





دانشکده مهندسی

# کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی رفتار گودهای عمیق

پایان نامه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی عمران گرایش خاک و پی

استاد راهنما

دکتر فریدون پویا نژاد

دانشجو:

محمد حسین خاتمی

تیر ماه ۹۱

**کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی**

**رفتار گودهای عمیق**

تقدیرم بہ ہر مرحلہ باعزیزانہ فیض و درکنارم بود...

با تشکر از استاد برجند جناب آقای که تمر و پیانژاد

## فهرست مطالب

۱	چکیده.....
۲	فصل اول: کلیات.....
۲	۱-۱ مقدمه.....
۳	۲-۱ هدف از تحقیق.....
۳	۳-۱ روش تحقیق.....
۳	۴-۱ سیر تحقیق.....
۵	فصل دوم: تاریخچه رفتاری گودهای عمیق.....
۵	۱-۲ مقدمه.....
۵	۲-۲ گود عمیق.....
۶	۳-۲ رفتار گودهای عمیق.....
۷	۴-۲ دیوار حائل.....
۷	۱-۴-۲ دیوارهای مهاربندی شده.....
۸	۲-۴-۲ سپرها.....
۹	۳-۴-۲ دیوارهای شمعی.....
۱۰	۴-۴-۲ دیوارهای دیافراگمی.....
۱۱	۵-۴-۲ جداره‌های مهاربندی شده توسط نیلینگ.....
۱۱	۵-۲ روش‌های مهار دیوار حائل.....
۱۲	۶-۲ تغییر مکان جانبی دیوار حائل.....
۱۳	۷-۲ عوامل تاثیرگذار بر تغییر مکان دیوار حائل.....
۱۳	۱-۷-۲ سختی دیوار.....

۱۵	۲-۷-۲ ضریب اطمینان در برابر تورم خاک در محل پنجه دیوار.....
۱۵	۳-۷-۲ مقاومت برشی زهکشی نشده در رس.....
۱۶	۸-۲ مروری بر کارهای انجام شده .....
۲۳	۹-۲ خلاصه فصل و نتیجه گیری.....
۲۵	فصل سوم: شبکه عصبی مصنوعی.....
۲۵	۱-۳ مقدمه.....
۲۵	۲-۳ شبکه عصبی مصنوعی.....
۲۶	۳-۳ شبکه عصبی MLP.....
۲۸	۴-۳ تعیین تعداد نرون‌های لایه ورودی میانی و خروجی.....
۲۹	۵-۳ آموزش، اعتبار سنجی و ارزیابی شبکه.....
۲۹	۶-۳ نتیجه گیری.....
۳۱	فصل چهارم: پیش‌بینی تغییر مکان جانبی دیوار حائل با داده‌های واقعی.....
۳۱	۱-۴ مقدمه.....
۳۲	۲-۴ طراحی شبکه‌ی عصبی مصنوعی .....
۳۶	۳-۴ ارائه نتایج.....
۳۷	۴-۴ تحلیل حساسیت .....
۳۸	۱-۴-۴ تحلیل حساسیت بر روی پارامتر $S_{u1}$ در تراز نهایی گود.....
۴۰	۲-۴-۴ تحلیل حساسیت بر روی پارامتر $S_{u2}$ در تراز نهایی گود.....
۴۱	۳-۴-۴ تحلیل حساسیت بر روی نسبت ضخامت لایه نرم فوقانی به عمق نهایی گود ( $h/H$ ).....
۴۲	۴-۴-۴ تحلیل حساسیت بر روی سختی سیستم.....
۴۲	۵-۴ استخراج رابطه برای $\delta_{hmax}$ .....

