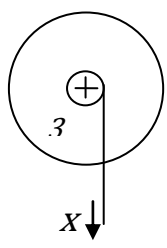


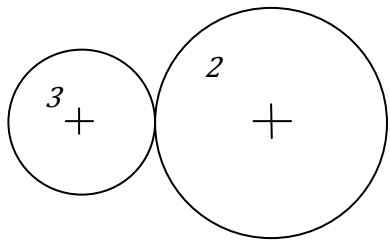
توان موتور:

$$H = T \cdot \omega$$

ω :

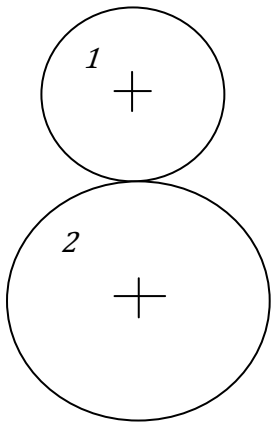


$$r_3 \theta = x \rightarrow r_3 \omega_3 = V \rightarrow \omega_3 = \frac{V}{r_3}$$



$$\frac{\omega_3}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_3} \rightarrow \omega_2 = \omega_3 \frac{R_3}{R_2} \rightarrow \omega_2 = \frac{V}{r_3} \times \frac{R_3}{R_2}$$

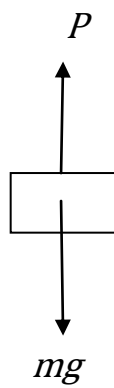
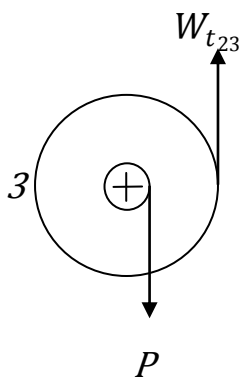




$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_1} \rightarrow \omega_1 = \omega_2 \frac{R_2}{R_1}$$

$$\rightarrow \omega_1 = \frac{V}{r_3} \times \frac{R_3}{\cancel{r_2}} \times \frac{\cancel{R_2}}{R_1}$$

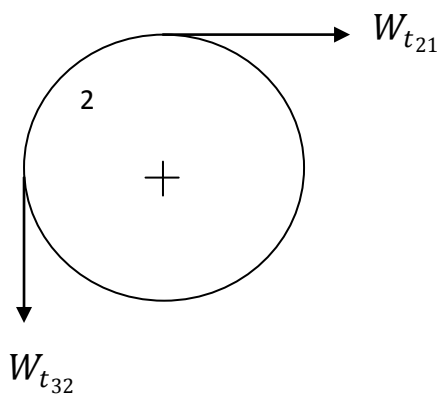
$T:$



$$P = mg$$

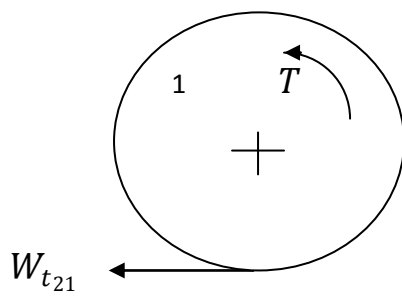
$$\sum M_{O_3} = 0 \rightarrow W_t \times R_3 = P \times r_3$$

$$\rightarrow W_t = mg \times \frac{r_3}{R_3}$$



$$\sum M_{O_2} = 0 \rightarrow W_{t21} \times \cancel{R_2} = W_{t32} \times \cancel{R_2}$$

$$\rightarrow W_{t21} = W_{t32} = mg \frac{r_3}{R_3}$$



$$\sum M_{O_1} = 0 \rightarrow T = W_{t21} \times R_1$$

$$\rightarrow T = mg \frac{r_3}{R_3} R_1$$

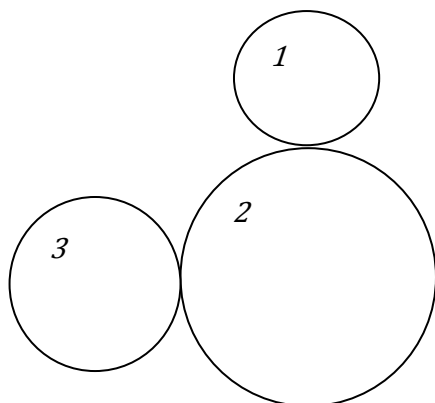
$$H = T \cdot \omega = mg \frac{\cancel{r_3}}{\cancel{R_3}} \cancel{R_1} \times \frac{V}{\cancel{r_3}} \times \frac{\cancel{R_3}}{\cancel{R_1}} = mgV$$

$$\rightarrow H = 100 \times 9.81 \times 0.5 \approx 500$$

چرخنده ها :

$$r_3 = 25mm \rightarrow \omega_3 = \frac{v}{r_3} = \frac{0.5}{0.025} = 20 \text{ rad/s}$$

فرض طراحی :



با توجه به کاتالوگ موتورهای .

الکتریکی شرکت متال گروپ ایتالیا :

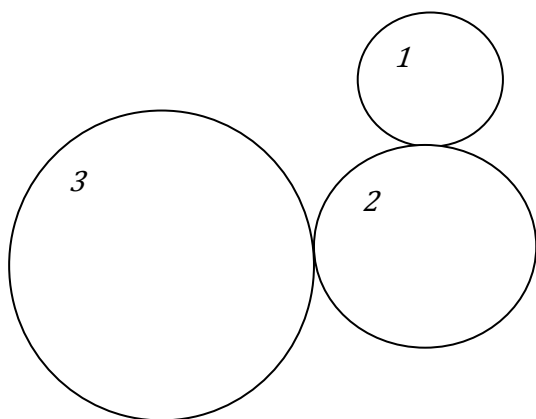
$$H = 500w = 0.5kw \rightarrow n_{max} = 2750 \text{ r.p.m.}$$

$$\omega_{max} = \omega_{1_{max}} = 287.83 \text{ rad/s}$$

با توجه به حداکثر سرعت ω_1 این موتور که میتواند داشته باشد :

$$\omega_{1(\text{مطلوب})} = 100 \text{ rad/s}$$

با توجه به سرعت دورانی چرخ ورودی (1) و سرعت دورانی چرخ خروجی (2) چرخنده ها کاهنده میباشند بنابراین باید چرخنده 2 بزرگتر از 1 و چرخنده 3 بزرگتر از 2 باشد .



شکل صحیح چرخ دنده ها :

نسبت کاهش :

$$r_r = \frac{\omega_1}{\omega_2} \times \frac{\omega_2}{\omega_3} = \frac{100}{20} = 5 []$$

$$m_{G_{12}} = \frac{N_G}{N_P} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{\frac{d_2}{m}}{\frac{d_1}{m}} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

$$m_G = 2 \rightarrow \omega_2 = \omega_1 \times \frac{1}{m_{G_{12}}} = 100 \times \frac{1}{2} = 50 \text{ rad/s}$$

$$m_{G_{12}} = \frac{N_3}{N_2} = \frac{\omega_2}{\omega_3} = \frac{50}{20} = 2.5 \text{ []}$$

$$N_P = \frac{N_G}{m_G} = \frac{2K}{(1 + 2m_G) \sin^2 \varphi} (m_G + \sqrt{m_G^2 + (1 + 2m_G) \sin^2 \varphi})^2$$

$$\text{سیستم دندانه} : \begin{cases} k = 1 \text{ (نوع دنده گود کامل)} \\ \varphi = 20^\circ \\ a = 1m \\ b = 1.25m \end{cases}$$

$$N_1 = \frac{2 \times 1}{(1 + 2 \times 2) \sin^2 20^\circ} (2 + \sqrt{2^2 + (1 + 2 \times 2) \sin^2 20^\circ})^2 = 14.16$$

$$N_1 = 15$$

$$\Rightarrow m_{G_{12}} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow N_2 = N_1 m_{G_{12}} = 30$$

$$\Rightarrow m_{G_{23}} = \frac{N_3}{N_2} = N_3 = N_2 m_{G_{23}} = 30 \times 2.5 = 75$$

تعیین قطر چرخها :

$$d_1 = 45mm : \text{فرض اولیه}$$

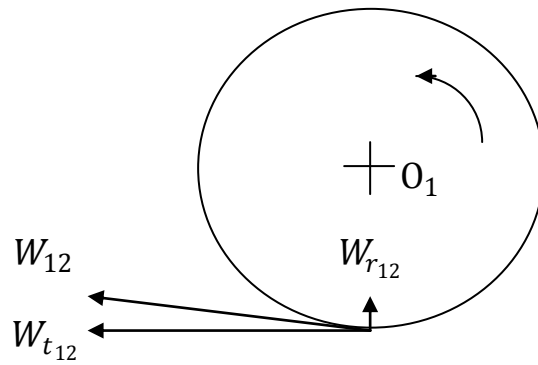
$$m = \frac{d_1}{N_1} \rightarrow m = \frac{45}{15} = 3mm$$

$$m = \frac{d_2}{N_2} \rightarrow d_2 = m N_2 \rightarrow d_2 = 3 \times 30 = 90mm$$

$$m = \frac{d_3}{N_3} = d_3 = m N_3 \rightarrow d_3 = 3 \times 75 = 225mm$$

تحلیل نیروها در چرخدنده ها :

چرخنده 1:



$$W_{t12} = \frac{H}{V}$$

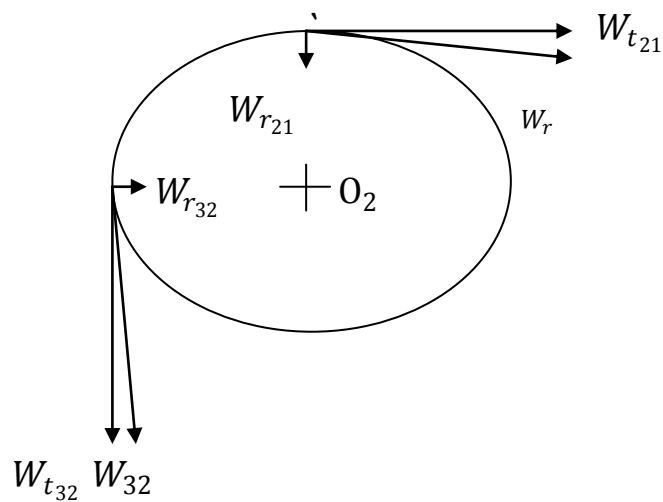
$$W_{t12} = \frac{60 \times 10^3 H}{\pi d_1 n_1}$$

$$\begin{cases} H = 0.5 \text{ KW} \\ d_1 = 45 \text{ mm} \\ n_1 = 100 \times \frac{60}{2\pi} = 954.9296 \text{ rpm} \end{cases}$$

$$W_{t12} = \frac{60 \times 10^3 \times 500 \times 10^{-3}}{\pi \times 45 \times 954.9296} = 0.2222 \text{ KN} \Rightarrow W_{t12} = 222.22 \text{ N}$$

$$W_{r12} = W_{t12} \tan \varphi = 222.22 \times \tan 20^\circ \Rightarrow W_{r12} = 80.88227 \text{ N}$$

چرخنده 2:



$$|W_{t21}| = |W_{t12}| = 222.22 \text{ N}$$

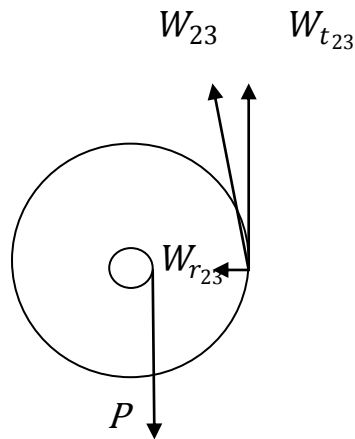
$$|W_{r21}| = |W_{r12}| = 80.88227 \text{ N}$$

$$\sum M_{O_2} = 0 \Rightarrow W_{t_{21}} r_2 = W_{t_{32}} r_2$$

$$|W_{t_{32}}| = |W_{t_{21}}| = 222.22 \text{ N}$$

$$W_{r_{32}} = W_{t_{32}} \tan \varphi = 222.22 \times \tan 20^\circ \Rightarrow W_{r_{12}} = 80.88227 \text{ N}$$

چرخ دنده 3 :



$$\sum M_{O_3} = 0 \Rightarrow \begin{cases} W_{t_{23}} = W_{t_{32}} = 222.22 \text{ N} \\ W_{r_{23}} = W_{r_{32}} = 80.88227 \text{ N} \end{cases}$$

