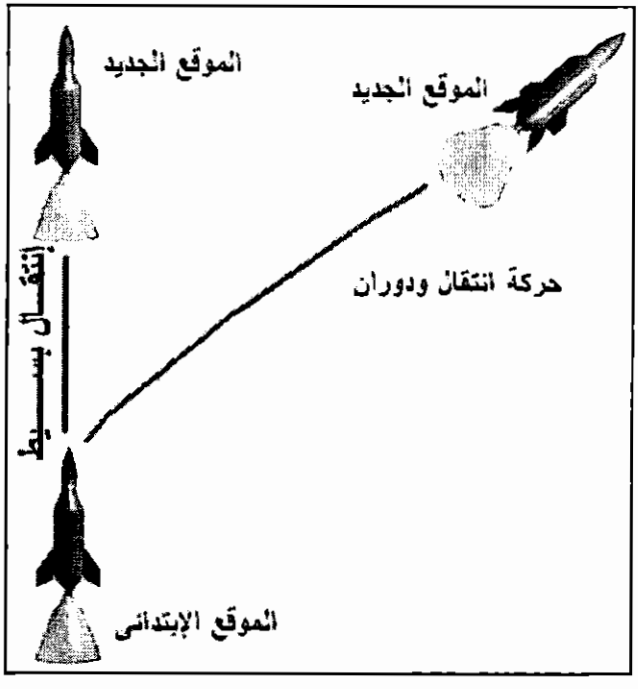
والحركة الثانية حركة دورانية أى يغير هيئته، أى وضع جسمه attitude الشكل (7-2). وعامة تشمل حركة أى صاروخ كلا النوعين من الانتقال والدوران. ويكون الانتقال استجابة مباشرة للقوى الخارجية. أما الدوران يكون استجابة مباشرة للعزم الخارجى أو قوة اللى twisting force.

إن حركة الصاروخ معقدة، لأن دورانه وانتقاله متلازمان، ويؤثر الدوران على مقدار واتجاه القوى التى تؤثر على الانتقال. ولفهم ووصف حركة الصاروخ نحاول تبسيط المشكلة المعقدة لحركة الصاروخ إلى سلسلة من الحركات البسيطة. يمكننا أن نتخيل انتقال الصاروخ كما لو كانت جميع كتل الصاروخ مجمعة عند نقطة واحدة تسمى مركز الثقل. ويمكننا وصف حركة مركز الثقل بقوانين الحركة لنيوتن. وعموما توجد أربعة قوى تؤثر على الصاروخ وهى الوزن والدفع ومقاومة الهواء والرفع.



الشكل (7-2)
حركة الصاروخ الانتقالية والدورانية.

7-6 : دوران الصاروخ :

7-6-1 : محاور الجسم :

يجب أن نتحكم فى وضع جسم الصاروخ واتجاه طيرانه فى الابعاد الثلاثة التى يتحرك فيها. يدور الصاروخ أثناء الطيران حول مركز ثقله. دعنا نحدد نظام احداثيات ذو ثلاثة ابعاد مركزه منطبق على مركز ثقل الصاروخ، يتعامد فيه كل محور على المحورين الآخرين. فيمكننا بذلك تحديد اتجاه ووضع الصاروخ فى الفضاء بمقدار الدوران لإجزاء الصاروخ على طول تلك المحاور.

