جمهوری اسلامی ایران
وزارت راه و شهرسازی

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

آشنایی با روش‌های گودبرداری

Excavation Methods

مولفین:

مهدی رجحانی- عطا آقائی آرائی

حامد بایسته

مازیار پاسدارپور

احسان دهقانی

شیرزاد عبدی

مهتاب علی طالش

سعید فرزانه

شماره نشر: ک- ۱۰۵۶

چاپ اول: شهریور ۱۴۰۲

پیوست‌اول: آشنایی با روش‌های گودبرداری

پ۱-۱- مقدمه

پیوست حاضر درباره معرفی روش‌های گودبرداری رایج و گزینه جایگزین روش اجرای بالا-پایین است. این پیوست به خواننده کمک خواهد کرد، روش بالا-پایین را با سایر روش‌های گودبرداری مقایسه نماید تا به انتخاب بهتری در مورد هر پروژه، نزدیک شود.

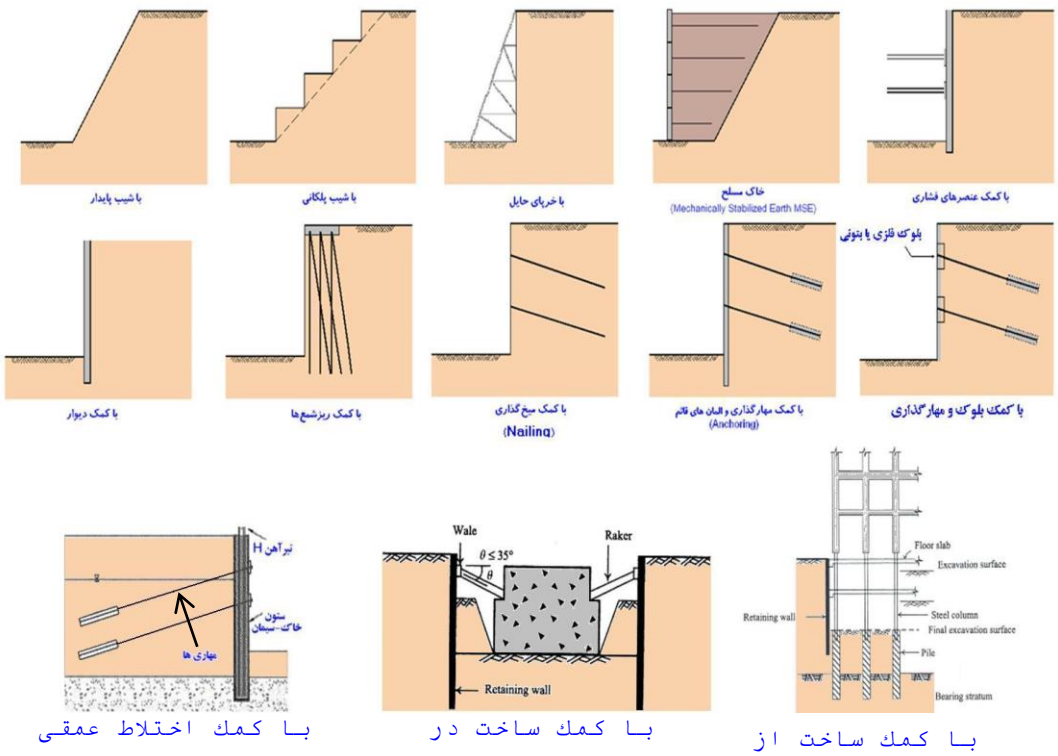
سیستم‌های نگهدارنده دیواره گود، قابلیت‌ها و ویژگی‌های مختلفی دارند. برای نمونه در خاک‌های بسیار سست، سیستم‌های نگهدارنده باید قبل از شروع عملیات گودبرداری احداث شوند. شمع‌ها و چاه‌های نگهدارنده بتنی در مجاورت گود، دیواره‌های جداکننده، سپرهای فلزی (در صورت امکان استفاده از آنها با توجه به خطرات کوبیدن) از جمله سیستم‌های مناسب برای این شرایط هستند.

در خاک‌های با پایداری نسبی خوب، می‌توان سیستم‌های نگهدارنده را همراه با انجام گودبرداری، به صورت گام‌به‌گام، احداث نمود. در این حالت باید به تغییرشکل گود و تغییرشکل‌های رخ‌داده زیر پی ساختمان مجاور، توجه ویژه داشت و چنانچه این تغییرشکل‌ها از مقادیر مجاز تجاوز کند، باید از روش ساخت سیستم‌های نگهدارنده (سازه نگهبان) قبل از شروع عملیات گودبرداری استفاده نمود.

شایان ذکر است در بررسی پایداری گودها، انتخاب و طراحی سیستم‌های نگهدارنده موارد زیر باید مدنظر قرار گیرد: نوع ساختار و بافت لایه‌های خاک، متغیّرهای مقاومت برشی خاک، متغیّرهای تغییرشکل پذیری خاک، عمق و عرض گودبرداری، شرایط آب زیرزمینی و آبهای سطحی، وجود یا عدم وجود سازه در نواحی مجاور گود و نحوهٔ ساخت و ساز آنها، وضعیت سربارهای موجود در کناره گود از قبیل ترافیک خیابان‌ها و غیره و همچنین کوتاه مدت یا بلند مدت بودن دوران استفاده از گود. همچنین در گودبرداری‌ها باید گسیختگی‌ها و تغییرشکل‌های متداول شامل لغزش خاک، نشست و تغییرمکان ساختمان‌های مجاور گود، ریزش، بالازدگی کف گود بر حسب مورد، جوشش ماسه از کف گود (در صورت بالا بودن سطح آب زیرزمینی)، مشکلات ناشی از لرزش ناشی از عملیات گودبرداری در سازه های اطراف گود و نیز چنانکه گود موقت نباشد، آثار نیروی زلزله مورد نظر باشد.

در این پیوست روش‌های گودبرداری و پایدارسازی ذیل معرفی و بررسی خواهند شد:

۱- روش پایدارسازی با شیب پایدار یا پلکانی
۲- روش پایدارسازی با سازه نگهبان خرپایی
۳- روش پایدارسازی با سازه نگهبان مهار متقابل (عناصر فشاری)
٤- روش پایدارسازی با استفاده از سیستم مهاری سپرکوبی
٥- روش پایدارسازی با استفاده از سیستم شمع و پوشش نگهدارنده
٦- روش پایدارسازی با استفاده از دیوارهای نگهدارنده بتنی
۷- روش پایدارسازی با میخ‌کوبی جهت مسلح کردن خاک
۸- روش پایدارسازی با مهاربندی خاک
۹- روش گودبرداری جزیره‌ای



شکل پ۱-۱ روش‌های مختلف گودبرداری و پایدارسازی دیواره گود

پ۱-۲- روش پایدارسازی با شیب پایدار یا پلکانی

یکی از روش‌های ایمن در پایدارسازی دیواره گود، گودبرداری با شیب پایدار یا پلکانی است. در مناطقی که فضای کافی در اطراف گود وجود دارد، می‌توان گود را به صورت شیب‌دار اجرا کرد. این روش اگرچه به تجهیزات خاصی نیاز ندارد، اما باعث افزایش تغییر شکل‌های جانبی در خاک می‌شود. همچنین به دلیل این‌که این روش به فضای زیادی نیاز دارد؛ امکان استفاده از این روش در محیط‌های شهری وجود ندارد.

