

## الفصل الثاني: الخواص الميكانيكية للمادة

يقصد بالخواص الميكانيكية للمادة هو سلوك وخواص المادة عند تعرضها لأنواع المختلفة من الاجهادات والاحمال مثل الشد , الانضغاط , الانحناء , الالتواء او دراسة سلوك المادة الواقعة تحت تأثير قوى خارجية. ان استجابة المواد للقوى المؤثرة عليها يعتمد على عوامل عديدة منها ترتيب الذرات والجزيئات المكونة للمادة ونوع الترابط بين الذرات والجزيئات . ويهتم المهندسون كثيرا بالخواص الميكانيكية للمواد عند تنفيذهم أي عمل هندسي من بناء الجسور والمركبات والحاسبات الالكترونية الى بناء المركبات الفضائية . وسيقدم هذا الفصل اساسيات الخواص الميكانيكية كالأجهاد والانفعال وانواعهما .

### 1 - المرونة: *Elasticity*

يتطرق موضوع المرونة الى دراسة الكيفية التي يتغير بها شكل المواد وحجمها عند تسليط قوى خارجية عليها . ويسمى هذا الموضوع في العلوم الهندسية بمقاومة المواد (*Strength of Material*) , ان كثير من المواد تستطيع الرجوع الى وضعها الاصلي من حيث الشكل والحجم بعد زوال القوة المؤثرة وتدعى بالمواد تامة المرونة (*Perfectly Elastic*) مثل بلورة الكوارتز التي تقترب مرونتها من المرونة التامة , خلافا لذلك فإنها تسمى مادة لدنة (*Plastic*) او غير مرنة اي لا تسترجع المادة وضعها الاصلي بعد زوال المؤثر اي ان الانفعال غير عكسي (*Plastic Strain*) بسبب الازاحة الدائمة للذرات داخل المادة مثل الطين والمعاجين التي تقترب من اللدونة التامة , ويحدث هذا نتيجة تسليط اجهاد او قوة خارجية بمقدار يتجاوز حدود المرونة . وماد مرنة وهي المواد التي تستطيع أن تعود إلى وضع قريب جدا من وضعها الاصلي بعد زوال السبب الذي أدى إلى تشوهها .

وتفقد المادة خاصية المرونة اذا ازدادت القوة عن مقدار معين يسمى بحد المرونة (*Elastic Limit*) وهو اقصى قوة تؤثر بها والجسم يبقى مرنا , ويعبر عن المرونة بمفهومين فيزيائيين هما الاجهاد (*Stress*) والمطاوعة او الانفعال (*Strain*) .

### 2 - الاجهاد (*Stress*)

يعرف الاجهاد بأنه القوة المؤثرة عمودياً على وحدة المساحة . ووحدة الاجهاد هي  $N/m^2$  او  $dyne/cm^2$  . فاذا كانت رمز القوة  $F$  والمساحة  $A$  فان

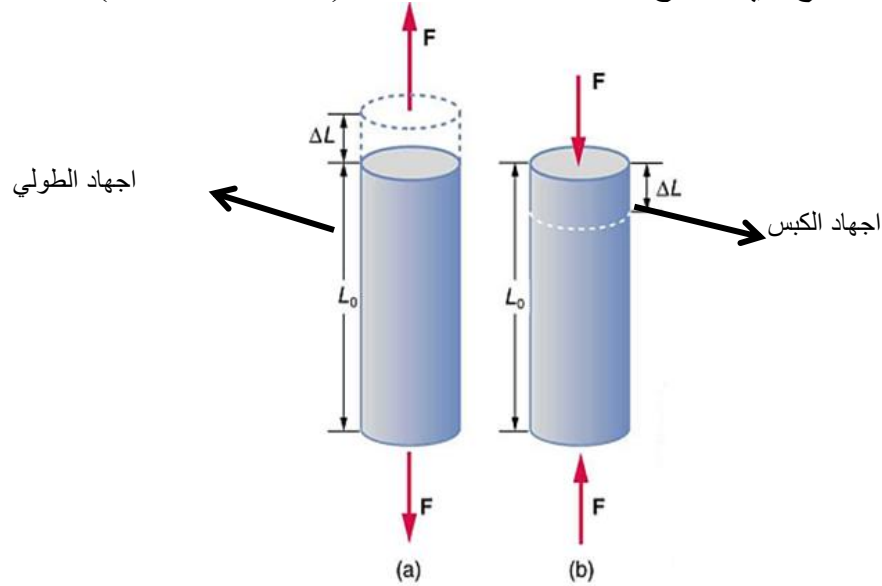
$$S = \frac{F}{A}$$

يمكن تقسيم الاجهاد الى ثلاثة انواع حسب نوع القوة المؤثرة على الجسم وهي

اجهاد طولى او الشد (Tensile stress)، إجهاد الكبس (Compressive Stress)، اجهاد قص (Shear Stress) .