تكون أغلب الصواريخ متماثلة بالنسبة لخط يمر بطول الصاروخ من قمة مقدمته إلى مركز فوهة العادم الشكل (7-3). ويسمى هذا الخط بمحور الدوران roll axis، والحركة حول هذا المحور تسمى بالحركة الدورانية. وحيث أن الصاروخ متماثل بالنسبة لهذا المحور لذلك أطلق عليه محور التماثل axisymmetric. ويقع مركز ثقل الصاروخ على هذا المحور. ولتحديد المحور الثانى للاحداثيات، يجب أن نميز بعض خواص تصميم الصاروخ مثل موقع الزعانف fin placement ونضع محور الإنعراج yaw axis حيث يكون متعامدا على محور الدوران، ويمر بمركز الثقل. والحركة حول محور الإنعراج ينتج عنها توجيه مقدمة الصاروخ إلى يمين أو يسار محور الدوران. أما محور الميل أو الإنحدار pitch axis فيكون متعامدا على محورى الدوران والإنعراج ويمر بمركز الثقل. وحركة الميل أو الإنحدار توجه مقدمة الصاروخ لإعلى وأسفل محور الدوران. والصاروخ يمكنه عمل مناورات (تغيير وضعه) maneuvers، بعدة طرق. فتولد الزعانف أثناء الطيران قوى هواء ديناميكية، وهذه القوى تؤثر على مركز الضغط للصاروخ الذى يبعد مسافة صغيرة عن مركز ثقله، لذلك يتولد عزم دوران حول المحاور، مما يسبب دوران الصاروخ حول محوره. وأغلب الصواريخ تقوم بالإنحدار أو الإنعراج بواسطة تغيير اتجاه فوهة العادم إلى الاتجاه المطلوب، حيث تكون فوهة العادم قابلة للحركة، (مثال لذلك المحركات الصغيرة المركبة على قوارب الصيد أو القوارب الرياضية، فاذا كان المحرك فى اتجاه الحركة تكون الحركة للأمام دائما، وعند تغير اتجاه المحرَك يمينا ينحرف القارب يمينا، وعند تحريكه يسارا ينحرف القارب يسارا). حيث ينتج عزم حول مركز الثقل عندما يكون اتجاه الدفع مائلا على محور الدوران.

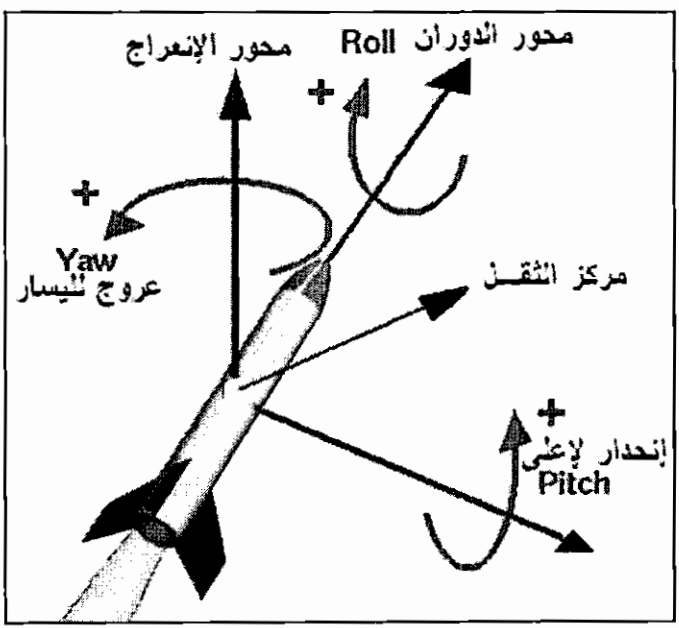
حركة دوران الصاروخ حول محور الدوران تنتج من انحراف المؤخرة المفصلية للزعانف (مثل ما يحدث فى الجزء الخلفى فى جناح الطيارة). حيث يغير انحراف المؤخرة المفصلية للزعنفه تغيير شكل ديناميكا الهواء للزعانف وتنتج قوة رفع تتعامد على اتجاه الطيران. وإذا حدث الإنحراف لجميع الزعانف بنفس المقدار فإن العزم الكلى يكون حول محور الدوران. ويمكن احداث حركة الدوران باستخدام حركة فوهة العادم لتوليد عزم دوران كلى حول محور الدوران.

كذلك تستخدم حركة فوهة العادم لإحداث حركة الإنحدار، وذلك بانحراف فوهة العادم عن محور الدوران فى الاتجاه المطلوب توجيه مقدم الصاروخ إليه. وحيث أن مركز الثقل يقع على محور الدوران فإن متجه الدفع يولد عزم دوران حول مركز الثقل يجعل الصاروخ ينحدر.

