يستخدم الوقود الصلب يكون الوقود والمؤكسد ممتزجان مع بعضهما البعض ومعبأة فى اسطوانات. ويتم اشعال الوقود عند السطح ويمتد الاحتراق بعد ذلك لباقى الوقود. ومع اشعال الوقود الصلب يستمر الاشتعال حتى ينتهى الوقود بالكامل ولا نستطيع إيقاف الاحتراق بعد اشعاله. بينما فى الوقود السائل يمكن وقف الاحتراق فى أى لحظة وبالتالى وقف دفع العادم من فوهة الصاروخ وذلك بإيقاف المضخات التى تضخ الوقود والمؤكسد إلى غرفة الاحتراق. الصواريخ التى تستخدم الوقود السائل تكون أكثر وزنا وتعقيدا لإنها تحتوى على مضخات لضخ الوقود والمؤكسد وكذلك على أسطوانات أضافية لفصل الوقود عن المؤكسد. ويتم تحميل اسطوانات الوقود والمؤكسد فى الصاروخ قبل بداية اطلاق الصاروخ مباشرة. بينما يتم تحميل خليط الوقود الصلب والمؤكسد فى الصاروخ قبل الاطلاق بشهور أو سنوات.

الأنواع الحديثة من الصواريخ تستخدم المحركات الكهربائية التى تسمى بالمحركات الأيونية ion engine. ووقود هذه المحركات أعداد هائلة جدا وصغيرة جدا من الجسيمات المشحونة التى تسمى بالأيونات ions. ويتم تسريع هذه الجسيمات بالقوى الكهروستاتيكية electrostatic forces. وتنتج هذه المحركات قوة دفع صغيرة جدا، ولكنها تستطيع الإستمرار لفترات زمنية طويلة، لأن معدل تدفق الجسيمات صغير جدا. والمحركات الأيونية لها دفع نوعى عالى مقارنة بالمحركات الكيميائية.

هناك نوع آخر من المحركات يسمى بالمحركات النووية الحرارية nuclear thermal. ويزود هذا النوع بمفاعل نووى صغير يكون مصدر مستمر للحرارة التى تستخدم لتسريع أى نوع من الغازات. حيث يسخن عند مروره على أو خلال المفاعل ليخرج من فوهة العادم بسرعة وضغط كبيرين. ودرجة حرارة العادم وسرعة الخروج تكون فى هذا النوع من المحركات أكبر بكثير من المحركات الكيميائية. كذلك للمحركات النووية دفع نوعى كبير جدا.

3-7 : وزن الصاروخ :

الوزن هو القوة الناتجة من قوة جذب الأرض للصاروخ. ونحن نعلم عن قوة الوزن أكثر مما نعلمه عن أى قوة أخرى تؤثر على الصاروخ، لأن كل واحد منا له وزنه الذى يمكن قياسه كل صباح بميزان الحمام فى المنزل. ونحن نشعر بالجسم الثقيل والجسم الخفيف. ولكن قوة الجذب التى تؤثر على الصاروخ تختلف عن أى قوة أخرى أثناء الطيران. فقوة الهواء الديناميكية (مقاومة الهواء والرفع) وقوة دفع الصاروخ تعتبر قوى ميكانيكية mechanical force. والصاروخ يكون فى حالة اتصال دائم مع الغازات التى تولد هذه القوى. أما قوة الجذب فهى قوة مجال field force والصاروخ لا

يستطيع أن يكون على اتصال مع مصدر هذه القوة. حيث أن هذه القوة موجودة فى وجود الصاروخ وفى عدم وجوده.

قوة الجذب درسها أسحق نيوتن منذ ثلاثمائة عام، ووجد أنها تعتمد على كتلة الجسمين الذى يتم التجاذب بينهما وعلى معكوس مربع المسافة بينهما. والأجسام الأكبر كتلة لها قوة جذب أكبر، والأجسام الأبعد مسافة من بعضها لها قوة جذب أقل.
ووزن أى جسم هو قوة الجاذبية وهى كتلة الجسم مضروبا فى عجلة الجاذبية الأرضية. وعجلة الجاذبية للأرض g_e هو حاصل ضرب ثابت الجذب العام فى كتلة الأرض مقسوما على مربع نصف قطر الأرض وتوضحه المعادلة التالية :

$$g_e=G\,M_{earth}\,/D^2_{earth}=9.8\ m/s^2$$

وتقاس العجلة بالمتر على مربع الثانية. ويكون وزن أى جسم على سطح الأرض هو:

$$W= m \times 9.8$$

إن كتلة الجسم لاتتغير من مكان لآخر ، ولكن وزن الجسم هو الذى يتغير لأن عجلة الجاذبية g_e تعتمد على بعد الجسم عن مركز الأرض. دعنا نحسب وزن مكوك الفضاء الذى يدور حول الأرض فى مدار منخفض. فإذا كان وزن مكوك الفضاء على سطح الأرض 250 ألف رطل، ومداره حول الأرض على ارتفاع 200 ميل من سطح الأرض، وبعده عن مركز الأرض 4200 ميل.

