# Structural Steel Design-2

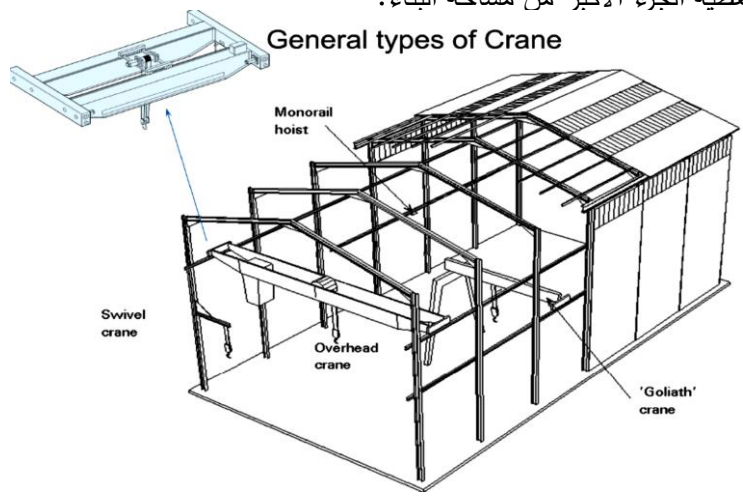
Prof. Mohammad Al-Samara

LECTURE # 9

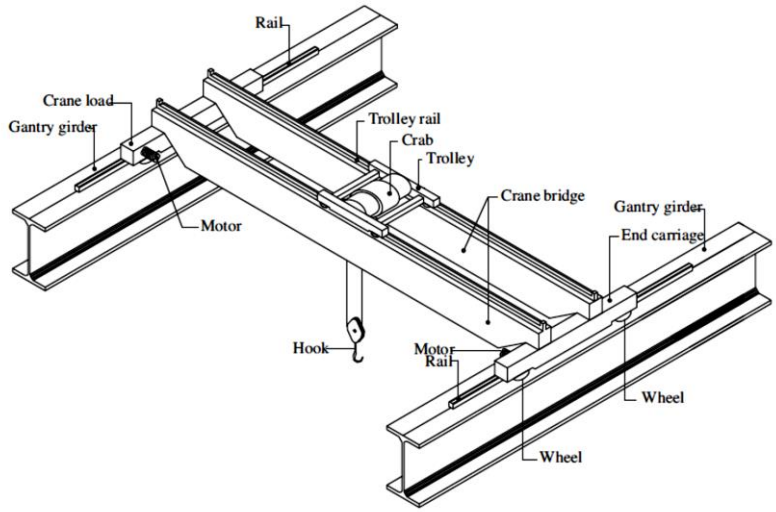
## الجائز الحامل للرافعة
## Crane Girder

**مقدمـة**

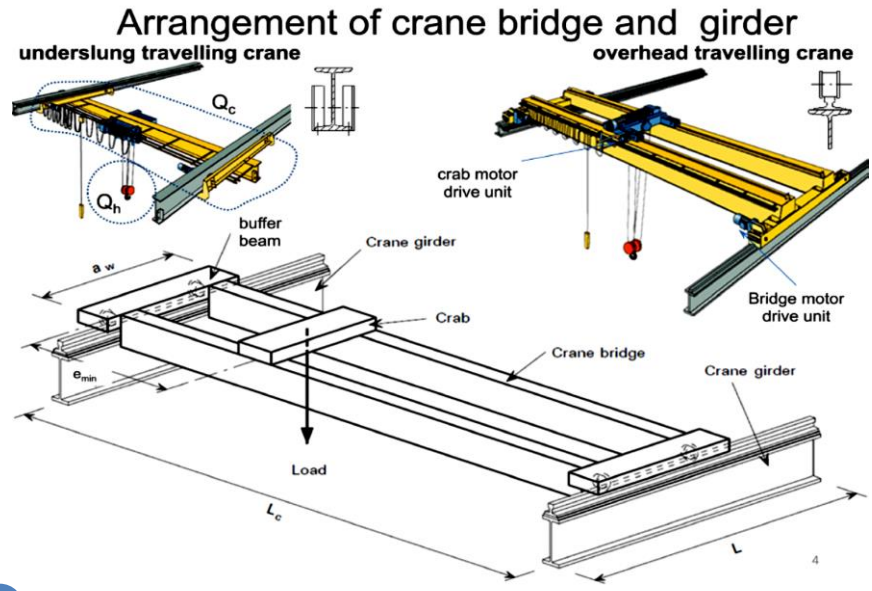
تحتوي الأبنية الصناعية عادةً على خطوط إنتاج تتطلب رفع وتحريك أحمال ثقيلة أثناء العمليات التصنيعية أو الصيانة، وتعد الروافع الجسرية الوسيلة الأفضل للقيام بذلك مغطية الجزء الأكبر من مساحة البناء.



