آموزش جامع طراحی سازه نگهبان خرپایی در نرم افزار ایتبس

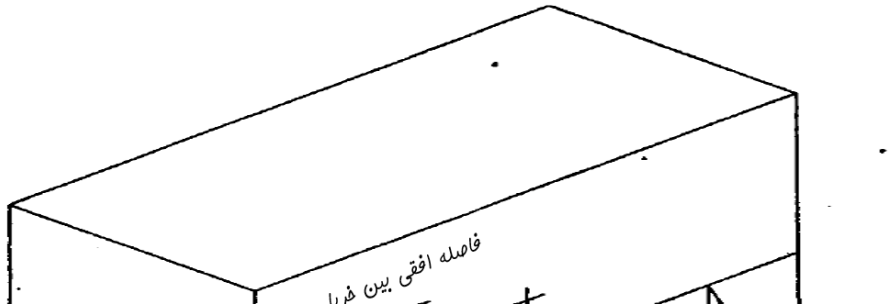
گودبرداری و پایدارسازی گود با روش مناسب، یکی از اقدامات اولیه و مهم در ساخت است. گودبرداری یک مرحله پر خطر میباشد فلذا عدم رعایت اصول در طراحی، اجرا و هم چنین نظارت بر آن، میتواند برای عوامل دخیل در پروژه خسارات جانی و مالی بسیاری را به همراه داشته باشد. به همین دلیل استفاده از افرادی با دانش و تجربه کافی در زمینه گودبرداری و انواع روش‌های آن ضروری است. مهندسین برای جلوگیری از خطرات ناشی از گودبرداری مثل ریزش دیوارها، سقوط آوار و صدمات به تاسیسات و نیروی کار، سازه هایی تحت عنوان سازه نگهبان برای پایدار و ایمن سازی گود احداث میکنند. انواع سازه نگهبان در پروژه های مختلف استفاده می شود؛ یکی از انواع سازه های نگهبان، سازه نگهبان خرپایی است. سازه نگهبان خرپایی یکی از متداول ترین روش پایدارسازی گود در گودهای شهری است. در این مقاله به شرح چگونگی طراحی سازه نگهبان خرپایی به صورت دستی، با استفاده از نمودارهای کمک طراحی و با نرم - افزار به اضافه ی ضوابط آیین نامه ای مربوطه پرداخته میشود. از این رو، ابتدا به بیان تئوری های حاکم بر سازه نگهبان خرپایی میپردازیم و پس از بررسی روابط و ضوابط مربوطه، چگونگی **طراحی سازه نگهبان خرپایی**، در نرم افزار ایتبس بیان میکنیم.

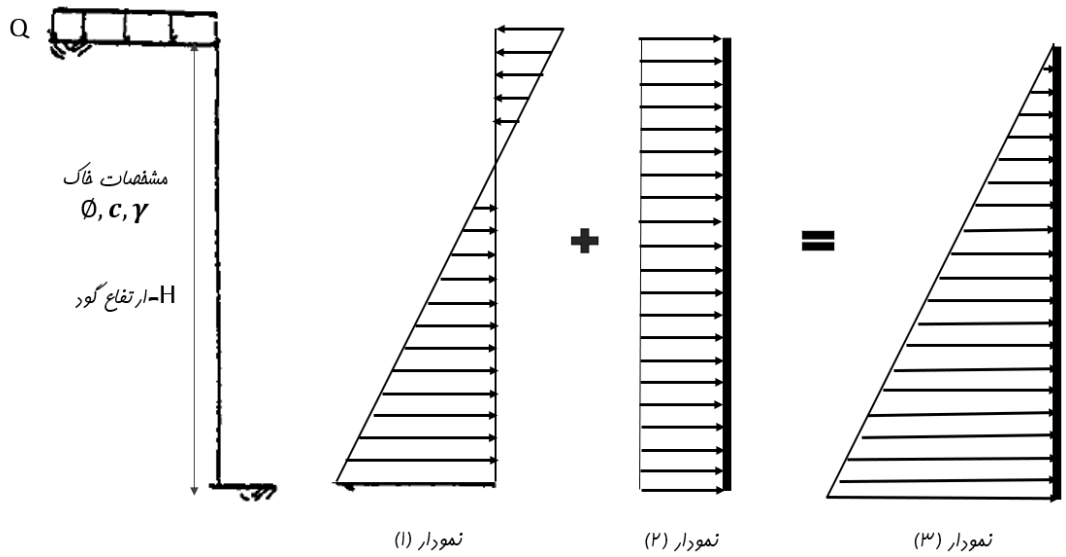
سرفصل‌های این مقاله:

- معرفی سازه نگهبان خرپایی
- طراحی اجزای سازه نگهبان خرپایی
- طراحی سازه نگهبان خرپایی با نمودار های کمک طراحی
- مدلسازی سازه نگهبان خرپایی در نرم افزار ETABS

معرفی سازه نگهبان خرپایی

پایدارسازی گود در ساختمان ها با استفاده از سازه نگهبان خرپایی یا Truss Retaining Structure از متداول ترین روش های اجرای سازه نگهبان در ساختمان های با عمق گود نسبتا کم می باشد. در پایین، تصویر کلی از سازه نگهبان خرپایی به همراه اجزای تشکیل دهنده آن نشان داده شده است. سازه نگهبان خرپایی از یک عضو عمودی و یک عضو مایل تشکیل شده است. سایر اعضای دیگر سازه نگهبان خرپایی به شکل افقی و قطری نصب میگردند و در نهایت ترکیب آن‌ها یک شبکه مثلثی خرپایی را به وجود می‌آورد. این سازه نگهبان همان طور که از نام آن مشخص است، عملکردی خرپایی دارد به همین دلیل نیروی اعضا صرفا محوری است و لنگر خمشی و نیروی برشی در آنها وجود ندارد. در اکثر مواقع اعضای سازه نگهبان خرپایی پروفیل های فولادی استاندارد **I** و **H** شکل هستند. برای عضو قائم خرپا معمولا از پروفیل جفت **IPE** استفاده می کنند.





