الفصل الأول_ الشد والانضغاط

1. المقدمة

1.1 تعريف قوة المواد

إن مقاومة المواد هي فرع من فروع الميكانيكا، وتسمى أيضًا ميكانيكا الأجسام الصلبة القابلة للتشوه؛ وهي تستخدم مفاهيم التوازن الثابت وخصائص المواد، والتي تُستخدم في تصميم وتحديد أحجام الأجزاء الإنشائية أو عناصر الآلات. هي أيضا دراسة الإجهاد وتشوه عناصر البناء سواء في الهندسة الميكانيكية أو في الهندسة المدنية، حيث تشكل الأداة الأساسية للمهندس لإنشاء منشآت اقتصادية لا تتعرض لخطر الكسر أو التشوه المفرط تحت وطأة الأحمال المطبقة عليها.

1.2 غرض الدراسة

تغطي مقاومة المواد الأساليب الهندسية المستخدمة لحساب قوة وصلابة واستقرار عناصر الآلات والإنشاءات. ونعني بـ:

المقاومة: قدرة القطعة على تحمل ونقل الأحمال الخارجية المفروضة عليها؛
الصلابة: يجب ألا يتعرض القطعة لتشوه مفرط عند تعرضها للإجهاد؛
الثبات (الاستقرار): يجب أن تحافظ القطعة على سلامتها الهندسية بحيث يتم تجنب الظروف غير المستقرة (الانبعاج، الانسكاب).

تتكون عملية حساب أولية على أساس قوانين مقاومة المواد من:

- اختيار المادة المكونة للعنصر.
- تحديد الأبعاد الوظيفية للعنصر.
- التحقق من مقاومة الكسر للعنصر.
- تحسين تكلفة القطعة عن طريق تغيير الأشكال والأبعاد والمواد وما إلى ذلك.

1.3 المفاهيم العامة

لا يمكن لتصميم أنواع مختلفة من الآلات والإنشاءات الصناعية المتنوعة (الجسور وخطوط النقل والحظائر والسفن والمحركات والتوربينات ومحطات الطاقة والطاقة النووية والآلات وأدوات الآلات وما إلى ذلك) أن يعتمد بأي حال من الأحوال فقط على المعرفة الأساسية بمقاومة المواد. ومع ذلك، وعلى الرغم من تنوع هذه الهياكل، يمكن تقليصها إلى عدد قليل نسبيًا من الأشكال الرئيسية مثل القضبان والعوارض والألواح (الشكل 2) والأجسام الضخمة.

- الفرضيات الرئيسية

في استخدامها الحالي، تستخدم مقاومة المواد الفرضيات التالية:

- **استمرارية المادة**: معدن ذو بنية ليفية، أو أحيانًا حبيبية؛ المسافات بين هذه الألياف أو هذه الحبيبات صغيرة جدًا مقارنة بأبعاد أصغر الأجزاء؛
- **مرنة**: تعود المادة إلى شكلها الأولي بعد دورة تحميل/تفريغ؛
- **خطية**: التشوهات تتناسب مع الضغوط؛
- **متجانسة**: المادة من نفس الطبيعة في جميع كتلتها؛
- **متساوية الخواص**: خصائص المادة متطابقة في جميع الاتجاهات.

تعتبر الإشكالية :

- في التشوهات الصغيرة؛
- ثابتة (لا توجد تأثيرات ديناميكية)؛
- متساوية الحرارة (لا يوجد تغير في درجة الحرارة)

من ناحية أخرى، سيتم الاحتفاظ بالفرضيات التالية طوال محتوى الدرس:
افتراض نافييه - برنولي (Navier – Bernoulli): تظل المقاطع العمودية على محور القضيب مستوية وعمودية أثناء عملية التشوه (انظر الشكل 1).
افتراض سانت - فينان (Saint – Venant): لا تنطبق نتائج المقاومة بشكل صحيح إلا على مسافة بعيدة بما يكفي عن منطقة تطبيق القوى المركزة. في الواقع، لا يمكننا، باستخدام معادلات الدراسة، حساب التشوهات المحلية حول نقطة تطبيق القوة.

