# البـــاب الأول

# مدخل في علم مقاومة المواد


1.1 طبيعة علم مقاومة المـــواد

2.1 الفرضيـــات الأساسيـــة

3.1 المفاهـــيم الأساسيـــــة

1.3.1 القـــوى الخارجيـــة

2.3.1 عـــــزوم القـــــوى

3.3.1 الإزاحـــة والانفعـــال

4.3.1 طريقـــة القطاعـــات

5.3.1 الأجهـــــــاد

4.1 النظـــام العالمـــي لوحـــدات القيـــاس

5.1 أنظمـــة وحـــدات قيـــاس أخـــــرى

6.1 التطبيقـــات الهندسيـــــة وطرق الحل

## 1.1 طبيعة علم مقـــاومة المـــواد

يعتـــبر علـــم مقاومة المواد ( Strength Materials) أحد فروع العلوم الطبيعـــية، الهـــدف مـــنه شرح طرق حساب استقرار ومتانة وصلادة أجزاء الإنشـــاءات 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 تتصـــف عند تصميمها بالمقاومة المطلوبة عند تأثير القوى الخارجية المسلطة علـــيها. ونتـــيجة للأبحاث العلمية التجريبية الشاملة والدراسة العميقة للخبرات المـــتراكمة، واستثمار الإنشاءات الهندسية المختلفة فقد تطور هذا العلم تطوراً كبـــيراً، وأستخدم بنجاح في السعي إلى ألاقتصاد في المواد الأولية المستخدمة في ألإنشاءات المختلفة وذلك عن طريق الدراسة الكاملة والعميقة لخواص هذه المواد المستعملة ولطبيعة ألاحمال ألمؤثرة عليها.

ومـــا نشـــهده الـــيوم مـــن تقدم علمي تكنولوجي كبير في شتى المجالات الهندســـية التطبيقـــية المختلفة ماهو ألا 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 العلـــوم التطبيقية الأخرى بعـــض "الفرضيات المبسطة" والمتعلقـــة بخواص وصفات المواد، وطبيعـــة الأحمال المختلفة ألمؤثرة عليها، حيث يتم ألاستناد عليها لمعالجة الكثير من الحســـابات والقضايا التصميمية المتعلقة بهذا العلم. وذلك نظراً لظهور صعوبات عديدة عند أجراء حساب أجزاء المنشاءات الهندسية المختلفة.

وقـد أثبتـت التجارب والابحاث العلمية التي حصل عليها نتيجة استخدام هـذه الفرضـيات أن أستخدمها يؤدي إلى أنحرا فات ضئيلة وقليلة جداً بحيث يمكـن إهمالهـا فـي التطبيقات والحسابات العملية. وسنقوم بعرض أهم هذه الفـرضيات:-

## الفـرضـية الأولـى:

تتضـمن عـدم أخـذ التركيب الذري للأجسام بالاعتبار، أن لمادة الجسم تركيـب أصـم متماسـك (Solidity) وقـد أثبـت التجارب العلمية صحة هذه الفرضيات بالنسبة للمواد ألإنشائية (البنائية) والمتكونة من حبيبات دقيقة وكثيرة بحيث يمكن اعتبارها متماسكة دون انقطاع، وحتى بالنسبة للمواد مثل الخشب والحجـر والخرسـانة فـان الحسابات المعتمدة على تماسك موادها تعطى في النواحـي العملـية نتائج مرضية. ويفسر هذا بان أبعاد ألا جزاء الحقيقية هي أكبر بكثير من المسافات يبين الذرات.

## الفـرضـية الثـانـية:

تعتـبر أن مادة الجسم متجانسة، بمعنى أن الخواص في جميع نقاط الجسم واحـدة. حيث يلاحظ أن المعادن ذات خواص متجانسة جداً أي أن جميع نقاط الجسـم لهـا نفس الخاصية عملياً. أما بالنسبة للخشب والخرسانة والبلاستيك والحجـر فأنهـا تعتبر أقل تجانساً ومع ذلك فقد أظهرت التجارب العملية بأن الحسـابات المسـتندة على افتراض التجانس لمادة الجسم تعطى نتائج مقبولة ومرضية للمواد ألإنشائية المختلفة.

## الفـرضـية الثـالثـة:

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 ألاتجاهـات وتكون مختلفـة على مستـوى

بلـورات المادة، ولكن على مستوى أجسام أكبر بكثير من حجم البلورات فأن خواصها تتوازن تقريباً في ألاتجاهات المختلفة ويرجع سبب ذلك إلى أن طبيعة تركيـب الجسـم تحـتوي على كميات كبيرة من البلورات بشكل غير منتظم. بالنسـبة لـبعض المـواد مـثل البلاستيك والخشب والخرسانة فأن الفرضية المذكـورة تطـبق بصـورة تقريبية فقط حيث تتباين خواصها بشكل ملحوظ وتسمى مثل هذه المواد بالمواد المتباينة الخواص.

## الفـرضية الـرابـعة:

لا يوجـد فـي الجسم أية قوى داخلية أولية قبل وضع ألاحمال الخارجية علـيه، أن هذه الفرضية لا تنطبق على أية مادة كانت ففي الخشب مثلاً توجد قـوى داخلـية نشـأت بفعل التيبس غير المنتظم، وفي الخرسانة خلال عملية التجمد، وفي ألاجزاء الفولاذية بفعل التبريد غير المنتظم أيضاً وغيرها. وعادة لا تكـون مقاديـر هـذه القوى معروفة للمصمم غير أنهه يسعى لتقديرها عن طـريق الـتجارب في الحالات التي يقدر فيها بأن هذه القوى قد تكون كبيرة ولايمكن إهمالها.