اگر فرض کنیم ارتفاع گود **H** و سر بار **Q** در مجاور گود وجود دارد، خاک با وزن مخصوص γ، زاویه اصطحکاک داخلی φ و چسبندگی C باشد. مطابق شکل بالا فشار وارد بر سازه نگهبان ناشی از خاک و سر بار میباشد که روابط محاسبه هر کدام در ادامه آورده شده است.

فشار ناشی از خاک (نمودار 1) :

$$\sigma_v(h) = \gamma h k_a - 2C\sqrt{k_a}$$

$$k_a = tan^2(45 - \frac{\phi}{2})$$

σv(H): مقدار تنش افقی در ارتفاع H از تراز زمین

γ: وزن مخصوص خاک پشت دیوار گود میباشد.

h: فاصله نقطه مورد نظر که قصد داریم فشار جانبی خاک را در آن اندازه گیری کنیم تا تراز زمین.

c: چسبندگی خاک پشت دیوار گود میباشد.

Ka: ضریب رانش محرک خاک که بر اساس زاویه اصطحکاک خاک تعیین می شود.

فشار ناشی از سر بار (نمودار2)

$$w_v(h) = L \times \sigma_v(h)$$

Wv(h): تنش افقی وارد بر سازه نگهبان در ارتفاع h از تراز زمین

L: فاصله افقی بین دو خرپای مجاور

σv(H): تنش افقی وارد بر سازه نگهبان در ارتفاع H از تراز زمین

عمق ترک کششی

همان طور که در قسمت قبل مشاهده کردید چسبندگی خاک باعث ایجاد کشش در قسمت بالای دیوار گود می شود. ارتفاعی که دیوار دچار کشش می شود را عمق ترک کششی می نامیم و آن را با Ht نشان می دهیم. عمق ترک کششی از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$H_t = \left[\frac{4C}{\gamma\sqrt{k_a}} - \frac{2Q}{\gamma}\right] \times \frac{1}{F.S}$$

σv(H): تنش افقی وارد بر سازه نگهبان در ارتفاع H از تراز زمین

γ: وزن مخصوص خاک پشت دیوار گود میباشد.

h: فاصله نقطه مورد نظر که قصد داریم فشار جانبی خاک را در آن اندازه گیری کنیم تا تراز زمین.

c: چسبندگی خاک پشت دیوار گود میباشد.

Ka: ضریب رانش محرک خاک که بر اساس زاویه اصطحکاک خاک تعیین می شود.

F.S: ضریب اطمینان برای عدم قطعیت ها است که مقدار آن 2.67 می باشد.

عمق پایدار گود **Hs**، دو برابر مقدار عمق ترک کششی **Ht** می باشد. اگر عمق گود از عمق پایدار گود کمتر باشد نیازی به اجرای سازه نگهبان نیست.

$$H_s = ۲H_t$$

Ht: عمق ترک کششی

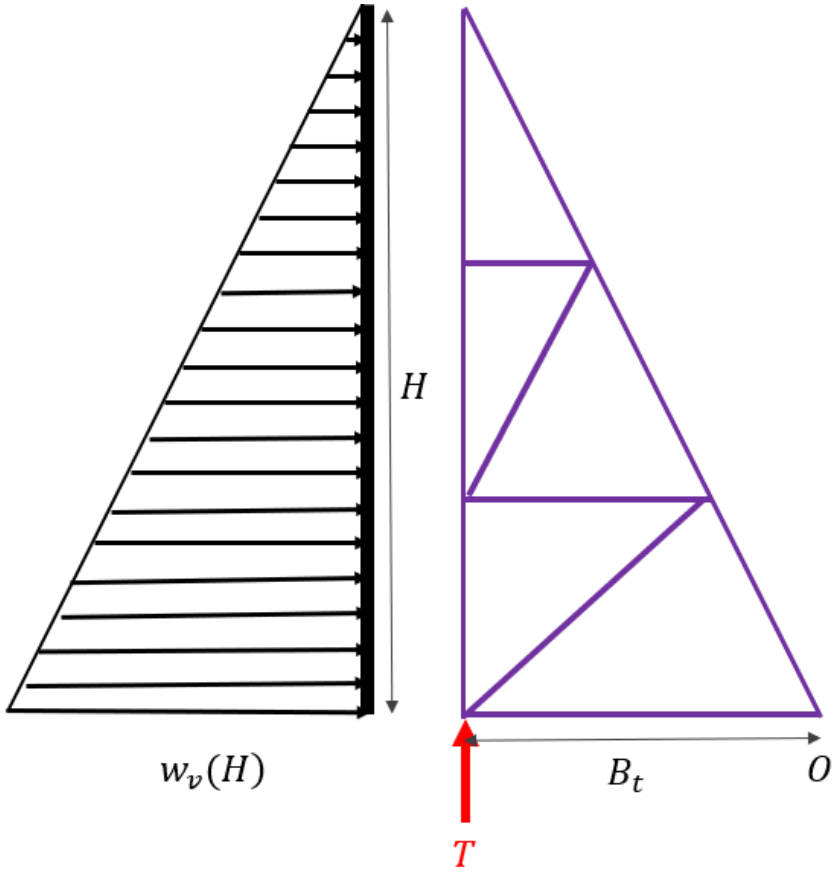
Hs: عمق پایداری گود

طراحی شمع برای نیروی کششی

حداکثر ظرفیت کششی شمع برابر با حاصل جمع نیروی اصطکاک شمع و وزن شمع می باشد.

