



رابطی مقدم

مهندسی پی

Retaining Walls

دیوارهای حائل

مثال ها

مهندسی پی: دیوارهای حائل

برای دیوار حائل نشان داده شده در شکل، مطلوب است تعیین نیروی جانبی خاک در حالت سکون وارد بر واحد طول دیوار و همچنین تعیین محل برآیند این نیرو.

$$c = 0 \rightarrow K_o = 1 - \sin \phi = 1 - \sin 30 = 0.5$$

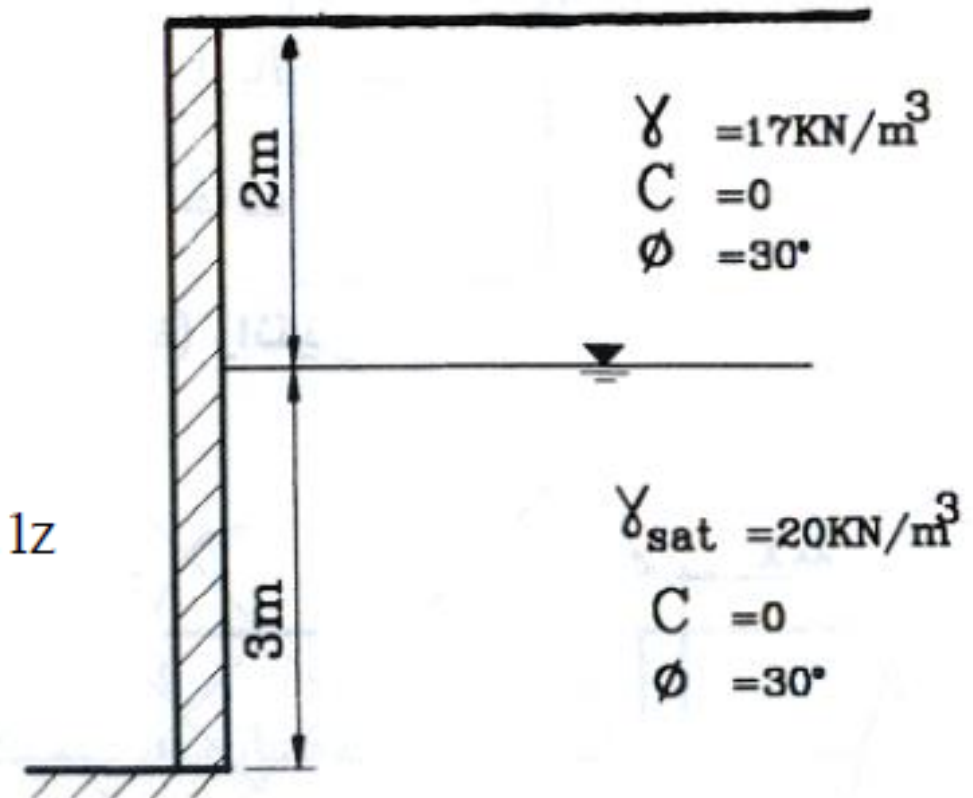
$$0 \leq z \leq 2 \rightarrow \sigma_v = \gamma z = 17z$$

$$2 \leq z \leq 5 \rightarrow \sigma_v = q + \gamma' z = 17 \times 2 + (20 - 9.81)z = 34 + 10.19z$$

$$0 \leq z \leq 2 \rightarrow \sigma_a = \sigma'_a = 0.5(17z) = 8.5z$$

$$0 \leq z \leq 3 \rightarrow \sigma_a = 0.5[17 \times 2 + (20 - 9.81)z] = 34 + 10.19z = 17 + 5.1z$$

$$0 \leq z \leq 3 \rightarrow u_w = \gamma_w \cdot z = 9.81z \rightarrow \sigma_a = \sigma'_a + u = 17 + 14.91z$$



مهندسی پی: دیوارهای حائل

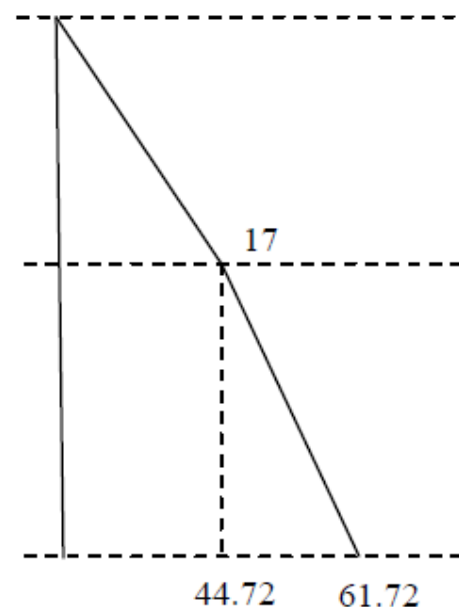
برای دیوار حائل نشان داده شده در شکل، مطلوب است تعیین نیروی جانبی خاک در حالت سکون وارد بر واحد طول دیوار و همچنین تعیین محل برآیند این نیرو.

با جایگذاری مقدار ارتفاع z در معادلات فوق توزیع فشار جانبی در ارتفاع دیوار مطابق شکل فوق بدست می آید.
محاسبه نیروی وارد بر واحد طول دیوار:

$$P_o = (17 \times 2 \times 0.5) + (17 + 61.72) \times 3 \times 0.5 = 135.05 \text{ kN/m}$$

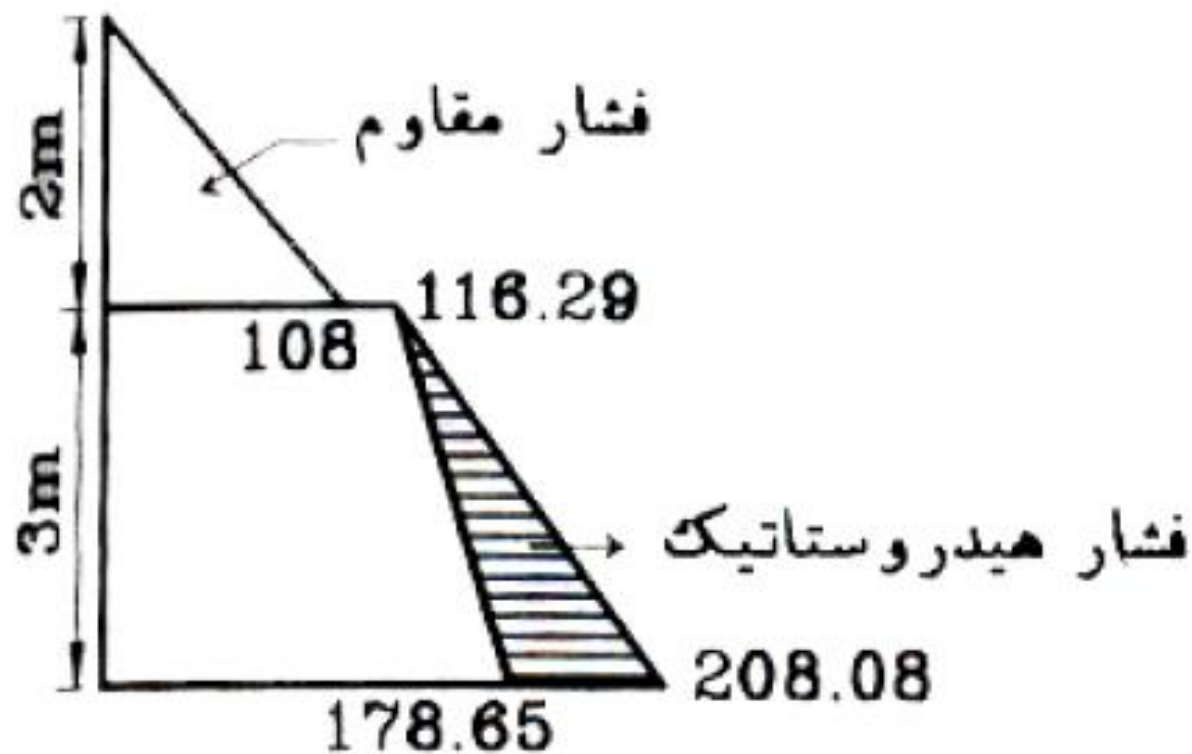
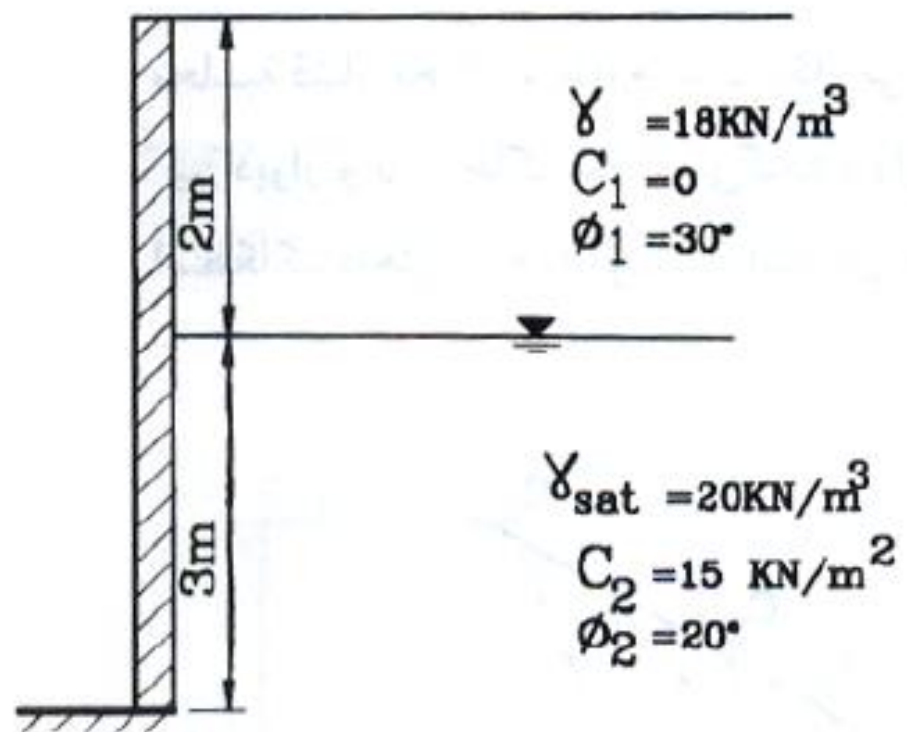
تعیین محل اثر برآیند نیرو (لنگر گیری نسبت به بالای دیوار):