شکل پ۱-۲ روش پایدارسازی با شیب پایدار یا پلکانی

جدول پ۱-۱ مشخصات روش پایدارسازی با شیب پایدار یا پلکانی

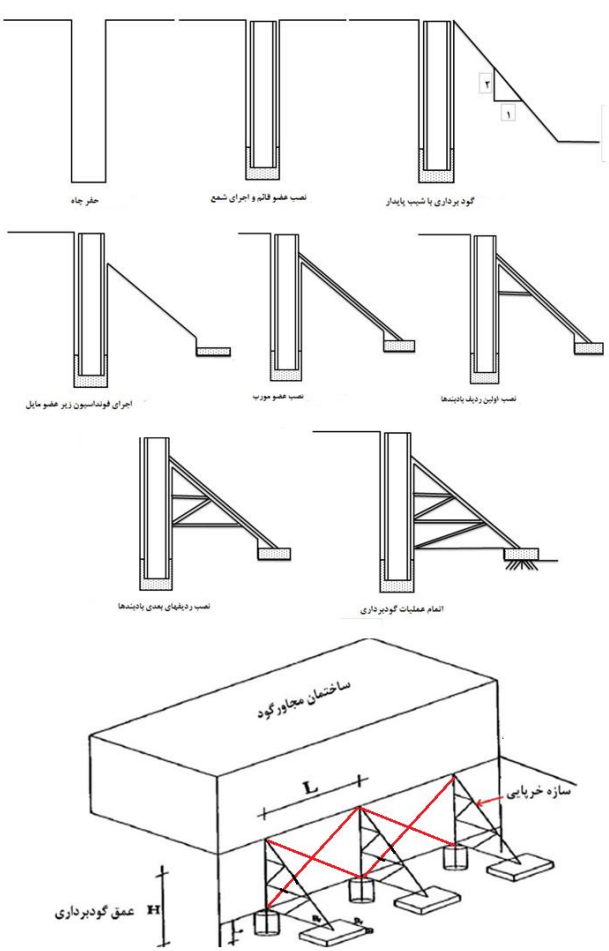
	مزایا	معایب
مشخصه روش	ارزانی، سادگی	نیازمند محدوده اجرایی خارج از گود
در مقایسه با روش بالا-پایین	سادگی بیشتر	تجاوز به ملک مجاور

پ۱-۳- روش پایدارسازی با سازه نگهبان خرپایی

این روش یکی از متداول‌ترین روش‌هایی سازه نگهبان در مناطق شهری و گودهای کم عمق است. زیرا اجرای آن ساده و بدون نیاز به تجهیزات و تخصص بالا و نسبتاً منعطف است. این روش تا دو طبقه زیرزمین و نسبت عرض به عمق گود بزرگتر از ۱/۵ توصیه می شود. از مزایای سازه نگهبان خرپایی می‌توان به امکان بازیافت بخشی از مصالح خرپا، عدم ورود به زمین‌های مجاور، قابلیت انطباق با روش‌های زهکشی، قابلیت اجرا در پروژه‌های با هندسه نامنظم اشاره کرد. از معایب آن می‌توان به جاگیر بودن (مشکل کردن عملیات اجرایی)، محدودیت استفاده در گودهای عمیق، نیازمندی به برداشتن بخشی ازخاک به روش دستی، سختی خاکبرداری و اجرای سازه اصلی، سختی اجرا و افت کیفیت سیستم آب‌بندی، عدم امکان استفاده برای افزایش عمق گود در زمان اجرا یا پس از اتمام گودبرداری، صعوبت اجرا و تداخل خرپاها در کنج‌های مقعر، سادگی ظاهری در طرح و روش ساخت و ورود افراد کاملاً غیر حرفه‌ای در این حوزه اشاره کرد. استفاده از اجزاء فرسوده و مقاطع لانه‌زنبوری برای اجرای سازه نگهبان خرپایی توصیه نمی‌شود. البته استفاده از مقاطع کارکرده و دارای کیفیت مناسب، ممکن است.

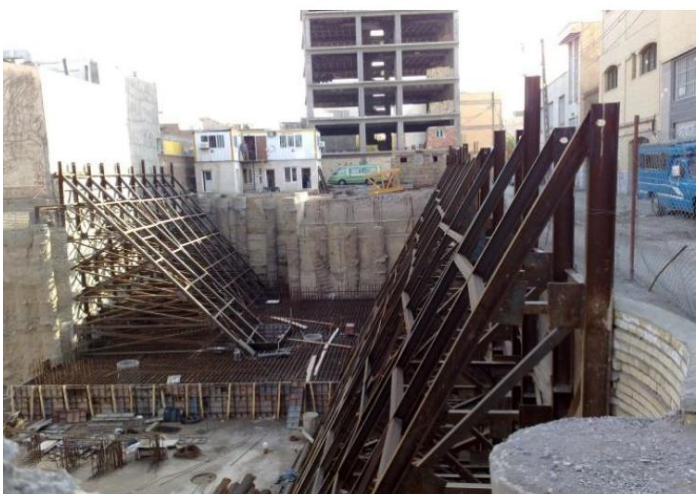
پ ۱-۳-۱- مراحل اجرا در روش خرپایی

خلاصه مراحل اجرای سازه نگهبان خرپایی در شکل (پ۱-۳) ارائه شده است. این مراحل به شرح زیر می باشد:



شکل پ۱-۳ خلاصه مراحل اجرای سازه نگهبان خرپایی

این روش بر مبنای جایگزین نمودن یک سازه فلزی با خاک برداشته شده و مهار خاک استوار شده است. در این روش ابتدا تعدادی چاه قائم در نقاط مورد نظر پیرامون زمین حفر می‌شود. در مرحله دوم قفسه آرماتورهای شمع در محل مربوطه قرار می‌گیرد. سپس عضو قائم در داخل چاه قرار گرفته و بتن‌ریزی در انتهای چاه انجام می‌شود. در مرحله بعدی داخل چاه با بتن کم‌مایه پر می‌شود. در ادامه کار، خاک با شیب پایدار در تمام محدوده گود حفاری می‌شود. در نهایت عملیات نصب عضو مایل انجام می‌گیرد.



