الفصل الأول

تعاريف ومفاهيم أساسية *Definitions and Basic Concepts*

1-1- المقدمة *Introduction*

تكمن الغاية من التحليل الميكانيكي للآلات في دراسة حركات أجزائها المختلفة ، وتحديد القوى المؤثرة فيها من دون التطرق إلى دراسة تأثير المرونة والتغيرات الحاصلة في شكل هذه الأجزاء بسبب القوى المطبقة عليها ؛ إذ إن هذه الدراسة هي مجال بحث مقاومة المواد (*Strength of Materials*) . كما أن تعيين حجم أجزاء الآلة اللازمة وأشكالها لتحمل القوى المطبقة عليها أو نقلها يدخل في موضوع تصميم الآلات (*Machine Design*) .

يقتصر البحث هنا على دراسة الحركة المستوية للجسم الصلب ، حيث تتحرك نقاط الجسم جميعها في مستويات متوازية أو منطبق بعضها على بعضها ، أي: تُهمل سماكة الأجزاء العمودية على مستوي الحركة ؛ مما يبسط الدراسة ، ولا يقلل من قيمة المعلومات التي يتم الحصول عليها ؛ لأن النقاط جميعها على أي عمود على مستوي الحركة تتحرك بطريق مماثلة ، مع الإشارة إلى أن أغلب الأسس والمفاهيم المعتمدة في دراسة الحركة المستوية ، هي ذات فائدة كبيرة في تحليل أنماط الحركة الفراغية ، وبخاصة اللولبية والكروية منها ، حيث يمكن دراسة هذه الحركة انطلاقاً من إسقاط مركباتها في مستويين أو أكثر ، ومن ثم تحليل الحركة الفعلية لهذه المركبات ، كما هو الحال في دراسة حركة بعض أنواع المسننات ، والمساند ، والمحامل التدحرجية ، والوصلات الكروية .

من الضروري قبل التطرق إلى بحث الوسائل المستخدمة في التحليل الميكانيكي للآلات وبيان تطبيقاتها المختلفة إعطاء فكرة موجزة عن أهم المفاهيم المتعلقة بالمكونات الحركية للآلات ، من حيث تحديد أوضاعها الهندسية وأشكال الاتصال فيما بينها لتأمين حركة ما .

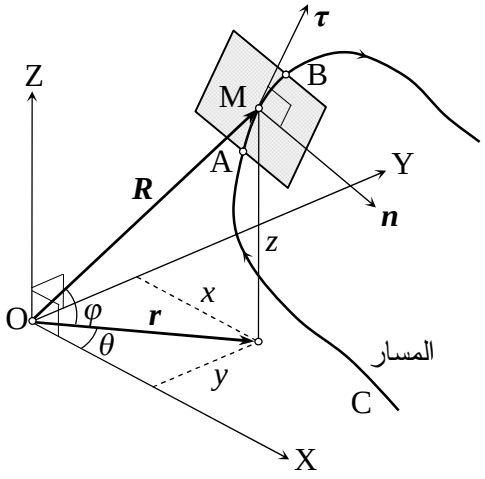
2-1- درجات الطلاقة *Degrees of Freedom*

إن مفهوم درجات الطلاقة ذو فائدة كبيرة في التعبير عن الأبعاد أو الإحداثيات اللازمة لتوصيف مواضع الأجسام المتحركة جميعها ؛ إذ إن عدد الإحداثيات المستقلة عن بعضها عن بعض ، واللازمة لتحديد وضع نظام ميكانيكي في أي لحظة يساوي عدد درجات الطلاقة لهذا النظام ، تسمى هذه الإحداثيات المستقلة بالإحداثيات المكانية ، ويساوي عددها العدد الكلي للإحداثيات مطروحاً منه عدد العلاقات الهندسية التي تربط بينها .

يلاحظ من (الشكل-1-1) أن وضع نقطة M تتحرك بطلاقة في الفراغ ، تتحدد بثلاث قيم جبرية مستقل بعضها عن بعض ، تمثل إحداثيات هذه النقطة بالنسبة إلى جملة محاور إحداثية ثابتة . يمكن أن تكون هذه الإحداثيات ديكارتية x , y , z أو أسطوانية r , θ, z أو أي إحداثيات أخرى . إذن للنقطة طليقة الحركة في الفراغ ثلاث درجات طلاقة .

لكن إذا قيدت النقطة بالحركة على سطح أو بشكل خاص في مستوى ، فإنه توجد بين الإحداثيات الثلاثة علاقة هندسية هي تابع السطح المقيد للحركة ؛ وبالتالي فإن وضع النقطة يحدد عندئذ بإحداثيين مستقلين فقط ، أي: إن لها درجتي طلاقة .

أما إذا قيدت النقطة بمنحنٍ فإنه يبقى إحداثي مكاني واحد فقط ؛ لأن المنحني بشكل عام ، هو خط تقاطع سطحين ، وهذا يعني أن للنقطة في هذه الحالة درجة طلاقة واحدة .

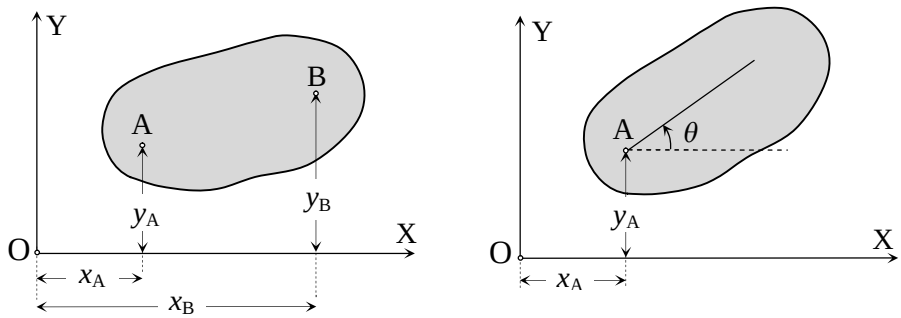


(الشكل-1-1) وضع نقطة M تتحرك بطلاقة في الفراغ .

أما في حالة جسم صلب عندما يتحرك بطلاقة في الفراغ بالنسبة إلى محاور ثابتة ، فإن وضعه يتعين بشكل كامل بوضع ثلاث نقاط منه لا تقع على استقامة واحدة ؛ إذ إن وضع أي نقطة إضافية من الجسم يحدد بالاستناد إلى أن بعدها عن النقاط الثلاث ثابت لا يتغير كيفما تحرك الجسم ؛ إضافةً إلى كون الأبعاد بين النقاط ثابتة أيضاً .

يتضح من ذلك أن الإحداثيات التسعة اللازمة لتعيين وضع النقاط الثلاث من الجسم ليست مستقلة عن بعضها بعضاً ؛ إذ إنها ترتبط فيما بينها بثلاث علاقات للأبعاد الثابتة بين هذه النقاط ؛ وبالتالي فإنه يبقى ست قيم مستقلة تمثل الإحداثيات المكانية للجسم ، أي: إن للجسم الصلب الطليق في الفراغ ست درجات طلاقة .

لكن إذا تحرك جسم صلب بحركة مستوية طليقة ، فإن وضعه يتعين بالنسبة إلى المستوي الثابت بإحداثيات نقطتين منه A و B ، كما هو مبين في المخطط a في (الشكل-1-2) ؛ لأن حركة الجسم في هذه الحالة هي دوماً موازية للمستوي الثابت OXY . يتحدد وضع النقطة A بالإحداثيين x_A و y_A ، بينما يتحدد وضع النقطة B بالإحداثيين x_B و y_B ؛ وبالتالي فإن وضع الجسم يعين في المستوي بأربعة إحداثيات ، لكن هذه الإحداثيات ليست مستقلة تماماً ، إنما توجد بينها علاقة: هي البعد الثابت بين النقطتين A و B .



a- تعيين الجسم بإحداثيات نقطتين.

b- تعيين الجسم بإحداثيات نقطة وميل خط مار منها.

(الشكل-1-2) تعيين جسم صلب يتحرك حركة مستوية طليقة .

كما يمكن تحديد وضع الجسم في المستوي بـــ x_A و y_A إحداثيي النقطة A ، والزاوية θ ميل الخط AB على المحور OX ، حيث تكون الإحداثيات θ و x_A و y_A مستقلة تماماً ، كما هو مبين في المخطط b في (الشكل-1-2) .

3-1- الوصلة *Link*

هي أي جزء من آلة يربط بين الأجزاء الأخرى ، ويتحرك بالنسبة إليها ، يمكن للوصلة أن تكون ثابتة لتشكل هيكل الآلة الذي تتحرك بالنسبة إليه بقية الأجزاء ، أو أن تكون دليلاً للحركة أو ناقلاً لها ، أو للقيام بهذه الأوضاع معاً مجتمعة .

ليس من الضروري أن تتكوّن الوصلة من قطعة واحدة ؛ وإنما يمكن أن تتكوّن من قطع عدة من مواد مختلفة جمعت بشكل وثيق لكي تتحرك كوحدة واحدة متماسكة . مثال ذلك ذراع التوصيل في محرك الاحتراق الداخلي الذي يتكوّن من مجموعة قطع صنعت منفصلة ، لكنها بعد تجميعها في الآلة تعدّ وصلة واحدة لانعدام الحركة النسبية بين مكوناتها المختلفة ، من الواضح أنه يمكن للوصلة أن تتصل بأي عدد من الوصلات الأخرى شريطة وجود حركة نسبية بين الوصلات المختلفة .

يمكن أن تكون الوصلة جسماً صلباً وتأخذ أشكالا تصميمية مختلفة ، فقد تكون بشكل قضيب أو قرص أو مسنن أو حدبة أو منزلقة وغير ذلك . ويجب أن تتميز الوصلة الصلبة بمقاومة كافية للقوى والإجهاد المتولد في أثناء الحركة ، مثل إجهاد الشد والضغط واللي والثني ، ويفترض بالتالي عند دراسة الآليات إهمال التشوهات الصغيرة في الوصلات الصلدة الناتجة عن الانفعالات ، حيث يفترض أن التغيرات العظمى للأبعاد تكون بحدود 0.001 من طول الوصلة .