• الاجهاد الطولي (Tensile Stress)

عندما تؤثر قوتان متساويتان في المقدار ومتعاكستان في الاتجاه على نهايتي الجسم وعلى نفس خط التأثير , وعليه فإن تأثير القوتين هو العمل على استطالة الجسم ويجب ان تكون القوة عمودية على مساحة المقطع . اي ان نوع القوة هو قوة شد او سحب (Tension Force)



$$S_T = \frac{F}{A} (N/m^2)$$

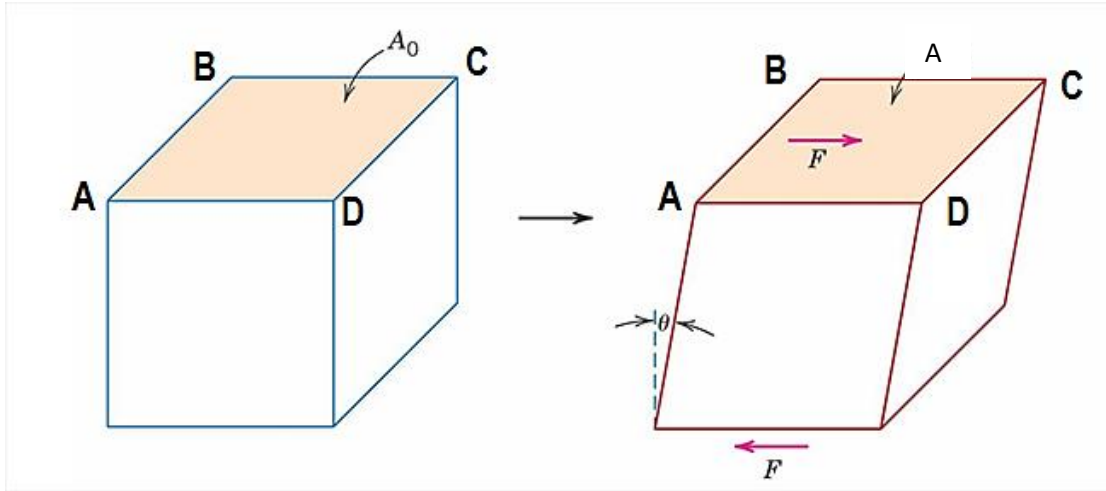
• اجهاد الكبس (Compressive)

عندما تؤثر قوتان متساويتان في المقدار ومتعاكستان في الاتجاه (متقابلتان) على نهايتي الجسم وعلى نفس خط التأثير, فان تأثير القوتين هو العمل على كبس الجسم .

$$S_C = \frac{F}{A}$$

• إجهاد القص (*Shear Stress*)

عند تأثير قوتان متساويتان في المقدار متعاكستان في الاتجاه (مبتعدتان) على نهايتي الجسم وعلى خطوط تأثير مختلفة اي عندما تكون القوة موازية للسطح كما في الشكل وبالتالي فان عمل القوتين هو تغيير شكل الجسم دون تغيير بحجمه .



إجهاد القص يعرف بأنه القوة المماسية او الموازية للسطح ABCD والمؤثرة على وحدة المساحات ويعطى بالعلاقة

$$S_{sh} = \frac{F}{A}$$

• الاجهاد الحجمي (Bulk Stress)

هو الجهد الناتج من تسليط قوى متساوية على الجسم من جميع الاتجاهات وعلى نفس خط تأثير القوة

$$S_B = \frac{F}{A} \text{ (Pressure)}$$

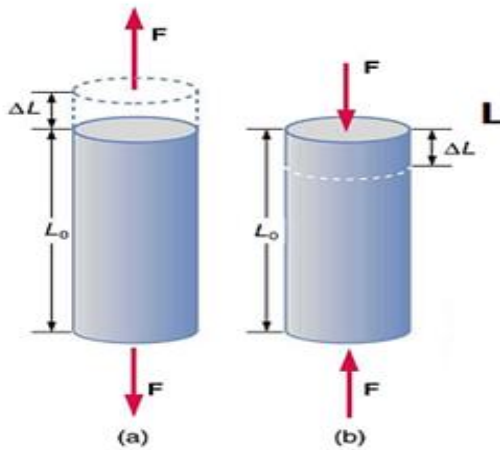
هذا النوع من الاجهاد هو الضغط لأنه يؤثر في جميع الاتجاهات  
3 - الانفعال او المطاوعة (Strain)