1.4 أنواع الأحمال

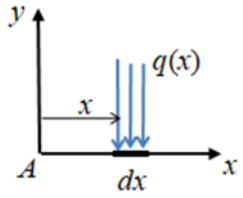
1.4.1 مفاهيم القوى الخارجية والقوى الداخلية

القوى الخارجية أو الأحمال هي قوى التفاعل بين عنصر مدروس والأجسام التي تكون على اتصال به؛ وهي تمارس بواسطة أجسام خارج النظام. والقوى الداخلية هي تلك التي تمارسها الأجسام الداخلية للنظام، وهي تعمل تحت تأثير قوى خارجية. إن دراسة التأثيرات الداخلية للقوى المؤثرة على جسم ما تشكل أحد اهتمامات مقاومة المواد. وسنرى لاحقًا، واعتمادًا على نوع الطلب، تحليل وتحديد هذه الأفعال الميكانيكية.

1.4.2 أنواع الأحمال الميكانيكية المطبقة على الأنظمة المعتبرة

بالإضافة إلى القوى الخارجية المطبقة على النظام، فإن ردود الفعل عند الدعامات هي قوى مركزة. الحمل الموزع على السطح والذي يمكن إعادته إلى المستوى الرئيسي، أي الحمل الموزع على خط، يسمى الحمل لكل وحدة طول، ويتم قياسه غالبًا بوحدة نيوتن/متر (q في الشكل 3). في حالة الحمل الموزع بشكل موحد، يكون الرسم البياني q مستطيلًا. إذا كان متغيرًا بشكل موحد، يكون الرسم البياني q مثلثًا.

إن التحول إلى قوة تعادل حملًا موزعًا في اتجاه واحد هو طريقة مقبولة بشكل عام. بالنسبة للشحنة ذات الاتجاه الثابت، يمكننا كتابة:



$$F = \int q(x)dx \qquad (1)$$

إن محصلة الحمل الموزع تساوي عدديا مساحة مخططه وتطبق على مركز ثقل الأخير.

3.1.1 التوازن الساكن (مراجعة)

نتذكر أن جميع كميات الشعاعية غالبًا ما يتم تمثيلها فيما يتعلق بإطار مرجعي عمودي مستقيم مع المحاور المقابلة Ox وOy وOz. يعبر شرط التوازن الأول للتوازن الساكن لجسم صلب عن التوازن في الترجمة، ونكتب:

$$\sum \boldsymbol{F} = \boldsymbol{0} \qquad (2)$$

تعادل هذه المعادلة معادلات قياسية ثلاث لمكونات القوة:

$$\sum F_{ix} = 0\ ;\ \sum F_{iy} = 0\ ;\ \sum F_{iz} = 0\ ; \qquad (3)$$

يجب ملاحظة أنه في (2) و (3) هو في الواقع مجموع كل القوى الخارجية. الشرط الثاني للتوازن الساكن لجسم صلب يعبر عن التوازن الدوراني:

$$\sum \boldsymbol{M}(\boldsymbol{F}) = \boldsymbol{0} \qquad (4)$$

مرة أخرى، المعادلة (4) تعادل ثلاث معادلات قياسية لمكونات شعاع للعزم:

$$\sum M_{ix} = 0\ ;\ \sum M_{iy} = 0\ ;\ \sum M_{iz} = 0\ ; \qquad (5)$$

4. الحملات المحورية على القضبان

نفترض في البداية قضيبًا معدنيًا مستقيمًا في البداية بمقطع عرضي ثابت، محملاً عند طرفيه بزوج من القوى المتوازية ذات الاتجاهين المعاكسين والتي تتزامن مع المحور الطولي للقضيب وتعمل من خلال مركز كل مقطع عرضي.

لتحقيق التوازن الساكن يجب أن تكون مقادير القوى متساوية. إذا كانت القوى موجهة بعيدًا عن الشريط، يقال إن الشريط في حالة شد؛ وإذا كانت موجهة نحو الشريط، توجد حالة ضغط. توضح الشكل 5 هذين الشرطين في.

إن مخطط القطع ***a-a*** عمودي على محور القضيب. والآن تصبح القوى الداخلية الأصلية خارجية بالنسبة للجزء المتبقي من الجسم (الشكل a6). ولكي يتوازن الجزء إلى اليسار، يجب أن يكون هذا "التأثير" قوة أفقية بقيمة P. ومع ذلك، **فإن هذه القوة P المؤثرة عموديًا على المقطع العرضي *a-a*** هي في الواقع محصلة القوى الموزعة المؤثرة على هذا المقطع العرضي في اتجاه عمودي عليه.

