

الباب الأول

مدخل في علم مقاومة المواد

1.1 طبيعة علم مقاومة المواد

2.1 الفرضيات الأساسية

3.1 المفاهيم الأساسية

1.3.1 القوى الخارجية

2.3.1 عزوم القوى

3.3.1 الإزاحة والانفعال

4.3.1 طريقة القطاعات

5.3.1 الأجهـاد

4.1 النظام العالمي لوحدات القياس

5.1 أنظمة وحدات قياس أخرى

6.1 التطبيقات الهندسية وطرق الحل

1.1 طبيعة علم مقاومة المواد

يعتبر علم مقاومة المواد (Strength Materials) أحد فروع العلوم الطبيعية، الهدف منه شرح طرق حساب استقرار ومتانة وصلادة أجزاء الإنشاءات والآلات والمكائن الهندسية المختلفة. والتي من خلالها يتم معالجة وحل معظم القضايا الهندسية المختلفة عند بناء وتصميم هذه الإنشاءات.

وبدقة أكثر هو ذلك العلم الذي يعني بصياغة العلاقات والنظريات اللازمة للاستقرار ومتانة وصلادة أجزاء الإنشاءات الهندسية المختلفة، والتي يجب أن تتصف عند تصميمها بالمقاومة المطلوبة عند تأثير القوى الخارجية المسطحة عليها. ونتيجة للأبحاث العلمية التجريبية الشاملة والدراسة العميقة للخبرات المتراكمة، واستثمار الإنشاءات الهندسية المختلفة فقد تطور هذا العلم تطوراً كبيراً، وأستخدم بنجاح في السعي إلى الاقتصاد في المواد الأولية المستخدمة في الإنشاءات المختلفة وذلك عن طريق الدراسة الكاملة والعميقة لخواص هذه المواد المستعملة ولطبيعة الأحمال المؤثرة عليها.

وما نشهده اليوم من تقدم علمي تكنولوجي كبير في شتى المجالات الهندسية التطبيقية المختلفة ما هو إلا ثمرات البحث العلمي المنظم في كافة العلوم الهندسية والذي يعتبر علم مقاومة المواد واحد منها.

2.1 الفرضيات المستخدمة

تستخدم في علم مقاومة المواد كما في العلوم التطبيقية الأخرى بعض "الفرضيات المبسطة" والمتعلقة بخواص وصفات المواد، وطبيعة الأحمال المختلفة المؤثرة عليها، حيث يتم الاستناد عليها لمعالجة الكثير من الحسابات والقضايا التصميمية المتعلقة بهذا العلم. وذلك نظراً لظهور صعوبات عديدة عند إجراء حساب أجزاء المنشآت الهندسية المختلفة.

وقد أثبتت التجارب والأبحاث العلمية التي حصل عليها نتيجة استخدام هذه الفرضيات أن استخدامها يؤدي إلى انحرافات ضئيلة وقليلة جداً بحيث يمكن إهمالها في التطبيقات والحسابات العملية. وسنقوم بعرض أهم هذه الفرضيات:-

الفرضية الأولى:

تتضمن عدم أخذ التركيب الذري للأجسام بالاعتبار، أن لمادة الجسم تركيب أصم متماسك (Solidity) وقد أثبت التجارب العلمية صحة هذه الفرضيات بالنسبة للمواد الإنشائية (البنائية) والمكونة من حبيبات دقيقة وكثيرة بحيث يمكن اعتبارها متماسكة دون انقطاع، وحتى بالنسبة للمواد مثل الخشب والحجر والخرسانة فإن الحسابات المعتمدة على تماسك موادها تعطى في النواحي العملية نتائج مرضية. ويفسر هذا بأن أبعاد الأجزاء الحقيقية هي أكبر بكثير من المسافات يبين الذرات.

الفرضية الثانية:

تعتبر أن مادة الجسم متجانسة، بمعنى أن الخواص في جميع نقاط الجسم واحدة. حيث يلاحظ أن المعادن ذات خواص متجانسة جداً أي أن جميع نقاط الجسم لها نفس الخاصية عملياً. أما بالنسبة للخشب والخرسانة والبلاستيك والحجر فأنها تعتبر أقل تجانساً ومع ذلك فقد أظهرت التجارب العملية بأن الحسابات المستندة على افتراض التجانس لمادة الجسم تعطى نتائج مقبولة ومرضية للمواد الإنشائية المختلفة.

الفرضية الثالثة:

تعتبر أن مادة الجسم مشابهة الخواص (Isotropic)، أي أن خواص المادة هي واحدة في جميع الاتجاهات، مع أن التجارب المخبرية أظهرت أن خواص جميع المواد لا تتساوى في جميع الاتجاهات وتكون مختلفة على مستوى

بلورات المادة، ولكن على مستوى أجسام أكبر بكثير من حجم البلورات فإن خواصها تتوازن تقريباً في الاتجاهات المختلفة ويرجع سبب ذلك إلى أن طبيعة تركيب الجسم تحتوي على كميات كبيرة من البلورات بشكل غير منتظم. بالنسبة لبعض المواد مثل البلاستيك والخشب والخرسانة فإن الفرضية المذكورة تطبق بصورة تقريبية فقط حيث تتباين خواصها بشكل ملحوظ وتسمى مثل هذه المواد بالمواد المتباينة الخواص.

الفرضية الرابعة:

لا يوجد في الجسم أية قوى داخلية أولية قبل وضع الاحمال الخارجية عليه، أن هذه الفرضية لا تنطبق على أية مادة كانت ففي الخشب مثلاً توجد قوى داخلية نشأت بفعل التيبس غير المنتظم، وفي الخرسانة خلال عملية التجمد، وفي الأجزاء الفولانية بفعل التبريد غير المنتظم أيضاً وغيرها. وعادة لا تكون مقادير هذه القوى معروفة للمصمم غير أنه يسعى لتقديرها عن طريق التجارب في الحالات التي يقدر فيها بأن هذه القوى قد تكون كبيرة ولا يمكن إهمالها.

الفرضية الخامسة:

اعتماد مبدأ التراكب (Superposition) والذي يتضمن أنه إذا أثرت مجموعة من القوى على جسم ما فإن تأثيرها على هذا الجسم يساوي مجموع نتائج تأثيرات القوى المكونة لها على نفس الجسم بالتوالي وبأي ترتيب كان. نتائج التأثيرات يقصد بها التشوه والقوى الداخلية التي قد تظهر في الجسم والإزاحة التي تتعرض لها نقاط الجسم على إنفراد.

أن مبدأ التراكب يستخدم بكثرة في الميكانيكا النظرية للأجسام المطلقة الصلابة، وبالنسبة للأجسام التي تتشوه تستعمل في حالتين فقط وهي:-

- 1- عندما تكون إزاحة نقاط تأثير القوى صغيرة بالمقارنة مع أبعاد الجسم.
- 2- وعندما تكون الإزاحة الناتجة عن تشوه الجسم مرتبطة بعلاقة خطية مع القوى المؤثرة وتسمى هذه الأقسام ذات التشوه الخطي.

الفرضية السادسة :

وتسمى هذه الفرضية عادة بمبدأ سين - فينان ، وتستخدم هذه الفرضية بشكل واسع في العلوم الميكانيكية ويتضمن المبدأ أنه إذا كانت النقاط الواقعة في جسم ما تبعد عن نقاط تأثير الأحمال على ذلك الجسم بما فيه الكفاية فإن القوى الداخلية الناشئة فيها تعتمد على طبيعة الأحمال اعتماداً ضئيلاً . حيث يسمح هذا المبدأ في معظم الحالات باستبدال نظام قوى بأخر مكافئ له أساتيكيًا بأمكانه تسهيل الحسابات .

