاومة الكبح) بسبب التموج الحاصل عند قاعدة الصاروخ على مستوى مخرج النازل حيث يتولد ضغط

منخفض فيكوّن كابحا يسحب الصاروخ للخلف . فمن بين الطرق للتقليل من ممانعة القاعدة هي جعل قطر مؤخرة الصاروخ أقل من القطر العام .

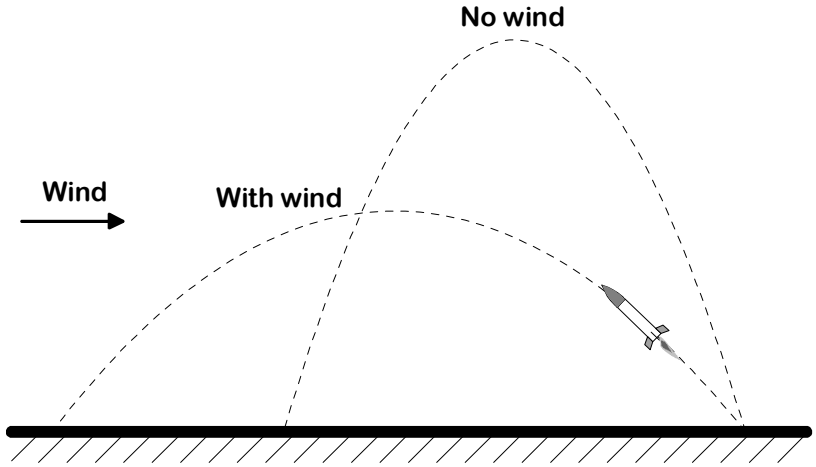
من أجل صواريخ تقضي أغلب وقتها في سرعة أقل من سرعة الصوت ينبغي أن تكون مقدمة الصاروخ دائرية وأجنحته مقدمتها دائرية و مؤخرتها حادة. أما من أجل صاروخ يقضي أغلب وقت طيرانه في سرعة مافوق الصوت ينبغي أن تكون حواف الأجنحة الأمامية و الخلفية حادة جدا و مقدمة الصاروخ Tangent ogive. أما الصواريخ التي تكون أغلب وقتها طائرة في سرعة انتقالية يتم التقليل من قطر الصاروخ في منطقة الأجنحة للتقليل من الكابح .

تأثير الهواء على مسار الصاروخ

ينبغي تجنب الرماية في وجود رياح قوية جدا . تؤثر الرياح على الصاروخ بطريقتين : عندما يغادر الصاروخ منصة الإطلاق فإن السرعة الأفقية للصاروخ تساوي السرعة الأفقية في عدم وجود الرياح ناقص سرعة الرياح . إذا كانت السرعة العمودية للصاروخ ليست كبيرة بشكل واضح مقارنة مع سرعة الرياح سيتأثر الصاروخ و تزيد سرعة الهبوب بزاوية أكبر من ١٠ درجات. فيتقدم موقع مركز الضغط ليصبح الصاروخ غير مستقر



فالذي يحصل أن السرعة تقل و يخرج من مساره إلى المسار غير المرغوب فيه كالتالي:



أما الظاهرة الثانية فهي تأثر الصاروخ بالرياح الشديدة إذ أنه يميل باتجاه الريح لإلغاء الزيادة في زاوية الهبوب المتسببة من طرف الرياح *weathercocking* تشبه ظاهرة توجه الديك الحديدي الذي يوضع على أسطح البيوت للدلالة على اتجاه الرياح فيميل

الصاروخ عكس اتجاه الرياح في فترة الدفع و يتوجه باتجاه الريح عند الطيران الحر ولا يتأثر المدى بعد ذلك .