يمكن تشبيه هذه المحاور بحركة الطائرة فعندما يغير القائد اتجاه الطيران إلى أعلى فيرفع مقدمة الطائرة لاعلى بذلك فهو يميل بها أو ينحدر لاعلى. وإذا أراد تغير أتجاهه يمينا أو يسارا فهو ينعرج بها يمينا أو يسارا. أما حركة الدوران حول محورها فلا تقوم بها إلا طائرات حربية تقوم باستعراضات رياضية حيث تدور حول محورها عدة مرات.

2-6-7 : استقرار الصاروخ :

عدم استقرار دفع الصاروخ وكذلك الرياح يؤثر على استقرار وضع الصاروخ أثناء الطيران. ومثل أى جسم يدور الصاروخ حول مركز ثقله **cg** وهذا الدوران يجعل محور الصاروخ يميل بزاوية α على اتجاه طيرانه.ويولد هذا الميل قوة رفع بواسطة زعانف الصاروخ بينما تظل مقاومة الهواء ثابتة فى حالة الميل بزاوية صغيرة. وتعمل قوة الرفع ومقاومة الهواء عند مركز ضغط الصاروخ *cp*.



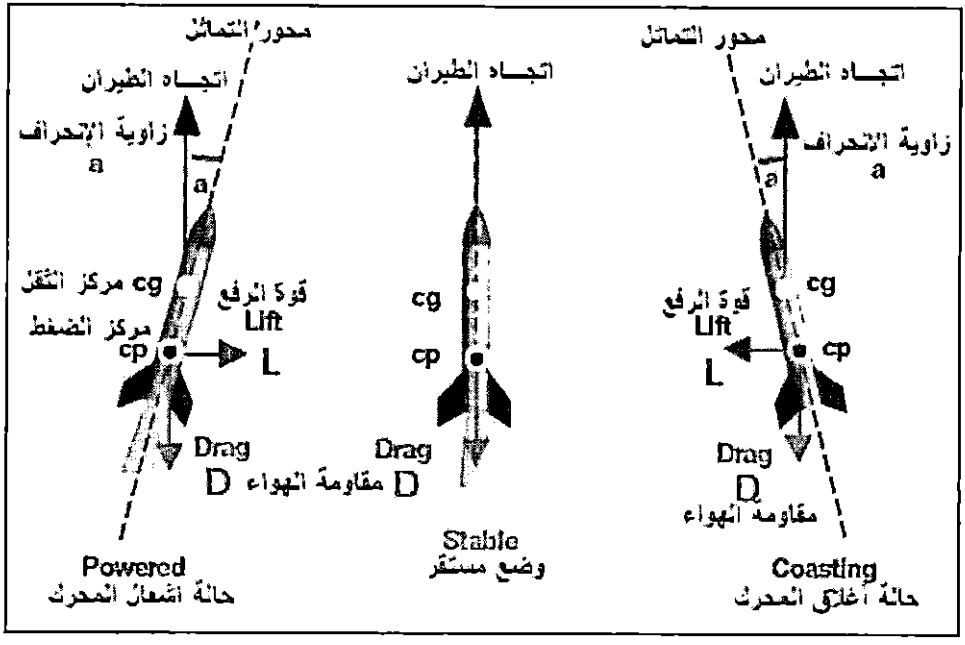
الشكل (7-3)
حركة الصاروخ حول محاوره.