$$\bar{z} = \frac{(17 \times 2 \times 0.5 \times 4/3) + (17 \times 3 \times 3.5) + (44.72 \times 3 \times 0.5 \times 4)}{(17 \times 2 \times 0.5) + (17 \times 3) + (44.72 \times 3 \times 0.5)} = 3.48 \text{ m}$$



مهندسی پی: دیوارهای حائل

در شکل زیر دیواری به ارتفاع ۵ متر نشان داده شده است. مطلوب است تعیین فشار مقاوم رانکین برای واحد طول دیوار.



در شکل زیر دیواری به ارتفاع ۵ متر نشان داده شده است. مطلوب است تعیین فشار مقاوم رانکین برای واحد طول دیوار.

$$K_{p[1]} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) = \tan^2 (45 + 15) = 3$$

محاسبه ضریب فشار مقاوم K_p :

$$K_{p[2]} = \tan^2 (45 + 10) = \tan^2 (45 + 10) = 2.04$$

$$0 \leq z \leq 2 \rightarrow \sigma_v = \gamma z = 18z$$

محاسبه فشار قائم:

$$0 \leq z \leq 3 \rightarrow \sigma'_v = q + \gamma' z = 18 \times 2 + (20 - 9.81)z = 36 + 10.19z$$

$$\sigma_p = \sigma_v K_p + 2c\sqrt{K_p}$$

محاسبه فشار مقاوم (Passive)

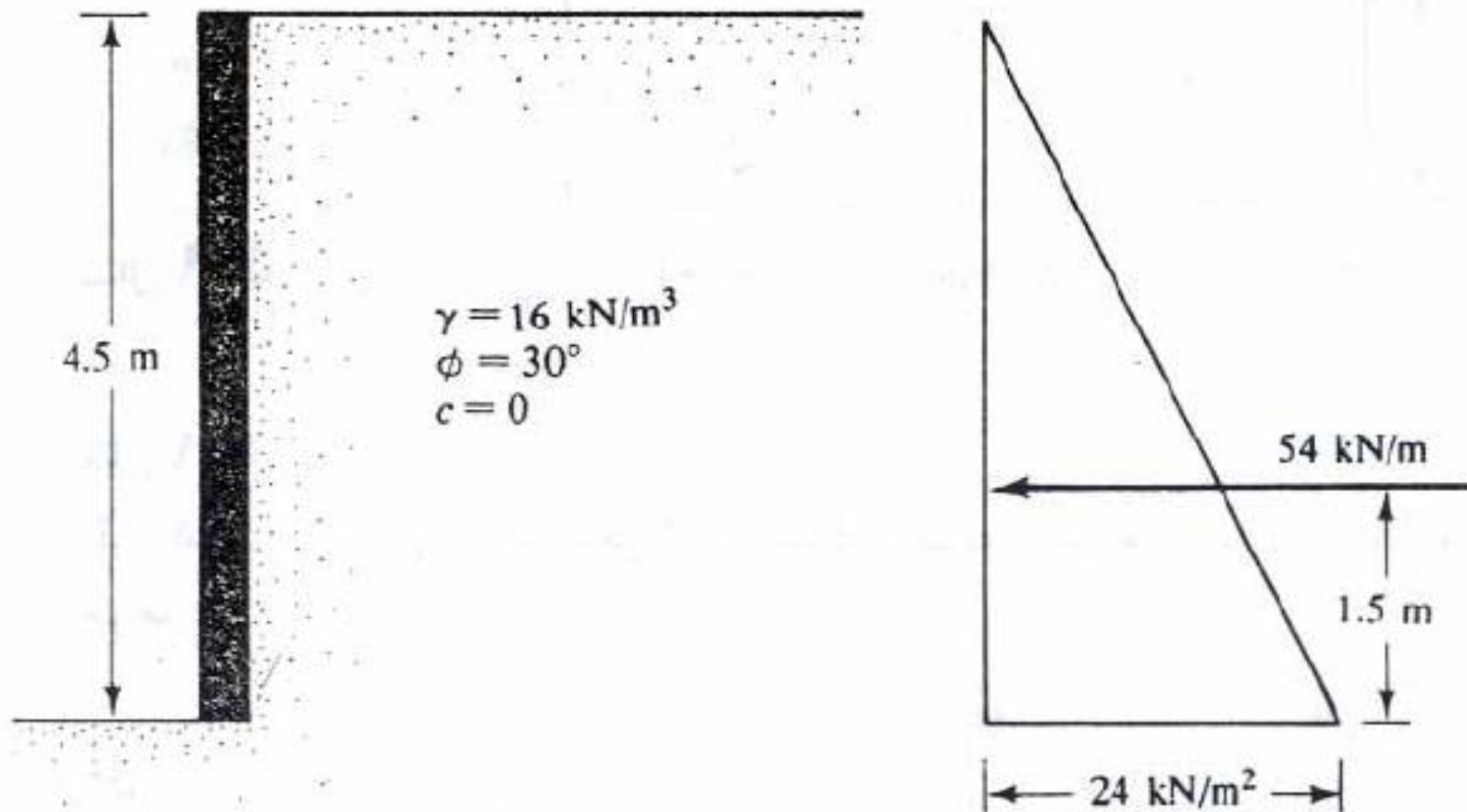
$$0 \leq z \leq 2 \rightarrow \sigma_p = 3 \times 18z = 54z$$

$$0 \leq z \leq 3 \rightarrow \sigma_p = 2.04(36 + 10.19z) + 2 \times 15\sqrt{2.04} \rightarrow 73.44 + 20.79z + 42.85 = 116.29 + 20.79z$$

$$0 \leq z \leq 3 \rightarrow u = \gamma_w z = 9.81z$$

مهندسی پی: دیوارهای حائل

مطلوب است محاسبه نیروی محرک رانکین بر واحد عرض دیوار نشان داده شده در شکل. همچنین محل برآیند را نیز تعیین نمایید.



مهندسی پی: دیوارهای حائل

مطلوب است محاسبه نیروی محرک رانکین بر واحد عرض دیوار نشان داده شده در شکل. همچنین محل برآیند را نیز تعیین نمایید.

$$c = 0 \rightarrow \sigma_a = K_a \sigma_v = K_a \gamma z$$

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) = \tan^2 (45 + 15) = \frac{1}{3}$$

$$\sigma_a = \frac{1}{3} \times 16 \times 4.5 = 24 \text{ kN/m}^2$$

در عمق $z = 0$ ، $\sigma_a = 0$ و در عمق $z = 4.5$ داریم:

توزیع فشار محرک در شکل نشان داده شده است. فشار محرک کل برای واحد عرض دیوار برابر خواهد شد با:

$$P_a = \frac{1}{2} \times 4.5 \times 24 = 54 \text{ kN/m}$$

با توجه به اینکه توزیع فشار خطی است، محل برآیند در یک سوم ارتفاع از پای دیوار یعنی $1/5$ متری آن قرار خواهد داشت.