كما أنه ليس من الضروري أن تكون الوصلة جسماً صلباً ؛ إنما يجب أن تكون جسماً مقاوماً قادراً على نقل الحركة دون تغير ملحوظ في أبعاده ، فالوصلة الصلبة (*Rigid Link*) هي قادرة على نقل قوى الشد أو الضغط أو كليهما معا كذراع التوصيل المذكور سابقاً ، أما الوصلة المرنة (*Flexible Link*) أو الطليقة فهي تبدي مقاومة وتنقل الحركة بطريقة معينة واحدة فقط . فمنها الوصلات الشدية (*Tension Links*) كالسيور والسلاسل والحبال التي تنقل قوى الشد لكنها لا تقاوم قوى الضغط . في حين تنقل الوصلات الضغطية (*Pressure Links*) قوى الضغط فقط كالسوائل غير القابلة للانضغاط المستعملة في المكابس والمكابح والروافع الهيدروليكية . أما الوصلات النابضية فهي تنقل قوى الشد أو الضغط بحسب نوعها وطريقة تصميمها حيث تصنف كنوابض شد أو نوابض انضغاط ، وتعمل بالتالي على تأمين الانغلاق بين الوصلات لنقل الحركة بشكل مستمر .

تجدر الإشارة إلى أننا في مجال بحثنا سنستعمل تعبير الوصلة للدلالة على الوصلات الصلبة حصراً مع التنويه ، حيث يلزم ، عن الأنواع الأخرى من الوصلات .

قبل الاستفاضة في البحث لا بد من تعريف الوظائف الحركية لوصلات التركيبة الآلية وتمييزها ، وتتلخص هذه الوظائف وفق إمكانيتها في نقل الحركات المختلفة وتحويلها ، فالحركة المتولدة عند الوصلة القائدة تنتقل بواسطة ذراع التوصيل مثلاً إلى الوصلة المقودة ، عبر وصلات التركيبة التي تؤدي خلالها حركات محددة متكررة وقسرية بسبب الأبعاد والازدواجات الحركية لتلك الوصلات ، بالنتيجة تحصل التغيرات في خواص الحركة المنقولة ، فقد يتغير نوع الحركة من دورانية إلى انسحابية ، وقد يتغير مقدار السرعة زيادةً أو نقصاناً .

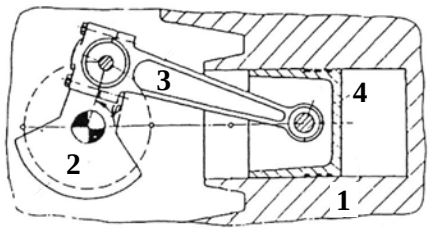
وتبعاً لوظائف الوصلات تستخدم التسميات الآتية:

- الوصلة الثابتة *Fixed Link*

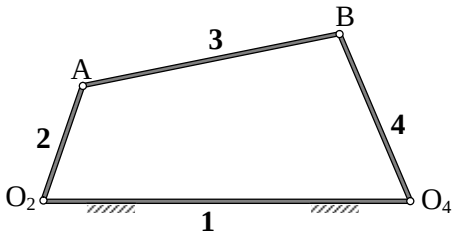
أو الهيكل (*Structure*) ، وهي تلك الوصلة التي تُعدُّ ثابتة في التركيبة الآلية ، وتقاس بالتالي حركة باقي الوصلات بالنسبة لها حتى ولو كانت هي نفسها متحركة أي منتمية لجملة متحركة كهيكل السيارة مثلاً ، أو كالوصلة رقم 1 ، كما في المخطط a في (الشكل-1-3) ، وفي المخطط b في (الشكل-1-3) .

- الوصلة القائدة *Driving Link*

أو المرفق (*Crank*) ، وهي وصلة الدخل في التركيبة الآلية مثل عمود المرفق رقم 2 في تركيبة المنزلقة والمرفق ، كما في المخطط a في (الشكل-1-3) ، وفي رباعية القضبان ، كما في المخطط b في (الشكل-1-3) ، وهي الوصلة التي تتلقى الحركة التي تتحول إلى الحركة التي على التركيبة تحويلها ، ويكون عمل القوى الخارجية المطبق عليها موجباً .



a- تركيبة المنزلقة والمرفق .



b- تركيبة رباعية القضبان .

(الشكل-1-3)

- الوصلة الناقلة للحركة *Coupler Link*

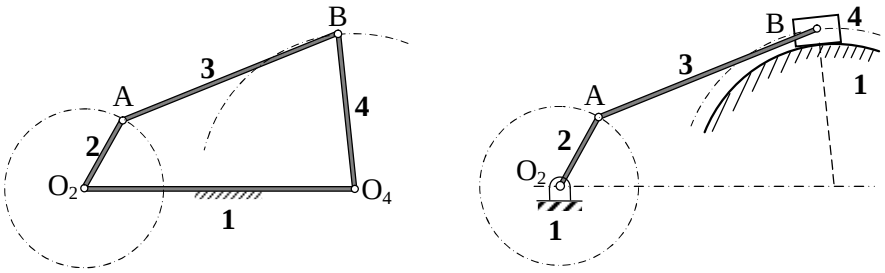
أو ذراع التوصيل (*Connecting Rod*) ، وهي الوصلة التي تنقل الحركة وتربط بين الوصلات المتحركة في التركيبة الآلية ، وليس لها اتصال مباشر مع الهيكل . مثل ذراع توصيل الحركة رقم 3 في تركيبة المنزلقة والمرفق ، كما في المخطط a في (الشكل-1-3) ، والوصلة رقم 3 في تركيبة رباعية القضبان ، كما في المخطط b في (الشكل-1-3) .

- الذراع *Lever*

وهو وصلة على شكل قضيب يهتز في زاوية ، ويغير اتجاه حركته في فترات معينة ، كالوصلة رقم 4 في تركيبة رباعية القضبان ، كما في المخطط a في (الشكل-1-4) .

- المنزلقة *Slider*

وهي وصلة على شكل قضيب أو كتلة تنزلق على سطح وصلة أخرى ، وقد تتحرك على خط مستقيم كالرأس المنزلق (*Crosshead*) رقم 4 في آلية المنزلقة والمرفق ، كما في المخطط a في (الشكل-1-3) ، أو قد يتحرك على منحنٍ ، كما تفعل الكتلة رقم 4 المبينة في المخطط b في (الشكل-1-4) .



b- منزلقة رقم 4 تتحرك على منحنٍ. a- الذراع رقم 4 في تركيبة رباعية القضبان.

(الشكل-1-4)

- الوصلة المقودة *Driven Link*

هي وصلة الخرج في التركيبة الآلية ، وهي التي تقوم بالحركة التي خصصت التركيبة من أجل الحصول عليها ، ويكون عمل القوى الخارجية المطبق عليها سالباً أو مساوياً للصفر . مثل المنزلقة رقم 4 في تركيبة المنزلقة والمرفق ، كما في المخطط a في (الشكل-1-3) ، أو كالوصلة رقم 4 في تركيبة رباعية الوصلات كما في المخطط a في (الشكل-1-4) .

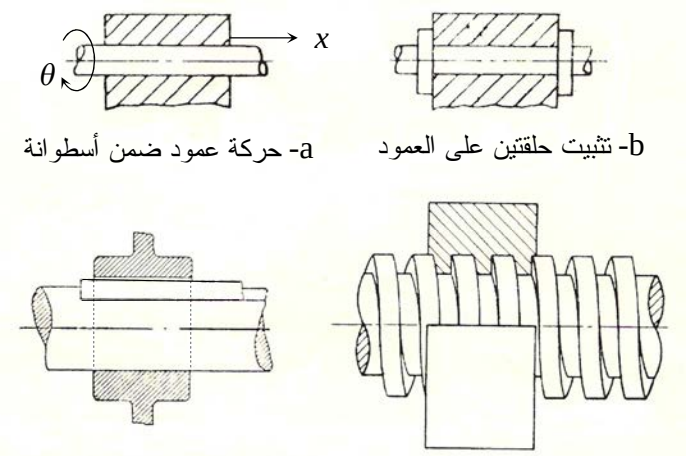
4-1- الازدواج الحركي *Kinematic Pair*

إذا وصلنا وصلتين بعضهما ببعض بحيث تكون الحركة النسبية بينهما مقيدة تقيداً تاماً فإننا نحصل على ازدواج حركي . هذا يعني أن الحركة النسبية المستوية بين الوصلتين يجب أن تكون ذات درجة طلاقة واحدة ، أي: إنها تُحَدد بإحداثي مستقل واحد فقط ، وبما أن للوصلة الطليقة التي تتحرك حركة مستوية بالنسبة لوصلة أخرى ثلاث درجات طلاقة ، كما ورد سابقاً في الفقرة (1-2) ، فإنه يجب - لتحقيق ازدواج حركي - تقييد حركة كل من الوصلتين بشكل يؤمن بينهما حركة نسبية ذات درجة طلاقة واحدة .

بالنسبة للوصلات التي تدخل في ازدواج حركي يكون عدد درجات الطلاقة أقل من ست درجات طلاقة ؛ بسبب شرط التماس والوصل الدائم لوصلات الازدواج الذي يخفض من عدد الانتقالات الممكنة ، ويمكن تقسيم الازدواجات الحركية بالنسبة لعدد درجات الطلاقة بأنها أحادية ، وثنائية ، وثلاثية ، ورباعية ، وخماسية . وإن عدد درجات الطلاقة وعدد درجات التقييد يساوي الستة دائماً أي: إنه يساوي عدد درجات الطلاقة لجسم يتحرك في الفراغ .

لفهم المقصود من الحركة النسبية المقيدة تقيداً تاماً ، ندرس حركة عمود ضمن أسطوانة ثابتة بينهما توافق دقيق ، كما في (الشكل-1-5) . نلاحظ في الحالة a في (الشكل-1-5) أنه يمكن تحريك العمود بالنسبة للأسطوانة بإحدى الحركات الآتية : دوران ، أو انزلاق ، أو دوران مع انزلاق ؛ وبالتالي فإن الحركة النسبية بينهما ليست مقيدة تقيداً تاماً ؛ إذ إن التلامس المغلق بين سطحي العمود والأسطوانة قد ألغى درجة طلاقة واحدة للعمود ؛ لأن درجة طلاقة الأسطوانة تساوي الصفر لكونها ثابتة ؛ إذ من الواضح أنه يلزم - بشكل عام - إحداثيان مستقلان x , θ لتحديد وضع العمود بالنسبة للأسطوانة في أية لحظة ، ولا يمكن ، من حيث الشكل الهندسي للازدواج الحركي بين الوصلتين ، تحديد حدوث أية من الحركات المذكورة سابقاً بشكل قاطع .