۴۵.....	۶-۴ خلاصه فصل و نتیجه گیری.....
۴۶.....	فصل پنجم: پیش بینی تغییر مکان جانبی دیوار حائل دیافراگمی با داده های FEM.....
۴۶.....	۱-۵ مقدمه.....
۴۷.....	۲-۵ تولید داده.....
۵۳.....	۳-۵ طراحی شبکه ی عصبی مصنوعی .....
۵۵.....	۴-۵ ارائه نتایج.....
۵۸.....	۵-۵ تحلیل حساسیت .....
۵۸.....	۱-۵-۵ تحلیل حساسیت بر روی نسبت مقاومت زهکشی نشده خاک به تنش موثر قائم در تراز نهایی گود.....
۵۹.....	۲-۵-۵ تحلیل حساسیت بر روی عمق نهایی گود.....
۶۱.....	۳-۵-۵ تحلیل حساسیت بر روی سختی دیوار.....
۶۲.....	۶-۵ استخراج رابطه برای $\delta_{hmax}$ .....
۶۵.....	۷-۵ خلاصه فصل و نتیجه گیری.....
۶۶.....	فصل ششم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد.....
۶۶.....	۱-۶ نتیجه گیری.....
۶۷.....	۲-۶ ارائه پیشنهاد.....
۶۸.....	مراجع.....
Abstract.....	71
Title .....	72



## فهرست اشکال

۶.....	شکل ۱-۲.....
۸.....	شکل ۲-۲.....
۸.....	شکل ۳-۲.....
۹.....	شکل ۴-۲.....
۱۰.....	شکل ۵-۲.....
۱۲.....	شکل ۶-۲.....
۱۶.....	شکل ۷-۲.....
۱۷.....	شکل ۸-۲.....
۱۹.....	شکل ۹-۲.....
۲۰.....	شکل ۱۰-۲.....
۲۲.....	شکل ۱۱-۲.....
۲۳.....	شکل ۱۲-۲.....
۲۶.....	شکل ۱-۳.....
۲۷.....	شکل ۲-۳.....
۳۵.....	شکل ۱-۴.....
۳۷.....	شکل ۲-۴.....
۳۷.....	شکل ۳-۴.....
۳۸.....	شکل ۴-۴.....

٣٩.....	شکل ٥-٤.....
٣٩.....	شکل ٦-٤.....
٤٠.....	شکل ٧-٤.....
٤٠.....	شکل ٨-٤.....
٤١.....	شکل ٩-٤.....
٤١.....	شکل ١٠-٤.....
٤٢.....	شکل ١١-٤.....
٤٥.....	شکل ١٢-٤.....
٤٩.....	شکل ١-٥.....
٥٠.....	شکل ٢-٥.....
٥٣.....	شکل ٣-٥.....
٥٥.....	شکل ٤-٥.....
٥٧.....	شکل ٥-٥.....
٥٨.....	شکل ٦-٥.....
٥٩.....	شکل ٧-٥.....
٦٠.....	شکل ٨-٥.....
٦٠.....	شکل ٩-٥.....
٦١.....	شکل ١٠-٥.....
٦٢.....	شکل ١١-٥.....

## فهرست جداول

۱۴.....	جدول ۱-۲.....
۳۲.....	جدول ۱-۴.....
۳۴.....	جدول ۲-۴.....
۳۶.....	جدول ۳-۴.....
۴۳.....	جدول ۴-۴.....
۴۴.....	جدول ۵-۴.....
۴۷.....	جدول ۱-۵.....
۴۸.....	جدول ۲-۵.....
۵۱.....	جدول ۳-۵.....
۵۱.....	جدول ۴-۵.....
۵۴.....	جدول ۵-۵.....
۵۵.....	جدول ۶-۵.....
۵۶.....	جدول ۷-۵.....
۵۷.....	جدول ۸-۵.....
۶۳.....	جدول ۹-۵.....
۶۴.....	جدول ۱۰-۵.....

## لیست نمادها

**B:** عرض گود

**$B_K$ :**  $k$  بایاس نرون مخفی

**$c$ :** چسبندگی خاک

**E:** مدول الاستیسیته

**H:** عمق نهایی گود

**I:** ممان اینرسی

**$I_{xx}$ :** ممان اینرسی حول محور قوی

**$I_{eq}$ :** ممان اینرسی معادل

**S:** فاصله مهارها از یکدیگر

**$w_{ik}$ :** وزن اتصال پارامتر ورودی  $i$  و نرون  $k$  لایه مخفی

**$\sigma'_v$ :** تنش موثر قائم

**$S_u$ :** مقاومت برشی زهکشی نشده

**$\gamma_w$ :** وزن مخصوص آب

**$\delta_{hmax}$ :** بیشینه تغییر مکان افقی

**$\delta_{vmax}$ :** بیشینه تغییر مکان عمودی

**$\Phi$ :** زاویه اصطکاک داخلی

**$f$ :** تابع انتقال

# ۱

## کلیات

### ۱-۱ مقدمه

لزوم دستیابی به راه حلی مناسب و قابل اعتماد برای پیش‌بینی رفتار گوده‌های عمیق بر هیچ کس پوشیده نیست. تاکنون تلاش‌های زیادی در این خصوص صورت گرفته است. جمع‌آوری داده‌های گودبرداری‌های سرتاسر جهان مانند [Long, 2001] و تدوین نمودارها و چارت‌های تجربی مانند [Peck, 1969] و تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود از مواردی هستند که می‌توان در این خصوص به آن‌ها اشاره کرد.