اگر از انتقال جانبی دیوار حائل مثال قبل جلوگیری شود. نیروی جانبی وارد بر واحد عرض دیوار چقدر خواهد بود؟

چون از انتقال دیوار جلوگیری شده است، فشار خاکریز در حالت سکون خواهد بود بنابراین:

$$\sigma_h = K_o \sigma_v = K_o \gamma z$$

$$K_o = 1 - \sin \phi$$

$$K_o = 1 - \sin 30 = 0.5$$

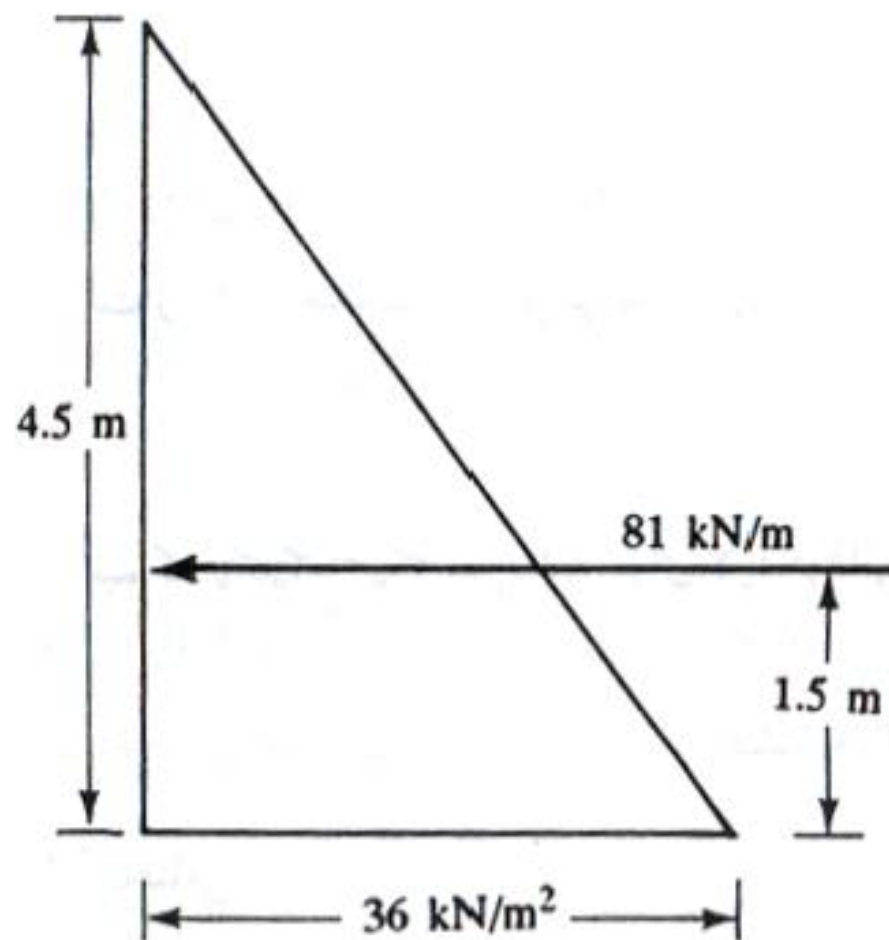
در عمق $z = 0$ ، $\sigma_h = 0$ و در عمق $z = 4.5\text{m}$ خواهیم داشت:

$$\sigma_h = 0.5 \times 4.5 \times 16 = 36 \text{ kN/m}^2$$

نمودار توزیع فشار در شکل زیر نشان داده شده است. فشار برآیند برابر است با:

$$P_o = \frac{1}{2} \times 4.5 \times 36 = 81 \text{ kN/m}$$

اگر از انتقال جانبی دیوار حائل مثال قبل جلوگیری شود. نیروی جانبی وارد بر واحد عرض دیوار چقدر خواهد بود؟



دیوار حائلی به ارتفاع ۴ متر با خاکریزی از ماسه خشک مفروض است. سطح خاکریز افقی و مشخصات آن به قرار زیر است:

$$\phi = 37^\circ$$

$$\gamma = 16.98 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{d(\min)} = 15.41 \text{ kN/m}^3$$

اگر از حرکت جانبی دیوار جلوگیری شده باشد، مطلوب است تعیین:

(الف) تعیین نیروی جانبی وارد بر واحد عرض دیوار با استفاده از رابطه $K_o = 1 - \sin \phi$

(ب) تعیین نیروی جانبی وارد بر واحد عرض دیوار با استفاده از رابطه $K_o = (1 - \sin \phi) + [\gamma_d / \gamma_{d(\min)} - 1] \times 5.5$

دیوار حائلی به ارتفاع ۴ متر با خاکریزی از ماسه خشک مفروض است. سطح خاکریز افقی و مشخصات آن به قرار زیر است:

$$K_o = 1 - \sin \phi = 1 - \sin 37 = 0.398 \quad (\text{الف})$$

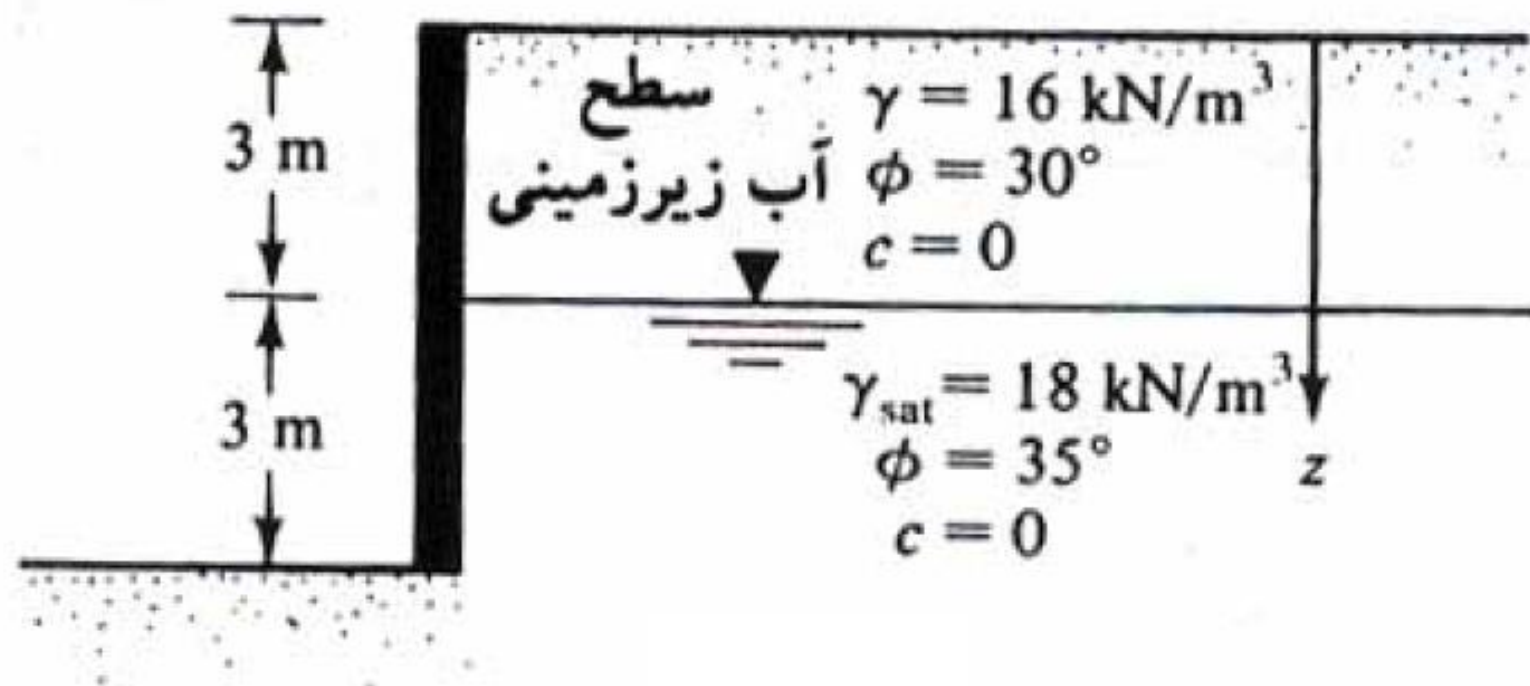
$$P_o = \frac{1}{2} K_o \gamma H^2 = 0.5(0.398)(16.98)(4)^2 = 54.06 \text{ kN/m} \quad (\text{ب})$$

$$K_o = (1 - \sin \phi) + \left[\frac{\gamma_d}{\gamma_{d(\min)}} - 1 \right] 5.5 = (1 - \sin 37) + \left[\frac{16.98}{15.41} - 1 \right] 5.5 = 0.398 + 0.56 = 0.958$$

$$P_o = \frac{1}{2} K_o \gamma H^2 = 0.5(0.958)(16.98)(4)^2 = 130.13 \text{ kN/m}$$

مهندسی پی: دیوارهای حائل

برای دیوار حائل نشان داده شده در شکل زیر مطلوب است تعیین نیروی محرک بر واحد عرض دیوار در حالت رانکین. همچنین محل برآیند را نیز بدست آورید.



مهندسی پی: دیوارهای حائل

برای دیوار حائل نشان داده شده در شکل زیر مطلوب است تعیین نیروی محرک بر واحد عرض دیوار در حالت رانکین. همچنین محل برآیند را نیز بدست آورید.

با $c = 0$ می دانیم که $\sigma'_a = K_a \sigma'_v$ می باشد. برای لایه فوقانی خاک، ضریب فشار محرک رانکین برابر است با:

$$K_a = K_{a(1)} = \frac{1 - \sin 30}{1 + \sin 30} = \frac{1}{3}$$

$$K_a = K_{a(2)} = \frac{1 - \sin 35}{1 + \sin 35} = \frac{0.4264}{1.5736} = 0.271$$

در $z = 0$ ، $\sigma_v = \sigma'_v$ و در $z = 3$ (بلافاصله بالای سطح آب زیرزمینی) خواهیم داشت:

$$\sigma'_v = 3 \times 16 = 48 \text{ kN/m}^2$$

بنابراین:

$$\sigma_a = \sigma'_a = K_{a(1)} \sigma'_v = \frac{1}{3} \times 48 = 16 \text{ kN/m}^2$$

برای دیوار حائل نشان داده شده در شکل زیر مطلوب است تعیین نیروی محرک بر واحد عرض دیوار در حالت رانکین. همچنین محل برآیند را نیز بدست آورید.