لكن إذا رغبنا أن تكون الحركة بين العمود والأسطوانة مقيدة تقيداً تاماً ، فعلينا عندئذ إدخال بعض التعديلات على هذا الشكل بحيث تؤمن قيداً إضافياً يلغي إحدى درجتي الطلاقة للعمود . يمكن على سبيل المثال ، إما:



a- حركة عمود ضمن أسطوانة b- تثبيت حلقتين على العمود

c- تثبيت خابور غاطس في الأسطوانة. d- لولبة سطحي تماس كل من العمود والأسطوانة.

(الشكل-1-5) الحركة بين العمود والأسطوانة .

- تثبيت حلقتين على العمود ، كما في الحالة b في (الشكل-1-5) ، بحيث تصبح حركة العمود بالنسبة للأسطوانة حركة دورانية فقط .
- أو تثبيت خابور غاطس في الأسطوانة ، كما في الحالة c في (الشكل-1-5) ، يشكل مع مجرى ملائم في العمود توافقاً انزلاقياً بحيث يسمح للعمود بالانزلاق فقط .
- أو لولبة سطحي تماس كل من العمود والأسطوانة ، كما في الحالة d في (الشكل-1-5) ، وتكون الحركة الناتجة مقيدة تقيداً تاماً رغم وجود دوران وانزلاق بآن واحد ؛ إذ إنه لكل دورة هناك انزلاقاً محدد القيمة بخطوة اللولب .

تجدر الإشارة إلى أن التحليل السابق لمفهوم التقييد التام للحركة بين وصلتين يبقى صحيحاً فيما لو كانت الأسطوانة غير ثابتة ؛ إذ إن الحركة النسبية بين الوصلتين لن تتغير ؛ وبالتالي فإن تثبيت إحدى الوصلتين أو تحريكها لا يغير نوعية الازدواج الحركي بينهما ؛ لأنه يتحدد بطبيعة الحركة النسبية فقط دون غيرها .

لما كانت الغاية من الوصلات المشكلة لآلة ما هي أداء حركة معينة يمليها العمل الذي صممت هذه الآلة من أجله ، فإنه من الواضح أن الازدواجات الحركية جميعها بين هذه الوصلات يجب أن تكون مقيدة تقيداً تاماً ؛ وبالتالي فإن تعبير ازدواج أينما ورد يعني ازدواجاً حركياً ما لم يُذكَر خلاف ذلك .

1-4-1- تصنيف الازدواجات الحركية *Kinematic Pair Classification*

نظراً لتباين أنماط الأداء في الآلات ، ولتنوع التقنيات المستخدمة في تحقيق حركة ما ، فإنه من الصعب تصنيف الازدواجات ضمن مجموعات محددة مستقلة لا تداخل بينها ؛ وبالتالي فإن هذا التصنيف يتم وفق منطلقات مختلفة ، نبين أهمها في الآتي:

1. وفق طبيعة الحركة النسبية *According to Relative Motion*

بما أن للحركة النسبية أهمية خاصة في تحديد مفهوم الازدواج الحركي ، فإنه من الطبيعي تصنيف الازدواجات تبعاً لنوع هذه الحركة بين وصلتي الازدواج . نميز في هذا المجال أربعة أنواع ، وهي:

- ازدواج حركي دوراني *Turning Pair*

حيث تقيد نقاط إحدى الوصلتين بالدوران على مسارات دائرية حول محور ثابت يمر في الوصلة الأخرى . مثال ذلك الحالة b في (الشكل-1-5) ، والمفاصل الدورانية والمحامل الارتكازية .

- ازدواج حركي انزلاقي *Sliding Pair*

حيث تكون الحركة النسبية بين نقاط تماس الوصلتين انزلاقية . يمكن للانزلاق أن يتم على مسارات مستقيمة ، مثال ذلك الحالة c في (الشكل-1-5) ، مكبس وأسطوانة ، منزلقة ومجرى مستقيم ، أو يمكن أن تنزلق إحدى الوصلتين على مسارات منحنية محددة في الوصلة الأخرى كما في حالة منزلقة ضمن مجرى منحن ، أو تابع مسطح وكامة قرصية .

- ازدواج حركي لولبي *Screw Pair*

حيث الحركة النسبية لولبية ، أي: إنها دوران بحت حول محور يرافقه انزلاق بحت مواز للمحور نفسه مع وجود علاقة محددة بين الدوران والانزلاق . مثال ذلك الحالة d في (الشكل-1-5) .

- ازدواج حركي تدحرجي *Rolling Pair*

إذا تحركت وصلة على وصلة أخرى بحيث لا تمس نقطة من إحداهما نقطتين متتابعتين على الأخرى ، فإن الحركة الناتجة هي تدحرج صرف ، والازدواج الحركي بينهما هو ازدواج حركي تدحرجي ، يعني ذلك أن شرط حدوث الحركة التدحرجية هو عدم وجود سرعة نسبية عند نقاط تماس الوصلتين . مثال ذلك تدحرج قرص على مستقيم أو على قرص آخر ، محامل الكرات (*Rolling Balls*) ، ومحامل الدحاريج ، وتعشيق زوج من أسنان مسننين .

2. **وفق طبيعة التقييد التام للحركة**

According to Complete Constraint of Motion

نميز في هذا المجال نوعين من الازدواجات ، وهما:

- ازدواج حركي مغلق ذاتياً *Self-Closed Kinematic Pair*

حيث يكون الشكل الهندسي للازدواج بين الوصلتين كافياً لتقييد الحركة بشكل تام ، ويتم تأمين الاتصال الدائم بواسطة تشكيل عناصر الازدواج الحركي ، بحيث لا يسمح إلا لنوع واحد من الحركة النسبية بالحدوث بين الوصلتين ، كما في الازدواجات الدورانية والانزلاقية واللولبية المبينة في الحالات b , c , d في (الشكل-1-5) ، فهي مغلقة ذاتياً حيث يحيط عنصر إحدى الوصلات بالأخرى . كذلك الأمر بالنسبة للكامات ذات الحركة الإيجابية ، ولمنزلقة تتحرك ضمن مجرى محدد وغيرها .

- ازدواج حركي مغلق قسرياً *Force-Closed Kinematic Pair*

يلاحظ في الكثير من الآلات أن شكل الازدواج لا يؤمن حركة مقيدة تماماً ، لكن ينتج تقييد تام للحركة من تأثير قوى خارجية ، يقال عن ازدواج من هذا النوع: إنه مغلق قسرياً ، وهناك وسائل عدة لغلق الازدواج ، وهي:

- الازدواجات الحركية المغلقة بقوى الثقالة

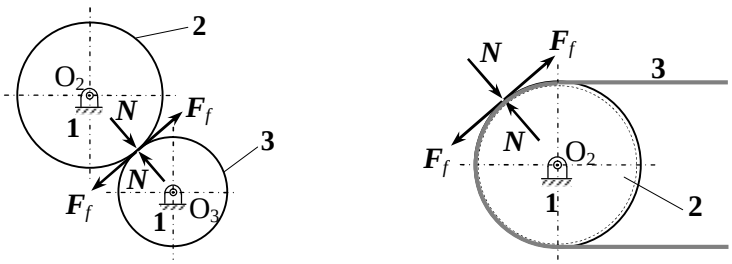
Kinematic Pairs Closed by Gravity Force

كما في حالة العنفات الشاقولية ، حيث لا يمنع الازدواج بين العمود ومحمل الدفع الحركة إلى الأعلى ، إلا أن وزن العنفة الكبير نسبياً يمنع إمكان حدوث هذه الحركة .

- الازدواجات الحركية المغلقة بقوى الاحتكاك

Kinematic Pairs Closed by Friction Force

يتم نقل الحركة من وصلة لأخرى عن طريق قوى الاحتكاك التي تؤثر في سطوح التماس ، مثل: الأقراص الاحتكاكية 2 و 3 الموضحة في المخطط a في (الشكل-1-6) ، حيث تتولد قوى الاحتكاك F_f بين هذه الأقراص ، وآلية السير حيث تتولد قوى الاحتكاك F_f بين السير 3 والبكرة 2 الموضحة في المخطط b في (الشكل-1-6) .



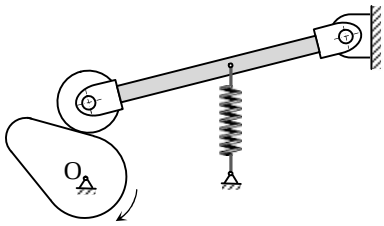
a- الأقراص الاحتكاكية . b- آلية السيور .

(الشكل-1-6) ازدواجات حركية مغلقة بقوى الاحتكاك

- الازدواجات الحركية المغلقة بقوة نابض

Kinematic Pairs Closed by Spring Force

يمكن أن تكون القوى الخارجية المقيدة للحركة نابضية ، كما في حالة تابع وكامة قرصية ، كما في (الشكل-1-7)



(الشكل-1-7) ازدواج حركي مغلق بقوة نابض .

- الازدواجات الحركية المغلقة بسبب الأوضاع النسبية للوصلات

Closed Kinematic Pairs by Relative Position of Links

يتم في بعض الحالات إغلاق الازدواج الحركي قسرياً بسبب الأوضاع النسبية لوصلات أو ازدواجات أخرى . مثال ذلك الازدواج الحاصل بين المكبس والأسطوانة في محرك الاحتراق الداخلي كما في المخطط a في (الشكل-1-3) حيث الحركة النسبية غير مقيدة تماماً ، لكن بسبب وجود ذراع التوصيل ، فإن محوري إصبع المكبس ووتد المرفق متوازيان دوماً ؛ وبالتالي فإن الحركة النسبية بين الأسطوانة والمكبس هي حركة انزلاقية فقط .

من الواضح أن تأمين ازدواجات مغلقة ذاتياً يستوجب دقة عالية في تشغيل سطوح تماس الوصلات وإنهائها ؛ لذا فإن التصميم الحركي للازدواجات يتم عادة بالاعتماد على إحدى وسائل الإغلاق القسري منعاً لحدوث انحرافات في الحركة النسبية بين الوصلات ؛ لأنه لا يمكن إنهاء سطوح التماس إلا ضمن حدود تفاوت معينة .