## الفـرضية الخـامسـة:

اعـتماد مـبدأ التراكب (Superposition) والذي يتضمن أنه إذا أثرت مجموعـة من القوى على جسم ما فأن تأثيرها على هذا الجسم يساوي مجموع نـتائج تأثيرات القوى المكونة لها على نفس للجسم بالتوالي وبأي ترتيب كان. نـتائج ألتأثـيرات يقصد بها التشوه والقوى الداخلية التي قد تظهر في الجسم والإزاحة التي تتعرض لها نقاط الجسم على إنفراد.

أن مـبدأ التراكـب 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-وعـندما تكـون ألإزاحة الناتجة عن تشوه الجسم مرتبطة بعلاقة خطية مع القوى ألمؤثرة وتسمى هذه ألا جسام ذات التشوه الخطي.

**الفرضيـــة السادســـة :**

وتسمى هذه الفرضية عادة بمبدأ سين – فينان ، وتستخدم هذه الفرضية بشكل واسع في العلوم الميكانيكية ويتضمن المبدأ أنه إذا كانت النقاط الواقعة في جســم ما تبعد عن نقاط تأثير الأحمال على ذلك الجسم بما فيه الكفاية فأن القوى الداخلية الناشئة فيها تعتمد على طبيعة الأحمال أعتماداً ضئيلاً . حيث يسمح هذا المبدأ في معظم الحالات باستبدال نظام قوى بأخر مكافئ لـــه أســـتاتيكياً بأمكانـــه تســـهيل الحسابات .

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

## 3.1 .المفاهيـــم الأساسيـــة

كما في أي علم أخر تستخدم في علم مقاومة المـــواد مفـــاهيم ومصـــطلحات وتعاريف لابد من التعرض لها قبل البدء في دراسة هذا العلم وســـنقوم بـــالتعرف على المفاهيم الأساسية منها :-

### 1.3.1 القـــوى الخارجيـــة

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

القــوى المركــزة (Force Concentrated) لا وجــود لهــا عملــياً فــي الطبــيعة،والقوى الحقيقــية هــي تلــك القوى الموزعة على بعض المساحات والحجــوم للمنشــات الهندســية المختلفة. وتقسم الحمولات الموزعة إلى أنوع 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 الأمــثلة على ذلك وزن عتبة مسندة إسنادا بسيطاً حيث يعتبر وزن العتبة (W) حمولة موزعة بانتظام على المتر الطولي لهذه العتبة.

أمــا الــنوع الثانــي الحمولة الموزعة والمتغيرة بانتظام وتكون هذه الحمولــة عــادة 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.

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

وتقــاس الحمولات الموزعة بوحدات القوة، المنسوبة إلى وحدة الطول أو وحدة السطح أو الحجم ويمكن أن تكون ألاحمال المركزة أو الموزعة أستاتيكية (ثابتة) أو ديناميكية (حركية).

أن الحمــولات الاســتاتيكية هــي الحمولات التي تغير مقاديرها اونقاط تأثــيرها أو اتجاههــا بسرعة ضئيلة جداً بحيث يمكن إهمال التسارع واهتزاز المنشاءات تحت تأثير مثل هذه الحمولات.

أما الحمــولات الديناميكية فهي تلك الحمولات التي تتغير مع الزمن بسرع

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

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

ويجب الإشارة إلى أنه لايمكن 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 ألاخذ 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، فأن هذا الدافع للدوران يسمى بعزم القوى (Moment of a force)، ويرمز له بالرمز ($\overrightarrow{M}$) ويصطلح عليه عادةً بعزم الدوران.

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

فأن عزم هذه القوة حول نقطة ثابتة اختيـــارية مثل (o) يمكـــن الحصول عليه باستخدام ما يعرف بحاصل الضرب المتجهي حسب العلاقة التاليـــة:

$$\overrightarrow{Mo} = \overrightarrow{r} \times \overrightarrow{F} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1.1)$$

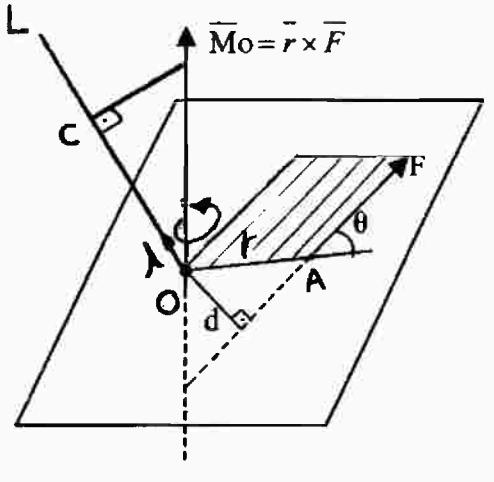
حيـــث :-

$\overrightarrow{M_o}$ : عزم القوة F حول النقطة o

$\overrightarrow{r}$ : متجه الموضع وهو الخط الواصل بين نقطة تأثير القوة على الجسم(A) والنقطة المراد أيجاد العزم حولها (o).

$\overrightarrow{F}$ : القوة المؤثرة على الجسم .

أن عـــزم أي قـــوة هي كمية متجهة وتكون عمودية على المستوى الذي يجمـــع القـــوة F ومتجه الموضع r . وأما أتجاه العزم فيحدد حسب قاعدة اليد اليمـــنى وتطـــبق هـــذه القاعدة "بوضع أصابع اليد اليمنى باتجاه القوة F وفتح الإبهام بحيث يكون عمودياً على باقي الأصابع ثم حني الأصابع بالاتجاه الذي تحـــاول فيه القوة F أن تدور حول النقطة o وبهذا سيكون اتجاه العزم بالاتجاه الذي يؤشر فيه الإبهام .