أن هذه الفرضيات المذكورة هي فرضيات عامة الهدف منها كما أشرنا سابقاً تسهيل الحسابات عند إجراء حسابات أجزاء الإنشاءات المختلفة وان استخدامها يؤدي إلى أخطاء قليلة جداً ، بحيث يمكن إهمالها في النواحي والأغراض العلمية.

3.1. المفاهيم الأساسية

كما في أي علم آخر تستخدم في علم مقاومة المواد مفاهيم ومصطلحات وتعريف لا بد من التعرض لها قبل البدء في دراسة هذا العلم وسنقوم بالتعرف على المفاهيم الأساسية منها :-

1.3.1 القوى الخارجية

تعتبر الحمولات التي تؤثر على المنشآت أو على أجزائها المختلفة قوى أو مزدوجات قوى (عزوم) أو أنظمة قوى أخرى مكافئة لها . ويجدر الإشارة إلى أن القوى الخارجية (الحمولات) العاملة يمكن بحثها أما مركزة أو موزعة .

القوى المركزة (Force Concentrated) لا وجود لها عملياً في الطبيعة، والقوى الحقيقية هي تلك القوى الموزعة على بعض المساحات والحجوم للمنشآت الهندسية المختلفة. وتقسم الحمولات الموزعة إلى أنواع مختلفة أهمها:

1. الحمولات الموزعة بانتظام (Uniformly Distributed Load)

2. الحمولات المتغيرة بانتظام (Uniformly Varying Load)

أن النوع الأول الحمولة الموزعة بانتظام تكون على شكل مستطيل ومن الأمثلة على ذلك وزن عتبة مسندة إسناداً بسيطاً حيث يعتبر وزن العتبة (W) حمولة موزعة بانتظام على المتر الطولي لهذه العتبة.

أما النوع الثاني الحمولة الموزعة والمتغيرة بانتظام وتكون هذه الحمولة عادة على شكل مثلث ومن الأمثلة على هذا النوع من الحمولات، الحمولات المؤثرة على العتبات والبلاطات للأبنية المختلفة، الحمولات المؤثرة على الجدران الرأسية والمائلة للخزانات المحتوية على السوائل وغيرها.

واستناداً إلى الفرضية السادسة أو ما يسمى "بمبدأ سين-فينان" المشار إليه سابقاً ولتسهيل الحسابات يمكننا أستبدال الحمولات الموزعة بأخرى مركزة مساوية لها في قوة تأثيرها .

وتقاس الحمولات الموزعة بوحدات القوة، المنسوبة إلى وحدة الطول أو وحدة السطح أو الحجم ويمكن أن تكون الأحمال المركزة أو الموزعة أستايتيكية (ثابتة) أو ديناميكية (حركية).

أن الحمولات الاستايتيكية هي الحمولات التي تغير مقاديرها اونقاط تأثيرها أو اتجاهها بسرعة ضئيلة جداً بحيث يمكن إهمال التسارع واهتزاز المنشآت تحت تأثير مثل هذه الحمولات.

أما الحمولات الديناميكية فهي تلك الحمولات التي تتغير مع الزمن بسرور

كبيرة، ويصاحب ذلك ظهور اهتزاز في المنشآت. وفي حالات خاصة يمكن أن يحمل تغيير الحمولة طابعاً دورياً تكرارياً بحيث تتكرر القيمة العظمى للحمولة خلال مدة معينة.

وفي حالات كثيرة أخرى لا يكون لتغيير الحمل مع الزمن طبيعة ثابتة كالحمولات التي تؤثر على أجزاء السيارات والمكائن، والحمولات التي تؤثر على المنشآت والمباني المختلفة من ضغط الرياح والتلوج وغيرها وتسمى مثل هذه الحمولات بالحمولات المكررة للأنظمة غير المثبتة.

ويجب الإشارة إلى أنه لا يمكن دراسة مثل هذه الحمولات بشكل عميق إلا بمساعدة الطرق الاستاتيكية ونظرية الاحتمالات التي تستعمل عند دراسة المقادير العفوية.

أن حساب الحمولات بشكل دقيق مهم جداً حيث يعمل على تنظيم الظروف اللازمة للتصميم فمثلاً عند حساب أجزاء سيارة ذات حمولة أربعة أطنان يجب الأخذ بالاعتبار أن الحمولة الحقيقية يجب أن تساوي أربعة أطنان فإذا زادت قابلية السيارة على تحمل مقدار أكثر من هذا فذلك يرجع إلى أن أبعاد مقاطع الأجزاء حسبت مع بعض احتياطي المتانة. وسنأتي على ذكر ذلك بصورة مفصلة في الأبواب القادمة من هذا الكتاب.

2.3.1. عزوم القوى

إذا أثرت قوة ما على جسم بحيث تدفع الجسم للدوران حول أي محور لا يقطع خط عمل هذه القوة ولا يكون موازياً لها، فإن هذا الدافع للدوران يسمى بعزم القوى (Moment of a force)، ويرمز له بالرمز (\vec{M}) ويصطلح عليه عادة بعزم الدوران.

لنفرض أن القوة (\vec{F}) تؤثر على جسم في نقطة مثل (A) ، كما هو مبين في الشكل (1-1).

فإن عزم هذه القوة حول نقطة ثابتة اختيارية مثل (O) يمكن الحصول عليه باستخدام ما يعرف بحاصل الضرب المتجهي حسب العلاقة التالية:

$$\vec{M}_O = \vec{r} \times \vec{F} \dots\dots\dots (1.1)$$

حيث :-

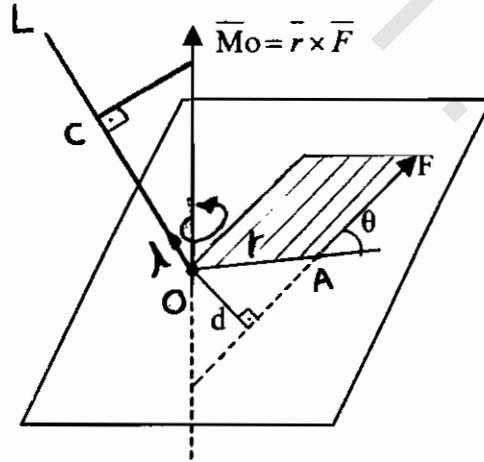
\vec{M}_O : عزم القوة F حول النقطة O

\vec{r} : متجه الموضع وهو الخط الواصل بين نقطة تأثير القوة على الجسم (A)

والنقطة المراد إيجاد العزم حولها (O).

\vec{F} : القوة المؤثرة على الجسم .

أن عزم أي قوة هي كمية متجهة وتكون عمودية على المستوى الذي يجمع القوة F ومتجه الموضع \vec{r} . وأما اتجاه العزم فيحدد حسب قاعدة اليد اليمنى وتطبق هذه القاعدة "بوضع أصابع اليد اليمنى باتجاه القوة F وفتح الإبهام بحيث يكون عمودياً على باقي الأصابع ثم حني الأصابع بالاتجاه الذي تحاول فيه القوة F أن تنور حول النقطة O وبهذا سيكون اتجاه العزم بالاتجاه الذي يؤشر فيه الإبهام .