يعرف الانفعال إستجابة المادة للقوة المؤثرة عليها قد يكون تغير في الطول او الحجم أو الشكل او التغير النسبي الحادث في أبعاد المادة , اي التغير في الطول بالنسبة إلى الطول الاصلي أو التغير في الحجم بالنسبة للحجم أصلي وبالتالي يقاس الإنفعال الحادث للجسم بالتغير الطارئ على وحده البعد الذي يطرأ عليه التغير سواء كان هذا البعد طولاً أو حجماً أو زاوية ( شكله). نلاحظ هنا أن الانفعال ليس له وحدة لانه نسبة بين طولين او حجمين.وبما انه هناك ثلاث انواع من الاجهاد فان هناك ثلاث انواع من الانفعال ايضا حسب نوع القوة المؤثرة وهي

• الانفعال الطولي (Tensile Strain)

هو النسبة بين التغير في الطول الى الطول الاصلي  $L_0$  اي في حالة تثير قوة شد ( Tension Force) او كبس (Compressive Force)

$$N_t = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}$$



$$( \text{compressive strain} ) N_c = \frac{\Delta L}{L_0} = - \frac{L-L_0}{L_0} \quad \bullet$$

• الانفعال القصي (Shear Strain)

يعرف الانفعال القصي بمقدار الازاحة الجانبية الى الطول الاصلي

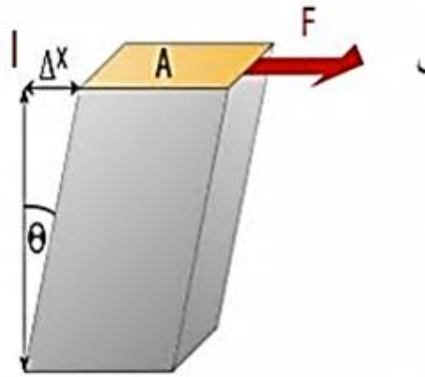
$$N_{sh} = \frac{\Delta x}{h} \quad \text{Tensile strain } N_t$$

$$\tan \theta = \frac{\Delta x}{h}$$

وتعرف  $\theta$  بالزاوية النصف قطرية وتسمى زاوية القص. وعندما تكون الزاوية صغيرة جدا فإن ظل الزاوية يساوي الزاوية نفسها أي ان

$$\theta = \frac{\Delta x}{h}$$

$$\therefore N_{sh} = \theta$$



• الانفعال الحجمي: وهو التغير في الحجم الى الحجم الاصلي عند الضغط من جميع الاتجاهات

$$N_B = -\frac{\Delta V}{V_0}$$

4 - معامل المرونة (*Modulus of Elasticity*)

هنالك انواع مختلفة من المعاملات , يعتمد نوع المعامل على نوع التشوه الذي تتعرض له المادة , كالاستطالة والانحناء وغيرها وتمثل جميع المعاملات بايجاد النسبة بين الاجهاد الى الانفعال . ان وحدات المعامل هي وحدات الاجهاد, وعندما يكون الاجهاد ضمن حدود المرونة , فان نسبة الاجهاد الى الانفعال مقدار ثابت ويسمى هذا الثابت بمعامل المرونة ويعتبر من ثوابت المادة . وبالتالي فإنه ضمن حدود المرونة تكون العلاقة خطية بين الاجهاد والانفعال وهذا ما يعرف بقانون هوك الذي ينطبق على معظم المواد المرنة في حالة حدوث انفعال صغير .

$$\text{معامل المرونة} = \frac{\text{الاجهاد}}{\text{الانفعال}}$$

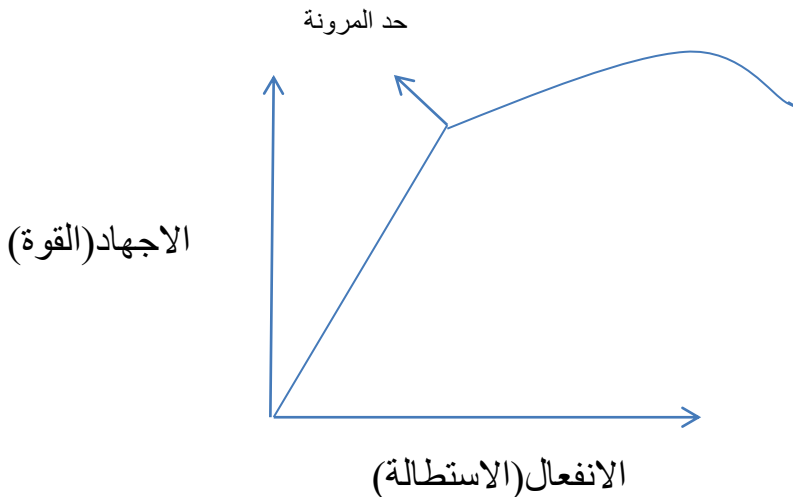
$$\text{Modulus of Elasticity} = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}}$$

