

# الباب السادس

## سلوك المواد الهندسية تحت تأثير الانحناء الاستاتيكي

( STATIC BENDING )

مقدمة :

اولا : اجهادات الانحناء في حدود المرونة

ثانيا : اجهادات الانحناء فوق حدود المرونة

ثالثا : انواع اختبار الانحناء

رابعا : اختبار الانحناء المكمرى

- ا - عينات الاختبار  
ب - اجزاء الاختبار  
ج - الخواص الميكانيكية في الاختبار  
د - انهيار المواد بالانحناء المكمرى

خا - ا : الثنى على البارد

- ا - قطع الاختبار  
ب - اجزاء الاختبار  
ج - مكينات الاختبار  
د - انهيار المواد في اختبار الثنى على البارد

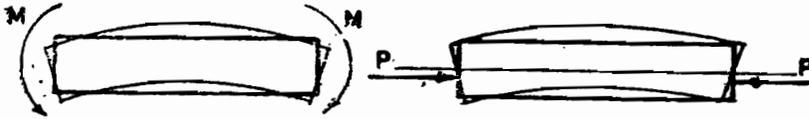
سادسا : اختبارات ثنى اخرى للمعادن

- ا - اختبار الثنى على الساخن  
ب - اختبار ثنى التسقية  
ج - اختبار ثنى الحز ،

## مقدمة :

يعتبر الجسم في حالة إنحناء إذا تعرض إلى حمل أو مجموعة من الأحمال بحيث يتولد عنها إجهادات شد على جزء من مقطع الجسم مصحوبة بإجهادات ضغط على باقي المقطع وتحدث حالة الانحناء إذا ما تعرضت كرتة (Beam) إلى أحمال جانبية (Lateral Loads) أو إلى عزوم إنحناء (Bending Moments) أو إلى تحميل لامركزي (Eccentric Loading) كما يقين ذلك من الشكل رقم (٦ - ١) .

وتعرض المنشآت الهندسية المختلفة والمباني أثناء أداؤها الأعمال المتنوعة إلى إجهادات الإنحناء التي قد تكون مصحوبة بإجهادات شد مباشر أو ضغط مباشر أو إجهادات قص (Shear Stresses) أو إجهادات التواء (Torsional Stresses) .

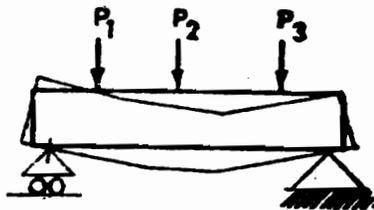


Bending moments

عزوم إنحناء

Eccentric loading

تحميل لامركزي (أكستريك)

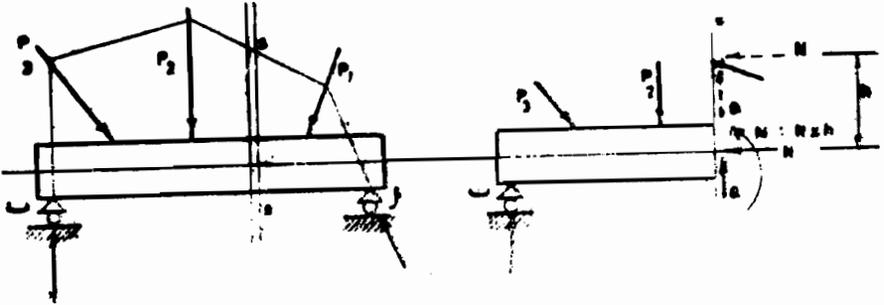


Lateral loads

أحمال جانبية

شكل رقم (٦ - ١) حالات التحميل بالإنحناء

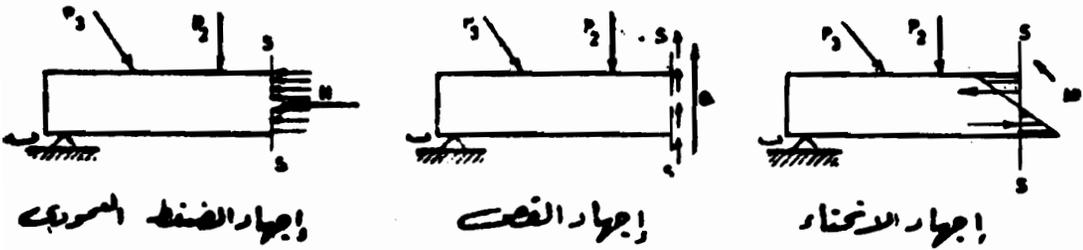
فتلا الكرة ( ا ب ) المبينة بالشكل رقم ( ٦ - ٢ ) والمحملة بالأحمال الجانبية  $p_1, p_2$  &  $p_3$  الواقعة في نفس مستوى الكرة ، يتعرض مقطعها ( S-S ) إلى



توزيع القوى على المقطع المستعرض لكررة محملة جانبياً

شكل رقم ( ٦ - ٢ )

إجهادات ضغط مباشرة عمودية على مستواه وإلى إجهادات قص موازية لمستواه وإلى إجهادات انحناء ( Bending stresses ) أى إجهادات شد وضغط عمودية على مستوى المقطع ، كما يتبين ذلك من الشكل رقم ( ٦ - ٣ ) .

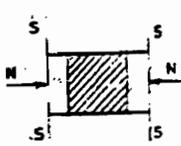


الإجهادات الموجودة عند مقطع في ككرة محملة

شكل رقم ( ٦ - ٣ )

وينتج عن الإجهادات المذكورة المؤثرة على المقطع ( S-S ) انفعال ( Strain ) عبارة عن انضغاط وانزلاق وانحناء لهذا المقطع كما هو مبين بالشكل رقم ( ٦ - ٤ ) وذلك نتيجة لإجهاد الضغط المباشر والقص والانحناء على التوالي .

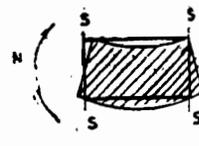
يتضح مما سبق أن إجهادات الانحناء والانفعالات المصاحبة لها عند أى مقطع لكررة ما



تأثير القوى العمودية



تأثير قوى القص



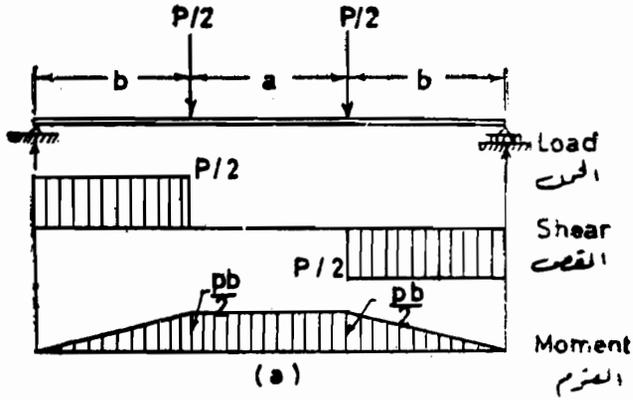
تأثير عزم الانحناء

تأثير القوى الموجودة عند المقطع المستعرض للكورة .

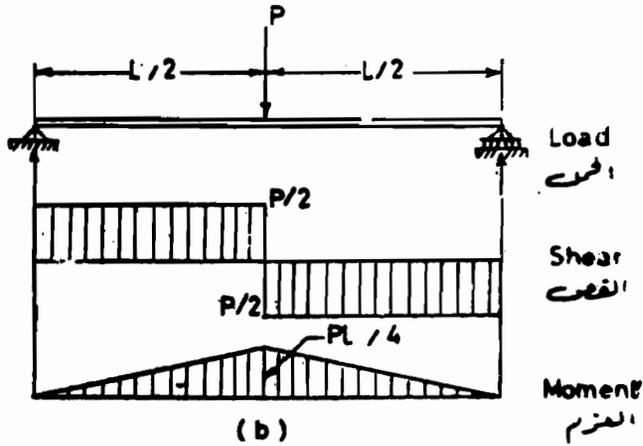
شكل رقم ( ٦ - ٤ )

ينتج من عزم الانحناء عند هذا المقطع والذي يساوى مجموع عزوم القوى المؤثرة على شمال أو على يمين المقطع والذي يعين من الرسم البياني لتوزيع عزم الانحناء على طول الكورة كما يتضح من الشكل رقم ( ٦ - ٥ ) حيث يبين الجزء ( b ) الكورة محملة بحمل جانبي ( p ) في منتصفها حيث المقطع ( s - s ) في منتصف بحر الكورة معرض إلى عزم انحناء  $\frac{p \cdot x \cdot L}{4}$  مصحوباً بقوة قص  $\frac{p}{2}$  ، بينما في الجزء ( a ) والكورة محملة جانبياً في لقتين بالأحمال  $p/2$  &  $p/7$  فإن المقطع ( s-s ) في منتصف بحر الكورة معرض لعزم انحناء فقط  $p/2$  وبذلك يكون المقطع ( s-s ) في الحالة ( a ) معرضاً لانحناء خالص ( pure bending ) .

وتصمم أجزاء المنشآت والمكناات المعرضة إلى انحناء طبقاً للمعادلات الهندسية الخاصة بإجهاد الانحناء وعلاقتها بقيمة الحمل المؤثر وأبعاد المقطع ونوع المادة المستخدمة في التصميم وعلى ذلك يلزم إجراء اختبار الانحناء على المادة قبل استخدامها في المنشأ أو الماكنة لاسيما وأن معادلات الانحناء التصميمية لا تمثل تماماً الحالة بل تحوى شيئاً من التقريب نتيجة لإهمالها الإجهادات المحلية ( Local stresses ) الناتجة لاسباب مختلفة مثل تغير المقطع من مكان لآخر كذلك نتيجة لإغفالها عدم انتظام المادة أو نتيجة اختلاف ظروف التحميل النظرية عن واقع التحميل أثناء التشغيل بالإضافة إلى أن المفروض التي بنيت عليها معادلات الانحناء التصميمية لا يمكن اعتبارها حقيقية أو كاملة الدقة لجميع المواد المعدنية وغير المعدنية ذات الخواص المختلفة والتركيبات الجزئية ذات التنوع الكبير في الشكل والتكوين .



TWO - POINT LOADING  
التحميل على نقطتين



ONE - POINT LOADING  
التحميل على نقطة واحدة

FLEXURE TEST      LOADING

تحميل اختبار الانحناء

شكل رقم (٦ - ٥)

ونظراً لأن اختبار الانحناء يمثل اختباراً تحت ظروف واقعية بالنسبة للمادة والتحميل والاجهادات والانفعالات المصاحبة لها لذلك يعطى اختبار الانحناء نتائج تعبر تماماً عن مدى مقاومة الجسم المختبر لأحمال الإنحناء . ويمكننا إختبار الانحناء

من تعيين الخواص الميكانيكية لل مواد مثل مقاومة الانحناء (Flexural Strength) والصلابة (Stiffness) والرجوعية في الانحناء (Resilience) والمتانة علاوة على بيان مدى الاتزان الانشائي (Structural Stability) للكمرات ذات القطاعات والأحجام المختلفة .

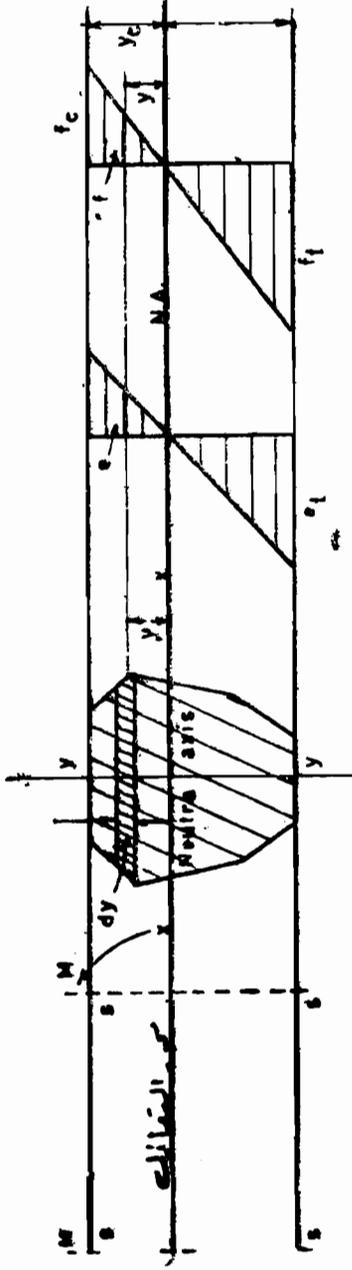
ومن مميزات إختبار الانحناء أن إجراؤه غالباً ما يكون باستخدام حمل صغير لذلك فإن مكنته غير عالية الثمن كما أنه يعبر بدقة — أكثر من إختيار الشد — عن خاصيتي الصلابة والرجوعية لل مواد عن طريق تحديد سهم الإنحناء (Deflection) للكورة المختبرة بسهولة ودقة خصوصاً لل مواد القصيفة مثل الحديد الزهر حيث يكون التشكل الذي يستخدم لتعيين خاصتي الصلابة والرجوعية في إختبار الشد صغيراً جداً ومن الصعب تحديده بدقة في الوقت الذي يكون فيه سهم الإنحناء ذا قيمة كبيرة مرات عديدة من قيمة التشكل الأيمن من إختبار الشد .

ونظراً لفوائد إختبار الإنحناء لل مواد في بيان الخواص الميكانيكية لها فإنه يعتبر إختباراً هاماً وضرورياً كإختبار قبول لل مواد (Acceptance Test) كما يعتبر أساساً ضمن الإختبارات اللازمة التي تنص عليها المواصفات القياسية لتحديد صلاحية أو رفض المواد في الأعمال الهندسية .

#### أولاً : إجهادات الانحناء في حدود المرونة

يرتكز تعيين الإجهادات الناتجة من عزم الانحناء في حدود المرونة على الإقتراحات الآتية :

- ١ — مقطع الكورة المجردة تحت تأثير عزم الانحناء يتكون من مادة متجانسة .
- ٢ — تخضع مادة الكورة أثناء تحميلها لقانون هوك أي أنها مجردة في حدود المرونة ويتبع ذلك التناسب الخطي بين الإجهاد والاتفعال المصاحب له .
- ٣ — ثبوت مقطع الكورة المحملة بعزم الانحناء في جميع أجزائها على كامل طولها .
- ٤ — معايير المرونة في الشد يساوي معايير المرونة في الضغط لمادة الكورة .



Beam loaded by moment Cross section Strain distribution Stress distribution

توزيع الإجهاد      توزيع الانفعال      مقطع مستطوي      كمية محمولة بعزم انحناء

شكل رقم ( ٦ - ٦ ) توزيع الإجهاد والانفعال على مقطع مستعرض للمكورة معرضة لعزم انحناء.

٥ - القوى المؤثرة على الكرة وردود الأفعال الناتجة تقع جميعها في مستوى واحد هو مستوى محور الكرة .

٦ - مستوى أى مقطع في الكرة يظل كما هو مستويًا بعد تأثير عزم الانحناء عليه .  
وإذا اعتبرت الكرة المبينة بالشكل رقم ( ٦ - ٥ ) توفى الاشرطات سالفة الذكر فيمكن حساب إجهادات الانحناء في أى مقطع بها كالآتي .

يسبب عزم الانحناء  $M$  للمقطع دوراناً حول خط يسمى خط التعادل ( Neutral axis ) نتيجة انضغاط أجزاء مقطع الكرة العليا واستطالة أجزاء المقطع السفلى وأيضاً لكي يستوفى شرط استواء المقطع قبل وبعد التحميل أى يحدث على المقطع  $S - S$  إجهادات ضغط في جزئياته العلوية وإجهادات شد في جزئياته السفلية كما أن الإجهادات عند خط التعادل تساوى صفراً وعلى ذلك تكون الإجهادات على المقطع  $S - S$  والناتجة من عزم الانحناء  $M$  موزعة توزيعاً مستويًا على المقطع وتناسب قيمتها في أى نقطة حسب بعد هذه النقطة عن خط التعادل كما هو مبين بالشكل رقم (٦-٦) .

وطبقاً للفرض السابق الذى ينص على أن التحميل في حدود المرنة حيث يتناسب خطياً الإجهاد والانفعال المصاحب له يكون توزيع الانفعال على المقطع توزيعاً مستويًا وتناسب قيمة الانفعال في أى نقطة مع بعدها عن خط التعادل ، وينتج من ذلك أن:

$$f = \frac{f_t}{y_t} = \frac{f_c}{y_c} = c = \text{ثابت}$$

$$\text{i. e. } f = y \times c$$

ويمكن الحصول على النتائج الآتية لأى مقطع للكرة تحت تأثير عزم الانحناء :

(١) حيث أن المقطع  $S - S$  واقع تحت تأثير عزم الانحناء  $M$  فقط فيكون مجموع القوى في اتجاه محور السينات في المقطع تساوى صفراً .

$$\begin{aligned} \sum F_x &= \sum ( f \cdot da ) = \int f \cdot da = \int c \cdot y \cdot da \\ &= c \int y \cdot da = \text{Zero} \end{aligned}$$

$$\therefore \int y da = \text{Zero}$$

أى أن عزم المساحة الأولى ( 1st moment of area ) للمقطع حول خط التعادل يساوى صفراً ، ويعنى ذلك أن خط التعادل يمثل محور يمر بمركز الثقل للمقطع ، أى

محور مركزي للقطع ( Central axis ) .