3. وفق شكل التماس *According to Contact Form*

تصنف الازدواجات من حيث شكل تماس الوصلتين في نوعين:

- ازدواج حركي سفلي *Lower Pairing*

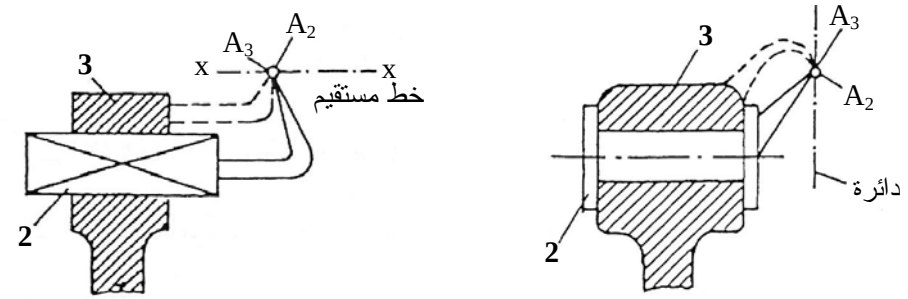
هو الازدواج الذي تتم الحركة النسبية بين وصلاته عن طريق التماس بين سطوحه ، ويكون تماس الوصلتين عبر سطحي تماس متطابقين هندسياً ، ويغلف أحدهما الآخر كلياً . والأمثلة من هذا النوع كثيرة ، نذكر منها مفصلاً دورانياً ، مكبساً وأسطوانة ، منزلقة ومجرى ، ولولباً مع عزقة . من الواضح أن للازدواج السفلي في الحركة المستوية درجة طلاقة واحدة ، بينما يكون له في الحركة الفراغية ثلاث درجات طلاقة ، كما في المفصل الكروي .

- ازدواج حركي علوي *Higher Pairing*

هي تلك الازدواجات التي تتم الحركة النسبية بين وصلاتها عن طريق التماس في نقاط معينة أو خطوط مستقيمة أو منحنية ، كما في حالة التوابع والكامات ، والمحامل ذات الكرات والدحاريج ، وتعشيق أسنان المسننات وغيرها . يلاحظ في هذه الازدواجات - بشكل عام - أن إحدى الوصلتين لا تغلّف تماماً الوصلة الأخرى ؛ إضافة إلى أنه لا يوجد بينهما تطابق تام بالشكل الهندسي ؛ لذا فإنه يلزم عادة تطبيق إغلاق قسري لتقييد الحركة النسبية تقيداً تاماً ، أو على الأقل ، لحفظ التماس بين الوصلتين .

من الواضح أن الازدواج العلوي ، بحد ذاته يلغي درجة طلاقة واحدة فقط ، وهي التي في اتجاه الناظم المشترك للوصلتين عند التماس . ينتج من ذلك أن للازدواج العلوي في الحركة المستوية درجتي طلاقة ، بينما يكون له في الحركة الفراغية خمس درجات طلاقة ، كما في حالة تدحرج مخروطين بعضهما على بعض ؛ لذا يتم عملياً تطبيق إغلاق قسري لتحقيق حركة معينة ما .

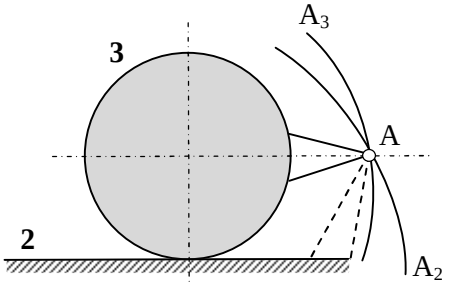
كما أن هناك فرقاً أساسياً بين هذين النوعين من الازدواجات ، وهو أن السطوح المتماسة في الازدواجات السفلية متطابقة هندسياً ، حيث تسري خاصية قابلية التعاكس الحركي بين الوصلات . هذا يعني أنه عند الحركة النسبية للوصلتين المتمفصلتين 2 و 3 ترسم مثلاً النقطة A_2 أو A_3 المسار نفسه ، كما هو مبين في (الشكل-1-8) سواء كانت تابعة للوصلة 2 أو 3 .



a- ازدواج حركي انزلاقي سفلي . b- ازدواج حركي دوراني سفلي .

(الشكل-1-8) قابلية التعاكس الحركي في الازدواجات السفلية .

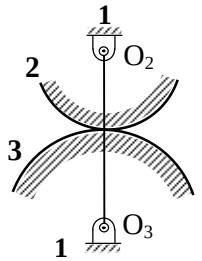
أما الازدواجات العلوية ، فهي عادة غير قابلة للتعاكس كما تبين الدراسات ، فإذا ما تدحرجت الوصلة 3 على الوصلة 2 ، فإن النقطة A_3 ترسم منحنياً دويرياً ، أما إذا تدحرجت الوصلة 2 على الوصلة 3 ، فإن النقطة A_2 ترسم انفراد الدائرة أي منحنياً إنفوليوتياً ، كما هو مبين في (الشكل-1-9) .



(الشكل-1-9) عدم قابلية التعاكس في الازدواجات العلوية .

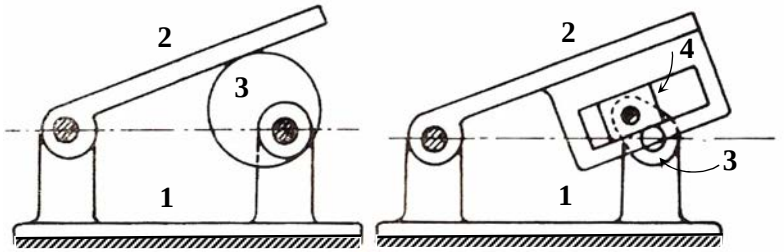
بما أن الازدواجات الحركية السفلية تتم عبر تماس سطوح ، فإن ميزة وصلاتها أنها تتحمل إجهادات ، وتقاوم التآكل أكثر من وصلات الازدواجات الحركية العلوية ؛ أي قدرتها على تقبل نقل وإعادة إعطاء قوى كبيرة بأقل تآكل ممكن ؛ لذا فإنه يفضل قدر الإمكان ، تجنب استعمال الازدواجات العلوية أو الاستعاضة عنها بازدواجات سفلية مكافئة حركياً ، ويتم ذلك عادة باستعمال وصلة إضافية ذات ازدواجين سفليين .

يبين (الشكل-1-10) مثالاً يوضح عملية الاستعاضة عن الازدواج العلوي بقضيب ومفصلين دورانيين حيث توضع المفاصل الدورانية في مراكز تقوّس المنحنيات المتماسة ، ويتم وصل بعضها ببعض بواسطة وصلة جديدة طولها يساوي مجموع نصفي قطري تقوس المنحنيين .



(الشكل-1-10) الاستعاضة عن الازدواج العلوي بقضيب ومفصلين دورانيين .

ويبين (الشكل-1-11) مثالاً يوضح عملية الاستعاضة عن الازدواج العلوي في المخطط a بازدواجين سفليين في المخطط b .



b- ازدواجان سفليان . a- الازدواج العلوي .

(الشكل-1-11) الاستعاضة عن الازدواج العلوي في a بازدواجين سفليين في b .

إن التماس المباشر في الحالة a في (الشكل-1-11) بين الوصلتين 2 و 3 يشكل ازدواجاً علوياً لأنه يتم خطياً ، أما في الحالة b في (الشكل-1-11) فقد أضيفت الوصلة 4 التي تتصل من جهة ، بالوصلة 3 بازدواج سفلي دوراني ، بينما تتصل من جهة أخرى ، بالوصلة 2 عبر ازدواج سفلي انزلاقي .

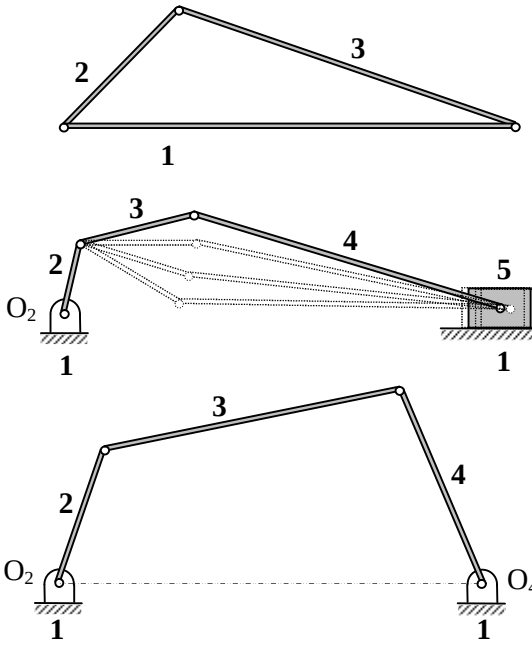
من الواضح أن هذا الاستبدال لم يغير طبيعة الحركة الأصلية حيث دوران الوصلة 3 مثلاً يؤدي إلى حركة تأرجحية للوصلة 2 في كلتا الحالتين ، أي: إنهما متكافئتان حركياً .

يتضح مما سبق أنه من الصعب بوجه عام إعطاء أفضلية لطريقة تصنيف الازدواجات الحركية على أخرى ؛ نظراً لوجود تداخل بينها . مثال ذلك الازدواج الحاصل بين تابع مسطح وكامة قرصية هو ازدواج علوي - انزلاقي - مغلق قسرياً ، بينما الازدواج في حالة منزلقة تتحرك ضمن مجرى هو ازدواج سفلي - انزلاقي - مغلق ذاتياً ، أما الازدواج عند تدحرج قرصي احتكاك فهو علوي - تدحرجي - مغلق قسرياً ؛ أي: إن التسمية المتكاملة لازدواج ما تشمل عادة نوعين أو أكثر من الأنواع المختلفة المذكورة آنفاً . إلا أننا في مجال بحثنا سنستعمل - بشكل رئيس - التسمية وفق طبيعة الحركة النسبية ؛ لاهتمامنا بالتحليل الميكانيكي للآلات دون التطرق إلى النواحي التصميمية والإنتاجية .

1-5- السلسلة الحركية *Kinematic Chain*

تتكون السلسلة الحركية من مجموعة ازدواجات حركية مرتبطة بعضها ببعض ، حيث كل وصلة فيها جزء في ازدواجين أو أكثر ، والحركة النسبية بين مختلف وصلاتها مقيدة تقييداً تاماً .

