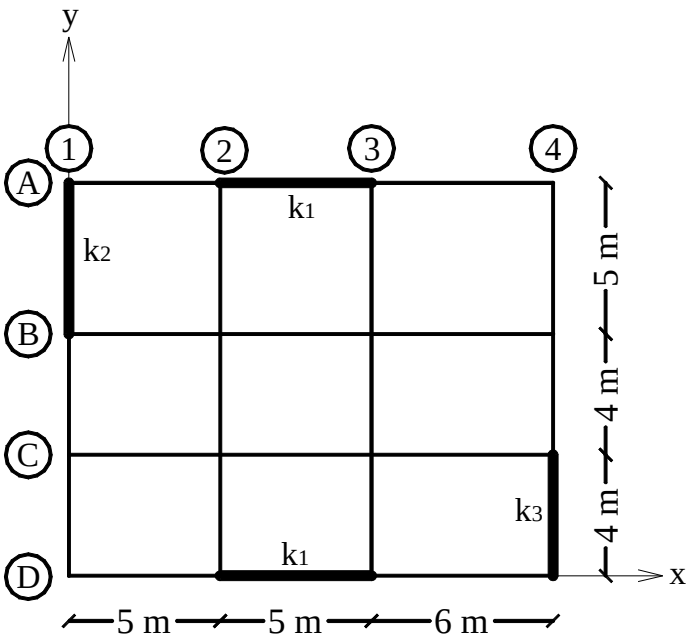
مثال ۱: یک بیمارستان هشت طبقه در بندر انزلی با پلان مطابق شکل مفروض است. بار مرده و زنده کف $\omega_D = 800\,kg/m^2$ و $\omega_L = 350\,kg/m^2$ برای طبقات و $\omega_D = 600\,kg/m^2$ و $\omega_L = 200\,kg/m^2$ برای بام تخت می‌باشد (در اینجا برای سهولت حل مسأله فرض می‌شود وزن ساختمان تنها ناشی از بارهای مشروحه فوق در طبقات با توزیع یکنواخت در تمام طبقه است. بدیهی است در طراحی باید وزن کلیه اجزا را مطابق مبحث شماره ۶ مقررات ملی ساختمان در نظر گرفت). ارتفاع طبقه همکف ۲/۸ متر و بقیه طبقات ۳/۵ متر می‌باشد. ساختمان در هردوجهت مجهز به سیستم باربر جانبی دیوار برشی بتن‌آرمه با شکل‌پذیری متوسط است. زمینی که ساختمان برروی آن بنا شده است، از نهشته‌های نرم با سطح آب زیرزمینی بالا تشکیل شده است. مرکز جرم هر طبقه منطبق بر مرکز سطح آن فرض می‌گردد (بدیهی است در طراحی باید موقعیت دقیق آن محاسبه گردد).

الف ـ مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران، نیروی جانبی ناشی از زلزله وارده به ساختمان را در جهت y محاسبه نموده، در ارتفاع توزیع کنید.

ب ـ کل نیروی جانبی ناشی از زلزله وارده در جهت y را بر دیوار واقع در محور ۴ در طبقه ششم محاسبه کنید.

$k_1 = 20\ t/cm$
$k_2 = 25\ t/cm$
$k_3 = 16\ t/cm$



حل:

الف ـ وزن مؤثر در زلزله محاسبه می‌شود.

$$A = (5+5+6)(4+4+5) = 208\ m^2$$
$$W_f = (800 + 0.4\times 350)(208) = 195.5\ t$$
$$W_r = (600 + 0.2\times 200)(208) = 133.1\ t$$
$$W = 133.1 + 7\times 195.5 = 1501.6\ t$$

پارامترهای لازم برای محاسبه ضریب زلزله و نیروی برشی ناشی از زلزله محاسبه می‌شوند.

$$V = CW$$
$$C = \frac{ABI}{R}$$

طبق نقشه پهنه‌بندی خطر نسبی لرزه‌خیزی (یا جدول پیوست ۱)، بندر انزلی در ناحیه با خطر نسبی لرزه‌خیزی زیاد قرار دارد، بنابراین طبق جدول ۲ نسبت شتاب مبنای طرح $A = 0.3$ می‌باشد. برای محاسبه ضریب بازتاب، ارتفاع ساختمان را محاسبه می‌کنیم.

$$H = 2.8 + 7\times 3.5 = 27.3\ m$$

ساختمان مجهز به دیوار برشی بتنی متوسط می‌باشد پس برای محاسبه زمان تناوب، در رده "سایر سیستم‌های ساختمانی" قرار می‌گیرد.