( ب ) حيث أن المقطع  $s-s$  في حالة اتزان فيكون مجموع عزوم القوى الداخلية ( عزوم إجهادات الانحناء ) حول محور الصادات يساوى عزوم القوى الخارجية المؤثرة على المقطع حول محور الصادات . وحيث أن القوى الخارجية هي فقط عزم الانحناء  $N$  الذى يؤثر بعزم حول السينات ( لأنه يقع في مستوى محور الصادات ) لذلك فإن عزم  $M$  حول محور الصادات يساوى صفراً .

مجموع العزوم حول محور الصادات = صفر

مجموع عزوم إجهادات الانحناء حول محور الصادات = صفر

$$\therefore \int ( f . da ) . x = \text{Zero}$$

$$\text{i.e.} \int ( cy . da ) . x = \text{zero}$$

$$c \int xy . da = \text{zero}$$

$$\therefore \int xy . da = \text{Zero}$$

أى أن عزم المساحة حول محور السينات ومحور الصادات للمقطع يساوى صفراً ، ويعنى هذا أن محور السينات ومحور الصادات للمقطع عبارة عن محاور عزم التقصور الذاتى الرئيسية ( Principal axes of inertia ) للمقطع والتي تمر بمركز ثقله .

( ج ) حيث أن المقطع  $s-s$  في حالة اتزان فيكون مجموع عزوم القوى الداخلية ( عزوم إجهادات الانحناء ) حول محور السينات يساوى عزوم القوى الخارجية المؤثرة على المقطع حول محور السينات أى تساوى عزم الانحناء  $M$  الذى يعمل حول محور السينات .

$$M = \text{مجموع عزوم إجهادات الانحناء حول محور السينات} .$$

$$\therefore \sum ( f . da ) . y = M$$

$$\text{i.e.} \int fy . da = M$$

$$\int cy . y . ds = M$$

$$c \int y^2 . da = M$$

ولكن  $\int y^2 da = I_x$  عزم المساحة الثاق للقطع أى عزم القصور الذاتي للقطع حول محور السينات  $I_x$

$$\therefore C \cdot I_x = M$$

$$\text{but } C = \frac{f}{y} = \frac{M}{I_x}$$

$$\therefore f = \frac{M \cdot y}{I_x}$$

أى أن إجهاد الانحناء ( $f$ ) فى أى جزء من المقطع بعد مسافة  $y$  عن خط التعادل يساوى:

$$\frac{\text{عزم الانحناء } (M) \text{ بعد الجزء من المقطع عن خط التعادل } (y)}{\text{عزم القصور الذاتي للقطع حول المحور الذى يدور حوله } (I_x)}$$

وبذلك تكون أكبر قيمة لإجهادات الضغط والشد على المقطع  $s-s$  الناتجة من عزم الانحناء  $M$  تقع فى نقط المقطع الطرفية العليا والسفلى حيث أكبر قيمة للمسافة  $y$  كما يتضح ذلك من شكل رقم (٦ - ٦) ، وتكون قيمتها تساوى :

$$f_t = \frac{M \cdot y_t}{I_x}$$

$$f_c = \frac{M \cdot y_c}{I_x}$$

حيث  $y_c$  ،  $y_t$  يمثلان على التوالي البعد عن محور التعادل لنقط الطرفية المجهدة بالشد والنقط الطرفية المجهدة بالضغط .  
وإذا اعتبر أن قيمة :

$$\frac{I_x}{y_c} = Z_c = \text{معايير المقطع للضغط}$$

$$\frac{I_x}{y_t} = Z_t = \text{ومعايير المقطع للشد}$$

وفى حالة المقاطع المتماثلة حول محور السينات حيث  $y_c = y_t$  فتكون

$$Z_c = Z_t = Z$$

$$\therefore f_c = f_t = \frac{M}{Z}$$

$$\text{i. e. } M = f \cdot Z$$

ولهذه النتيجة أهمية كبيرة في تصميم المنشآت والمباني المعرضة لعزوم الانحناء  
لاختيار مقطع الكرة لاي تحميل يؤثر بعزم انحناء  $M$  معلوم على هذا المقطع بشرط  
أن لا يتعدى أكبر إجهاد انحناء بمقطع الكرة عن إجهاد معين  $f$  وذلك بتعيين قيمة

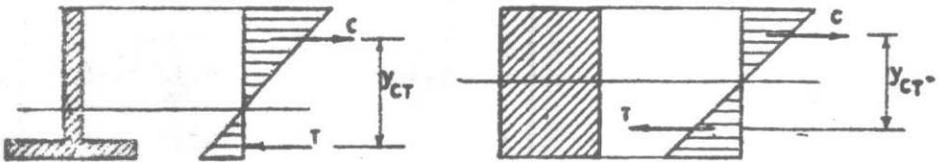
$$Z = \frac{M}{f} \quad \text{معايير المقطع (Section Modulus) } Z \text{ من المعادلة:}$$

ويمكن باستخدام جداول خاصة تعيين المقطع المناسب لهذا المعيار كما تستخدم  
هذه النتيجة أيضاً في تعيين الحمل (أى عزم الانحناء  $M$ ) الذى لو حملت به كرة معلوم  
مقطعها أى معلوم معايير المقطع ( $Z$ ) نحصل على أكبر إجهاد انحناء  $f$  معلوم  
وذلك بالمعادلة:  $M = Z \cdot f$  وبين الجدول رقم (٦ - ١) قيمة عزم الانحناء  
 $M$  الذى يمكن أن تقاومه المقاطع من ذات الأشكال المختلفة للكرات .

ويلاحظ أن عزم الانحناء  $M$  المؤثر على مقطع أى كرة يساوى عزم انحناء مقاومة  
مقطع الكرة الناتج من قوى الشد والضغط كما أن مجموع قوى الضغط تساوى مجموع  
الشد للإجهادات الناتجة على المقطع من عزم الانحناء  $M$  وذلك من ضرورة إيزان

$$M = C \cdot Y_{CT} = T \cdot Y_{CT} \quad \text{المقطع أى أن:}$$

$$\therefore C = T \quad \text{كما يتبين من الشكل رقم (٦ - ٧)}$$



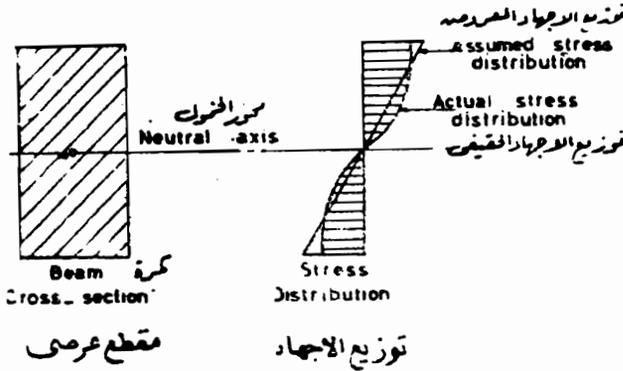
$$M = T \cdot Y_{CT} = C \cdot Y_{CT}$$

## عزم المقاومة للانحناء

شكل رقم (٦ - ٧)



خطياً وهو الفرض الذي يتوافر في حدود المرونة فقط أما فوق حد المرونة فتكون العلاقة بين الإجهاد والانفعال متمشية مع المنحنى البياني للإجهاد والانفعال تحت تأثير أحمال الشد والضغط وبذلك يكون توزيع إجهادات الانحناء على مقطع الكرة غير مستو ولا تتناسب إجهادات الانحناء خطياً مع بعضها على طول المقطع كما هو الحال في إجهادات الانحناء في حد المرونة كما يتضح في الشكل رقم (٦ - ٨) .



شكل رقم (٦ - ٨) توزيع الإجهادات فوق للمرونة

كما يلاحظ أنه إذا اختلف المنحنى البياني للإجهاد والانفعال في الشد عنه في حالة الضغط للمادة المجردة بالانحناء في خط التعادل لا يمر بمركز ثقل المقطع ولكن يتزحزح إلى ناحية الجسم الأصلب من الكرة حتى يحقق التساوي بين قوى الشد وقوى الضغط المؤثرة على المقطع ليتكون متما عزم المقاومة ( Moment of Resistance ) كما يتضح من الشكل رقم (٦ - ٩) .

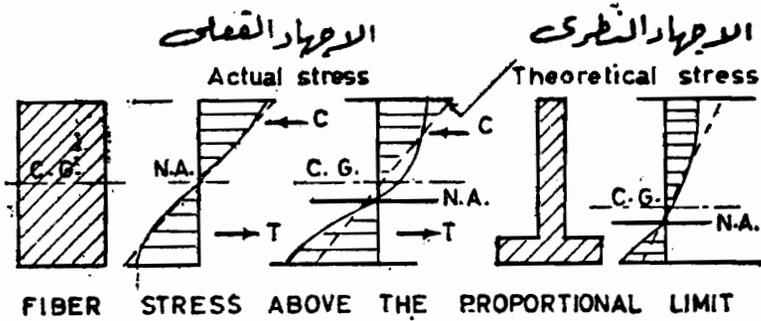
$$T = C \quad \& \quad M = T \cdot Y_{CT} = C \cdot Y_{CT}$$

وتوجد حلول متعددة لتعيين إجهادات الانحناء فوق حد المرونة بعضها نظري شبه بياني وقد بنيت جميعها على أساس معادلتى الاتزان الآتيتين :

١ - مجموع القوى المؤثرة على مقطع الكرة المعرضة لعزم انحناء  $N$  فقط يساوى

$$\text{صيراً } (\sum V = 0) \text{ أى أن قوى الشد} = \text{قوى الضغط } (C = T) .$$

٢ - مجموع عزوم القوى المؤثرة على مقطع الكرة يساوى صفرأ أى أن عزم الانحناء



شكل رقم ( ٦ - ٩ ) إجهاد الجزيئات الطرفية المقطع فوق حد التناوب

الخارجي  $M =$  عزم إنحناء مقاومة المقطع الناتج من إجهادات الشد والضغط الموجودة عليه نتيجة عزم الانحناء الخارجي (  $M = T \cdot Y_{CT} = C \cdot Y_{CT}$  ). وهاتان المعادلتان تطبيقان على أى مقطع معرض لإنحناء بإجهادات فوق حد المرونة مع فرض أن المقطع المستوي للككرة يظل مستويا بعد الانحناء أى أن استتالة طبقات الككرة طوليا وافكاشها تتناسب مع بعد هذه الطبقات عن خط التعادل وهذا الفرض صحيح تؤكده نتائج التجارب العملية .

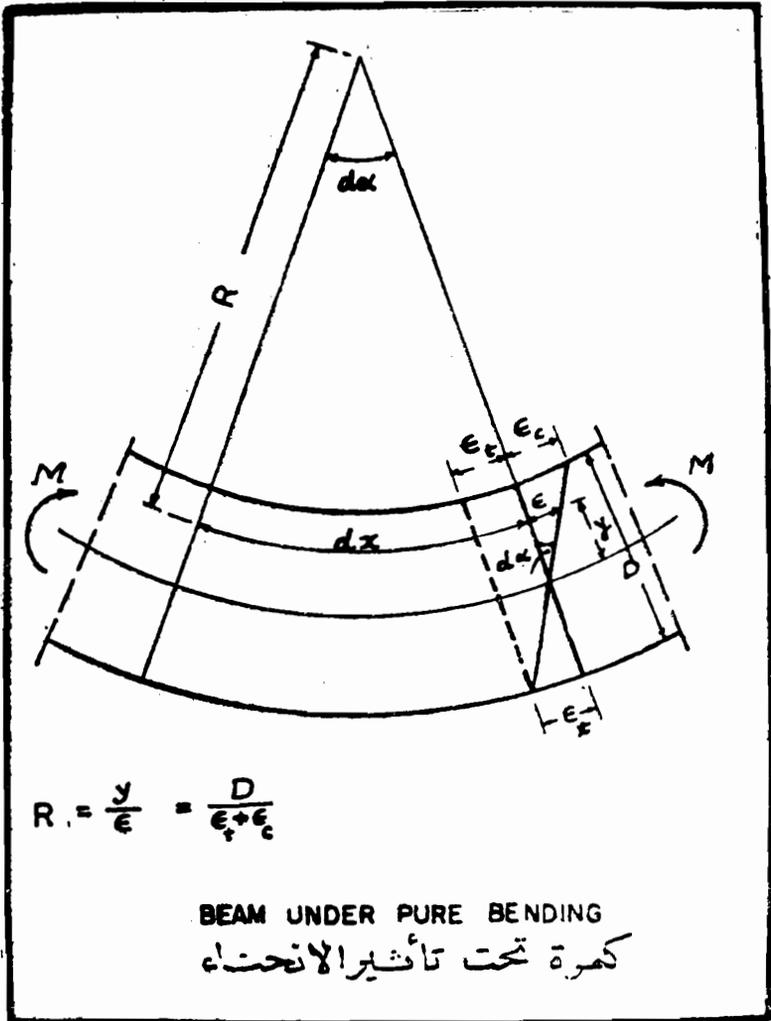
ولإيجاد العلاقة بين عزم الإنحناء  $M$  والإجهاد والانفعال الناتجين منه فوق حد المرونة نفترض أن الككرة المبنية بالشكل رقم ( ٦ - ١٠ ) تحت تأثير عزم انحناء  $M$  ونعتبر مقطعين متوازيين  $S - S$  ،  $S' - S'$  على مسافة قريبة جداً من بعضهما وهذان المقطعان لا يظلان متوازيين بعد انحناء الككرة ولكن يصنعا مع بعضهما زاوية صغيرة  $(d\theta)$  وبالرجوع إلى الشكل رقم ( ٦ - ١٠ ) فإن :

$$\frac{e \cdot dy}{y} = \tan d\theta = d\theta$$

$$\therefore e dx = y \cdot d\theta ; \text{ but } dx = R d\theta$$

$$\therefore e = \frac{y}{R} \text{ i.e. } y = R \cdot e \text{ \& } dy = R de$$

حيث :  $e =$  الانفعال .  $y =$  بعد الجزء المجهد عن محور التعادل ،  $R =$  نصف قطر القوس ( الانحناء ) .