طراحی نیروی کششی عضو قائم خرپا

برای تعیین نیروی کششی عضو قائم خرپا که نیروی کششی به آن وارد می شود از نوشتن تعادل خمش حول نقطه O در شکل زیر به دست می آید.



$$T = w_v(H)\frac{H^2}{6B_t}$$

Wv(H): نیروی جانبی وارد بر خرپا در تراز کف گود

H: عمق گود

Bt: عرض خرپا یا طول عضو افقی در تراز کف گود

طراحی سربار نیروی قائم آن

$$(B_f)_{min} = \sqrt{\frac{w_v(H)LH^2}{B_t(\frac{q_{ult}}{F,S})}}$$

Wv(H): نیروی جانبی وارد بر خرپا در تراز کف گود

H: عمق گود

L: فاصله افقی بین دو خرپای مجاور

qult: ظرفیت باربری خاک در زیر پی مربعی

Bt: عرض خرپا یا طول عضو افقی در تراز کف گود

طراحی سازه نگهبان خرپایی با نمودارهای کمک طراحی

با توجه به کاربرد بسیار زیاد سازه نگهبان خرپایی در گود های شهری، یک سری نمودار های کمک طراحی برای تعیین ابعاد اجزای سازه نگهبان خرپایی با توجه به شرایط گود تهیه شده است. در ادامه قصد داریم که این نمودار هارا به شما معرفی کنیم و با یک مثال استفاده از آن ها را آموزش دهیم.

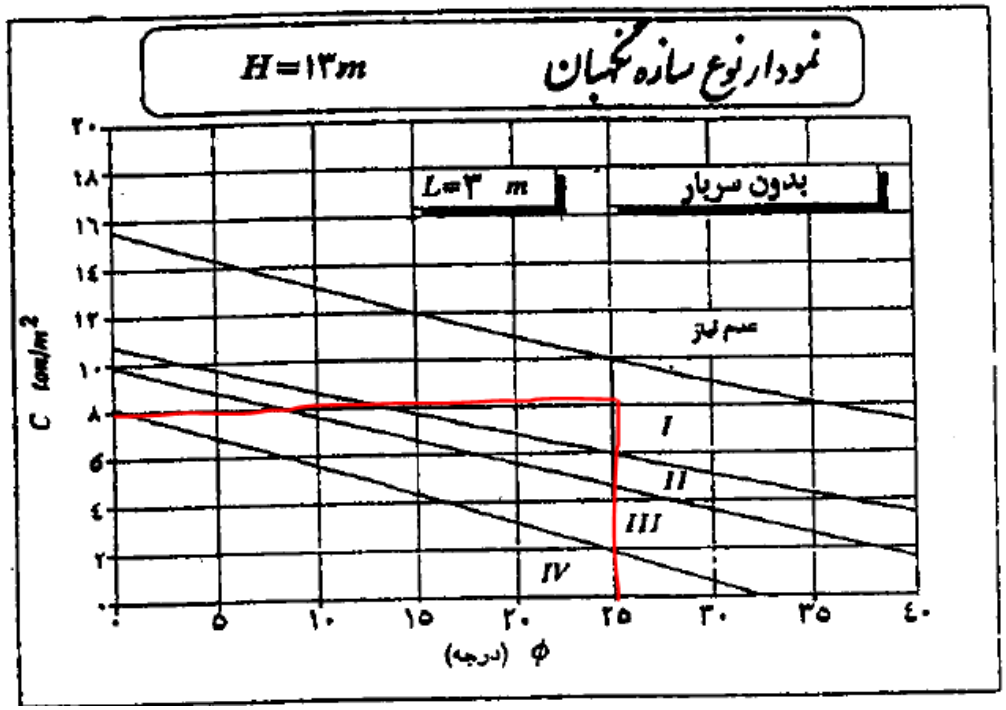
پارامترهای طراحی سازه نگهبان خرپایی

پارامتر های طراحی سازه نگهبان برای انتخاب نمودار های مناسب لازم و ضروری هستند. در ادامه به بررسی این پارامترها خواهیم پرداخت:

عمق گود H: اگر دیواره گود مورد نظر در مجاورت معابر یا زمین باشد، عمق گود برابر است با فاصله سطح زمین تا کف گود می باشد. اما اگر دیواره گود مورد نظر در مجاورت ساختمان باشد فاصله بین تراز کف فونداسیون همسایه تا کف گود به عنوان عمق گود معرفی می شود.

سر بار گود Q: وجود سازه یا معابر در مجاورت دیواره گود باعث ایجاد سر بار می شود که در مقدار تنش جانبی تاثیر گذار است. مقادیر پیشنهادی سر بار گود برای حالت های مختلف بارگذاری مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ویرایش سال 1398 به شرح زیر است:

نوع سر بار	مقدار سر بار
خیابان یا معبر با عرض یک متر	۱,۵ تن بر متر مربع
ساختمان مسکونی برای هر طبقه	۱ تن بر متر مربع
ساختمان تجاری برای هر طبقه	۱,۵ تن بر متر مربع