الشكل (1-1) عزوم القوة F حول النقطةo

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 :

$$M_o = F.d \quad \text{.....(2.1)}$$

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 :

$$d = r \sin\theta$$

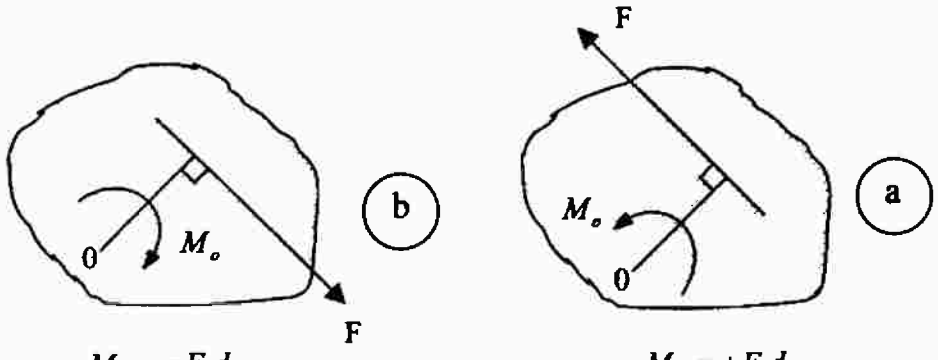
$\theta$ – هي الزاوية المحصورة ما بين القوة F ومتجه الموضع r .

ومنه نجد أن :

$$M_o = F.d = F.r.\sin\theta \text{ ..... ..... ..... ..(3-1)}$$

هي القيمة القياسية (العددية) 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 عكس عقارب الساعة

ويلاحظ أن $M_o$ خارج من الورقة

$M_o = -F.d$

دوران مع عقارب الساعة

ويلاحظ أن $M_o$ داخل من الورقة

الشكل (1-2)

لقــد 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 ألآن بتعريف عزم القوة F حول المحور (oL), $M_{oL}$ على أنه مسقط العزم Mo على المحور (oL) ونرمز له بالرمز (oC) كما هو مبين في الشكل (1-1) ،أن متجه الوحدة على طول الخط oL يرمز له بالرمز ( $\lambda$ ) وباستخدام العلاقات الســـابقة وحاصل الضرب القياسي والمتجهي يمكننا كتابة العلاقة بالنسبة لعزم القوة حول المحور كمايلي:

$$M_{oL} = \lambda M_o = \lambda ( \vec{r} \times \vec{F} ) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.1)$$

حيث أن :-

$M_{oL}$ : عزم القوة F حول المحور oL

Mo : عزم القوة F حول النقطة o

r : متجه الموضع وهو الخط الواصل بين النقطة A إلى النقطة o

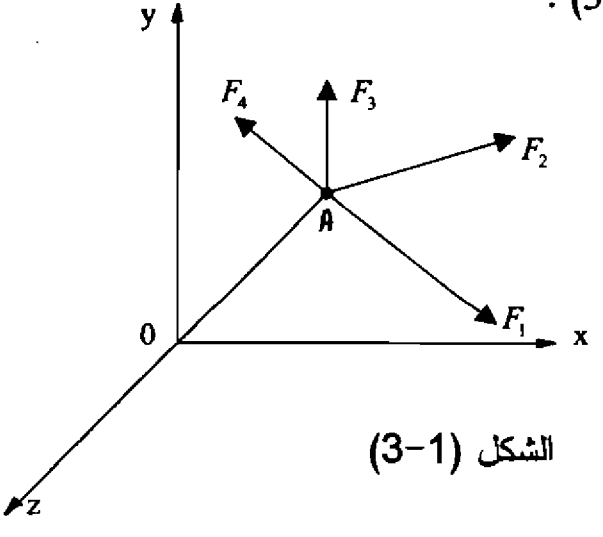
$\lambda$ : متجه الوحدة على طول المحور oL

وبناءً على ذلك نستطيع القول أن عزم القوة F حول محـــور مثل (oL) هـــو

مقـيـاس دوران هـذه القوة حـول محور ثابت (OL) والتي تساهم في الحـركة الدورانـية حول هذا المحور. أما في حال كون القوة لا تقـع في مسـتوى عمـودي على محور العزم كما أشرنا سابقاً وخاصة للقوى المستوية فأنه يتوجب علينا تحليل القوة إلى مركباتها ألافقية والرأسية حيث يعطى العزم فـي هذه الحالة حسب ما يسمـى بمبدأ العزوم (Principle of Moments) بالنسـبة للقوى المستوية والذي ينص على أن (عزم القوة حول أي نقطة يكون مسـاوياً لمجموع عزوم مركبات هذه القوة حول نفس النقطة) . وهذا ما يعتبر من الأساسيات التي يتوجب على الطالب معرفتها والإلمام بها .

أما بالنسـبة لعزم محصلة مجموعة قـوى ملتقية في نقطـة واحدة في الفـراغ.....، $F_1$ , $F_2$ , $F_3$ فيمكـن الحصـول عليه حسب نظرية فارتـون (Varignon 's Teorem).

لنفرض أن القوى..... $F_1, F_2, F_3,$ ملتقية في نقطة واحدة مثل (A) في الـفراغ، كما هو مبين في (1-3) .




الشكل (1-3)

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

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

وذلـك 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،،.