شكل رقم (٦ - ١٠)

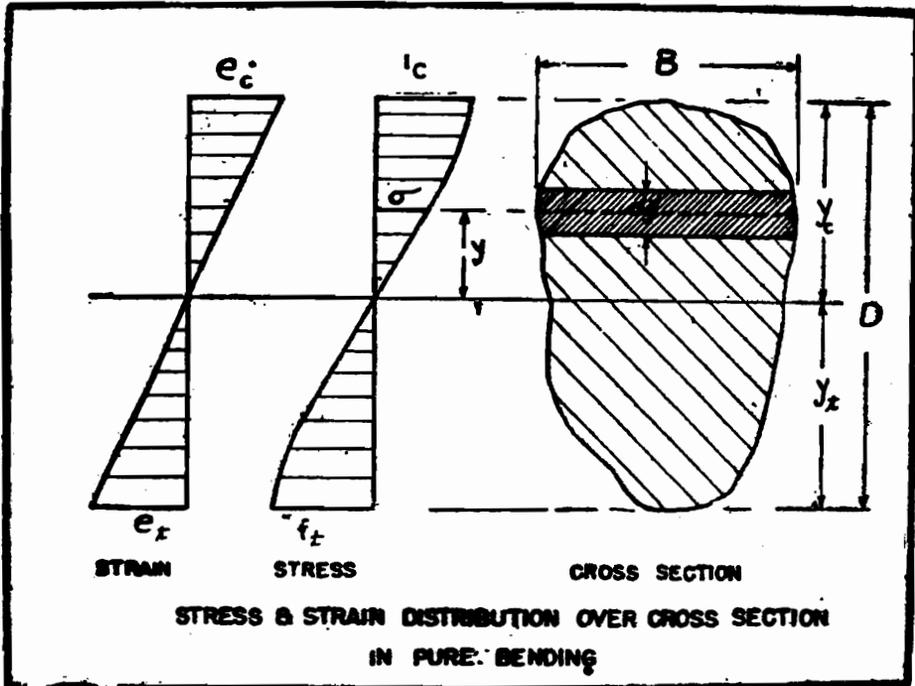
فإذا كانت  $\epsilon_t$  ،  $\epsilon_c$  أكبر انفعال شد وضغط عند الأجزاء الطرفية للمقطع ،

فبنفس الطريقة السابقة ينتج أن :  $D = R \cdot (\epsilon_t + \epsilon_c)$

$$i. e R = \frac{D}{\epsilon_t + \epsilon_c}$$

وبتطبيق معادلات الاتزان على المقطع ينتج أن :

$$1 - \text{قوة الشد} = \text{قوة الضغط أي } C = T$$



توزيع الاجهاد والانفعال على مقطع كمره تحت تأثير الانحناء الخالص

شكل رقم (٦ - ٢٠ ب)

$$\text{i.e. } \int y^t (b \cdot dy) \cdot f = \int y^c (b \cdot dy) \cdot f$$

$$\text{i.e. } \int_{e_t}^{e_c} b \cdot f \cdot de = \int_{f_t}^{f_c} b \cdot f \cdot de$$

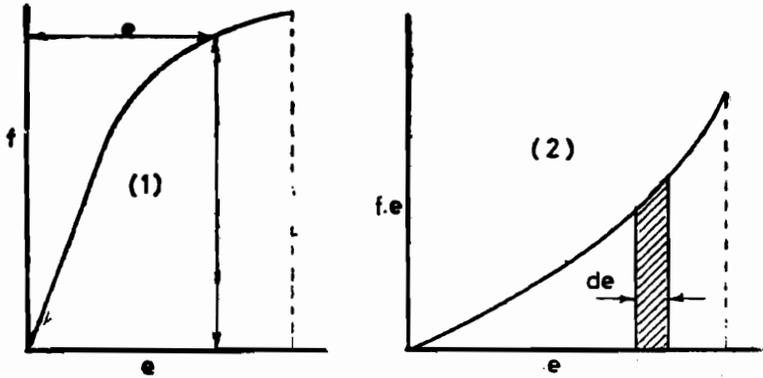
ب - عزم الانحناء الخارجى = عزم انحناء مقاومة المقطع

$$\text{i.e. } M = y_c \int y^t (b \cdot dy) \cdot f \cdot y$$

$$= e_c \int_{e_t}^{e_c} b \cdot R^2 \cdot f \cdot de$$

$$M = \frac{1}{(e_t + e_c)} \left[ \int_{e_t}^{e_c} b \cdot f \cdot e \cdot de + \int_{e_t}^{e_c} b \cdot f \cdot e \cdot de \right]$$

ويمكن إيجاد قيمة التكامل في كل من المعادلتين السابقتين بالتعويض عن قيمة الاجهاد  $f$  بما يعادلها من الانفعال  $e$  وذلك من العلاقة بين الاجهاد والاتصال الميئة بواسطة الرسم البياني لمنحنى الاجهاد والانفعال العادى أو بواسطة الرسم البياني



### تعيين قيمة المعايير المنخفض $E_r$

إذا علمت قيمة  $e$  أقصى انفعال طرفي يمكنه تعيين قيمة الإجهاد  $f$  المقابلة لها من الشكل (١) ومنه يمكن عمل الرسم البياني (٢) بين  $(e)$  و  $(f.e)$  فتكون المساحة تحت الشكل (٢) هي :  $E_r = \int f e de$

شكل رقم (٦ - ١١)

لمنحني الاجهاد والانفعال الحقيقي أو من العلاقة الجبرية بين الاجهاد والانفعال المستنتجة من منحنيات الاجهاد والانفعال أو بواسطة فرض منحني بياني للإجهاد والانفعال يقرب من المنحني الأصلي وذلك لتسهيل عمليات الحساب. ويمكن تلخيص بعض الطرق لإيجاد قيمة التكامل وبالتبعية تعيين عزم الانحناء الذي يمكن لقطع الكرة مقاومته عند إجهاده فوق حد المرونة. وذلك كما يلي :

١ - باستخدام العلاقة الجبرية بين الاجهاد والانفعال :

يعوض في معادلة عزم الانحناء عن قيمة الاجهاد  $f$  بما تساويه من قيمة الانفعال باستخدام إحدى العلاقات الجبرية المستنتجة من منحني الإجهاد والانفعال وفيما يلي مثال لبعض هذه العلاقات :

$$\left. \begin{aligned} f &= ae + be^2 + ce^3 + de^4 \\ f &= ae + be \tanh\left(\frac{1-a}{b}\right) e \end{aligned} \right\} \text{منحني عادي}$$

$$f = (ae) + (dec) + Ke + m \quad \text{منحني حقيقي}$$

(ب) باستخدام منحنى الإجهاد والانفعال :

إذا افترض أن منحنى الإجهاد والانفعال في الشد هو نفسه لحالة الضغط مثلا ومقطع الكرة مستطيل فنصير معادلة عزم الانحناء كالتالي :

$$M = \frac{2 b D^2}{(e_t + e_c)^2} \cdot \int_0^{\bullet} f. e. de$$

$$= \frac{2 b D^3}{K (e_t + e_c)^3} \cdot \int_0^{\bullet} f. e. de$$

وذلك بالضرب والقسمة بالقيمة :

$$\frac{R}{D} = (e_t + e_c)$$

$$\therefore M = \frac{I}{R} \cdot \frac{24}{(e_t + e_c)^3} \cdot \int_0^{\bullet} f. e. de = \frac{I}{R} \cdot E_r$$

حيث  $E_r =$  معيار التخميد (Reduced modulus)

$$\frac{24}{(e_t + e_c)^3} \cdot \int_0^{\bullet} f. e. de =$$

$$\frac{b D^3}{12} = I \quad \text{عزم القصور الذاتي لمقطع مستطيل بارتفاع } D$$

$R =$  نصف قطر الانحناء .

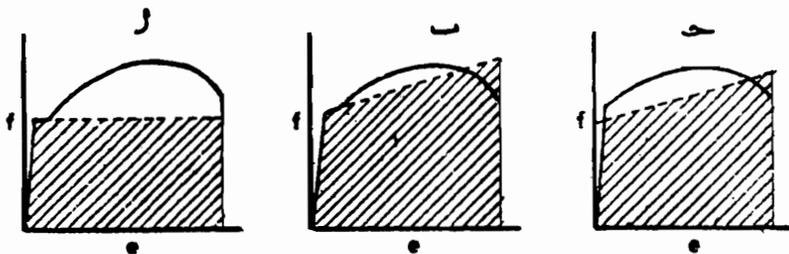
وتعين قيمة  $E_r$  لأي إنفعال أقصى طرفي  $e_t = e_c =$  معروم للمقطع بيانيا من منحنى الإجهاد والانفعال كما في الشكل رقم (٦ - ١١) كما تعين قيمة  $R$  من المعادلة =

$$R = \frac{D}{e_t + e_c}$$

(ج) باستخدام منحنى تقريبي مفروض للإجهاد والانفعال .

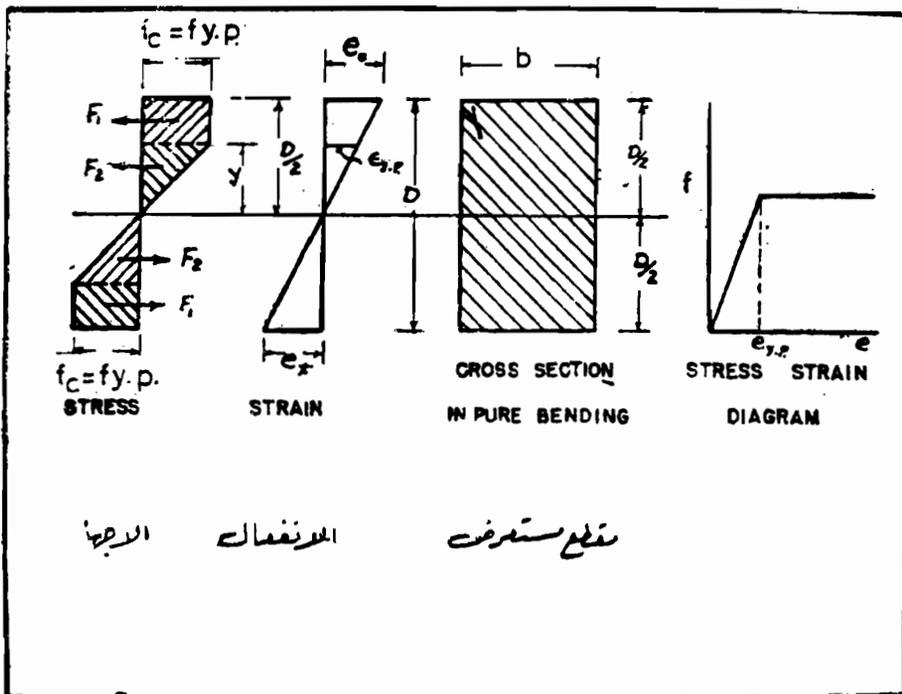
يمكن فرض علاقة بيانية مقربة لتسهيل الحسابات ، ومن أمثلة ذلك التقريبات المبينة بشكل رقم (٦ - ١٢) .

ولتطبيق ذلك نفرض أن مقطع الكرة مستطيل وأن منحنى الإجهاد والانفعال التقريبي كما هو في شكل (٦ - ١٢) أي أن أكبر إجهاد شداً و ضغطاً لا يتعدى - فرضاً - إجهاد الخضوع . وتحسب قيمة عزم الانحناء كما هو مبين بالشكل رقم (٦ - ١٣) كما يأتي :-



بعض تقريبات المنحني البياني للاجهاد والانفعال لتسهيل حساب مساحته

شكل رقم (٦ - ١٢)



شكل رقم (٦ - ١٣)

توزيع الاجهاد والانفعال على مقطع مستمر نتيجة تعرضه لانحناء خالص فوق حد المرونة

$$M = 2 \left\{ b \cdot f_{yield} \left[ \frac{D}{2} - y \right] \cdot \left[ \frac{1}{2} (D - y) + y \right] \right\} \\ + \left\{ 2 b \cdot (f_{yield} \cdot y / 2) \cdot \frac{2}{3} y \right\} = b \cdot f_{yield} \left[ D^2/4 - y^2/3 \right]$$

Introducing  $y = (e_{yield} / \epsilon_t) \cdot D/2$  then :

$$M = b D^2 / 12 \cdot f_{yield} \cdot [3 - (e_{yield} / \epsilon_t)^2]$$

$$i. e. \quad M / M_{yield} = \frac{1}{2} [3 - (e_{yield} / \epsilon_t)^2]$$

والنسبة المذكورة بين عزم الانحناء فوق حد المرونة وعزم الانحناء عند الخضوع تكون بحد أقصى  $\frac{1}{4}$  في حالة مقطع الكرة المستطيل، أما إذا تغير مقطع الكرة فيتغير ذلك الحد الأقصى لتلك النسبة كما يتبين من الشكل رقم (٦ - ١٤) الذي يوضح أنه للحصول على إنفعال معين في الجزئيات الطرفية للكرة فإن تحملها لعزم الانحناء تختلف قيمتها باختلاف شكل مقطع الكرة أى أن شكل المقطع يؤثر في قيمة عزم مقاومتها للانحناء .

### ثالثاً - أنواع اختبار الانحناء :

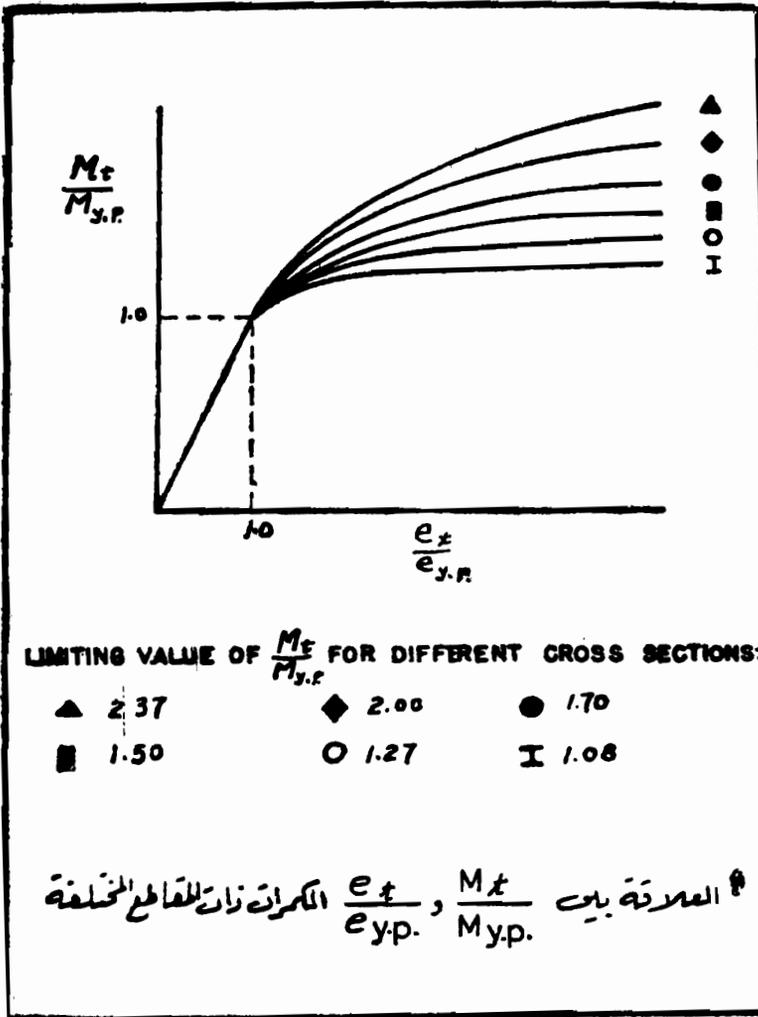
يمكن تقسيم الإختبار تبعاً لطبيعة إستخدامه إلى النوعين الرئيسيين التاليين :

#### ١ - إختبار الانحناء الكرى : ( Bending beam test )

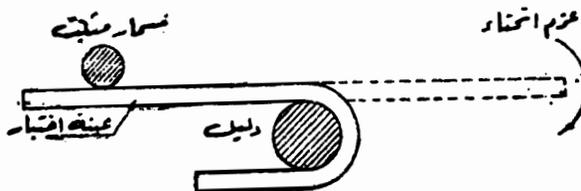
وفيه تحمل القطع المختبرة وهي على شكل كرات بحمل جانبي أو أحمال جانبية ويحدد حمل الكسر وسهم الانحناء عند الكسر لتحديد مقاومة التحميل للإحناء وصلابة مادة الكرة وقد يحدد أيضاً أثناء الإختبار قراءات مختلفة للحمل المؤثر وسهم الانحناء المصاحب له لرسم منحنى الحمل وسهم الانحناء لتحديد خواص المواد الميكانيكية . كما قد تقاس قيم الانفعال أو زوايا التماس في مقاطع الكرة المختلفة . ويمجرى هذا الإختبار على المواد القصفه مثل الحديد الزهر . وتنص المواصفات القياسية لقبول هذه المواد أو منتجاتها في الصناعة ضرورة إجراء هذا الإختبار لتحديد خاصية المقاومة لتحمل الانحناء والصلابة .

#### ب - إختبار الثني البارد : ( Cold bend test ) .

وفيه تشن القطع المختبرة بعزم إنحناء حتى يتوازي طرفاها وذلك في درجة حرارة معمل الإختبار العادية كما هو مبين بالشكل رقم (٦ - ١٥) .



شكل رقم (٦ - ١٤)



اجراء الشئ على البار لتضيب معدني

ويجرى هذا الاختبار فقط على المواد المطيعة للتأكد من تواجد خاصية الممتولية بها فإذا كسرت أو شرخت عند ثنيها وقبل أن يتوازي طرفاها تعتبر غير صالحة وبالنسبة لكونها مادة مطيعة وتنص المواصفات القياسية على ضرورة اجراء اختبار الثني البارد للمواد المطيعة مثل الصلب الطرى عند استخدام هذه المواد فى الاعمال الهندسية للتأكد من استيفائها هذه الخاصية وذلك بالإضافة إلى معرفة النسبة المئوية للاستطالة من اختبار الشد التى تحدد خاصية الممتولية للمادة .

#### رابعا - اختبار الانحناء الكمرى

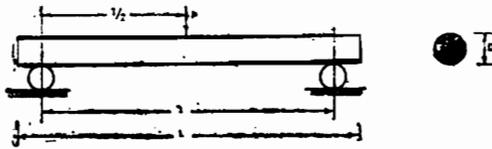
##### ١ - عينات الاختبار :

تصمم عينات الانحناء بأبعاد معينة بشرط أن يكون كسر العينة ناتج من تأثير الانحناء وليس نتيجة لقوى القص الأفقية أو الرأسية كذلك ليس نتيجة لاجهادات الشد الضلعية القطرية ( Diagonal Stress ) الحادثة من تأثير قوة القص . لذلك يجب ألا يكون طول العينة صغيرا جدا بالنسبة لعمقها أى لارتفاع العينة. ويمكن أن نعتبر أن العينة مناسبة لاختبار الانحناء وتوفى الاشتراطات السالفة الذكر إذا كان بحر العينة أى المسافة بين تقطعي الارتكاز (Span)  $L$  تساوى من ٦ إلى ١٢ مرة عمق العينة أى :  $L = 6d \text{ to } 12d$

وفى أعمال الأبحاث والأعمال الخاصة تستخدم الكمرات ذات الأشكال المتعددة كعينات لاختبار الانحناء الكمرى ، أما فى أعمال الاختبارات التجارية ( Commercial tests ) وأعمال الاختبارات المعتادة اليومية للإنتاج وأعمال اختبارات التحكم فى الإنتاج ( Control tests ) والتفتيش عليه ( Inspection tests ) لمطابقة للمواصفات القياسية فتكون عينات الاختبار عبارة عن كمرات بأبعاد قياسية تتوقف قيمتها على نوع المادة وشكل الكمرة وطريقة التحميل . ( يجرى اختبار الانحناء الكمرى على المواد المتممة مثل الحديد والزهرة والخرسانة والخشب والطوب والجبس ) .