يمكن توضيح مفهوم السلسلة الحركية بدراسة المجموعات المبينة في (الشكل-1-12):



a- سلسلة مقفلة

b- سلسلة غير مقيدة

c- سلسلة حركية مقيدة

(الشكل-1-12) السلسلة الحركية .

تتكون المجموعة a في (الشكل-1-12) ، من ثلاث وصلات ذات ازدواجات دورانية فيما بينها ، حيث يتحقق القسم الأول من تعريف السلسلة الحركية ، لكن من الواضح أنه لا يمكن أن ينتج عنها أية حركة نسبية بين الوصلات الثلاث ؛ وإنما تشكل هيكلاً صلباً يستعاض عنه عند الدراسة الحركية بوصلة واحدة . يسمى هذا النوع من المجموعات بالسلسلة المقفلة ، ودرجة الطلاقة في هذه الحالة تساوي الصفر .

تتكون المجموعة b في (الشكل-1-12) ، من خمس وصلات تصل بينها أربعة ازدواجات دورانية وازدواج انسحابي واحد ، حيث يتحقق هنا أيضاً القسم الأول من التعريف ، لكن الحركة النسبية بين الوصلات غير مقيدة تماماً ، باعتبار أنه إذا ثبتنا الوصلة 1 مثلاً وأعطينا حركة محددة للوصلة 2 ، فإن هنالك عدة احتمالات ممكنة لحركة كل من الوصلات 3 , 4 , 5 كما هو مبين بالخطوط المتقطعة . يسمى هذا النوع من المجموعات بالسلسلة غير المقيدة ، ويكون لها أكثر من درجة طلاقة واحدة .

أما المجموعة c في (الشكل-1-12) ، فمن الواضح أنها تحقق الشرطين معاً ، من حيث ترابط الوصلات وكون الحركة النسبية بينها مقيدة تقييداً تاماً ، فهي إذن سلسلة حركية ، لأنه إذا ثبتنا الوصلة 1 مثلاً ، وأعطينا حركة معينة للوصلة 2 فإن كلاً من الوصلتين 3 , 4 تتحرك بحركة محددة وحيدة . أي: إن الحركات النسبية بين وصلات سلسلة حركية تحدد بوسيط مستقل واحد ، هو مثلاً الزاوية بين وصلتين ؛ وبالتالي فإن لها درجة طلاقة واحدة فقط .

يقال عن وصلة في سلسلة حركية إنها بسيطة أو ثنائية إذا اتصلت بازدواجين فقط ، وتكون الوصلة مركّبة إذا اتصلت بأكثر من ازدواجين ، وتسمى عندئذ وصلة ثلاثية ، أو رباعية ، بحسب عدد الازدواجات المتصلة بها ؛ وبالتالي تكون السلسلة بسيطة إذا تكونت من وصلات بسيطة فقط ، وإلا فهي سلسلة مركّبة .

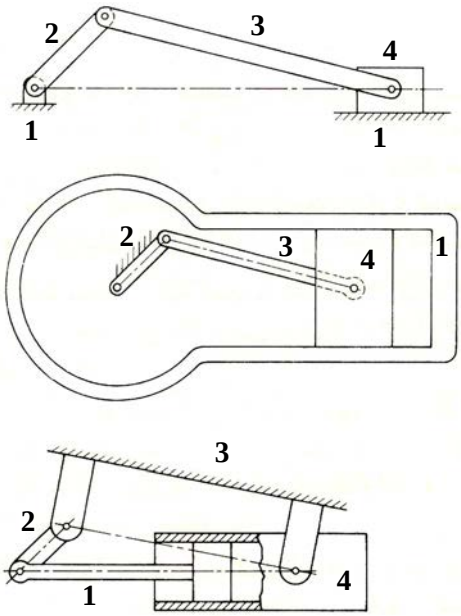
من الواضح أنه يمكن للسلسلة الحركية أن تتكون من أي عدد من الوصلات تتصل فيما بينها بأي نوع من الازدواجات ، شرط أن تحقق هذه المجموعة من الوصلات والازدواجات سلسلة مستمرة مغلقة لها حركة نسبية مقيدة تماماً . كما يمكن أن يكون فيها بدلاً من الازدواجات البسيطة والتي تربط بين وصلتين ، ازدواجات مضاعفة تربط بين ثلاث وصلات أو أكثر ، وتسمى السلسلة مستوية إذا وقعت مسارات الحركات النسبية للوصلات جميعها في مستويات متوازية ، وإلا فهي فراغية . سنتطرق في دراستنا بوجه عام إلى السلاسل المستوية ، مع الإشارة - حيث يلزم - إلى السلاسل الفراغية . ستوضح الأمثلة اللاحقة مجمل هذه المفاهيم .

1-6- التركيبة الآلية *Mechanism*

إذا ثبتت إحدى وصلات سلسلة حركية فإنه ينتج لدينا ما يسمى بالتركيبة الآلية أو الآلية ، ويمكن عندئذ استعمال المجموعة في نقل الحركة أو تحويلها ، وعندما نتحدث عن الآلية فإننا نفكر في الوسيلة التي نحصل بها على حركات ميكانيكية معينة ، ولا يهمنا البحث في مقدرة هذه الوسيلة على القيام بأي عمل مفيد .

نلاحظ أنه يمكن الحصول على تركيبات آلية مختلفة من سلسلة حركية واحدة حسب الوصلة المثبتة ، وإن عدد هذه التركيبات يساوي عدد الوصلات المكونة للسلسلة ، لكن ليس من الضروري أن تكون كلها ذات فائدة أو تطبيقات عملية ، وتسمى كل تركيبة من هذه التركيبات بالتركيبة العكسية أو متحول الآلية (*Inversion of a Mechanism*) للسلسلة الأصلية .

ويمكن توضيح مفهوم التركيبة العكسية بدراسة التركيبات الناتجة من سلسلة المنزلقة والمرفق المكونة من أربع وصلات ، بينها ثلاثة ازدواجات دورانية وازدواج انزلاقي كما هو مبين في (الشكل-1-13) .



(الشكل-1-13) التركيبات الناتجة من سلسلة المنزلقة والمرفق .

تعد التركيبة الآلية المبينة في المخطط a في (الشكل-1-13) حيث تثبت الوصلة 1 من أهم تطبيقات هذه السلسلة ؛ لأنها أساس التصميم الحركي للآلات الترددية كمحركات الاحتراق الداخلي ، والضواغط .

إذا استعضنا عن ذلك بتثبيت الوصلة 2 ، فإننا نحصل على تركيبة ويت وورث (*Whitworth*) المبينة في المخطط b في (الشكل-1-13) ، وهي تستعمل في المقاشط وبعض آلات قطع المعادن لتأمين الحركة سريعة الارتداد التي سنتطرق إليها لاحقاً .

أما التركيبة الآلية المبينة في المخطط c في (الشكل-1-13) فإنها تنتج من تثبيت الوصلة 3 ، حيث يؤدي دوران الوصلة 2 إلى حركة ترددية للوصلة 1 ضمن الوصلة 4 المتأرجحة حول المفصل الدوراني بينها والوصلة الثابتة 3 . تستعمل هذه التركيبة كأساس في المحرك متأرجح الأسطوانة ، وكذلك في تركيبة المرفق والذراع المشقوق لتأمين حركة سريعة الارتداد مشابهة للحالة b في (الشكل-1-13) .

أما المتحول الرابع الذي ينتج من تثبيت الوصلة المنزلقة 4 فلن نتطرق إليه نظراً لتضائل تطبيقاته العملية حالياً ، بعد أن كان يستعمل في المضخات اليدوية الترددية النطاحة وفي المضخات النواسة .

تجدر الإشارة إلى أنه أياً كانت الوصلة الثابتة ، فإن الحركة النسبية بين الوصلات كما هي دون تغيير ، أي إن لجميع متحولات سلسلة حركية ما الحركات النسبية نفسها ، بينما تتغير الحركات المطلقة لوصلاتها . يبقى هذا صحيحاً رغم أننا نضطر غالباً ، عند تطبيق متحول ما عملياً ، إلى تغيير شكل بعض الازدواجات أو وظيفتها ، أو تغيير نسب أبعاد بعض الوصلات بما يلائم المتطلبات العملية ؛ لأن أي متحول هو مشتق أساساً من سلسلة حركية مقيدة الحركة تقيداً تاماً .

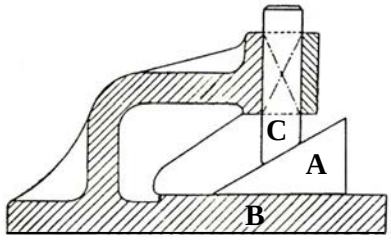
يتضح من تعريف السلسلة الحركية الوارد في الفقرة (1-5) أن توصيف حركة وصلة واحدة منها يحدد حركة بقية الوصلات ؛ وبالتالي فإن التركيبات الآلية المشتقة منها هي ذات درجة طلاقة واحدة ، وتسمى الوصلة التي تحدد حركة تركيبة ما بالوصلة القائدة . لكن هذا لا يعني بالضرورة أنه لا يمكن إنشاء تركيبات آلية ذات تطبيقات عملية انطلاقاً من سلاسل غير مقيدة . إلا أنه يجب في هذه الحالة توصيف حركة وصلتين أو أكثر ، وفق عدد درجات طلاقة السلسلة الأصلية ، لكي تحدد حركة بقية الوصلات . مثال ذلك ، التركيبة التفاضلية المستعملة في السيارات هي أساساً سلسلة ذات درجتي طلاقة ؛ وبالتالي يجب عند تصميمها حركياً توصيف حركة وصلتين فيها سرعة دوران عجلتين مثلاً ؛ لتحديد حركة بقية الوصلات .

تستعمل التركيبات ذات درجات الطلاقة المتعددة في عدة تطبيقات عملية ، منها دارات التحكم وأنظمة توليد التوابع الرياضية ، حيث تحدد الحركة عادة بأكثر من متغير مستقل واحد .