$T = 0.05H^{3/4} = 0.05 \times 27.3^{3/4} = 0.6\ s$

با توجه به داده‌های مسأله، زمین ساختگاه از گروه IV بوده، خطر نسبی لرزه‌خیزی نیز زیاد است.

$S = 1.75 \qquad T_0 = 0.15 \qquad T_S = 1.0$

$T_0 < T < T_S \quad \rightarrow \quad B = 1 + S = 1 + 1.75 = 2.75$

کاربری ساختمان بیمارستان می‌باشد و طبق بند ۱-۷ آیین‌نامه، در گروه با اهمیت خیلی زیاد دسته‌بندی می‌شود و طبق جدول ۵، $I = 1.4$ است. ساختمان مجهز به دیوار برشی بتنی متوسط است در نتیجه $R = 7$ در نظر گرفته می‌شود.

$$C = \frac{0.3 \times 2.75 \times 1.4}{7} = 0.165$$

$V = CW = 0.165 \times 1501.6 = 247.76\ t$

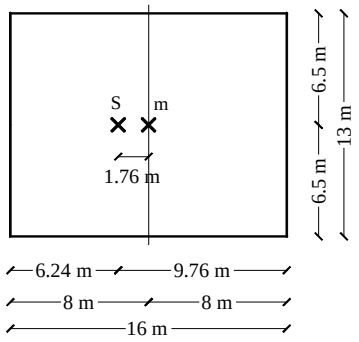
$T = 0.6 < 0.7 \quad \rightarrow \quad F_t = 0$

n	W_i	h_i	$W_i h_i$	$F_i = (V - F_t)\frac{W_i h_i}{\sum_{j=1}^{n} W_j h_j}$
8	133.1	27.3	3633.63	41.23
7	195.5	23.8	4652.9	52.80
6	195.5	20.3	3968.65	45.03
5	195.5	16.8	3284.4	37.27
4	195.5	13.3	2600.15	29.50
3	195.5	9.8	1915.9	21.74
2	195.5	6.3	1231.65	13.98
1	195.5	2.8	547.4	6.21
	$\sum = 1501.6$		$\sum = 21834.68$	$\sum = 247.76$ √

ب ـ مرکز جرم طبقات در مسأله داده شده است. لازم است موقعیت مرکز سختی طبقه ششم محاسبه گردد (در این مسأله مراکز سختی کلیه طبقات در پلان برهم منطبق هستند). در هرصورت تنها مختصات مرکز سختی طبقه ششم موردنیاز می‌باشد.

$$\overline{X}_S = \frac{\sum_i k_{yi} x_i}{\sum_i k_{yi}} = \frac{25 \times 0 + 16 \times 16}{25 + 16} = 6.24$$

$$\overline{Y}_S = \frac{\sum_i k_{xi} y_i}{\sum_i k_{xi}} = \frac{20 \times 0 + 20 \times 20}{20 + 20} = 6.5$$



مرکز سختی طبقه ششم $S_6 \begin{cases} 6.24 \\ 6.5 \end{cases}$

مرکز جرم کلیه طبقات $m_i \begin{cases} 8 \\ 6.5 \end{cases}$

لنگر پیچشی در طبقه ششم محاسبه می‌گردد.

$$M_i = \sum_{j=i}^{n} (e_{ij} + e_{aj}) F_j$$

$$M_6 = (e_{66} + e_{a6}) F_6 + (e_{67} + e_{a7}) F_7 + (e_{68} + e_{a8}) F_8$$

$$M_6 = [(8 - 6.24) + 0.05 \times 16] \times 45.03 + [(8 - 6.24) + 0.05 \times 16] \times 52.8 + [(8 - 6.24) + 0.05 \times 16] \times 41.23$$

$$M_6 = (1.76 + 0.8) \times 45.03 + (1.76 + 1.8) \times 52.8 + (1.76 + 0.8) \times 41.23$$

$$M_6 = 356 \ t.m \quad (counterclockwise)$$

نیروی کل وارده بردیوار مورد نظر حاصل از برش مستقیم و پیچش محاسبه می‌گردد.