وتنص المواصفات القياسية لكل مادة على أبعاد عينات إختبار الانحناء الكمرى وشكل تلك العينات وعلى طريقة تحضيرها وعلى طريقة تحميلها ، فمثلا تنص بعض المواصفات القياسية على أن عينات الحديد الزهر عبارة عن قضبان مستديرة المقطع تصب منفصلة عن الأجسام المصبوبة التي يراد معرفة خواص مادتها في الانحناء ولكن تصب في نفس الوقت أثناء صب تلك الأجسام وفي نفس ظروف قوالب الصب وبنفس ملحقة الصب وبنفس مادة العصب وفي نفس المكان مثل الأجسام المراد معرفة خواصها ، وقد حددت المواصفات القياسية المصرية أربعة أنواع لعينات الحديد الزهر في الانحناء الكمرى طبقا لسمك مقطع الصبة المراد معرفة خواصها حيث أن سمك الصبة يؤثر في خواصها نتيجة تأثير سرعة تبريد الجزء الخارجى عن الجزء الداخلى منها لذلك فيلزم أن يزيد عمق عينة الإختبار بزيادة سمك الصبة التى تمثلها هذه العينة وتقل بقلتها ، وهذه الأنواع الأربعة من العينات عبارة عن كرات مبيدة أبعادها بالشكل رقم (٦ - ١٦) وترتكز كل عينة على نقطتى ارتكاز وتحمل في منتصف البحر (Mid span) حتى الكسر .

أما المواصفات القياسية الأمريكية ( A . S . T . M . ) فإنها تحدد أبعاد عينات الحديد الزهر كما في جدول رقم (٦ - ٢) .



سمك العينة ك	القطر د ك	الطول ل (على ثلاث مخاريط)	المسافة بين نقطتى الارتكازات ز
٨ - ٤	١٢	٣٠٠	٢٦٠
أكبر - ٨ - ١٥	٢٠	٤٥٠	٤٠٠
أكبر - ١٥ - ٢٠	٢٠	٦٥٠	٦٠٠
أكبر - ٢٠ - ٥٠	٤٥	٩٥٠	٩٠٠

المواصفات القياسية المصرية للحديد الزهر (م. ق. ١) إختبار الانحناء الكمرى

جدول رقم (٦-٢) أبعاد عينات الحديد الزهر للخواص الأمريكية (A.S.T.M)

المسافة بين تقطى الارتكاز (بحر الكمره) (بوصه)	الأبعاد الاعتيادية للعينه (بوصه)		السلك الرئيسى للصبه (بوصه)
	الطول - L - بوصه	القطر - D - بوصه	
١٢	١٥	٠,٨٧٥	٠,٥٠ أقل
١٨	٢١	١,٢٠	من ١,٠٠ إلى ٠,٥١
٢٤	٣٧	٢,٠٠	من ١,٠١ وأكبر

أما المواصفات القياسية البريطانية (B.S.S) فتستخدم للحديد الزهر نفس الشكل والتحميل السابق ولكن بأبعاد أخرى كما في الجدول رقم (٦ - ٣).

جدول رقم (٦ - ٣) المواصفات القياسية البريطانية (B.S.S).

المسافة بين تقطى الارتكاز li - بوصه	الطول الكلى - L - بوصه	الساح في أبعاد القطر - بوصه	قطر العينه D - بوصه	السلك الرئيسى للصبه (بوصه)
٩	١٠	٠,٠٤٥	٠,٦٠	لا تزيد على $\frac{3}{8}$
١٢	٢٥	٠,٠٦٥	٠,٨٧٥	أكبر من $\frac{3}{8}$ إلى $\frac{3}{4}$
١٨	٢١	٠,٠٩٠	١,٢٠	أكبر من $\frac{3}{4}$ إلى $1\frac{1}{8}$
١٨	٢١	٠,١٠٠	١,٦٠	أكبر من $1\frac{1}{8}$ إلى $1\frac{5}{8}$
٢٤	٢٧	٠,١٠٠	٢,١٠	أكبر من $1\frac{5}{8}$

ب - أجزاء الاختبار :

يجرى اختبار الانحناء الكمرى باستخدام مكثات الاختبار العامة كما يستخدم

لذلك أحياناً مكثات تعمل باليد مصممة خصيصاً لهذا الغرض . والأجزاء الرئيسية التي يشملها جهاز اختبار الانحناء هي قواعد الارتكاز للكرة ( Supports ) وأجزاء التأثير بالحل على الكرة ( Loading device ) وقرص مدرج لبيان قيمة هذا الحمل وجهاز أو أجهزة لقياس سهم الانحناء ( Deflectometers ) وقد يلزم أحياناً مقياس الانفعال لقياس الانفعال أو التغيير في الطول في أجهزة الكرة إذا أريد ذلك . وتكون هذه الأجزاء الرئيسية كما يلي :

### ١ - قواعد الارتكاز . ( Supports )

يشترط في قواعد الارتكاز أن تكون بشكل يمكن من حرية حركة الكرة عليها أثناء التحميل وألا تسبب تقطع تماسها مع الكرة أى تركيز في الإجهادات عندها ( Stress concentration ) كذلك توضع بحالة تمكن من الحركة الجانبية القليلة حتى لا تتولد أية إجهادات التوائية ( Torsional stresses ) بالكرة كما يجب أن تكون متزنة تحت تأثير الأحمال . وقد بنيت معظم مواصفات الاختبار على أن تلك القواعد تكون من كتل معدنية أسطوانية أى مستديرة المقطع أو من كتل معدنية ذات أسطح مستديرة المقطع كما يتبين من الشكل رقم ( ٦ - ١٧ ) ويحسن عند اختبار المواد غير المعدنية كالخرسانة والخشب وضع قطعة لوحية صغيرة بين قواعد الارتكاز والكرة لتوزيع الحمل توزيعاً مناسباً يمنع تركيز الاجهاد بالكرة عند نقطة ارتكازها على القواعد كما يتضح من الشكل رقم ( ٦ - ١٧ ) كما يحسن أن تكون إحدى قواعد الارتكاز مثبتة بحجم جهاز الاختبار وذات سطح مستدير على أن تكون القاعدة الأخرى للإرتكاز كتلة معدنية أسطوانية حرة الحركة على جسم الجهاز كما يتضح من الشكل رقم ( ٦ - ١٧ ) .

### ٢ - قطع التحميل : ( Loading blocks )

إن الاشتراطات التي سبق ذكرها في قواعد الارتكاز هي نفسها الاشتراطات الواجب توافرها في المقطع المعدنية المستخدمة لنقل الحمل من مكنة الاختبار إلى العينة المختبرة

أسس تكنة الاختبار -



أسس تكنة الاختبار

Deflectometers

Beam

Two point loading

Rocker

كرتة جاسنة

Roller

كرتة صرمة الكرتية

أسس تكنة الاختبار -



تحميل على نقطتين

Two point loading

Beam

تحميل على نقطة واحدة

One point loading

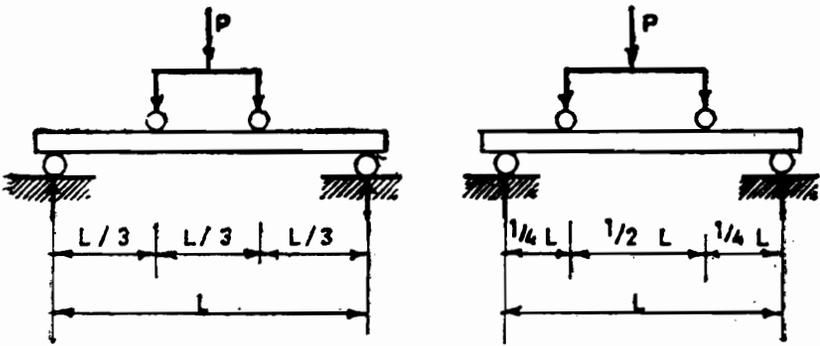
Beam

كرتة

شكل رقم ٦١ - ١٧ أنواع الأزرار كلاً في اختبار الأحمال.

وتوضع قطع التحميل بمسكة الاختبار بحيث تنقل الحمل إلى الككرة في نقطة منتصف الككرة أو بحيث ينقل الحمل إلى الككرة في نقطتين يبعد الككرة وهي نقطتي الثلث أو الربع للجزء كما يتبين من الشكل رقم (٦ - ١٨)

والتحميل في نقطتين ميزة الحصول على منطقة بالككرة المختبرة تحت تأثير عزم الانحناء خالص ويفضل هذا التحميل في بعض الاختبارات مثل اختبار الخرسانة في الانحناء

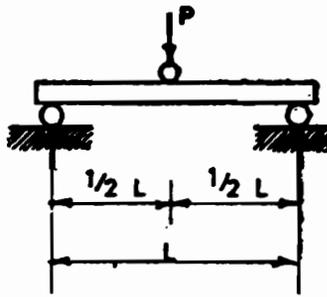


Two point loading

Third points  
نقطه الثلث

تحميل على نقطتين

Quarter points  
نقطه الربع



One point loading

تحميل على نقطة واحدة

أما عند اختبار المواد المعدنية القصفة كالحديد الزهر فقد رأت المواصفات القياسية جعل التحميل في نقطة منتصف الككرة لسهولة رجم تعرض الككرة إلى عزم وانحناء وقوة قص حيث أن هذه المواد لها مقاومة أكبر في القص غنما في تحمل الشد ويسبب تحميل الككرة كسرهما بقوة الشد الناتجة من عزم الانحناء وليس بقوى القص الأمر الذى يجعل الاختبار هو مقاومة الككرة لعزم الانحناء .

### ٣ - أجهزة قياس سهم الانحناء: ( Deflectometers )

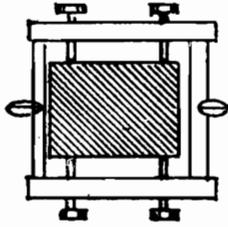
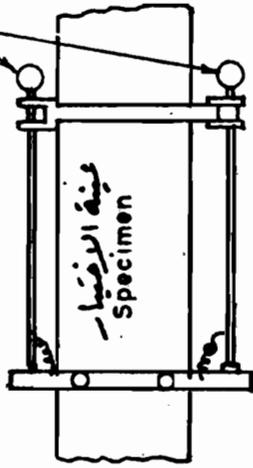
عند وضع مقياس القرص على الككرة لقياس سهم الانحناء في منتصف بحرهما أو الأجهزة المتعددة لقياس سهم الانحناء في أكثر من نقطة حسب متطلبات الاختبار يراعى أن يصمم ذلك بشكل يجعل أى تهشيم عند قواعد الارتكاز أو أى هبوط ( Settlement ) في هذه القواعد أو أى تشكل لقواعد الارتكاز أو قطع التحميل لا يسبب عنه أخطاء ملحوظة في قراءات المقياس . وإحدى الطرق لتفادى مصادر هذه الأخطاء هى قياس سهم الانحناء بالنسبة إلى النقط الموجودة على خط الانحناء عند مقطع الككرة فوق قاعدة الارتكاز ومثل هذا التصميم مبين بالشكل رقم ( ٦ - ١٧ ) بوضع أجهزة القياس مثبتة في إطار يرتكز على تقطعتين في منتصف مقطع الككرة عند قاعدة الارتكاز .

### ٤ - مقاييس الانفعال (Strain gages)

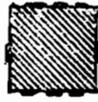
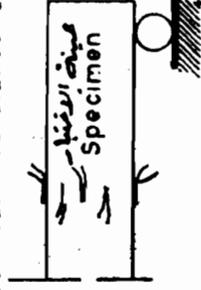
تستخدم مقاييس الانفعال لقياس التشكل عند استعمال الأجهزة الميكانيكية أو الأجهزة الضوئية أو لقياس الانفعال مباشرة عند استخدام مقياس المقاومة الكهربائى وذلك بتثبيتها رأسياً على السطح العلوى والسفلى للككرة حيث يوجد أكبر اجهاد للشد والضغط وأحياناً على السطح الجانبي للككرة لبيان الاجهادات في النقط المختلفة لمقطع الككرة كما يتبين من الشكل رقم ( ٦ - ١٩ )

ويجرى اختبار الانحناء الكرى القياسى لتعيين حمل الكسر (Breaking load) وسهم الانحناء في منتصف بحر الككرة (Mid deflection) عند الكسر ليحبر الأول

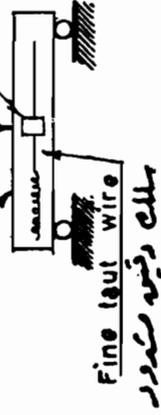
مقياس انفعال يقرأ من على  
Dial strain gage (Mech.).



مقاييس انفعال بالمقاومة الكهربائية  
Electrical resistance strain gages



مقياس سرعة على عينة الإختبار  
Mirror scale on specimen



شكل رقم (٦ - ١٩) تثبيت مقاييس الانفعال على الككرة في اختبار الانحناء

عن مقاومة الككرة للانحناء ويعبر الثاني عن صلابة الككرة ، وقد يكون الغرض من إجراء اختبار الانحناء الكمرى دراسة خواص ميكانيكية معينة أو ظواهر معينة لخصائص معدن الككرة مثل معايير الرجوعية أو معايير المتانة أو دراسة التشكل الطولى للككرة أو شكل مقاطعها ... الخ .

ج - الخواص الميكانيكية في الانحناء :

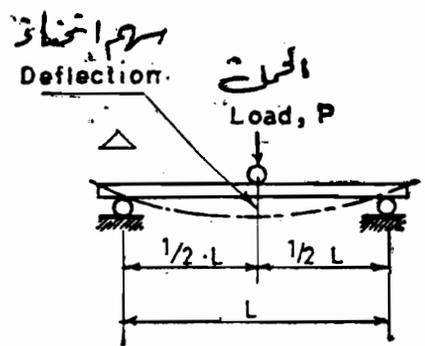
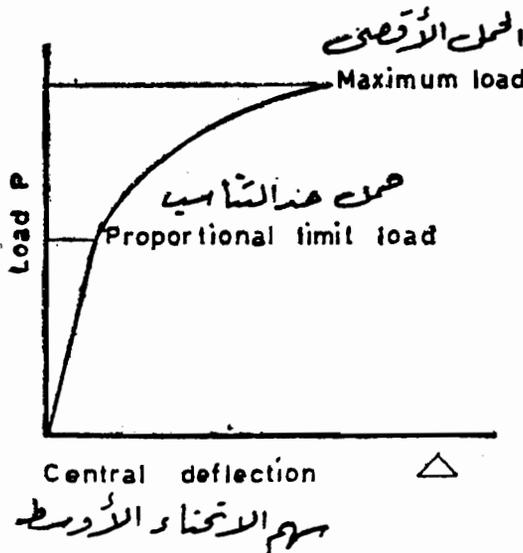
من أم الخواص الميكانيكية في الانحناء ما يأتي :

١ - مقاومة الانحناء : (Flexural strength)

تعين مقاومة الانحناء في حدود المرونة عن طريق حساب إجهاد الانحناء عند حد التناسب وذلك برسم المنحنى البياني للحمل وسهم الانحناء من واقع القراءات العملية كما يقين الشكل رقم (٦ - ٢٠) وتحديد الحمل عند حد التناسب ثم حساب

$$i = \frac{M \cdot y}{I}$$

أما المقاومة القصوى للانحناء والتي تسمى معايير الكسر (Modulus of rupture)



شكل رقم (٦ - ٢٠) تعيين الخواص الميكانيكية في اختبار الانحناء

تعيين لل مواد القصفة وهي التي يجزى عليها اختبار الانحناء الكرى غالباً باستخدام  
المعادلة :  $f = \frac{M \cdot v}{I}$

ومع أن هذه المعادلة مستنتجة على أساس حد المرونة فقط إلا أنه يمكن استخدامها مع التقريب البسيط للمعادن القصفة نظراً لعدم تغير مقطع الكرة تغيراً ذا قيمة ملحوظة عند الكسر عن أثناء التحميل الأولى، ويمكن التعبير عن مقاومة الانحناء بالإضافة إلى معايير الكسر بحمل الكسر أى الحمل الأقصى في الانحناء. ولقبول أو رفض المواد طبقاً للواصفات القياسية تقارن هذه القيم بالمنصوص عنها كحد أدنى في المواصفات للعينات ذات الأبعاد القياسية .