الشكل (1-1) عزوم القوة F حول النقطة O

وكما أشرنا سابقاً عند تعريف حاصل الضرب المتجهي لمتجهين ، بأن اتجاه ناتج حاصل الضرب المتجهي عمودي على المستوى الذي يحتوي القوة F ، ومتجه الموضع r وأن الترتيب هنا مهم حيث أن :

$$M_o = r \times F = -(F \times r)$$

أما بالنسبة للقيمة القياسية لها العزم (Magnitude of the Moment) فيمكن الحصول عليها كما يلي :

$$M_o = F \cdot d \dots\dots\dots(2.1)$$

حيث أن :

d : تمثل المسافة العمودية من النقطة المراد إيجاد العزم حولها (o) إلى خط تأثير القوة F ، كما هو مبين في الشكل (1-1) .

ونلاحظ أن المسافة (d) هي عبارة عن المركبة العمودية لمتجه الموضع r حيث :

$$d = r \sin \theta$$

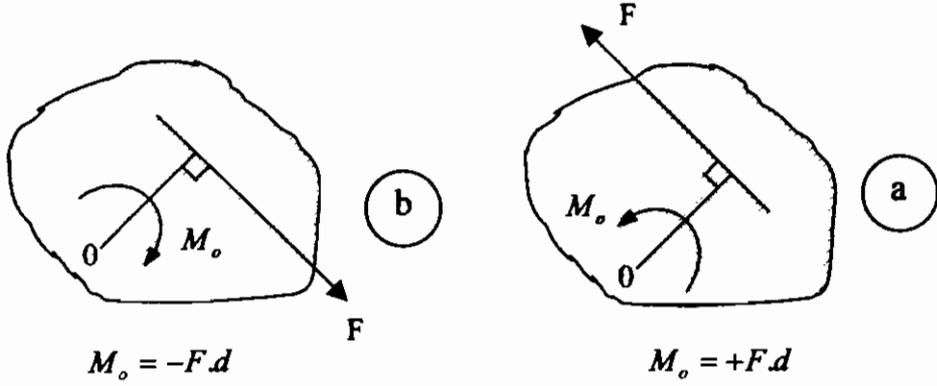
θ - هي الزاوية المحصورة ما بين القوة F ومتجه الموضع r .

ومنه نجد أن :

$$M_o = F \cdot d = F \cdot r \cdot \sin \theta \dots\dots\dots(3 - 1)$$

هي القيمة القياسية (العديّة) لعزم القوة حول نقطة.

ويعرف عزم القوة حول أي نقطة بأنه حاصل ضرب القوة والمسافة العمودية بين تلك النقطة وخط تأثير القوة وتسمى المسافة العمودية (d) عاده بذراع القوة. ويمثل عزم القوة حول نقطة قابليتها لتدوير الجسم الذي تؤثر عليه حول المحور العمودي على المستوى الذي يحوي القوة وذراعها.



$M_o = -F.d$
 دوران مع عقارب الساعة
 ويلاحظ أن M_o داخل من الورقة

$M_o = +F.d$
 دوران عكس عقارب الساعة
 ويلاحظ أن M_o خارج من الورقة

الشكل (2-1)

لقد عرفنا عزم القوة حول نقطة في الشكل (1-1) ونستطيع أن نعرف عزم القوة F حول محور بفرض أن الخط (OL) حول محور يمر خلال النقطة (O) . نقوم الآن بتعريف عزم القوة F حول المحور (OL) ، M_{OL} على أنه مسقط العزم M_O على المحور (OL) ونرمز له بالرمز (OC) كما هو مبين في الشكل (1-1)، أن متجه الوحدة على طول الخط OL يرمز له بالرمز (λ) وباستخدام العلاقات السابقة وحاصل الضرب القياسي والمتجهي يمكننا كتابة العلاقة بالنسبة لعزم القوة حول المحور كمايلي:

$$M_{OL} = \lambda M_O = \lambda (\vec{r} \times \vec{F}) \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

حيث أن :-

M_{OL} : عزم القوة F حول المحور OL

M_O : عزم القوة F حول النقطة O

\vec{r} : متجه الموضع وهو الخط الواصل بين النقطة A إلى النقطة O

λ : متجه الوحدة على طول المحور OL

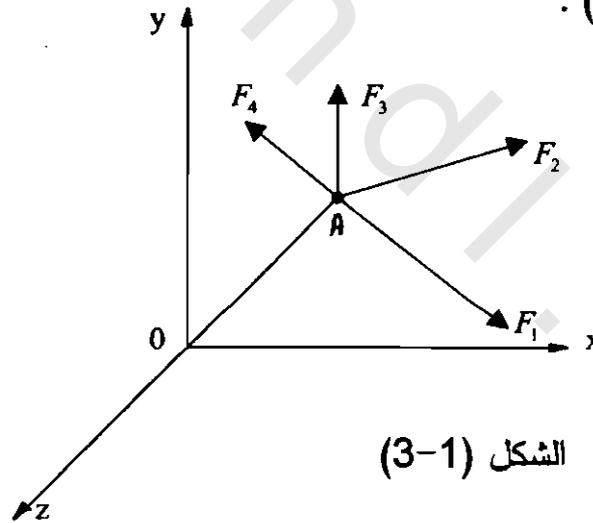
وبناءً على ذلك نستطيع القول أن عزم القوة F حول محور مثل (OL) هو

مقياس دوران هذه القوة حول محور ثابت (OL) والتي تساهم في الحركة الدورانية حول هذا المحور. أما في حال كون القوة لا تقع في مستوى عمودي على محور العزم كما أشرنا سابقاً وخاصة للقوى المستوية فإنه يتوجب علينا تحليل القوة إلى مركباتها الأفقية والرأسية حيث يعطى العزم في هذه الحالة حسب ما يسمى بمبدأ العزوم (Principle of Moments) بالنسبة للقوى المستوية والذي ينص على أن (عزم القوة حول أي نقطة يكون مساوياً لمجموع عزوم مركبات هذه القوة حول نفس النقطة). وهذا ما يعتبر من الأساسيات التي يتوجب على الطالب معرفتها والإلمام بها .

أما بالنسبة لعزم محصلة مجموعة قوى ملتقية في نقطة واحدة في الفراغ.....، F_1 , F_2 , F_3 ، فيمكن الحصول عليه حسب نظرية فارتون (Varignon 's Teorem).

لنفرض أن القوى F_1, F_2, F_3, \dots ملتقية في نقطة واحدة مثل (A) في الفراغ،

كما هو مبين في (3-1) .



الشكل (3-1)

باستخدام حاصل الضرب المتجهي لمتجهين يمكن إيجاد عزم هذه القوى حول النقطة 0 حيث :-

$$M_o = r \times (F_1 + F_2 + F_3 \dots) = r \times F_1 + r \times F_2 + r \times F_3 \dots \dots \dots (5.1)$$

ونلك حسب نظرية فريجنون التي تنص على أن ،،العزم حول نقطة مثل (0) لمحصلة عدة قوى ملتقية في نقطة واحدة في الفراغ مساوياً لمجموع عزوم كل قوة من هذه القوى حول النقطة (0) كل على حدة،،.

وعندما تتساوى وتتوازي قوتان F , $-F$ على مسافة معينة من بعضهما فأنهما تولدان عزم يسمى بالمزدوج (couple) وتكون قيمته حول أي نقطة بالفراغ ثابتة وتساوي حاصل ضرب إحدى هاتين القوتين في المسافة العمودية (d) ما بين القوتين حسب العلاقة التالية :

$$M_{\text{زوج}} = F \cdot d \quad \dots\dots\dots(6.1)$$

حيث أن : d هي المسافة العمودية بين خطي تأثير القوتين F ، $-F$ وحدة العزم هي (N.m) وهي مشتقة من وحدات القياس في النظام العالمي (SI) لان العزم ينتج من حاصل ضرب القوة في المسافة. وأخيراً سوف نفرض بأن القارئ مطلع على رياضيات المتجهات وطرق تمثيلها والتعبير عنها بدلالة وحدات المتجهات i, j, k على طول محاور أنظمة الإحداثيات.