4.1 الإجهاد العمودي

لنفترض القضيب في حالة شد كما هو موضح بالشكل 5. بمعرفة مساحة المقطع العرضي الأصلية، يمكن الحصول على الإجهاد العمودي، الذي يرمز له بـ **σ**، لأي قيمة للحمل المحوري باستخدام العلاقة :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (6)$$

تُسمى شدة القوة العمودية لكل وحدة مساحة **بالإجهاد العمودي** ويُعبر عنها بوحدة القوة لكل وحدة مساحة، نيوتن/م2 (N/m^2).

إذا كانت القوى المطبقة على أطراف القضيب بحيث يكون القضيب في حالة شد، فإن **إجهادات الشد تنشأ** في القضيب؛ وإذا كان القضيب في حالة ضغط فلدينا **إجهادات ضغط**. يمر خط عمل القوى الطرفية المطبقة عبر مركز كل مقطع عرضي للقضيب.

الوحدات: ميجا باسكال أو نيوتن/ملم2 (ميجا باسكال، 1 ميجا باسكال = 1 نيوتن/ملم2).
(Mega-Pascal, 1 MPa = 1 N/mm^2) N/mm^2 or MPa.

4.2 التشوه العمودي

لنفترض أن قضيب الشكل 5 يتعرض لقوى شد تدريجية على الأطراف. يمكن إيجاد **الاستطالة** لكل وحدة طول، والتي تسمى التشوه العمودي ويرمز لها بـ ε، عن طريق قسمة الاستطالة الكلية ΔL على الطول L، أي:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (7)$$

يتم التعبير عن التشوه عادة بوحدات ممتر لكل ممتر وبالتالي فهو بلا أبعاد.

4.3 علاقة الإجهاد الطبيعي بالانفعال الطبيعي

4.3.1 منحنى الإجهاد بالانفعال

مع زيادة الحمل المحوري في الشكل 6 (القضيب في حالة شد) تدريجيًا، يتم قياس الاستطالة الكلية على طول القضيب عند كل زيادة في الحمل ويستمر ذلك حتى يحدث كسر العينة. تمثل هذه التجربة ما يسمى ب **اختبار الشد**.
بعد الحصول على العديد من أزواج قيم الإجهاد الطبيعي σ والانفعال الطبيعي ε، يمكن رسم البيان التجريبي مع اعتبار هذه الكميات كإحداثيات على التوالي. هذا هو منحنى الإجهاد والانفعال (الشكل 7) أو الرسم التخطيطي للمادة لهذا النوع من التحميل.
ومن الجدير بالذكر أن مخططات الإجهاد والانفعال تتخذ أشكالًا مختلفة على نطاق واسع للمواد المختلفة. يسمح اختبار الشد وحده بتحديد الخصائص الميكانيكية الشائعة المستخدمة في ميكانيكا المواد.
تفاصيل مهمة موجودة في الفيديو الموجود على الرابط التالي: https://youtube/FyhIezLB0wQ

4.3.2 قانون هوك

كما هو موضح في الشكل 8، فإن العلاقة بين الإجهاد والانفعال خطية. هذه العلاقة الخطية بين الاستطالة والقوة المحورية المسببة لها تسمى قانون هوك. لوصف هذا النطاق الخطي الأولي لتأثير المادة، يمكننا بالتالي أن نكتب :

$$\sigma = E\varepsilon \quad (8)$$

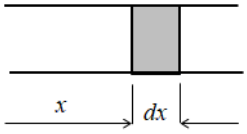
حيث يشير E إلى ميل الجزء المستقيم AB من المنحنى في الشكل 8.
الكمية E ، أي نسبة الإجهاد الوحدوي إلى الانفعال الوحدوي، هي **معامل مرونة المادة تحت الشد**، أو كما يطلق عليه غالبًا **معامل يونج** (Young). يتم جدولة قيم E لمختلف المواد الهندسية في المراجع.
ومن الجدير بالذكر أن سلوك المواد تحت الحمل كما تمت مناقشته في هذه الدرس يقتصر على **المنطقة الخطية لمنحنى الإجهاد والانفعال**.
باستخدام المعادلتين 7 و8، نوضح أن **الاستطالة الكلية** لقضيب بطول L وسطع عرضي (المقطع) ثابت A تحت الشد بواسطة القوة P تعطى بالصيغة التالية:

$$\Delta L = \frac{PL}{EA} \quad (9)$$

في الحالة العامة حيث تتغير القوة الطبيعية الداخلية على طول الشريط، وكذلك حالة المقطع المتغير، مع الأخذ في الاعتبار عنصر بطول dx يمكننا أن نكتب:

$$\sigma(x) = \frac{N(x)}{A(x)}$$

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{dx} = \frac{\sigma_x}{E} = \frac{N(x)}{EA(x)}$$