شکل پ۱-٤ روش سازه نگهبان خرپایی

جدول پ۱-۲ مشخصات روش پایدارسازی با سازه نگهبان خرپایی

	مزایا	معایب
مشخصه روش	متداول در بسیاری گودهای کوچک قابلیت انعطاف زیادی بازیافت مصالح خرپا سادگی عدم نیاز به تخصص یا دستگاه خاص	سرعت اجرا نسبتاً کم دست و پا گیری خرپا احتمال نیاز به خاکبرداری دستی ایمنی کم
در مقایسه با روش بالا-پایین	سادگی بیشتر	ایمنی کمتر

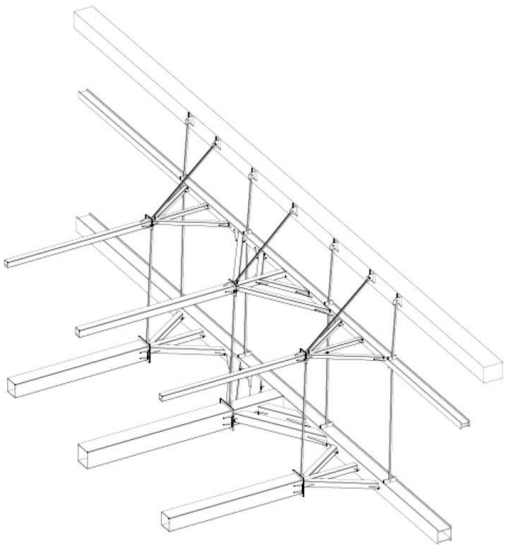
پ۱-٤- روش پایدارسازی با سازه نگهبان مهار متقابل (عناصر فشاری)

در محیط‌های شهری و در مواردی که به دلایل فنی و اجرایی مانند محدودیت ابعاد یا زیادی عمق، اجرای سازه نگهبان خرپایی با محدودیت همراه باشد و یا به علت وجود معارض، روش‌های پایدارسازی دوخت به پشت امکان پذیر نباشد، روش مهار متقابل گزینه مناسبی برای پایدارسازی گود است. اصول کلی این روش استفاده از اجزاء فلزی افقی (استرات) و مورب (مهار) به همراه اجزاء قائم (شمع فولادی) به همراه دیوار بتنی یا بتن پاششی، شمع‌های بتنی (جدا یا پیوسته)، سپر فولادی و یا دیوار جداکننده (دیافراگمی) برای تامین پایداری و کنترل تغییرشکل‌های ناشی از گودبرداری می‌باشد. مهارهای فشاری به صورت فلزی یا بتنی ساخته می‌شوند، که گاهی قابلیت عملکرد به صورت هیدرولیکی را نیز دارند و طول آن‌ها قابل تغییر است. با توجه به شرایط پروژه، نیازهای طراحی، سطح آب زیرزمینی، نوع خاک و سایر عوامل، یکی از انواع اجزاء قائم ذکر شده در بالا انتخاب می‌گردد. طراحی اجزاء افقی با طول متغییر بر اساس مراجع معتبر، به شرطی که کلیه امکانات اجرایی آن پیش‌بینی گرد، مجاز است.

در روش مهار متقابل، فشـار خاک وارد بر دیواره گود از طریق اجزاء افقی به دیوار مقابل منتقل می‌گردد. این روش در حفر ترانشـه های کم عرض مثل کانالها و حتی عمیق در محیطهای شـهری کاربرد بسـیاری دارد. در طراحی کلیات و چیدمان اجزاء سـیسـتم مهار متقابل، توصـیه می شود به منظور پیشگیری از بروز پدیده خرابی پیشرونده، درجه نامعینی سازه تا حد امکان افزایش داده شود.

این روش برای عرض حدود ۱۰ و کمتر از ۱۵ متر مناسـب‌تر اسـت. فاصـله اجزاء باید طوری تنظیم گردد که علاوه بر تأمین ایمنی سـیسـتم سـازه نگهبان(تأمین مقاومت و سـختی لازم)، مباحث اجرایی نیز رعایت گردد. از مزایـای آن در گودبرداری بـا عرض کم می‌توان به محدود سـازی تغییرشـکل‌ها، قابلیت انطباق با روش‌های زهکشـی، انعطاف‌پذیری و امکان تقویت طرح در حین و پس از اجرا، عدم وابسـتگی کارآیی روش به جنس خـاک، هزینه کمتر، سـرعت زیادتر و جاگیری کمتر در گودبرداری‌های کوچک و عدم نیاز به تجهیزات خاص اشـاره کرد. از معایب آن مشـکلات مرتبط با یکسـان نبودن خاک طرفین، عدم امکان حفاری توسـط ماشین در گودبرداری‌های عمیق، غیراقتصـادی بودن در زمین‌های با عرض و عمق زیاد، اشغال فضای داخل گود و مشکل بودن خاکبرداری و اجرای سـازه اصـلی، سـرعت نسـبتاً پائین اجرای عملیات، محدودیت اجرا در محیط‌های با دسـترسـی دشـوار، سختی اجرا و افت کیفیت سیستم آب‌بندی، محدودیت اجرا در پروژه‌های با هندسه نامنظم، عـدم امکـان اسـتفـاده برای افزایش عمق گود در زمـان اجرا یـا پس از اتمـام گودبرداری، نیاز به تجهیزات و ماشین‌آلات خاص، نیازمند پرسنل مجرب و کنترل کیفی دقیق جهت اجرای مهارها به ویژه اتصالات می‌باشد.

درگودهای طویل یا تونل‌هایی که برای مهار جانبی از مهار متقابل اسـتفاده می‌شود، استفاده از تیر افقی سرتاسری یکپارچه کننده (تیر ویل)، به جای اتصـال مستقیم عنصر افقی به سازه نگهبان پیشنهاد می‌گردد. اتصال مهار افقی به تیر سـرتاسـری می‌بایسـت طوری باشـد که از کلیه حرکات انتقالی در سـه راستای اصلی جلوگیری کند. لازم اسـت از قراردادن اجزاء در تراز سـقف و ترکیب آنها با سـقف سـازه اصـلی خودداری گردد. در مواردی ممکن اسـت از دال بتنی کف به عنوان مهار متقابل اسـتفاده شود که در این موارد لازم است، طراحی لازم جهت تأمین سختی و مقاومت کافی در برابر بارهای جانبی سازه نگهبان و بارهای عمودی (مانند ماشین آلات ساخت) انجام گردد. تیر سرتاسری می‌بایست مقاومت و سختی کافی جهت انتقال نیرو از سیستم سازه نگهبان به مهارمتقابل را داشـته باشـد. فاصله عمودی تیرها باید طوری تنظیم گردد که علاوه بر تأمین ایمنی لازم سیستم سازه نگهبان (با توجه به تأمین مقاومت و سـختی لازم)، مباحث اجرایی نیز رعایت گردد. ابعاد تیر می‌بایسـت طوری انتخاب گردد که ملاحظات اتصـال مهار به تیر را در برگیرد. پیشـنهاد می‌شـود در سـطح تماس اتصـال تیر به مهار، تیر بزرگتر باشد.