3.3.1. الإزاحة والانفعال (Deflection and Strain)

أن كل الأجسام كما هو معروف تتشوه بدرجة معينة تحت تأثير القوى الخارجية، وان الأجسام التي تدرس في "الميكانيكا النظرية باعتبارها أجساماً مطلقاً الصلابة أو أجساماً لا تتشوه، لا وجود لها في الواقع. ومن الطبيعي الايحصل تشوه كبير تحت تأثير الحمل العادي على الجزء المعين .

أن الانفعالات (التشوهات) البسيطة لا تظهر تأثيراً ملموساً على قوانين توازن الأجسام وحركتها، ولذا فأنها تهمل في "الميكانيكا النظرية" كما أشرنا سابقاً. لكن في معظم الأحيان بدون دراسة تلك الانفعالات لا يمكن حل مسائل،

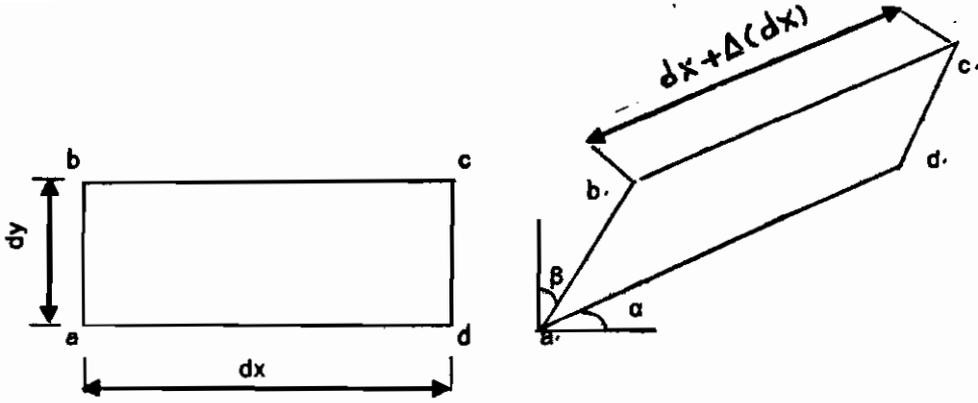
كثيرة بالنسبة للمهندسين، فهي في بعض الأحيان يمكن أن تخرب الكثير من أجزاء المنشآت وفي بعض الحالات يمكنها أن تعمل بأمان .

وعدا ذلك، في أكثر الحالات يجب تحديد مقدار الانفعالات، بغض النظر عن صغرها بالنسبة الى أبعاد الجزء المدروس، إذ أنه يستحيل الاستعمال الطبيعي للهيكل في حالة عدم تحديد الانفعالات. فنتيجة للانفعالات الحاصلة في نفس الجزء أو أجزاء أخرى للمنشئ أثناء عملية التصنيع الميكانيكية لذلك الجزء، تقل دقة الصناعة وهذا لا يسمح به. أن قابلية أجزاء الإنشاءات الهندسية لمقاومة الانفعالات تسمى بالصلادة (rigidity) وهي إحدى مهام هذا الكتاب كما أشرنا في البنود السابقة.

أن تشوه الأجسام تحت تأثير القوى الخارجية يعني أن أبعادها أو أشكالها أو كلها معاً تتغير، أنتغير الأبعاد الطولية للجسم يسمى بالتشوه الطولي، وتغير مقادير الزوايا يسمى بالتشوه الزاوي. أما زيادة أبعاد الجسم فتسمى بالاستطالة، أما قلة الأبعاد فتسمى بالتقلص، وإذا تغير التشوه في حجم الجسم الكلي فعند ذلك يقال بأن التشوه حدث في نقطة معلومة من الجسم وباتجاه معين.

فلو تصورنا مستطيلاً صغيراً جداً (abcd) على سطح جسم معين بالقرب من موضع الدراسة، نجد أن المستطيل في الحالة العامة قد تحول أو أخذ شكل متوازي الأضلاع (a' b' c' d') نتيجة للانفعال (للتشوه) كما هو مبين في الشكل (1-4) .

أن أضلاع المستطيل تتغير (تزيد أو تتقلص)، كما يتغير وضعها عما كان عليه في البداية، ويعطى تغيير أبعاد الضلع ab أو الضلع cd طبيعة التشوه الطولي الكامل في تلك النقطة بالاتجاه الرأسي، وتغير أبعاد الضلع cb أو الضلع da يعطى طبيعة التشوه الطولي الكامل في الاتجاه الأفقي.



الشكل (4-1)

إن تغير الزاوية القائمة الأولى بين ضلعي المستطيل المبين في الشكل (4-1) يساوي $\theta = \alpha + \beta$ يبين طبيعة التشوه الزاوي أو زاوية القص في النقطة.

يرمز إلى التشوه الطولي الكامل ، $\Delta(dx)$ ، $\Delta(dy)$ ، ΔL ، وما شابه ذلك نسبة إلى رمز يرمز به إلى طول القسم موضع الدراسة وللتخلص من تأثير إبعاد أضلاع المستطيل نستعمل مفهوم التشوه الطولي النسبي :-

$$\epsilon = \frac{\Delta(dx)}{dx} \quad , \quad \epsilon = \frac{\Delta(dy)}{dy} \quad , \quad \epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

وبذلك يكون التشوه الطولي (ϵ) مقدار نسبيا أي بدون وحدات قياس، ويعتبر التشوه الطولي موجبا إذا صاحبت ذلك زيادة في الطول.

ΔL : تسمى الاستطالة لوحدة الطول بالانفعال المحوري (Axial Strain) فإذا كان الطول الأصلي بين النقطتين هو (L) والطول النهائي هو (Lo) فإن الاستطالة ($\Delta L = L_o - L$) . ومن هنا فإن الانفعال يعطى حسب العلاقة التالية والتي أشرنا إليها سابقاً ($\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$) وبمعرفة تشوه الجسم في جميع نقاطه وحالة تشبته يمكننا تحديد إزاحة جميع نقاطه، أي — إحداثياتها الجديدة بعد الانفعال .

أن الاستعمال الطبيعي للإنشاءات يتطلب أن يكون تشوه أجزائها مرناً. وأن مقدار التشوه يجب أن لا يزيد عن القيم التي يسمح بها. إن هذه الشروط التي يعبر عنها بشكل معادلات تسمى بشروط الصلادة كما أشرنا سابقاً.

ويجدر بنا الإشارة هنا إلى أنواع الانفعالات الممكن ملاحظتها في الطبيعة فهناك ما يسمى بالانفعالات المرنة (Elastic Strain)، والتي تعرف بالانفعالات التي تختفي عند رفع الحمولات الخارجية عن الجسم، أما النوع الثاني من الانفعالات فيسمى بالانفعالات اللدنة (Plastic Strain)، والتي تعرف بالانفعالات التي تعتمد على مقدار الحمولات وتكون مستقلة تماماً عن الزمن ولا تختفي عند إزالة الحمولات عن الجسم .