حيث أن كتلة الجسم m لاتتغير فإن : $m=W_s/g_e=W_0/g_0$

ومنها نوجد $W_0 =W_s \times g_0/g_e$

ويمكن كتابة نسبة عجلة الجاذبية كالتالى $g_0/ge= (d_{earth})^2/(d_{orbit})^2 =0.907$

حيث W_s وزن المركبة على سطح الأرض (250 رطل)، W_0 وزن المركبة فى المدار، g_0 عجلة الجاذبية فى المدار. لذلك نجد أن وزن المكوك

= .907 x 250000 = 226757 رطل

لاحظ إن وزن المكوك لا يساوى صفرا. ومازالت توجد قوة جذب كبيرة تؤثر على المكوك على بعد 200 ميل. أما ظاهرة انعدام الوزن weightlessness التى يتعرض لها رواد الفضاء على متن المكوك ناتجة من تعادل قوة جذب الأرض للمكوك مع قوة الطرد المركزية نتيجة لسرعة المكوك العالية فى المدار.

حيث أن الوزن يعتمد على كتلة الجسم المجذوب وكتلة الجسم الجاذب ومربع المسافة بينهما، فإن وزن الجسم يتغير أيضا من كوكب لآخر. وعجلة الجاذبية تعتمد

أيضا على كتلة الكوكب ونصف قطره، لذلك نجد أن لكل كوكب فى المجموعة الشمسية عجلة جاذبية خاصة به. فعجلة جاذبية القمر :

$$g_{moon}=G \times M_{moon} / D^2_{moon}=1.61\ m/s^2$$

وعجلة جاذبية المريخ :

$$g_{mars}=G \times M_{mars} / D^2_{mars}=3.68\ m/s^2$$

فكتلة الصاروخ لاتتغير على سطح الأرض أو القمر أو المريخ، ولكن على سطح القمر يكون وزن الصاروخ تقريبا **1/6** وزنه على سطح الأرض، وعلى المريخ يكون وزنه **1/3** وزنه على سطح الأرض. لهذا نجد أن الصاروخ على القمر أو المريخ لا يحتاج لنفس قوة الدفع للانطلاق مثل التى يحتاجها للانطلاق من سطح الأرض. لأن وزن الصاروخ على القمر أو المريخ أقل من وزنه على الأرض.

جميع القوى هى كميات متجهه vector quantity لها مقدار واتجاه. لذلك قوة وزن الصاروخ تتجه دائما ناحية مركز الأرض. يعتمد مقدار هذه القوى على كتلة جميع أجزاء الصاروخ نفسة بالإضافة إلى الحمولة التى ينقلها الصاروخ (القمر الصناعى أو المسبار الذى سيضعه فى مداره). والوزن موزع على طول الصاروخ، لكننا نعتبر أنه مجمع ويعمل عند نقطة واحدة تسمى مركز الثقل *cg*. وأثناء الطيران يدور الصاروخ حول مركز الثقل، ولكن يظل اتجاه الوزن تجاه مركز الثقل.

وأثناء اطلاق الصاروخ فإن الوقود يحترق، لذلك فإن وزن الصاروخ يتغير بمعدل ثابت. لذلك يؤخذ فى معادلات الحركة للصاروخ التغير فى وزن الوقود وبالتالى فى الوزن الكلى للصاروخ. وغالبا يتكون الصاروخ من مراحل متعددة تنفصل أثناء الطيران بعد أن ينتهى وقودها ليبدأ اشعال وقود المرحلة التالية.

4-7 : قوى الهواء الديناميكية على الصاروخ :

تتولد قوى الهواء الديناميكية على الصاروخ عند طيرانه فى الهواء. ومقدار هذه القوى يعتمد على شكل الصاروخ، حجمه، سرعته وبعض خواص طبقة الهواء التى يطير خلالها. وتنقسم القوى الديناميكية إلى مركبتين: قوة مقاومة الهواء drag ويكون اتجاهها عكس اتجاه الحركة، وقوة رفع lift تعمل فى اتجاه عمودى على اتجاه حركة الصاروخ. وتؤثر قوتى المقاومة والرفع عند مركز الضغط **cp** وهو موقع متوسط لتأثير قوى الهواء الديناميكية على جسم الصاروخ.

قوى الهواء الديناميكية هى قوى ميكانيكية mechanical forces. وتتولد من مرور الصاروخ بسرعة خلال الهواء أثناء الطيران. أى أن هذه القوى ليس لها وجود على الصاروخ قبل اطلاقه. لأن هذه القوى لاتولد مجال قوة مثل مجال الجاذبية