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

$$M_{\text{ازدواج}} = F.d \quad \text{.....(6.1)}$$

حيث أن : d هي المسافة العمودية بين خطي تأثير القوتين F ، -F

وحـدة العـزم هي ( N.m) وهي مشتقة من وحدات القياس في النظام العالمـي (SI) لان العـزم ينتج من حاصل ضرب القوة في المسافة. وأخيراً سـوف نفـرض بـأن القارئ مطلع على رياضيات المتجهات وطرق تمثيلها والتعبـير عـنها بدلالـة وحدات المتجهات k, j , i على طول محاور أنظمة الإحداثيات.

## 3.3.1. الإزاحـة والانفـعـال (Deflection and Strain)

أن كـل الأجسـام كما هو معروف تتشوه بدرجة معينة تحت تأثير القوى الخارجـية، وان الأجسام التي تدرس في "الميكانيكا النظرية باعتبارها أجساما مطلقـة الصـلابة أو أجساماً لا تتشوه، لا وجود لها في الواقع. ومن الطبيعي الايحصل تشوه كبير تحت تأثير الحمل العادي على الجزء المعين .

أن الانفعـالات (التشـوهات) البسيطة لا تظهر تأثيراً ملموساً على قوانين تـوازن الأجسام وحركتها، ولذا فأنها تهمل في "الميكانيكا النظرية" كما أشرنا سابقا. لكن في معظم الأحيان بدون دراسة تلك ألانفعالات لا يمكن حل مسائل،

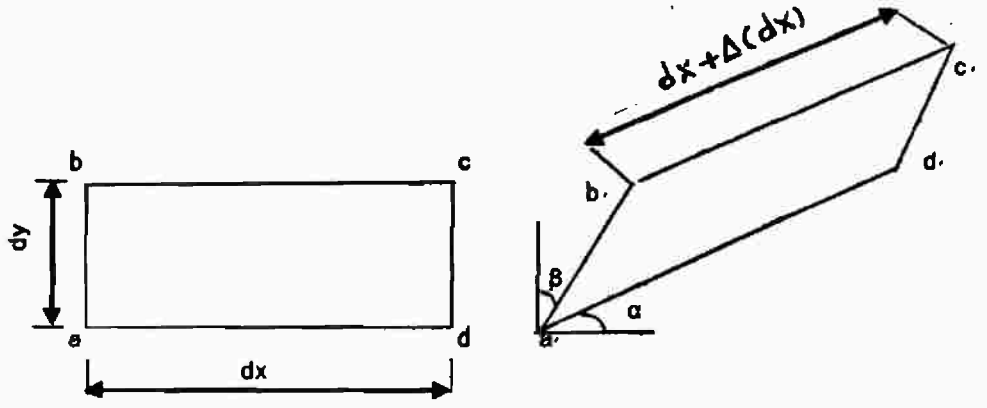
كثـــيرة بالنسبة للمهندسين، فهي في بعض الأحيان يمكن أن تخرب الكثير من أجزاء المنشئات وفي بعض الحالات يمكنها أن تعمل بأمان .

وعـــدا ذلك، في أكثر الحالات يجب تحديد مقدار الانفعالات، بغض النظر عـــن صـــغرها بالنســـبة الى أبعاد ألجزء المدروس، آذ أنه يستحيل الاستعمال الطبيعي للهيكل في حالة عدم تحديد الانفعالات. فنتيجة للانفعالات الحاصلة في نفـــس الجـــزء أو أجـــزاء أخرى للمنشئ أثناء عملية التصنيع الميكانيكية لذلك الجـــزء، تقـــل دقـــة الصـــناعة وهذا لا يسمح به. أن قابلية أجزاء الإنشاءات الهندسية لمقاومة الانفعالات تسمى بالصلادة (rigidity) وهي أحدى 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 الزواية يسمى بالتشوه الزاوي.اما زيادة أبعاد الجسم فتسمى بالاستطالة، أمـــا قلة الأبعاد فتسمى بالتقلص، وإذا تغير التشوه في حجم الجسم الكلي فعند ذلك يقال بأن التشوه حدث في نقطة معلومة من الجسم وباتجاه معين.

فلـــو تصـــورنا مســـتطيلاً صغيراً جداً ( abcd ) على سطح جسم معين بالقرب من موضع الدراســـة، نجد أن المستطيل في الحالـــة العامـــة قد تحول أو أخـــذ شكل متوازي الأضلاع ($a' b' c'd'$) نتيجة للانفعال (للتشوه) كما هو مبين فى الشكل (1-4) .

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




الشكل (1-4)

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

يرمز إلى التشوة الطولي الكامل ، $\Delta(d\,x)$ ، $\Delta(d\,y)$ ، $\Delta L$ وما شابه ذلك نسـبة إلى رمز يرمز به الى طول القسم موضع الدراسة وللتخلص من تأثير إبعاد أضلاع المستطيل نستعمل مفهوم التشوة الطولي النسبي :-

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

وبذلك يكون التشوة الطولي ( $\varepsilon$ ) مقدار نسبيا أي بدون وحدات قياس، ويعتبر التشوة الطولي موجبا إذا صاحبت ذلك زيادة في الطول.

$\Delta L$: تسمى الاستطالة لوحدة الطول بالانفعال المحوري (Axial Strain) فـإذا كان الطول الأصلي بين النقطتين هو (L) والطول النهائي هو (Lo) فأن الاسـتطالة ( $\Delta L = Lo - L$ ) . ومـن هـنا فأن الانفعال يعطى حسب العلاقة التالـية والتـي أشـرنا أليها سابقاً ( $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ ) وبمعرفة تشوه الجسم في جميع نقاطـه وحالة تثبيته يمكننا تحديد إزاحة جميع نقاطه، أي ـــ إحداثياتها الجديدة بعد الانفعال .