وتصنف المواد بحسب قابليتها للانفعال (للتشوه) فهناك المواد المطاوعة (Ductile Materials) وهي المواد التي يكون تشوهها اللدن أكبر بكثير من تشوهها المرن قبل انهيارها. أما النوع الثاني من المواد فهي التي تتشوه قليلاً قبل انهيارها وتسمى بالمواد الهشة أو القصيفة (Brittle Material) .

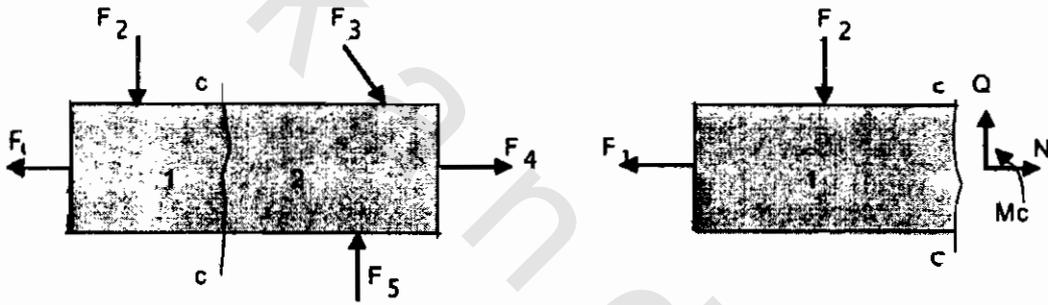
ويجب الإشارة هنا إلى أن خاصية المطاوعة أو الهشاشة لا تعتمد على نوع المادة فقط، وإنما على عوامل أخرى كثيرة منها درجة الحرارة، سرعة الإجهاد، ونوعية حالة الإجهاد وغيرها. فمثلاً ينتمي النحاس، والألمنيوم، والفولاذ المنخفض الكربون إلى المواد المطاوعة، في حين ينتمي حديد الزهر والفولاذ العالي الكربون، والحجر، والخرسانة، والزجاج إلى المواد الهشة .

4.3.1. طريقة القطاعات

تعتبر طريقة القطاعات الطريقة العامة في علم مقاومة المواد ، لإيجاد القوى الداخلية والعزوم العاملة على مقطع معين لجسم ما في حالة اتزان . حيث نفترض طبقاً للافتراض الذي اتخذناه حول استمرارية مادة الجسم تحت تأثير الحمولات هي قوى مستمرة التوزيع.

لذلك يقوم عادة بأحداث مقطعاً لجسم في حالة اتزان في النقطة موضع الدراسة، وبعد ذلك نهمل احد القسمين (في معظم الأحيان القسم الواقع تحت أكثر تأثير قوى)، حيث نجد أن التأثير المتبادل بين القسمين يستبدل بقوى داخلية، بحيث تساوي القوى الخارجية التي تؤثر على الجسم المقطوع، بعد ذلك نرسم مخطط الجسم الحر (Free Body Diagram) حيث يكون من السهولة في هذه الحالة إيجاد القوى والعزوم على المقطع بتطبيق شروط الاتزان.

لنفرض أننا أحدثنا مقطعاً لجسم في حالة اتزان كما هو مبين في الشكل (5-1) في النقطة التي تهمننا ولتكن النقطة (c-c) وبعد ذلك نهمل أحد القسمين ونستبدلها بقوى داخلية مساوية للقوى الخارجية التي تؤثر على القسم المقطوع.



الشكل (5-1)

إذا كانت القوى الخارجية تقع في مستوى واحد فإنه من الضروري لتوازنها تسليط ثلاث قوى على المقطع: (Q) تؤثر على مستوى المقطع العرضي وتسمى بالقوة العرضية أو قوة القص (Shearing Force)، قوة (N) باتجاه محور الجسم وتسمى بالقوة الطولية (المحورية) (Longitudinal Force)، وعزم (Mc) ويسمى بعزم الانحناء (Bending Moment) الذي يكون مستوى تأثيره عمودياً على مستوى المقطع ويظهر عند انحناء المقطع (الجسم).

بعد ذلك توضع معادلات الاتزان لجزء القسم المقطوع، ومنها نحصل على Mc, N, Q . ويجب الإشارة إلى أننا نحصل على القوة N عند إسقاط القوى المؤثرة على الجزء المقطوع على اتجاه محور هذا الجزء بحيث يساوي مجموع المساقط صفراً، وبإسقاط القوى على اتجاه عمودي على محور الجزء، نحصل على القوة العرضية Q ، وعندما يساوي مجموع العزوم صفراً بالنسبة إلى أي نقطة من الجسم نحصل على (Mc) .

أما إذا كانت نفس القوى الخارجية لا تقع في مستوى واحد أي أن المسألة ثلاثية الأبعاد (الفراغ)، فإنه عندئذ من الممكن إن تظهر في المقطع العرضي ست قوى داخلية تشكل مركبات المتجه والعزم الرئيسيين لنظام القوى الداخلية: N - القوى الطولية، Qy - القوى العرضية، القوى العرضية Qx وثلاثة عزوم Mx, My, Mz ، حيث أن العزمين Mx, My هما عزمين انحناء أما العزم Mz الذي يؤثر في مستوى المقطع فيسمى بعزم الالتواء (Torsional Moment) وذلك لأنه ينشأ عند التواء الجزء. ولتحديد هذه القوى الست من الضروري استعمال ست معادلات للاتزان بحيث إن مجموع مساقط القوى على محاور الإحداثيات الثلاثة يساوي صفراً، وكذلك مجموع عزوم القوى يساوي صفراً بالنسبة للمحاور الثلاثة التي تبدأ في مركز ثقل المقطع.

وأخيراً نجد أنه لإيجاد القوى الداخلية يجب أن نتبع الخطوات التالية:-

- 1- أحداث قطع للجسم أو مجموعة أجسام.
- 2- إهمال احد القسمين.
- 3- تسليط قوى على المقطع محل الدراسة تكون مساوية للقوى الخارجية المؤثرة على الجزء المقطوع.
- 4- إيجاد قيم القوى المجهولة من معادلات الاتزان الموضوعه للجزء المقطوع في بعض الحالات الخاصة يمكن أن تظهر في المقطع العرضي للجسم:-

1. القوة العرضية Q_x, Q_y فقط في حالة القص .
2. القوة الطولية N فقط وتسمى هذه شداً إذا كانت القوة منطلقة من المقطع، وانضغاطاً إذا كانت القوة الطولية موجهة نحو المقطع .
3. عزم الانحناء M_x أو M_y في حالة الانحناء .
4. عزم الالتواء M_t فقط في حالة الالتواء .
5. عدة قوى مثل عزوم الانحناء والالتواء في حالة التشوه المعقد .

5.3.1 الإجهاد (Stress)

ذكرنا سابقاً بان القوى الداخلية تظهر نتيجة التأثيرات الخارجية ، وان القوى المتمركزة الداخلية N, Q, M لا تؤثر في المقطع العرضي للجسم ، بل تؤثر قوى موزعة بانتظام . قد تختلف شدتها في مختلف النقاط والاتجاهات.

يمكننا قياس شدة القوى الداخلية لنقطة معلومة في مقطع معلوم ، مثلاً في نقطة (c) وذلك بأخذ مساحة صغيرة مثل ΔA حول النقطة c. ونفرض أن ΔR هي محصلة القوى الداخلية المؤثرة على هذه المساحة كما هو مبين في الشكل (6-1) .