## ٢ - الصلابة : ( Stiffness )

تحدد صلابة المادة بقيمة معايير المرونة فتزيد بزيادة وبالعكس تقل بقلته، ويعين معايير المرونة من المعادلة :

$$\Delta = \frac{PL^3}{48 EI} \therefore E = \frac{PL^3}{48 \Delta I} = \frac{P}{\Delta} \cdot \frac{L^3}{48 I} = \frac{P}{\Delta} \times \text{Constant}$$

حيث  $\frac{P}{\Delta}$  ميل الخط المستقيم من منحنى الحمل وسهم الإنحناء ويمكن التعبير عن صلابة المادة علاوة على معايير المرونة بقيمة سهم الانحناء القصوى عند الكسر أى :  $\Delta_{max}$  وتعارن هذه القيم بالحد الأدنى المين بالمواصفات القياسية عند إجراء اختبار الانحناء الكرى القياسي لقبول أو رفض المواد .

## ٣ - الرجوعية في الانحناء : ( Bending resilience )

وتحدد قيمة الرجوعية في الانحناء بقيمة أكبر طاقة يمكن للكرة أن تخزنها وهي تحت تأثير الحمل ثم إعادة هذه الطاقة كاملة بعد إزالة التحميل أى تكون والكرة محملة بأكبر حمل في حدود المرونة وهو حد التناسب في الانحناء . وبذلك تكون الرجوعية تساوى مساحة المثلث الواقع تحت خط التناسب بين الحمل وسهم الانحناء ويمكن التعبير عن رجوعية المواد ومقارنتها في المواد المختلفة بمعايير الرجوعية ويساوى الرجوعية مقسومة على حجم الجزء المجهد من الكرة .

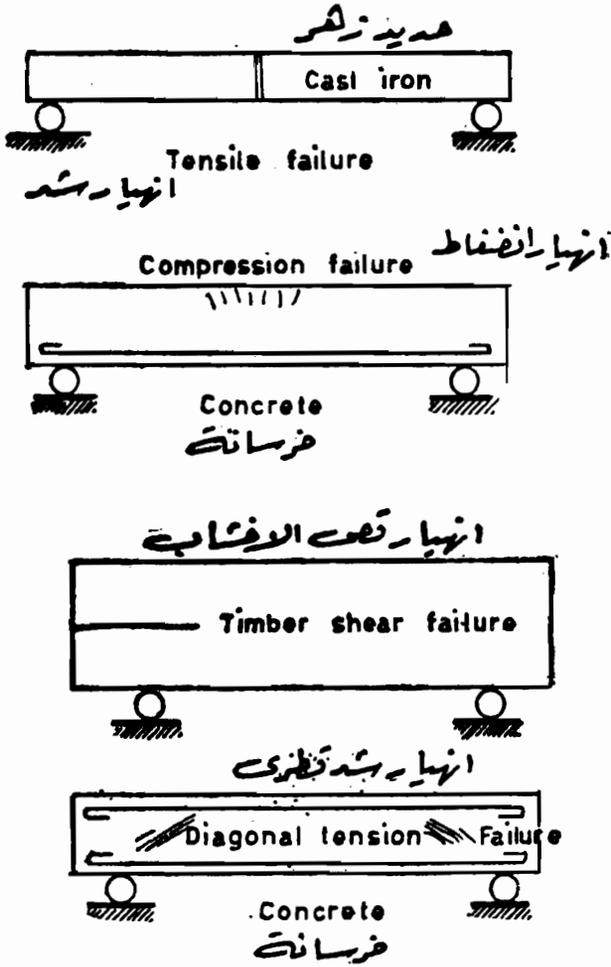
### ٤ - المتانة في الانحناء ( Toughness in Bending )

وتحدد قيمتها بالطاقة القصوى التي يمكن للككرة المختبرة تحملها حتى الكسر وتمثلها المساحة الكلية تحت المنحنى البياني للحمل وسهم الانحناء ويمكن التعبير عن مقاومة المادة للصدم في تحميل الانحناء بحساب معايير المتانة والذي يساوي المساحة سالفة الذكر مقسومة على حجم المجهد من الكبرة وهو الموجود بين تقطعي الارتكاز فقط .

#### د - انهيار للواد بالانحناء الكمرى :

يختلف شكل انهيار الكمرات المختبرة طبقاً لنوع المادة ونوع الإجهادات المسببة للإنهيار وأبعاد العينة المختبرة وشكل وأبعاد المقطع والعلاقة بين عمق وجر الكرة وفي المواد القصيفة يكون الانهيار غالباً بالكسر نتيجة ابتداء الكسر في المقطع الأكثر إجهاداً عند جزئياته الطرفية ( Outer fibers ) المجهدة بالشد حيث تحمل هذه المواد للشد ضعيف بالنسبة لحملها في الضغط فتتلاخ الحديد الزهر تحمله في الشد حوالى ٢٥٪ من مقاومته في الضغط والخرسانة مقاومتها في الشد حوالى ١٠٪ من مقاومتها في الضغط ويكون شكل مقطع المكسر في الحديد الزهر عمودى على المحور الطولى للكرة بكامل المقطع ، كذلك الأمر في الخرسانة العادية أما في الخرسانة المسلحة والخشب فيكون الانهيار الكمرى بالكسر على هيئة شروخ متعددة نتيجة إجهاد الشد أو القص أو الشد الضلعى القطرى ( Diagonal-tension ) الناتج من القص أو من إجهاد الضغط أحياناً، كما يقين من الشكل رقم ( ٦ - ٢١ ) .

وتؤثر سرعة التحميل وكيفيته عند إجراء إختبار الانحناء الكمرى في قيمة المقاومة لذلك تحدد المواصفات القياسية لاختبار المواد في الانحناء السرعة المناسبة للاختبار لكل مادة كما يلاحظ أن المقاومة للانهيار في المواد القصيفة عند تعرضها للانحناء الكمرى أكبر منها عند تعرضها للشد وذلك لوجود مقاومة ضغط لها أثناء الانحناء الكمرى تحسن من مقاومتها للانهيار . فشلا معايير الكسر للحديد الزهر حوالى ١,٨ من قيمة المقاومة للشد ، وفي الخرسانة العادية يتراوح من ١,٦ إلى ٢ من قيمة المقاومة للشد ، كما يلاحظ أيضاً أن مقاومة الإنحناء الكمرى لهذه المواد غالباً ماتكون أقل من



شكل رقم (٦ - ٢١) أنواع الانهيارات للمواد المختلفة في اختبار الإنحناء  
 مقاومتها في الضغط فشلا نسبة معايير الكسر في الإنحناء إلى مقاومة الضغط تساوي  
 حوالي ١٥٪ إلى ٢٠٪ في حالة الخرسانة العادية .

#### خامسا - اختبار الثني على البارد (Cold Bend Test)

تجرى اختبارات الثني على البارد للتأكد من تواجد خاصية المطولية للمعادن التي  
 ستعمل أثناء التشغيل في أغراض خاصة وكذلك لبيان مدى نقص المطولية نتيجة  
 تعريض المعادن لبعض معاملات معينة ميكانيكية أو حرارية أثناء التشكيل والتصنيع ،

كما تستخدم هذه الاختبارات للمعادن لمعرفة تواجد كمية عالية من الكربون أو الفسفور بها وكذلك لمعرفة عدم إنتظام ومناسبة ظروف الدلفنة — الأمر الذى يجعلها ضعيفة المطولية . لذلك تتطلب مواصفات معظم أنواع الصلب ضرورة اجراء اختبار الثنى على البارد لاسيا الصلب على شكل أسياخ وألواح مثل أسياخ الصلب للخرساة المسلحة و صلب مسامير البرشام ( Rivet Steel ) والصلب الإنشائى ( Structural Steel ) و صلب المستودعات المعرضة لضغط داخلى. كما يجرى غالباً اختبار الثنى على البارد لاختبار مطولية الوصلات الملمومة (Welded Joints) ويكون اجراء اختبار الثنى على البارد كما يلى:

### ١ - قطع الاختبار ( Test pieces )

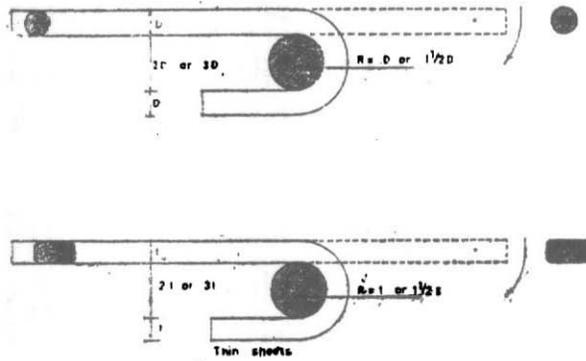
تجهز قطع الاختبار للأسياخ أو القضبان أو الأسلاك بقطعها بالطول المناسب الذى يمكن من اجراء الاختبار بمكثات الاختبار الموجودة ويلاحظ ترك قطر السيخ أو القضيب أو السلك كما هو بدون ازالة أية طبقة سطحية منه الا اذا نص على ذلك فى مواصفات التعاقد وقد يجهز القضيب من كتلة أو مقطع انشائى معين فيكون قطره مناسباً وحسب مواصفات الاختبار فى التعاقد . أما الألواح ( Plates ) فتجهز قطع اختبارها بتمضير شرائح ( Strips ) بطول مناسب لمكثة الاختبار و بنفس سمك اللوح . وتكون هذه غالباً بعضها فى اتجاه دلفنة الألواح والبعض الآخر عمودى على اتجاه الدلفنة لمعرفة المطولية فى كل من هذين الإتجاهين ويراعى ضرورة عمل استدارة بسيطة بأركان مقاطع قطعة اللوح المختبرة أى عمل استدارة للسوكة بطول القطعة وذلك للألواح ذات السمك الكبير لتفادى تأثير تركيز الإجهاد الناتج من الحروف المدببة على نتيجة الاختبار .

### ب اجراء الاختبار :

#### ١ - القضبان : ( Bars )

ثنى العينة حتى يتوازى طرفاها وتكون العلاقة بين قطر القضيب ( D ) ونصف قطر القطعة الاسطوانية التى ثنى حولها القضيب ( R ) كالتالى :

اذ كان قطر القضيب يساوى ٢,٥ سم أو أقل فإن  $R = D$  أما اذا كان قطر القضيب أكثر من ٢,٥ سم فإن  $R = 1\frac{1}{2}D$  كما يتضح من شكل رقم ( ٦ - ٢٢ )



اختبار الشنى على الباراد للقضبان والألواح الرقيقة

شكل رقم ( ٦ - ٢٢ )

والفرض من هذا التحديد لتلك العلاقة بين  $R$  ،  $D$  هو توحيد إجراء اختبار الشنى على الباراد حتى يمكن أن تكون نتيجة الاختبار جالحة للمقارنة مهنا اختلفت أما كن إجراء الاختبار لتكون أساس مؤحد صالح لقبول أو رفض المواد حيث أن اختلاف قطر الاسطوانة التي يثنى حولها القضيب يؤثر في نتيجة الاختبار فالقطر الكبير قد لا يظهر الكسر بينما لنفس القضيب لو ثنى حول قطر صغير يكون الاختبار شديداً على المادة ويكسرها قبل تمام الشنى .

٢ - الألواح ( Plates ) .

يجرى هذا الاختبار تماماً كلقضبان على أن يحمل سمك اللوح ( $t$ ) محل قطر القضيب  $D$  أى أن العلاقة بين ( $K$  ،  $t$ ) تكون كالآتى شكل ( ٦ - ٢٢ ) .  
إذا كانت  $t$  تساوى ٢٥ مم أو أقل  $R = t$  وإذا كانت  $t$  تساوى أكثر من ٣٥ مم فإن  $t = 1 \frac{1}{2} R$  .

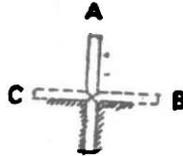
٣ - الألواح الرقيقة ( الرقائق ) : ( Thin Sheets ) .

نظراً لصعوبة إجراء الشنى على الباراد حول قطعة اسطوانية بقطر ذى علاقة بسمك اللوح الرقيق كما هو الحال فى القضبان والألواح سالفة الذكر لذلك فإن إجراء اختبار الشنى على الباراد للألواح الرقيقة يكون بثنى قطعه الاختبار على نفسها كما هو مبين بالأشكال رقم ( ٦ - ٢٢ ) ، ( ٦ - ٢٤ ) ، ( ٦ - ٢٥ ) .

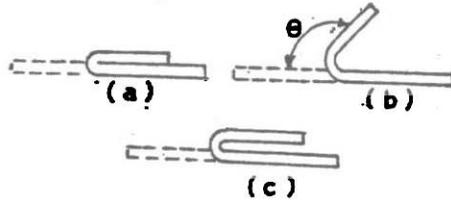


إختبار الشقي على البارد للألواح الرقيقة (الرقائق)

شكل رقم (٦ - ٢٣)

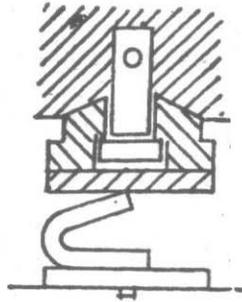


Reverse bend test  
إختبار الشقي عكسي



BENT TESTS FOR SHEET METAL

شكل رقم (٦ - ٢٤) إختبار الشقي على البارد للألواح الرقيقة

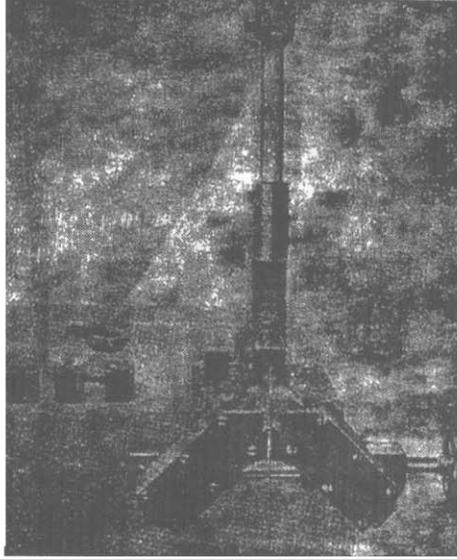


FOLDING FLAT BETWEEN THRUST PLATES.

شكل رقم (٦ - ٢٥) الشقي الرقائق ثنياً مسطحاً بين لوحى ضغط

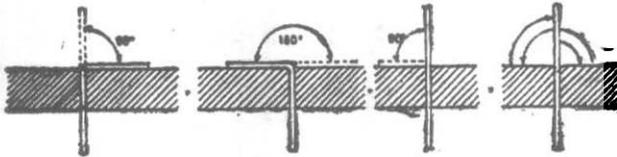
٤ - الأسلاك : (Wires)

شقي على البارد قطع الإختبار السلك بعد شدّها شداً بسيطاً وثبيتها بالمسكنة الخاصة بذلك والتي تشبه المنجلة شكل رقم (٦ - ٢٦) وذلك بثنيها جانبياً ٩٠ درجة



شكل رقم (٦ - ٢٦) مكنة اختبار ثني الأسلاك على البارد

ثم جانبياً في الاتجاه المعاكس  $180^\circ$  درجة ثم جانبياً في الاتجاه الأول  $90^\circ$  درجة أي لرجع لوضعها الرأسي الأول . ويكون الاختبار قد تم بثني السلك دورتين كاملتين كما هو في الشكل (٢٧ - ٦) فإذا لم ينكسر يعتبر مقبولاً ، ويمكن مقارنة مدى تحمل قطعتين من السلك للثني على البارد بأجراء الثني جانبياً عدة مرات حتى كسر السلك فيكون عدد الدورات التي كسرت السلك هو مقياس لهذه المقارنة .  
ويمكن - طبقاً للمواصفات أو لاشتراطات التعاقد - أن تختبر الألواح الرقيقة جداً بنفس اختبار الأسلاك المذكورة .

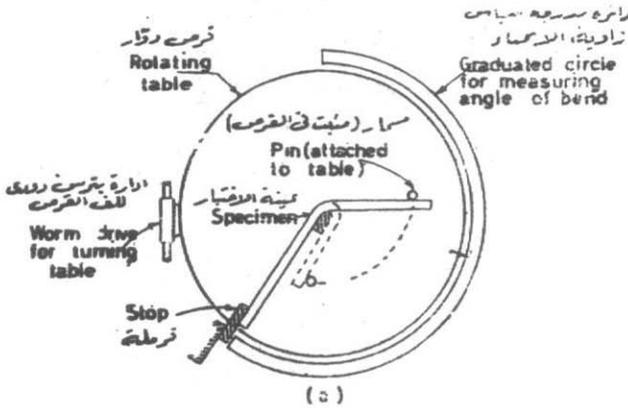


اختبار الثني على البارد للأسلاك

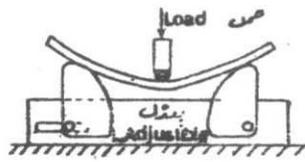
ج - مكنت الاختبار: ( Testing Machines )

يجرى اختبار الشق على البارد بإحدى الاجهزة الآتية :

- ١ - قطع اسطوانية ( pins ) مثبتة توضع بينها قطعة الاختبار التي يؤثر عليها بعزم انحناء يدويا أو ميكانيكيا بطرق مختلفة شكل ( ٦ - ٢٢ ) .
- ٢ - مكنت اختبار خاصة بالشق على البارد: فقط مثل مكنت ألسن ( Olsen ) أو جهاز شلر ( Scheler ) كما في شكل رقم ( ٦ - ٢٨ ) .