أن الاســتعمال الطبيعي للإنشاءات يتطلب أن يكون تشوه أجزائها مرناً. وأن مقــدار 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 فهــناك مــا يســمى بالانفعالات المرنة ( Elastic Strain )، والتي تعرف بالانفعــالات التــي تختفي عند رفع الحمولات الخارجية عن الجسم، أما النوع الثانــي من الانفعالات فيسمى بالانفعالات اللدنة ( Plastic Strain ) ، والتي تعــرف بالانفعالات التي تعتمد على مقدار الحمولات وتكون مستقلة تماماً عن الزمن ولا تختفي عند إزالة الحمولات عن الجسم .

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

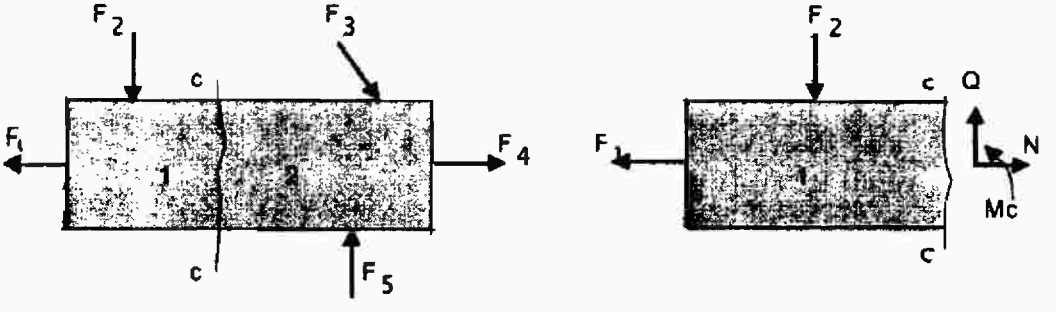
ويجــب الإشارة هنا إلى أن خاصية المطاوعة أو الهشاشة لا تعتمد على نــوع المادة فقط، وإنما على عوامل أخرى كثيرة منها درجة الحرارة، سرعة الإجهــاد، ونوعــية حالــة الإجهاد وغيرها. فمثلاً ينتمي النحاس، والألمنيوم، والفولاذ المنخفض الكربون إلى المواد المطاوعة، في حين ينتمي حديد الزهر الفولاذ العالي الكربون،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

### 4.3.1. طريقــة القطــاعــات

تعتــبر طــريقة القطاعات الطريقة العامة في علم مقاومة المواد ، لإيجاد القــوى الداخلــية والعزوم العاملة على مقطع معين لجسم ما في حالة اتزان . حيــث 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 الدراســة، وبعد ذلك نهمل احد القسمين (في معظم الأحيان القسم الواقع تحت أكــثر تأثــير قــوى)، حيث نجد أن التأثير المتبادل بين القسمين يستبدل بقوى داخلــية، بحيــث تساوي القوى الخارجية التي تؤثر على الجسم المقطوع، بعد ذلك نرسم مخطط الجسم الحر (Free Boday Diagram) حيث يكون من الســهولة فــي هــذه الحالة أيجاد القوى والعزوم على المقطع بتطبيق شروط الاتزان.

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




الشكل (1-5)

إذا كانــت القــوى الخارجــية تقع في مستوى واحد فأنه من الضروري لــتوازنها تســليط ثــلاث قوى على المقطع: (Q) تؤثر على مستوى المقطع العرضــي وتسمى بالقوة العرضية أو قوة القص (Shearing Force)، قوة (N) باتجــاه محــور الجســم وتســمى بــالقوة الطولــية (المحوريــة) ( Longitudinal Force )، وعــزم ( Mc ) ويسمــى بعــزم الانحنــاء ( Bending Moment ) الــذي 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 .ويجـب الإشارة إلى أننا نحصل على القوة N عند إسقاط القوى المؤثـرة علـى الجـزء المقطوع على اتجاه محور هذا الجزء بحيث يساوي مجموع المساقط صفراً، وبإسقاط القوى على أنجاه 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 ثلاثـية الأبعاد (الفراغ)، فأنه عندئذ من الممكن إن تظهر في المقطع العرضي ست قوى داخلية تشكل مركبات المتجه والعزم الرئيسيين لنظام القوى الداخلية: N– القـوى الطولـية، Qy– القـوى العرضية، القوى العرضية Qx وثلاثة عـزوم Mx، My، Mz، حيث أن العزمين Mx ،My هما عزمين انحناء أما العزم Mz الذي يؤثر في مستوى المقطع فيسمى بعزم الالتواء ( Torsional Moment) وذلـك لأنه ينشأ عند التواء الجزء. ولتحديد هذه القوى الست من الضـروري اسـتعمال ست معادلات للاتزان بحيث إن مجموع مساقط القوى علـى محـاور الإحداثيات الثلاثة يساوي صفراً، وكذلك مجموع عزوم القوى يساوي صفراً بالنسبة للمحاور الثلاثة التي تبدأ في مركز ثقل المقطع.

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

1- أحداث قطع للجسم أو مجموعة أجسام.

2- إهمال احد القسمين.

3- تسـليط قـوى على المقطع محل الدراسة تكون مساوية للقوى الخارجية المؤثرة على الجزء المقطوع.

4- أيجاد قيم القوى المجهولة من معادلات الاتزان الموضوعة 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. القــوة الطولية N فقط وتسمى هذه شداً إذا كانت القوة منطلقة من المقطع، وانضغاطاً إ ذا كانت القوة الطولية موجهة نحو المقطع .

3. عزم الانحناء $M_x$ أو $M_y$ في حالة الانحناء .