يوضح الشكل (7-4) ثلاثة حالات يكون فيها

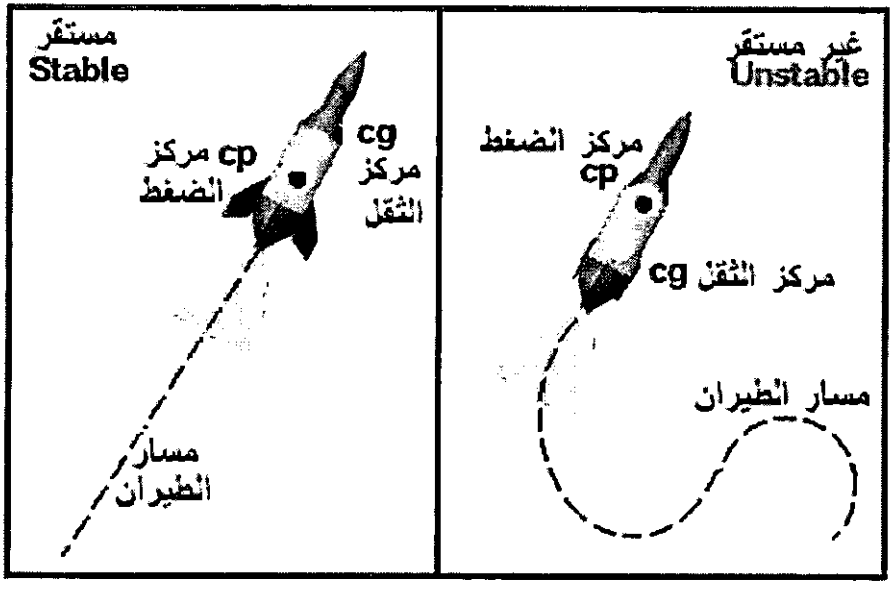
اتجاه الطيران رأسى. فالشكل الأوسط الصاروخ فى وضع مستقر حيث يكون محور تماثله على امتداد اتجاه الطيران. ومقاومة الهواء على طول محور الصاروخ لا تتولد قوة رفع فى هذه الحالة لعدم وجود زاوية ميل بين المحور واتجاه الطيران. ند يسار الشكل الصاروخ فى وضع تشغيل محركاته powered حيث يندفع العادم من الفوهة. نجد أن مقدمة الصاروخ انحرفت ناحية اليمين بزاوية α (α الزاوية المحصورة بين اتجاه محور الصاروخ واتجاه الطيران). ونجد أن قوة الرفع ظهرت فى هذه الحالة فى اتجاه الإنحراف. وفى يمين الشكل نجد أن الصاروخ ومحركاته مغلقة coasting انحرف ناحية اليسار بزاوية α. وتولدت أيضا قوة رفع ناحية اليسار فى اتجاه انحراف محور الصاروخ. ففى حالة تشغيل المحركات نجد أن قوة الرفع ومقاومة الهواء تنتج عزم حول مركز الثقل عكس اتجاه حركة عقارب الساعة. لذلك نجد أن الذيل ينحرف يمينا تحت تأثير كلا من القوتين، وتنحرف مقدمة الصاروخ يسارا. ففى حالة عدم تشغيل المحركات نجد أن كلا من قوة الرفع ومقاومة الهواء تنتج عزم حول مركز الثقل فى اتجاه حركة عقارب الساعة. لذلك نجد أن الذيل ينحرف يسارا تحت تأثير كلا من القوتين، وتنحرف مقدمة الصاروخ يمينا. وفى كلتا الحالتين نجد أن قوتى الرفع ومقاومة الهواء تحرك مقدمة الصاروخ لتعود إلى اتجاه الطيران. واطلق على هذا قوة الإستعادة restoring force لأن القوى تعيد الصاروخ لوضع الإتزان أو الاستقرار.

قوة الاستعادة تتولد لأن مركز الضغط يكون أسفل مركز الثقل. أما إذا كان مركز الثقل أسفل مركز الضغط، فإن قوة الرفع ومقاومة الهواء ستحتفظ بنفس الاتجاهات ويكون اتجاه العزم معكوس. لذلك تسمى هذه الحالة بقوة عدم الاستقرار **de-stabilizing force**. ويوضح الشكل (7-5) مقارنة بين وضعى الاستقرار وعدم الاستقرار عندما يتغير وضع مركز الثقل بالنسبة لمركز الضغط.

أى انحراف صغير لمقدمة الصاروخ ينتج عنها قوى تسبب زيادة هذا الإنحراف. لذلك فإن استقرار الصاروخ ينتج من وضع مركز الضغط أسفل مركز الثقل. ويمكن زيادة استقرار الصاروخ بخفض مركز الضغط بزيادة مساحة الزعانف، أو رفع مركز القل إلى أعلى بزيادة وزن مقدمة الصاروخ.



الشكل (7-4) استقرار وعدم استقرار الصاروخ فى أوضاع مختلفة.



الشكل (7-5) مقارنة بين الحركة فى وضعين مختلفين لمركزى الضغط والثقل