OLSEN COLD BEND MACHINE  
مكنت ألسن لاختبار الشق على البارد



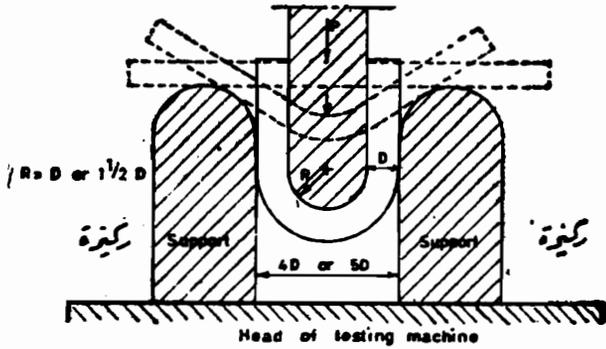
(SCHELER DEVICE FOR COLD BEND TEST)

جهاز شلر لاختبار الشق على البارد

شكل رقم ( ٦ - ٢٨ )

- ٣ - مكنت الاختبار العامة باستخدام قواعد ارتكاز إسطوانية وقطع تحميل ذات طرف نصف دائري تتغير حسب قطر أو سمك العينة المختبرة بحيث تكون العلاقة بين نصف قطر طرف قطعة التحميل وقطر أو سمك عينة الاختبار طبقا للعلاقة التي سبق

ذكرها بين  $R$  و  $D$  أو  $t$  و  $D$  ويراعى عند إجراء الاختبار أن يكون التحميل في منتصف العينة والمسافة بين حافتي قاعدتي الارتكاز تساوي  $4t$  أو  $4D$  (في حالة قطر أو سمك العينة  $10$  مم وأقل) أو تساوي  $5D$  أو  $5t$  (في حالة قطر أو سمك العينة أكثر من  $20$  مم). حتى يمكن تحميل العينة بالضغط والاستمرار في التحميل حتى يتوازا طرفا العينة تماما كما يتضح من الشكل رقم (٦ - ٢٩).



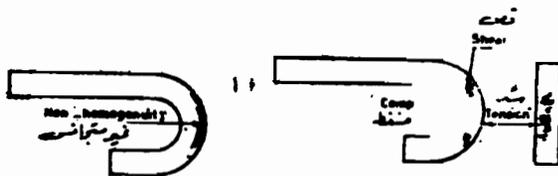
رأس مكنة الاختبار

اختبار الشقي على الباراد بامتخدام مكنة الاختبار العامة

شكل رقم (٦ - ٢٩)

واد في اختبار الشقي على البارود:

يحدث للمواد المعطبة انهيار في اختبار الشقي على البارود نتيجة اجهاد الشد أو اجهاد الضغط أو اجهاد القهر أو بالتشقق والكسر نتيجة لعدم تجانسها (Non-homogeneous) وذلك في الأماكن وبالحواله المبينة بالشكل رقم (٦ - ٣٠).



انهيار المواد في اختبار الشقي على البارود

شكل رقم (٦ - ٣٠)

## سلسلا - اختبارات ثنى أخرى للمعادن :

تختبر المعادن فى الثنى باختبارات أخرى خلاف الثنى على البارد لأغراض متنوعة منها ما يلى :

### ١ - اختبار الثنى على الساخن ( Hot bend test )

يجرى هذا الاختبار أحياناً على الحديد المطاوع ( Wrought iron ) لبيان كية الكبريت العالية الموجودة به والتي تسبب له قلة كبيرة فى المظولية فى درجات الحرارة العالية . ويكون إجراء الاختبار بتسخين الحديد المطاوع لدرجة اللحام حوالى  $1800^{\circ}\text{F}$  (  $880^{\circ}\text{C}$  ) ثم ثنى القطعة المسخنة على سندان .

### ب - اختبار ثنى التسيقية ( Quench bend test )

ويستخدم هذا الاختبار لصلب مسامير البرشام ( Rivet steels ) المستخدمة فى صناعة المزاجل ( Boilers ) ويكون ذلك بتسخين الصلب وتسيقته ثم ثنيه والغرض من الاختبار بيان كية الكربون العالية به حيث أن تواجدها يسبب تقص كبير فى مظولية الصلب .

### ج - اختبار ثنى الحز ( Nick bend test )

يجرى هذا الاختبار إذا أريد إجراء اختبار سريع للمعادن لبيان أن جزئياتها كبيرة التكوين أو لبيان العيوب الداخلية التى تسبب تقص المظولية للمعادن . ويكون إجراء الاختبار بحز العينة المختبرة بأزميل ( chisel ) ثم تثبيتها فى منجل وثنيها بواسطة مطرقة ويمكن إجراء هذا الاختبار بعناية أكثر بحمل الحز بمنشار معادن أو بمسكنة تفريز ثم ثنى العينة قليلاً بمطرقة ويكمل الثنى بضغط العينة بحمل مركوى فى مسكنة الانتياز .

## أمثلة محلولة

١ - اجري اختبار الانحناء على ككرة من الخشب مربعة المقطع وعملة بحمل مركز في منتصفها . وكانت المسافة بين تقطعي الارتكاز ٩٠ سم فإذا كان معاير مرونة هذا النوع من الخشب مساويا ١٠,٠٦٤ × ١٠<sup>٤</sup> كجم / مم<sup>٢</sup> وكانت قراءات الحمل وسهم الانحناء في منتصف البحر المقابل لكل حمل كما يلي :

الحمل (كجم)	سهم الانحناء (مم)
٢٠٠	١,١٥٠,٥٥
٤٠٠	١,٧٦١,٨٨
٦٠٠	٣,٦٠
٩٠٠	٤,٤٠
١٢٠٠	٥,٤٨
١٥٠٠	٦,١٣
١٨٠٠	٧,١٠
٢٠٠٠	
٢٢٠٠	

ارسم منحنى الحمل وسهم الانحناء وعين ما يأتي :

- ١ - أبعاد مقطع الككرة
  - ب - إجهاد حد التناسب
  - ٢ - معاير الرجوعية
  - د - معاير الكسر في الانحناء
  - هـ - معاير المتانة
- الحل :

شكل رقم (٦ - ٣١) يبين منحنى الحمل وسهم الانحناء

١ - عين معاير المرونة E من المعادلة :

$$E = \frac{P}{\Delta} \cdot \frac{13}{48I}$$

$$P = 200 \text{ kg}$$

$$\Delta = 0.55 \text{ mm}$$

$$I = 900 \text{ mm}^4$$

$$E = 1.064 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$$

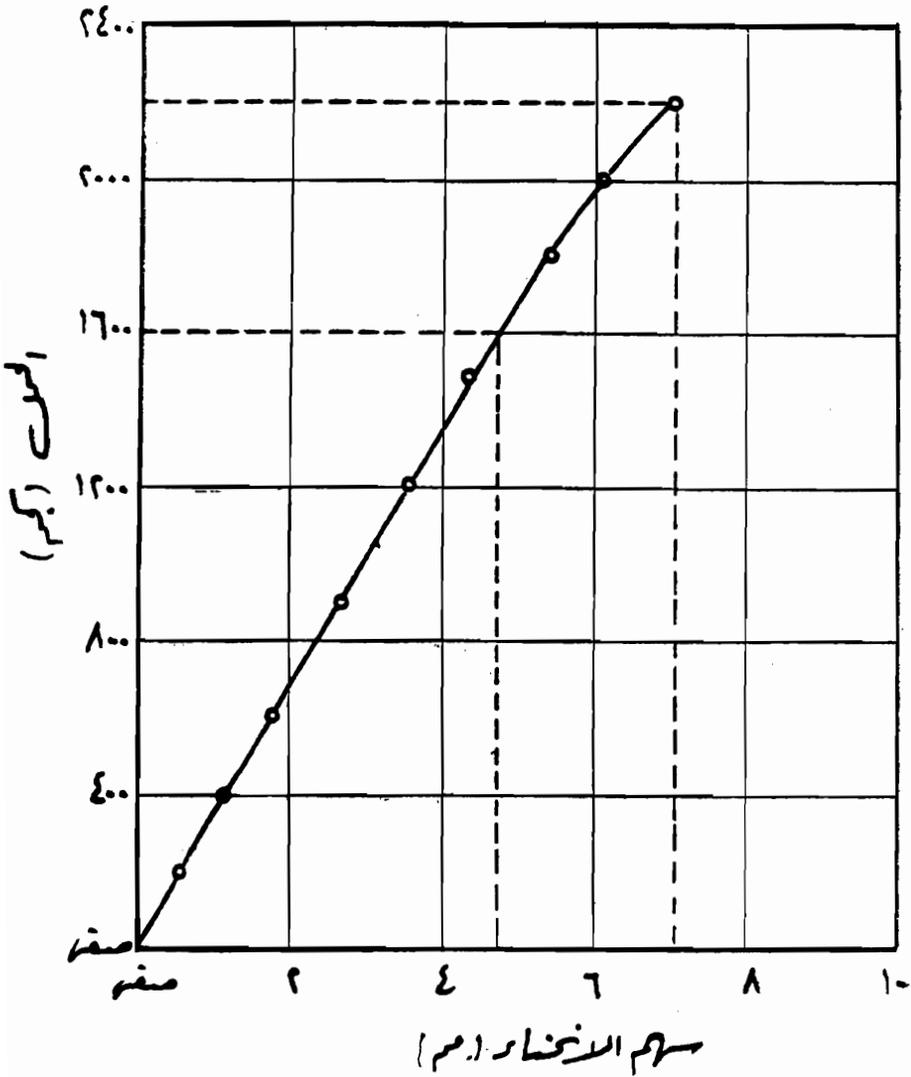
$$\therefore I = \frac{P}{\Delta} \cdot \frac{13}{48E} = \frac{200}{0.55} \cdot \frac{(900)^3}{6.4 \times 10^4} = 52.0 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

وحيث أن مقطع الككرة مربع طول ضلعه b

$$\therefore I = \frac{(b)^4}{12}$$

$$\therefore b = \sqrt[4]{12 I} = \sqrt[4]{12 \times 52.0 \times 10^4} = 50.0 \text{ mm}$$

$$\therefore b = 50 \text{ cm}$$



شكل رقم (٦ - ٣١) العلاقة بين الحمل وسهم الانحاء

ب - من الرسم نجد أن حمل حد التناسب (  $P_{pl}$  ) = ١٦٠٠ كجم

∴ يعين إجهاد حد التناسب (  $f_{pl}$  ) من المعادلة :

$$f_{pl} = \frac{P_{pl.1}}{4} \times \frac{v}{I} = \frac{1600 \times 90.0}{4} \times \frac{5}{2}$$

$$= 1730 \text{ kg/cm}^2$$

ح - معايير الرجوعية =  $\frac{\frac{1}{4} \times \text{حمل حد التناسب} \times \text{سهم الانحناء عند حد التناسب}}{\text{الحجم}}$

$$= \frac{0,475 \times 1600 \times \frac{1}{4}}{90 \times 5 \times 5} = 0,170 \text{ كجم ، سم/سم}^2$$

د - معايير الكسر في الانحناء (  $f_b$  ) :

$$f_b = \frac{P_{\max} \cdot l}{4} \times \frac{y}{I} = \frac{2200 \times 90}{4} \times \frac{2,5}{52} = 2400 \text{ Kg/cm}^2$$

هـ - معايير التآكل =  $\frac{\text{المساحة تحت منحنى الحمل وسهم الانحناء}}{\text{الحجم}}$

$$= \frac{0,71 \times 2200 \times \frac{1}{4}}{90 \times 5 \times 5} = 0,35 \text{ كجم ، سم/سم}^3$$

٢ - كرة من الحديد الزهر ذات مقطع مستدير قطر ٥ سم مرتكزة ارتكازاً حراً في نقطتين المسافة بينهما ( البحر ) تساوي ٤٦ سم ومحطة في منتصف البحر بحمل مركز بقيمة تزداد تدريجياً حتى الكسر . وكانت قيمة الحمل بالطن وقيمة سهم الانحناء بالمليمتر عند منتصف البحر كما يلي :

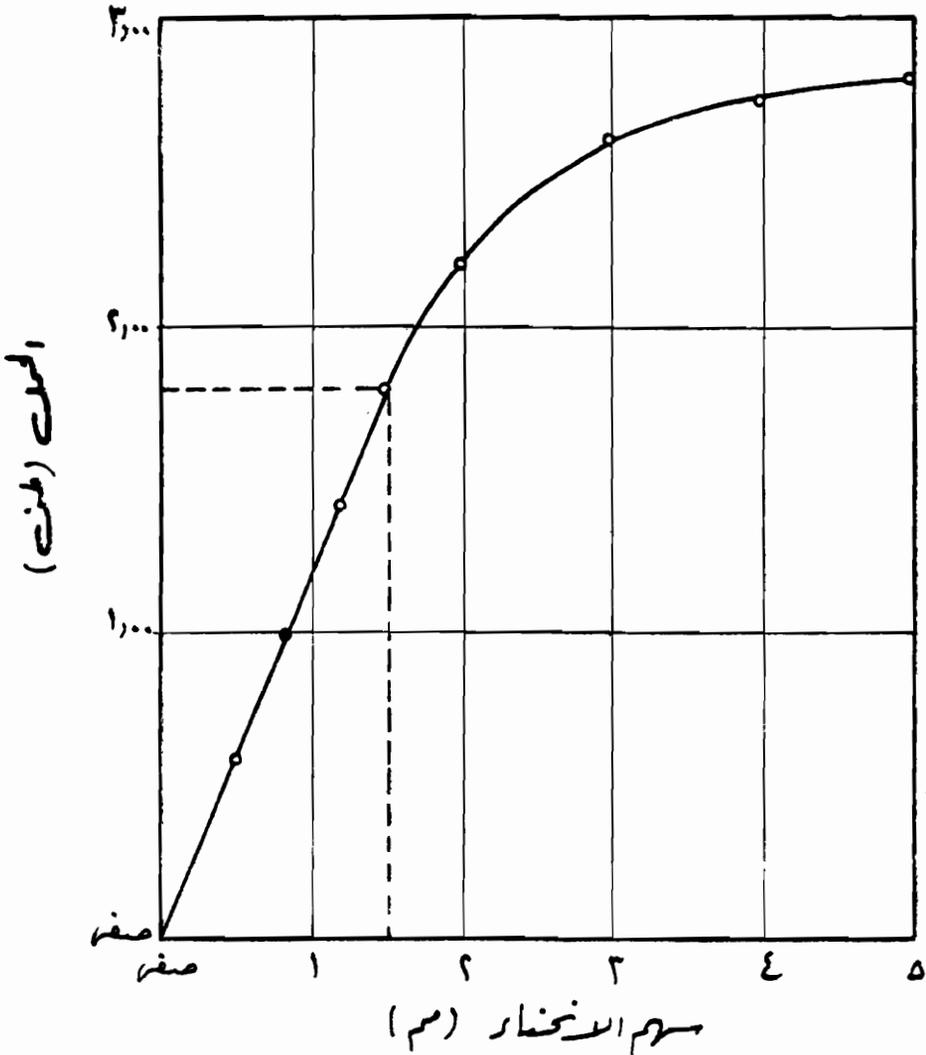
٢,٨	٢,٧٤	٢,٦	٢,٢	١,٨	١,٤	١	٠,٦	صفر	الحمل
٥	٤	٣	٢	١,٥	١,٢	٠,٨	٠,٥	صفر	سهم الانحناء

ارسم منحنى الحمل وسهم الانحناء ثم عين :

إجهاد حد التناسب - معايير الكسر - معايير المرونة في الانحناء - معايير الرجوعية في الانحناء.

الحل :

شكل رقم ( ٦ - ٢٢ ) يبين منحنى الحمل وسهم الانحناء ومنه نجد أن حمل حد التناسب (  $P_{pl}$  ) = ١,٨ طن .