(*Young 's Modulus*)

• معامل يونك

يعرف معامل يونك او معامل المرونة الطولي بانه نسبة الاجهاد الى المطاوعة في حالي الاستطالة والانكماش الطوليين . حيث اكتشف العالم يونك ان نسبة الاجهاد الى الانفعال ضمن حدود المرونة مقدار ثابت وان لكل مادة معامل يختلف عن الاخرى أي ان معامل يونك يعتمد على نوع المادة وليس ابعادها حد المرونة: هو اكبر قوة يمكن ان تؤثر على المادة دون ان تفقد مرونته

$$Y = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{FL}{A\Delta L} \quad N/m^2$$



Values for Young's modulus for various materials.

---

<b><i>Material</i></b>	<b><i>Young's modulus (<math>N m^{-2}</math>)</i></b>
Steel	$2.0 \times 10^{11}$
Brass	$1.3 \times 10^{11}$
Cast iron	$1.0 \times 10^{10}$
Aluminium	$7.0 \times 10^{10}$
Marble	$5.0 \times 10^{10}$
Concrete	$2.0 \times 10^{10}$
Brick	$1.4 \times 10^{10}$
Bone (human femur)	$1.4 \times 10^{10}$
Timber (pine)	
parallel to the grain	$1.0 \times 10^{10}$
across the grain	$1.0 \times 10^9$
Nylon	$5.0 \times 10^9$
Glass (crown)	$7.1 \times 10^{10}$
Granite	$4.5 \times 10^{10}$
Rubber	$4.0 \times 10^6$

---

## معامل القص (معامل المرونة القصي او الشكلي) share modulus of elasticity

تسمى النسبة بين الإجهاد القصي والانفعال القصي بمعامل المرونة القصي (S) share modulus ويعطى بالعلاقة التالية

$$S = \frac{S_{sh}}{N_{sh}}$$
$$= \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta X}{h}} = \frac{F/A}{\tan(\theta)}$$

في حال الزاوية النصف قطرية صغيرة فإن

$$\tan(\theta) = \theta \therefore S = \frac{F/A}{\theta}$$

## • معامل المرونة الحجمي (Bulk Modulus)

ويعرف على انه النسبة بين الاجهاد (التغير في الضغط المسلط عليها ) الى الانفعال المناظر له ( اي التغير النسبي في حجم ) وحداته هي وحدات ضغط , لا يمكن ايجاد معامل يونك او معامل القص للموائع

$$B = \frac{-\Delta P}{\Delta V/V}$$



المعامل (الاسم العلمي)	الاسم الاخر	تعريفه
<b>Yong's modulus</b>	معامل المرونة الطولي	يقيس مقاومة الجسم الصلب للتغير في الطول
<b>Share modulus</b>	معامل المرونة القصي او الشكلي	يقيس مقاومة المستويات المنزلة فوق بعضها البعض
<b>Bulk modulus</b>	معامل المرونة الحجمي	يقيس مقاومة الجسم الصلب او السائل للتغير في الحجم

### قانون هوك Hook's Law

يمكن تعريف المادة المرنة من خلال قانون هوك ( Hook's Law ) , من خلال التجارب العملية لوحظ عندما يكون الانفعالات صغيرة , وبالتالي فإن الانفعال دالة للإجهاد اي العلاقة طردية بينهما او بمعنى اخر العلاقة خطية (Linear elastic). مثال على ذلك الانفعال الطولي هو دالة للإجهاد الطولي في حالة في حالة الشد البسيط.

اذا اثرنا على سلك طوله  $L$  بقوة  $F$  فإنه يحدث له استطالة مقدارها  $\Delta L$  وكلما زادت القوة تزداد معها الاستطالة اي ان القوة دالة للاستطالة اي العلاقة طردية كما في الشكل المجاور .