تستند هذه الروافع على أربعة دواليب تتحرك على سكة

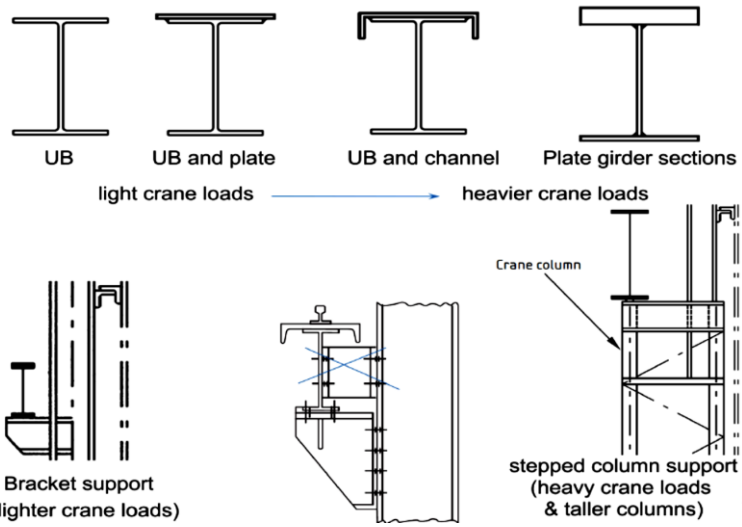




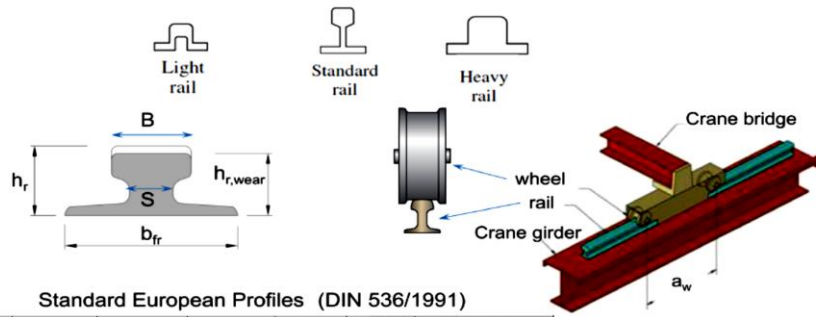
تتحرك الرافعة على سكة محمولة على جائز كالمبين في الشكل يدعى بالجائز الحامل للرافعة، كما يُبينه الشكل

## Typical sections adopted for crane girders





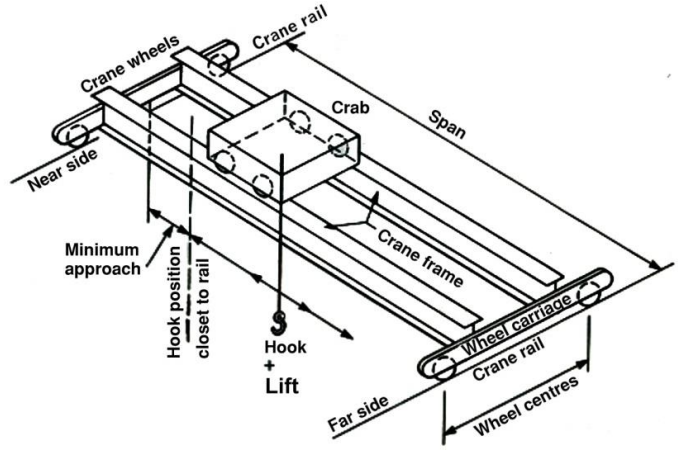

## Crane Rails




Standard European Profiles (DIN 536/1991)

| Profile | A ($cm^2$) | $I_r$ ($cm^4$) | Weight kg/m | Base $b_{fr}$ mm | Height $h_r$ mm | Head B mm | Web S mm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A45 | 28.2 | 90.0 | 22.1 | 125 | 55 | 45 | 24 |
| A55 | 40.5 | 178.0 | 31.8 | 150 | 65 | 55 | 31 |
| A65 | 54.9 | 319.0 | 43.1 | 175 | 75 | 65 | 38 |
| A75 | 71.6 | 531.0 | 56.2 | 200 | 85 | 75 | 45 |
| A100 | 94.7 | 856.0 | 74.3 | 200 | 95 | 100 | 60 |
| A120 | 127.4 | 1361.0 | 100.0 | 220 | 105 | 120 | 72 |
| A150 | 191.4 | 4373.0 | 150.3 | 220 | 150 | 150 | 80 |

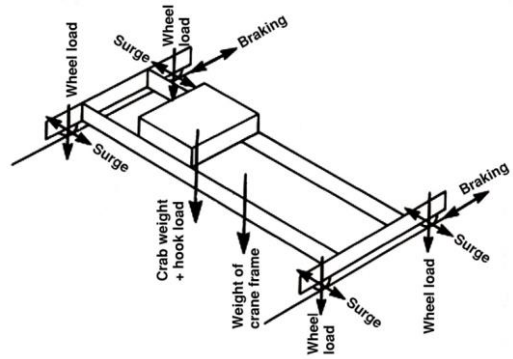
يتم حساب حمل الدولاب الواحد من خلال المعطيات التي يقدمها مصنّعي الروافع عن وزن كل جزء منها مع الانتباه إلى أن العربة والخطاف يمكن أن يتحركا على طول إطار الرافعة حتى يصلا إلى مسافة دنيا من الجائز الحامل للرافعة تسمى مسافة الاقتراب الأدنى






**أحمال الجائز الحامل للرافعة:**

❖ بناءً على مسافة الاقتراب الأدنى يتم حساب حمل الدولابين القريبين إلى الجائز الحامل للرافعة إضافة إلى وزن إطار الرافعة الذي يقسم بالتساوي على أربعة دواليب.




❖ يُصعد حمل الدولاب الواحد بـ 25% لأخذ الأثر الديناميكي الناتج عن حركة الرافعة بالحسبان وذلك للرافعات الصغيرة والمتوسطة، أما في حالة الرافعات العملاقة لا بد من العودة إلى المواصفات البريطانية BS 2573 part 1.

❖ هناك حملين أفقيين يُنقَلان عبر السكة إلى الجائز:

- الأول حمل جانبي متعامد مع السكة ينتج عن حركة وفرملة العربة على طول إطار الرافعة ويقدر بـ 10% من وزن العربة وحمل الخطاف ( BS EN1991-3:2006)، ويقسم عادة على أربعة دواليب ويؤثر في أي من الاتجاهين؛
- أما الحمل الأفقي الثاني فينتج عن فرملة الرافعة ككل ويُطبَّق على طول السكة ويقدر بـ 5% من حمل الدواليب ويكون أعظمياً عندما يكون حمل الدواليب أعظمياً،

❖ إضافة إلى كل هذه الأحمال يجب أن لا ننسى الوزن الذاتي للجائز الحامل للرافعة ذاته



عند تصميم جائز حامل لرافعة ما وفقاً للحالة الحدية القصوى يجب تحقيق تركيبي الأحمال الآتيين:

❖ عند حصول معظم الأحمال غير المرغوبة

$$\sum_j \gamma_{G,j}\, G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \qquad (9\text{-}1)$$