الشكل (6-1)

أن متوسط مقدار القوى الداخلية المؤثرة على وحدة المساحة من المساحة ΔA يساوي :-

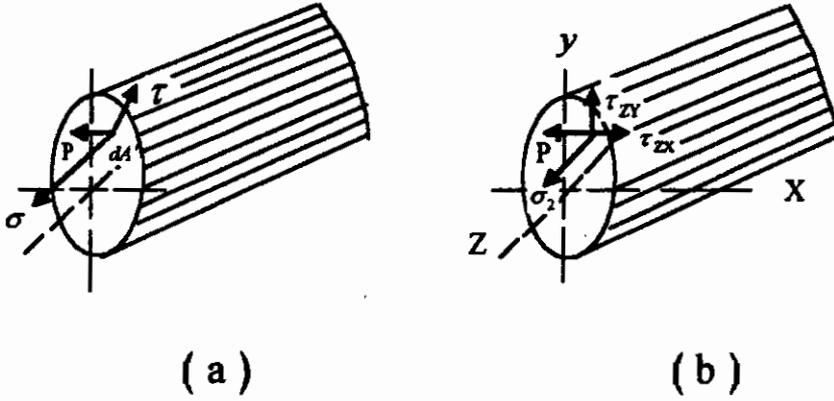
$$P = \frac{\Delta R}{\Delta A} \dots\dots\dots(7-1)$$

يسمى مقدار P_1 - بمتوسط الإجهاد وهو يبين متوسط شدة القوى الداخلية . وبتقليل أبعاد المساحة نحصل على :-

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta A} \dots\dots\dots(8-1)$$

مقدار P - يسمى بالإجهاد الحقيقي أو إجهاد نقطة معلومة في مقطع معين . ومن العلاقتين (7-1) ، (8-1) يظهر لنا أن وحدة قياس الإجهاد هي قوة / مساحة ويعبر عن هذه الوحدة في النظام العالمي (SI) (N/m^2) .
أن الإجهاد كما أشرنا سابقا عند أي نقطة مثل c في الإنشاء يعبر عن كثافة القوى الداخلية عند هذه النقطة بصفة عامة . وللسهولة يمكننا القول بأننا نقصد بالإجهاد -القوة الداخلية المؤثرة على وحدة المساحة في نقطة معلومة من مقطع معين .

أن الإجهاد P باعتباره يمثل كثافة قوة ، هو أيضا يمثل قوة . وهذه القوة لها اتجاه وهو اتجاه ΔR ، كما أن اتجاه الإجهاد P لا يشترط أن يكون عمودياً على المقطع المار بالنقطة c ، ونتيجة لذلك وتيسيراً للدراسة فإنه يمكن تحليل نتيجة لذلك وتيسيراً للدراسة فإنه يمكن تحليل الإجهاد الكلي P ، بنفس الطريقة التي تحلل بها القوة العادية، إلى مركبتين كما في الشكل (7-1 , a) . أحدهما عمودية على مستوى المقطع وتسمى هذه المركبة بالإجهاد العمودي (Normal Stress) ويرمز إليها عادة بالرمز σ ، والثانية مركبة تقع في مستوى المقطع وتسمى بالإجهاد التماسي أو إجهاد القص (Shear Stress) ويرمز إليها بالرمز τ . ومن الممكن أن يأخذ إجهاد القص أي اتجاه في مستوى المقطع ، تبعاً للقوة المؤثرة وللسهولة فإن τ يعبر عنها عادة بصورة مركبتين باتجاه محاور الإحداثيات الشكل (7-1 , b) .

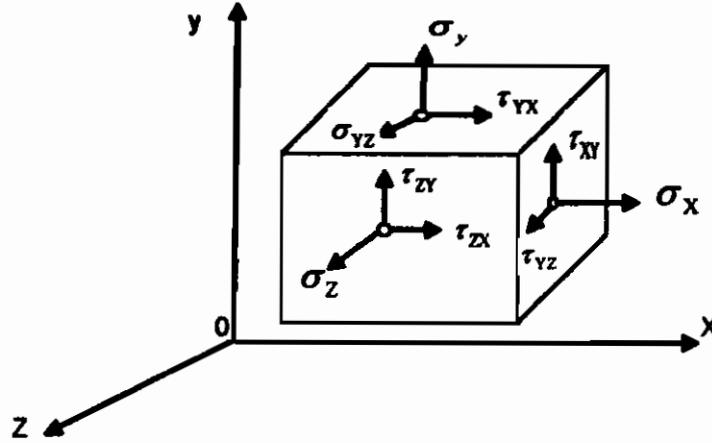


الشكل (7-1)

يرمز عادة إلى الإجهاد كما هو مبين في الشكل (7-1) حيث يبين الإجهاد العمودي بعلامة توضح محور الإحداثيات الذي يوازيه الإجهاد . الإجهاد العمودي يعتبر موجباً إذا كان شاداً ، ويعتبر سالباً إذا كان ضاعطاً . ويرمز إلى إجهاد القص (الإجهاد التماسي) بعلامتين الأولى ترمز إلى المحور الموازي العمودي على المساحة التي يؤثر عليها الإجهاد ، والثانية إلى المحور الموازي إلى الإجهاد نفسه .

أن عملية تحليل الإجهاد الكامل التي أشرنا إليها إلى عمودي وتماسي لها معنى ومحتوى فيزيائياً معيناً حيث أن الإجهاد العمودي يظهر عندما تحول جزيئات المادة الماسة للمساحة المعينة الابتعاد عن بعضها أو التقارب من ماسة للمساحة المعينة الابتعاد عن بعضها أو التقارب من بعضها . أما الإجهاد التماسي فإنه مرتبط بقص المادة في مستوى المقطع المذكور .

إذا قمنا مثلاً بقطع جزء على شكل مكعب صغير جداً حول نقطة معينة من الجسم فستكون هناك بصورة عامة اجهادات تؤثر على أوجه المكعب كما هو مبين في الشكل (8-1) 30.

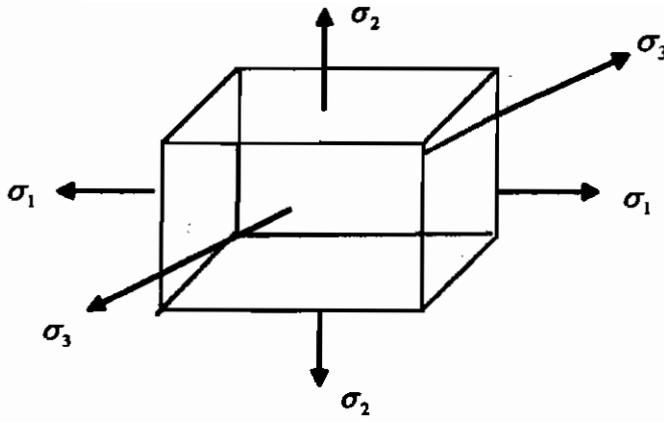


الشكل (8-1)

أن مجموعة الاجهادات على كافة المساحات الأولية ، والتي يمكن تمريرها خلال نقطة معينة من الجسم تسمى بحالة الإجهاد في النقطة المعنية .
 فإذا كانت الاجهادات العمودية وحدها تؤثر على أوجه المكعب فإنها تسمى بالاجهادات الرئيسية، أما المساحات التي تؤثر عليها الاجهادات الرئيسية فإنها تسمى بالمساحات الرئيسية.

ويرمز عادة إلى الاجهادات الرئيسية σ_1 , σ_2 , σ_3 . أن حالة الإجهاد المختلفة الأشكال تقسم عادة تبعاً لعدد الاجهادات الرئيسية المؤثرة.