در $z = 3$ (بلافاصله در زیر سطح آب زیرزمینی)

$$\sigma_v = \sigma'_v = 3 \times 16 = 48 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_a = \sigma'_a = K_{a(2)} \sigma'_v = 0.271 \times 48 = 13 \text{ kN/m}^2$$

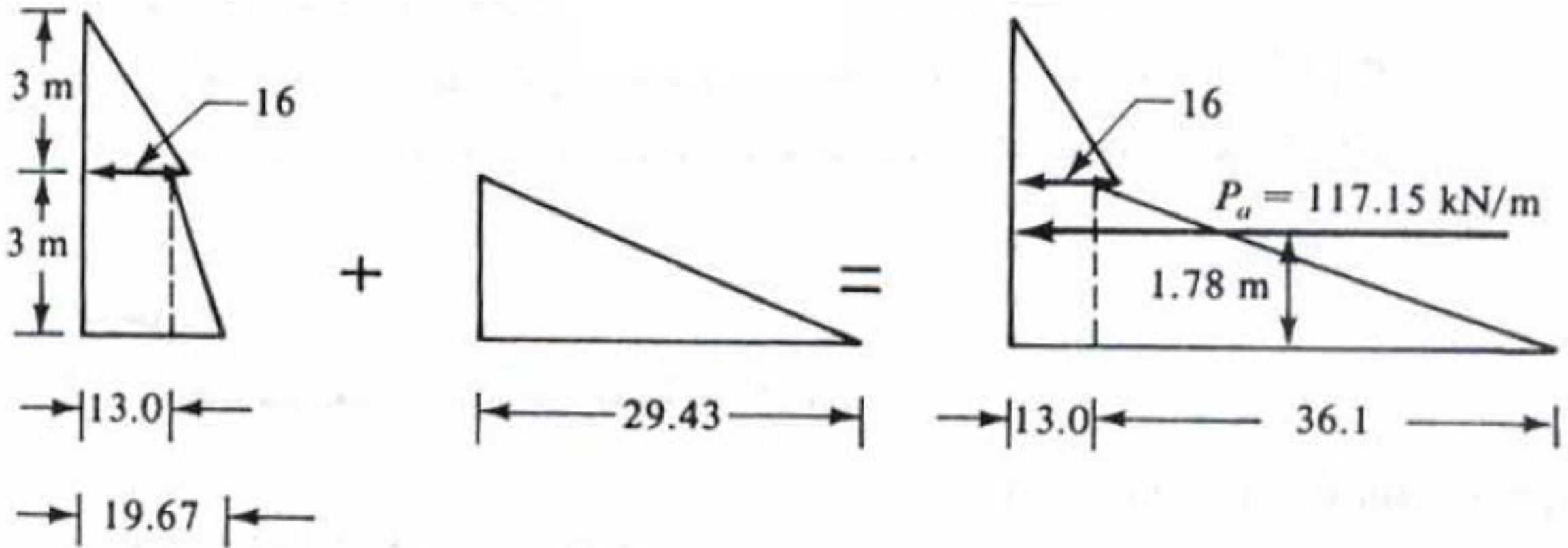
در عمق $z = 6\text{m}$

$$\sigma'_v = 3 \times 16 + 3(19 - 9.81) = 72.57 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_a = K_{a(2)} \sigma'_v = 0.271 \times 72.57 = 19.67 \text{ kN/m}^2$$

برای دیوار حائل نشان داده شده در شکل زیر مطلوب است تعیین نیروی محرک بر واحد عرض دیوار در حالت رانکین. همچنین محل برآیند را نیز بدست آورید.

تغییرات σ'_a با عمق در شکل زیر نشان داده شده است. فشار جانبی به علت آب حفره ای به صورت زیر محاسبه می شود:



σ'_a

u

برای دیوار حائل نشان داده شده در شکل زیر مطلوب است تعیین نیروی محرک بر واحد عرض دیوار در حالت رانکین. همچنین محل برآیند را نیز بدست آورید.

در عمق $z = 0, u = 0$

در عمق $z = 3\text{m}, u = 0$

در عمق $z = 6\text{m}, u = 3 \times \gamma_w = 3 \times 9.81 = 29.43 \text{ kN/m}^2$

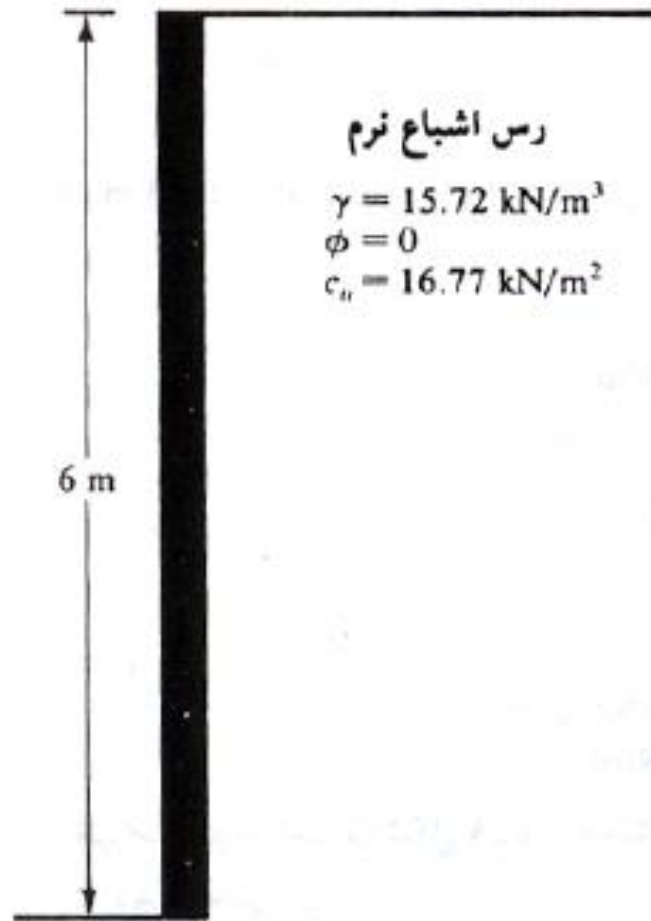
تغییرات u با عمق در شکل و تغییرات σ_a (تنش محرک کل) در شکل نشان داده شده است. بنابراین:

$$P_a = \frac{1}{2} \times 3 \times 16 + 3 \times 13 + \frac{1}{2} \times 3 \times 36.1 = 24 + 39 + 54.15 = 117.15 \text{ kN/m}$$

با لنگر گیری حول پای دیوار، محل برآیند به دست می آید:

$$\bar{Z} = \frac{24 \left(3 + \frac{3}{5} \right) + 39 \left(\frac{3}{2} \right) + 54 \left(\frac{3}{3} \right)}{117.15} = 1.78 \text{ m}$$

یک دیوار حائل با خاکریزی از رس اشباع نرم در شکل نشان داده شده است. برای شرایط زهکشی نشده خاکریز ($\phi = 0$) مطلوب است:



(الف) حداکثر عمق ترک کششی

(ب) P_a قبل از وقوع ترک کششی

(پ) P_a بعد از وقوع ترک کششی

یک دیوار حائل با خاکریزی از رس اشباع نرم در شکل نشان داده شده است. برای شرایط زهکشی نشده خاکریز ($\phi = 0$) مطلوب است:

چون $\phi = 0$ است، $K_a = \tan^2(45) = 1$ و $c = c_u$ خواهد بود. بنابراین می توان نوشت:

$$\sigma_a = \gamma z - 2c_u$$

$$\text{در عمق } z = 0, \quad \sigma_a = -2(16.77) = -33.54 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{در عمق } z = 6\text{m}, \quad \sigma_a = 15.72 \times 6 - 2(16.77) = 60.78 \text{ kN/m}^2$$

$$z_c = \frac{2c_u}{\gamma} = \frac{2 \times 16.77}{15.72} = 2.13 \text{ m}$$

(الف) عمق ترک کششی برابر است با:

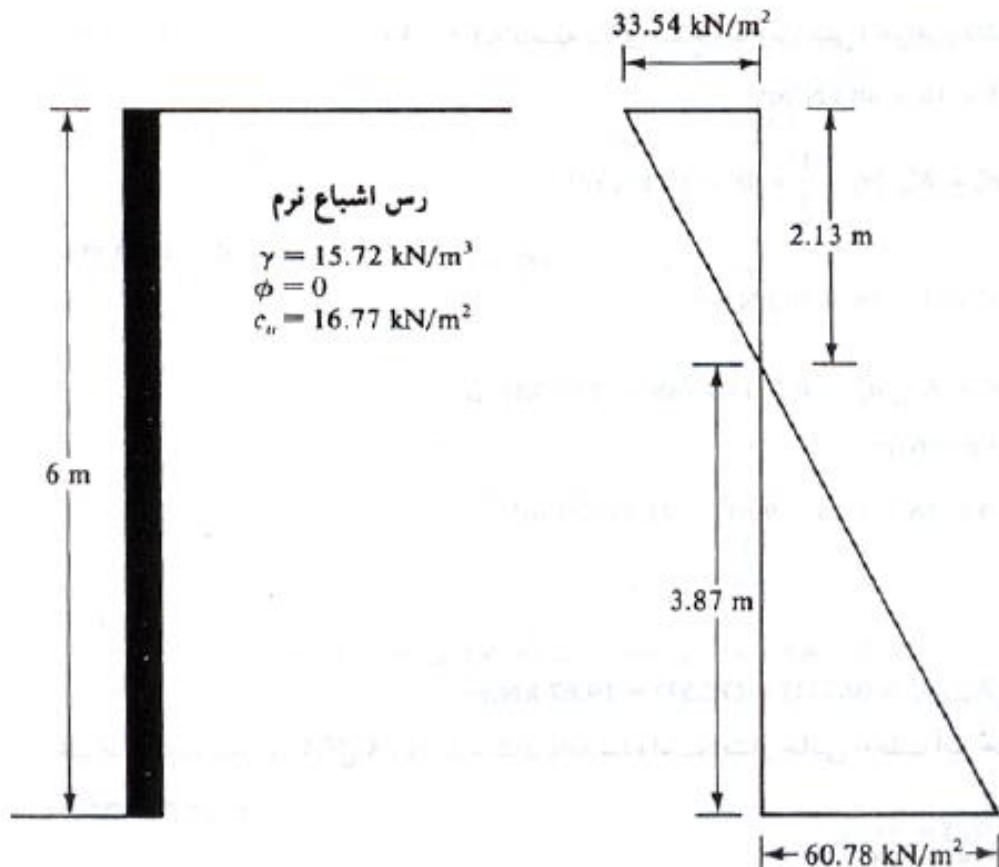
(ب) قبل از وقوع ترک کششی:

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 - 2c_u H = \frac{1}{2} (15.72) 6^2 - 2(16.77) \times 6 = 282.96 - 201.24 = 81.72 \text{ kN/m}$$

یک دیوار حائل با خاکریزی از رس اشباع نرم در شکل نشان داده شده است. برای شرایط زهکشی نشده خاکریز ($\phi = 0$) مطلوب است:

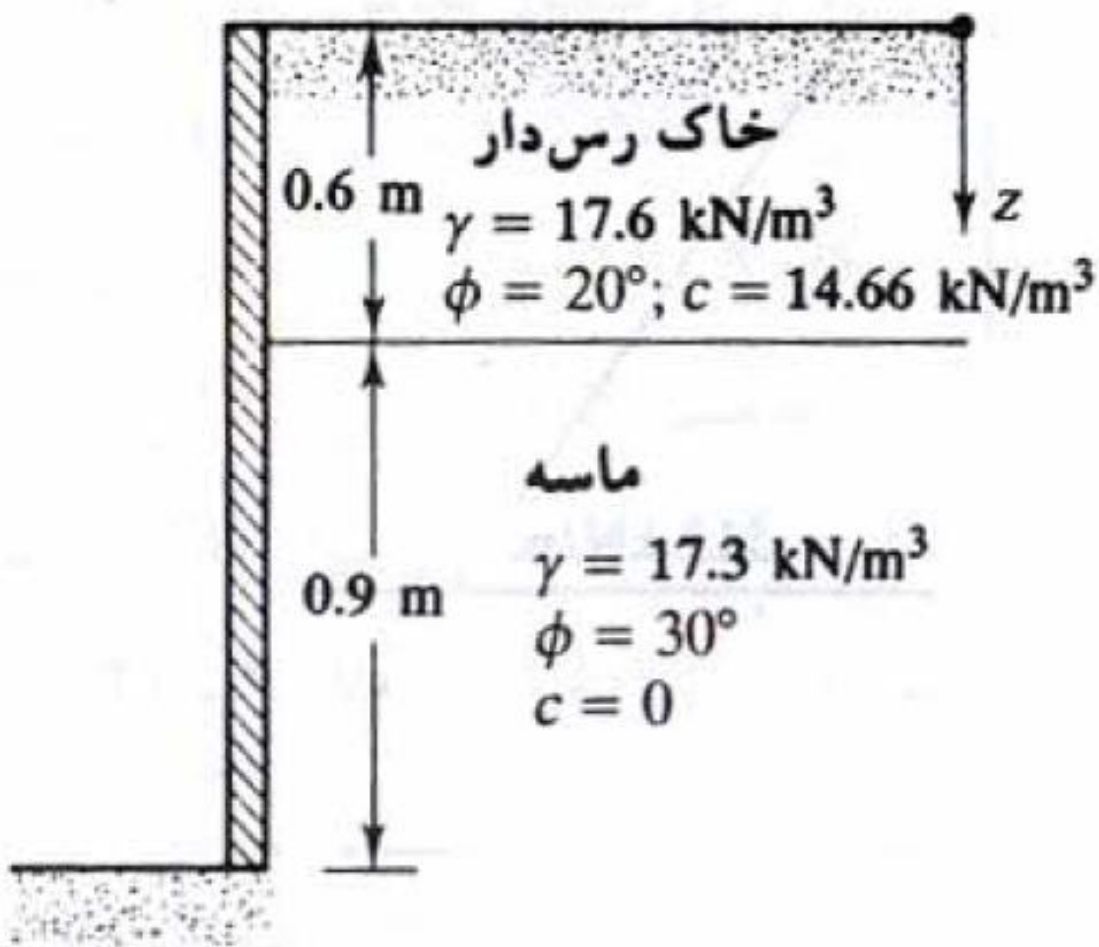
$$P_a = \frac{1}{2}(6 - 2.13)(60.78) = 117.6 \text{ kN/m}$$

(پ) بعد از وقوع ترک کششی:



برای دیوار حائل نشان داده شده در شکل مطلوب است تعیین P_a بعد از تشکیل ترک کششی.

برای لایه فوقانی:



$$K_a = K_{a(1)} = \tan^2 \left(45 - \frac{20}{2} \right) = 0.49$$

$$z_c = \frac{2c}{\gamma \sqrt{K_a}} = \frac{2 \times 14.66}{17.6 \sqrt{0.49}} = 2.83$$

برای دیوار حائل نشان داده شده در شکل مطلوب است تعیین P_a بعد از تشکیل ترک کششی.

با توجه به اینکه عمق لایه رسی ۰/۶ متر می باشد، ترک کششی در تمام ضخامت آن به وجود می آید.

$$K_a = K_{a(2)} = \tan^2 \left(45 - \frac{30}{2} \right) = \frac{1}{3}$$

$$z = 0.6 \text{ m}$$

$$\sigma_v = \sigma'_v = 0.6 \times 17.6 = 10.56 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_a = \sigma'_a = \sigma'_v K_{a(2)} = 10.56 \times \frac{1}{3} = 3.52 \text{ kN/m}^2$$