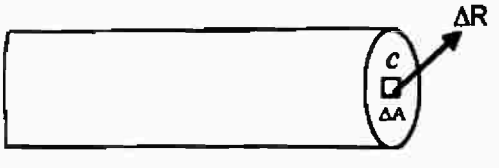
4. عزم الالتواء $M_t$ فقط في حالة الالتواء .

5. عدة قوى مثل عزوم الانحناء والالتواء في حالة التشوه المعقد .

## 5.3.1 الإجهـــــــاد ( Stress )

ذكــرنا ســابقاً بان القوى الداخلية تظهر نتيجة التأثيرات الخارجية ، وان القــوى المتمركزة الداخلية N , Q , M لا تؤثر في المقطع العرضي للجسم ، بــل تؤثــر قــوى موزعــة بانــتظام . قــد 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 $\Delta A$ حول النقطة c. ونفرض أن $\Delta R$ هــي محصــلة القــوى الداخليــة المؤثرة على هذه المساحة كما هو مبين في الشكل ( 1-6 ) .




الشكل (1-6 )

أن متوسط مقدار القوى الداخلية المؤثرة على وحدة المساحة من المساحة $\Delta A$ يساوي :-

$$P = \frac{\Delta R}{\Delta A} \quad \text{.....(7-1)}$$

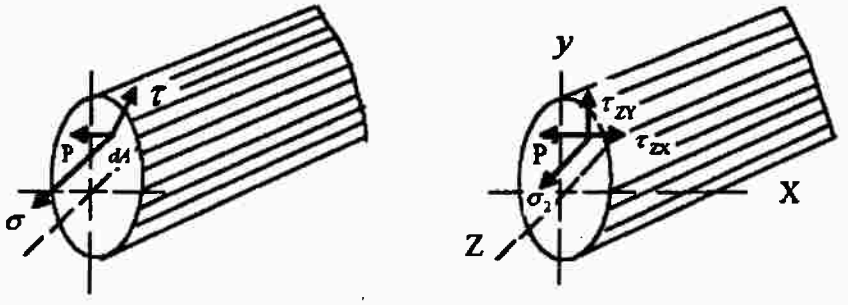
يسمى مقدار $P_1$ – بمتوسط الإجهاد وهو يبين متوسط شدة القوى الداخلية . وبتقليل أبعاد المساحة نحصل على :-

$$P = \lim_{\Delta A \to 0} \frac{\Delta R}{\Delta A} \quad \text{.....(8-1)}$$

مقدار P – يسمى بالإجهاد الحقيقي أو إجهاد نقطة معلومة في مقطع معين . ومن العلاقتين ( 1-7) ، (1-8 ) 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 $\Delta R$ ، كما أن اتجاه الإجهاد P لا يشترط أن يكون عمودياً على المقطع المار بالنقطة c ، ونتيجة لذلك وتيسيراً للدراسة فأنه يمكن تحليل نتيجة لذلك وتيسيراً للدراسة فأنه يمكن تحليل الإجهاد الكلي P ، بنفس الطريقة التي تحلل بها القوة العادية، إلى مركبتين كما في الشكل (1-7 , a) . أحداهما عمودية على مستوى المقطع وتسمى هذه المركبة بالإجهاد العمودي (Normal Stress) ويرمز إليها عادة بالرمز $\sigma$، والثانية مركبة تقع في مستوى المقطع وتسمى بالإجهاد التماسي أو إجهاد القص (Shear Stress) ويرمز إليها بالرمز $\tau$ . ومن الممكن أن يأخذ إجهاد القص أي اتجاه في مستوى المقطع ، تبعاً للقوة المؤثرة وللسهولة فأن $\tau$ يعبر عنها عادة بصورة مركبتين باتجاه محاور الإحداثيات الشكل (1-7 , b ) .



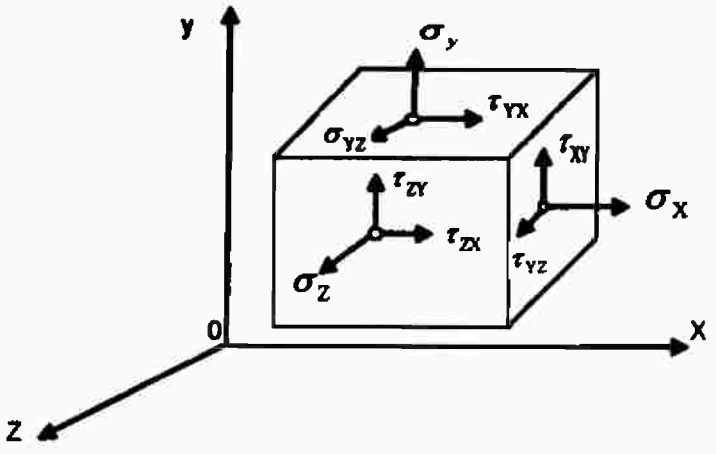

( a ) ( b )

الشكل (1-7)

يرمز عادة إلى الإجهاد كما هو مبين في الشكل (1-7) حيث يبين الإجهاد العمـودي بعلامـة توضح محور الإحداثيات الذي يوازيه الإجهاد . الإجهاد العمـودي يعتبر موجباً إذا كان شاداً ، ويعتبر سالباً إذا كان ضاغطاً . ويرمز إلـى إجهـاد القـص ( 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 معنـى ومحـتوى فيزيائياً معيناً حيث أن الإجهاد العمودي يظهر عندما تحول جـزئيات المـادة الماسة للمساحة المعينة الابتعاد عن بعضها أو التقارب من ماسة للمساحة المعينة الابتعاد عن بعضها أو التقارب من بعضها . أما الإجهاد التماسي فانه مرتبط بقص المادة في مستوى المقطع المذكور .