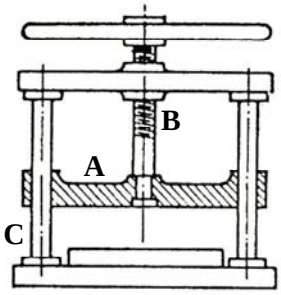
يجب إذن عند دراسة تركيبة ما تعيين عدد درجات طلاقتها ؛ وبالتالي تحديد الشروط التي ينبغي تحققها كي تكون هذه التركيبة قابلة للتطبيق عملياً . لقد تم ايجاد عدة علاقات لتعيين درجة طلاقة تركيبة ما بحسب عدد الوصلات المكونة لها عدد الازدواجات وعدد درجات الطلاقة التي يسمح بها كل من هذه الازدواجات ، لكن لكل من هذه العلاقات شروطاً محددة لتطبيقها بحيث لا يمكن - بوجه عام - اعتماد علاقة معينة لتشمل الحالات جميعها . تعد طريقة الإنشاء العددي التي وضعها الباحث كروبلير (*Grübler*) من أهم الطرائق المطبقة في هذا المجال نظراً لكونها الأكثر شمولية ، وبخاصة في دراسة تركيبات الحركة المستوية .

بينا في الفقرة (1-5) أن ثلاث وصلات بينها ازدواجات دورانية لا تشكل سلسلة حركية ؛ وإنما تكافئ وصلة صلبة واحدة . لكن يجب ألا يفهم من ذلك عدم وجود سلاسل حركية ؛ وبالتالي تركيبات آلية ، مكونة من ثلاث وصلات أو وصلتين فقط .

يبين (الشكل-1-14) مثالين لتركيبة آلية ذات ثلاث وصلات ، ففي الحالة a في (الشكل-1-14) لدينا ثلاثة ازدواجات انزلاقية بين الوصلات A , B , C ، بحيث إذا ثبتت الوصلة B وأعطيت إزاحة معينة للوصلة A فإن الوصلة C تتحرك بإزاحة محددة تتناسب مع الازاحة المعطاة ، وتسمى هذه التركيبة الإسفين .



(a)



(b)

a- ثلاث وصلات تشكل ثلاثة ازدواجات انزلاقية .

b- ثلاث وصلات تشكل ازدواجاً دورانياً ، وانزلاقياً ، وازدواجاً لولبياً .

(الشكل-1-14) تركيبات آلية ذات ثلاث وصلات .

أما الحالة b في (الشكل-1-14) فيمثل تخطيطاً لتركيبة مكبس يدوي لولبي حيث الازدواج A-B دوراني ، الازدواج A-C انزلاقي ، والازدواج B-C لولبي . إذا ثبتت الوصلة C وتم تدوير الوصلة B حول محورها ، فإن إزاحة الوصلة A بالنسبة إلى الوصلة C تتناسب مع دوران B .

كما يمكن لوصلتين بينهما ازدواج دوراني أن تشكلا تركيبة كالملفاف ، أو الرافعة البسيطة والمقص . أما إذا كان بينهما ازدواج انزلاقي ، فنحصل على المستوي المائل مثلاً ، وفي حالة ازدواج لولبي بين الوصلتين نحصل على تركيبة المرفاع اللولبي المستعمل لرفع السيارات .

1-6-1- أنواع التركيبات الآلية *Types of Mechanisms*

يفضل عادة تقسيم التركيبات الآلية وفق نمط حركتها:

- التركيبات الآلية المستوية *Plane mechanisms*

تتميز التركيبات الآلية المستوية بأن المحاور الدورانية جميعها فيها تكون متوازية ، وتتحرك كل نقاط التركيبة الآلية في مستويات متوازية ، وبشكل عام يمكن وصف حركة كل وصلة بأنها ذات بعدين .

- التركيبات الآلية الفراغية *Spatial mechanisms*

عندما لا تتم الحركة في مستويات متوازية ، فإنها تدعى بالحركة الفراغية وهي الحالة الأكثر عمومية ، وتكون المحاور الدورانية متصالبة . وتسمى التركيبة الآلية عندئذ بالآلية الفراغية أو الآلية ثلاثية الأبعاد . فالإنسان الآلي الصناعي هو آلية فراغية . وهناك حالة خاصة للآليات الفراغية تدعى بالآليات الكروية التي تتميز بأن كل محاورها الدورانية تتقاطع في نقطة واحدة .

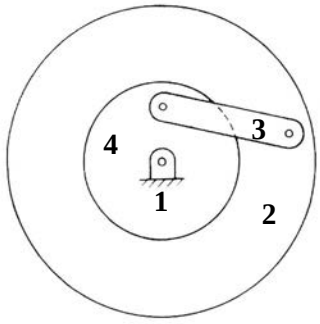
سنقتصر في هذا الفصل على دراسة الآليات المستوية ، لأن هذا النوع هو الأكثر استعمالاً في التطبيقات الميكانيكية والآلات المختلفة .

1-7- الآلة *Machine*

تتألف الآلة من تركيبة آلية واحدة أو مجموعة تركيبات آلية ، قادرة على نقل الطاقة أو تحويلها من مصدر الطاقة إلى المقاومة المراد التغلب عليها بغية أداء عمل معين . وبالتالي فإن الآلة يجب أن تقوم بنقل حركة نسبية محددة ، وبنقل الطاقة التي تزود بها من مصدر خارجي ، وفائدتها محصورة في قدرتها على تغيير الطاقة المعطاة لها ، وجعلها صالحة للقيام بغرض معين ، بينما في التركيبة الآلية نهتم فقط بقدرتها على نقل حركة معينة ، وقد لا تنقل كمية محسوسة من الطاقة ، بينما الآلة يجب أن تنقل كمية محسوسة منها ، فالآلة إذن هي التنفيذ العملي للتركيبة الآلية .

فالتركيبة الآلية المبينة في المخطط a في (الشكل-1-13) تحول الحركة الترددية للمكبس إلى حركة دورانية للمرفق ، لكنها تصبح آلة محرك الاحتراق الداخلي ، عندما تقوم بتحويل طاقة الضغط في الغازات الناتجة من الاحتراق إلى عمل ميكانيكي مفيد ينتقل بواسطة عمود المرفق . يتم ذلك نتيجة تأثير ضغط الغازات على المكبس بقوة تنتقل خلال ذراع التوصيل والمرفق لتدوير عمود المرفق بعزم يستفاد منه في أداء عمل معين .

قد يتساءل بعضهم عما إذا كان المحرك الكهربائي هو آلة من خلال المفهوم السابق ذكره ، في الواقع إنه يمثل حركياً تركيبة رباعية الوصلات تكافئ تلك المبينة في (الشكل-1-15) ، حيث يدور القرصان 2 و 4 حول محور مشترك ، ويتصل بعضهما ببعض عبر الوصلة القارنة 3 . في المحرك الكهربائي ، تماثل القطبية الدوارة في ملف التحريض القرص 2 ، بينما يعمل المجال المغناطيسي عمل الوصلة 3 ، ويكافئ المتحرض حركياً القرص المقود 4 .



(الشكل-1-15) تمثيل المحرك الكهربائي حركياً بتركيبة رباعية الوصلات .

من الواضح أن كل الآلات هي أساساً تركيبات آلية ، لكن العكس ليس من الضروري ؛ إذ إن بعض الأجهزة الدقيقة كالساعات والأجزاء الميكانيكية في أجهزة القياس والآلات الكاتبة وغيرها ، تقع وفقاً للتعريف على الحد الفاصل بين الآلات والتركيبات الآلية . لكنه من الأكثر ملاءمة تصنيف هذه الأجهزة كتركيبات آلية ؛ لأنها تنقل طاقة صغيرة جداً تكفي فقط للتغلب على الاحتكاك ، ولإعطاء الحركة النسبية المطلوبة ، أي: إن العمل المفيد هو تغيير الأوضاع النسبية للأجزاء دون الحاجة إلى أداء عمل خارجي . فالآلة إذن ، بمفهومها العملي ، يجب أن تنقل كمية محسوسة من الطاقة كافية لأداء عمل خارجي معين ، وللتغلب على المقاومات المؤثرة في أجزائها المتحركة .

1-8- درجات طلاقة السلاسل الحركية *Kinematic Chain Degrees of Freedom*

يمكن توضيح الأسس المتبعة في تحديد عدد درجات طلاقة سلسلة حركية ؛ وبالتالي تركيبة آلية ، استناداً إلى كون درجة طلاقة مجموعة ما من الازدواجات الحركية تساوي عدد الإحداثيات المكانية المستقلة التي تحدد وضع المجموعة المتكاملة بالنسبة إلى جملة إحداثيات ثابتة تمثل مستوي الإسناد الثابت .

إذا كان عدد الأجسام الصلبة أو الوصلات المكونة للمجموعة الحركية هو n ، فإنه يكون لكل جسم منها لو فرضنا أنه يتحرك حركة طليقة b درجة طلاقة ، حيث b هو عدد الإحداثيات التي تحدد وضع الجسم وهو في حالة الحركة الفراغية ($b = 6$) ، وفي الحركة المستوية ($b = 3$) كما ورد في الفقرة (1-2) . ينتج من ذلك أن درجة طلاقة مجموعة أجسام تتحرك جميعها بطلاقة هي ($b . n$) .

إلا أنه في حالة سلسلة تحوي ازدواجات أو وسائل تربط هذه الأجسام بعضها بعضاً ؛ وبالتالي تقيد هذه الازدواجات حركة السلسلة بحيث ينقص عدد درجات الطلاقة تبعاً لعدد القيود الحركية عند كل ازدواج C_i ، ويصبح عدد درجات طلاقة السلسلة F ، هو:

$$F = b . n - \Sigma C_i \qquad (1\text{-}1)$$

أي بمعنى آخر تصبح درجة طلاقة كل ازدواج f_i مساوية عدد الإحداثيات في الحركة الطليقة مطروحاً منه عدد القيود الحركية عند كل ازدواج C_i ، ومنه فإن:

$$f_i = b - C_i \qquad \Rightarrow \qquad C_i = b - f_i \qquad (2\text{-}1)$$

وفي حالة تثبيت إحدى وصلات السلسلة فإن عدد الوصلات المتحركة عبر الازدواجات يصبح $(n - 1)$ ، حيث يمكن كتابة العلاقة التالية عندئذ:

$$F = b(n-1) - \Sigma(b - f_i) \qquad (3\text{-}1)$$

إن العلاقة (3-1) صحيحة في حالة كون درجة طلاقة الازدواجات مستقل بعضها عن بعض ، إلا أنه يحدث أحياناً وجود شروط خاصة لحركة السلسلة بحيث تصبح درجة طلاقة السلسلة أو التركيبة الآلية غير مستقلة تماماً . يمكن أن يتم ذلك عند:

1. انطباق درجات الطلاقة عند الازدواجات بعضها على بعض .
2. وجود أوضاع خاصة لمحاور الازدواجات .
3. وجود أبعاد خاصة للوصلات .