شکل پ۱-۵ اتصال مهارافقی و تیر سرتاسری به سرشمع

شکل پ۱-٦ پایدارسازی گود با روش مهارمتقابل

جدول پ۱-۳ مشخصات روش پایدارسازی با مهارمتقابل

	مزایا	معایب
مشخصه روش	سرعت اجرای بالا مناسب برای گودهای با عرض کم عدم تجاوز به ملک مجاور امکان بازیابی المانهای مهار متقابل	دست و پا گیر بودن ناشی از اشغال فضا هزینه بیشتر برای تهیه اجزای پایدارساز لزوم طراحی و اجرای صحیح اتصالات نیازمند تخصص بالای اجرای سازه
در مقایسه با روش بالا-پایین	سرعت نسبتاً بیشتر	ایمنی کمتر

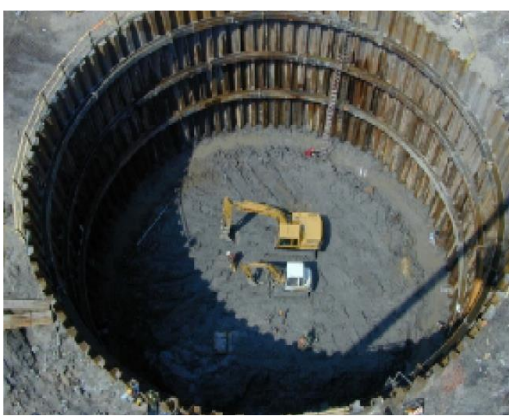
پ۱-۵- روش پایدارسازی با استفاده از سیستم مهاری سپرکوبی

در این روش مقاطع فلزی درون خاک و در جداره‌ی گود توسط چکش بادی و یا با استفاده از لرزش کوبیده می‌شوند و با انواع اتصالات کام زبان بین خود، به یکدیگر متصل شده و یک جداره‌ی پیوسته را تشکیل می‌دهند. در این روش محدودیت‌های اشغال فضای داخل گود کمتر وجود دارد. سپرها اصولاً عناصر موقت هستند. عمده‌ترین کاربرد سپرها در گودبرداری‌های کم‌عرض جهت لوله‌گذاری، تونل، مترو و امثال آن است.

در این روش، ابتدا در طرفین گود سپرها کوبیده می‌شود و سپس خاکبرداری انجام می‌شود. پس از آن که عمق خاکبرداری به تراز مناسب رسید، در کمرکش سپرها و بر روی آنها، تیرهای پشت‌بند افقی نصب و سپس

قیدهای فشـــاری قائم در جهت عمود بر صـــفحه‌ی ســـپرها از جلو و یا مهار درون خاک از پشـــت به این پشت‌بندهای افقی وصل می‌گردد. سپس دوباره تا تراز بعدی نصب قید فشاری یا مهارها، حفاری ادامه می‌یابد.
سپرها، پشت‌بندها و قیدهای فشاری در عرض‌های کم و خاک‌های غیر سست، معمولاً از نوع چوبی است. ولی در عرض‌های بیشـتر و خاک‌های سست‌تر، استفاده از سپرها و پشت‌بندها و قیدهای فشاری فلزی اجتناب‌ناپذیر است.

سـپرها عناصـری شـکل‌پذیر و معمولاً فلزی هسـتند. خاک در جلوی سـپر می‌تواند در حالت رانش مقاوم و در پشت آن در حالت محرک باشد. اگر سپر به اندازه‌ی کافی در خاک فرو رفته باشد، آنگاه سپر گیردار در پا است و فشـار ضـد رانش مقاوم در پای سـپر ایجاد می‌کند. اگر سپر به اندازه کافی در خاک فرو نرفته باشد، پای سپر مفصل است و به آن سپر آزاد در پا گفته می‌شود.



شکل پ۱-۷ پایدارسازی گود با روش سپرکوبی

جدول پ۱-٤ مشخصات روش پایدارسازی با سپرکوبی

	مزایا	معایب
مشخصه روش	ایمنی بالا در صورت مهار به پشت مناسب برای گود ها با طول زیاد مناسب برای شرایط بالا بودن آب زیرزمینی	نیاز به دستگاه‌های ویژه نیاز به نیروی کار متخصص مناسب برای عرض‌های کم
در مقایسه با روش بالا-پایین	تامین فضای مناسب‌تر کاری	گران‌تر غیرقابل کاربرد در خاک‌های قلوه ای و سخت

پ۱-٦- روش پایدارسازی با استفاده از دیوارهای نگهدارنده بتنی

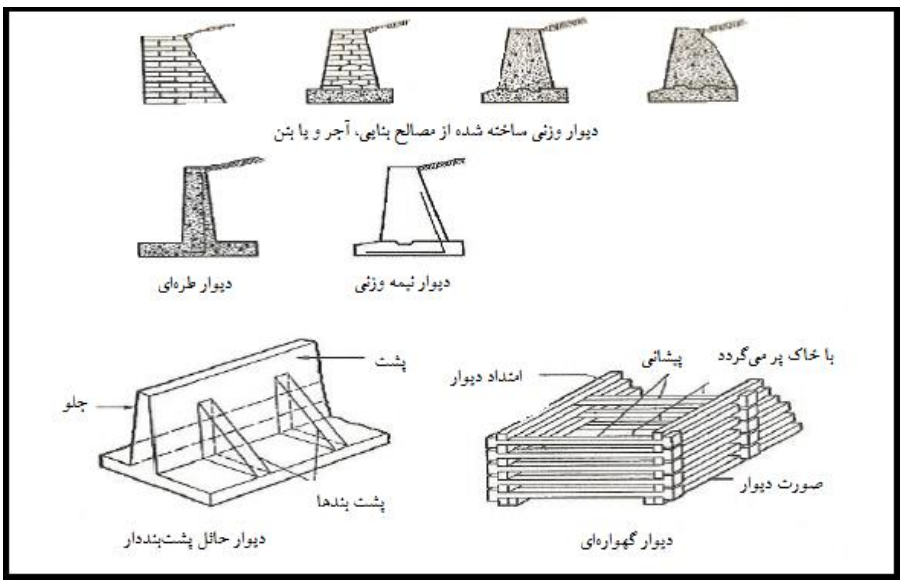
دیوار حائل یا دیوار نگهدارنده، دیواری بتنی اسـت که خاک را در پشت خود نگه می‌دارد و باعث جلوگیری از ریزش آن می‌شود. انواع مختلفی از دیوارهای نگهدارنده بتنی به شرح ذیل وجود دارد:

- دیوارهای ثقلی[۱]
- دیوار طره‌ای[۲]

[۱] Gravity Walls

[۲] Cantilever Walls

- دیوار حائل پشت‌بنددار[۱] یا مهارشده
- دیوار گهواره‌ای[۲]
- دیوار نیمه ثقلی[۳]
- دیوار جداکننده[۴]



شکل پ۱-۸ انواع مختلف دیوارهای نگه‌دارنده از جنس بتن مسلح یا مصالح بنایی

لیکن همانطور که مشخص است، بسیاری از این دیوارهای بتنی قابلیت اجرا برای گودبرداری را ندارد. یعنی نمی‌تواند قبل از خاکبرداری ایجاد و مانع ریزش خاک شود. از میان این روش‌ها، دیواره طره‌ای یا مهارشده با فناوری‌های اجرایی مختلف از قبیل جداکننده (دیافراگمی)، شمعی با الگوهای مختلف چینش و یا حتی غیربتنی و ساخته شده با خاک‌سیمان با فناوری تزریق پرفشار (جت‌گروت) یا اختلاط عمیق می‌باشد.