شكل رقم (٦ - ٣٢) العلاقة بين الحمل وسهم الانحناء

$$P_{pl} = \frac{P_{pl} l}{4} \cdot \frac{y}{l} \text{ من المعادلة: } (f_{pl})$$

$$l = 46 \text{ cm و } y = 5/2 = 25 \text{ cm} \quad \text{حيث}$$

$$I = \frac{\pi \cdot (5)^4}{64} = 30.6 \text{ cm}^4$$

$$\therefore f_{pl} = \frac{1800 \times 46}{4} \times \frac{2.5}{30.6} = 1690 \text{ Kg/cm}^2$$

يحسب معايير الكسر في الانحناء ( $f_b$ ) من المعادلة :

$$f_b = \frac{P_{max,l}}{4} \cdot \frac{y}{I} = \frac{2800 \times 46}{4} \times \frac{2.5}{30.6} = 2800 \text{ Kg/cm}^2$$

يحسب معايير المرونة ( $E$ ) من المعادلة :

$$E = \frac{P}{\Delta} \cdot \frac{(l)^3}{48 I} = \frac{0.6}{0.05} \times \frac{(46)^3}{46 + 30.6}$$

$$\therefore E = 790 \text{ t/cm}^2$$

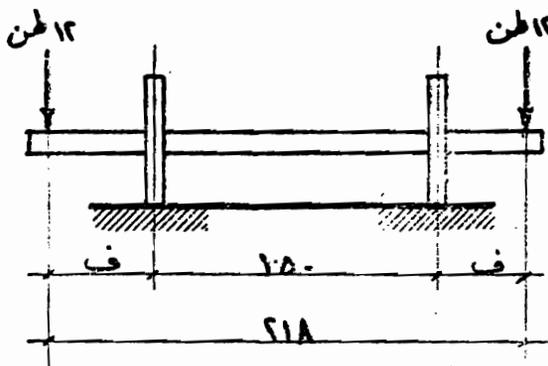
معايير الرجوعية =  $\frac{\frac{1}{4} \text{ حمل التناسب} \times \text{مسبم الانحناء عند حد التناسب}}{\text{الحجم}}$

$$r_{\text{سم}^2} = \frac{0.10 + 1800 \times \frac{1}{4}}{46 \times \frac{(0)^2}{5}} = 0.188 \text{ كجم / سم}^2$$

٣ - دنجل قاطرة قطره ٢٥ سم والبعد بين العجلتين ١٥٠ سم والبعد بين كرسي الحمل على الدنجل ٢١٨ سم . فإذا كان الحمل على كل كرسي ١٢ طن . فوجد أ كبر إجهاد في الدنجل كذلك نصف قطر القوس بفرض معايير مرونة الصلب ٢١٠٠ طن/سم<sup>٢</sup> .

الحل :

من شكل رقم (٦ - ٣٣) نجد أن :



شكل رقم (٦ - ٣٣)

(  $M_{max}$  ) أقصى عزم انحناء يؤثر على الدبجل = الحمل (  $P$  )  $\times$  المسافة (  $f$  )  
 $= 12 \times 24 = 288 = 0.8$  طن.سم

وأ كبر إجهاد بالدبجل (  $f_{max}$  ) بحسب من المعادلة :  $f_{max} = M_{max} \cdot \frac{y}{I}$

$$y = 25/2 = 12.5 \text{ cm} \quad \text{حيث :}$$

$$I = \frac{\pi(25)^4}{64} = 19100 \text{ cm}^4$$

$$\therefore f_{max} = \frac{408000 \times 12.5}{19100} = 265 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\frac{M}{I} = \frac{E}{R}$$

حيث (  $R$  ) هو نصف قطر القوس

$$\therefore R = \frac{1.E}{M} = \frac{19100 \times 2100}{408} = 96000 \text{ cm} = 960 \text{ m}$$

٤ - أوجد أ كبر إجهاد في سلك صلب قطره ٠,٨ مم إذا ثنى على بكرة قطرها ٥٠ سم . اعتبر معايير المرونة في الضغط والشد  $E = 2100$  طن / سم<sup>٢</sup> .

الحل :

بفرض أن الإجهادات بالسلك في حدود المرونة :  $\frac{f_{max}}{y_{max}} = \frac{E}{R}$

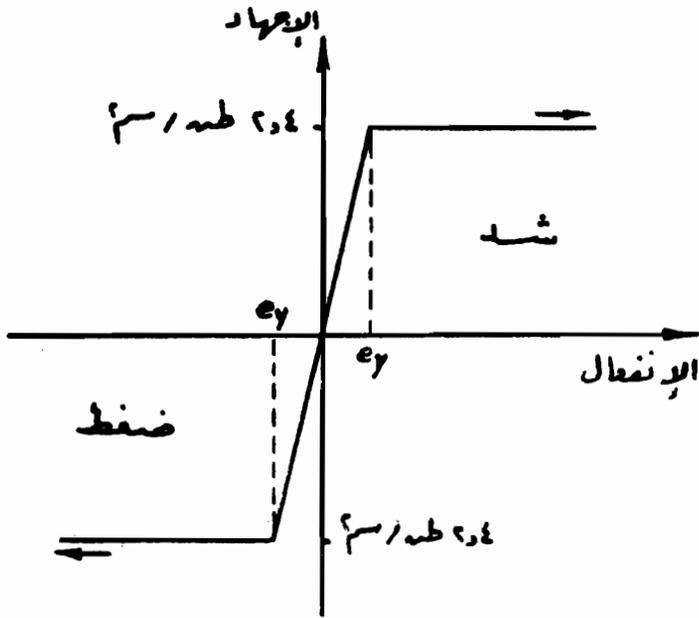
حيث  $f_{max} =$  أ كبر إجهاد بالسلك

$y_{max} =$  نصف قطر السلك  $E =$  معايير المرونة

$R =$  نصف قطر القوس = نصف قطر البكرة

$$f_{max} = \frac{E \cdot y_{max}}{R} = \frac{2100 \times 0.04}{25} = 3.35 \text{ t/cm}^2$$

٥ - إذا فرض أن منحنى الاجهاد والانفعال للصلب الطرى في أى من الشد والضغط كما هو مبين في شكل رقم ( ٦ - ٣٤ ) أوجد أقصى عزم انحناء تتحمله كرة بسيطة من هذا الصلب مقطوعها مربع أبعاده ٥  $\times$  ٥ سم بحيث لا تتعدى الاجهادات



### العلاقة التقريرية للإجهاد والانفعال

شكل رقم (٦ - ٣٤)

بالكرة حدود المرونة. كذلك احسب أقصى عزم انحناء يمكن أن تتحمله هذه الكرة.

الحل :

من شكل رقم (٦ - ٣٥) الذي يبين توزيع الإجهادات على مقطع الكرة في نهاية منطقة المرونة نجد أن :

يجب حسب أقصى عزم انحناء في منطقة المرونة ( $M_e$ ) من المعادلة :

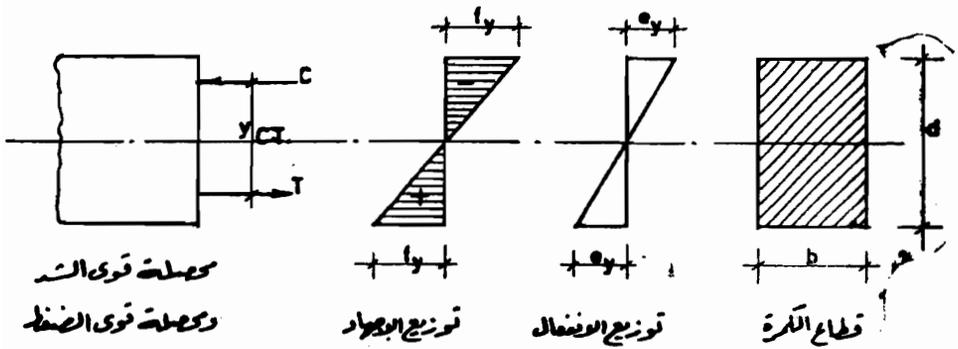
$$M_e = C y_{cT} = T \cdot y_{cT}$$

$$C = T = \frac{f_y d/2}{2} \cdot b = \frac{1}{4} f_y \cdot d \cdot b$$

$$y_{cT} = 2 \cdot \frac{2}{3} d/2 = \frac{2}{3} d$$

$$\therefore M_e = \frac{1}{6} f_y \cdot d^2 \cdot b$$

$$\therefore f_y = 2.4 \text{ t/cm}^2 \quad , \quad b = d = 5 \text{ cm}$$



توزيع الجهود و الانفعال على قطاع الأبرة في نهاية البرونة

شكل رقم (٦ - ٢٥)

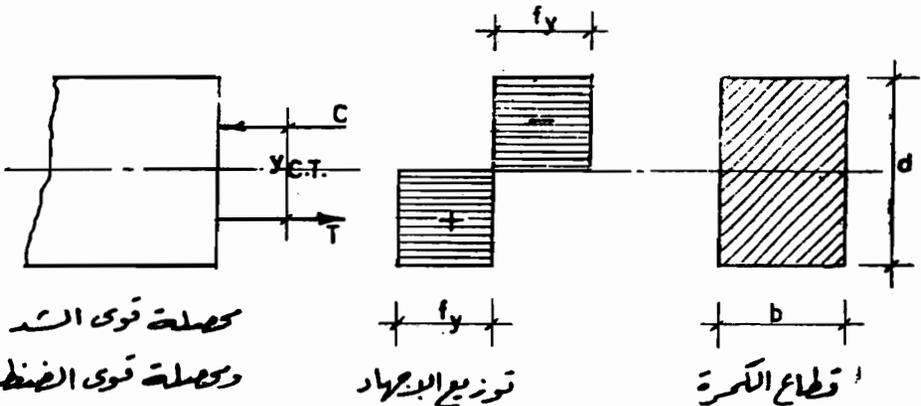
$$\therefore M_e = \frac{1}{6} \times 2.4 \times (5)^2 \times 5 = 50 \text{ t. cm}$$

كذلك من شكل رقم (٦ - ٣٦) الذي يبين توزيع الإجهادات على مقطع الكرة بعد حدوث خضوع في كل مقطع نجد أن أقصى عزم انثناء ( $M_{max}$ ) بحسب من المعادلة

$$M_{max} = C y_{c.T} T = T y_{c.T} C$$

$$C = T = \frac{1}{2} f_y \cdot d \cdot b \quad \text{و} \quad y_{c.T} = \frac{1}{2} d$$

$$\therefore M_{max} = \frac{1}{4} f_y d^2 b = \frac{1}{4} \times 2.4 \times (5)^2 \times 5 = 75 \text{ t.cm}$$



شكل رقم (٦ - ٣٦) توزيع الاجهادات على مقطع الكرة بعد حدوث الخضوع في كل المقطع

## مسائل

١ - كرة خشبية ذات مقطع مربع  $٥ \times ٥$  سم مرتكزة على قعقق إرتمكز المسافة بينهما  $٨٠$  سم ، حلت تدريجياً حتى الكسر بحمل مركز في منتصف البحر وكانت نتائج الاختبار بين الحبل وسهم الإنحناء المصاحب له في منتصف الكمرة كما يلي :

١٢٠٠	١٠٠٠	٨٠٠	٦٠٠	٤٠٠	٢٠٠	١٠٠	صفر	( كجم )
٥٢,٥	١٧	١٢,٥	٨	٥	٢,٥	١,٢٥	صفر	سهم الإنحناء ( مم )

ارسم منحنى الحبل وسهم الإنحناء ثم عين ما يأتي :

- ١ - معايير الكسر .  
ب - معايير المرونة في الإنحناء .  
ج - معايير الرجوعية في الإنحناء .

د - بين بالرسم أربع حالات متوقعة لشكل الكسر للكمرة المختبرة .

٢ - كرة بسيطة من الحديد الزهر الرمادي ذات مقطع مربع  $٣٠ \times ٣٠$  مم وبحجم  $٦٠٠$  مم ، حلت بحمل مركز في منتصفها تدريجياً حتى الكسر . وكانت نتائج الحبل بالكيلو جرام وسهم الإنحناء المصاحب له في منتصف الكمرة بالمليمتر كما يلي :

١٤٤٠	١٣٥٠	١٢٠٠	١٠٠٠	٨٠٠	٦٠٠	٤٠٠	٢٠٠	صفر	( كجم )
١,٤	١,٢	١,٠	٠,٨٢	٠,٦٦	٠,٥٠	٠,٣٤	٠,١٦	صفر	سهم الإنحناء ( مم )

١ - إجهاد حد التناسب في الإنحناء .  
ب - معايير الكسر .

ج - معايير المرونة .  
د - معايير المتانة .

هـ - ارسم شكل الكسر المتوقع للكمرة الزهر .

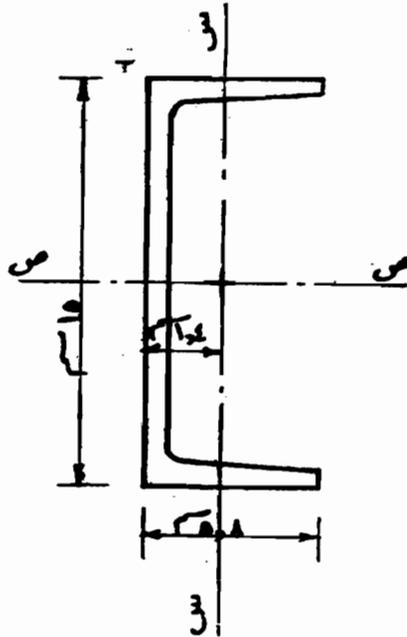
٣ - أجرى اختبار الإنحناء على كرتين أ ، ب من الحديد الزهر بتحميل كل كرة في منتصفها حتى الكسر وقد سجلت القراءات الآتية :

الكمرة	قطر مم	بحر سم	حمل الكسر كجم	سهم الإنحناء في المنتصف عند حمل الكسر - مم
أ	٤	٦٠	١٥٠٠	١,٤
ب	٦	٨٠	٢٠٠٠	١,٦

بين أى الكمرتين تفوق الأخرى من جهة خاصية المقاومة ومن جهة خاصية الصلابة ؟

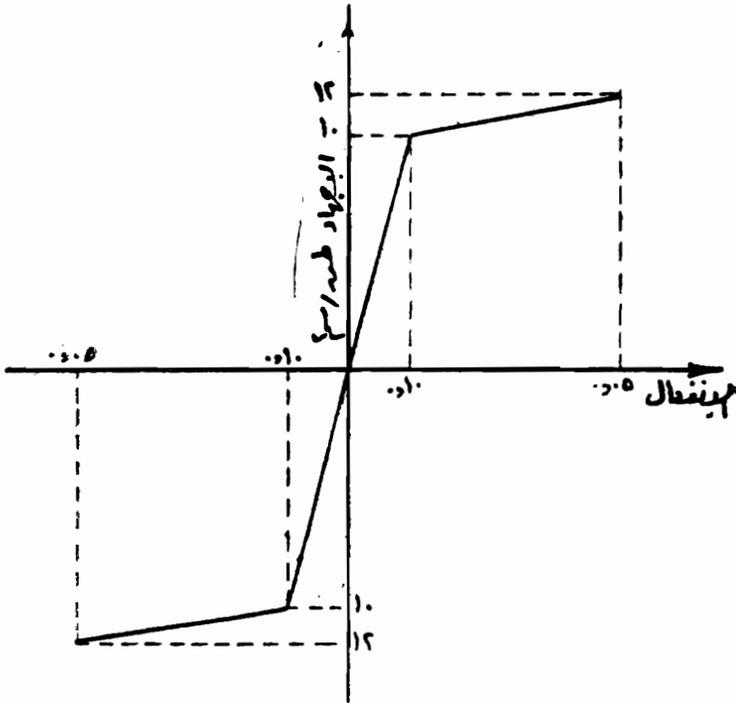
٤. — كرة بسيطة من الصلب بجرها ٣ متر ومقطعها مجرى - شكلي رقم (٤) فإذا كان عزم القصور الذاتي لمقطع الكمرة حول المحور س س = ٢ سم<sup>٤</sup> وحول المحور ص ص = ٨١٠ سم<sup>٤</sup>، لإوجد قيمة الحمل الموزع بانتظام على طول الكمرة الذى يمكن التأمير به بحيث لا يزيد الاجهاد بالمقطع عن ٦٠٠ كجم/سم<sup>٢</sup> وذلك فى الحالتين الآتيتين =

١. — إذا وضعت الكمرة بحيث يكون ارتفاع المقطع (غ) رأسياً .
- ب. — إذا وضعت الكمرة بحيث يكون ارتفاع المقطع (ع) أفقياً .



شكل رقم (٦ - ٢٧)

٥ - إذا كان منحنى الإجهاد والانفعال لسيبكا ما في أي من الشد أو الضغط مكون من خطين مستقيمين كما في شكل رقم (٦ - ٢٨) - أوجد أقصى عزم انحناء يمكن أن تعرض له كرة مصنوعة من هذه السببكا مقطوعا مستطيل عرضه ٢,٥ سم وعمقه ٥ سم.



العلاقة التقربية للإجهاد والانفعال

شكل رقم (٦ - ٢٨)

## تمرين (١٠)

اختبار الانحناء الكمرى لعينة من الحديد الزهر الرمادى

١ - اللجان :

يهدف هذا الاختبار إلى دراسة سلوك الحديد الزهر الرمادى تحت تأثير الانحناء وذلك بتحميل كرة مرتكزة عند طرفها ومحتمة في منتصف المسافة بين قعطي الارتكاز ثم تعيين سهم الانحناء المصاحب لكل حمل وذلك للكورة في منتصف المسافة بين قعطي الارتكاز (منتصف البحر) ثم رسم المنحنى الباقى للحمل وسهم الانحناء وتعيين الخواص الميكانيكية للحديد الزهر فى الانحناء ، كذلك ملاحظة شكل كسر عينة الاختبار نتيجة التحميل بالانحناء الكمرى .