وبالتالي فإن قانون هوك ينص :

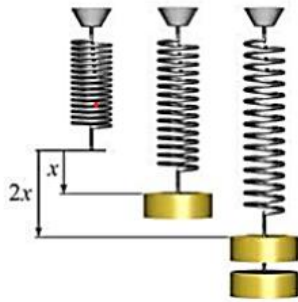
يتناسب الانفعال الحادث في المادة المرنة, تناسبا طرديا مع الاجهاد الذي يؤثر فيها , بشرط ان لا تتعدى المادة حدود المرونة . اي ضمن حدود المرونة

ضمن حد المرونة فإن الاستطالة تتناسب طرديا مع قوة الشد المؤثر عليها

$$F \propto \Delta L$$

اي ان الاجهاد يتناسب مع الانفعال

$$\text{Stress} \propto \text{Strain}$$



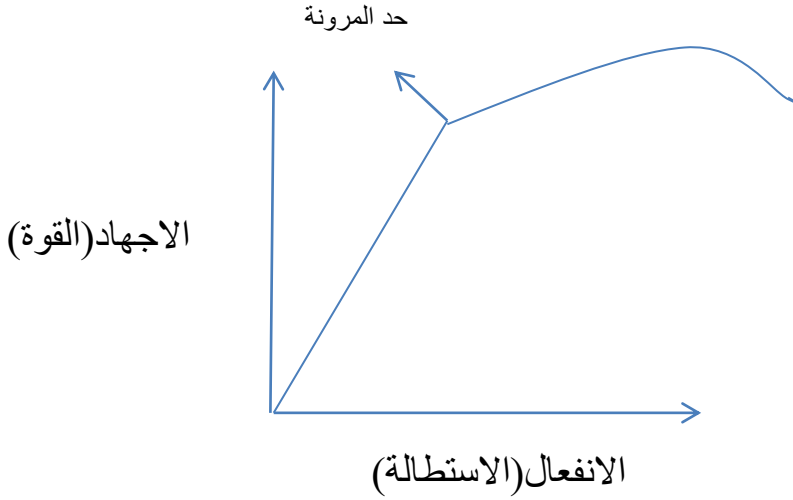
$$\therefore \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} = \text{constant}$$

اي ان قانون هوك يعمل او يطبق ضمن المنطقة الخطية من منحنى الاجهاد والانفعال. وبعدها لا يطبق لان العلاقة تصبح غير خطية

اذا ضمن حدود المرونة في حالة الاستطالة Tensile او الكبس Compressive فإن

$$(Youn's Modulus) Y = \frac{Stress}{Strain} = \frac{FL}{A\Delta L} \quad N/m^2$$

لمعظم المواد الهندسية يكون معامل يونك كبير مثلا للستيل يساوي  $200 \times 10^9 N/m^2$



#### ● منحنى الاجهاد – الانفعال

ان العلاقة بين الاجهاد والانفعال علاقة معقدة تعتمد على عوامل عدة منها قوى الترابط بين الذرات والجزينات , وترتيبها والعيوب البلورية في المادة.

1- المرحلة الاولى O E وهي مرحلة المرونة حيث تكون العلاقة بين الاجهاد والانفعال علاقة خطية (طردية) حيث ينطبق قانون هوك في تلك المنطقة المستقيمة. وتحفظ المادة بكامل مرونتها حيث تستطيع المادة من العودة الى حالتها الاولى بعد زوال المؤثر. وتسمى النقطة E حد المرونة

2- بعد النقطة E نلاحظ ان الخط ينحني ويزداد الانفعال بصورة كبيرة وتستمر الى النقطة Y وفي المرحلة الثانية EY لا تستطيع المادة استرجاع كامل شكلها الاصلي بعد زوال المؤثر لكن تحدث تشوهات قليلة على شكل المادة.

3- المرحلة الثالثة وهي YC ونلاحظ فيها زيادة الانفعال بكميات كبيرة دون زيادة محسوسة بالإجهاد, حيث لا تستطيع المادة استرجاع شكلها الاصلي, وتسمى النقطة Y بنقطة الخضوع.

4- وفي هذه المرحلة تحدث تشوهات كبيرة وتكون الاستطالة نتيجة الاجهاد القصي وليس الاجهاد الطولي ويزداد الانفعال نتيجة زيادة الاجهاد الى ان نصل الى نقطة تبدأ فيها حالة عدم الاستقرار ويحدث التخصر حيث تمثل هذه المرحلة بالنقطة N وتسمى نقطة الكسر ويسمى الاجهاد عند تلك النقطة بإجهاد الكسر او القطع وبعدها يبدأ الاجهاد بالانخفاض .