پ۱-۶-۱- دیوار جداکننده

دیوارهای جداکننده یا دوغابی[۵] دسته‌ای از دیوارهای حائل از جنس بتن مسلح هستند که با حفر ترانشه‌هایی عمیق ساخته می‌شوند. در این روش ابتدا دورتادور گود به کمک دستگاه‌های حفاری ویژه‌ای حفاری می‌شود و به‌طور همزمان با گل بنتونیت پر می‌شود. بعد از پایان خاکبرداری، قفسه آرماتور داخل شیار قرار داده شده و درون آن با بتن پر می‌شود. این روش درگودهای عمیق و تونل‌ها کاربرد بسیاری دارد. به علت کاربرد این نوع دیوارها در روش بالا-پایین با الگوی جهانی، روش اجرای این روش به تفصیل در فصل سوم راهنما ذکر شده است. این دیوارها به غیر از کاربرد در روش بالا-پایین، با ترکیب با قیدهای فشاری متقابل یا مهارهای کششی پشت دیوار، یک سیستم پایدارسازی قابل اتکا و اصولی است. خصوصاً در مواردی که آب زیرزمینی در ترازهای بالا باشد، استفاده از این روش اجرای دارای مزایای قابل توجهی است.

---

[۱] Counterfort Walls

[۲] Crib Walls

[۳] Semi-Gravity Walls

[۴] Diaphragm Walls

[۵] Slurry Wall

شکل پ۱-۹ پایدارسازی گود با روش دیوار جداکننده

جدول پ۱-۵ مشخصات روش دیوار جداکننده

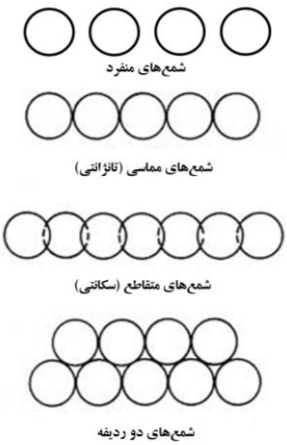
	مزایا	معایب
مشخصه روش	ایمنی بالا در صورت دوخت به پشت	در احجام کم هزینه بالا است عدم امکان اجرا در فضای محدود شهری نیاز به دستگاه‌های ویژه نیاز به نیروی کار متخصص
در مقایسه با روش بالا-پایین		نیاز به فناوری و تجهیزات خاص احتمالاً گران‌تر

پ۱-٦-۲- دیوار متشکل از شمع

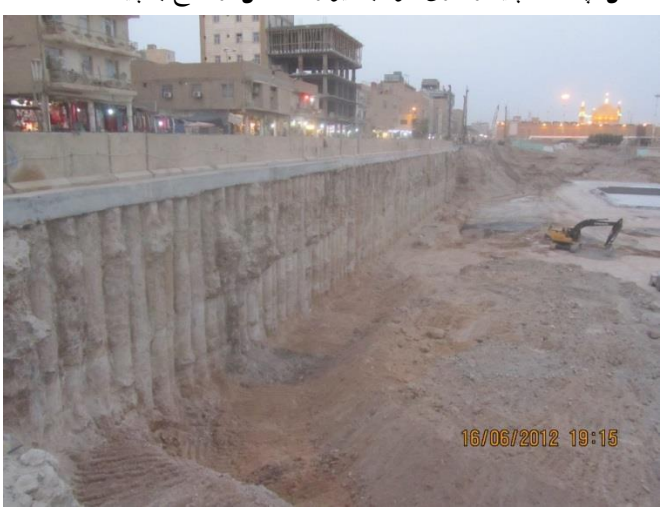
یک روش دیگر برای ایجاد دیوار، ساخت دیوار با ساخت شمع‌های متعدد است. بدین ترتیب که با ساخت شمع‌های مجاور[1] (شمع‌های سرباز) که ممکن است با فاصله بوده یا با هم مماس یا همپوشانی داشته باشند، یک سازه نگهبان ساخته می‌شود. اگر خاک وضعیت خیلی خوبی داشته باشد، ممکن است شمع‌ها با فاصله از هم ساخته شوند. در غیر این صورت شمع‌ها با هم موازی (تانژانت پایل) و یا حتی برای یکپارچگی بهتر، در هم رفته و با همپوشانی (سکانت پایل) خواهد بود (شکل پ۱-۱۰). استفاده از مهار برای کمک به مقطع شمع یا مهار متقابل در برابر این شمع‌ها، مشابه آنچه برای دیوار جدا کننده انجام می‌شد، قابل انجام است.

در این روش، در پیرامون زمینی که قرار است گودبرداری انجام شود، در فواصل معینی از هم شمع‌هایی اجرا می‌شود. این شمع‌ها می‌توانند از انواع مختلف مصالح سازه‌ای نظیر فولاد، بتن و چوب باشند. همچنین شمع‌های بتنی را می‌توان به‌صورت پیش‌ساخته یا درجا اجرا کرد. در این روش بعضاً شمع‌ها فشار جانبی خاک را به صورت تیرهای یک سر گیردار تحمل می‌کنند. در این شرایط طول گیرداری لازم در انتهای شمع‌ها، چیزی در حدود ۳۰ درصد طول شمع است. پس از اجرای شمع‌ها می‌توان عملیات گودبرداری را اجرا کرد. البته در صورت لزوم باید شمع‌ها را در امتداد گود مهاربندی کرد و یا مهار متقابل برای آنها قرار داد. در این روش ممکن است شمع‌ها از هم فاصله داشته باشند و فاصله بین آنها توسط چوب، قطعات پیش‌ساخته بتنی و یا بتن پاششی پر شود.

[1] Soldier piles

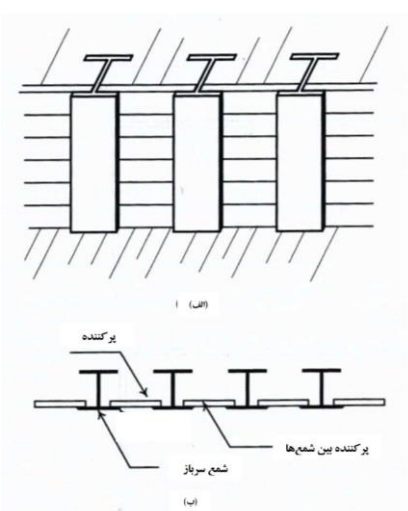


شکل پ۱-۱۰ پایدارسازی گود با دیواره متشکل از شمع با چیدمان مختلف



شکل پ۱-۱۱ پایدارسازی گود با روش شمع مماسی

پر کردن فاصـله بین شمع‌ها برای جلوگیری از ریزش‌های سطحی خاک می‌باشد. در این روش شمع‌ها می‌توانند با مصالح و مقاطع متنوع دیگری از قبیل مقطع H فولادی نیز باشند.



شکل پ۱-۱۲ پایدارسازی گود با روش شمع سرباز با فاصله و پرکننده بین شمع‌ها

در این روش اجرا، مقاطعی از تیرآهن تا عمقی بیشتر از حفاری در خاک رانده می‌شود. بین این تیرآهن‌ها با استفاده از چوب‌هایی به ضخامت ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر که در پشت بال جلویی قرار می‌گیرد، پر می‌شود. چنانچه لازم باشد، در ترازهایی از مهار نیز استفاده خواهد شد.