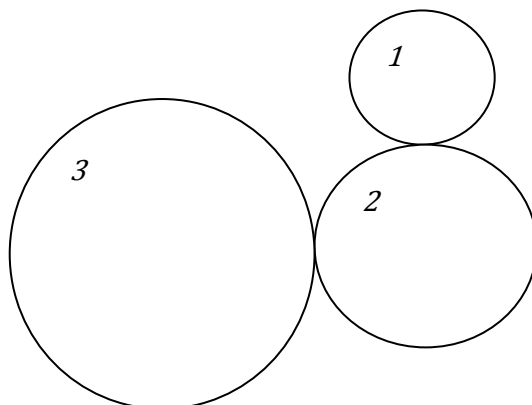
$$W_{t_{23}} R_3 = r_3 P$$

$$222.22 \times \frac{125}{2} = 25 \times 100 \times 9.81$$

$$25000 = 24525$$

$$g = 10 \Rightarrow 25000 = 25000 \quad \checkmark$$

عرض دندانه ها :



$$9m < F < 14m$$

$$3P < F < 5P$$

$$m = 3mm \Rightarrow F = 38mm$$

$$\frac{F}{d_{min}} \leq 2 \quad \{d_{min} = d_1\} : \text{جهت توزیع بار خوب (بخش 11-14)}$$

$$\Rightarrow \frac{38}{45} = 0.844 \sqrt{}$$

$$R_1 = 22.5mm$$

$$R_2 = 45mm$$

$$R_3 = 112.5mm$$

$$t = 38mm$$

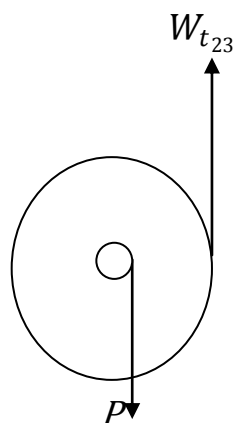
تحلیل تنش ها :

چرخنده 3:

تنش خمشی :

AGMA Standard :

$$\sigma = W_t k_o k_v k_s \frac{1}{bm_t} \frac{k_H k_B}{Y_j}$$



$$W_t = W_{t_{23}} = 222.22 \text{ N} \quad (\text{بار مماسی})$$

k_o : (ضریب فزون باری)

برای ماشین های محرک یکنواخت و منبع توان یکنواخت :

$$k_o = 1 \quad (\text{شکل 14-17})$$

k_v : (ضریب پویایی)

$$k_v = \left[\frac{A + \sqrt{200V}}{A} \right]^B$$

$$V = R_3 \omega_3 = \frac{112.5}{1000} \times 20 = 2.25 \text{ m/s} \quad \text{سرعت خطی چرخ 3} :$$

$$B = \left[0.25(12 - Q_v)^{\frac{2}{3}} \right] \quad \& \quad A = 50 + 56(1 - B)$$

Q_v :

نمره کیفیت یا کلاس 3 تا 7 برای چرخنده های تجاری

نمره کیفیت یا کلاس 8 تا 12 برای کیفیت دقیق

با فرض تجاری :

$$Q_v = 6$$

$$\Rightarrow B = 0.82548181 \Rightarrow A = 59.773$$

$$k_v = \left[\frac{59.773 + \sqrt{200 \times 2.25}}{59.773} \right]^{0.8254} = 1.284949$$

k_s : (ضریب اندازه)

$$k_s = 0.8433 [Fm \sqrt{Y}]^{0.0535}$$

$$F = 38 \text{ mm}$$

$$m = 3 \text{ mm}$$

$$Y = \frac{2x}{3m} \quad \& \quad x = \frac{t^2}{4l}$$

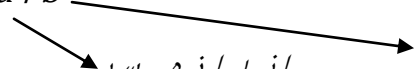
کلفتی دندانه : (t)

$$t = \frac{P}{2} \quad (P = \pi m)$$

$$P = \pi m = 3\pi = 9.42mm$$

$$\Rightarrow t = 4.71mm$$

$$l = a + b$$



$$\text{From Table 1-13: } \begin{cases} a = 1m \\ b = 1.25m \end{cases}$$

$$l = 1 \times 3 + 1.25 \times 3 = 6.75mm$$

$$X = \frac{t^2}{4l} = \frac{(4.71)^2}{4 \times 6.75} = 0.822467$$

$$Y = \frac{2}{3} \times \frac{0.822467}{3} = 0.18277$$

$$k_s = 0.8433 [38 \times 3 \sqrt{0.18277}]^{0.0535} = 1.038$$

k_H : (ضریب توزیع بار)

$$k_H = 1 + C_{mc} [C_{Pf} C_{Pm} + C_{ma} C_e]$$

$$C_{mc} : \begin{cases} 1 & \text{دنده های بی شکم} \\ 0.8 & \text{دنده های شکم دار} \end{cases} \Rightarrow C_{mc} = 1$$

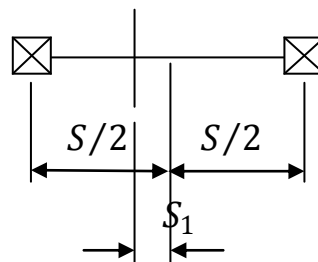
$$C_{Pf} = \frac{F}{10d} - 0.0375 + 0.5 \times 10^{-3} F, \quad 25mm \leq F \leq 432mm$$

$$\text{If } \frac{F}{10d} \leq 0.05 \Rightarrow \frac{F}{10d} = 0.05$$

$$\frac{F}{10d} = \frac{38}{10 \times 225} = 0.016889$$

$$\Rightarrow C_{Pf} = 0.05 - 0.0375 + 0.5 \times 10^{-3} \times 38 = 0.0315$$

$$C_{pm} : \begin{cases} 1 & s_1 < 0.1755 \\ 1.2 & s_2 \geq 0.1755 \end{cases}$$



با فرض بیشترین مقدار:

$$(C_{pm} = 1.2)$$

$$C_{ma} = A + BF + CF^2, \quad F = 38mm \rightarrow C_{ma} = 0.16$$

$$C_e : \begin{cases} 0.8 \\ 1 \end{cases}$$

0.8 به هنگام نصب تنظیم میشود

1 برای همه شرایط

$$C_e = 1$$

$$k_H = 1 + 1[0.0315 \times 1.2 + 0.16 \times 1] = 1.1978$$

$$k_B = \begin{cases} 1.6 \ln \frac{2.242}{m_B} & m_B < 1.2 \\ 1 & m_B \geq 1.2 \end{cases} \quad m_B = \frac{t_R}{h_t}$$

$$k_B = 1$$

برای طوقه های کلفت:

$$Y_j = \frac{Y}{k_f m_N}$$

$$k_f = H + \left(\frac{t}{r}\right)^l \left(\frac{t}{l}\right)^M$$

$$\varphi = 20^\circ = 20 \times \frac{\pi}{180} = 0.349 \text{ rad}$$

$$H = 0.34 - 0.4583662\varphi \rightarrow H = 0.02$$

$$l = 0.316 - 0.4583662\varphi \rightarrow l = 0.004$$

$$M = 0.29 + 0.4583662\varphi \rightarrow M = 0.61$$

$$r = \frac{(b-r_f)^2}{\left(\frac{d}{2}\right) + b - r_f}, \quad r_f = 1mm$$

$$r = \frac{(38-1)^2}{\left(\frac{225}{2}\right) + 38 - 1} = 9.15719$$

$$k_f = 0.02 + \left(\frac{4.71}{9.15719}\right)^{0.004} \times \left(\frac{4.71}{6.75}\right)^{0.61} = 0.82667$$

$$Y_J = \frac{0.18277}{0.8207786 \times 1} = 0.222679$$

$$\sigma = 222.22 \times 1 \times 1.284949 \times 1.038 \times \frac{1}{38 \times 3} \times \frac{1.1978 \times 1}{0.222679}$$

$$\sigma_3 = 13.985 \text{ MPa} \cong 14 \text{ MPa}$$

تنش مجاز برای چرخ 3 :

با فرض فولاد سخت کاری شده کامل و شکل 2-14

$$\rightarrow \sigma_{FP} = 0.533 H_B + 88.3 \text{ MPa}$$

سختی ←

$$\text{For Steel 1020} \xrightarrow{\text{From Table A-23}} H_B = 108 \rightarrow \sigma_{FP} = 0.533 \times 108 + 88.3 = 145.864 \text{ MPa}$$

ضریب عمر تنش از شکل 14-14 : Y_N

$$N = 10^8 \Leftarrow \text{با فرض } 10^8 \text{ دور}$$

برای دمای روانکار کمتر از 120°C : $Y_\theta = 1$

ضریب اعتماد پذیری : Y_Z

$$Y_Z = 0.85$$

با فرض 0.90 اعتماد پذیری : $\xleftarrow{\text{Table 10-14}}$

ضریب ایمنی (اطمینان) : S_F

ضریب طراحی برای خمش چرخنده 3

$$S_F = \left[\frac{\frac{\sigma_{FP} Y_N}{Y_\theta Y_Z}}{\sigma} \right] = \left[\frac{\frac{145.869 \times 0.97678}{1 \times 0.85}}{14} \right] = 11.97286$$

تنش مماسی برای چرخنده 3 :

$$\sigma_C = Z_E \sqrt{W_t k_0 k_v k_s \frac{k_H}{d_{\omega_1} b} \cdot \frac{Z_R}{Z_I}}$$

$$W_t = 222.22 \text{ N} , \quad k_0 = 1 , \quad k_v = 1.284444 , \quad k_s = 1.038 , \quad k_H = 1.1978 , \quad b = 38 \text{ mm}$$

$$Z_E = 191 \text{ MPa (Granweel)} , \quad Z_R = 1 , \quad d_{\omega_1} = 90 \text{ mm}$$

$$Z_I = \frac{\cos \varphi_t \sin \varphi_t}{2m_N} \cdot \frac{m_G}{m_G + 1} \xrightarrow{\varphi_t = \varphi = 20^\circ , \quad m_{G2,3} = 2.5} Z_I = \frac{\cos 20 \sin 20}{2 \times 1} \cdot \frac{2.5}{2.5 + 1} = 0.11478$$

$$\sigma_C = 191 \sqrt{222.22 \times 1 \times 1.284444 \times 1.038 \times \frac{1.1978}{90 \times 38} \times \frac{1}{0.11478}} \rightarrow \sigma_C = 181.64 \text{ MPa}$$

تنش مجاز مماسی برای چرخنده 3 :

$$\sigma_{C_{all}} = \frac{\sigma_{HP}}{S_H} \cdot \frac{Z_N Z_W}{Y_\theta Y_Z} , \quad S_H = \frac{\sigma_{HP} Z_N Z_W}{Y_\theta Y_Z \sigma_C} , \quad Y_Z = 0.85 , \quad Y_\theta = 1$$

مقاومت تماس مجاز :

$$\text{For Steel: } \xrightarrow{\text{Table 5-14}} \sigma_{HP} = 2.22 H_B + 200 \text{ MPa}$$

$$\text{For Steel 1020: } \xrightarrow{\text{Table A-23}} H_B = 108$$

$$\sigma_{HP} = 2.22 H_B + 200 = 2.22 \times 108 + 200 \rightarrow \sigma_{HP} = 439.76 \text{ MPa}$$

ضریب عمر تنش :

$$Z_N = 1.4488 N^{-0.023} \xrightarrow{\text{Table 15-14}} N = 10^8 \rightarrow Z_N = 1.4488 (10^8)^{-0.023}$$

$$\rightarrow Z_N = 0.944843$$

ضریب نسبت تختی برای مقاومت مماسی برای چرخ گرانویل : Z_W

$$\frac{H_{BP}}{H_{BG}}$$

H_{BP} : سختی گرانویل که برای فولاد 1020 برابر است با 108

H_{BG} : سختی پینیون که با فرض فولاد 1040 برابر است با 225 بنابر جدول 23 - الف

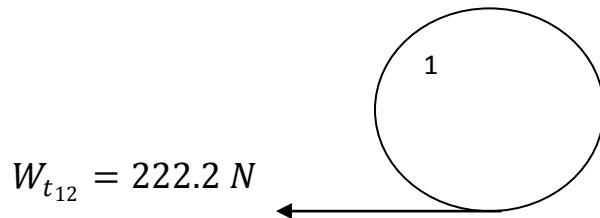
$$\frac{H_{BP}}{H_{BG}} = \frac{225}{108} = 2.0833 > 1.7 \Rightarrow A' = 0.00698$$

$$Z_W = 1 + A' (m_G - 1) = 1 + 0.00698 (2.5 - 1) \rightarrow Z_W = 1.01047$$

ضریب طراحی برای تنش مماسی :

$$S_H = \frac{\frac{439.76 \times 0.944843 \times 1.01047}{1 \times 0.85}}{181.64} \rightarrow S_H = 2.71937$$