$$z = 1.5 \text{ m}$$

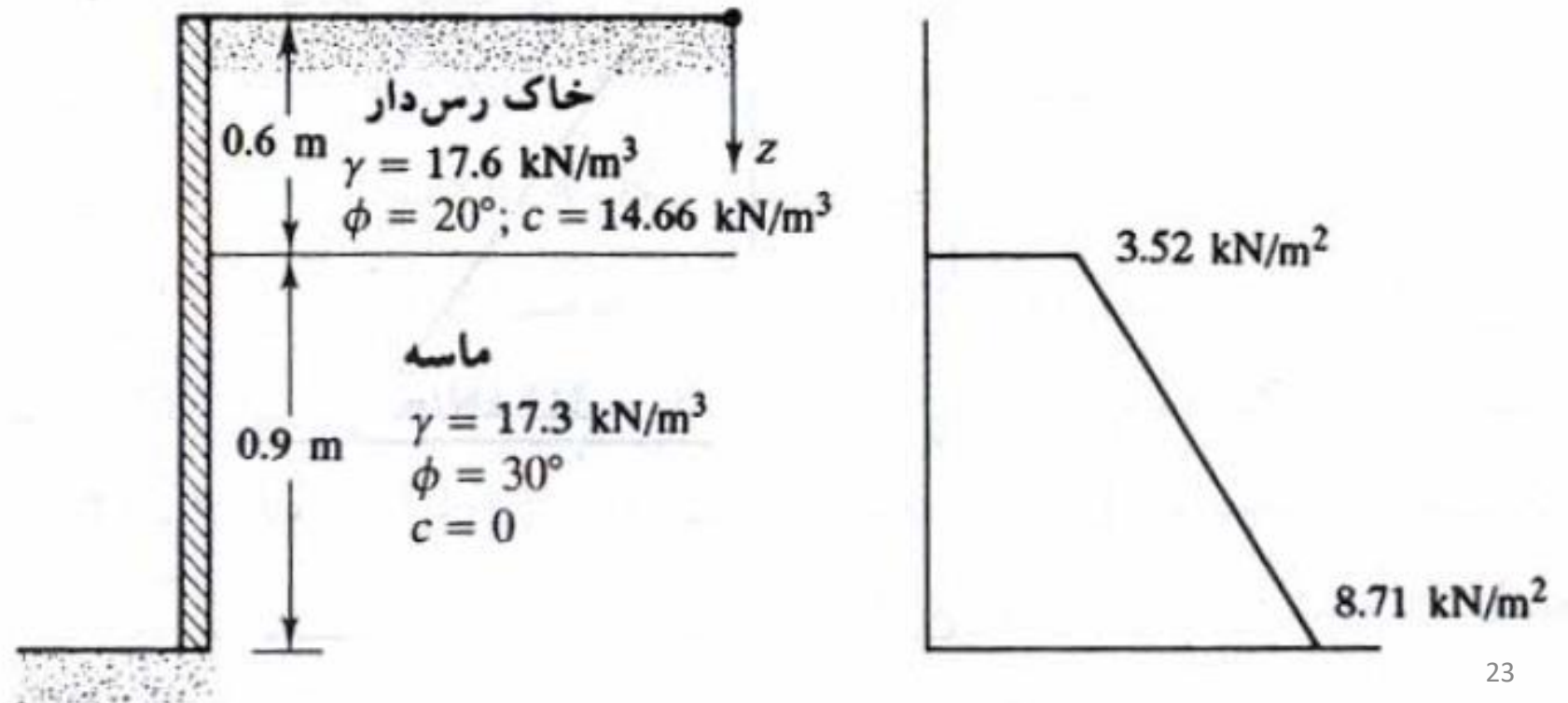
$$\sigma_v = \sigma'_v = 0.6 \times 17.6 + 0.9 \times 17.3 = 26.13 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_a = \sigma'_a = \sigma'_v K_{a(2)} = 26.13 \times \frac{1}{3} = 8.71 \text{ kN/m}^2$$

برای دیوار حائل نشان داده شده در شکل مطلوب است تعیین P_a بعد از تشکیل ترک کششی.

در شکل نمودار توزیع فشار بعد از وقوع ترک نشان داده شده است. از این نمودار داریم:

$$P_a = \left(\frac{1}{2} \right) (3.52 + 8.71) (0.9) = 5.504 \text{ kN/m}$$



در شکل زیر یک دیوار حائل بدون اصطکاک نشان داده شده است. مطلوب است تعیین فشار مقاوم P_p در روی خاکریز و محل برآیند نیروی مقاوم.

$$\phi = 26^\circ$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = \frac{1 + \sin 26}{1 - \sin 26} = \frac{1.4384}{0.5616} = 2.56$$

$$\sigma_p = K_p \sigma_v + 2c\sqrt{K_p}$$

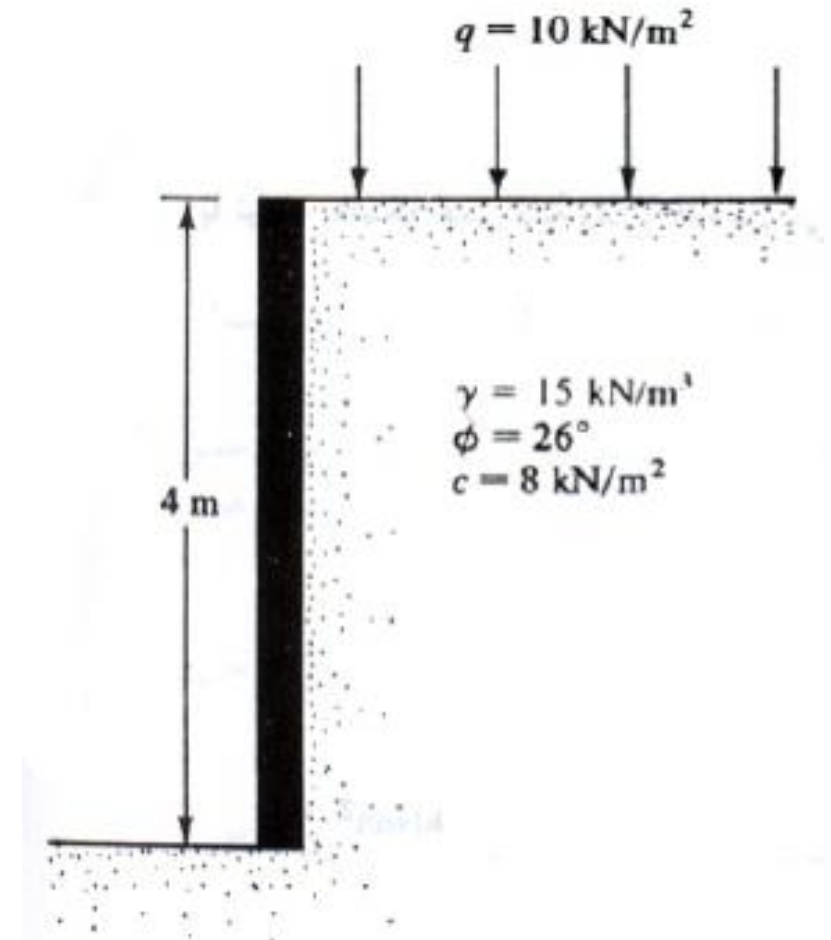
$$\text{در عمق } z = 0, \quad \sigma_v = 10 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_p = 2.56 \times 10 + 2 \times 8 \times \sqrt{2.56} = 25.6 + 25.6 = 51.2 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{در عمق } z = 4\text{m}, \quad \sigma_v = (10 + 4 \times 15) = 70 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_p = 2.56 \times 70 + 2 \times 8 \times \sqrt{2.56} = 204.8 \text{ kN/m}^2$$

نکته: تنش سربار بدون تغییر در ارتفاع دیوار توزیع می شود و با ضریب فشار جانبی خاک به تنش افقی تبدیل شده و به دیوار اعمال می شود.



مهندسی پی: دیوارهای حائل

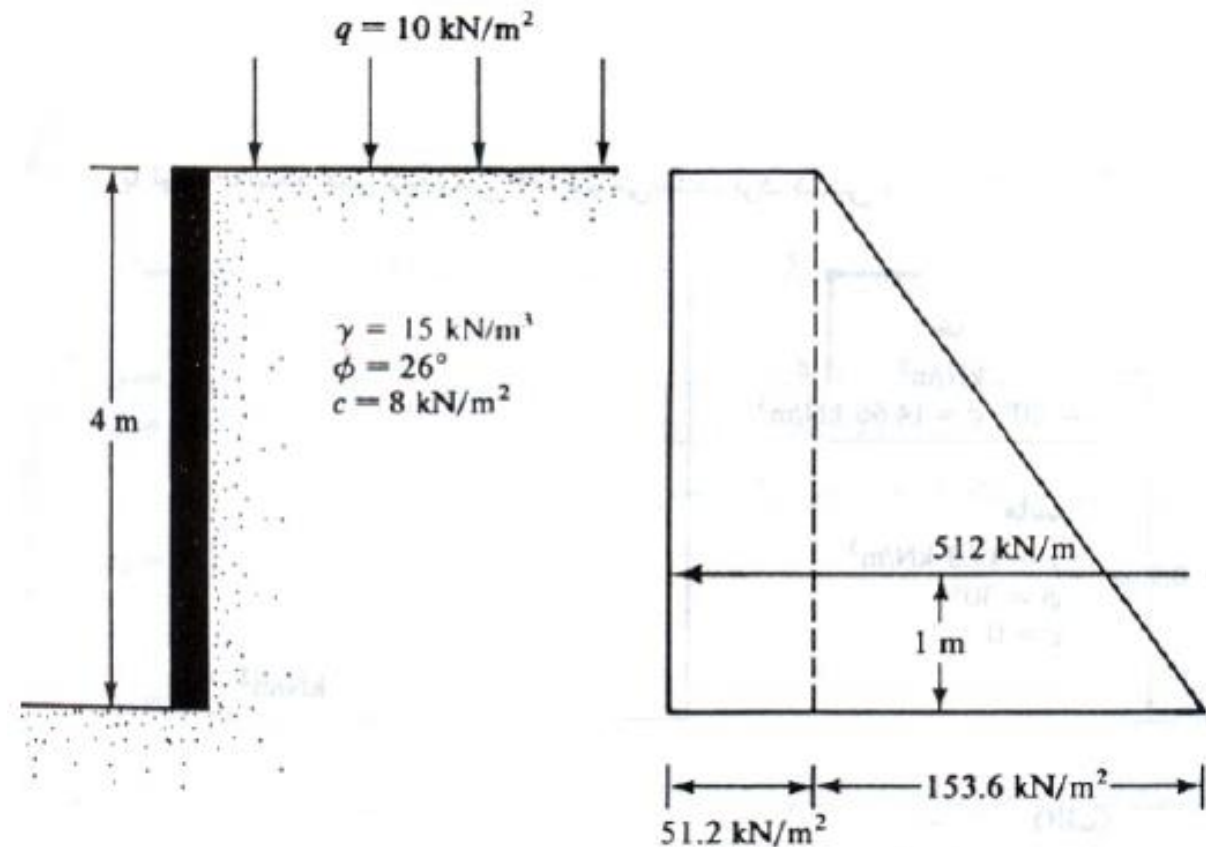
در شکل زیر یک دیوار حائل بدون اصطکاک نشان داده شده است. مطلوب است تعیین فشار مقاوم P_p در روی خاکریز و محل برآیند نیروی مقاوم.