$$P_{i_r} = \frac{k_y}{\sum k_y} \times V_{r_y} \pm \frac{k_y X}{\sum k_x Y^2 + \sum k_y X^2} \times M_r$$

ملاحظه می‌شود دیوار مورد نظر در سمت راست مرکز سختی قرار دارد و نیروی زلزله در جهت y باعث پیچش پادساعتگرد ساختمان می‌شود. در نتیجه پیچش باعث تشدید نیروی وارده به دیوار می‌گردد و باید از علامت مثبت جمله دوم معادله فوق استفاده کرد.

$$P_{4_6} = \frac{k_3}{k_2 + k_3} \times V_6 + \frac{k_3 X}{\sum k_x Y^2 + \sum k_y X^2} \times M_6$$

$$P_{4_6} = \frac{16}{16 + 25} \times (45.03 + 52.8 + 41.23) + \frac{16 \times (16 - 6.24)}{2 \times 20 \times 6.5^2 + 16 \times (16 - 6.24)^2 + 25 \times (6.24 - 0)^2} \times 356$$

$$P_{4_6} = 45.27 + 13.28 = 67.55 \ t$$

مثال ۲: یک ساختمان مسکونی چهار طبقه در شهر تهران با پلان به شکل زیر مفروض است. ساختمان در جهت x دارای سیستم باربر جانبی قاب فلزی ساده با مهاربند هم‌محور فولادی و در جهت y مجهز به قاب خمشی فولادی متوسط است. مرکز جرم طبقات منطبق بر مرکز هندسی آنها فرض می‌شوند. زمین ساختگاه سازه منطبق بر گروه III آیین‌نامه ۲۸۰۰ است و میان‌قاب‌ها مشارکتی در سختی جانبی سازه ندارند. ارتفاع طبقه اول ۲/۵ متر و ارتفاع بقیه طبقات ۳ متر می‌باشد.

الف ـ نیروی افقی ناشی از زلزله را در هریک از دو امتداد x و y محاسبه کنید و در ارتفاع ساختمان توزیع نمایید.

ب ـ نیروی وارده به بادبند واقع در محور B در طبقه دوم را بر اثر وقوع زلزله در امتداد x محاسبه کنید.

طبقات $\begin{cases}\omega_D = 700\ kg/m^2\\ \omega_L = 200\ kg/m^2\end{cases}$

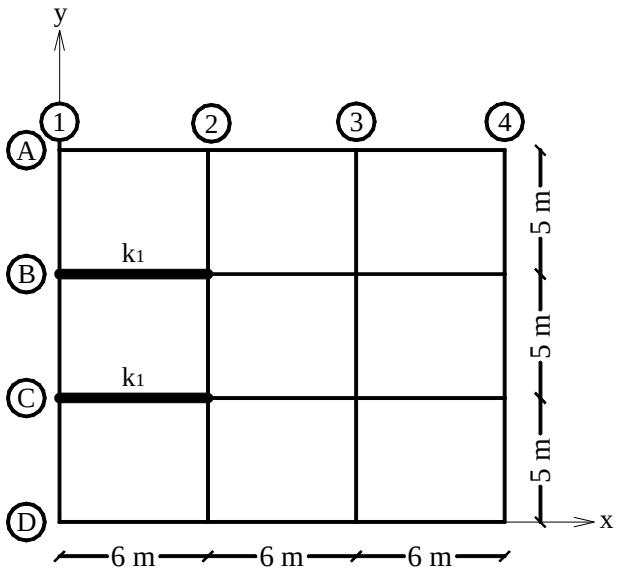
بام $\begin{cases}\omega_D = 500\ kg/m^2\\ \omega_L = 150\ kg/m^2\end{cases}$