تحلیل تنش برای چرخنده 1 :



$$\sigma_1 = W_t k_O k_v k_S \frac{1}{bm_t} \cdot \frac{k_H k_B}{Y_j}$$

$$W_t = 222.22 \text{ N} , k_O = 1$$

$$k_v = \left(\frac{A + \sqrt{200V}}{A} \right)^B , \quad V = R_1 \omega_1 , A = 50 + 50(1 - B)$$

$$B = 0.25 (12 - Q_v)^{\frac{2}{3}} , Q_v = 6 \rightarrow B = 0.82548 , A = 59.773$$

$$k_v = 1.284948$$

$$k_S = 0.8433 (Fm \sqrt{Y})^{0.0535} , \quad F = 38 \text{ mm} , \quad m = 3 \text{ mm}$$

$$Y \xrightarrow{\text{Table 2-14}} N_1 = 15 \rightarrow Y = 0.290$$

$$k_S = 0.8433 (38 \times 3 \sqrt{0.290})^{0.0535} \rightarrow k_S = 1.051103$$

$$k_H = 1 + C_{m_c} (C_{Pf} C_{Pm} + C_{ma} C_e)$$

$$C_{m_c} = 1$$

$$C_{Pf} : \frac{F}{10d} = \frac{38}{10 \times 45} = 0.0844 \rightarrow C_{Pf} = \frac{F}{10d} - 0.0375 + 0.5 \times 10^{-3} \times F$$

$$C_{Pf} = 0.0849 - 0.0375 + 0.5 \times 10^{-3} \times 38 \rightarrow C_{Pf} = 0.065949$$

$$C_{Pm} = \begin{cases} 1 \\ 1.1 \end{cases} \rightarrow C_{Pm} = 1.1 , C_{ma} = 0.16 , C_e = \begin{cases} 0.8 \\ 1 \end{cases} \rightarrow C_e = 1$$

$$k_H = 1 + 1(0.0849 \times 1.1 + 0.16 \times 1) \rightarrow k_H = 1.23253898$$

$$k_B = 1, Y_j = \frac{Y}{K_f M_N}$$

$$k_f = H + \left(\frac{t}{r}\right)^L \left(\frac{t}{l}\right)^M$$

$$H = 0.34 - 0.458366 \times 2\varphi = 0.02, t = 4.71mm$$

$$L = 0.316 - 0.451366 \times 2\varphi = 0.004, l = 6.75mm$$

$$M = 0.3290 + 0.458366 \times 2\varphi = 0.61$$

$$r = \frac{(b - r_f)^2}{\left(\frac{d}{2}\right) + b - r_f}, b = 38, r_f = 1, d = 45mm$$

$$r = \frac{(38 - 1)^2}{\left(\frac{45}{2}\right) + 38 - 1} \rightarrow r_f = 23.009$$

$$k_f = 0.02 + \left(\frac{4.71}{23.009}\right)^{0.004} \left(\frac{4.71}{6.75}\right)^{0.61} \rightarrow k_f = 0.8178$$

$$Y_j = \frac{0.29}{0.8178 \times 1} = 0.35459$$

$$\sigma_1 = 222.22 \times 1 \times 1.284949 \times 1.051103 \times \frac{1}{38 \times 3} \cdot \frac{1 \times 1.2325389}{0.35459} \rightarrow \sigma_1 = 12.42 MPa$$

تنش مجاز برای چرخ 1 :

$$\sigma_{all} = \frac{\sigma_{FP}}{\sigma_F} \times \frac{Y_N}{Y_\theta Y_Z}$$

$$\sigma_{FP} = 0.533 H_P + 88.3 MPa, H_P = 108 \rightarrow \sigma_{FP} = 0.533 \times 108 + 88.3 \rightarrow \sigma_{FP} = 145.864$$

$$Y_N = 1.3558 N^{-0.0178} = 1.3558 \times [10^8]^{-0.0178} = 0.97678$$

$$Y_\theta = 1, Y_Z = 0.85$$

$$S_F = \left[\frac{\frac{\sigma_{FP} Y_N}{Y_\theta Y_Z}}{\sigma_1} \right] = \left[\frac{\frac{145.869 \times 0.97678}{1 \times 0.85}}{12.42} \right] \rightarrow S_F = 13.49$$

تنش مماسی وارد بر چرخ 1 :

$$\sigma_C = Z_E \sqrt{W_t k_0 k_v k_s \frac{k_H}{d_{w1} b} \cdot \frac{Z_R}{Z_l}}$$

$$W_t = 222.22 \text{ N} , \quad k_0 = 1 , \quad k_v = 1.284949 , \quad k_s = 1.051103 , \quad k_H = 1.2325389 , \quad Z_R = C_P = 1$$

$$Z_l = \frac{\cos \varphi_t \sin \varphi_t}{2m_N} \cdot \frac{m_G}{m_G + 1} \rightarrow Z_l = \frac{\cos 20 \sin 20}{2 \times 1} \times \frac{2}{2 + 1} \rightarrow Z_l = 0.10713$$

$$b = 38 \text{ mm} , \quad d_{w1} = 45 \text{ mm} , \quad Z_E = 191 \text{ MPa}$$

$$\sigma_C = 191 \sqrt{222.22 \times 1 \times 1.284949 \times 1.051103 \times \frac{1.2325389}{45 \times 38} \times \frac{1}{0.10713}}$$

$$\rightarrow \sigma_C = 271.417 \text{ MPa}$$

تنش مجاز مماسی در چرخ 1 :

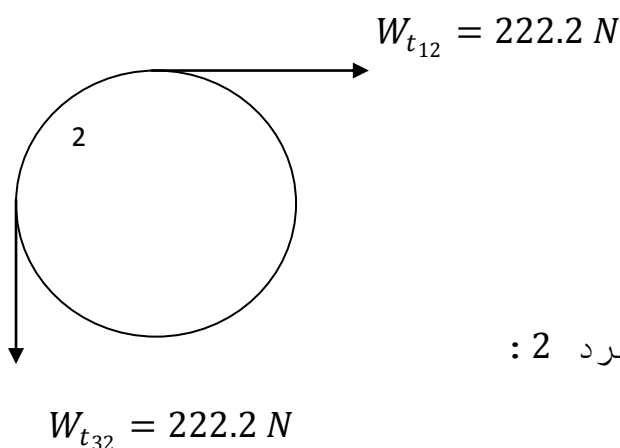
$$\sigma_{C_{all}} = \frac{\sigma_{HP}}{S_H} \cdot \frac{Z_N Z_W}{Y_\theta Y_Z}$$

$$\sigma_{HP} = 2.22 \times H_B + 200 , \quad H_B = 108 \rightarrow \sigma_{HP} = 439.76 \text{ MPa}$$

$$Z_N = 1.4488 N^{-0.023} = 1.4488 \times [10^8]^{-0.023} \rightarrow Z_N = 0.9484$$

$$Z_W = 1 , \quad Y_\theta = 1 , \quad Y_Z = 0.85$$

$$S_H = \frac{\frac{\sigma_{HP} Z_N Z_W}{Y_\theta Y_Z}}{\sigma_C} \rightarrow S_H = \frac{\frac{439.76 \times 0.9484 \times 1}{1 \times 0.85}}{271.417} \rightarrow S_H = 1.8 \quad (\text{ضریب اطمینان})$$



تحلیل تنش برای چرخنده هرزگرد 2 :

روش کار: ابتدا تنش مجاز را برای تنش های خمشی و مماسی به دست می آوریم سپس تنش خمشی ناشی از نیروهای وارد بر چرخنده را به دست می آوریم که برآیند آنها تنش خمشی کل خواهد بود. با این روند برای تنش مماسی نیز ادامه می دهیم.

تنش مجاز خمشی :

$$\sigma_{all} = \frac{\sigma_{FP}}{S_F} \times \frac{Y_N}{Y_\theta Y_Z}$$

$$\sigma_{FP} = 0.533 H_P + 88.3 \text{ MPa} , H_P = 225 \rightarrow \sigma_{FP} = 0.533 \times 225 + 88.3$$

$$\rightarrow \sigma_{FP} = 208.225 \text{ MPa}$$

$$Y_N = 1.3558 N^{-0.0178} = 1.3558 \times [10^8]^{-0.0178} = 0.97678$$

$$Y_\theta = 1 , Y_Z = 0.85$$

$$\sigma_{all} = \frac{208.225}{S_F} \times \frac{0.9762}{1 \times 0.85} \rightarrow \sigma_{all} = \frac{239.14}{S_F}$$

ضریب طراحی

$$\sigma_{C_{all}} = \frac{\sigma_{HP}}{S_H} \cdot \frac{Z_N Z_W}{Y_\theta Y_Z}$$

$$\sigma_{HP} = 2.22 \times H_B + 200 , H_B = 225 \rightarrow \sigma_{HP} = 699.5 \text{ MPa}$$

$$Z_N = 1.4488 N^{-0.023} = 1.4488 \times [10^8]^{-0.023} \rightarrow Z_N = 0.9484$$

$$Y_\theta = 1 , Y_Z = 0.85$$

$$Z_W = \begin{cases} Z_{W_{2,3}} = 1 \\ Z_{W_{12}} \neq 1 \Rightarrow \frac{H_{B_D}}{H_{B_G}} = \frac{H_{B_1}}{H_{B_2}} = \frac{108}{225} = 0.48 \Rightarrow \frac{H_{B_D}}{H_{B_G}} < 1.2 \xrightarrow{A'=0} Z_W = 1 \end{cases}$$

$$\sigma_{C_{all}} = \frac{699.5}{S_H} \cdot \frac{0.9484 \times 1}{1 \times 0.85}$$

تنش خمشی ناشی از نیروهای وارد بر چرخنده 2 :

$$\sigma = W_t k_O k_v k_S \frac{1}{bm_t} \cdot \frac{k_H k_B}{Y_j}$$

$$W_{t_{12}} = W_{t_{32}} = 222.22 \text{ N} , \quad k_{O_{12}} = k_{O_{32}} = 1$$

$$k_v = \left(\frac{A + \sqrt{200V}}{A} \right)^B , \quad k_v = k_{v_{12}} = k_{v_{32}} , \quad V = R_1 \omega_1 , A = 50 + 50(1 - B)$$

$$B = 0.25 (12 - Q_v)^{\frac{2}{3}} , Q_v = 6 \rightarrow B = 0.82548 , A = 59.773$$

$$k_v = 1.284948$$

$$k_S = k_{S_{12}} = k_{S_{32}} = 0.8433 (Fm \sqrt{Y})^{0.0535} , \quad F = 38mm , \quad m = 3mm$$

$$Y \xrightarrow{\text{Table 2-14}} N_1 = 30 \rightarrow Y = 0.359$$

$$k_S = 0.8433 (38 \times 3 \sqrt{0.359})^{0.0535} \rightarrow k_S = 1.05711$$

$$k_H = 1 + C_{m_c} (C_{Pf} C_{Pm} + C_{ma} C_e)$$

$$C_{m_c} = 1$$

$$C_{Pf} : \frac{F}{10d} = \frac{38}{10 \times 90} = 0.0422 \rightarrow \frac{F}{10d} = 0.05 \rightarrow C_{Pf} \\ = \frac{F}{10d} - 0.0375 + 0.5 \times 10^{-3} \times F$$

$$C_{Pf} = 0.05 - 0.0375 + 0.019 \rightarrow C_{Pf} = 0.0315$$

$$C_{Pm} = \left\{ \begin{matrix} 1 \\ 1.1 \end{matrix} \right. \rightarrow C_{Pm} = 1.1 , \quad C_{ma} = 0.16 , \quad C_e = \left\{ \begin{matrix} 0.8 \\ 1 \end{matrix} \right. \rightarrow C_e = 1$$

$$k_H = 1 + 1(0.0315 \times 1.1 + 0.16 \times 1) \rightarrow k_H = 1.19465$$

$$k_B = 1 , Y_j = \frac{Y}{K_f M_N} = \frac{0.359}{0.82 \times 1} = 0.4378$$

$$Y=0.359 , m_N = 1$$

$$k_f = H + \left(\frac{t}{r} \right)^L \left(\frac{t}{l} \right)^M$$

$$H = 0.34 - 0.458366 \times 2\varphi = 0.02 , t = 4.71mm$$

$$L = 0.316 - 0.451366 \times 2\varphi = 0.004 , l = 6.75mm$$

$$M = 0.3290 + 0.458366 \times 2\varphi = 0.61$$

$$r = \frac{(b - r_f)^2}{\left(\frac{d}{2}\right) + b - r_f} , b = 38 , r_f = 1 , d = 45mm$$

$$r = \frac{(38 - 1)^2}{\left(\frac{90}{2}\right) + 38 - 1} \rightarrow r_f = 16.695$$

$$k_f = 0.02 + \left(\frac{4.71}{16.695}\right)^{0.004} \left(\frac{4.71}{6.75}\right)^{0.61} \rightarrow k_f = 0.82$$

$$b = 38mm , m_t = m = 3mm ,$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{23} = 222.22 \times 1 \times 1.284948 \times 1.05711 \times \frac{1}{38 \times 3} \times \frac{1.9465 \times 1}{0.4378} \rightarrow \sigma = 7.225 MPa$$

$$\sigma = \sigma_{12} + \sigma_{23} = 2\sigma_{12} = 2 \times 7.225 \rightarrow \sigma = 14.45 MPa$$

$$\sigma = \frac{239.14}{S_F} \Rightarrow S_F = \frac{239.14}{14.45} \Rightarrow S_F = 16.549$$