بررسی مقالات در خصوص گوده‌های عمیق نشان می‌دهد که طراحی‌های امروزی در سطح جهان دست بالا می‌باشد [Long, 2001] اگر بتوان روشی یافت که اولاً توانایی در نظر گرفتن تمامی پارامترها را بدون هیچ فرض ساده‌کننده‌ای داشته باشد و دوماً سرعت پردازش بالاتری داشته باشد قطعاً با استقبال جامعه مهندسی روبه‌رو خواهد شد. به تازگی استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی در حل مسائل مهندسی ژئوتکنیک به عنوان راه حلی جدید مطرح گردیده است.

## ۱-۲ هدف از تحقیق

مطالعه در زمینه رفتار گودبرداری‌های عمیق در دهه‌های گذشته سیر تکاملی داشته است. اولین تلاش‌ها در این زمینه منجر به رسم گراف‌هایی برای تخمین میزان نشست یا تغییر مکان جانبی ماکزیمم دیوارهای حائل گردید. با پیشرفت نرم‌افزارهای المان محدود مطالعات شکل جدیدی به خود گرفت و گودهای بسیاری توسط این نرم‌افزارها مدل‌سازی شد. اما استفاده از این نرم‌افزارها در زمینه مسائل ژئوتکنیک همیشه با اما و اگرهایی همراه بوده است زیرا ماهیت خاک بر خلاف سایر مصالح مانند فولاد یا بتن بسیار پیچیده است و برای مدل‌سازی آن باید فرضیات ساده-کننده‌ای بکار برد. در دهه اخیر استفاده از هوش مصنوعی در زمینه مسائل ژئوتکنیکی با استقبال زیادی روبه‌رو شده است. هدف از این تحقیق کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی رفتار گودهای عمیق و پیش‌بینی تغییر مکان جانبی ماکزیمم دیوار حائل و ارائه رابطه‌ای برای آن می‌باشد.

## ۱-۳ روش تحقیق

برای نیل به این هدف از دو روش متفاوت استفاده گردیده است. در روش اول صرفاً از داده‌های واقعی برای تشکیل شبکه استفاده شده است و در روش دوم از داده‌های مبتنی بر واقعیت و ساخته شده با نرم افزار. هر روش مزایا و معایب خود را دارد که در فصل‌های آینده به تفصیل بیان خواهد شد اما نتیجه کلی بدست آمده از هر دو روش این است که شبکه عصبی قادر به یافتن الگویی بین هر دو دسته از داده‌ها می‌باشد و بسته به نوع داده‌ها و بازه‌ی آن‌ها، می‌توان رابطه‌ای برای پیش‌بینی تغییر مکان جانبی ماکزیمم دیوار حائل به دست آورد.

## ۱-۴ سیر تحقیق

در فصل آینده گودبرداری عمیق و مسائل پیش آمده ناشی از آن تعریف می‌شود سپس انواع دیوارهای حائل مرسوم شرح داده شده و دامنه کاربرد آن‌ها ذکر می‌شود، در ادامه روش‌های مهار دیوار حائل به اختصار ذکر شده و انواع تغییر شکل‌های محتمل برای دیوار حائل نشان داده می‌شود. سپس پارامترهای تاثیرگذار بر تغییر مکان جانبی ماکزیمم دیوار

حائل بیان شده و روش محاسبه بعضی از آن‌ها توضیح داده می‌شود. در انتها مروری مختصر بر کارهای انجام شده در زمینه گودهای عمیق داشته و نتایج آن‌ها آورده می‌شود.