الاستطالة الجزئية هي:

$$\Delta l = \int_x \frac{N(x)}{EA(x)} dx \quad (10)$$

يتم التكامل حسب طول كل جزء، ومن ثم يتم الجمع حسب أجزاء الشريط.

$$\Delta L = \sum \int_x \frac{N(x)}{EA(x)} dx \quad (11)$$

4.3.3 السلوك الحراري الميكانيكي

إن التغيرات في درجات الحرارة في الهيكل تؤدي إلى إجهادات داخلية، تمامًا كما تفعل الأحمال المطبقة. **التشوه الحراري** الناتج عن تغير درجة الحرارة ΔT هو

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot \Delta T \quad (12)$$

معامل التمدد (يُشار إليه عادةً بـ α) يُعرَّف بأنه التغير في الطول لكل وحدة طول لقضيب مستقيم يخضع لتغير في درجة الحرارة بمقدار درجة واحدة. قيمة هذا المعامل مستقلة عن وحدة الطول ولكنها تعتمد على مقياس درجة الحرارة المستخدم.

مثال: لمادة الفولاذ $\alpha = 1.2\ 10^{-5}\ /\ ^\circ C$

تمثل المعادلة 10 استطالة القضيب المحمل بالشد بمقدار P. تحت التحميل بالقوة ودرجة الحرارة، يكون قانون هوك- دوهاميل (***Hooke-Duhamel***) هو

$$\Delta l = \frac{PL}{EA} + \alpha \Delta T \quad (13)$$

تسمى الإجهادات الناتجة عن اختلاف درجات الحرارة **بالإجهادات الحرارية**.

4.4 حالة الاجهاد الأقصى

يتم كتابة شرط مقاومة الشد أو الضغط ببساطة على النحو التالي :

$$\sigma_{\max} \le [\sigma] \quad (14)$$

حيث أن $[\sigma]$ أو σ_{alow} هو الإجهاد المسموح به للمادة.

4.5 معامل بواسون (Poisson)

عندما يتعرض قضيب لقوة شد، يحدث زيادة في طول القضيب في اتجاه الحمل، ولكن يحدث انخفاض في الأبعاد الجانبية العمودية على الحمل. تُعرف نسبة الانفعال في الاتجاه الجانبي إلى الانفعال في الاتجاه المحوري بنسبة بواسون**(Poisson)**. بالنسبة لمعظم المعادن، تقع في نطاق 0.25 إلى 0.35.

$$\nu = \frac{\text{Lateral strain}}{\text{Axial strain}} \quad (15)$$

5. نظام الوحدات الدولي SI والتحويل إلى وحدات إنجليزية

يستخدم نظام الوحدات الدولي **SI** في جميع أنحاء العالم ويُطلق عليه أيضًا نظام الوحدات الدولي. يوضح الجدول أدناه وحدات الكميات الفيزيائية الأكثر شهرة وتحويلها إلى وحدات النظام الإنجليزي.

Quantity	Symbol	SI Units	English Units	To Convert from English to SI Units Multiply by
Length	L	m	ft	0.3048
Mass	m	kg	lbm	0.4536
Time	t	s	sec	1
Area	A	m^2	ft^2	0.09290
Volume	V	m^3	ft^3	0.02832
Velocity	V	m/s	ft/sec	0.3048
Acceleration	a	m/s^2	ft/sec^2	0.3048
Angular velocity	ω	rad/s	rad/sec	1
		rad/s	rpm	9.55
Force, Weight	F, W	N	lbf	4.448
Density	ρ	kg/m^3	lbm/ft^3	16.02
Specific weight	γ	N/m^3	lbf/ft^3	157.1
Pressure, stress	ρ, σ, τ	kPa	psi	6.895
Work, Energy	W, E, U	J	ft-lbf	1.356
Power	W	W	ft-lbf/sec	1.356
		W	hp	746