❖ عند حصول كل الأحمال غير المرغوبة

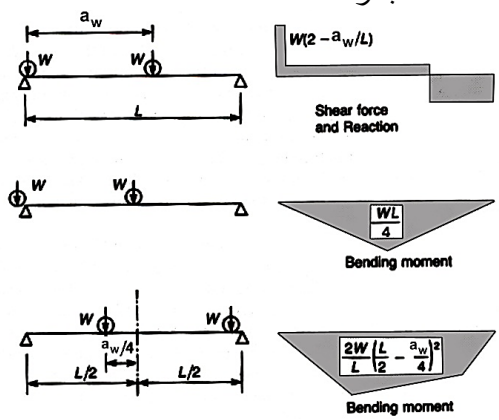
$$\sum_j \gamma_{G,j}\, G_{k,j} + 0.9 \sum_{i\geq 1} \gamma_{Q,i} Q_{k,i} \qquad (9\text{-}2)$$

حيث $G_{k,j}$ تمثل الأحمال الميتة (وزن الجائز الحامل للرافعة)
$Q_{k,i}$ تمثل الأحمال الحية (المتحركة)

يؤخذ عامل الأمان على الأحمال الميتة $\gamma_{G,j}$ مساوياً 1.35 ويؤخذ عامل الأمان على الأحمال الحية $\gamma_{Q,i}$ مساوياً 1.5.

## آثار الحمل الأعظمي Maximum load effects

يتغير عزم الانعطاف وقوة القص الناتجين عن حملي الدولابين في الجائز الحامل للرافعة بتغير موقع الدولابين على طول الجائز، ففي الجائز ذي الاستناد البسيط يحصل القص الأعظمي بجانب المسند مباشرةً، أما عزم الانعطاف الأعظمي يحصل بالقرب من منتصف الجائز






إذاً:

قوة القص العظمى $F_{\max} = W(2 - a_w / L)$

عزم الانعطاف الأعظمي $M_{\max} = W\,L/4$

أو $M_{\max} = 2W\,(L/2 - a_w/4)^2 / L$

رد الفعل الأعظمي $R_{\max} = W(2 - a_w / L)$

## تصميم الجائز الحامل للرافعة

يتم تصميم الجائز الحامل للرافعة كعنصر خاضع للانعطاف مع الأخذ بالحسبان النقاط التالية:

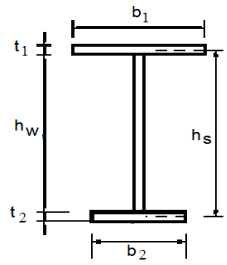
* تُعد الأحمال المطبقة مساعدة في عدم الاستقرار.
* تُحسب الخصائص الهندسي لمقطع الجائز كما يلي:

$A = \sum b_i\, t_i + h_w\, t_w$ مساحة مقطع الجائز $A$

$I_t = (\sum b_i\, t_i^3 + h_w\, t_w^3)/3$ ثابت فتل المقطع $I_t$

$b_i$ , $t_i$ عرض وسماكة صفيحة الجناحين $i$

$h_w$ , $t_w$ ارتفاع وسماكة جسد المقطع.






* يتم حساب الضغط المحلي على جسد المقطع تحت دولاب الرافعة بتوزيع حمل الدولاب بزاوية 45° عبر السكة وجناح المقطع، فيحدد طول التحميل بالعلاقة التالية:

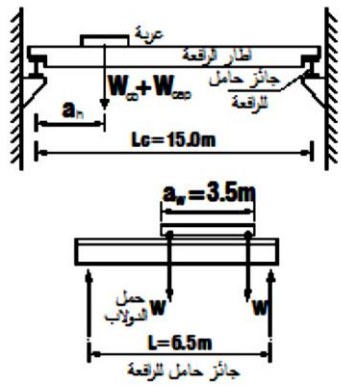
$x_R = 2(H_R + T)$

حيث: $H_R$ ارتفاع السكة و $T$ سماكة جناح الجائز.

* تحسب مقاومة تحنيب القص دون استخدام فعل حقل الشد.
* عند استخدام اللحام في تصنيع الجائز الحامل للرافعة يجب أن يكون اللحام مستمراً على كامل طول العناصر الملحومة.

**مثال 1-9**

صمم جائزاً حاملاً للرافعة مجازة 6.5m من فولاذ ماركته S275 مستخدماً مقطعاً قياسياً UB مع صفيحة ملحومة إلى جناحه العلوي، بحيث يستطيع حمل رافعة جسرية متوسطة الاستطاعة مواصفاتها كمايلي:




مجاز الرافعة $L_c = 15.0m$

المسافة بين دولابيها $a_w = 3.5m$

مسافة الاقتراب الأدنى $a_h = 0.7m$

وزن إطار الرافعة $W_c = 200\,kN$

وزن العربة $W_{cb} = 40\,kN$

حمل الخطاف $W_{cap} = 120\,kN$

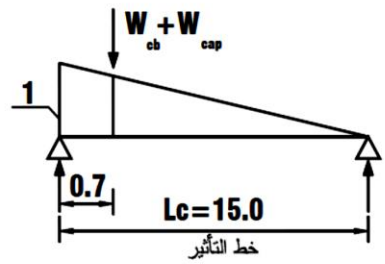
المعامل الديناميكي يساوي 1.25



الحل:

1) حساب أحمال الدولاب الواحد

• الأحمال الحية الشاقولية: بالعودة إلى خط التأثير المبين أدناه نجد:




– الحمل الناتج عن الخطاف

$$W_1 = 120(15-0.7)/(15\,x\,2) = 57.2\,kN$$

- الحمل الناتج عن وزن العربة

$$W_2 = 40(15-0.7)/(15\,\text{x}\,2) = 19\ kN$$

- الحمل الناتج عن وزن إطار الرافعة

$$W_3 = 200/4 = 50\ kN$$

- مجموع الأحمال الشاقولية العظمى على الدولاب

$$W_4 = W_1 + W_2 + W_3 = 126 kN$$

- حمل الدولاب مصعّداً بالمعامل الديناميكي وبعامل الأمان

$$\gamma_{Q,j} = 1.5$$

$$W_v = 1.25 \times 1.5 \times 126 = 236.25\ kN$$



• الأحمال الحية الأفقية:

- الحمل المتعامد مع السكة ويساوي 10 % من حمل الخطاف ووزن العربة مقسوماً على عدد الدواليب مصعّداً بعامل أمان $\gamma_{Q,j} = 1.5$