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



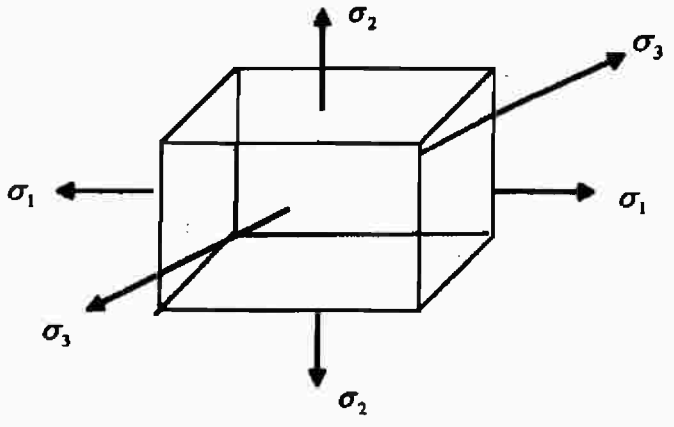

الشكل ( 1-8 )

أن مجموعة الاجهادات على كافة المساحات الأولية ،والتي يمكن تمريرها خلال نقطة معينة من الجسم تسمى بحالة الإجهاد في النقطة المعينة .

فإذا كانت الاجهادات العمودية وحدها تؤثر على أوجه المكعب فأنها تسمى بالاجهادات الرئيسية، أما المساحات التي تؤثر عليها الاجهادات الرئيسية فإنها تسمى بالمساحات الرئيسية.

ويرمـــز عادة إلى الاجهادات الرئيسية $\sigma_3$, $\sigma_2$ , $\sigma_1$ . أن حالة الإجهاد المختلفة الإشكال تقسم عادة تبعاً لعدد الاجهادات الرئيسية المؤثرة.

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




الشكل ( 1-9 )

كمـــا أشـــرنا ســـابقاً إن الإجهاد عند النقطة c سواء $\tau$ , $\sigma$ يتوقف على المستوى الذي يمر بالنقطة c ذلك أن قيمة القوة $\Delta R$ التي تؤثر على المساحة $\Delta A$ تـــتوقف على المقطع الذي تقع فيه هذه المساحة وبالتالي تؤثر عليه هذه القوة ، بحيث لو أخذنا مستوى أخر يمر بالنقطة c ثم وجدنا قيمة القوة $\Delta R$ ، وبالتالـــي قـــيمة الإجهـــادات P ، $\sigma$ ، $\tau$ على هذا المستوى لحصلنا على قيم تخالف تماماً القيم السابقة للاجهادات المؤثرة عند النقطة c على المقطع.

ومعـــنا هذا أن الإجهاد عند أي نقطة في الإنشاء يجب أن يرتبط بمستوى معـــين يمـــر بالنقطة ، حيث تتحدد قيمته تبعاً لهذا المستوى ومن الطبيعي أن تكـــون هـــناك صـــلة بـــين مركبات الإجهاد عند النقطة c بالنسبة للمستويات المختلفة التي تمر بهذه النقطة .

## 4.1.النظـــام العالمـــــي لوحـــدات القيـــاس
## ( InternationaL System of Units .SI )

مـــع أن الـــنظام الخـــاص لوحدات القياس قد يكون اختيارا في كثير من الأحـــيان، آلا أن الحاجة إلى نظام موحد والى لغة عالمية للوحدات والرموز أصبحت ملحة جداً في ظل التطور الصناعي المطرد الذي يشهدهالعالم .

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

يحـــتوي الـــنظام العالمـــي للوحدات (SI) على ست أبعاد قياسية أساسية بدلالـــتها يمكـــن اشتقاق وحدات أخرى نحتاج أليها في العلوم الهندسية مختلفة الفـــروع وذلـــك بواســـطة 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 مقاومـــة المـــواد كالقـــوة ، والكـــتلة ، والعزم ، والقدرة ، والطاقة ، والشغل وغيرها.

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

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

| الكميـــة الطبيعـــية | الرمـــز | الوحدات الهندسية حسب النظام العالمي |
|---|---|---|
| الطـــول | L | المتـــــر ( m ) |
| الكتلـــــة | M | الكيلو غـرام ( Kg ) |
| الزمـــــن | T | الثانيـــــة ( S ) |
| كميـة المـادة | MoL | المـــول ( MoL ) |

ونستطيع أن نشتق من الوحدات الأساسية كما أشرنا سابقاً الوحدات المساعدة مثل وحدة المساحة ($m^2$) وحدة الحجم ($m^3$) وحدة 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 :-

العـــزم = القـــوة x المســـافة — $M = N.m$

الطاقـــة = القـــوة x المســـافة — $E = N.m = J$

القـــدرة = الطـــاقة / الزمـــن — $Watt = W = J/s$

الضغـــط = القـــوة / المساحـــة — $Pascal = Pa = N/m^2$

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

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

| الكمية الطبيعية | الرمز | الوحدة | | التعبير في النظام العالمي |
|---|---|---|---|---|
| القوة | F | النيوتن. | N | $Kg.m/s^2$ |
| عزم القوة | M | النيوتنx المسافة | N.m | $Kg.m^2/s^2$ |
| الضغط | P | الباسكال | pa | $N/m^2$ |
| الضغط | P | البار | Bar | $10^5 N/m^2$ |
| الطاقة | E | الجول | J | N.m |
| القدرة | P | الوات | W | J/s |
| الشغل | W | الجول | J | N.m |
| الكتلة | m | الطن | T | $10^3 Kg$ |
| الزمن | t | الدقيقة | min | 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، وتسـهيلاً لتبادل المعلومات العلمية والصناعية، ألا أنه يتحتم علينا ذكر أنظمة وحدات قياس أخرى كانت وما زالت شائعة ومستخدمة في بعض الدول.