در فصل سوم تاریخچه مختصری از شبکه عصبی بیان می‌شود و برای درک بهتر عمل کرد آن نحوه عمل کرد بلوک ساختاری شبکه عصبی توضیح داده می‌شود. سپس به تعریف شبکه‌های چند لایه MLP پرداخته شده و انواع توابع انتقال شرح داده می‌شود. اهمیت تعداد نرون‌های لایه مخفی و تعریف اصطلاحات "آموزش"، "اعتبارسنجی" و "ارزیابی" شبکه در ادامه این فصل می‌آید.

در فصل چهارم شبکه‌ی عصبی بر مبنای داده‌های واقعی طراحی شده و طی آن مزایا و معایب کارکردن با داده‌های صرفاً واقعی شرح داده می‌شود. نمودار رگرسیون برای مراحل مختلف تشکیل شبکه آورده شده و سپس با روشی ابتکاری تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای ورودی شبکه انجام می‌شود. در انتهای این فصل رابطه‌ای برای پیش‌بینی تغییر مکان جانبی ماکزیمم دیوارهای حائل در خاک رسی آورده می‌شود.

در فصل پنجم با تفسیر و نتیجه‌گیری از مطالب فصل چهارم، به داده‌سازی با استفاده از نرم‌افزار پرداخته می‌شود. باید متذکر شد داده‌های ساخته شده با نرم‌افزار بر مبنای واقعیت بوده و با استفاده از گراف‌های تجربی نشان داده می‌شود که در بازه‌های منطقی قرار دارند. سپس شبکه عصبی بر مبنای این دسته از داده ایجاد شده و نمودار رگرسیون برای مراحل مختلف تشکیل شبکه آورده می‌شود. در ادامه تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای ورودی انجام شده و در انتها رابطه‌ای برای پیش‌بینی تغییر مکان جانبی ماکزیمم دیوار حائل دیافراگمی در خاک رسی با لایه‌های سیلتی به دست می‌آید.

فصل آخر نیز به نتیجه‌گیری از تحقیقات انجام شده می‌پردازد و شامل پیشنهادهایی برای مطالعات دقیق‌تر گودبرداری‌های عمیق می‌باشد.

# ۲

## تاریخچه رفتاری گودهای عمیق

### ۱-۲ مقدمه

امروزه در شهرهای بزرگ جهان ساخت سازه‌های مرتفع، مراکز تجاری بزرگ، مسیرهای زیرزمینی مترو و... به امری متداول تبدیل شده است. به طبع آن گودبرداری‌های عمیق و مسائل مربوط به آن به یکی از مسائل بحث برانگیز در جامعه‌ی مهندسی تبدیل گشته است.

در این فصل به تعریف گودبرداری‌های عمیق و مسائل مربوط به آن پرداخته می‌شود. انواع دیوارهای حائل، روش‌های مهار و تغییر شکل‌های جانبی محتمل برای دیوار شرح داده می‌شود. سپس فاکتورهای تاثیرگذار بر تغییر مکان جانبی دیوار مورد بررسی قرار می‌گیرد و در انتها تلاش‌های صورت گرفته برای پیش‌بینی رفتار گودهای عمیق در قالب چکیده کارهای انجام شده در این زمینه ذکر می‌گردد.

### ۲-۲ گودبرداری عمیق<sup>۱</sup>

طبق تعریفی که Peck در سال ۱۹۶۹ ارائه داد گود عمیق به گودی گفته می‌شود که "دیوارهای آن برای پایدار

ماندن نیاز به مهار جانبی دارند".