توزیع فشار در شکل زیر نشان داده شده است. نیروی مقاوم بر واحد عرض دیوار برابر است با:

$$P_p = 51.2 \times 2 + 0.5 \times 4 \times 153.6 = 204.8 + 307.2 = 512 \text{ kN/m}$$

محل برآیند با لنگرگیری نمودار فشار در حول پای دیوار به دست می آید:

$$\bar{Z} = \frac{(25.6 + 25.6) \left(\frac{4}{2} \right) + \frac{1}{2} \times 153.6 \times \frac{4}{3}}{512.18} = \frac{102.4 + 409.6}{512} = 1 \text{ m}$$



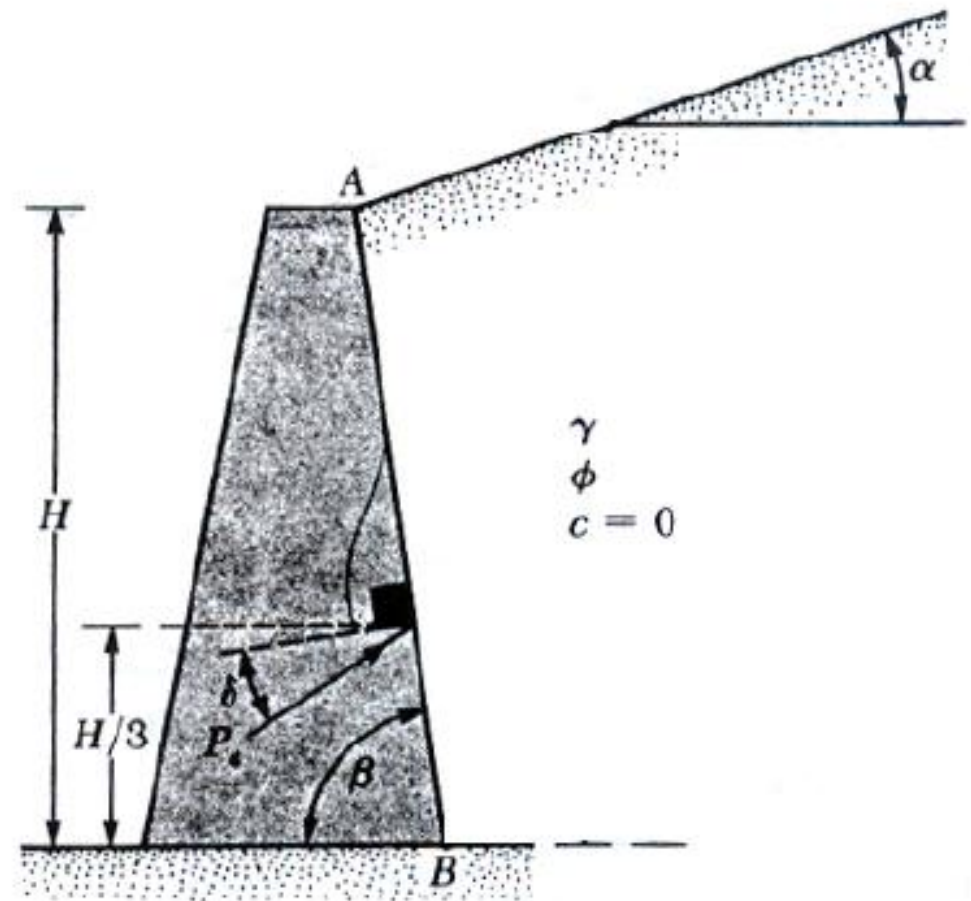
مهندسی پی: دیوارهای حائل

برای دیوار شکل زیر با داده های زیر نیروی محرک واحد طول دیوار را با استفاده از نظریه فشار محرک کولمب محاسبه نمایید. $c = 0$ ، $\alpha = 0$ ، $\beta = 90^\circ$ ، $H = 4.6\text{m}$ ، $\gamma = 16.5\text{kN/m}^3$ ، $\phi = 30^\circ$ ، $\delta = \frac{2}{3}\phi$.

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

مقدار $K_a = 0.297$ بدست می آید. در نتیجه:

$$P_a = 0.5 \times 0.297 \times 16.5 \times 4.6^2 = 51.85 \text{ kN/m}$$



مهندسی پی: دیوارهای حائل

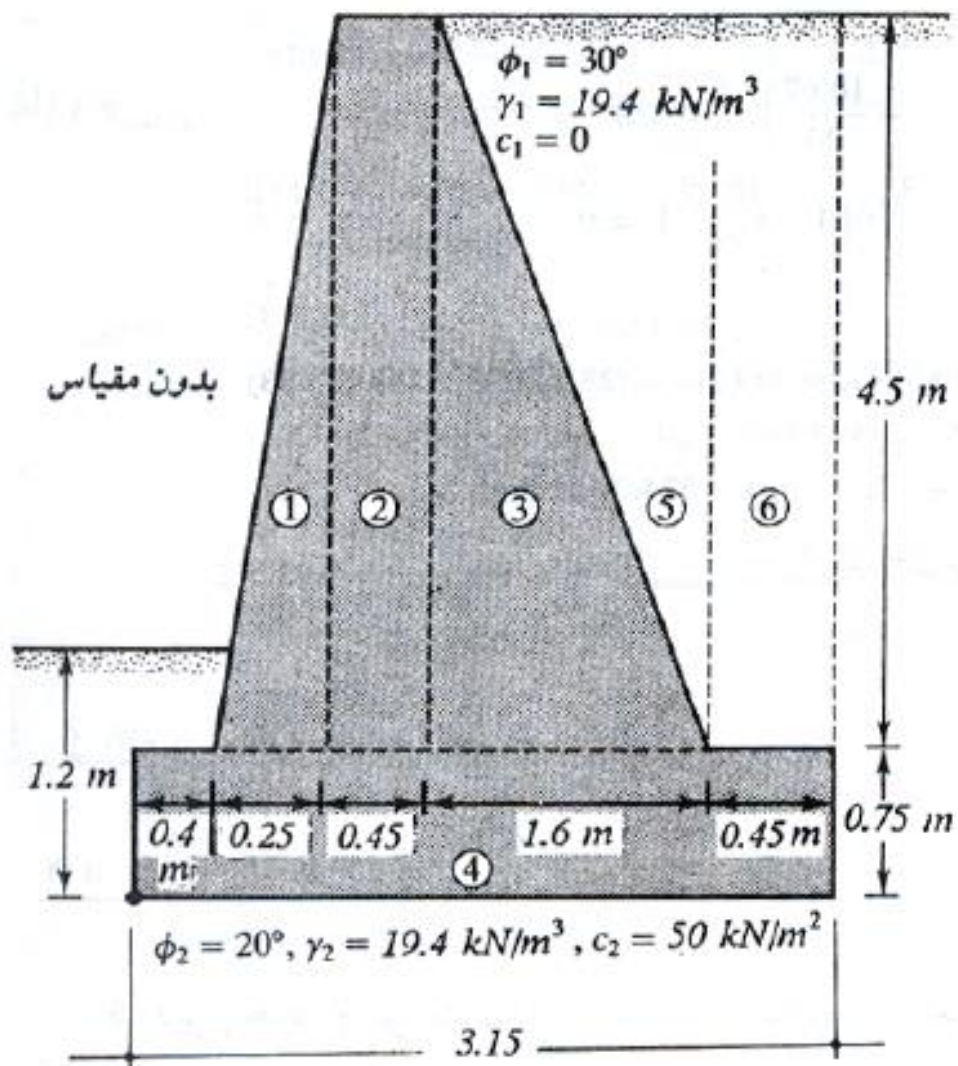
در شکل زیر یک دیوار حایل وزنی نشان داده شده است. مطلوب است تعیین:

(الف) ضریب اطمینان در مقابل واژگونی

(ب) ضریب اطمینان در مقابل لغزش

(پ) فشار خاک در پنجه و پاشنه

(وزن مخصوص بتن را ۲۴ کیلونیوتن بر متر مکعب در نظر بگیرید).



$$H' = 4.5 + 0.75 = 5.25 \text{ m}$$

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi_1}{2} \right) = \tan^2 \left(45 - \frac{30}{2} \right) = \frac{1}{3}$$

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma \times H'^2 K_a = 0.5 \times 19.4 \times 5.25^2 \times 0.33 = 88.23 \text{ kN / m}$$

$$\alpha = 0$$

$$P_h = P_a = 88.23 \text{ kN / m}$$

$$P_v = 0$$

مهندسی پی: دیوارهای حائل

قسمت الف: ضریب اطمینان در مقابل واژگونی

محاسبه لنگر مقاوم:

شماره قسمت	وزن (kN / m)	بازو تا نقطه C (m)	لنگر حول C kN · m / m
1	$0.5 \times 0.25 \times 4.5 \times 24 = 13.5$	0.57	7.70
2	$0.45 \times 4.5 \times 24 = 48.60$	0.88	42.77
3	$0.5 \times 1.6 \times 4.5 \times 24 = 86.4$	1.63	140.83
4	$3.15 \times 0.75 \times 24 = 56.70$	1.58	89.59
5	$0.5 \times 1.6 \times 4.5 \times 19.4 = 39.29$	2.17	151.55
6	$0.45 \times 4.5 \times 19.4 = 39.29$	2.93	115.12
	$\Sigma V = 314.33$		547.56

لنگر واژگونی:

$$M_o = \frac{H'}{3} P_a = \frac{5.25}{3} \times 88.23 = 154.40$$

$$\text{ضریب اطمینان واژگونی} = \frac{547.56}{154.40} = 3.25$$

قسمت ب: ضریب ایمنی در مقابل لغزش

با فرض $k_1 = k_2 = 2/3$ داریم:

$$FS_{\text{sliding}} = \frac{\sum V \tan\left(\frac{2}{3}\right)\phi_2 + B\left(\frac{2}{3}\right)c_2}{P_a} = \frac{314.33 \times \tan(0.67 \times 20) + 3.15 \times 0.67 \times 50}{88.23} = \frac{74.88 + 105.53}{88.23} = 2.04$$

قسمت پ: فشار خاک در نوک پنجه و پاشنه:

$$e = \frac{B}{2} - \frac{\sum M_R - \sum M_o}{\sum V} = \frac{3.15}{2} - \frac{547.56 - 154.40}{314.33} = 0.32 \text{ m}$$

$$q_{\text{toe}} = \frac{\sum V}{B} \left[1 + \frac{6e}{B} \right] = \frac{314.33}{3.15} (1 + 6 \times 0.32 / 3.15) = 160.61 \text{ kN / m}^2$$

$$q_{\text{heel}} = \frac{\sum V}{B} \left[1 - \frac{6e}{B} \right] = \frac{314.33}{3.15} (1 - 6 \times 0.32 / 3.15) = 38.96 \text{ kN / m}^2$$

مثال قبل را با استفاده از روش کولمب با فرض $\delta = 2/3\phi$ تکرار نمایید:

$$\delta = \frac{2}{3}\phi = \frac{2}{3} \times 30 = 20^\circ$$

$$(\alpha = 0^\circ, \beta = 70^\circ) \longrightarrow K_a = 0.4797$$

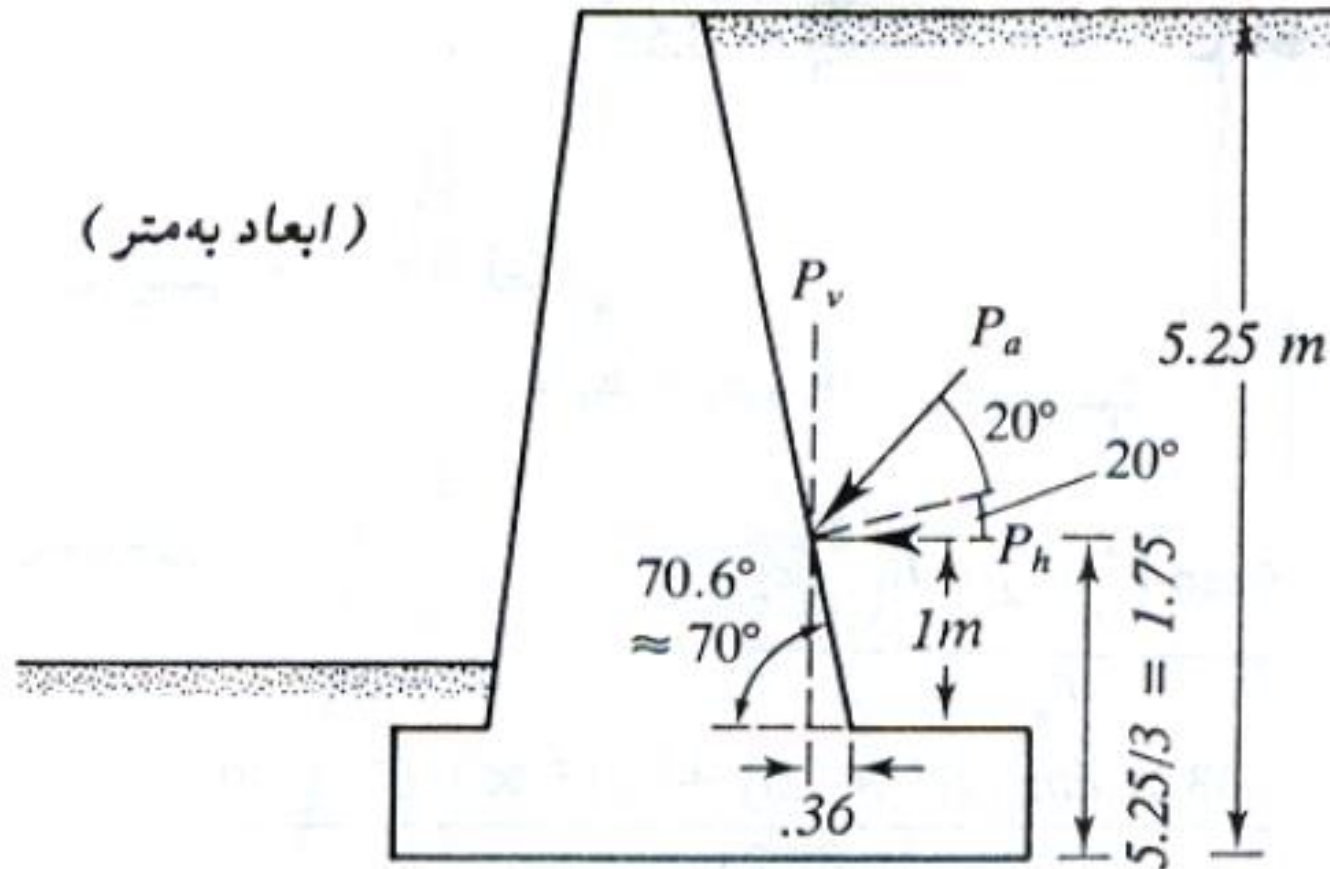
$$P_a = 0.5 \times 19.4 \times 5.25^2 \times 0.4794 = 128.17 \text{ kN/m}$$

$$P_h = P_a \cos 40 = 128.17 \cos 40 = 98.18 \text{ kN/m}$$

$$P_v = P_a \sin 40 = 128.17 \sin 40 = 82.39 \text{ kN/m}$$

مهندسی پی: دیوارهای حائل

مثال قبل را با استفاده از روش کولمب با فرض $\delta = 2/3\phi$ تکرار نمایید:



بدون مقیاس

مهندسی پی: دیوارهای حائل

مثال قبل را با استفاده از روش کولمب با فرض $\delta = 2/3\phi$ تکرار نمایید:

قسمت الف: ضریب ایمنی در مقابل واژگونی

لنگر مقاوم:

با مراجعه به اشکال و استفاده از جدول مثال قبل داریم:

شماره قسمت	وزن (kN / m)	بازو تا نقطه C (m)	لنگر حول C kN · m / m
1	13.5	0.57	7.70
2	48.60	0.88	42.77
3	86.4	1.63	140.83
4	56.7	1.58	89.59
P_v	82.39	2.34	192.79
	287.59		473.68

مثال قبل را با استفاده از روش کولمب با فرض $\delta = 2/3\phi$ تکرار نمایید:

لنگر واژگونی

$$M_o = P_h \frac{H'}{3} = 98.18 \times \frac{5.25}{3} = 171.82 \text{ kN.m/m}$$

$$F_s \text{ (واژگونی)} = \frac{473.68}{171.82} = 2.76$$

قسمت ب: ضریب اطمینان در مقابل لغزش:

$$FS_{\text{sliding}} = \frac{\sum V \tan\left(\frac{2}{3}\right)\phi_2 + B\left(\frac{2}{3}\right)c_2}{P_h} = \frac{287.59 \tan(0.67 \times 20) + 3.15(0.67 \times 50)}{98.18} = 1.77$$

مثال قبل را با استفاده از روش کولمب با فرض $\delta = 2/3\phi$ تکرار نمایید:

قسمت پ: فشار خاک در نوک پنجه و پاشنه:

$$e = \frac{B}{2} - \frac{\sum M_R - \sum M_o}{\sum V} = \frac{3.15}{2} - \frac{473.68 - 171.82}{287.59} = 0.53$$

$$q_{toe} = \frac{\sum V}{B} \left[1 + \frac{6e}{B} \right] = \frac{287.59}{3.15} \left(1 + \frac{6 \times 0.53}{3.15} \right) = 183.47 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{heel} = \frac{\sum V}{B} \left[1 - \frac{6e}{B} \right] = \frac{287.59}{3.15} \left(1 - \frac{6 \times 0.53}{3.15} \right) = -0.87 \text{ kN/m}^2 \approx 0$$