وتسمى حالة الإجهاد بثلاثية المحور إذا لم تساوي أي من الاجهادات الرئيسية الثلاثة صفراً الشكل (9-1) . وإذا ساوى احد تلك الاجهادات الرئيسية صفراً فتسمى حالة الإجهاد عند ذلك ثنائية المحور أو حالة الإجهاد المستوية.
 وإذا ساوى اجهادان رئيسيان صفراً فعند ذلك تسمى حالة الإجهاد هذه وحيدة
 ان رئيسيان صفراً فعند ذلك تسمى حالة الإجهاد هذه وحيدة المحور أو الطولية ،
 وبمعرفة حالة الإجهاد في أي جزء يمكن تقدير ذلك الجزء ، والذي يعنينا
 الآن هو دراسة الإجهادات العمودية .



الشكل (9-1)

كما أشرنا سابقاً إن الإجهاد عند النقطة c سواء τ ، σ يتوقف على المستوى الذي يمر بالنقطة c ذلك أن قيمة القوة ΔR التي تؤثر على المساحة ΔA تتوقف على المقطع الذي تقع فيه هذه المساحة وبالتالي تؤثر عليه هذه القوة ، بحيث لو أخذنا مستوى آخر يمر بالنقطة c ثم وجدنا قيمة القوة ΔR ، وبالتالي قيمة الإجهادات P ، σ ، τ على هذا المستوى لحصلنا على قيم تخالف تماماً القيم السابقة للإجهادات المؤثرة عند النقطة c على المقطع.

ومعنا هذا أن الإجهاد عند أي نقطة في الإنشاء يجب أن يرتبط بمستوى معين يمر بالنقطة ، حيث تتحدد قيمته تبعاً لهذا المستوى ومن الطبيعي أن تكون هناك صلة بين مركبات الإجهاد عند النقطة c بالنسبة للمستويات المختلفة التي تمر بهذه النقطة .

4.1. النظام العالمي لوحدات القياس (International System of Units .SI)

مع أن النظام الخاص لوحدات القياس قد يكون اختياراً في كثير من الأحيان، إلا أن الحاجة إلى نظام موحد والتي لغة عالمية للوحدات والرموز أصبحت ملحة جداً في ظل التطور الصناعي المطرد الذي يشهده العالم .

لذا عملت المنظمة الدولية للقياسات والأوزان في المؤتمر العام الحادي عشر منذ عام 1960 على اتخاذ قرار حول تثبيت نظام عملي عام لوحدات القياس ، حيث أن اصطلاحات قياسية عالمية موحدة يسهل تبادل المعلومات العلمية والصناعية المختلفة ، علاوة على ذلك حفظ الوقت والمجهود اللازمين للحسابات والقراءات، وذلك كنتيجة لاستخدام نظام موحد واحد يحتوي على أجزاء أو مضاعفات للعدد عشرة .

يحتوي النظام العالمي للوحدات (SI) على ست أبعاد قياسية أساسية بدالاتها يمكن اشتقاق وحدات أخرى نحتاج إليها في العلوم الهندسية مختلفة الفروع وذلك بواسطة عمليات بسيطة تشمل على عمليات ضرب وقسمة للوحدات الأساسية وهي :-

وحدة الطول - المتر ، وحدة الكتلة - الكيلو غرام ، وحدة الزمن - الثانية ،
وحدة الحرارة- درجة كلفن ، وحدة التيار- أمبير ، وحدة قوة الضوء - شمعة

هناك وحدات قياسية تستعمل لحساب الكميات المختلفة التي تدخل في علم مقاومة المواد كالقوة ، والكتلة ، والعزم ، والقدرة ، والطاقة ، والشغل وغيرها.

أن الجدول (1-1) يبين الوحدات الأساسية المستخدمة ورموزها .

جدول (1-1) الوحدات الأساسية المستخدمة في علم مقاومة المواد

| الوحدات الهندسية حسب النظام العلمي | الرمز | الكمية الطبيعية |
|------------------------------------|-------|-----------------|
| المتــــر (m) | L | الطــــول |
| الكيلو غرام (Kg) | M | الكتــــلة |
| الثانــــيــــة (S) | T | الزمن |
| المول (Mol) | Mol | كمية المادة |

ونستطيع أن نشق من الوحدات الأساسية كما أشرنا سابقاً الوحدات المساعدة مثل وحدة المساحة (m^2) ووحدة الحجم (m^3) ووحدة القوة ($N=Kg.m/S^2$) حيث أن القوة تساوي الكتلة ضرب العجلة .

كما يمكن استخدام الوحدات المشتقة لاستنتاج وحدات مشتقة أخرى والأمثلة تبين ذلك فمثلاً :-

| | |
|-----------------------|--------------------------|
| $M = N.m$ | العزم = القوة X المسافة |
| $E = N.m = J$ | الطاقة = القوة X المسافة |
| $Watt = W = J/s$ | القدرة = الطاقة / الزمن |
| $Pascal = Pa = N/m^2$ | الضغط = القوة / المساحة |

والجدول (2-1) يبين بعض الوحدات المشتقة وكمياتها الطبيعية المناصرة اللازم استخدامها في دراسة علم مقاومة المواد .

جدول (2-1) بعض وحدات المشتقة المستخدمة في علم مقاومة المواد
وكمياتها الطبيعية المناضرة

| الكمية الطبيعية | الرمز | الوحدة | التعبير في النظام العالمي |
|-----------------|--------|-------------------|---------------------------|
| القوة | F | النيوتن. | N |
| عزم القوة | M | النيوتن X المسافة | N.m |
| الضغط | P | الباسكال | pa |
| الضغط | P | البار | Bar |
| الطاقة | E | الجول | N.m |
| القدرة | P | الوات | J/s |
| الشغل | W | الجول | N.m |
| الكتلة | m | الطن | 10 ³ Kg |
| الزمن | t | الدقيقة | 60s |
| الكثافة | ρ | - | Kg/m ³ |

5.1 أنظمة وحدات قياس أخرى (Other System of Units)

بالرغم انه منذ عام 1970 كل الكتب، والمراجع والأبحاث العلمية يشترط نشرها بالوحدات العالمية حفظ للوقت والمجهود اللازمين للحسابات والقراءات، وتسهيلاً لتبادل المعلومات العلمية والصناعية، ألا أنه يتحتم علينا ذكر أنظمة وحدات قياس أخرى كانت وما زالت شائعة ومستخدمة في بعض الدول.

من هذه الأنظمة النظام الجاوسي أو نظام سم.غم.ث (cm.g.s) حيث تستخدم في هذا النظام وحدة (cm) للطول، ووحدة (g) للكتلة، ووحدة (s) للزمن وهو النظام الأكثر شيوعاً واستخداماً بكثرة في الأبحاث العلمية.

ويوجد كذلك النظام الإنجليزي الذي يستخدم وحدة الياردة (y)، القدم (ft) للطول ووحدة الباوند (P) للكتلة والثانية للزمن بحيث :-

$$1y = 0.9144 \text{ m} \quad , \quad 1p = 0.452 \text{ Kg}$$

والجدول رقم (3-1) يعطى مقارنة بين أنظمة القياس المختلفة للوحدات الأساسية المذكورة سابقاً.