٢ - عينات الاختبار :

يجرى الاختبار على كرة من الحديد الزهر الرمادى مستطيلة المقطع ( عرض المقطع ٣٠ مم وعمقه ٥٠ مم ) وطولها الكلى ١١٠ سم .

٣ - أدوات الاختبار :

مكنة خاصة لأجراء الانحناء الكمرى ويوجد بها جزء خاص لقياس سهم الإنحناء فى منتصف بحر الكورة - مسطرة مدرجة .

٤ - خطوات إجراء الاختبار :

١- تقاس أبعاد مقطع كرة الحديد الزهر بالمسطرة المدرجة ، ثم تضبط ريكزتري مكنة الاختبار على طول البحر المطلوب فى الاختبار وهو ٩٠ سم .

ب- توضع الكمر فى مكنة الاختبار مرتكزه على الريكزتريين (Supports) ويضبط جهاز قياس سهم الانحناء على قراءة الصفر .

ج- تحمل الكورة بحمل مركز فى منتصف البحر ويزداد التحميل على دفعات مع تسجيل سهم الانحناء فى منتصف البحر المناظر لكل حمل حتى يحدث الكسر .

## • - الناتج :

يمكن من البيانات المسجلة في هذا الاختبار الحصول على النتائج التالية .

١ - رسم المنحنى البياني للحمل وسهم الانحناء لككرة الحديد الزهر .

٢ - من المنحنى البياني للحمل وسهم الانحناء يمكن تعيين ما يلي :

(١) حمل حد التناسب : وهو الحمل عند نهاية الخط المستقيم من هذا المنحنى البياني . (  $P_{p1}$  ) .

(٢) سهم الانحناء عند حد التناسب : وهو سهم الانحناء عند نهاية الخط المستقيم من منحنى الحمل وسهم الانحناء (  $\Delta p_1$  ) .

حمل الكسر (  $P_{max}$  ) .

٣ - تعيين الخواص الميكانيكية الآتية للحديد الزهر في الانحناء :

$$f_{p1} = \frac{M_{p1} \cdot y}{I} \quad \text{كا يلي : (١) اجهاد حد التناسب في الانحناء ( } f_{p1} \text{ )}$$

حيث (  $M_{p1}$  ) هو عزم الانحناء في منتصف الككرة عند حد التناسب

$$M_{p1} = \frac{P_{p1} \cdot l}{4} \quad \text{و ( } l \text{ ) هو بجر الككرة و ( } y \text{ ) نصف عمق الككرة}$$

$$I = \frac{b d^3}{12} \quad \text{و } I \text{ هو عزم القصور الذاتي لمقطع الككرة حول محور التعادل}$$

حيث (  $b$  ) عرض قطاع الككرة و (  $d$  ) عمق الككرة .

$$f_b = \frac{M_{max} \cdot y}{I} \quad \text{(ب) معايير الكسر في الانحناء ( } f_b \text{ ) :}$$

حيث (  $M_{max}$  ) هو عزم الانحناء في منتصف الككرة عند الكسر

$$M_{max} = \frac{P_{max} \cdot l}{4}$$

$$E = \frac{P}{\Delta} \cdot \frac{l^3}{48I} \quad \text{(ج) معايير المرونة :}$$

حيث  $\frac{P}{\Delta}$  هو ميل الخط المستقيم من المنحنى البياني للحمل وسهم الانحناء .

٥ - معيار الرجوعية =  $\frac{\text{المساحة تحت الخط المستقيم من منحنى الحمل وسهم الانحناء}}{\text{حجم الجزء المجهد من الكرة}}$

$$\frac{P_{pl} \cdot \Delta_{pl}}{2 \cdot b \cdot d \cdot l} =$$

٥ - معيار التآقة =  $\frac{\text{المساحة الكلية تحت منحنى الحمل وسهم الانحناء}}{\text{حجم الجزء المجهد من الكرة}}$

$$\frac{2}{3} \frac{P_{max} \cdot \Delta_{max}}{b \cdot d \cdot l} =$$

٤ - يلاحظ أن مقطع الكسر عمودي على محور الكرة وفي منتصفها ويكون الكسر نتيجة انفصال المنطقة المعرضة لإجهادات الشد من مقطع الكرة ثم يمتد الانفعال بسرعة حتى يشمل كل عمق الكرة .

١ - مثال تطبق :

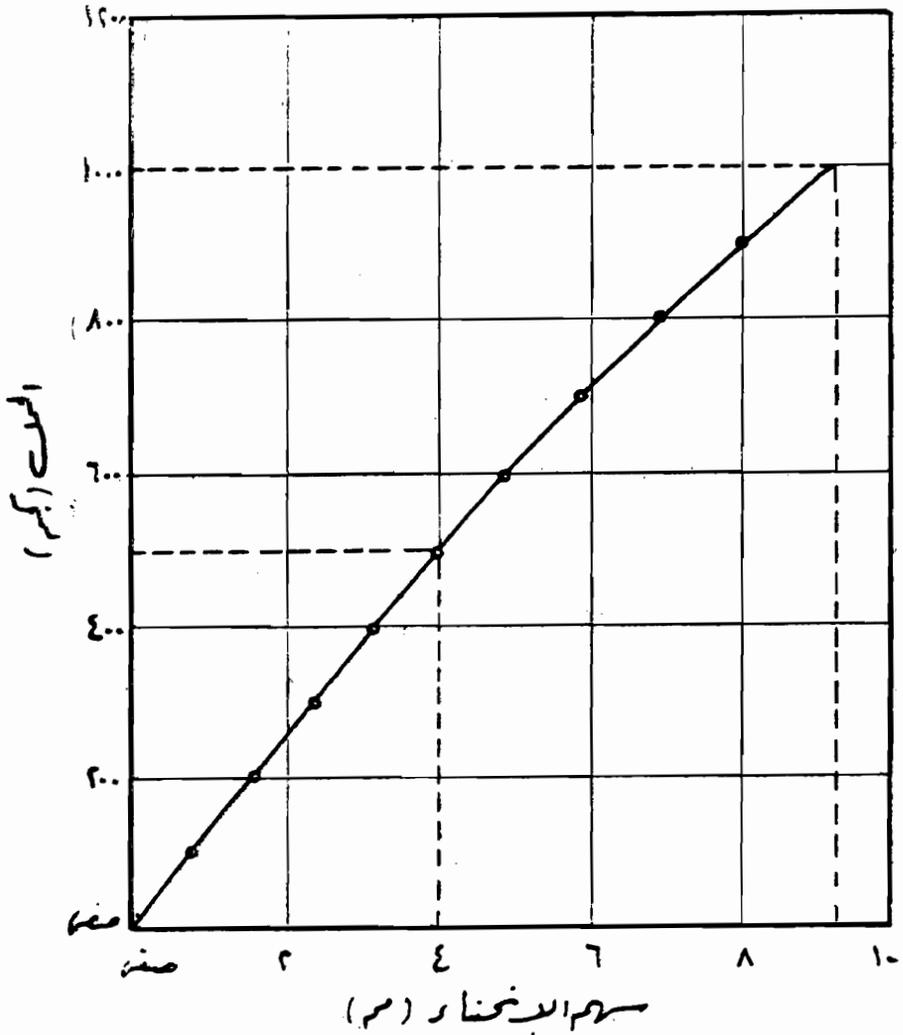
عند اختبار كرة من الحديد الزهر الرمادي في الانحناء بحمل مركزى في منتصف البحر كانت قراءة الحمل وسهم الانحناء عند منتصف الكرة المناظر له كما يلي :

الحمل (p) (كجم)	صفر	١٠٠	٢٠٠	٣٠٠	٤٠٠	٥٠٠	٦٠٠	٧٠٠	٨٠٠	٩٠٠	١٠٠٠
سهم الانحناء (Δ) (مم)	صفر	٠,٨	١,٦	٢,٤	٣,٢	٤,٩	٥,٩	٦,٩	٧,٩	٨,١	الكسر

فإذا كانت أبعاد مقطع الكرة هي ٢٨ مم × ٤٧ مم وبجرها ٩٠ سم فالمطلوب رسم منحنى الحمل وسهم الانحناء وتعيين الخواص الميكانيكية للمنطقة للحديد الزهر .  
الحل :

شكل رقم (٦-٣٩) يبين العلاقة البيانية بين الحمل وسهم الانحناء لكرة الحديد الزهر المختبرة ، ومنه يمكن تحديد ما يلي :

حمل حد التناسب (P<sub>p1</sub>) = ٥٠٠ كجم



شكل رقم (٦ - ٣٩) العلاقة بين الحمل وسهم الانحناء لمعدب الزهر

سهم الانحناء عند التناسب  $(\Delta_{p1}) = 4$  مم

الحمل الأقصى  $(P_{max}) = 1000$  كجم

سهم الانحناء عند الكسر  $(\Delta_{max}) = 9,2$  مم

وحيث أن:  $b = 28$  mm ,  $d = 47$  mm و  $l = 900$  mm

$$\therefore y = \frac{47}{2} = 23.5 \text{ mm}$$

$$I = \frac{28 \cdot (47)^3}{12} = 241500 \text{ mm}^4$$

وعلى ذلك يمكن تعيين الخواص الميكانيكية في الانحناء للحديد الزهر كما يلي :

(١) اجهاد حد التناسب ( $f_{pl}$ ) :

$$f_{pl} = M_{pl} \cdot \frac{y}{I} = \frac{P_{pl} l}{4} \cdot \frac{y}{I}$$

$$= \frac{500 \times 900}{4} \times \frac{23.5}{241500} = 10.9 \text{ Kg/mm}^2$$

(ب) معايير الكسر في الانحناء ( $f_b$ ) :

$$f_b = M_{\max} \cdot \frac{y}{I} = \frac{P_{\max} l}{4} \cdot \frac{y}{I}$$

$$= \frac{1000 \times 900}{4} \times \frac{23.5}{241500} = 21.8 \text{ Kg/mm}^2$$

(ج) معايير المرونة ( $f_b$ ) :

$$E = \frac{P}{\Delta} \cdot \frac{l^3}{48I} = \frac{100}{0.8} \cdot \frac{(900)^3}{48 \times 241500} = 7.85 \times 10^3 \text{ Kg/mm}^2$$

(د) معايير الرجوعية :

$$\text{Modulus of Resilience} = \frac{P_{pl} \Delta_{pl}}{2} / b \cdot d \cdot l$$

$$= \frac{500 \times 4}{2} / 28 \times 47 \times 900 = 8.5 \times 10^{-4} \text{ Kg/mm}^2$$

(هـ) معايير التناثر :

$$\text{Modulus of Toughness} = \frac{2}{3} P_{\max} \cdot \Delta_{\max} / b \cdot d \cdot l$$

$$= \frac{2}{3} \times 1000 \times 9 \cdot 3 / 28 \times 47 \times 900$$

$$= 5.23 \times 10^{-3} \text{ Kg/mm}^2$$

التالفة :

١ - لماذا يعتبر إختبار الانحناء الكرى إختبار قبول للحديد الزهر ؟

٢ - ما هي الاحتياطات الواجب اتخاذها عند إجراء إختبار الانحناء الكرى

التالفة : وضح إجابتك بالرسومات .

٣ - عين معيار الكسر للحديد الزهر المختبر باستخدام قيمة حمل الكسر المعين من إختبار الانحناء الكرى .

٤ - هل يمكن اعتبار أن معيار الكسر هو المقاومة القصوى للبعادن تحت تأثير حمل الانحناء ؟ لماذا ؟

٥ - احسب معيار المرونة في الانحناء من واقع البيانات العملية لاختبار الانحناء الكرى للحديد الزهر .

٦ - ما هي الخاصية التي تعبر عنها قيمة سهم الانحناء القصوى للبكرة المختبرة عند إنهارها ؟ اشرح لماذا ؟

٧ - كيف يمكن تعيين معيار الرجوعية ومعيار المتانة للبعادن في الانحناء ؟ احسب قيمة كل منهما للحديد الزهر المختبر في الانحناء الكرى .

٨ - قارن بين نتائج اختبار الانحناء الكرى للحديد الزهر واشتراطات المواصفات القياسية للحديد الزهر م.ق.م - ١ - ١٩٦٠ ؟ وهل يعتبر الحديد الزهر المختبر مقبولاً ؟

٩ - ارسم تخطيطاً لعينة الحديد الزهر بعد إنهارها باختبار الانحناء الكرى و اشرح سبب ذلك الانهار .

١٠ - هل يمكن إجراء اختبار الانحناء الكرى للمواد المطوية ؟ اشرح سبب ذلك .

## تمرين رقم (١١)

اختبار التني على البارد لعينة من الصلب الطرى

١ - المجال :

يهدف هذا الاختبار إلى دراسة مطولية الصلب الطرى تحت تأثير التني على البارد وملاحظة شكله وحالته بعد إجراء ذلك الاختبار .

٢ - عينة الاختبار :

يمكن إجراء هذا الاختبار على قطع ذات طول مناسب من أسياخ أو ألواح أو أسلاك الصلب الطرى .

٣ - ادوات الاختبار :

يحتاج الاختبار إلى مكنة الاختبار العامة لاختبار الأسياخ أو الألواح. أما في حالة: اختبار الأسلاك فتستخدم منجلة خاصة بذلك .

٤ - طريقة إجراء الاختبار :

أولاً : في حالة الأسياخ أو الألواح :

تثنى قطعة الاختبار حتى يتوازي طرفاها حول قطعة اسطوانية نصف قطرها (R)

بحيث يكون :  $D \leq 2.5 \text{ cm}$  في حالة  $R = D$

$D \geq 5.2 \text{ cm}$  في حالة  $R = 1\frac{1}{2} D$

حيث (D) هو قطر قطعة الاختبار .

ويلاحظ أنه في حالة الألواح يحمل سمك اللوح محل (D) في الاشتراطات السابقة.

كما يلاحظ أنه يجب عمل استدارة بسيطة بأركان مقطع قطعة اللوح وبكامل طولها قبل اختبارها لتضادى تأثير تركيز الإجهاد عند هذه الأركان على نتائج الاختبار .

ثانياً : في حالة الألواح الرقيقة :

في هذه الحالة تثنى شرائح من هذه الألواح على نفسها .

ثالثاً : في حالة الاسلاك :

تثبت قطعة السلك في المنجاة وتشد شداً بسيطاً وتثنى جانبياً  $90^\circ$  ثم جانبياً في الاتجاه المعاكس  $180^\circ$  وبعد ذلك جانبياً في الاتجاه الأول  $90^\circ$  — أى يثنى السلك دورتين كاملتين .

وقد يستمر ثني قطعة السلك حتى تنكسر مع تسجيل عدد دورات الثني اللازمة وذلك بغرض مقارنة مطولية قطعتين من السلك حيث يزداد عدد دورات الثني حتى الكسر بزيادة مطولية السلك .

#### ٥ — النتائج :

تفحص قطعة الاختبار بعد ثنيها لمعرفة تواجد الشروخ من عدمه ، وقبل العينات في هذا الاختبار إذا لم تنكسر أو يحدث بها شروخ بعد الثني .

#### ٦ — المناقشة :

١ — ما هو الغرض من إجراء اختبار الثني على البارد للمعادن ؟ وهل يمكن إجراؤه لجميع المعادن ؟ لماذا ؟

٢ — هل يعتبر هذا الاختبار اختباراً كيمياً أو اختباراً وصفيًا لقياس قدرة المعادن للتشكيل أثناء عمليات الثني ؟

٣ — اشرح كيف يمكن إجراء اختبار الثني على البارد للقضبان مستديرة المقطع المستعرض وذات المقطع المستعرض المستطيل الشكل وضح إجابتك بالرسومات .

٤ — كيف يمكن استخدام مكناث الاختبار العامة لإجراء اختبار الثني على البارد ؟ وضح إجابتك بالرسومات .

٥ — اشرح كيف يمكن إجراء اختبار الثني على البارد على الرقائق ( الألواح الرقيقة ) وضح إجابتك بالرسومات .

٦ — ماهي الاحتياطات الواجب اتخاذها عند إجراء اختبار الثني على البارد على عينات المعادن ؟ لماذا ؟

٧ - كيف يجرى اختبار الثني على البارد لعينة من السلك الصلب ؟ ارسم تخطيطياً مكنة الاختبار الخاصة بذلك : وهل يمكن استخدام هذه المكنة لاختبار الثني على البارد للألواح الرقيقة من المعادن ؟

٨ - ارسم تخطيطياً الحالات المختلفة للشروخ المنتظر حدوثها للعينات مستديرة المقطع إذا حدث لها انهيار باختبار الثني على البارد . وضح إجابتك بالرسومات .