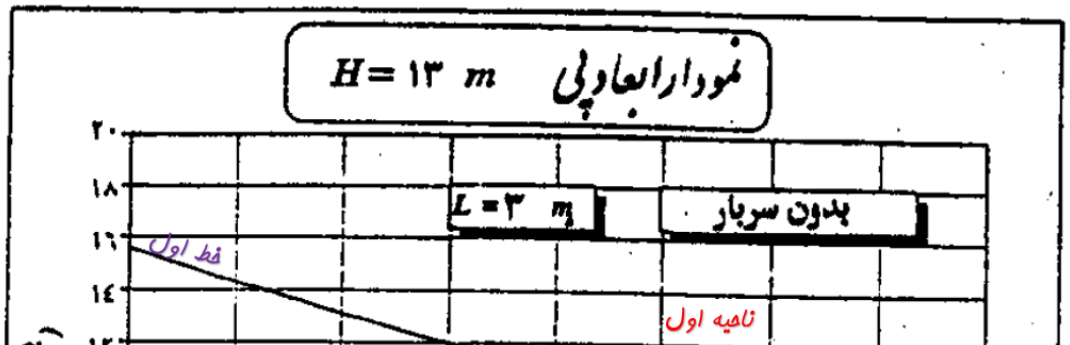


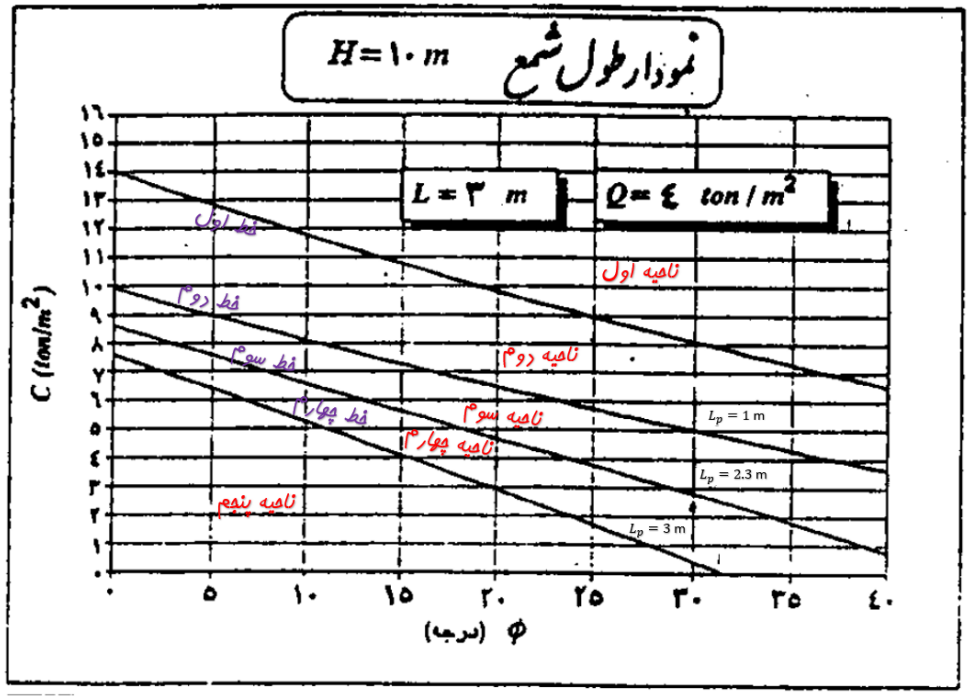
در نمودار فوق اگر مقدار C=8 t/m2 و زاویه اصطحکاک داخلی ϕ=25 باشد نوع سازه نگهبان مورد نظر I می باشد.

اگر نقطه متناظر با مشخصات خاک در قسمت عدم نیاز قرار گرفت این گود نیازی به سازه نگهبان ندارد و اگر نقطه متناظر در قسمت IV قرار گرفت خاک بسیار ضعیف بوده و باید سازه نگهبان خاص برای گود طراحی شود.

نمودار کمک طراحی تعیین ابعاد فونداسیون

با کمک این دسته از نمودارها عرض پی مربعی برای عضو مایل تعیین می شود. مانند قسمت قبل با استفاده از پارامتر های H و L و Q نمودار تعیین ابعاد پی را انتخاب می کنیم. همان طور که در شکل زیر مشاهده می کنید در این نوع از نمودار چهار خط و پنج ناحیه وجود دارد. ناحیه اول که قسمت عدم نیاز به سازه نگهبان و ناحیه پنجم ناحیه ی سازه نگهبان خاص می باشد. نقطه متناظر با مشخصات خاک در ناحیه دوم و سوم و چهارم قرار می گیرد. بر روی خط دوم، سوم و چهارم موجود در نمودار مقدار عرض پی مربعی نوشته شده است.





اگر نقطه متناظر با مشخصات خاک روی خط دوم ، سوم و چهارم نمودار قرار بگیرد مقدار طول شمع و نوع آن بر اساس مقدار که روی خط نوشته شده است را اتخاذ می کنیم.

برای مثال: در نمودار شکل بالا اگر مقدار C=3 t/m2 و زاویه اصطحکاک داخلی ϕ=20 باشد نوع شمع بدون پاشنه و طول آن برابر با 3 متر می باشد

اگر نقطه متناظر در ناحیه دوم قرار گرفت مقدار طول شمع و نوع آن بر اساس مقدار که روی خط دوم نوشته شده است، می باشد. اگر نقطه متناظر در ناحیه سوم و چهارم قرار گرفت و مقادیر روی خطوط بالا و پایین نقطه هر دو مقدار Lp و Lp* باشد طول شمع باید بر اساس درون یابی تعیین شود. برای درون یابی خطی اگر فاصله نقطه مورد نظر تا خط بالایی و خط پایینی به ترتیب L1 و L2 باشد و مقدار عددی نوشته شده Lp روی خط بالایی و پایینی به ترتیب Lp1 و Lp2 باشد؛ نوع شمع بدون پاشنه و مقدار طول شمع از رابطه زیر محاسبه می شود.