تنش مماسی :

$$\sigma_C = Z_E \sqrt{W_t k_0 k_v k_s \frac{k_H}{d_{\omega_1} b} \cdot \frac{Z_R}{Z_I}}$$

$$W_t = 222.22 \text{ N} , k_0 = 1 , k_v = 1.284949 , k_s = 1.05711 , k_H = 1.19465 , Z_R = 1$$

$$Z_I = \frac{\cos \varphi_t \sin \varphi_t}{2m_N} \cdot \frac{m_G}{m_G + 1} \rightarrow Z_{I_{12}} = \frac{\cos 20 \sin 20}{2 \times 1} \times \frac{2}{2 + 1} = 0.10713$$

$$\& Z_{I_{23}} = \frac{\cos 20 \sin 20}{2 \times 1} \times \frac{2.5}{2.5 + 1} = 0.11478$$

$$b = 38mm , Z_E = 191MPa$$

d_{ω_1} : (قطرگام چرخ دنده پنیون)

$$d_{\omega_{12}} = d_1 = 45mm$$

&

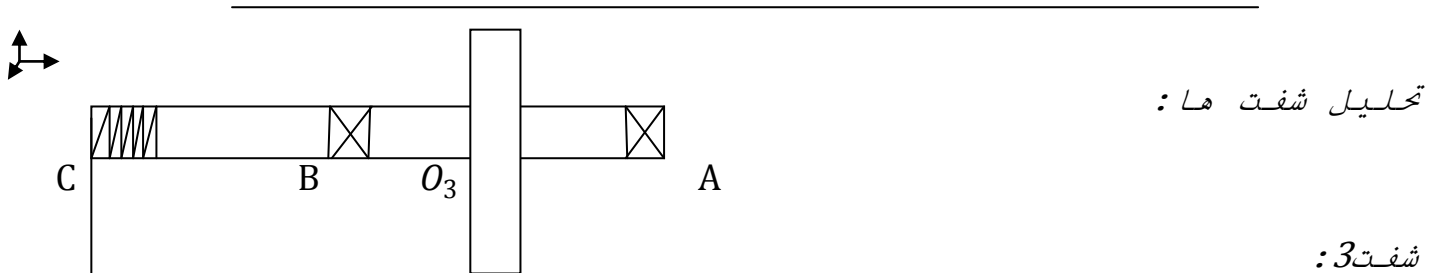
$$d_{\omega_{23}} = d_2 = 90mm$$

$$\sigma_{C_{12}} = 191 \sqrt{222.22 \times 1 \times 1.284948 \times 1.05711 \times \frac{1.19465}{45 \times 38} \times \frac{1}{0.10713}} = 267.975 \text{ mpa}$$

$$\sigma_{C_{23}} = 191 \sqrt{222.22 \times 1 \times 1.284948 \times 1.05711 \times \frac{1.19465}{90 \times 38} \times \frac{1}{0.11478}} = 183.0635 \text{ mpa}$$

$$\sigma_{total} = \sigma_{C_{12}} + \sigma_{C_{23}} = 451.0385 \text{ mpa}$$

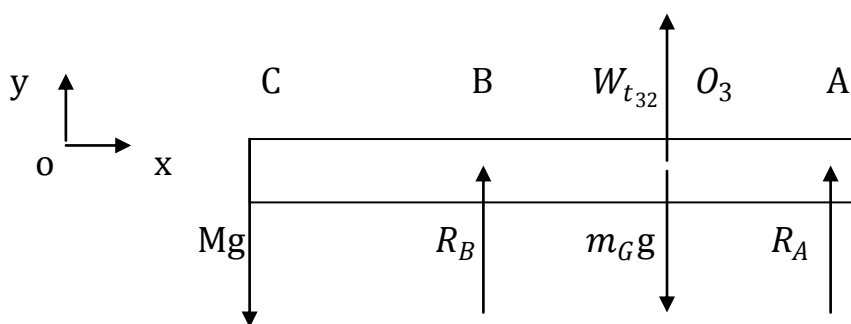
$$\sigma_{total} = \frac{780.5}{S_H} \Rightarrow S_H = \frac{780.5}{451.0385} = 1.73$$



شفت 3:

عرض چرخ = 38 میلی متر
 عرض یاتاقان = 12 میلی متر (فرض)
 طول آزاد بین چرخ و یاتاقان = 5 میلی متر (فرض)
 طول آزاد بین یاتاقان و قسمت کابل = 10 میلی متر (فرض)

$$L = 12 + 12 + 5 + 5 + 38 + 10 = 82 \text{ mm}$$



تحلیل استاتیکی نیرو ها:

$$W_{t_{32}} = 222.22 \text{ N}$$

$$Mg = 100 \times 9.81 = 981 \text{ N}$$

$$m_G g = \rho v g$$

$$\rho g = 76.5 \text{ kN/m}^3$$

$$v = \pi \times R_3^2 \times F$$

$$v = \pi \times (112.5 \times 10^{-3})^2 \times 38 \times 10^{-3} = 1.51014 \text{ m}^3$$

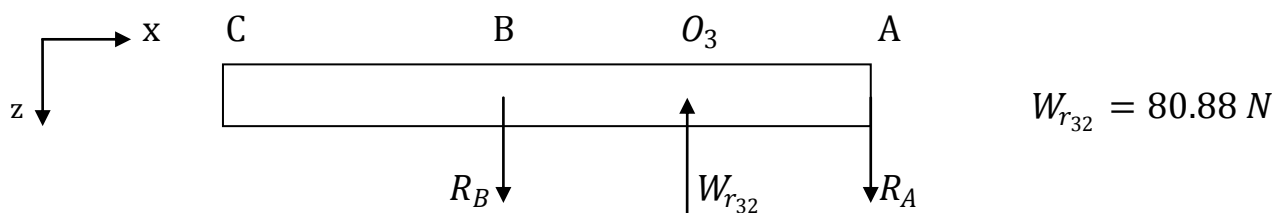
$$m_G g = 76.5 \times 1.51014 \quad m_G g = 115.526 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow Mg \times \left(\frac{6+2 \times 24+12+10}{1000} \right) + (m_G g - W_{t_{32}}) \left(\frac{24+6}{1000} \right) - R_B \times \left(\frac{6+24+24+6}{1000} \right) = 0$$

$$\Rightarrow R_B = 1189.253 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow R_B - m_G g + W_{t_{32}} - Mg + R_A = 0 \Rightarrow R_A = -314.9 \text{ N}$$

جهت برعکس خواهد بود .



$$\sum M_A = 0 \Rightarrow R_B \times \left(\frac{6 \times 2 + 24 \times 2}{1000} \right) = W_{r_{32}} \times \left(\frac{6 + 24}{1000} \right) \Rightarrow R_B = 40.44 \text{ N}$$

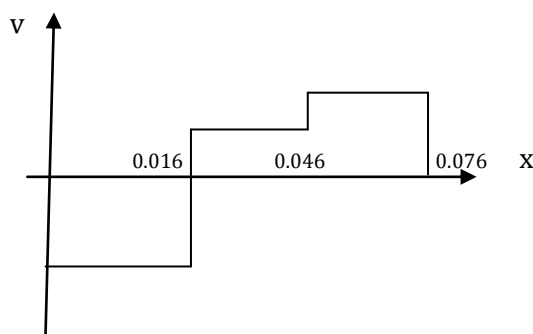
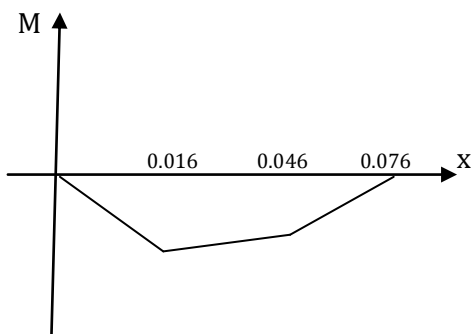
$$\sum F_y = 0 \Rightarrow W_{r_{32}} - R_A - R_B = 0 \Rightarrow R_A = 40.44 \text{ N}$$

تحلیل مقاطعی (گشت آور و نیروی برشی):

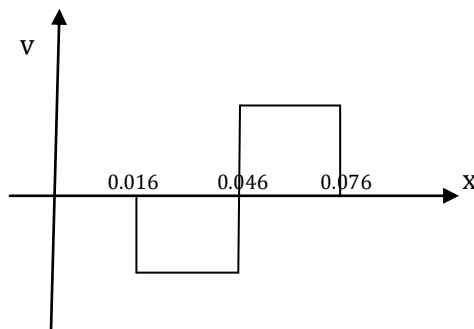
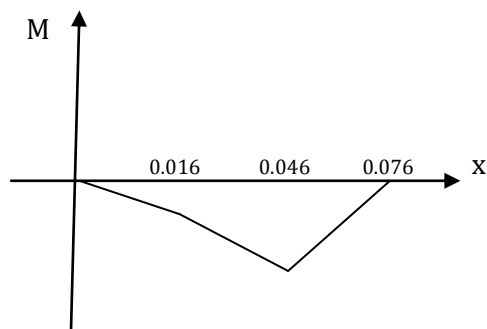
$$\left\{ \begin{array}{ll} 0 \leq x \leq 0.016 \text{ m} & M = -Mg \times x \quad \& \quad v = -Mg \\ 0.016 \leq x \leq 0.046 \text{ m} & M = -Mg \times x + R_B (x - 0.016) \quad \& \quad v = R_B - Mg \\ 0.046 \leq x \leq 0.076 \text{ m} & M = (W_{t_{32}} - m_G g)(x - 0.040) + R_B (x - 0.016) - Mg x \\ & v = -Mg + R_B + (W_{t_{32}} - m_G g) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0.016 \leq x \leq 0.046 \text{ m} & M = -R_B \times x \quad \& \quad v = -R_B \\ 0.046 \leq x \leq 0.076 \text{ m} & M = W_{r_{32}} (x - 0.046) - R_B (x - 0.016) \\ & v = W_{r_{32}} - R_B \end{array} \right.$$

نمودارهای گشتاور و نیروی برشی:



در صفحه xoy



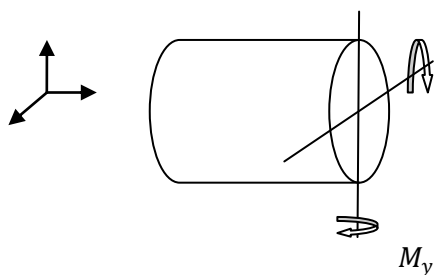
در صفحه xoz

با فرض اینکه بعد طولی شفت از 3 برابر بعد عرضی شفت (قطر) بیشتر است. بنابراین تنش ناشی از نیروی برشی در مقایسه با تنش خمشی و پیچشی ناچیز خواهد بود. بنابراین صرف نظر می کنیم.

با فرض B به عنوان ضعیف ترین نقطه زیرا:

$$B: |M| = \sqrt{(-15.7)^2 + (-0.647)^2} = 15.7133 \text{ N.m}$$

$$O_3: |M| = \sqrt{(-9.448)^2 + (-1.21)^2} = 9.525 \text{ N.m}$$



$$M_z = -15.7 \text{ N.m}$$

$$M_z > M_y \Rightarrow \sigma_{max} = \frac{M_z \times c}{I} = \frac{15.7 \times r}{\frac{\pi}{64} \times 16 \times r^4} = \frac{20}{r^3} \text{ pa}$$

$$M_y = -0.647 \text{ N.m}$$

گشتاور پیچشی شفت:

$$\tau = \frac{T \times r}{J} \quad (T = W_{t32} \times R \text{ \& } J = \frac{\pi}{32} \times 16 \times r^4) \Rightarrow \tau = \frac{15.923}{r^3} \text{ pa}$$

به خاطر اینکه به هنگام اعمال بار شفت دوران میکند پس هر تنش دارای دامنه و مقدار متوسط است:

$$\sigma_{\text{خمشی}}: \begin{cases} \sigma_M = 0 \\ \sigma_a = \frac{20}{r^3} \text{ pa} = \frac{20}{10^6 \times r^3} \text{ mpa} \end{cases}$$

$$\tau_{\text{پیچشی}}: \begin{cases} \tau_M = \frac{15.923}{r^3} \text{ pa} = \frac{15.923}{10^6 \times r^3} \text{ mpa} \\ \tau_a = 0 \end{cases}$$

$$\sigma' = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}$$

فرمول تنش معادل:

$$\sigma'_{\text{معادل}}: \begin{cases} \sigma'_a = \frac{20}{10^6 \times r^3} \text{ mpa} \\ \sigma'_m = \sqrt{0^2 + 6 \tau_M^2} = \sqrt{6} \times \tau_M = \sqrt{6} \times \frac{15.923}{10^6 \times r^3} \text{ mpa} \end{cases}$$

S_e & S_{ut} :

انتخاب شفت از جنس فولاد HR1020 و از جدول الف-23:

$$S_{ut} = 440 \text{ mpa}$$

بافرض دمای کاری 50°C و از جدول 6-7 : $k_d = 1.010$

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \Rightarrow S_{ut} = S_T = 1.010 \times 440 = 444.4 \text{ mpa}$$

\swarrow حداکثر تنش در دمای کاری
 \nwarrow حداکثر تنش در دمای آزمایشگاه

$$S'_e = 0.504 \times S_{ut} = 239.9776 \text{ mpa}$$

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

برای سطح شفت با پرداخت سنگ زنی: $a=1.58$ & $b=-0.085$

$$k_a = 0.9410$$

$$k_b = 1.24d^{-0.107} \quad \text{با فرض } 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm}$$

$$k_c: \begin{cases} 1 & \text{خمشی} \\ 0.85 & \text{محوری} \\ 0.59 & \text{پیچشی} \end{cases} \Rightarrow k_c = 1 \times 0.59 = 0.59$$

$$k_e: \quad k_e = 0.897 \quad \text{با اعتماد پذیری 90 درصد از جدول 7-7} :$$

$$k_f = 1 \text{ (تمرکز تنش)}$$

$$S_e = 0.9410 \times 1.24d^{-0.107} \times 0.59 \times 0.897 \times 1 \times 221.76 \text{ mpa} = 136.9427d^{-0.107} \text{ mpa}$$

$$\frac{n\sigma_a}{S_e} + \frac{n\sigma_M}{S_{ut}} = 1$$

با استفاده از معیار گود من:

با قرار دادن ضریب طراحی 2 برای دامنه تنش ها خواهیم داشت:

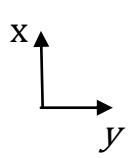
$$\frac{2 \times \frac{20}{10^6 \times r^3}}{136.9427 \times d^{-0.107}} + \frac{\frac{39}{10^6 \times r^3}}{444.4} = 1 \quad \Rightarrow \quad r = 6.473 \text{ mm (حداقل شعاع شفت 3)}$$

با توجه به اینکه در قسمت قبل شعاع شفت 3 را 25 میلی متر فرض کرده بودیم و چون از مقدار مجاز بیشتر است همان 25 میلی متر را انتخاب می کنیم.