سختی بادبند در طبقات اول و دوم $k_1 = 70\ t/cm$

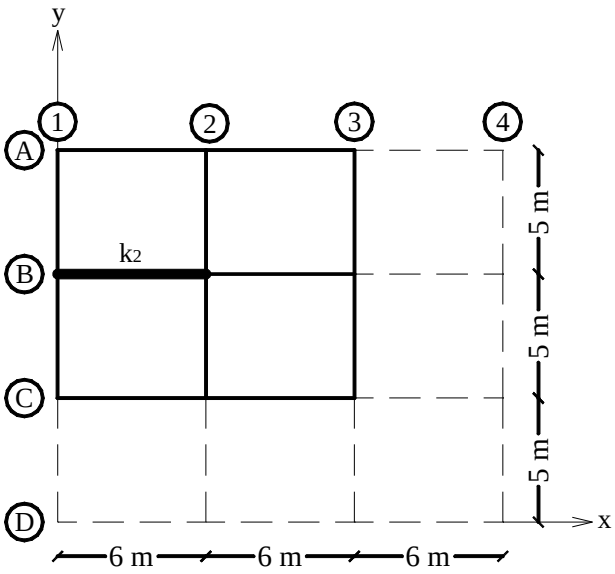
سختی بادبند در طبقات سوم و چهارم $k_2 = 60\ t/cm$

سختی یک قاب در امتداد y در طبقات اول و دوم $= 40\ t/cm$

سختی یک قاب در امتداد y در طبقات سوم و چهارم $= 30\ t/cm$



پلان طبقات اول و دوم



پلان طبقات سوم و چهارم

حل:

الف ـ نیروهای افقی وارده بر ساختمان را در دو جهت محاسبه می‌کنیم.

$$W_1 = 700\times 9\times 5\times 6 + 0.2\times 200\times 9\times 5\times 6 = 199.8\ t$$

$$W_2 = 700\times 4\times 5\times 6 + 0.2\times 200\times 4\times 5\times 6 + 500\times 5\times 5\times 6 + 0.2\times 150\times 5\times 5\times 6 = 168.3\ t$$

$$W_3 = 700\times 4\times 5\times 6 + 0.2\times 200\times 4\times 5\times 6 = 88.8\ t$$

$$W_4 = 500\times 4\times 5\times 6 + 0.2\times 150\times 4\times 5\times 6 = 63.6\ t$$

$$W = 199.8 + 168.3 + 88.8 + 63.6 = 520.5\ t$$

1) E_x

$A = 0.35$

$H = 2.5 + 3 \times 3 = 11.5\ m$

$T = 0.05H^{3/4} = 0.05 \times 11.5^{3/4} = 0.312\ s$

$S = 1.75 \qquad T_0 = 0.15 \qquad T_S = 0.7$

$T_0 < T < T_S \quad \rightarrow \quad B = 1 + S = 1 + 1.75 = 2.75$

$I = 1$

$R = 6$

$C = \dfrac{ABI}{R} = \dfrac{0.35 \times 2.75 \times 1}{6} = 0.16$

$V = CW = 0.16 \times 520.5 = 83.28\ t$

$T = 0.312 < 0.7 \quad \rightarrow \quad F_t = 0$

n	W_i	h_i	$W_i h_i$	$F_i = (V - F_t)\dfrac{W_i h_i}{\sum_{j=1}^{n} W_j h_j}$
4	63.6	11.5	731.4	20.92
3	88.8	8.5	754.8	21.59
2	168.3	5.5	925.65	26.48
1	199.8	2.5	499.5	14.29
	$\sum = 520.5$		$\sum = 2911.35$	$\sum = 83.28$ √

2) E_y

$A = 0.35$

$H = 2.5 + 3 \times 3 = 11.5\ m$

$T = 0.08H^{3/4} = 0.08 \times 11.5^{3/4} = 0.5\ s$

$S = 1.75 \qquad T_0 = 0.15 \qquad T_S = 0.7$

$T_0 < T < T_S \quad \rightarrow \quad B = 1 + S = 1 + 1.75 = 2.75$

$I = 1$

$R = 7$

$C = \dfrac{ABI}{R} = \dfrac{0.35 \times 2.75 \times 1}{6} = 0.1375$

$V = CW = 0.1375 \times 520.5 = 71.57\ t$

$T = 0.5 < 0.7 \quad \rightarrow \quad F_t = 0$

n	W_i	h_i	$W_i h_i$	$F_i = (V - F_t)\frac{W_i h_i}{\sum_{j=1}^{n} W_j h_j}$
4	63.6	11.5	731.4	17.98
3	88.8	8.5	754.8	18.56
2	168.3	5.5	925.65	22.76
1	199.8	2.5	499.5	12.28
	$\sum = 520.5$		$\sum = 2911.35$	$\sum = 71.57\surd$