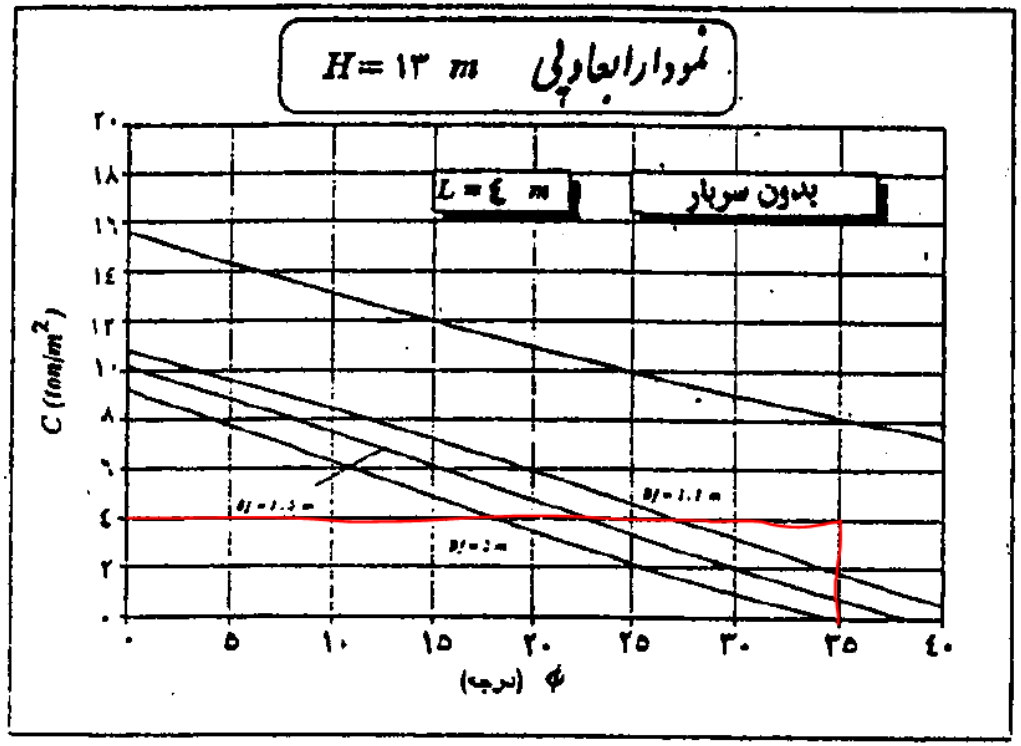
$$L_p = (L_p)_1 + \frac{L_1}{L_1+L_2}\left((L_p)_2 - (L_p)_1\right)$$

برای درون یابی اگر هر دو خط Lp* باشد نوع شمع پاشنه دار و طول آن از رابطه بالا محاسبه می شود فقط به جای Lp در رابطه Lp* جایگذاری شود.

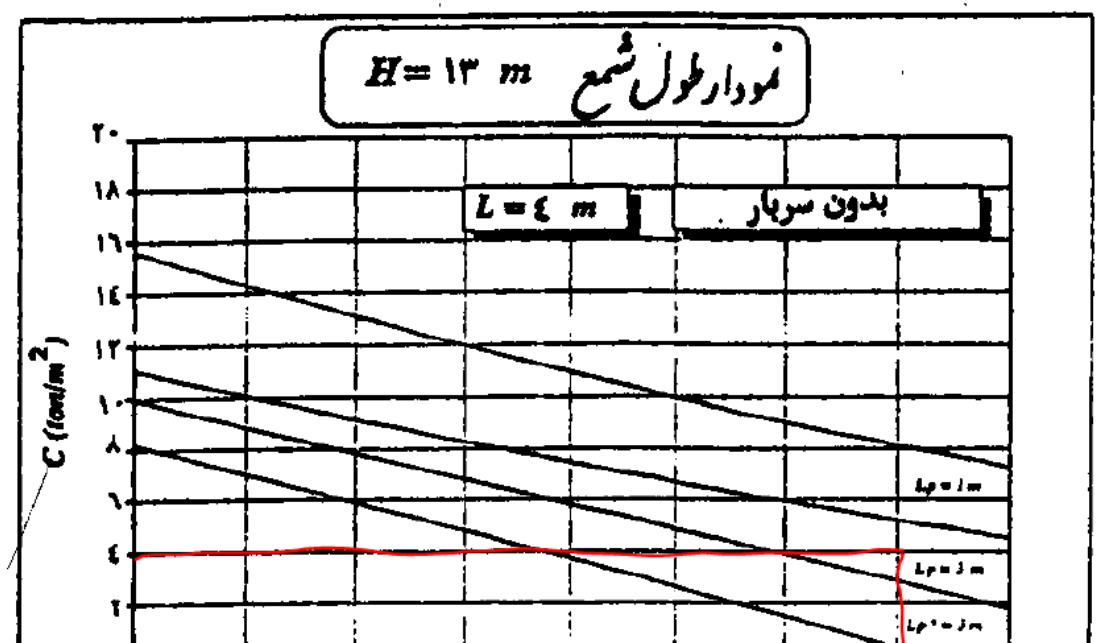
اگر نقطه متناظر در ناحیه سوم و چهارم قرار گرفت و مقادیر روی خطوط بالا و پایین نقطه مقدار Lp و Lp* باشد طول شمع باید بر اساس طول شمع پاشنه دار یعنی Lp* تعیین شود.