شکل پ۱-۱۳ پایدارسازی گود با روش شمع سرباز با فاصله

جدول پ۱-٦ مشخصات روش پایدارسازی با شمع

	مزایا	معایب
مشخصه روش	تامین بخش عمده مزایای دیوار جداکننده بدون استفاده از تجهیزات پیچیده	زمان‌بر بودن لزوم مهار به پشت و نفوذ در زمین مجاور در اعماق زیاد
در مقایسه با روش بالا-پایین		نیازمند فضای بیشتر سطح کار نامنظم تر

پ۱-٦-۳- دیوار متشکل از شمع‌های خاک سیمانی

یکی دیگر از روش‌های پایدارسازی دیواره گود، روش مشابه استفاده از شمع‌های بتنی است. با این تفاوت که به جای شمع بتنی که مستلزم حفاری و اجرای شمع است، از ستون‌ها یا شمع‌های خاک سیمانی استفاده می‌شود. حسن استفاده از شمع‌های خاک سیمانی، روش اجرای آن است که بسیار ساده و سریع است و با فناوری اختلاط عمیق[1] خاک یا تزریق پرفشار[2] انجام می‌شود. در این روش‌ها ستون یکنواختی با مخلوط خاک و مواد پایدارکننده نظیر سیمان و آهک در محل ساخته می‌شود که از همپوشانی این ستون‌ها، دیواره‌ای محکم جهت پایداری دیواره گود ایجاد می‌کند. اگرچه سختی این مصالح به مراتب کمتر از بتن می‌باشد و به همین دلیل در گودهای عمیق با محدودیت زیادی همراه است، لیکن سرعت و سهولت اجرایی آن به حدی است که در موارد بسیاری راهگشاست.

شکل پ۱-١٤ پایدارسازی گود با ستون‌های خاک سیمانی

[1] Deep soil mixing
[2] Jet grouting

شکل پ۱-۱۵ پایدارسازی گود با ستون‌های خاک سیمانی مهارشده

در روش اختلاط عمیق ابتدا دستگاه همزن با بازوهای خود و همزمان با فشار و چرخش در زمین وارد می‌شود. سپس زمانی که به عمق موردنظر رسید، رانش متوقف شده و همزن حرکت خود را به صورت معکوس آغاز می‌کند و به‌طور آهسته به سمت بالا رانده می‌شود. در زمان حرکت همزن به سمت بالا، از درون نازل‌های تعبیه‌شده در نوک بازوها، دوغاب با فشار بسیار زیاد به درون خاک تزریق می‌شود. این حرکت به سوی بالا مرحله‌ای بوده و پس از طی فاصله یک متر رو به بالا، به مدت تقریباً یک دقیقه در همان تراز می‌چرخد و دوغاب به داخل زمین تزریق می‌شود. البته فاصله‌ها و زمان‌های اشاره شده با توجه به نوع دستگاه و نوع خاک متغییر است.

روش دیگر اجرای ستون خاک سیمانی، تزریق پرفشار است. بدین نحو که مته حفاری مجهز به نازل ویژه تزریق، با چرخش و فشار با حفاری به قطر حدود ۱۰ سانتی‌متر خود را به تراز مورد نظر می‌رساند. سپس در آن تراز، تزریق دوغاب سیمان با فشارهای بسیار بالا آغاز می‌شود و مته آرام آرام با چرخش به سطح بر می‌گردد. محصول این اقدام، فرسایش و مخلوط شدن خاک اطراف تا قطر مشخصی است که ستون خاک سیمانی را تشکیل می‌دهد. در این روش‌ها برای افزایش مقاومت خمشی نیز می‌توان، قبل از گیرش مخلوط خاک سیمان با کوبیدن مقاطع H شکل در داخل ستون‌های ایجاد شده، آنها را مسلح کرد.

جدول پ۱-۷ مشخصات روش‌های استفاده از ستون خاک سیمانی

	مزایا	معایب
مشخصه روش	سرعت اجرای بالا دست و پا گیر نبودن روش کاهش هزینه در احجام زیاد مناسب برای شرایط بالا بودن آب زیرزمینی	اقتصادی معمولاً در گودهای کم عمق صعوبت حفاری در زمینهای سخت مشکلات کنترل کیفی
در مقایسه با روش بالا-پایین	تامین فضای کاری مناسب	محدودیت زیاد در عمق

پ۱-۷- روش پایدارسازی با میخ‌کوبی دیواره

روش میخ‌کوبی (نیلینگ) که با عنوان روش دوخت به پشت نیز شناخته می‌شود، یکی دیگر از فنون پایدارسازی دیواره‌های گودهای عمیق است. طریقه عمل این روش بر مبنای مسلح کردن خاک دیواره گود با استفاده از دوختن توده خاک توسط مهارهای کششی به یکدیگر است. در این روش ابتدا تا کمی پایین‌تر از تراز میلگردها، گودبرداری انجام می‌شود. سپس با زاویه بین ۱۰ تا ۲۵ درجه نسبت به افق، سوراخ‌کاری انجام می‌شود. در ادامه میلگردها در سوراخ‌های حفاری شده قرار می‌گیرد و سوراخ‌ها با دوغاب سیمان پر می‌شود؛ و دیواره با شبکه

فولادی و بتن پاششی اجرا می‌شود و این روند تا رسیدن به پایین گود ادامه می‌یابد.

روش میخ‌کوبی برای اعماق گود ۸ تا ۱۵ متر برای خاک‌های دانه‌ای خوب دانه‌بندی شده نسبتاً متراکم با SPT بیش از ۳۰، خاک ریزدانه سخت با SPT بیش از ۱۰ و سنگ‌های هوازده فاقد صفحات سست مناسب است. بطور کلی خاک شن و ماسه‌ای دارای ۱۵ تا ۲۰٪ ریزدانه، بهترین خاک برای پایدارسازی دیواره گود با میخ‌کوبی است. اگر بخش حفاری شده به ارتفاع ۱ تا ۲ متر به صورت قائم یا نزدیک به قائم، برای مدت زمان یک تا دو روز پایداری خود را حفظ کند، به طوری‌که بعد از خیس شدن کامل، به صورت توده‌ای ریزش نداشته باشد و همچنین اگر شرایط زمین طوری باشد که چال حفاری شده بتواند به مدت چند ساعت (زمان قراردادن آرماتورها و تزریق دوغاب) پایدار بمانند، نیازی به قرار دادن لوله حفاظ (Casing) نیست؛ در آن صورت بکارگیری روش میخ‌کوبی کاملاً اجرایی و اقتصادی است.