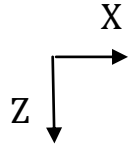
تحلیل شفت 3 به کمک تغییر شکل (خیز و شیب):

$$EI\theta = \int Mdx \quad \& \quad EIy = \iint Mdx dx$$

با استفاده از مقادیر بدست آمده گشت آور در قسمت قبل توابع خیز و شیب بصورت زیر بدست می آید:



$$\left\{ \begin{array}{lll} 0 \leq x \leq 0.016 \text{ m} & \theta = \frac{-Mgx^2}{2EI} + c_1 & y = \frac{-Mgx^3}{6EI} + c_1x + c_2 \\ \\ 0.016 \leq x \leq 0.046 \text{ m} & \theta = \frac{-Mgx^2}{2EI} + \frac{R_B x^2}{2EI} - 0.016 \frac{R_B x}{EI} + c_1 & \\ & y = \frac{-Mgx^3}{6EI} + \frac{R_B x^3}{6EI} - 0.008 \frac{R_B x^2}{EI} + c_1x + c_2 \\ \\ 0.046 \leq x \leq 0.076 \text{ m} & \theta = \frac{(W_{t32} - m_g g)}{EI} \left(\frac{x^2}{2} - \frac{40x}{2000} \right) + \frac{R_B}{EI} \left(\frac{x^2}{2} - \frac{10x}{1000} \right) - \frac{-Mgx^2}{2EI} + c_1 & \\ & y = \frac{(W_{t32} - m_g g)}{EI} \left(\frac{x^3}{6} - \frac{40x^2}{2000} \right) + \frac{R_B}{EI} \left(\frac{x^3}{6} - \frac{10x^2}{2000} \right) - \frac{-Mgx^3}{6EI} + c_1x + c_2 \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{lll} 0.016 \leq x \leq 0.046 \text{ m} & \theta = \frac{-R_B x^2}{2EI} + c_1 & y = \frac{-R_B x^3}{6EI} + c_1x + c_2 \\ \\ 0.046 \leq x \leq 0.076 \text{ m} & \theta = \frac{W_{r32} x^2}{2EI} - \frac{W_{r32} 46x}{1000EI} - \frac{R_B x^2}{2EI} + 0.016 \frac{x}{EI} + c_1 & \\ & y = \frac{W_{r32} x^3}{6EI} - \frac{W_{r32} 46x^2}{2000EI} - \frac{R_B x^3}{6EI} + 0.008 \frac{x^2}{EI} + c_1x + c_2 \end{array} \right.$$

با استفاده از مقدار قطری که در قسمت تحلیل تنش بدست آمد:

$$I = \frac{\pi}{64} d^4 = \frac{\pi}{64} (50 \times 10^{-3})^4 = 3.0664 \times 10^{-7}$$

$$E = 205 \text{ Gpa} \quad EI = 62861.4 \quad \text{pa.m}^4$$

با شرایط اولیه یعنی خیز در موقعیت یاتاقان ها برابر صفر است
مقادیر مجهول در معادلات شیب و خیز بدست می آید:

در صفحه xoy:

$$\theta \leq x \leq 0.016 \text{ m} \left\{ \begin{array}{l} \theta = \frac{-981x^2}{2 \times 62861.4} - 2.06182422 \times 10^{-6} \\ y = \frac{-981x^3}{6 \times 62861.4} - 2.06182422 \times 10^{-6} \times x + 0.043642718 \times 10^{-6} \end{array} \right.$$

$$0.016 \leq x \leq 0.046 \text{ m} \left\{ \begin{array}{l} \theta = \frac{-981x^2}{2 \times 62861.4} + \frac{1189.253 \times x^2}{2 \times 62861.4} - \frac{16}{1000} \frac{1189.253x}{62861.4} + 0.359763435 \times 10^{-6} \\ y = \frac{-981x^3}{6 \times 62861.4} + \frac{1189.253 \times x^3}{6 \times 62861.4} - \frac{16}{2000} \frac{1189.253x^2}{62861.4} + 0.359763435 \times 10^{-6} \times x \\ \quad + 0.030727357 \times 10^{-6} \end{array} \right.$$

$$0.046 \leq x \leq 0.076 \text{ m} \left\{ \begin{array}{l} \theta = \frac{(222.22 - 115.526)}{62861.4} \left(\frac{x^2}{2} - \frac{40x}{1000} \right) + \frac{1189.253}{62861.4} \left(\frac{x^2}{2} - \frac{16x}{1000} \right) - \frac{981}{62861.4} \times \frac{x^2}{2} \\ \quad + 1.84789 \times 10^{-6} \\ y = \frac{(222.22 - 115.526)}{62861.4} \left(\frac{x^3}{6} - \frac{40x^2}{2000} \right) + \frac{1189.253}{62861.4} \left(\frac{x^3}{6} - \frac{16x^2}{2000} \right) - \frac{981}{62861.4} \times \frac{x^3}{6} \\ \quad + 1.84789 \times 10^{-6} \times x + 0.23544318 \times 10^{-6} \end{array} \right.$$

مقدار شیب در یاتاقان A در صفحه xoy:

$$\theta_A = 16.71099403 \times 10^{-6}$$

مقدار شیب در یاتاقان B در صفحه xoy:

$$\theta_B = -4.059361561 \times 10^{-6}$$

مقدار خیز در چرخ دنده 3 در صفحه xoy:

$$y_{0_3} = -0.219234549 \times 10^{-6} m$$

در صفحه xoz:

$$0.016 \leq x \leq 0.046 m \left\{ \begin{array}{l} \theta = \frac{-40.44x^2}{2 \times 62861.4} + 4.92028 \times 10^{-7} \\ y = \frac{-40.44x^3}{6 \times 62861.4} + 4.92028 \times 10^{-7} \times x - 7.43327 \times 10^{-9} \end{array} \right.$$

$$0.046 \leq x \leq 0.076 m \left\{ \begin{array}{l} \theta = \frac{80.88x^2}{2 \times 62861.4} - \frac{80.88 \times 46 \times x}{1000 \times 62861.4} - \frac{40.44x^2}{2 \times 62861.4} + \frac{16x}{1000 \times 62861.4} + 1.84159 \times 10^{-6} \\ y = \frac{80.88x^3}{6 \times 62861.4} - \frac{80.88 \times 46 \times x^2}{2000 \times 62861.4} - \frac{40.44x^3}{6 \times 62861.4} + \frac{16x^2}{2000 \times 62861.4} + 1.84159 \times 10^{-6} \times x \\ + 1.09129 \times 10^{-7} \end{array} \right.$$

مقدار شیب در یاتاقان A در صفحه xoz:

$$\theta_A = -7.79251 \times 10^{-7}$$

مقدار شیب در یاتاقان B در صفحه xoz:

$$\theta_B = 4.09683 \times 10^{-7}$$

مقدار خیز در چرخ دنده 3 در صفحه xoz:

$$y_{0_3} = 1.4272 \times 10^{-8}$$

مقدار کل شیب در یاتاقان A:

$$\theta_{A_{total}} = \sqrt{(16.71099403 \times 10^{-6})^2 + (-7.79251 \times 10^{-7})^2} = 16.7291528 \times 10^{-6}$$

مقدار کل شیب در یاتاقان B:

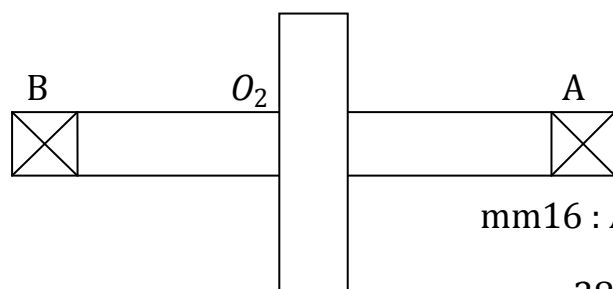
$$\theta_{B_{total}} = \sqrt{(-4.059361561 \times 10^{-6})^2 + (4.09683 \times 10^{-7})^2} = 4.079982407 \times 10^{-6}$$

مقدار کل شیب در چرخ دنده 2:

$$y_{0_{3total}} = \sqrt{(-0.219234549 \times 10^{-6})^2 + (1.4272 \times 10^{-8})^2} = 0.219698606 \times 10^{-6} m$$

با توجه به اینکه مقدار خیز مجاز در چرخ دنده ها 0.5 میلی متر است و هم چنین شیب مجاز در یاتاقان های شیار عمیق 0.0087 رادیان است پس بنابراین قطر انتخابی شفت مناسب و نهایی است.

طراحی شفت 2:



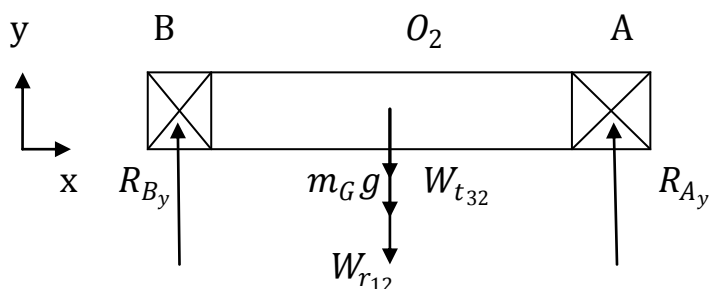
عرض یاتاقان A و B: 16 mm

عرض چرخ دنده 2: 38 mm

طول آزاد بین چرخ و یاتاقان: 5 mm

فرض طول شفت:

$$l = 16 + 16 + 5 + 5 + 38 = 80 \text{ mm}$$



$$W_{r12} = 80.88 \text{ N}$$

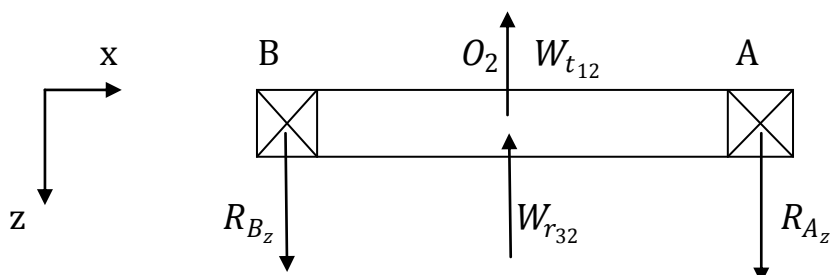
$$W_{t32} = 222.22 \text{ N}$$

$$m_G g = \rho g v = 76.5 \times 10^3 \times \pi \times R^2 \times F = 76.5 \times 10^3 \times \pi \times (45 \times 10^{-3})^2 \times 38 \times 10^{-3}$$

$$m_G g = 18.5 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0 \quad R_{B_y} \times \left(\frac{8+8+24+24}{1000} \right) - (W_{t32} + W_{r12} + m_G g) \left(\frac{24+8}{1000} \right) = 0 \quad R_{B_y} = 160.8 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0 \quad R_{A_y} = W_{t32} + W_{r12} + m_G g - R_{B_y} \quad R_{A_y} = 160.8 \text{ N}$$