ب ـ برای محاسبه نیروی وارد بر بادبند محور B در طبقه دوم، مختصات مرکز سختی طبقه دوم را محاسبه می‌کنیم.

$$\overline{X}_S = \frac{\sum_i k_{yi} x_i}{\sum_i k_{yi}} = \frac{40 \times (0+6+12+18)}{4 \times 40} = 9$$

$$\overline{Y}_S = \frac{\sum_i k_{xi} y_i}{\sum_i k_{xi}} = \frac{70 \times 5 + 70 \times 10}{2 \times 70} = 7.5$$

مرکز سختی طبقه دوم $S_2 \begin{cases} 9 \\ 7.5 \end{cases}$

$$M_i = \sum_{j=i}^{n} (e_{ij} + e_{aj}) F_j$$

$$M_2 = (e_{22} + e_{a2})F_2 + (e_{23} + e_{a3})F_3 + (e_{24} + e_{a4})F_4$$

$$M_2 = [(7.5 - 7.5) + 0.05 \times 15] \times 26.48 + [(10 - 7.5) + 0.05 \times 10] \times 21.59 + [(10 - 7.5) + 0.05 \times 10] \times 20.92$$

$$M_2 = 147.39 \ t.m \quad \text{(clockwise)}$$

$$P_{i_r} = \frac{k_x}{\sum k_x} \times V_{r_x} \pm \frac{k_x Y}{\sum k_x Y^2 + \sum k_y X^2} \times M_r$$

$$P_{B_2} = \frac{70}{70+70} \times (26.48 + 21.59 + 20.92) + \frac{70 \times (10 - 7.5)}{2 \times 70 \times 2.5^2 + 2 \times 40 \times 3^2 + 2 \times 40 \times 9^2} \times 147.39$$

$$P_{B_2} = 34.5 + 3.19 = 37.69 \ t$$

مثال ۳: یک ساختمان تجاری پنج طبقه در منطقه آزاد تجاری بندر انزلی با پلان به شکل زیر مفروض است. ساختمان درجهت x دارای سیستم باربر جانبی قاب فلزی ساده با مهاربندی هم‌محور فولادی و در جهت y مجهز به قاب فلزی ساده با مهاربندی برون‌محور فولادی است. فرض کنید مرکز جرم هر طبقه بر مرکز هندسی آن منطبق است. ارتفاع طبقه اول ۴/۵ متر و ارتفاع سایر طبقات ۳/۵ متر می‌باشد. نیروی وارد به مهاربند k_{x1} را در محور ۳ در طبقه اول بر اثر وقوع زلزله در جهت x بیابید.

$k_{x1} = 80$ t/cm = سختی بادبند در جهت x در طبقات اول و دوم

$k_{x2} = 60$ t/cm = سختی بادبند در جهت x در طبقات سوم و چهارم و پنجم

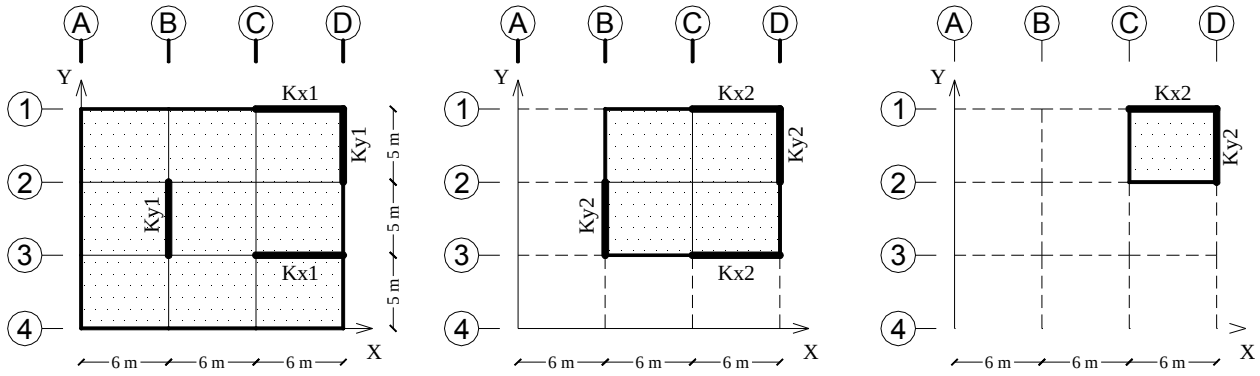
$k_{y1} = 70$ t/cm = سختی بادبند در جهت y در طبقات اول و دوم