---

<sup>۱</sup> Deep excavation

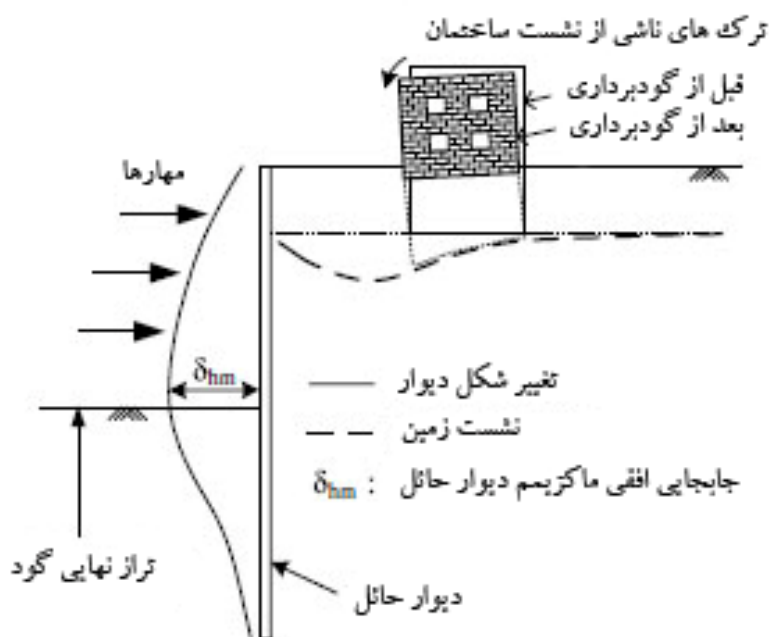


در اثر گودبرداری‌های عمیق دو پدیده رخ می‌دهد؛ اول اینکه در اثر خاکبرداری، تنش موثر قائم در کف گود کاهش می‌یابد و دوم اینکه دیواره‌های گود ناپایدار می‌شوند و برای نگهداشتن آن باید از سازه‌ی نگهدارنده استفاده شود [Bentler, 1998].

## ۲-۳ رفتار گودهای عمیق

گودهای عمیق به گونه‌ای طراحی می‌شوند که پایدار باشند و تغییر شکل‌هایی در محدوده‌ی در نظر گرفته شده داشته باشند. پایدار بدین معناست که دیواره‌های گود فرو نریزد و کف گود به طور غیر قابل کنترلی متورم نشود. تغییر شکل سطح زمین در مجاورت گودها نیز می‌تواند به ساختمان‌ها، خیابان‌ها و تاسیسات شهری آسیب برساند. میزان آسیب بستگی به مقدار و الگوی تغییر شکل‌های اطراف گود دارد.

بنابراین پایداری و تغییر شکل با یک‌دیگر در ارتباط هستند. اگر ضریب اطمینان پایداری بالا باشد، کرنش‌ها در محدوده‌ی کم‌تری خواهند بود لذا تغییر شکل سطح زمین نیز کمتر خواهد شد. (شکل ۲-۱)



شکل ۲-۱ گودبرداری در رس‌ها و اثر آن بر تغییر شکل دیوار حائل، نشست زمین و پاسخ ساختمانها

بنابراین پیش‌بینی رفتار گودهای عمیق شامل تحلیل پایداری و تغییر شکل می‌باشد. تجربه نشان داده است که پایداری را می‌توان توسط معادله تعادل حدی با دقت قابل قبولی محاسبه کرد، اما پیش‌بینی تغییر شکل گودهای عمیق کاری دشوارتر می‌باشد [Bentler, 1998]. به‌طور کلی چهار روش برای پیش‌بینی تغییر مکان جانبی دیوار و تغییر شکل زمین در محدوده‌ی گودهای عمیق وجود دارد. روش اول استفاده از نتایج و مشاهدات پروژه‌های گذشته است که بطور دقیق و قابل اعتمادی جمع‌آوری شده باشند. روش دوم استفاده از گراف‌ها و نمودارهای طراحی تجربی، روش سوم استفاده از تحلیل عددی مانند روش اجزای محدود<sup>۱</sup> و روش چهارم پیش‌بینی رفتار گود با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی می‌باشد [Chua et al, 2005].