مـــن هـــذه الأنظمة النظام الجاوسي أو نظام سم.غم.ث (cm.g.s) حيث تســـتخدم فـــي 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 :-

$$1y = 0.9144\ m \qquad , \qquad 1p = 0.452\ Kg$$

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

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

| الكمية الأساسية | النظام العالمي (m.kg.s) | النظام الجاوسي (cm.g.s) | النظام الإنجليزي (ft.p.s) |
|---|---|---|---|
| الطـــول | المتـــر -m | السنتيمتر -cm | القـــدم -ft |
| الكتلـــة | الكيلوغرام-kg | الغـــرام -g | الباونـد -p |
| الزمـــن | الثانيـــة -s | الثانيـــة -s | الثانيـــة -s |

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

$1kg = 1000g$

$1Mpa = 10^6\ Pa$

أن الباســـكال هـــو وحـــدة صغيرة جداً لذا لايكون دائماً من المناسب استخدام كوحدة لقياس الضغط وذلك لان (1Pa) أصغر من الضغط الجوي بحوالـــي،

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

$1bar = 10^5 Pa$

لـذا وللـتغلب علـى الصـعوبات 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.

والجـدول (1-4) يشـمل علـى الأجزاء (Fractions) والمضاعفات (Muliples) الشـائعة الاسـتعمال فـي علم مقاومة المواد والعلوم الهندسية الأخرى في النظام العالمي

**الجـدول (1-4)**

| أسـم البادئـة | الرمـز المختصر | الجـزء المضاعـف |
|---|---|---|
| كيلـو - (Kilo) | K | $10^3$ =1000 |
| ميغـا - (mega) | M | $10^6$ =1000.000 |
| هيغـا - (giga) | H | $10^9$ =1000.000.000 |
| ميلـي - (milli) | m | $10^{-3}$ =0.001 |
| ميكرو - (micro) | μ | $10^{-6}$ = 0.000.001 |
| نانـو - (nano) | n | $10^{-9}$=0.000.000.001 |

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 التطبيقـــات الهندسيـــة وطـــرق الحـــــل

ظهـــر علم مقاومة المواد ( Strenght of Materials ) كما أشرنا في بدايـــة هـــذا الكـــتاب لشـــرح طرق وحساب استقرار وصلادة ومتانة أجزاء المنشاءات والآلات والمكائن الهندسية المختلفة.

لذلك في ختام هذا الباب يتحتم علينا أن نوضح كيفية التعامل مع المسائل والتطبـــيقات المخـــتلفة وذلك من خلال توضيح خطوات الطريقة العامة التي ســـوف 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 القـــوى المؤثـــرة على هـــذا النظـــام - مـــن قـــوى عاملـــــة (Acting Forces) – والقوى المعروفة بردود الأفعال (Reations) في المساند والاتصالات، وشروط الاتزان المطلوبة .

4- دراسة الانفعالات (التشوهات) 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

والصـــيغ المخـــتلفة التي تواجهها خلال حل التطبيقات المختلفة في بعض المســـائل والأنظمـــة يكـــون من الممكن الحصول على كل من ردود الفعال المجهـــولة باستخدام معادلات الاتزان الاستاتيكي الثلاثة وتسمى هذه الأنظمة بالمســـائل أو الأنظمـــة المحددة أستاتيكياً (Statically Determinate ) ، وهـــناك نـــوع أخر من الأنظمة لايمكن الحصول على كل من ردود الأفعال المجهولة باستعمال معادلات الاتزان فقط، وأنما تتطلب دراسة انفعالات النظام المتلائمة هندسياً، وتسمى هذه الأنظمة بالأنظمة غير المحددة أستاتيكياً .

وبـــناء على هذا التعريف فأن ردود الأفعال المجهولة في الأنظمة المحددة اســـتاتيكياً تـــتطلب الخطوات الثلاثة الأولى بينما تحتاج الأنظمة غير المحددة استاتيكياً تطبيق جميع الخطوات الستة المذكورة أعلاه .

أن حل المسائل في معظم الأحيان يتطلب إنشاء وتوضيح القوى التي تؤثر علـــى النظام حيث تعد هذه الخطوة البداية السليمة والمهمة والتي تعتمد عليها شـــروط الاتزان بعد ذلك، حيث يكون في بعض الحالات البسيطة من السهولة اختـــيار الـــنظام وعزله لغرض تحليله، وفي الحالات المعقدة قد يتطلب الأمر عزل أنظمة عديدة وتحليلها كل على انفراد ومن ثم تلائم الأنظمة المختلفة في نقـــاط عـــزلها للحصول على الحل الكامل للمسألة . ونبدء عملية عزل النظام برســـم مخطط يوضح كل القوى الخارجية التي تعمـــل على النظام ويســـمى هـــذا المخطط برسم مخـــطط الجـــسم الـــحر (Free-Body Diagram )

أن الرســـم البيانـــي للمخطط الجسم الحر (F .B .D) هـــو الرســـم 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) يظهـــر فيه القوى المؤثرة على هذا النظام.

تمـــثل كل قوة في هذا المخطط أما بمقدارها إذا كانت معلومة، أو برمز أذا كانت غير معلومة، وبفرض اتجاه القوة الغير معلومة عندما لا يكـــون واضـــحاً 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 عمـــودي، وإحداثيات النقاط أن وجدت حسب نظام الإحداثيات المستخدمة لحل المسألة مثل القوى المعرفة 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 .