$k_{y2} = 55$ t/cm = سختی بادبند در جهت y در طبقات سوم و چهارم و پنجم

$W_1 = W_2 = 350$ t = وزن طبقات اول و دوم

$W_3 = W_4 = 150$ t = وزن طبقات سوم و چهارم

$W_5 = 40$ t = وزن طبقه پنجم



پلان طبقه اول و دوم — پلان طبقه دوم و سوم — پلان طبقه پنجم

حل:

$W = 2\times 350 + 2\times 150 + 40 = 1040 \;\; t$

$A = 0.3$

$H = 4.5 + 4\times 3.5 = 18.5 \;\; m$

$T = 0.05H^{3/4} = 0.05\times 18.5^{3/4} = 0.446 \;\; s$

$S = 1.75 \qquad T_0 = 0.15 \qquad T_S = 1.0$

$T_0 < T < T_s \quad \Rightarrow \quad B = 1 + S = 1 + 1.75 = 2.75$

$I = 1$

مهاربندی هم‌محور فولادی در امتداد x $\Rightarrow \quad R_x = 6$

$$C_x = \frac{ABI}{R} = \frac{0.3\times 2.75\times 1}{6} = 0.1375$$

$V = 0.1375\times 1040 = 143 \;\; Ton$

$T = 0.446 < 0.7 \qquad \rightarrow \qquad F_t = 0$

n	W_i	h_i	$W_i h_i$	$F_i = (V - F_t)\dfrac{W_i h_i}{\sum_{j=1}^{n} W_j h_j}$
5	40	18.5	740	11.64
4	150	15	2250	35.4
3	150	11.5	1725	27.14
2	350	8	2800	44.05
1	350	4.5	1575	24.77
	$\sum = 1040$		$\sum = 9090$	$\sum = 143$ $\surd$

$$m_5 \begin{cases} X_5 = 15 \\ Y_5 = 12.5 \end{cases}$$

$$m_3, m_4 \begin{cases} X_3 = X_4 = 12 \\ Y_3 = Y_4 = 10 \end{cases}$$

$$m_1, m_2 \begin{cases} X_1 = X_2 = 9 \\ Y_1 = Y_2 = 7.5 \end{cases} \qquad S_1 \begin{cases} X_s = \dfrac{70\times 6 + 70\times 18}{2\times 70} = 12 \\ Y_s = \dfrac{80\times 5 + 80\times 15}{2\times 80} = 10 \end{cases}$$

$$M_i = \sum_{j=i}^{n} (e_{ij} + e_{aj}) F_j$$

$$\begin{aligned} M_1 = {} & [(10-7.5) + 0.05\times 15]\times 24.77 \\ & + [(10-7.5) + 0.05\times 15]\times 44.05 \\ & + [(10-10) + 0.05\times 10]\times 27.14 \\ & + [(10-10) + 0.05\times 10]\times 35.4 \\ & + [(10-12.5) + 0.05\times 5]\times 11.64 \end{aligned}$$

$$M_1 = 228.745 \quad t.m \quad \text{(counterclockwise)}$$

$$P_{i_r} = \frac{k_x}{\sum k_x} \times V_{r_x} \pm \frac{k_x Y}{\sum k_x Y^2 + \sum k_y X^2} \times M_r$$

$$P_{3_1} = \frac{80}{2\times 80}\times 143 + \frac{80\times (10-5)}{80\times (15-10)^2 + 80\times (10-5)^2 + 70\times (18-12)^2 + 70\times (12-6)^2} \times 228.745$$