## ۲-۴ دیوار حائل

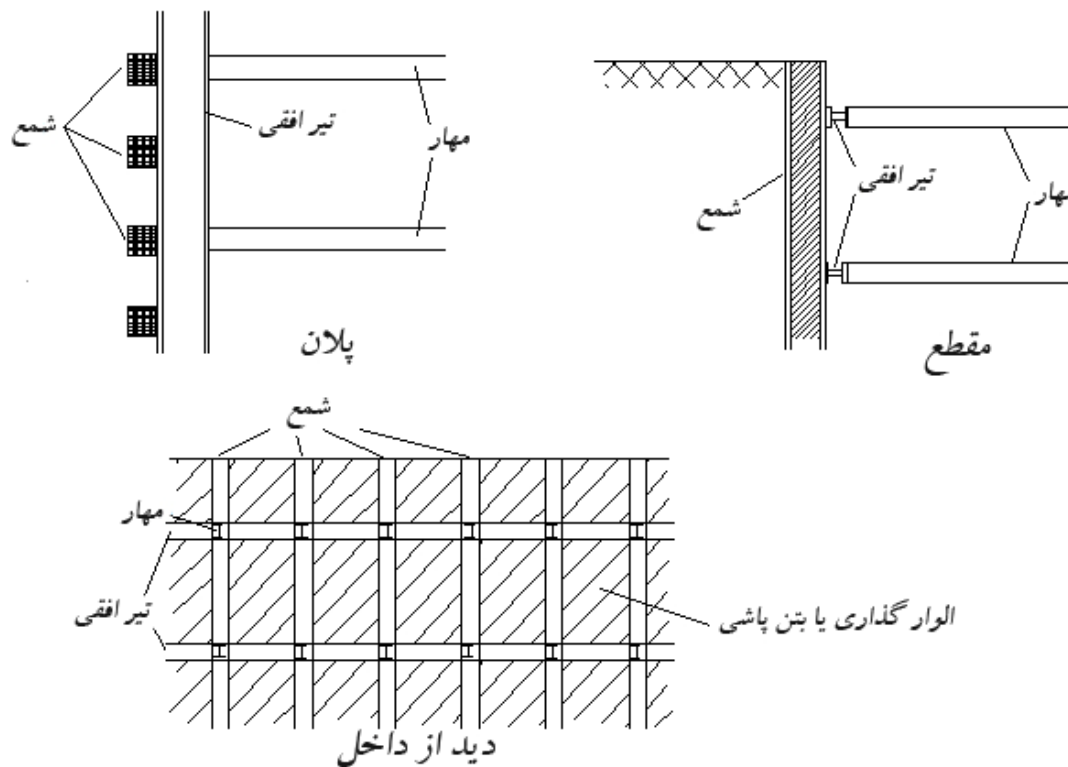
به‌طور کلی هر سازه‌ی نگهبان از دو بخش تشکیل شده است. دیوار حائل و عامل نگهدارنده‌ی دیوار حائل. دیوارهای حائل انواع گوناگونی دارند مانند دیوارهای مهاربندی شده، سپرها، شمع‌های نگهبان، دیوارهای دیافراگمی، دیوار حائل با بتن مسلح درجا و... [Chua et al, 2005]. انتخاب نوع دیوار حائل به عواملی چون هندسه گودبرداری، سطح آب زیر زمینی، نوع خاک، شرایط ساختمان‌های اطراف، هزینه و سرعت کار بستگی دارد [Ergun, 2008]. در ادامه به چند دیوار حائل که کاربرد گسترده‌تری دارند اشاره می‌شود.

### ۲-۴-۱ دیوارهای مهاربندی شده

در این روش ابتدا دور تا دور محوطه به فواصل ۲ الی ۳ متر شمع‌هایی اجرا می‌شود. این شمع‌ها معمولاً از مقاطع فلزی H یا I هستند. مرحله‌ی اول گودبرداری انجام می‌شود و سپس تیر افقی و مهارها نصب می‌شوند. فواصل بین شمع‌ها با الوار پر می‌شود می‌توان به جای الوار از روش بتن پاشی نیز استفاده کرد. (شکل ۲-۲) به همین ترتیب مراحل بعدی گودبرداری تا رسیدن به عمق نهایی گود انجام می‌شود. خاک‌های دارای مقداری چسبندگی که سطح آب زیر زمینی در آنها پایین می‌باشد برای این نوع دیوار حائل مناسب می‌باشند.

<sup>۱</sup> Finite Element Method

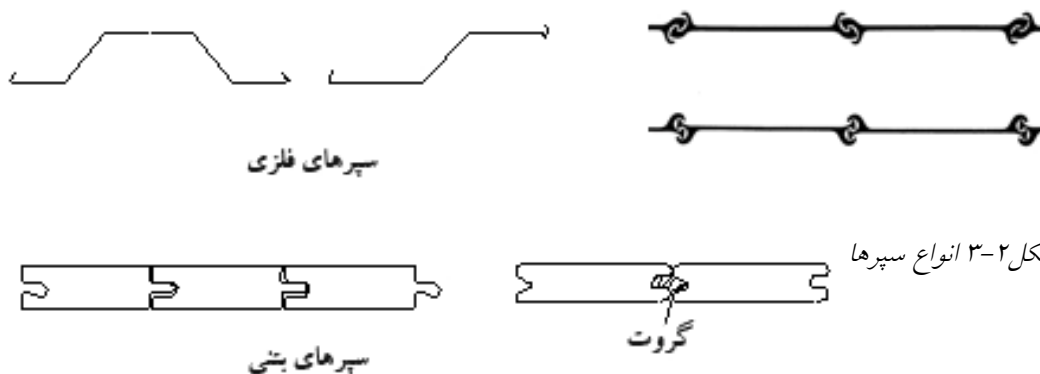
اگر عرض گود کم باشد می‌توان از روش مهار متقابل استفاده نمود در غیر این صورت ترجیح داده می‌شود از انکر استفاده شود. هم‌چنین در بعضی مواقع می‌توان تیر افقی را حذف کرد و انکر را مستقیماً بر روی شمع نصب کرد [Ergun, 2008].