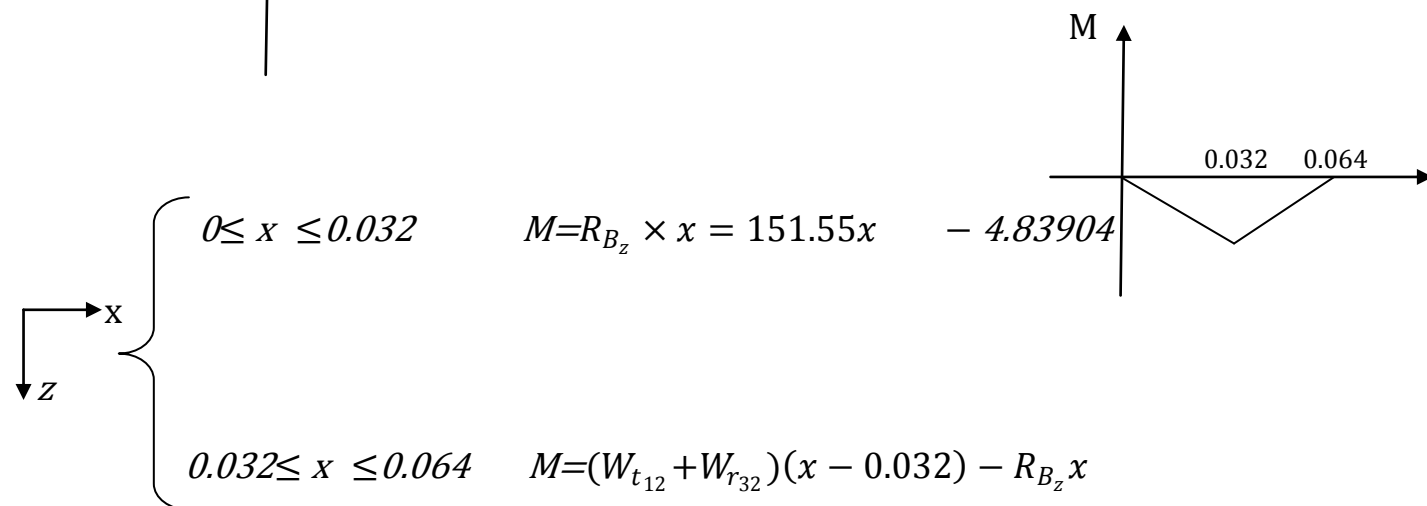
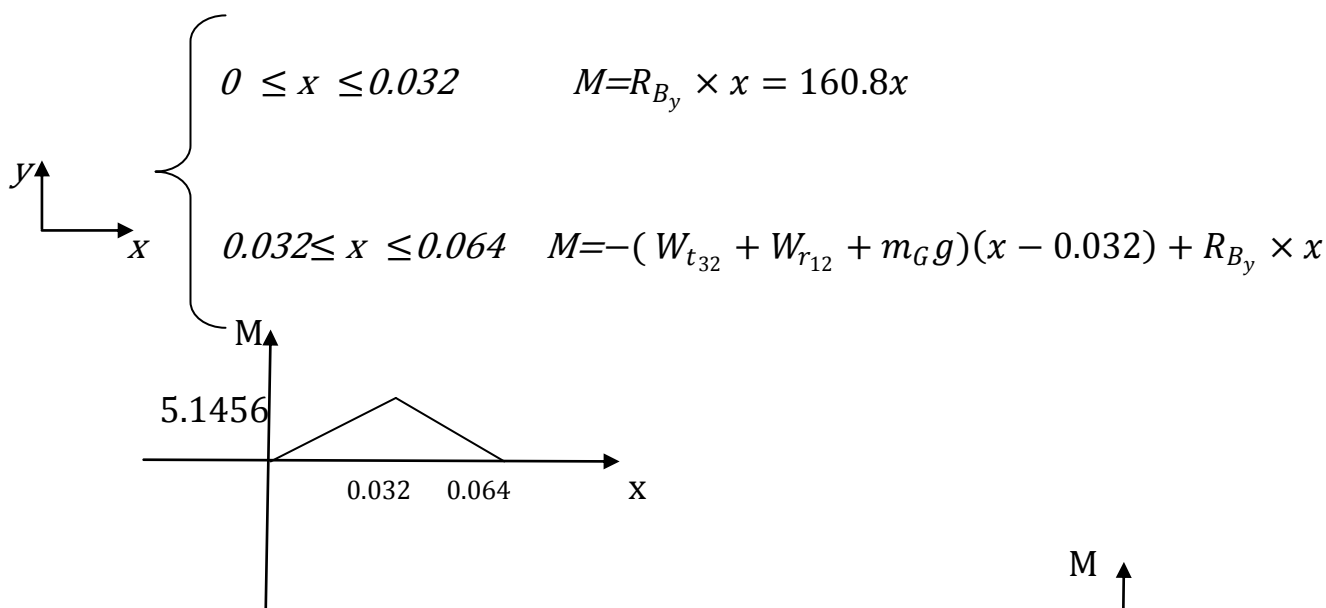
$$W_{t12} = 222.22 \text{ N}$$

$$W_{r32} = 80.88 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0 \quad R_{B_z} \left(\frac{24+24+8+8}{1000} \right) - (W_{t_{12}} + W_{r_{32}}) \left(\frac{24+8}{1000} \right) = 0 \quad R_{B_z} = 151.55 \text{ N}$$

$$\sum F_z = 0 \quad R_{B_z} = R_{A_z} = 151.55 \text{ N}$$

تحلیل مقاومت شفت 2 :

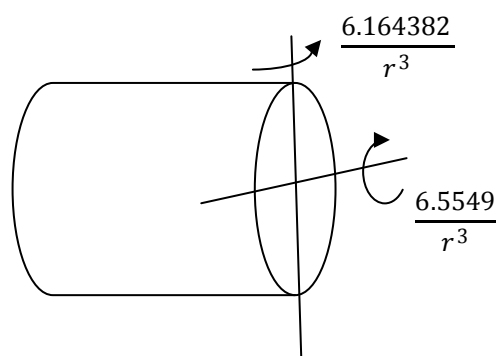


تنش در نقطه O_2 در صفحه xoy :

$$\sigma_{O_2} = \frac{M \times c}{I} = \frac{5.1456 \times r_2}{\frac{\pi}{64} (2r_2)^4} = \frac{6.5549}{r^3}$$

تنش در نقطه O_2 در صفحه xoz :

$$\sigma_{O_2} = \frac{M \times c}{I} = \frac{4.83904 \times r_2}{\frac{\pi}{64} (2r_2)^4} = \frac{6.164382}{r^3}$$



با توجه به شکل ضعیف ترین نقطه دارای تنش $\frac{6.5549}{r^3}$ است.

ولی با توجه به این که شفت در حال دوران است پس این تنش دامنه آن بوده و مقدار متوسط آن صفر است.

$$\sigma: \begin{cases} \sigma_a = \frac{6.5549}{r^3} pa = \frac{6.5549}{10^6 r^3} mpa \\ \sigma_m = 0 \end{cases}$$

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

برای فولاد $HR1020$ از جدول الف-23 برابر با $440 mpa$ است S_{ut} :
 با فرض دمای کاری $50^\circ C$ از جدول $k_d 6-7$ برابر خواهد بود با 1.010

$$S_{ut} = k_d S_{RT} = 1.010 \times 440 = 444.4 mpa$$

$$S'_e = 0.504 \times 444.4 = 223.9776 mpa$$

$$k_a = 1.58 \times S_{ut}^{-0.085} = 0.9410$$

$$k_b = 1.24 d^{-0.107}$$

$$k_c = 1 \text{ (خمشی بارگذاری)}$$

$$k_f = 1 \text{ (ضریب تمرکز تنش)}$$

$$k_e = 0.897 \text{ (با اعتماد پذیری 90 درصد)}$$

$$S_e = 0.9410 \times 1.24 d^{-0.107} \times 1 \times 0.897 \times 1 \times 223.9776 = 136.9427 d^{-0.107} mpa$$

با استفاده از معیار گودمن:

$$\frac{n \sigma_a}{S_e} + \frac{n \sigma_m}{S_{ut}} = 1$$

با ضریب طراحی 2 شعاع مجاز خواهد بود با:

$$\frac{2 \times \frac{6.5549}{10^6 \times r^3}}{136.9427 (2r)^{-0.107}} = 1 \quad r = 0.0038455 m = 3.8455 mm$$

با توجه به کاتالوگ یاتاقان ها برای جلوگیری از تمرکز تنش و قطر یکسان 30 میلی متر قطر شفت و یا 15 میلی متر شعاع شفت را گزینش می کنیم.

طراحی با خیز و شیب برای شفت 2:

برای فولاد 1020 :

$$E=205 \text{ Gpa} \quad \& \quad I=\frac{\pi}{64}d^4=\frac{\pi}{64}(30 \times 10^{-3})^4 \quad EI=8146.82825 \text{ pa. m}^4$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq x \leq 0.032 \quad EI\theta = 80.4x^2 + c_1 \quad Ely=26.8x^3 + c_1x + c_2 \\ 0.032 \leq x \leq 0.064 \quad EI\theta = 10.2912x - 80.4x^2 + c_1 \\ Ely=5.1456x^2 - 26.8x^3 + c_1x + c_2 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq x \leq 0.032 \quad EI\theta = -75.775x^2 + c_1 \quad Ely=-25.2583x^3 + c_1x + c_2 \\ 0.032 \leq x \leq 0.064 \quad EI\theta = -9.6992x + 75.775x^2 + c_1 \\ Ely=-4.8496x^2 + 25.2583x^3 + c_1x + c_2 \end{array} \right.$$

با توجه به اینکه در یاتاقان ها خیز صفر است بنابر این مجهولات در معادلات فوق پیدا می شوند:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq x \leq 0.032 \quad EI\theta = 80.4x^2 - 0.0823293 \\ Ely=26.8x^3 - 0.0823243x \\ 0.032 \leq x \leq 0.064 \quad EI\theta = 10.2912x - 80.4x^2 - 0.246989 \\ Ely=5.1456x^2 - 26.8x^3 - 0.246989x + 0.00175636 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 0 \leq x \leq 0.032 & EI \theta = -75.775x^2 + 0.0775929 \\
 & Ely = -25.2583x^3 + 0.0775929x \\
 0.032 \leq x \leq 0.064 & EI \theta = -9.6992x + 75.775x^2 + 0.23278 \\
 & Ely = -4.8496x^2 + 25.2583x^3 + 0.23278x - 0.0289488
 \end{array} \right.$$

شیب در یاتاقان B:

$$EI\theta_B = \sqrt{(-0.0823293)^2 + (0.0775929)^2} = 0.113132$$

$$\theta_B = \frac{0.113132}{EI} = \frac{0.113132}{8146.828125} = 0.000013886589364$$

شیب در یاتاقان A:

$$EI\theta_A = \sqrt{(0.0823294)^2 + (-0.0775944)^2} = 0.113133$$

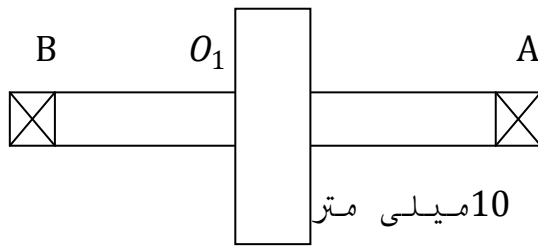
$$\theta_A = \frac{0.113133}{EI} = \frac{0.113133}{8146.828125} = 0.000013886589364$$

خیز در چرخ دنده 2:

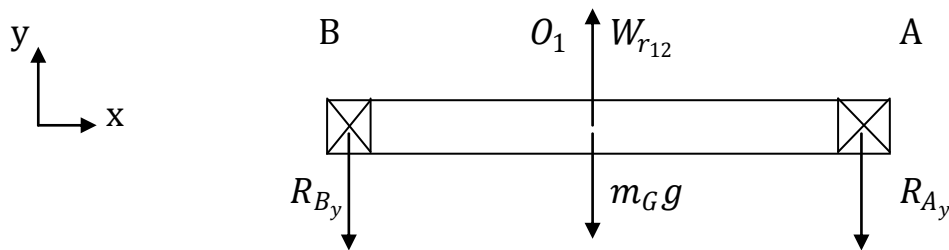
$$Ely_{O_2} = \sqrt{(-0.00175637)^2 + (0.00165531)^2} = 0.00241348 \text{ m}$$

$$y_{O_2} = \frac{0.00241348}{EI} = \frac{0.00241348}{8146.828125} = 2.96248 \times 10^{-7} \text{ m}$$

باتوجه به اینکه مقدار خیز مجاز در چرخ دنده ها 0.25 میلی متر است
و مقدار شیب مجاز در یاتاقانهای ساچمه ای برابر با 0.0087 رادیان است
بنابراین شفت دارای قطر مناسب و نهایی است.



عرض یاتاقان B و A : 10 میلی متر
 عرض چرخ دنده 1 : 38 میلی متر
 طول آزاد بین چرخ و یاتاقان : 5 میلی متر
 فرض طول شفت :
 $l = 10 + 10 + 38 + 5 + 5 = 68 \text{ mm}$
 تحلیل استاتیکی :



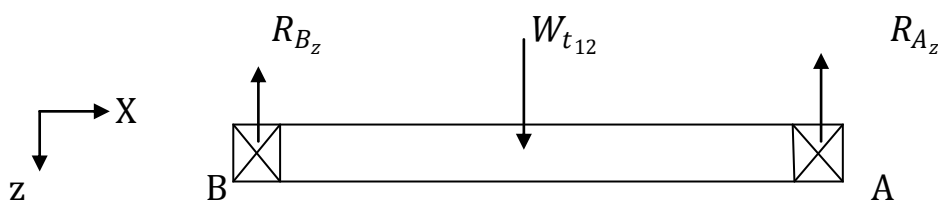
$$W_{r12} = 80.88 \text{ N}$$

$$m_G g = \rho g v = 76.5 \times 10^3 \times \pi \times R_1^2 \times F = 76.5 \times 10^3 \times \pi \times \left(\frac{22.5}{1000}\right)^2 \times 38 \times 10^{-3}$$