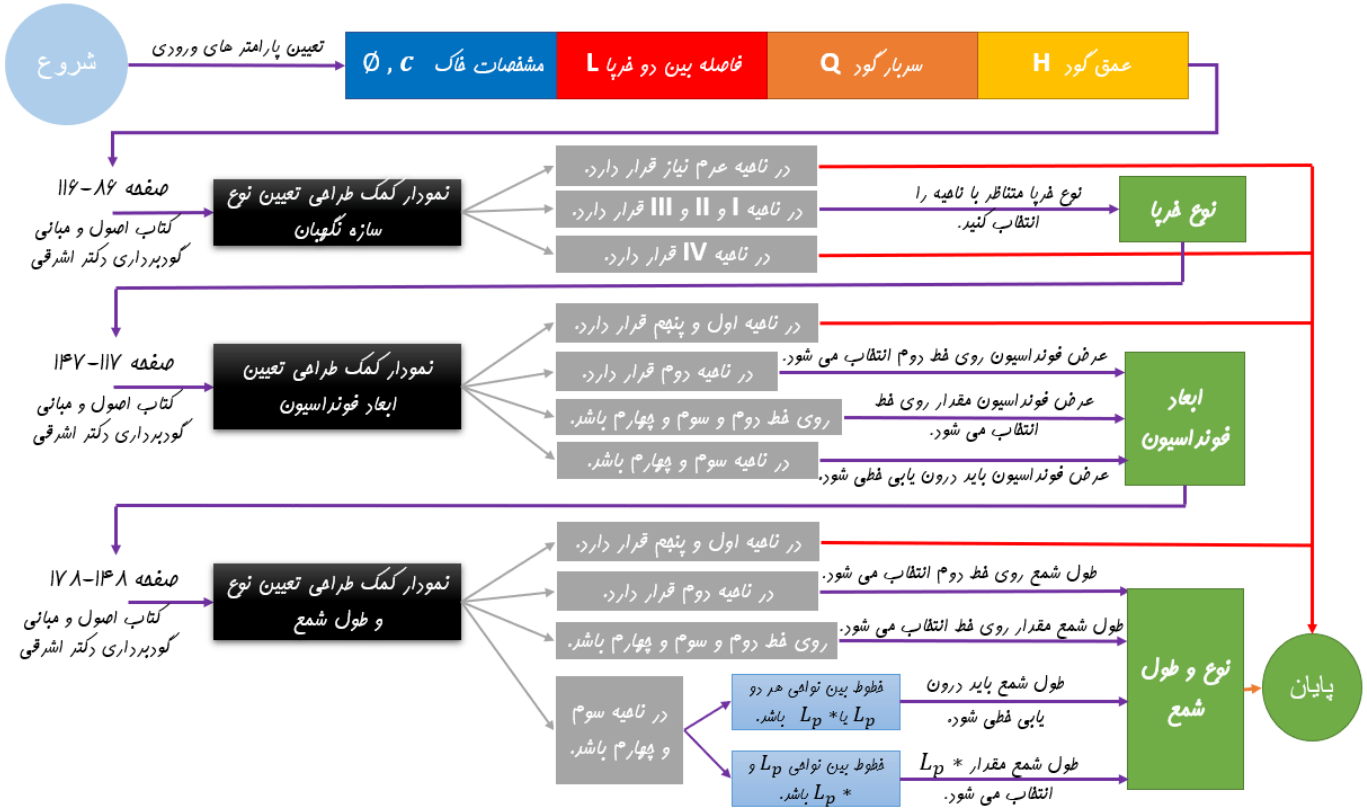
حل مثال طراحی سازه نگهبان خرپایی با استفاده از نمودار

فرض کنید که گودی به عمق 13 متر در مجاورت آن سرباری وجود ندارد. فاصله بین هر دو خرپا مجاور 4 متر است. مشخصات مکانیکی خاک به شرح زیر است.



با توجه به نمودار عرض پی 1.1 متر می باشد.





مدل سازی سازه نگهبان خرپایی در ایتبس

در این بخش از مقاله، مثال قسمت قبل مجددا به وسیله مدل سازی سازه نگهبان خرپایی در نرم افزار ایتبس حل می کنیم. این روش دقیق ترین روش موجود برای طراحی سازه نگهبان خرپایی است.

مراحل مدل سازی شامل ترسیم مدل در نرم افزار، بارگذاری خرپا و در نهایت تحلیل و کنترل سازه نگهبان می باشد. برای پروژه های ساختمانی مشخصات خاک و شرایط موجود در چهار طرف گود می توانند متفاوت باشد و مهندسین برای این شرایط چند تیپ سازه نگهبان خرپایی طراحی می کنند که از لحاظ اقتصادی به صرفه تر است. مراحل مدل سازی شامل ترسیم مدل در نرم افزار، بارگذاری خرپا و در نهایت تحلیل و کنترل سازه نگهبان می باشد.

برای پروژه های ساختمانی مشخصات خاک و شرایط موجود در چهار طرف گود می توانند متفاوت باشد و مهندسین برای این شرایط چند تیپ سازه نگهبان خرپایی طراحی می کنند که از لحاظ اقتصادی به صرفه تر است. طراحی سازه نگهبان هر چند تیپی که باشد برای هر کدام کافی است مراحل زیر را طی کنید.

مشخصات گود مورد نظر:

چسبندگی خاک دیواره گود: C=4 ton/m2

زاویه اصطحکاک داخلی خاک: ϕ=35°

عمق گود:H=13 m

مقدار سر بار گود: Q=0 ton/m^2

بارگذاری خرپا

بار گذاری خرپا با استفاده از روابط قسمت های قبل انجام می گیرد.

محاسبه ضریب رانش در حالت محرک:

$$k_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) = \tan^2\left(45 - \frac{35}{2}\right) = 0.271$$

برای تخمین پارامتر وزن مخصوص خاک از جدول زیر استفاده شده است. متناسب با مشخصات موجود وزن مخصوص خاک مقدار بین 1.74 تا 1.84 گرم بر سانتی متر مکعب قرار دارد.

جدول ۳-۲- مقادیر تخمینی c و ϕ و γ خاکها

ردیف	نوع و گروه خاک	چسبندگی خاک c (kg/cm^2)	زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک ϕ (درجه)	وزن مخصوص ظاهری و موجود γ (gr/cm^3)
۱	شن شکسته، بدون ناخالصی، با تراکم کم	-	۴۰ تا ۴۴	۱/۶۵ تا ۱/۸۷
۲	شن و ماسه شکسته، بدون ناخالصی، با تراکم کم	-	۳۸ تا ۴۰	۱/۶۵ تا ۱/۷۵
۳	مخلوط شن و ماسهٔ طبیعی، بدون ناخالصی، با دانه بندی منظم و گسترده و تراکم متوسط	-	۳۴ تا ۳۷	۱/۷۲ تا ۱/۸۲
۴	مخلوط شن و ماسهٔ طبیعی با دانه بندی منظم و گسترده و تراکم متوسط، و با ۵ تا ۱۲ درصد ناخالصی سیلیسی و رسی	۰/۲۵ تا ۰/۵۰	۳۲ تا ۳۶	۱/۷۴ تا ۱/۸۴
۵	مخلوط شن و ماسهٔ طبیعی با تراکم متعارف (متوسط)، و با ناخالصی ۱۲ تا ۲۵ درصد لای و رس، و با دانه بندی نامنظم	۰/۴۰ تا ۰/۸۰	۳۰ تا ۳۲	۱/۶۸ تا ۱/۷۸
۶	ماسه با دانه بندی منظم و گسترده بدون ناخالصی، و با تراکم متوسط	-	۳۲ تا ۳۵	۱/۶۵ تا ۱/۷۵
۷	ماسه با دانه بندی متوسط و ریز، با ۵ تا ۱۲ درصد ناخالصی لای و رس، با تراکم متوسط، و با دانه بندی نامنظم	۰/۲۵ تا ۰/۵۰	۲۸ تا ۳۲	۱/۶۲ تا ۱/۷۲