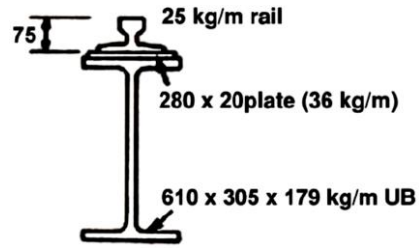
$$W_{h1} = 1.5 \times 0.1(120+40)/4 = 6.0\ kN$$

- الحمل الموازي للسكة ويساوي 5 % من حمل الدولاب الشاقولي الأعظمي $(W_4)$ مصعّداً بعامل أمان $\gamma_{Q,j} = 1.5$

$$W_{h2} = 0.05\,\text{x}1.5\,\text{x}\,126 = 9.45\ \ kN \text{ per wheel}$$

2) اختيار مقطع الجائز الحامل للرافعة

سنجرب مقطعاً قياسياً UB 610x305x179 مع صفيحة تقوية $280\,x20\,mm$ على طول الجناح العلوي كما هو مبين في الشكل أدناه. تستخدم هذه الصفيحة لتقوي الجناح العلوي الذي سيتحمل مع صفيحة التقوية القوى الأفقية المتعامدة مع السكة.






يحسب الوزن الميت للجائز بإضافة وزن صفيحة التقوية $(0.36\,kN/m)$ ووزن السكة ( $0.25\,kN/m$ فرضاً) إلى الوزن الذاتي للمقطع القياسي فينتج بعد الضرب بعامل أمان $\gamma_{G,1} = 1.35$:

$$W_d = 1.35\,x\,(1.79+0.36+0.25)\,x\,6.5 = 21.06\ \ kN$$

• عزم الانعطاف الأعظمي الناتج عن الأحمال الشاقولية

– عزم الانعطاف الناتج عن أحمال الدولابين عندما يُطبَّقان دون أحمال أفقية

إما $M_1 = W_v L/4 = 236.25 \times 6.5/4 = 283.9 \quad kN\,m$

أو $M_2 = 2W_v\,(L/2 - a_w/4)^2/L$

$= 2 \times 236.25\,(6.5/2 - 3.5/4)^2/6.5 = 410 \quad kN\,m$

– عزم الانعطاف الناتج عن الوزن الذاتي للجائز وعن أحمال الدولابين الشاقوليين

$M_v = M_2 + W_d\,L/8 = 410 + 21.06 \times 6.5/8 = 427 \quad kN\,m$



• عزم الانعطاف الأعظمي الناتج عن الأحمال الأفقية

إما $M_3 = W_{h1}\,L/4 = 6.0 \times 6.5/4 = 9.75 \quad kN\,m$

أو $M_4 = 2W_{h1}\,(L/2 - a_w/4)^2/L$

$= 2 \times 6.0(6.5/2 - 3.5/4)^2/6.5 = 10.4 \quad kN\,m$

إذاً $M_h = M_4 = 10.4\,kNm$

• القص الشاقولي الأعظمي الناتج عن الأحمال الشاقولية

– القص الشاقولي الأعظمي الناتج عن الدولابين

$$F_{v1} = W_v(2 - a_w / L) = 236.25(2 - 3.5/6.5) = 345.3 \quad kN$$

– القص الشاقولي الأعظمي الناتج عن الوزن الذاتي وعن أحمال الدولابين

$$F_v = F_{v1} + W_d / 2 = 345.3 + 21.06/2 = 355.8 \quad kN$$

• القص الأعظمي الناتج عن الأحمال الأفقية

$$F_h = W_{h1}(2 - a_w / L) = 6(2 - 3.5/6.5) = 8.5 \quad kN$$



4) خصائص المقطع المجمع

– خصائص المقطع القياسي المستخدم 610x305x179 UB هي

$$h = 620.2\,mm,\ b = 307.1\,mm,\ t_w = 14.1mm,$$

$$t_f = 23.6mm,\ r = 16.5mm,\ d = 540mm,$$

$$A_B = 228cm^2,\ I_{yB} = 153000\,cm^4$$

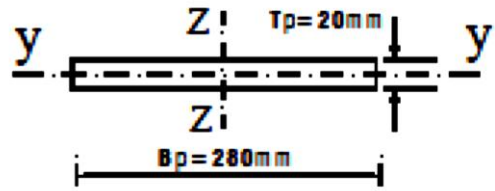
$$I_{zB} = 11410\,cm^4, i_y = 25.9\,cm,\ i_z = 7.07\,cm,$$

$$c_f / t_f = 5.51,\ c_w / t_w = 38.3$$

$$W_{el,yB} = 4935\,cm^3,\ W_{el,zB} = 743\,cm^3,\ W_{pl,yB} = 5547\,cm^3,$$

$$W_{pl,zB} = 1144\,cm^3,\ I_{wB} = 10.2\times10^6\,cm^6,\ I_{tB} = 340cm^4$$

- خصائص صفيحة التقوية




$$A_P = 280 \text{ x } 20 \text{ x } 10^{-2} = 56\, cm^2$$

$$I_{yp} = 280 \text{ x } 20^3 \text{ x } 10^{-4} / 12 = 18.7\, cm^4$$

$$I_{zp} = 20 \text{ x } 280^3 \text{ x } 10^{-4} / 12 = 3658.7\, cm^4$$

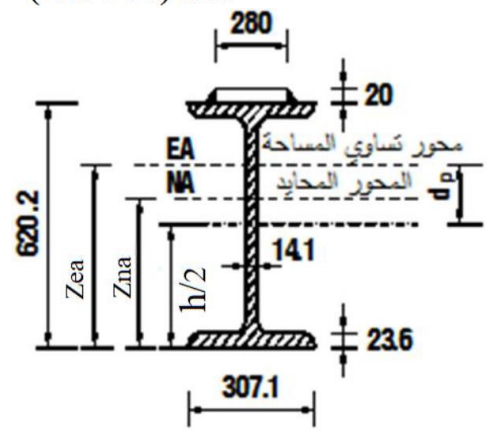


- يحدد بعد المحور المحايد عن الجناح السفلي كما يلي:

$$z_{na}(A_B + A_p) = A_B\, h/2 + A_p(h + T_p/2)$$

$$z_{na} = \frac{228 \text{ x } 10^2 \text{ x } 620.2 \text{ x } 0.5 + 56 \text{ x } 10^2 (620.2 + 20 \text{ x } 0.5)}{(228 + 56) \text{ x } 10^2}$$

$$= 373.3\, mm$$



- ومنه تحسب المسافة بين مركز ثقل المقطع القياسي والمحور المحايد

$$d_e = z_{na} - h/2 = 373.3 - 620.2 \text{ x } 0.5 = 63.2\, mm$$

- يحدد بعد محور تساوي المساحة $d_p$ عن مركز ثقل المقطع القياسي كما يلي:

$$A_B/2 + t_w d_p = A_B/2 - t_w d_p + A_p \Rightarrow$$

$$d_p = A_p / 2t_w = 56 \text{ x } 10^2 / 2 \text{ x } 14.1 = 198.6\, mm$$

- ومنه يحدد بعد محور تساوي المساحة عن الجناح السفلي

$$z_{ea} = d_p + h/2 = 198.6 + 620.2 \text{ x } 0.5 = 508.7\, mm$$



- معامل المقطع اللدن حول محور تساوي المساحة

$$W_{pl,y} = W_{pl,yB} + t_w d_p^2 + A_p(h/2 + T_p/2 - d_p)$$

$$= 5547 \text{ x } 10^3 + 14.1 \text{ x } 198.6^2 +$$

$$56 \text{ x } 100\,(620.2 \text{ x } 0.5 + 20 \text{ x } 0.5 - 198.6) = 6783\ cm^3$$

- معامل الجناح العلوي اللدن حول محوره الشاقولي

$$W_{pl,zf} = (23.6 \text{ x } 307.1^2/4 + 20 \text{ x } 280^2/4) \text{ x } 10^{-3} = 948\ cm^3$$

- عزم عطالة المقطع المجمع ومعامله المرن حول المحور المحايد

$$I_y = I_{yB} + A_B\, d_e^2 + I_{yp} + A_p(h + T_p/2 - z_{na})^2$$

$$I_y = 153000 \text{ x } 10^4 + 228 \text{ x } 10^2 \text{ x } 63.2^2 + 18.7 \text{ x } 10^4$$

$$+ 56 \text{ x } 10^2 \text{ x } (620.2 + 20 \text{ x } 0.5 - 373.3)^2 = 199084\, cm^4$$

$$W_{el,y\,Bottom} = I_y / y_{na} = 199084/37.33 = 5333\ cm^3$$

$$W_{el,y\,Top} = I_y/(h + 20 - y_{na}) = 199084/26.69 = 7459\ cm^3$$

- عزم عطالة المقطع المجمع ونصف قطر عطالته حول محور شاقولي مار بمركز ثقله (المحور z)

$$I_z = I_{zB} + I_{zp} = 11410 + 3658.7 = 15068.7\ cm^4$$

$$i_z = \sqrt{I_z / A} = \sqrt{15068.7 / (228 + 56)} = 7.28\ cm$$

- عزم عطالة الجناح السفلي حول المحور الشاقولي ذاته

$$I_{z.tf} = 23.6 \text{ x } 307.1^3 / (12 \text{ x } 10^4) = 5690\ cm^3$$

- عزم عطالة الجناح العلوي ومعامل مقطعه المرن حول المحور الشاقولي ذاته

$$I_{z.cf} = I_{tf} + 20 \text{ x } 280^3 / (12 \text{ x } 10^4) = 9350\ cm^3$$

$$W_{el.zcf} = 2I_{z.cf} / b = 2 \text{ x } 9350 / 30.71 = 609\ cm^3$$



## ملخص العزوم وقوى القص العظمى

عزم الانعطاف الناتج عن الوزن الذاتي للجائز وعن أحمال الدولابين الشاقوليين

$$M_v = 427 \quad kN\ m$$

عزم الانعطاف الأعظمي الناتج عن الأحمال الأفقية

$$M_h = 10.4\ kNm$$

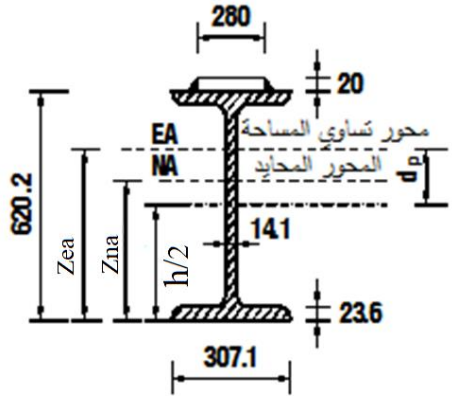
القص الشاقولي الأعظمي الناتج عن الوزن الذاتي للجائز وعن أحمال الدولابين

$$F_v = 355.8 \quad kN$$

القص الأعظمي الناتج عن الأحمال الأفقية

$$F_h = 8.5 \quad kN$$

## ملخص خصائص المقطع المجمع




$z_{na} = 373.3\ mm$

$d_e = 63.2mm$

$d_p = 198.6\ mm$

$z_{ea} = 508.7\ mm$

$W_{pl,y} = 6783\ cm^3$ معامل المقطع اللدن حول محور تساوي المساحة

$W_{pl,zf} = 948\ cm^3$ معامل الجناح العلوي اللدن حول محوره الشاقولي



عزم عطالة المقطع المجمع ومعامله المرن حول المحور المحايد

$I_y = 199084\ cm^4$

$W_{el,yBottom} = I_y/y_{na} = 5333\ cm^3$

$W_{el,yTop} = I_y/(h + 20 - y_{na}) = 7459\ cm^3$

عزم عطالة المقطع المجمع ونصف قطر عطالته حول محوره الشاقولي (المحور z)