$$P_{3_1} = 71.5 + 10.12 = 81.62 \quad T.m$$

مثال ۴: ساختمانی به شکل زیر مفروض است. ساختمان درجهت x و y مجهز به قاب فلزی ساده با مهاربندی فولادی است. مختصات مرکز جرم هر طبقه (x_{mi} و y_{mi}) مشخص شده‌اند. در صورتیکه مقادیر نیروهای وارده بر طبقات اول تا پنجم (F_i) بر اثر نیروی زلزله در جهت y مساوی مقادیر داده شده باشد، نیروی وارد به مهاربند k_{y1} را در محور B در طبقه دوم بر اثر وقوع زلزله در جهت y بیابید.

$k_{x1} = 80$ Ton/cm = سختی بادبند در جهت x در طبقات اول و دوم

$k_{y1} = 70$ Ton/cm = سختی بادبند در جهت yدر طبقات اول و دوم

$F_5 = 12$ Ton

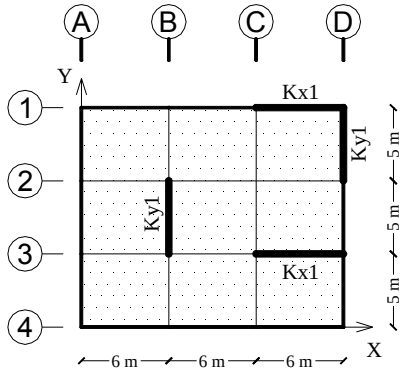
$F_4 = 35$ Ton

$F_3 = 30$ Ton

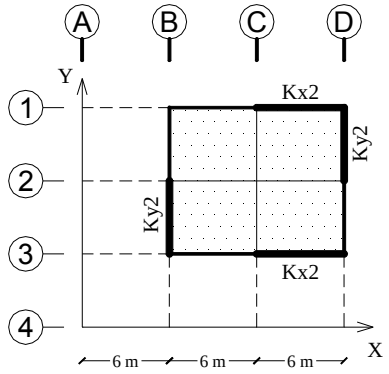
$F_2 = 45$ Ton

$F_1 = 25$ Ton

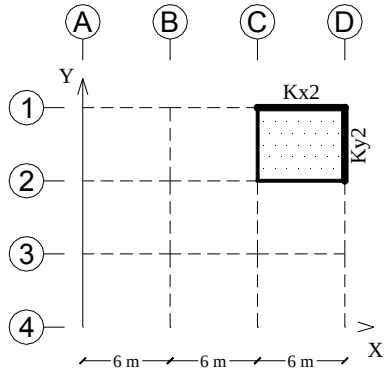
$$\begin{cases} X_{m1} = X_{m2} = 9 \\ Y_{m1} = Y_{m2} = 7.5 \end{cases} \quad \begin{cases} X_{m3} = X_{m4} = 10 \\ Y_{m3} = Y_{m4} = 10 \end{cases} \quad \begin{cases} X_{m5} = 15 \\ Y_{m5} = 12.5 \end{cases}$$



پلان طبقه اول و دوم



پلان طبقه دوم و سوم



پلان طبقه پنجم

حل:

روشن است مرکز سختی طبقه دوم به طول $X_{s2} = 12$ و به عرض $Y_{s2} = 10$ می‌باشد.

$$M_i = \sum_{j=i}^{n} (e_{ij} + e_{aj}) F_j$$

$$M_2 = [(12-9)+(0.05)(18)]\times 45 + [(12-10)+(0.05)(12)]\times 30 + [(12-10)+(0.05)(12)]\times 35 + [(12-15)+(0.05)(6)]\times 12$$

$$M_2 = 312.1 \ t.m \qquad \text{(clockwise)}$$

$$P_{i_r} = \frac{k_y}{\sum k_y} \times V_{r_y} \pm \frac{k_y X}{\sum k_x Y^2 + \sum k_y X^2} \times M_r$$

$$P = \frac{70}{70+70}(12+35+30+45) + \frac{(70)(6)(312.1)}{(2)(70)(6)^2 + (2)(80)(5)^2}$$

$$P = 61 + 14.5 = 75.5 \quad t$$