هم چنین بنا بر بند 7-3-3-5-3 مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان ویرایش 1392 برای تحلیل پایداری گود لازم است بار مرده ساختمان ها و ابنیه مجاور به طور کامل در نظر گرفته شود و برای تحلیل گود در شرایط موقت در نظر گرفتن بار زلزله لازم نیست.

از بندهای فوق نتیجه می گیریم که تاثیر بار زلزله در تحلیل و طراحی سازه نگهبان برای گود های موقت (زمان بهره برداری کمتر از 1 سال) لازم نیست اما بار مرده و زنده سازه های مجاور باید به طور کامل در نظر گرفته شود.(در این مثال سر باری وجود ندارد.)

بنا بر بند 6-2-3-2 ت) مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ویرایش 1398 در صورت وجود فشار جانبی خاک و فشار آب زیرزمینی یا مواد انباشته، H، اثر آن ها را باید به صورت زیر منظور نمود:

1) اگر اثر این بار در جهت افزودن به اثرات دیگر بارها باشد، اثر بار H باید با ضریب 1.6 در ترکیب بار ها منظور شود.

2) اگر اثر این بار در جهت کاهش اثرات دیگر بار ها باشد، در صورت وجود دائمی بار H، اثر آن باید با ضریب 0.9 در ترکیب بارها منظور شود و در بقیه موارد باید از اثر بار H صرف نظر گردد.

از بند فوق نتیجه می گیریم که ضریب بار H بنا بر بند بالا باید 1.6 باشد (سایر بارها وجود ندارند.) در صورت وجود سربار آن را بدون ضریب در ترکیب بار وارد می کنیم چراکه در محاسبه مقادیر سر بار ترکیب بارهای مبحث ششم اعمال شده است و نیازی به اعمال مجدد آن نیست.

Comb1= 1.6H+Q

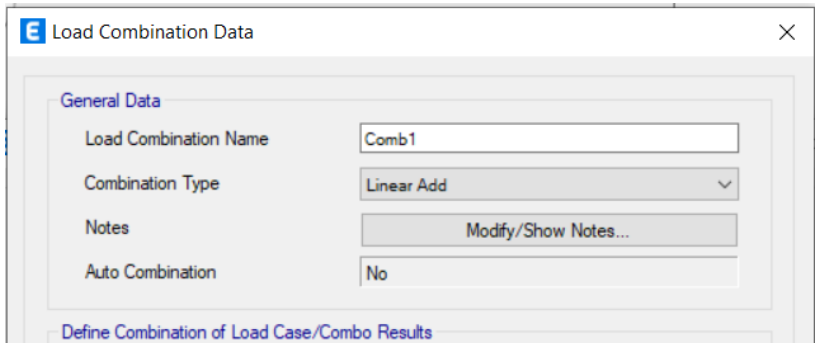
که از مسیر زیر در نرم افزار وارد می شود:

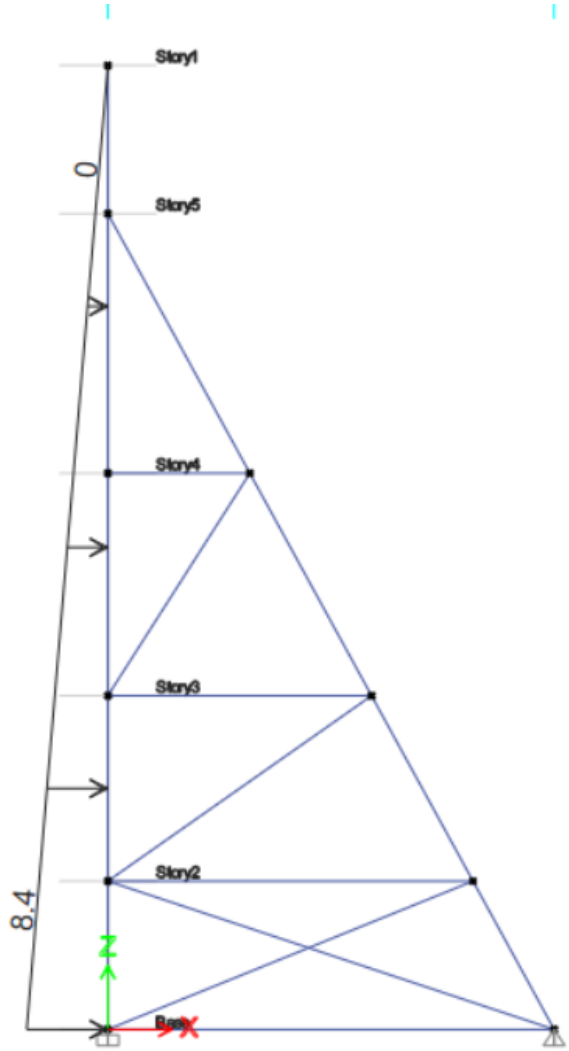
Define

ت) در صورت وجود فشار جانبی خاک و فشارآب زیرزمینی یا مواد انباشته، H، اثر آن‌ها را باید به صورت زیر منظور نمود:

ت-۱) اگر اثر این بار در جهت افزودن به اثرات دیگر بارها باشد، اثر بار H باید با ضریب ۱/۶ در ترکیب بارها منظور شود،

ت-۲) اگر اثر این بار در جهت کاهش اثرات دیگر بارها باشد، در صورت وجود دائمی بار H، اثر آن باید با ضریب ۰/۹ در ترکیب بارها منظور شود و در بقیه موارد باید از اثر بار H صرف‌نظر گردد.