جدول (3-1) مقارنة بين أنظمة القياس للوحدات الأساسية

| النظام الإنجليزي (ft.p.s) | النظام الجاوسي (cm.g.s) | النظام العالمي (m.kg.s) | الكمية الأساسية |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|
| القدم-ft | السنتمتر-cm | المتر-m | الطول |
| الباوند-p | الغرام-g | الكيلوغرام-kg | الكتلة |
| الثانية-s | الثانية-s | الثانية-s | الزمن |

بالإضافة إلى ذلك تستخدم الكميات الإضافية التي تجعل الوحدة أكبر بمقدار $10^3, 10^6, 10^9$ على التوالي، أي أكبر بألف مرة مثلاً :-

$$1\text{kg} = 1000\text{g}$$

$$1\text{Mpa} = 10^6 \text{ Pa}$$

أن الباسكال هو وحدة صغيرة جداً لذا لا يكون دائماً من المناسب استخدام كوحدة لقياس الضغط وذلك لان (1Pa) أصغر من الضغط الجوي بحوالي،

(100000) مرة ولذا تستخدم أحياناً وحدات قياس أكبر مثل البار :-

$$1\text{bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

لذا وللتغلب على الصعوبات التي تظهر في الأغراض والتحليلات الهندسية عندما تكون القيمة العددية للوحدات الأساسية والمشتقة للنظام العالمي ليست مناسبة وملائمة.

ويفضل استخدام البادئات المستخدمة (Used Prefixes) والتي تكون على الصورة (10^n) حيث أن n عبارة عن عدد صحيح.

والجدول (4-1) يشمل على الأجزاء (Fractions) والمضاعفات (Muliplies) الشائعة الاستعمال في علم مقاومة المواد والعلوم الهندسية الأخرى في النظام العالمي

الجدول (4-1)

| الجزء المضاعف | الرمز المختصر | أسم البادئة |
|---------------------------|---------------|-----------------|
| $10^3 = 1000$ | K | كيلو - (Kilo) |
| $10^6 = 1000.000$ | M | ميغا - (mega) |
| $10^9 = 1000.000.000$ | H | هيفا - (giga) |
| $10^{-3} = 0.001$ | m | ميلي - (milli) |
| $10^{-6} = 0.000.001$ | μ | ميكرو - (micro) |
| $10^{-9} = 0.000.000.001$ | n | نانو - (nano) |

ويفضل كقاعدة عامة استخدام البادئات في البسط فقط والأمثلة التالية تبين كيفية استخدام الأرقام العشرية (البادئات) في النظام الدولي فمثلاً :-

1000 m = 1kilometre - (كيلومتر) = 1Km

1000J = 1kiloJoule - (كيلو جول) = 1K

0.000.000.001S = 1nano second (نانو ثانية) = 1ns

1000.000 W = 1megawatt (ميغاوات) =1KJ

6.1 التطبيقات الهندسية وطرق الحل

ظهر علم مقاومة المواد (Strenght of Materials) كما أشرنا في بداية هذا الكتاب لشرح طرق وحساب استقرار وصلادة ومتانة أجزاء المنشآت والآلات والمكائن الهندسية المختلفة.

لذلك في ختام هذا الباب يتحتم علينا أن نوضح كيفية التعامل مع المسائل والتطبيقات المختلفة وذلك من خلال توضيح خطوات الطريقة العامة التي سوف تتبع في هذا الكتاب عند حل المسائل والتطبيقات المختلفة المتعلقة بهذا العلم والتي تتضمن:-

- 1- اختيار النظام المعين اختياراً مناسباً.
- 2- بناء نموذجاً رياضياً (مثالياً) لهذا النظام.
- 3- دراسة القوى المؤثرة على هذا النظام - من قوى عاملة (Acting Forces) - والقوى المعروفة برود الأفعال (Reations) في المساند والاتصالات، وشروط الاتزان المطلوبة .
- 4- دراسة الانفعالات (التشوّهات) وشروط التلائم الهندسي.
- 5- ربط القوى بالانفعالات طبقاً لقوانين مواد النظام المختارة .
- 6- التأكد من صحة النتائج وذلك عن طريق المقارنة بالنتائج والملاحظات العلمية والمخبرية، هذا إلى جانب التأكيد على مطابقة أبعاد المعادلات

والصيغ المختلفة التي تواجهها خلال حل التطبيقات المختلفة في بعض المسائل والأنظمة يكون من الممكن الحصول على كل من ردود الفعال المجهولة باستخدام معادلات الاتزان الاستاتيكي الثلاثة وتسمى هذه الأنظمة بالمسائل أو الأنظمة المحددة أستاتيكيًا (Statically Determinate) ، وهناك نوع آخر من الأنظمة لا يمكن الحصول على كل من ردود الأفعال المجهولة باستعمال معادلات الاتزان فقط، وأما تتطلب دراسة انفعالات النظام المتلائمة هندسياً، وتسمى هذه الأنظمة بالأنظمة غير المحددة أستاتيكيًا .

وبناء على هذا التعريف فإن ردود الأفعال المجهولة في الأنظمة المحددة استاتيكيًا تتطلب الخطوات الثلاثة الأولى بينما تحتاج الأنظمة غير المحددة استاتيكيًا تطبيق جميع الخطوات الستة المذكورة أعلاه .

أن حل المسائل في معظم الأحيان يتطلب إنشاء وتوضيح القوى التي تؤثر على النظام حيث تعد هذه الخطوة البداية السليمة والمهمة والتي تعتمد عليها شروط الاتزان بعد ذلك، حيث يكون في بعض الحالات البسيطة من السهولة اختيار النظام وعزله لغرض تحليله، وفي الحالات المعقدة قد يتطلب الأمر عزل أنظمة عديدة وتحليلها كل على انفراد ومن ثم تلائم الأنظمة المختلفة في نقاط عزلها للحصول على الحل الكامل للمسألة . ونبداء عملية عزل النظام برسم مخطط يوضح كل القوى الخارجية التي تعمل على النظام ويسمى هذا المخطط برسم مخطط الجسم الحر (Free-Body Diagram)

أن الرسم البياني للمخطط الجسم الحر (F . B . D) هو الرسم التخطيطي للنظام أو جزء من النظام، أو مجموعة من الأنظمة بمعزل تام عن بقية الأنظمة المحيطة الأخرى ويتميز بثلاثة مميزات أساسية هي :-

أولاً : أنه رسم مخطط (كروكي) للنظام .

ثانياً : يبين النظام المدروس بمعزل تام عن بقية الأنظمة الأخرى .

ثالثاً : يبين على الرسم التخطيطي تأثير الأجسام الأخرى ممثلة بقوة أي أن الرسم البياني لمخطط الجسم الحر (F. B. D) يظهر فيه القوى المؤثرة على هذا النظام.

تمثل كل قوة في هذا المخطط أما بمقدارها إذا كانت معلومة، أو برمز إذا كانت غير معلومة، وبفرض اتجاه القوة الغير معلومة عندما لا يكون واضحاً لأول وهلة، ومن ثم يصحح هذا الاتجاه المعروف إذا أثبت عدم صحته، كما يبين الميل أو زاوية الميل لكل قوة لا تكون في وضع أفقي أو عمودي، وإحداثيات النقاط أن وجدت حسب نظام الإحداثيات المستخدمة لحل المسألة مثل القوى المعروفة بنقطتين على خط تأثيرها .

وأخيراً يجب التأكيد مرة أخرى على أنه بعد اختيار أي نظام وتبسيطه تكون خطواتنا الأساسية المتبعة في التحليل هي :-

- 1- دراسة القوى ومتطلبات الاتزان .
 - 2- دراسة الانفعال وشروط التلائم الهندسي .
 - 3- تطبيق قوانين المواد التي تربط القوى بالانفعال الناتج عنها .
- أن الخطوات الثلاثة المذكورة أعلاه هي أساس عملية التحليل للأنظمة والتطبيقات المختلفة، وسنرى الأبواب اللاحقة كيفية استخدامها .