$I_z = I_{zB} + I_{zp} = 15068.7\ cm^4$

$i_z = \sqrt{I_z/A} = 7.28\ cm$

عزم عطالة الجناح السفلي حول المحور الشاقولي Z

$I_{z,tf} = 5690\ cm^4$

عزم عطالة الجناح العلوي ومعامل مقطعه المرن حول المحور الشاقولي Z

$I_{z,cf} = 9350\ cm^4$

$W_{el,zcf} = 2I_{z,cf}/b = 609\ cm^3$

5) تصنيف المقطع

- بما أن $16 < t_w = 23.6\ mm \leq 40$ فإن $f_y = 265\ n/mm^2$

$$\varepsilon = (235/265)^{1/2} = 0.94$$

- المقطع من الصنف 1 لأن:

$$c_f / t_f = 5.51 < 9\varepsilon = 8.46$$

$$c_w / t_w = 38.3 < 72\varepsilon = 67.68$$

$$b / T_p = 280 / 20 = 14 < 33\varepsilon = 31 \qquad \text{لصفيحة التقوية}$$



6) تحقيق طاقة تحمل القص

- القص الشاقولي

$$V_{Ed,max} = F_v = 355.8\ kN$$

$$A_v = A_B - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$$

$$A_v = 22800 - 2 \times 307.1 \times 23.6 + (14.1 + 2 \times 16.5) \times 23.6 = 9416.4\ mm^2$$

$$V_{pl,Rd} = A_v \frac{f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 9416.4 \frac{265/\sqrt{3}}{1.0} \times 10^{-3} = 1440.7\ kN$$

$$V_{pl,Rd} = 1440.7\ kN > V_{Ed} = 355.8\ kN \qquad ok$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = 0.24 < 0.5 \Rightarrow low\ shear$$

- لا حاجة لتحقيق تحنيب القص لأن

$$\frac{h_w}{t_w} \le 72\frac{\epsilon}{\eta} \quad for\ unstiffened\ webs$$

$h_w = h - 2t_f = 620.2 - (2\times 23.6) = 573.0 mm$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{573.0}{14.1} = 40.6 < 72\frac{\epsilon}{\eta} = 72 \times \frac{0.94}{1.0} = 67.8 \quad ok$$

- القص الأفقي

$$A_{vh} = bt_f + A_p = 307.1 \times 23.6 + 5600$$
$$= 12847\ mm^2$$

$$V_{pl,Rdh} = A_v \frac{f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 12847 \frac{265/\sqrt{3}}{1.0} \times 10^{-3}$$
$$= 1965\ kN$$

$$V_{pl,Rdh} = 1965\ kN > V_{Edh} = F_h = 8.5\ kN \quad ok$$



7) تحقيق طاقة تحمل العزم

- تحقيق العزم الشاقولي وبما أن المقطع من الصنف 1 فإن:

$$M_{c,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{c,y,Rd} = \frac{6783 \times 10^3 \times 265}{1.0} \times 10^{-6} = 1797.5\ kNm$$

$$M_{c,y,Rd} = 1797.5\ kNm > M_{y,Ed} = M_v = 427\ kNm$$

- تحقيق العزم الأفقي (يتم تحميل العزم الأفقي للجناح العلوي فقط)

$$M_{c,z,Rdf} = \frac{W_{pl,zf} f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{c,z,Rdf} = \frac{948 \times 10^3 \times 265}{1.0} \times 10^{-6} = 251\ kNm$$

$$M_{c,z,Rdf} = 251\ kNm > M_{h,Ed} = M_h = 10.4\ kNm$$

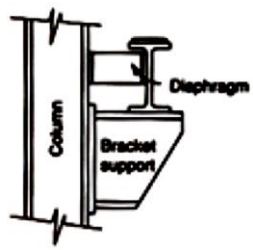
- تحقيق الانعطاف المركب

عندما تكون الأحمال الشاقولية والأفقية مطبقة معاً يتعرض الجناح العلوي إلى انعطاف مركب، لذا يجب تحقيقه وفق علاقة تركيب الأحمال (2-9):

$$M_{v1,ED} = 0.9M_2 + W_d L/8$$
$$M_{v1,ED} = 0.9 \times 410 + 21.06 \times 6.5/8 = 386\ kNm$$
$$M_{h1,ED} = 0.9M_4 = 0.9 \times 10.4 = 9.36\ kNm$$
$$\frac{M_{v1,ED}}{M_{c,y,Rd}} + \frac{M_{h1,ED}}{M_{c,z,Rdf}} = \frac{386}{1797.5} + \frac{9.36}{251} = 0.25 < 1.0\ \ ok$$



8) تحقيق تحنيب الفتل الجانبي:




بما أن الجائز مقيد في موضعه فقط عند مسنديه كما هو مبين في الشكل فإن الجناح العلوي غير مقيد وبالتالي الجناح العلوي والحمل حران في الحركة جانبياً.

إذاً يمكن أن يكون الحمل مساعداً في عدم استقرار الجناح العلوي. كما أن الجناح العلوي حر في الدوران في مستويه. بناءً على ما تقدم نحدد الطول الفعال للجائز كما يلي:

$$L_E = L = 6.5\,m$$

– يحدد العزم المقاوم لتحنيب الفتل الجانبي للجائز وفق العلاقة

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M1}}$$

بما أن مقطع الجائز المجمع متناظر حول المحور الشاقولي فقط والأحمال المطبقة تقع أعلى مركز القص فيعطى العزم الحرج $M_{cr}$ وفقاً للملحق F من الكود الأوروبي DD Env 19931-1-1992 بالعلاقة التالية:

$$M_{cr} = \frac{C_1 \pi^2 E I_z}{(kL)^2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right\}$$



حيث: k و $k_W$ معاملي الطول الفعال

k = 1.0 (جناحي الجائز حرين في الدوران عند مسانده)

$k_W$ = 1.0 (لا يوجد شروط خاصة على لمنع تشوه المقطع warping)

$C_1$, $C_2$, $C_3$ معاملات تعتمد على شروط التحميل وشروط التقييد عند المساند وتؤخذ من الجدول F.1.2 of DD Env 19931-1-1992

$C_1$=1.046, $C_2$=0.43, $C_3$=1.12

$I_w$ معال تشوه المقطع العرضي ويحدد بالعلاقة التالية:

$$I_w = \beta_f (1 - \beta_f) I_z h_s^2$$

$$\beta_f = \frac{I_{z,cf}}{I_{z,cf} + I_{z,tf}} = \frac{9350}{9350 + 5690} = 0.62$$