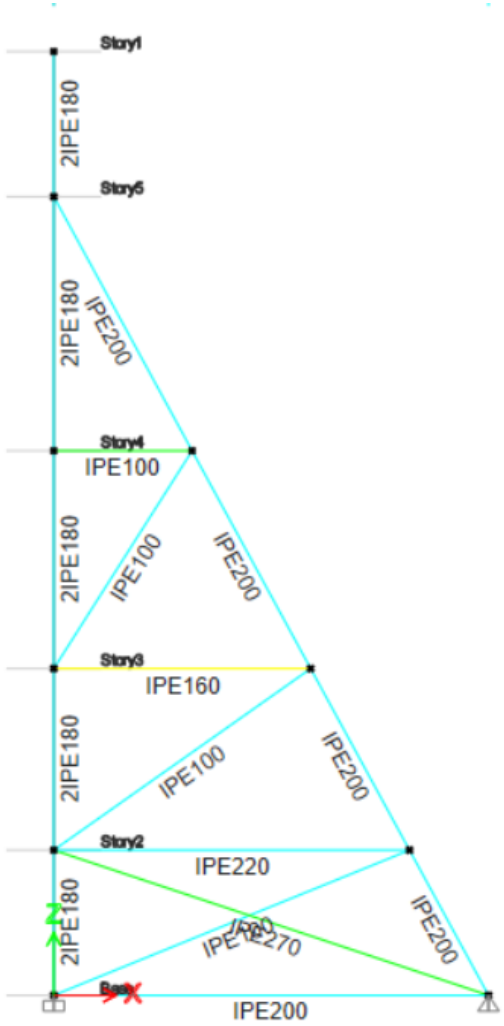


تحلیل، طراحی و کنترل سازه نگهبان خرپایی

برای تحلیل و طراحی اعضای خرپا از نرم افزار کمک می گیریم. خرپا را تحت ترکیب بارهای معرفی شده تحلیل می کنیم و مطابق با ضوابط طراحی اعضای فولادی، مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ویرایش 1392، آن ها را طراحی می کنیم. مسئله بسیار مهمی که باید حتما به آن توجه کنید این است که فشار خاک در حالت محرک محاسبه شده است و باید تغییر شکل خرپا با این فرض مطابقت داشته باشد.

۷-۵-۴-۲-۲ فشار در حالت محرک و مقاوم خاک

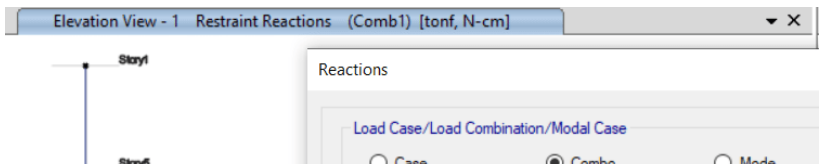
در شرایطی که حرکت دیوار نسبت به خاک در حدود مقادیر جدول ۷-۵-۱ باشد، میزان فشار وارده



طراحی پی منفرد سازه نگهبان خرپایی

طراحی پی منفرد به صورت دستی انجام می گیرد. روابط استفاده شده در این قسمت از بخش طراحی پی برای نیروی قائم آن برداشته شده است. ابتدا نیروی وارد بر پی را از قسمت زیر می خوانیم:

Display<Force/Stress Diagram<Support/Spring reaction



طراحی شمع

نیروی طراحی شمع در شکل بالا نشان داده شده است. با کمک روابط در قسمت طراحی شمع برای نیروی کششی طول شمعی با قطر 1 متر محاسبه می شود:

$$T_u = P_s + w \rightarrow T_u = ۶۱٫۷۸\ ton$$

محاسبه نیروی اصطحکاک شمع P_s (به روش α) :

$$f_s = \alpha C + k\,\sigma_v \tan\delta = ۱ \times ۴ + (۱ - \sin(۳۵)) \times ۲٫۱ \times \tan(۳۵) = ۴٫۶۲\ t/m^۲$$

$$A = (\pi D)L_p = (\pi \times ۱)L_p = ۳٫۱۴L_p/$$

$$P_s = f_s\,A = ۴٫۶۲ \times ۳٫۱۴L_p = ۱۴٫۵۱\,L_p$$

محاسبه وزن شمع w :

$$w = \gamma_c\left(\frac{\pi D^۲}{۴}\,L_p\right) = ۲٫۵ \times \left(\frac{\pi \times ۱^۲}{۴}\right)L_p = ۱٫۹۶L_p$$

$$T_u = ۱۴٫۵۱\,L_p + ۱٫۹۶L_p \rightarrow ۶۱٫۷۸\ ton = ۱۳٫۲\,L_p + ۱٫۹۶L_p \rightarrow L_p = ۳٫۷۵\ m$$

کنترل لغزش سازه نگهبان خرپایی

کنترل لغزش یکی از مهمترین کنترل های لازم برای سازه خرپایی است. ضریب اطمینان به دلیل موقت بودن سازه، 1.25 اختیار می گردد.

نیروی محرک:

$$F_a = w_v(H) \times \frac{H^۲}{۲} = ۸٫۴ \times \frac{۱۳^۲}{۲} = ۷۰۹٫۸\ ton$$

نیروی مقاوم:

$$k_p = \tan^۲\left(۴۵ + \frac{\phi}{۲}\right) = \tan^۲\left(۴۵ + \frac{۳۵}{۲}\right) = ۳٫۷$$

$$F_p = (C + \tan\delta)\left(\sum A\right) + k_p\,\gamma\,\frac{L_p}{۲}\,D_p + k_p\,\gamma\,\frac{B_f B^۲}{۲}$$

$$\frac{۳٫۷۵}{۲}$$