از مزایای پایدارسازی دیواره گود به روش میخ‌کوبی می‌توان به انعطاف‌پذیری نسبی، قابلیت تحمل نشست زیاد، قابل قبول و مجاز بودن تغییرشکل و خمش دیوار میخ‌کوبی شده، عملکرد خوب تحت بار لرزه‌ای به علت انعطاف‌پذیری، اقتصادی‌تر بودن، قابلیت تنظیم و جانمایی مجدد در صورت برخورد به تاسیسات زیرزمینی و اصلاح راحت‌تر طرح دیوار بدون از دست دادن سطح ایمنی در مقایسه با مهار اشاره کرد. از سایر مزایا می‌توان به سرعت بالای اجرای عملیات، قابلیت اجرا در محیط‌های با دسترسی دشوار، حداقل اشغال فضای داخلی پروژه، عدم تداخل با اجزای سازه اصلی، امکان پایدارسازی دائمی، انطباق با روش‌های زهکشی و آب‌بندی، انعطاف‌پذیری و امکان تقویت طرح در حین و پس از اجرا، قابلیت اجرا در پروژه‌های با هندسه نامنظم، امکان استفاده در پروژه‌های نیمه تمام و یا پایدارسازی نشده و قابلیت استفاده برای افزایش عمق گود در زمان اجرا یا پس از اتمام گودبرداری می‌باشد.

از معایب این روش می‌توان به تجاوز به حریم همسایه، عدم امکان کنترل جابجایی، مشکلات اجرایی در صورت وجود تاسیسات مدفون، نیاز به تخصص برای نصب میخ‌ها، نشت آب برای مکان‌های با تراز بالای تراز آب زیرزمینی اشاره کرد. از دیگر موارد می‌توان به بروز جابجایی قابل توجه به ویژه در مجاورت سازه‌های حساس، نیاز به تجهیزات و ماشین‌آلات خاص، مشکلات و محدودیت‌های اجرایی مربوط به وجود حفرات زیرزمینی، نیازمند پیمانکارهای تخصصی مجرب، آلودگی صوتی و احتمال آسیب رساندن به فضای سبز و چاه‌های مجاور اشاره کرد. مشکل دیگر این است که با توجه به غیرفعال بودن اجزاء، در اکثر آنها پس از لغزش گوه، نیرو جهت مقابله ایجاد می‌شود که به توجه به ایجاد تغییرشکل نامناسب است. در این روش پایدارسازی، زهکش‌ها باید به دقت زیاد طرح‌ریزی و اجرا گردد.

شکل پ۱-۱۶ پایدارسازی گود با میخ‌کوبی دیواره

جدول پ۱-۸ مشخصات روش میخ‌کوبی دیواره

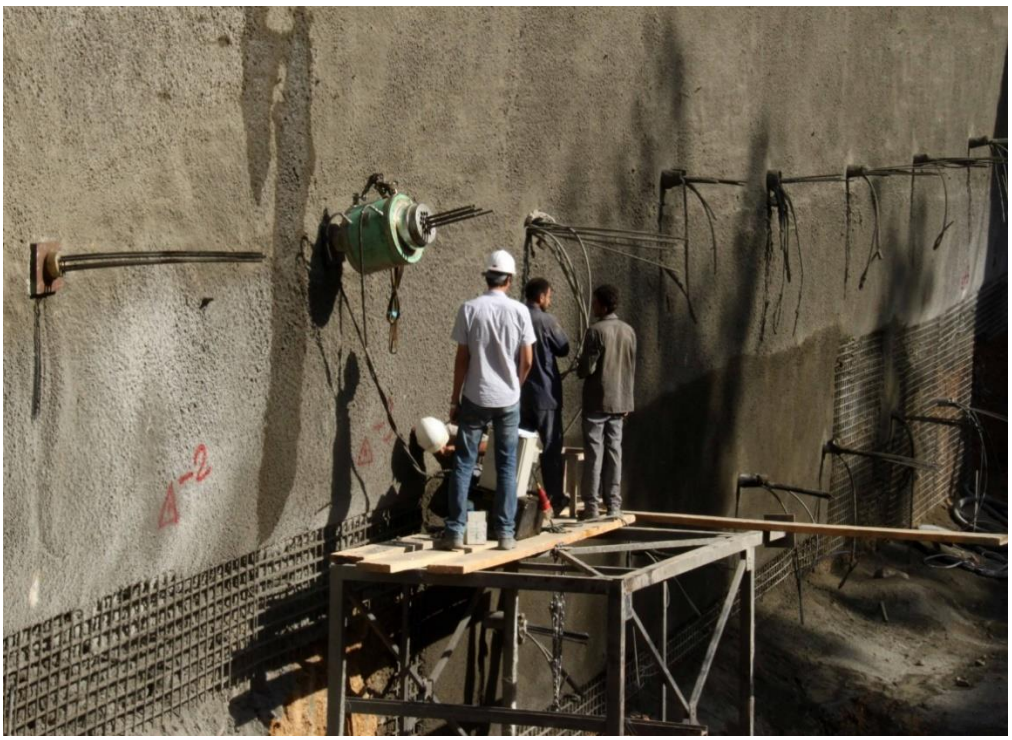
	مزایا	معایب
مشخصه روش	فضای کاری مناسب ارزانی (در پروژه‌های بزرگ ممکن است) سرعت در اجرای اسکلت	تجاوز به حریم همسایه
در مقایسه با روش بالا-پایین	در دسترس بودن سرعت اجرا تامین فضای کاری مناسب‌تر	تجاوز به حریم همسایه

پ۱-۸- روش پایدارسازی با مهاربندی دیواره

یکی از پرکاربردترین روش‌های پایدارسازی گود، استفاده از روش مهاربندی است. این روش یکی از روش‌های دوخت به پشت می‌باشد که با حفاری تعدادی گمانه در زمین‌های اطراف گود و قراردادن اجزاء مسلح کننده (استرند یا میلگرد)، در داخل آنها و تزریق، مقاومت برشی سطح گسیختگی خاک افزایش داده می‌شود.

مزیت اصلی روش مهاربندی نسبت به میخ‌کوبی، ایجاد نیروی تنیدگی در اجزاء مسلح کننده جهت کاهش نسبی میزان تغییرشکل‌های ناشی از گودبرداری است. در حالی‌که در روش میخ‌کوبی فعال شدن نیرو در میخ‌ها مستلزم بروز تغییرشکل در توده خاک دیواره گود است. همچنین اعمال نیروی تنیدگی منجر به حصول اطمینان از صحت عملکرد اجزاء می‌شود. از مزایای روش مهاربندی می‌توان به کاهش نسبی تغییرمکان‌ها، اطمینان از صحت عملکرد کلیه مهارها، قابلیت اجرا در پایدارسازی گودهای با عمق زیاد، حداقل اشغال فضای داخلی پروژه، عدم تداخل با اجزای سازه اصلی، سرعت بالای اجرای عملیات، امکان پایدارسازی دائمی، انطباق با روش‌های زهکشی و آب‌بندی، انعطاف پذیری و امکان تقویت طرح در حین و پس از اجرا، قابلیت اجرا در پروژه‌های با هندسه نامنظم، امکان استفاده در پروژه‌های نیمه تمام و یا پایدارسازی نشده و قابلیت استفاده برای افزایش عمق گود در زمان اجرا یا پس از اتمام گودبرداری نام برد.