يجب في هذه الحالة إنقاص عدد درجات الطلاقة F للسلسلة تبعاً لعدد هذه الشروط الخاصة وليكن F_d ، حيث يصبح عدد درجات الطلاقة المستقلة ($F\text{-}F_d$) .

استناداً إلى هذا التحليل استنتج الباحث كروبلير (*Grübler*) علاقات عددية لتعيين درجة طلاقة التركيبات الآلية ، حيث تعد هذه العلاقات من أهم الأسس المستعملة في الإنشاء العددي (*Number Synthesis*) للحصول على تركيبات مقيدة تقيداً تاماً ، أو بمعنى آخر تحديد عدد الوصلات التي يلزم تصميم التركيبة على أساسها تبعاً لعدد المعطيات الحركية .

سنبين هنا هذه العلاقات في حالة تركيبات ذات ازدواجات دورانية وانزلاقية فقط ، أي ازدواجات سفلية ، وفي حالة وجود ازدواجات عليا في التركيبة .

1-8-1- تركيبات آلية ذات ازدواجات دورانية وانزلاقية

Turning and Sliding Pair Mechanisms

نعلم أن تقييد الحركة المستوية بازدواج دوراني أو انزلاقي يبقي على درجة طلاقة ($f_i = 1$) للازدواج ، حيث تعين الحركة عندئذ بإحداثي مكاني واحد فقط ، دوران أو انزلاق . فإذا كان عدد الازدواجات الدورانية والانزلاقية معا هو p ، فإنه ينتج من المعادلة (1-3) أن درجة طلاقة التركيبة في هذه الحالة ، هي:

$$F = 3(n-1) - 2p \qquad (4\text{-}1)$$

على أساس أن حركة التركيبة مستوية ($b = 3$) . أما في حالة التركيبات الفراغية ($b = 6$) فإن عدد درجات طلاقة الازدواجات الكروية هو ($f_i = 3$) ، ويمكن حساب درجة طلاقة تركيبة فراغية عندئذ بالتعويض من قيم b , f_i في المعادلة (1-3) .

يمكن تطبيق المعادلة (1-4) مباشرة في تركيبة مستوية عند عدم وجود ازدواجات مضاعفة ، أي عدم وجود أكثر من وصلتين يتصل بعضهما ببعض عند كل ازدواج . إن وجود ازدواج مضاعف يضع قيداً أو قيوداً ، بحسب عدد الوصلات المتصلة به ، يجب حسابها عند تعيين F .

يكافىء الازدواج المضاعف وجود شروط خاصة يجب تعيينها . إلا أن أبسط طريقة لتعيين درجة طلاقة التركيبة F في مثل هذه الحالة هي تطبيق المعادلة (1-4) مع الانتباه إلى أن العدد p هو العدد الفعلي للازدواجات البسيطة ، وليس العدد الظاهري في المخطط الحركي . ينتج من ذلك أن ازدواجاً مضاعفاً يصل بين ثلاث وصلات هو في الواقع ازدواجان بسيطان منطبقان ، بينما في حالة أربع وصلات فهو ثلاثة ازدواجات بسيطة .

مثال ذلك إذا أردنا تعيين درجة طلاقة تركيبة بوسولييه (*Peaucellier*) لتوليد حركة مستقيمة صحيحة المبينة لاحقاً في (الشكل-2-16) ، فإننا نجد أن ($n = 8$) ، أما عدد الازدواجات البسيطة فهو 2 ، بينما عدد الازدواجات المضاعفة التي يصل كل منها بين ثلاث وصلات فهو 4 ، أي: إنه يكافىء عدد 8 ازدواجات بسيطة بحيث يصبح العدد ($p = 10$) عند تطبيق المعادلة (1-4) ، ونحصل على:

$$F = 3(8-1) - 2\times 10 = 1$$

وهذا متوقع لأن هذه التركيبة تنتج من سلسلة مقيدة تقيداً تاماً ($F = 1$) . أما في حالة آلية المنساخ المبين لاحقاً في (الشكل-2-24) ، فإن عدد الازدواجات البسيطة المكافىء هو ($p = 8$) وعدد الوصلات ($n = 5$) بحيث ينتج أن ($F = 2$) . إلا أنه يجب الانتباه إلى تقييد إضافي عند التطبيق العملي لهذه التركيبة ، وهو تحديد إحدى النقطتين D أو F بالتحرك على مسار معين ؛ مما يؤدي إلى ($F = 1$) .

تجدر الإشارة إلى أن التركيبات الآلية التي سيتم التعرض إليها من خلال مجمل الفصول اللاحقة هي بشكل عام ذات درجة طلاقة واحدة . أما التركيبات التفاضلية فهي تصمم أساساً للمفاضلة بين قيمتين ، أي: إن استثمارها عملياً يستلزم ($F = 2$) .

2-8-1- تركيبات آلية ذات ازدواجات علوية *Higher Pairing Mechanisms*

نعلم أن الازدواج العلوي يقيد بشكل عام إحداثياً واحداً للحركة ، وبالتالي فإن أغلب أشكال هذه الازدواجات ذات ($f_i = 2$) ، كما أننا أوضحنا ضرورة تطبيق إغلاق قسري للحفاظ على التماس بين الوصلتين في أغلب التطبيقات العملية لهذه الازدواجات . وبالتالي فإن الازدواجات العلوية تحسب عند تعيين درجات الطلاقة على أساس أن درجة طلاقتها ($f_i = 2$) ، إضافة إلى إنقاص عدد الشروط الخاصة F_d ، اللازمة لتحقيق الحركة الصحيحة إن وجدت ، من العدد F المحسوب وفقاً للمعادلة (1-3) ، أي: إن في الحركة المستوية:

$$F = 3(n-1) - 2p_1 - p_2 - F_d \qquad (5\text{-}1)$$

حيث :

p_1 تمثل عدد الازدواجات الدورانية والانزلاقية في التركيبة .

P_2 تمثل عدد الازدواجات العلوية .

يلاحظ عند تطبيق المعادلة (1-5) على كامة قرصية ذات تابع دحروجي المبينة لاحقاً في الفقرة (6-11-1) أن عدد الوصلات ($n = 4$) وهي الهيكل ، والكامة ، والدحروج ، والتابع ، وأن ($p_1 = 3$) و ($p_2 = 1$) ، أما ($F_d = 1$) ؛ لأن الدحروج مقيد بالدوران حول محوره دوماً ، حيث ينتج في هذه الحالة أن:

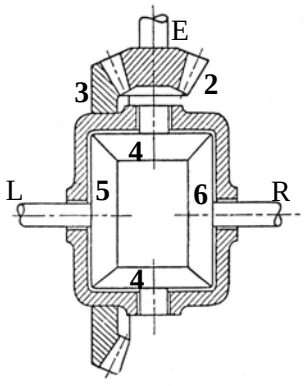
$$F = 3(4-1) - 2\times 3 - 1 - 1 = 1$$

لتفادي الخطأ أو السهو عند تحديد F_d ، يفضل عادة ، تعيين درجة طلاقة تركيبة ذات ازدواج علوي انطلاقاً من التركيبة المكافئة لها حركياً ، والتي تحوي ازدواجات دورانية وانزلاقية فقط وفق الفقرة (6-16) .

إن تحليل الباحث كروبلير (*Grübler*) والعلاقات التي استنتجها تخضع عند تطبيقها إلى شروط تتعلق ببنية التركيبة ، حيث يجب حساب الوصلات الحركية فقط ، أي تلك اللازمة لأداء الحركة وإهمال الوصلات والازدواجات التي قد تضاف لتأمين متانة للمجموعة مثلاً ، كما في حالة الجهاز التفاضلي المبين في (الشكل-1-16) حيث يجب إهمال أحد المسننين 4 والازدواجات المتصلة به ؛ إضافة إلى إهمال ازدواج الذراع 3 مع أحد المحورين R ، أو L لعدم الضرورة الحركية لهذه الإضافات ؛ وبالتالي فإن درجة طلاقة الجهاز التفاضلي في (الشكل-1-16) ، هي:

$$F = 3(6-1) - 2\times 5 - 1\times 3 = 2$$

وهذا متوقع لأنه تركيبة تفاضلية فيها ($n = 6$) , ($p_1 = 5$) , ($p_2 = 3$) ، حيث الازدواجات الدورانية هي بين (1-5 , 3-5 , 1-6 , 3-4 , 1-2) ، والازدواجات العلوية هي بين المسننات (2-3 , 4-5 , 4-6) ، ولا توجد شروط خاصة .

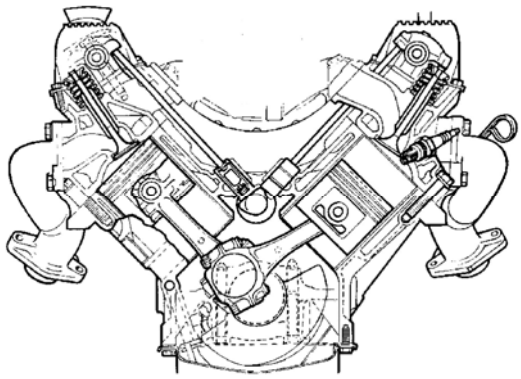


(الشكل-1-16) جهاز تفاضلي يستعمل في المركبات الآلية .

يتضح مما تقدم أنه رغم بساطة العلاقات ، إلا أنه يجب تطبيقها بحذر وبعد دراسة جيدة لحركة التركيبة لتدارك أية شروط تقييد خاصة ممكنة ، ولتحديد درجة طلاقة كل ازدواج بخاصة في حالة الازدواجات العلوية .