$$m_G g = 4.62 \text{ N}$$

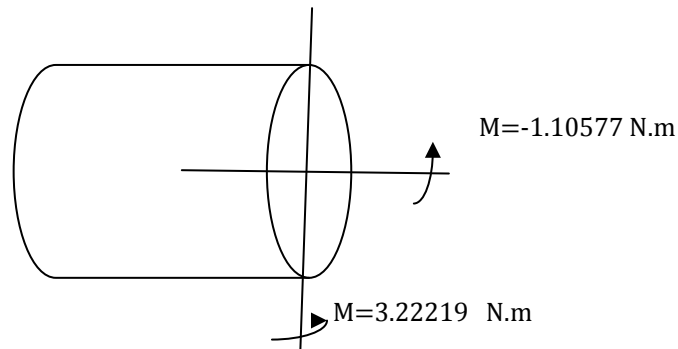
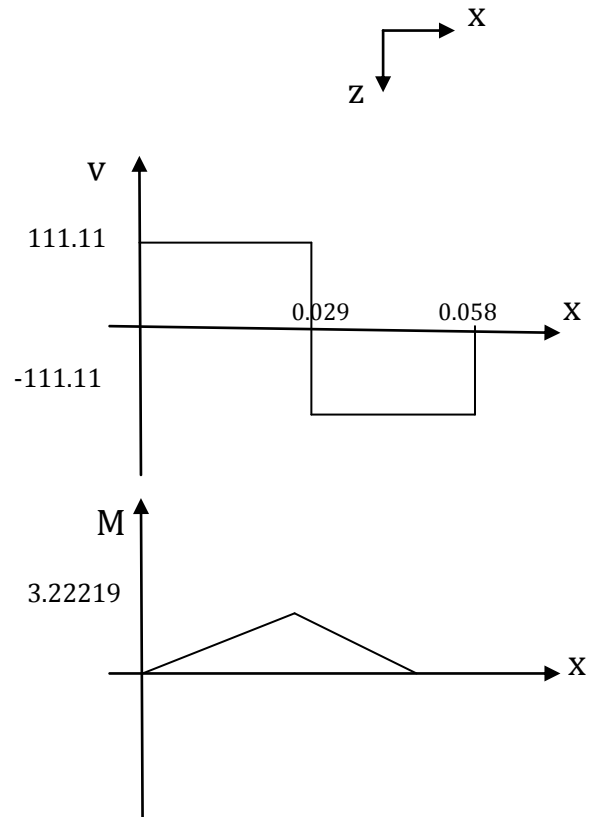
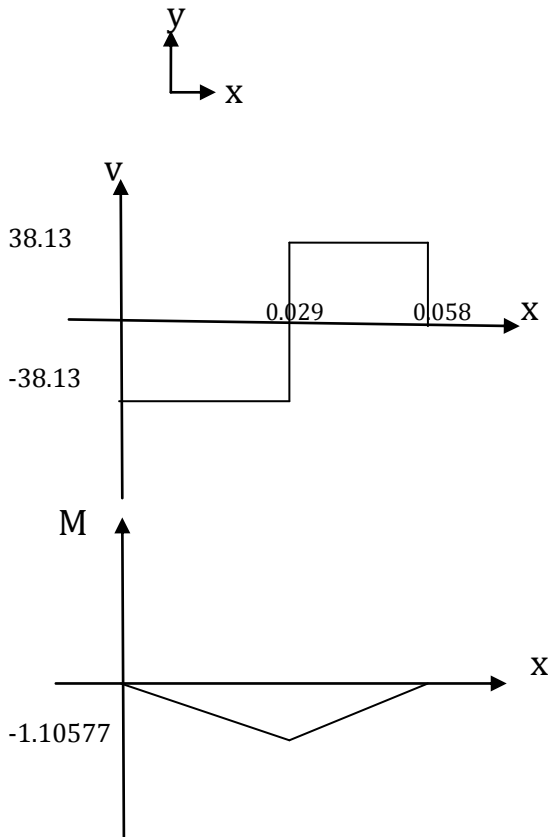
$$\sum M_A = 0 \quad R_{B_y} \times \frac{2 \times 5 + 2 \times 24}{1000} + (m_G g - W_{r12}) \times \frac{24 + 5}{1000} = 0 \quad R_{B_y} = 38.13 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0 \quad R_{A_y} = R_{B_y} = 38.13 \text{ N}$$



$$R_{A_z} = R_{B_z} = \frac{W_{t12}}{2} = \frac{222.22}{2} = 111.11 \text{ N}$$

تحلیل مقاومت برای شفت 1:



$$\sigma_{\text{خمشی}} = \frac{M.c}{I} = \frac{3.22219.r}{\frac{\pi}{64}(2r)^4} = \frac{4.1047}{r^3} \text{ pa}$$

ضعیف ترین نقطه از لحاظ تنش خمشی دارای گشتاور 3.22219 نیوتن برمتر است.

گشتاور پیچشی:

$$\tau = \frac{T\rho}{J} = \frac{222.22 \times 22.5 \times 10^{-3} \times r}{\frac{\pi}{32}(2r)^4} = \frac{3.18468}{r^3} \text{ pa}$$

$$\sigma: \begin{cases} \sigma_a = \frac{4.1047}{r^3} pa \\ \sigma_m = 0 pa \end{cases} \quad \tau: \begin{cases} \tau_a = 0 pa \\ \tau_m = \frac{3.18468}{r^3} pa \end{cases}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{6} \tau_m = \frac{7.80084}{r^3 \times 10^6} mpa \quad \sigma'_a = \frac{4.1047}{r^3} pa = \frac{4.1047}{10^6 \times r^3} mpa$$

با استفاده از معیار گود من:

$$\frac{n\sigma_a}{S_e} + \frac{n\sigma_m}{S_{ut}} = 1$$

S_{ut} & S_e :

برای فولاد HR1020 از جدول الف - 23 :

$$S_{ut} = 440 mpa$$

با جدول 6 - 7 برای دمای کاری $50^\circ C$:

$$k_d = 1.010 \quad S_{ut} = 1.010 \times 440 = 444.4 mpa$$

$$S'_e = 0.504 \times 444.4 = 223.9776 mpa$$

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

$$k_a = a S_{ut}^b = 1.58 (444.4)^{-0.085} \quad k_b = 1.24 d^{-0.107}$$

$$k_c = \begin{cases} 0.59 & \text{پیچش} \\ 1 & \text{خمشی} \\ 0.85 & \text{محوری} \end{cases} \quad k_c = 0.59 \times 1 = 0.59 \quad k_f = 1 \text{ ضریب تمرکز تنش}$$

$$k_e = 0.897 \quad \text{با اعتماد پذیری 90 درصد}$$

$$S_e = 0.9410 \times 1.24 d^{-0.107} \times 0.59 \times 1 \times 0.897 \times 223.9776 = 138.3121556 d^{-0.107}$$

$$\frac{\frac{n \times 4.107}{10^6 r^3}}{138.3121556 d^{-0.107}} + \frac{\frac{7.80084}{10^6 r^3}}{444.4} = 1$$

با ضریب طراحی 2 :

$$r_{\text{حداقل}} = 0.0037511 m = 3.7511 mm$$



باتوجه به کاتالوگ یاتاقان ها به دخواه قطر 12 میلی متر و یا شعاع 6 میلی متر را برمی گزینیم تا شفت قطر یکسان داشته باشد و از تمرکز تنش جلوگیری شود و اگر از محاسبات خیز و شیب مناسب بیاید این اندازه رابه عنوان مقدار نهایی بر می گزینیم.

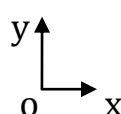
طراحی شفت 1 به کمک خیز و شیب:

$$EI: \quad E=205 \text{ Gpa} \quad \& \quad I=\frac{\pi}{64}d^4 = \frac{\pi}{64}(12 \times 10^{-3})^4 \quad EI = 208.6645 \text{ pa.m}^4$$

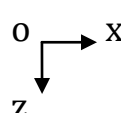
$$\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{ll} 0 \leq x \leq 0.029 & M=-38.13x \\ & EI\theta = -19.065x^2 + c_1 \\ & Ely=-6.355x^3 + c_1x + c_2 \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{ll} 0.029 \leq x \leq 0.058 & M=-38.13x + 76.26(x - 0.029) \\ & EI\theta = -2.21154x + 19.065x^2 + c_1 \\ & Ely=-1.10577x^2 + 6.355x^3 + c_1x + c_2 \end{array} \right. \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{ll} 0 \leq x \leq 0.029 & M=111.11x \\ & EI\theta = 55.555x^2 + c_1 \\ & Ely=18.518x^3 + c_1x + c_2 \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{ll} 0.029 \leq x \leq 0.058 & M=111.11x - 222.22(x - 0.029) \\ & EI\theta = 6.44438x - 55.555x^2 + c_1 \\ & Ely=3.22219x^2 - 18.518x^3 + c_1x + c_2 \end{array} \right. \end{array}$$

تعیین مقادیر مجهول با شرایط اولیه (خیز در یاتاقان ها صفر است):



$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq x \leq 0.029 \quad EI \theta = -19.065x^2 + 0.0160336 \\ EI y = -6.355x^3 + 0.0160336x \\ 0.029 \leq x \leq 0.058 \quad EI \theta = -2.21154x + 19.065x^2 + 0.0481009 \\ EI y = -1.10577x^2 + 6.355x^3 + 0.0481009x - \\ 0.000309984 \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq x \leq 0.029 \quad EI \theta = 55.555x^2 - 0.0467218 \\ EI y = 18.5183x^3 - 0.0467218x \\ 0.029 \leq x \leq 0.058 \quad EI \theta = 6.444438x - 55.555x^2 - 0.140165 \\ EI y = 3.22219x^2 - 18.5183x^3 - 0.140165x + \\ 0.000903286 \end{array} \right.$$

شیب در یاتاقان B:

$$EI\theta_{B_{total}} = \sqrt{(0.0160336)^2 + (-0.0467218)^2} = 0.0493964$$

$$\theta_{B_{total}} = \frac{0.0493964}{EI} = \frac{0.0493964}{208.6645} = 0.000236726$$

شیب در یاتاقان A:

$$EI\theta_{A_{total}} = \sqrt{(-0.0160314)^2 + (0.0456722)^2} = 0.0493959$$

$$\theta_{A_{total}} = \frac{0.0493959}{EI} = \frac{0.0493959}{208.6645} = 0.000236724$$

خیز در چرخ دنده 1:

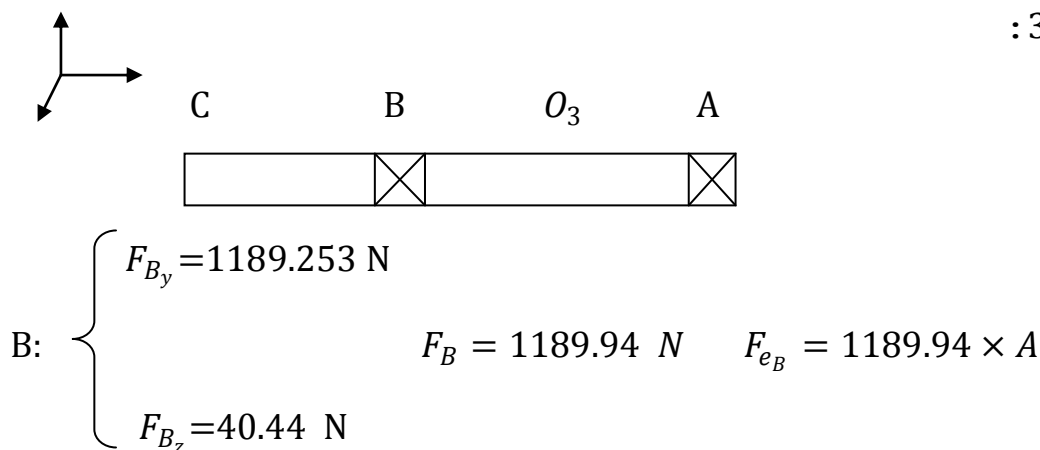
$$EI y_{O_3_{total}} = \sqrt{(0.000309982)^2 + (-0.000903289)^2} = 0.000954998$$

$$y_{O_3_{total}} = \frac{0.000954998}{EI} = \frac{0.000954998}{208.6645} = 4.57672 \times 10^{-6} \text{m}$$

با توجه به اینکه حداکثر شیب در یاتاقانهای شیار عمیق 0.0087 رادیان است و حداکثر خیز در چرخ دنده ها 0.05 میلی متر است پس مقدار قطر انتخابی 12 میلی متر برای چنین شفتی مناسب می باشد.

انتخاب یاتاقان ها :

یاتاقان های شفت 3 :



A: ضریب بار از جدول 5-11 که برای چرخهای تجاری برابر 1.2 است

$$F_{eB} = 1189.94 \times 1.2 = 1.4279 \text{ N} = F_D$$

به خاطر عدم وجود نیروی محوری در یاتاقان ها از یاتاقان های ساچمه ای شیار عمیق استفاده می کنیم

$$F_R = C_{10} = F_D \left[\frac{\frac{60L_D n_D}{60L_R n_R}}{0.02 + 4.48 \left[l_n \left(\frac{1}{R} \right) \right]^{1.5}} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$60L_R n_R = 10^6 \quad R = 0.9 \text{ (قابلیت اعتماد پذیری)}$$

$$L_D n_D: \quad n_D = \omega_3 \times \frac{60}{2\pi} = 190.9859 \text{ r.p.m.}$$

با فرض هر روز 6 ساعت کار به مدت 12 سال :

$$L_D = 6 \times 365 \times 12 = 26280 \text{ hrs} = 1576800 \text{ mins}$$

$$60L_D n_D = 1.807 \times 10^{10}$$

$$\Rightarrow C_{10} = 37.2235 \text{ KN}$$

از جدول 2-11 برای یاتاقان های شیار عمیق برابر با 43.6 کیلو نیوتن را گزینش می کنیم.

$$A: \begin{cases} F_{A_y} = 914.9 \text{ N} \\ F_{A_z} = 40.44 \text{ N} \end{cases} \Rightarrow F_A = 950.486 \text{ N} = 0.950486 \text{ KN}$$

$$F_{e_A} = 1.2 \times 0.950486 = 1.14105 \text{ KN}$$

$$F_R = C_{10} = F_D \left[\frac{\frac{60 L_D n_D}{60 L_R n_R}}{0.02 + 4.48 \left[l_n \left(\frac{1}{R} \right) \right]^{\frac{1}{1.5}}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad 60 L_R n_R = 10^6 \quad \& \quad 60 L_D n_D = 1.807 \times 10^{10}$$

$$F_R = C_{10} = 22.5 \text{ KN}$$

از جدول 2-11 بهترین گزینه برای این یاتاقان 25.5 کیلو نیوتن است. ولی جهت این که قطر سوراخ و یا همان قطر شفت تغییر نکند مانند یاتاقان 43.7 B کیلو نیوتن را انتخاب می کنیم.