از معایب مهاربندی می‌توان به تجاوز به محدوده زمینهای مجاور، نیاز به حفاری با طولهای بلندتر نسبت به روش میخ‌کوبی، نیاز به تجهیزات و ماشین‌آلات خاص، مشکلات و محدودیتهای اجرایی مربوط به وجود حفرات زیرزمینی، نیازمند پیمانکارهای تخصصی مجرب، آلودگی صوتی و احتمال آسیب رساندن به فضای سبز و چاه‌های مجاور اشاره کرد.



شکل پ۱-۱۷ پایدارسازی گود با مهاربندی دیواره

در روش مهاربندی برای کنترل نیروی مهار در سرمهار و انتقال مطمئن آن به خاک، از اجزاء مناسبی استفاده می‌شود. اجزاء قائم یا بالشتک بتنی یا فلزی و یا ترکیب آنها می‌تواند به این منظور استفاده شود. اجزاء قائم از مقاطع فولادی یا شمع‌های فولادی ساخته شده است. بالشتک بتنی در واقع یک بلوک بتنی مسلح است که می‌تواند پیش‌ساخته یا درجا باشد. بالشتک فلزی نیز در واقع ورق‌های طراحی شده فلزی برای زیر سر مهار است. رفتار بالشتک‌ها، همانند شالوده‌های منفرد و به صورت یک دال دو طرفه است. بالشتک بتنی باید مقاومت کافی در مقابل نیروهای برش سوراخ‌کننده و خمش داشته باشد.

این روش به صورت مرحله به مرحله و از بالا به پایین گودبرداری اجرا می‌شود. مراحل اجرا و روش کار به شرح زیر است:

(۱) شروع عملیات گودبرداری بصورت مرحله به مرحله (هر مرحله حداکثر ۲ تا ۳ متر) و حدود ۰/٦ متر پایین‌تر از تراز طراحی یک مهار خاک

(۲) حفر چاهک‌های افقی یا مایل در بدنه دیواره گود با تجهیزات خاص حفاری

(۳) قرار دادن کابل‌های تنیدگی مونوبار یا استرند درون چاهک همراه با لوله تزریقی پلی اتیلنی و تزریق دوغاب در انتهای آن به منظور مهار کابل

(٤) کشیدن کابل‌ها توسط جک (ایجاد تنیدگی) و مهار آن در سطح

(۵) تزریق دوغاب سیمان درون چاهک‌ها

(٦) آزاد کردن جک‌ها پس از خودگیری بتن

(۷) انجام عملیات بتن‌پاششی

در جدول پ۱-۱۰ مقایسه‌ای بین روش‌های میخ‌کوبی و مهاربندی با عناصر قائم شمع یا بالشتک ارائه شده است.

جدول پ۱-۹ ارزیابی و مقایسه کلی روش‌های میخ‌کوبی، بلوک- مهاری و شمع-مهاری برای گودهای عمیق

	روش	ایمنی	تغییرشکل	هزینه اجرا	زمان اجرا
۱	میخ‌کوبی	کمترین	بیشترین	بیشترین	مشابه ۲
۲	شمع و مهاری	بیشترین	کمترین	بینابین	مشابه ۱
۳	بلوک و مهاری	بینابین	بینابین	کمترین	کمترین

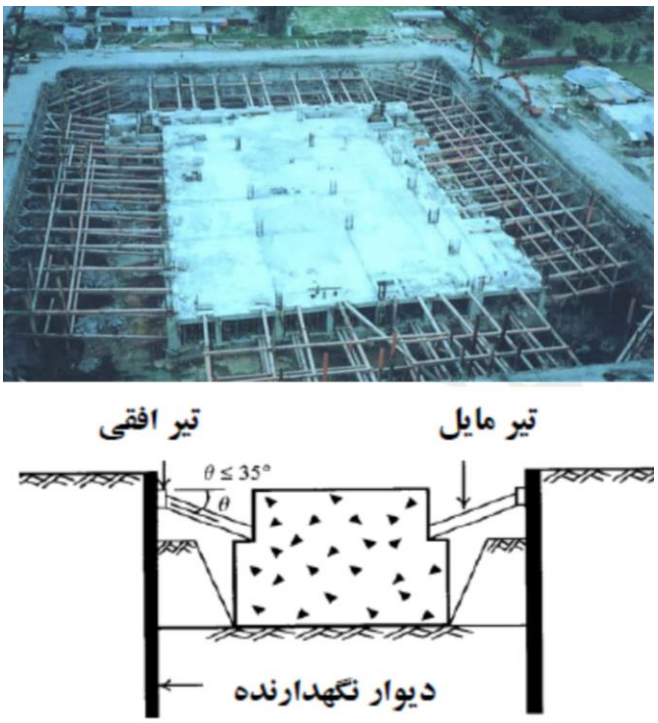
جدول پ۱-۱۰ مشخصات روش مهاربندی دیواره

	مزایا	معایب
مشخصه روش	بهبود مشخصات مکانیکی خاک فضای کاری مناسب فعال بودن روش و کنترل تغییرشکل‌ها اجرای سریع تر اسکلت	تجاوز به حریم همسایه نیازمند نیرو و تجهیزات تخصصی
در مقایسه با روش بالا-پایین	تامین فضای کاری مناسب‌تر	تجاوز به حریم همسایه استفاده از مصالح بیش از موارد لازم برای اجرای سازه

پ۱-۹- روش گودبرداری جزیره‌ای

روش گودبرداری جزیره‌ای، حفاری و گودبرداری بخش مرکزی محل پروژه با دیواره شیب‌دار و ساخت سازه مرکزی و سپس برداشتن خاک ناحیه شیب‌دار با اتکا دیواره به سازه مرکزی است. در این روش اغلب، ابتدا دیوار حائلی اطراف محل موردنظر ساخته می‌شود و تیرهای افقی به‌صورت پشت‌بند افقی بر دیوار حائل نصب می‌شود. سپس خاک‌برداری قسمت مرکزی محل به صورت شیب‌دار انجام می‌شود. در ادامه بخشی از سازه در وسط گود ساخته می‌شود و حائلی بین دیوار و سازه وسط نصب می‌شود و بخش‌های شیب‌دار خاکبرداری شده و بقیه سازه ساخته می‌شود.

مراحل اجرا در این روش شامل ۱- ساخت دیوارحایل، ۲- خاکبرداری بخش مرکزی به صورت شیب دار، ۳- اجرای بخش مرکزی سازه در وسط، ٤- نصب تیر مهاری با زاویه ۳۵ درجه کمتر (نسبت به افق) بین دیوار و سازه در وسط، ۵- خاکبرداری بخش شیب دار و اجرای بقیه سازه می‌باشد.



شکل پ۱-۱۸ پایدارسازی گود با روش جزیره‌ای

جدول پ۱-۱۱ مشخصات روش پایدارسازی جزیره‌ای

	مزایا	معایب
مشخصه روش	استفاده بیشتر از ظرفیت پایدارسازی خاک کاهش هزینه افزایش سرعت	مناسب برای اراضی بزرگ
در مقایسه با روش بالا-پایین	کاهش هزینه اجرا افزایش سرعت اجرا	عدم قابلیت کاربرد در اراضی کوچک