المسافة بين مركزي قص الجناحين ويحدد ($h_s$ آخذين بالحسبان أن مركز ثقل الجناح العلوي يقع على بعد 22.3 mm من الوجه العلوي للصفيحة المضافة) كما يلي:

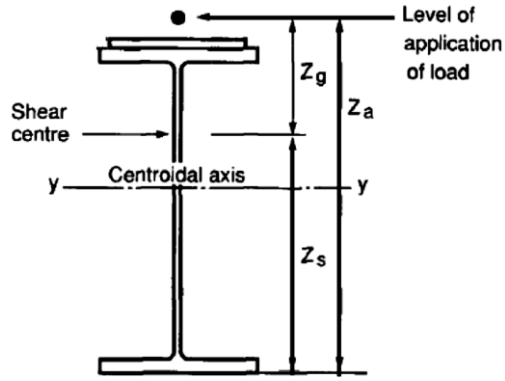
$$h_s \approx h + t_p - 0.5t_f - 22.3$$
$$= 620.2 + 20 - 0.5 \times 23.6 - 22.3$$
$$= 606\ mm$$
$$I_w = 0.62(1 - 0.62) \times 15068.7 \times 60.6^2$$
$$= 13037560\ cm^6$$

$$When\ \beta_f > 0.5 \qquad z_j = 0.4(2\beta_f - 1)h_s$$
$$z_j = 0.4(2\beta_f - 1)h_s = 0.4(2 \times 0.62 - 1) \times 606$$
$$= 58.176\ mm$$



$I_t$ ثابت فتل المقطع العرضي للجائز

$$I_t = \frac{1}{3}(2 \times b_B \times t_f^3 + h_w \times t_w^3 + b_p \times t_p^3)$$
$$I_t = \frac{1}{3}(2 \times 307.1 \times 23.6^3 + 573 \times 14.1^3$$
$$+ 280 \times 20^3) = 3973149\ mm^4$$



$$z_g = z_a - z_s$$

$z_a$ بعد نقطة تطبيق الحمل عن الجناح السفلي كما في الشكل أدناه

$z_a = 620.2 + 20 + \text{Crane rail height } (h_r=75) = 715.2 \text{ mm}$

$z_s$ بعد مركز المقطع العرضي عن الجناح السفلي ويحدد بالغلاقة التالية:

$$z_s = 0.5t_f + \beta_f h_s = 0.5 \times 23.6 + 0.62 \times 606 = 387.5\ mm$$

$z_g = 715.2\text{-}387.5 = 327.7$ mm

$E = 210000$ N/mm$^2$

$G = 80769$ N/mm$^2$



$$M_{cr} = \frac{C_1\pi^2 EI_z}{(kL)^2}\left\{\sqrt{(\frac{k}{k_w})^2\frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - (C_2 z_g - C_3 z_j)\right\}$$

$$\frac{C_1\pi^2 EI_z}{(kL)^2} = \frac{1.046 \times \pi^2 \times 210000 \times 15068.7 \times 10^4}{(1 \times 6500)^2} = 7.72 \times 10^6$$

$$(\frac{k}{k_w})^2\frac{I_w}{I_z} = (\frac{1}{1})^2\frac{13037560 \times 10^6}{15068.7 \times 10^4} = 86521$$

$$\frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} = \frac{(1 \times 6500)^2 \times 80769 \times 3973149}{\pi^2 \times 210000 \times 15068.7 \times 10^4} = 43456$$

$$C_2 z_g - C_3 z_j = 0.43 \times 327.7 - 1.12 \times 58.176$$
$$= 75.75$$

$$M_{cr} = 7.72 \times 10^6 \left\{\sqrt{86521 + 43456 + (75.75)^2} - (75.75)\right\} \times 10^{-6} = 2259\ kNm$$

تُحدد نسبت نحافة الفتل الجانبي اللا بعدية للجائز كما يلي:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{W_y f_y / M_{cr}} = \sqrt{6783 \times 10^3 \times 265 / 2259 \times 10^6} = 0.89$$

باستخدام الكود NA.2.17- NA to BS EN 1993-1-1:2005 يتم

تحديد منحني التحنيب ومعامل العيب $\alpha_{LT}$ كما يلي:

h/b=620.2/307.1=2.02

من أجل مقطع I متناظر حول محور واحد ذي نسبة h/b > 2 يجب

استخدام المنحني d وعلية تُحدد $\alpha_{LT} = 0.76$



$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1.0 \quad and \quad \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2}$$

$$\phi_{LT} = 0.5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

$$\phi_{LT} = 0.5[1 + 0.76(0.89 - 0.4) + 0.75 \times 0.89^2]$$
$$= 0.98$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$
$$= \frac{1}{0.98 + \sqrt{0.98^2 - 0.75 \times 0.89^2}} = 0.63$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$M_{b,Rd} = 0.63 \times \frac{6783 \times 10^3 \times 265}{1.0} \times 10^{-6}$$
$$= 1132\ kNm$$

$$M_{b,Rd} = 1132\ kNm > M_{y,Ed} = M_v = 427\ kNm \quad \text{ok}$$

إذاً الجائز محقق ضد تحنيب الفتل الجانبي في حالة الأحمال الشاقولية دون الأفقية

كذلك الجائز محقق ضد تحنيب الفتل الجانبي في حالة تواجد الأحمال الشاقولية والأفقية معاً ويتضح ذلك بتطبيق العلاقة التالية:

$$\frac{M_{v1,ED}}{M_{b,Rd}} + \frac{M_{h1,ED}}{M_{c,z,Rdf}} = \frac{386}{1132} + \frac{9.36}{251} = 0.38 < 1.0 \ \ ok$$



9) تحقيق تحمّل (دهس) الجسد

يجب تحقيق تحمّل جسد المقطع أيضاً عند نقاط تطبيق الأحمال المركزة أي تحت حمل الدولاب الأعظمي وعند نقطة استناد الجائز وكمثال على ذلك سيتم تحقيق الدهس تحت الدولاب. وستحدد مقاومة الجسد بالأصغر مما يلي:

$$R_{y,Rd} = \frac{s_y t_w f_{yw}}{\gamma_{M1}}$$

$$s_y = 2(h_r + t_f)\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{f,Ed}}{f_{yf}}\right)^2}$$