انتخاب یاتاقان های شفت 2:

چون شفت 2 متقارن است و نیرو های وارد بر هر دو یکسان است پس گزینش نوع یاتاقان در هر دو یکسان است:

$$F_{A_y} = F_{B_y} = 212.353 \text{ N}$$

$$F_{A_z} = F_{B_z} = 151.55 \text{ N} \Rightarrow F_A = F_B = 260.8854 \text{ N}$$

$$F_e = A.F_B = 1.2 \times 260.8854 = 0.313062 \text{ KN} = F_D$$

$$F_R = C_{10} = F_D \left[\frac{\frac{60 L_D n_D}{60 L_R n_R}}{0.02 + 4.48 \left[l_n \left(\frac{1}{R} \right) \right]^{\frac{1}{1.5}}} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$60 L_R n_R = 10^6$$

$$n_D = \omega_2 \times \frac{60}{2\pi} = 477.707 \text{ r.p.m.}$$

با 8 ساعت کار در 12 سال:

$$L_D = 8 \times 365 \times 12 = 35040 \text{ hrs} = 2102400 \text{ mins}$$

$$60L_D n_D = 6.0250987 \times 10^{10}$$

(قابلیت اعتماد پذیری) $R=0.9$

$$F_R = C_{10} = 12.19 \text{ KN}$$

برای جلو گیری از تمرکز تنش 19.5 کیلو نیوتن را انتخاب می کنیم تا قطر سوراخ برابر با قطر شفت باشد.

انتخاب یاتاقان های شفت 1:

$$F_{A_y} = F_{B_y} = 50.30685 \text{ N}$$

$$F_{A_z} = F_{B_z} = 40.44 \text{ N} \Rightarrow F_A = F_B = 64.5459 \text{ N} = 0.0645459 \text{ KN}$$

$$F_e = A \times F_A = 1.2 \times 0.0645459 = 0.0774551 \text{ KN}$$

$$60L_R n_R = 10^6 \quad n_D = \omega_1 \times \frac{60}{2\pi} = 955.4140 \text{ r.p.m.} \quad R=0.9$$

$$L_D = 12 \times 10 \times 365 = 43800 \text{ hrs} = 2628000 \text{ mins}$$

(با روزی 10 ساعت کار در 12 سال)

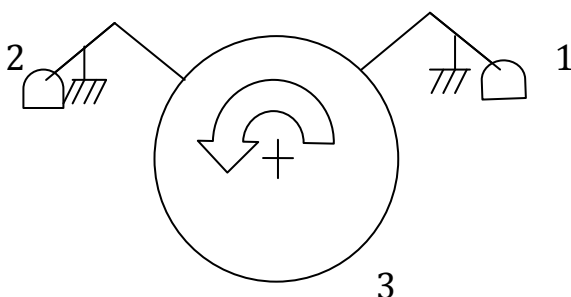
$$F_R = 4.1 \text{ KN}$$

بهترین مقدار برابر با 5.07 کیلو نیو تن با توجه به جدول 11-2 در قسمت شیار عمیق است.

سیستم قفل کن:

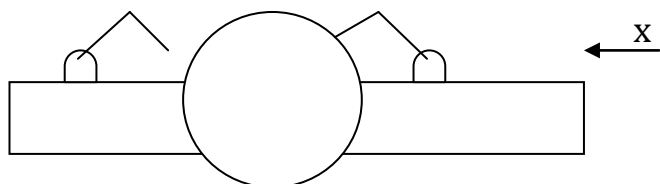
یک سیستم قفل کن ساده روی چرخ دنده 3 نصب می شود و به هنگام توقف الکترو موتور گشت آور جسم خارجی را روی شفت 3 خنثی می کند.

اما برای جلو گیری از عمل قفل کن هنگام آوردن مصالح به پایین باید به تعداد دو نوع از این سیستم ها بکار برده شود.

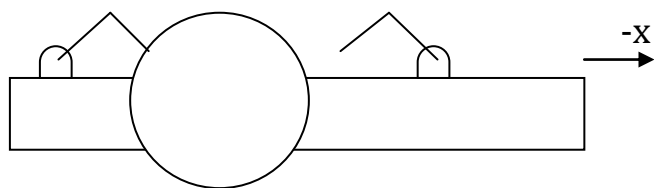


به هنگام حرکت جسم 100 کیلویی به طرف بالا چرخ 3 در جهت نشان داده شده می چرخد. پس سیستم قفل کن 1 باید فعال باشد ولی هنگام پایین آوردن جسم چرخ 3 در خلاف جهت نشان داده شده می چرخد و قفل کن 2 باید فعال باشد:

اما چگونگی فعال و غیر فعال کردن سیستم قفل کن به این شکل است که:



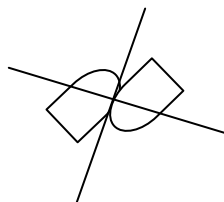
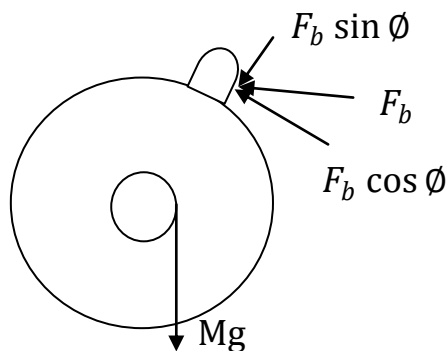
هنگام حرکت جسم 100 کیلویی به بالا



هنگام حرکت جسم 100 کیلویی به پایین

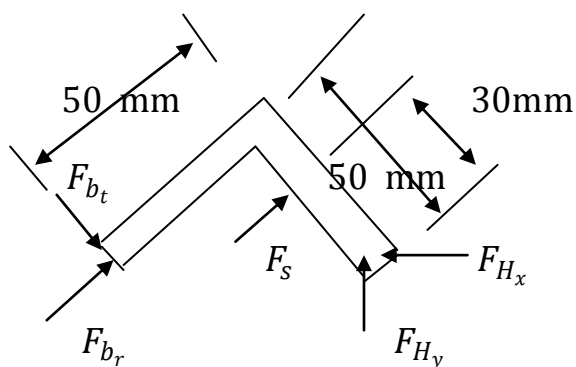
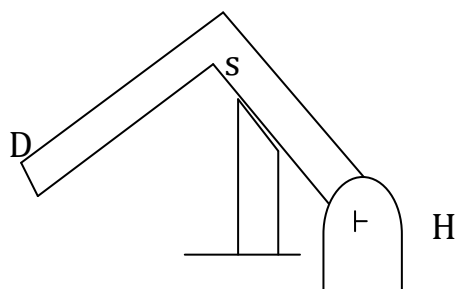
تحلیل استاتیکی قفل کن:

اگر نوک قفل کن را دقیقاً به شکل و اندازه دنده در گیر ساخته شود:



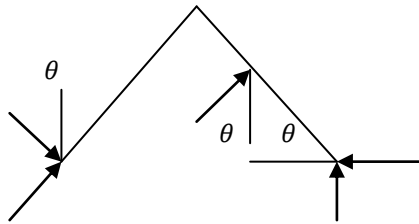
$$\sum M_{O_3} = 0 \quad Mg \cdot r_3 = R_3 \cdot F_b \cos \phi \quad F_b = \frac{Mg \cdot r_3}{R_3 \cdot \cos \phi} = \frac{981 \times 25 \times 10^{-3}}{112.5 \times 10^{-3} \times \cos 20} = 246.889 \text{ N}$$

$$F_b \sin \phi = 84.44 \text{ N} \quad F_b \cos \phi = 232 \text{ N}$$



$$\sum M_H = 0 \quad 232 \times 50 \times 10^{-3} - F_s \times 30 \times 10^{-3} - 84.437729 \times 10^{-3} = 0$$

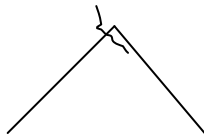
$$F_s = 245.937 \text{ N}$$



$$\sum F_x = 0 \quad -F_{Hx} + F_{bt} \sin \theta + F_s \sin \theta + F_{br} \cos \theta = 0 \quad F_{Hx} = 456.1245 \text{ N}$$

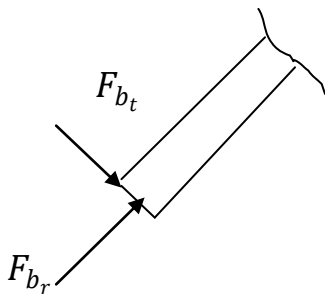
$$\sum F_y = 0 \quad -F_{bt} \cos \theta + F_s \cos \theta + F_{Hy} + F_{br} \sin \theta = 0 \quad F_{Hy} = -80.09377$$

جهت این نیرو بر عکس خواهد بود.

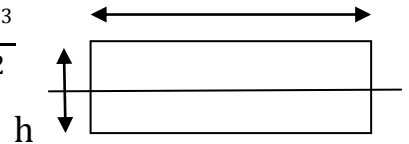


تحلیل مقاومتی قفل کن:

جهت تحلیل همانند شکل یک برش زده و هر قسمت را جدا گانه تحلیل می کنیم.



$$\sigma_{\text{خمشی}} = \frac{M \times c}{I} \quad \& \quad c = \frac{h}{2} \quad \& \quad M = F_{bt} \times 0.05 \quad \& \quad I = \frac{bh^3}{12}$$



$$\sigma_{\text{خمشی}} = \frac{1831.5789}{h^2} \text{ pa}$$

$$\sigma_{\text{فشاری}} = \frac{F_{br}}{bh} = \frac{2222.05}{h} \text{ pa}$$

$$n = \frac{\sigma_{\text{all}}}{\sigma_{\text{max}}}$$

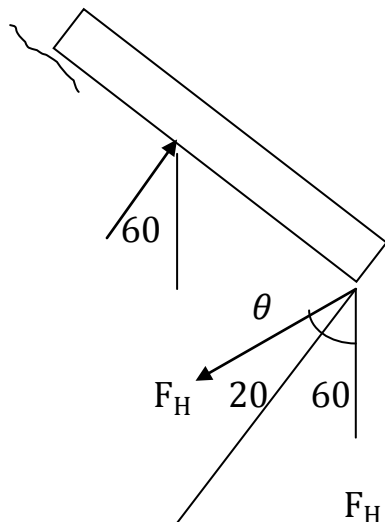
با ضریب طراحی 2 و تنش تسلیم برابر با 207 مگا پاسکال

برای فولاد 1020

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{207}{2} = 103.5 \text{ mpa} \quad 103.5 \times 10^6 = \frac{1831.5789}{h^2} + \frac{2222.05}{h}$$

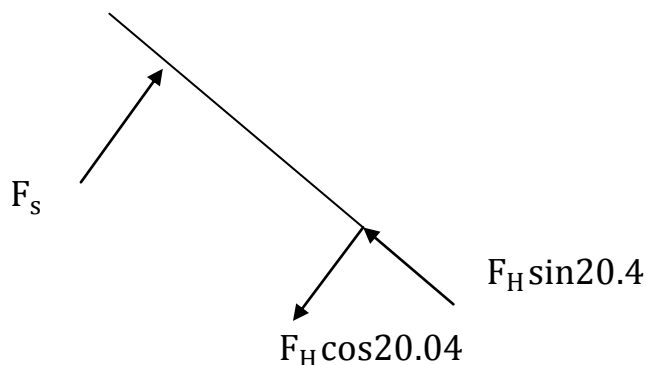
$$H = 0.00421746 \text{ m} = 4.22 \text{ mm}$$

قسمت بعد برش:



$$\tan \theta = \frac{F_{Hx}}{F_{Hy}} \quad \theta = \tan^{-1} \frac{456.1245}{80.09377} = 80.04^\circ$$

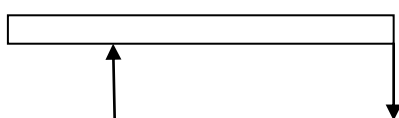
$$F_H = \sqrt{(456.1245)^2 + (80.09377)^2} = 463.103 \text{ N}$$



$$\sigma_{\text{فشاری}} = \frac{F_H \sin 20.4}{bh} = \frac{4176.168}{h} \text{ pa}$$

$$\sigma_{\text{خمشی}} = \frac{M \times c}{I} \quad \& \quad c = \frac{h}{2} \quad \& \quad I = \frac{bh^3}{12}$$

M:



$$M_{max} = F_H \cos 20.04 \times 0.03 = 16.8344 \text{ N.M}$$

$$\sigma_{\text{خمشی}} = \frac{2658.0724}{h^2} \quad \& \quad n = \frac{\sigma_{all}}{\sigma}$$

با ضریب طراحی 2 و تنش تسلیم برای فولاد 1020 برابر با 207 مگا پاسکال خواهیم داشت:

$$\frac{4176.168}{h} + \frac{2658.0724}{h^2} = 103.5 \times 10^6$$

$$h = 0.00509 \text{ m} = 5.09 \text{ mm}$$

با توجه به دو مقدار h مقدار نهایی آن برابر خواهد بود با:
h=6mm