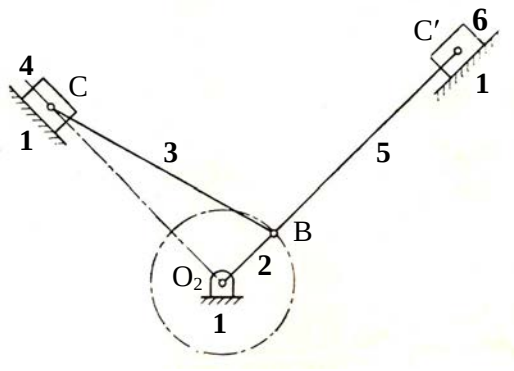
1-9- المخطط الحركي *Kinematic Diagram*

يبين (الشكل-1-17) مقطعاً رأسياً في محرك احتراق داخلي على شكل V . يلاحظ من هذا الشكل وجود عدة أجزاء في هذا المحرك لا تؤثر في تحليل الحركة الدورانية لعمود المرفق الناتجة من الحركة الترددية للمكابس ؛ لذا يفضل غالباً عند دراسة حركة آلة ما ، تمثيل أجزائها تخطيطياً على مخطط يبين المعلومات الهندسية اللازمة جميعها لتحديد الحركات النسبية بين هذه الأجزاء التي هي ، في الواقع وصلات التركيبة المستخدمة في تحقيق عمل الآلة . يسمى هذا المخطط بـــ المخطط الحركي ، أو كما تسميه بعض المراجع بـــ المخطط الهيكلي (*Skeleton Diagram*) .



(الشكل-1-17) مقطع رأسي في محرك احتراق داخلي على شكل V .

يمكن إذن - استناداً إلى مفهوم المخطط الحركي - تحليل حركة المحرك المبين في (الشكل-1-17) عن طريق مخطط بسيط وواضح يتم في البداية ترقيم وصلات المحرك كما في (الشكل-1-18) ، حيث تمثل الأجزاء الثابتة في المحرك كافة ، مثال ذلك جسم الأسطوانات وحوض عمود المرفق ، بالوصلة 1 المرقنة عرضيا أي المهشرة . أما الوصلة 2 فإنها تمثل عمود المرفق حيث الطول O_2B هو طول المرفق ، بينما يمثل الذراع التوصيل بالوصلة 3 والمكبس بالوصلة 4 ، آخذين بالحسبان أن البعد BC يساوي طول ذراع التوصيل . يستكمل المخطط برسم الوصلة 5 لتمثل ذراع التوصيل الآخر حيث ($BC = BC'$) ، وكذلك الوصلة 6 التي تمثل المكبس الآخر .



(الشكل-1-18) المخطط الحركي لمحرك احتراق داخلي على شكل V .

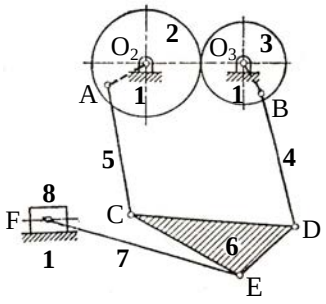
من الواضح أن المخطط في (الشكل-1-18) ، على ما فيه من بساطة يبين طبيعة الحركات النسبية الحاصلة بين مختلف أجزاء المحرك ، كما يبين الأوضاع النسبية جميعها والأبعاد العائدة للوصلات التي تؤثر في تحديد الحركة من حيث الإزاحة ، السرعة والتسارع .

يحدد وضع المرفق 2 ، في كل وضع من الأوضاع المراد دراستها ، بزاوية ميله على محور إحدى الأسطوانتين ؛ إذ إن الزاوية بين محوري الأسطوانتين ثابتة أساساً ولا تتغير خلال كامل مجال الحركة . يكفي بعدئذ معرفة طول كل من المرفق وذراع التوصيل لرسم المخطط الحركي للمحرك عند أي وضع من أوضاع المرفق .

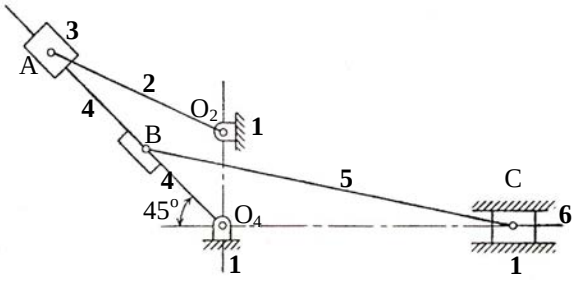
يلاحظ من ذلك أننا لا نحتاج إلى أية معلومات أخرى من حيث حجم الأسطوانة وشكلها أو أية أبعاد أخرى ؛ إضافةً إلى عدم حاجتنا إلى الدخول في تفاصيل أوضاع الأجزاء الثابتة وأبعادها المتصلة بها كافةً .

يرسم المخطط الحركي عادة بمقياس رسم مناسب وتوضح عليه الأبعاد اللازمة للتحليل الميكانيكي ، دون الحاجة إلى بيان الأبعاد الأخرى لهذه الوصلات كالسماكة أو العرض وغير ذلك مما لا يؤثر في الحركات النسبية بين الوصلات . يحدث أحياناً أن تحوي الآلة أكثر من تركيبة واحدة حيث يلزم عندئذ رسم مخطط حركي لكل واحدة منها . مثال ذلك نجد أن المحرك في (الشكل-1-17) يحوي لكل أسطوانة تركيبة تابع وكامة لفتح صمام الدخول وإغلاقه وأخرى لصمام العادم . أما إذا كانت التركيبات متماثلة فإنه يكتفي برسم مخطط حركي واحد لها .

يمكن توضيح أغلب الرموز في إنشاء المخطط الحركي لآلة من خلال المخططين a و b المبينين في (الشكل-1-19) . ليس من الضروري تمثيل الوصلة الثابتة إلا بجوار الازدواجات المتصلة بها ، حيث يكتفى برسم خط مستقيم قصير وترقين أي تهشير عرضي ، كما هو مبين في حالة الوصلة 1 . إذا اتصلت الوصلة الثابتة بازدواج دوراني ، فإنها تمثل كما في O_4 , O_3 , O_2 ، بينما إذا اتصلت بازدواج انزلاقي فإنه يكتفى بالخط المرقن ، أو يُرسَم خطان متوازيان مع ترقين ، كما عند C في المخطط الحركي b . تمثل الوصلة المتصلة بازدواجين دورانيين بخط مستقيم يصل بين محوري الازدواجين ، مثال ذلك الوصلات 7 , 5 , 4 في المخطط الحركي a ، والوصلتين 5 , 2 في المخطط الحركي b في (الشكل-1-19) .



(a)



(b)

(الشكل-1-19) مخططات حركية لتركيبات آلية .

أما الوصلة المنزلقة ، فإنها تمثل بمستطيل صغير ينطبق طوله على الازدواج الانزلاقي أو يوازيه كالوصلة 8 في المخطط الحركي a ، والوصلتين 6 , 3 في المخطط الحركي b في (الشكل-1-19) . لكن إذا اتصلت وصلة بثلاثة ازدواجات أو أكثر ، ليست على استقامة واحدة ، وتدعى بالوصلة المركبة ، فإنها تمثل بالشكل الهندسي الناتج من وصل محاور الازدواجات ؛ إضافةً إلى ترقين السطح الممثل للوصلة عرضياً ، كما في حالة الوصلة 6 في المخطط الحركي a في (الشكل-1-19) .

أما إذا كانت الازدواجات المرتبطة بالوصلة المركبة على استقامة واحدة ، فإنها تمثل كالوصلة 4 في المخطط الحركي b في (الشكل-1-19) ، حيث يشير المستطيل الصغير B إلى استمرار كون الوصلة 4 وصلة واحدة ، رغم اتصالها بازدواج دوراني مع الوصلة 5 .

أما الوصلات التي تحوي ازدواجات عليا ، فإنها تمثل عادةً في المخطط الحركي بإسقاط شكلها الحقيقي على مستوي الحركة ؛ وبخاصة في حالة الكامات وتوابعها . إلا أن المسننات تمثل في أغلب الحالات بمسقط دوائر الخطوة العائدة لها على مستوي الحركة ، مثال ذلك المسننات 3 , 2 في المخطط الحركي a في (الشكل-1-19) . يجب الانتباه إلى أن كلاً من الخطين المتقطعين O_2A , O_3B في المخطط الحركي a لا يمثل أية وصلة إضافية ؛ وإنما يفيد فقط في تعيين أوضاع الازدواجات عند رسم المخطط الحركي .

تجدر الإشارة إلى أننا قد بينا هنا مجمل وسائل التمثيل الحركي للمكونات التي تصادف في أغلب التطبيقات ، آخذين بالحسبان أن الفقرات اللاحقة ستتيح التعرف إلى نماذج أخرى من المخططات الحركية .

يتضح لنا من هذا العرض الموجز لأهم المفاهيم المؤثرة في التحليل الميكانيكي للآلات أن حركات أجزاء الآلة المختلفة ؛ وبالتالي القوى المؤثرة فيها ، يتعلق كلياً بالأوضاع النسبية للازدواجات ، ولا تأثير مطلقاً لحجم الوصلات المكونة لها وأشكالها ؛ إذ إن هذه الازدواجات ، هي التي يتم بوساطتها نقل الحركات والقوى أو تحويلها من مصدر الطاقة الخارجي إلى مأخذ العمل المطلوب تنفيذه ؛ لذا فإننا عند تحليل الحركات والقوى في الآلات ، نكتفي بالمخطط الحركي للأجزاء دون الاهتمام بمسائل تصميم أجزاء الآلة وتصنيعها .

إن مفهوم التركيبة العكسية أو المتحول لسلسلة حركية ذو أهمية بالغة في التحليل الميكانيكي ؛ إذ إن معرفة العلاقات الحركية بين وصلات سلسلة ما تحدد بشكل كامل حركات المتحولات جميعها الناتجة منها ؛ لأن انعكاس التركيبة لا يغير على الاطلاق الحركات النسبية بين وصلات السلسلة الأصلية . كما أن مفهوم التكافؤ الحركي - أي تساوي ميزات حركة وصلتين أو تركيبتين مختلفتين - يساعد كثيراً في تحليل بعض الآلات المعقدة .

لذا فإن تطبيق هذه المفاهيم يبسط الدراسة جداً ، ويوفر الوقت المهدور في دراسة تركيبات عدّة متكافئة حركياً ؛ إذ ليس من الضروري عندئذ تكرار التحليل ؛ وإنما يكفي فقط تحليل السلسلة الأصلية لهذه التركيبات .