$h_r = 75$ mm ارتفاع السكة

$t_f = 20 + 23.6 = 43.6$ mm سماكة الجناح العلوي المجمّع

$$\sigma_{f,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{el,f\ Top}} = \frac{427 \times 10^6}{7459 \times 10^3} = 57\ N/mm^2$$

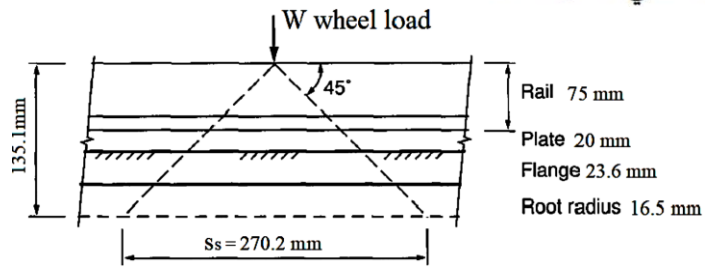
$$s_y = 2(75 + 43.6) \times \sqrt{1 - \left(\frac{57}{265}\right)^2} = 231.6\ mm$$

$$R_{y,Rd} = \frac{s_y t_w f_{yw}}{\gamma_{M1}} = \frac{231.6 \times 14.1 \times 265}{1.0} \times 10^{-3}$$

$$= 865\ kN$$

$$R_{y,Rd} = 865\ kN > F_{v1} = 345.3\ kN \quad ok$$

أو عند عنق الجسد حيث يتم فرض أن حمل الدولاب ينتشر بزاوية 45° كما في الشكل أدناه






$S_s/d = 270.2/540 = 0.5$ but $\leq 0.2 \Longrightarrow$ take $S_s/d = 0.2$

$$R_{a,Rd} = \frac{0.5 t_w^2 (E f_{yw})^{0.5} \left[\left(\frac{t_f}{t_w}\right)^{0.5} + 3\left(\frac{t_w}{t_f}\right)\left(\frac{S_s}{d}\right)\right]}{\gamma_{M1}}$$

$$R_{a,Rd}$$

$$= \frac{0.5 \times 14.1^2 (210000 \times 265)^{0.5} \left[\left(\frac{23.6}{14.1}\right)^{0.5} + 3\left(\frac{14.1}{23.6}\right)(0.2)\right]}{1.0}$$

$$= 1255000\ N = 1255\ kN$$

$$R_{a,Rd} = 1255\ kN > 345.3\ kN \quad ok$$

إذاً تحمل جسد المقطع هو الأصغر أي $R_{y,Rd} = 865\ kN$

وبما أن المقطع يتعرض لعزم انعطاف مع متزامن مع الحمل المركز لابد من تحقيق العلاقة التالية:

$$\frac{F_{y,Ed}}{F_{y,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd}} \leq 1.5$$

$$\frac{345.3}{865} + \frac{427}{1797.5} = 0.63 < 1.5 \quad ok$$



11) تحقيق السهوم

يحدد السهمان الشاقولي والأفقي المسموح بهما الناتجان عن حملي الرافعة الشاقولي والأفقي كما يلي:

السهم الشاقولي $\delta_{v\lim} = L/600 = 6.5 \text{ x } 10^3 / 600 = 10.8\, mm$

السهم الأفقي $\delta_{h\lim} = L/500 = 6.5 \text{ x } 10^3 / 500 = 13\, mm$

* يحدد السهم الشاقولي الناتج عن حمل الرافعة الساكن غير المصعد بتوضيع دولابي الرافعة بشكل متناظر حول منتصف مجاز الجائز بالعلاقة التالية:

$$\delta_{v\max} = \frac{W_{vs}\, L^3}{6\, E\, I_y} \left[ \frac{3}{8} \left( 1 - \frac{a_w}{L} \right) - \left( \frac{L - a_w}{2L} \right)^3 \right]$$

حيث $W_{vs}$ الحمل الشاقولي للدولاب الواحد الساكن دون تصعيد أي:

$$W_{vs} = W_v / (1.5 \times 1.25) = 126 \ kN$$

معامل المرونة $E = 210 \ \ kN/mm^2$

عزم عطالة مقطع الجائز الحامل للرافعة $I_y = 199084 \times 10^4 \ mm^4$

المسافة بين الدولابين $a_w = 3.5 \times 10^3 \ mm$

مجاز الجائز الحامل للرافعة $L = 6.5 \times 10^3 \ mm$

$$\delta_{v\,max} = \frac{126 \times 6.5^3 \times 10^9}{6 \times 210 \times 199084 \times 10^4} \left[ \frac{3}{8}\left(1 - \frac{3.5}{6.5}\right) - \left(\frac{6.5 - 3.5}{2 \times 6.5}\right)^3 \right]$$

$$= 2.2 mm < \delta_{v\,lin} \qquad o.k.$$



- يحدد السهم الأفقي الناتج عن حمل فرملة العربة غير المصعّد بتوضيع دولابي الرافعة حول منتصف مجاز الجائز بالعلاقة التالية:

$$\delta_{h\,max} = \frac{W_{hs} L^3}{6E\, I_{cf}} \left[ \frac{3}{8}\left(1 - \frac{a_w}{L}\right) - \left(\frac{L - a_w}{2L}\right)^3 \right]$$

حيث:

الحمل الأفقي لدولاب واحد $W_{hs} = W_{h1} / 1.5 = 6/1.5 = 4.0 \ kN$

عزم عطالة الجناح العلوي $I_{z,cf} = 9350 \times 10^4 \ mm^4$

$$\delta_{h\,max} = \frac{4 \times 6.5^3 \times 10^9}{6 \times 210 \times 9350 \times 10^4} \left[ \frac{3}{8}\left(1 - \frac{3.5}{6.5}\right) - \left(\frac{6.5 - 3.5}{2 \times 6.5}\right)^3 \right]$$

$$= 1.75 \ mm < \delta_{h\,lim} \qquad o.k.$$

Thank you