شکل ۲-۲ دیوار حائل مهاربندی شده

### ۲-۴-۲ سپرها

سپرها ورق‌های فولادی به ضخامت ۷ الی ۳۰ میلیمتر و عرض ۴۰۰ الی ۵۰۰ میلیمتر هستند که در طول‌ها و شکل‌های گوناگونی چون U، Z و تخت تولید می‌شوند. (شکل ۲-۳)



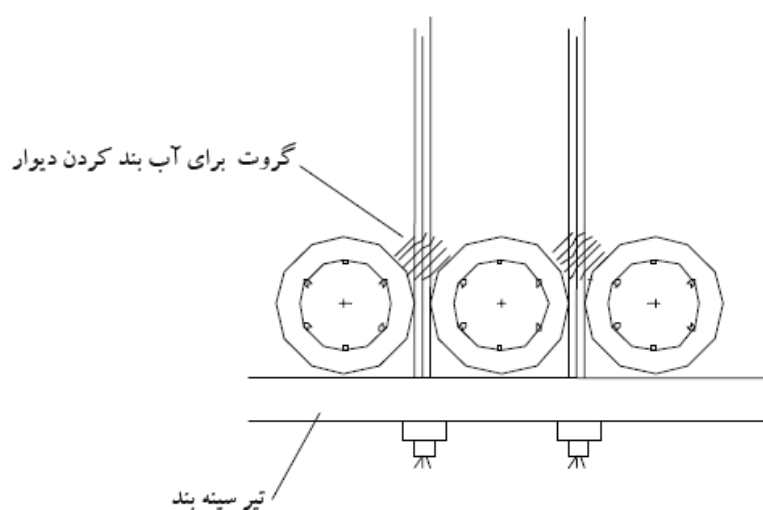
شکل ۲-۳ انواع سپرها

شیارهای ضد آب در یکدیگر قفل و بست می‌شوند و در طرفین سپرها وجود دارد. سپرها به وسیله چکش یا لرزش به داخل خاک فرو می‌روند. صدا و لرزش تولید شده هنگام فرو رفتن عامل محدود کننده استفاده از سپرها در مناطق شهری می‌باشد. در نهایت جبهه‌ی داخلی سپرها مرحله به مرحله خاکبرداری شده و در هر مرحله مهارهای لازم ایجاد می‌شود. به علت اینکه سپرها در برابر آب نفوذناپذیر هستند می‌توان از آنها در مناطق ساحلی که سطح آب زیر زمینی بالاست استفاده نمود [Ergun, 2008].

## ۲-۴-۳ دیواره‌های شمعی

این نوع دیوار حائل به صورت درجا ساخته می‌شود و چون عملیات ساخت آن پیچیده نمی‌باشد و مصالح آن در دسترس می‌باشد کاربرد گسترده‌ای دارد. دیواره‌های شمعی به دو صورت می‌باشد؛ دیوار پیوسته<sup>۱</sup> و دیوار سکانت<sup>۲</sup>

در نوع پیوسته فاصله بین شمعه‌ها از قطر شمعه‌ها بزرگ‌تر می‌باشد. این فاصله بر اساس نوع خاک و لنگر طراحی شمعه‌ها انتخاب می‌شود اما در هر صورت نباید خیلی زیاد باشد. احداث این نوع دیوار در خاک‌های دارای چسبندگی زیاد تا متوسط با سطح آب زیر زمینی پایین مناسب می‌باشد. معمولاً قطر شمعه‌ها  $0/6$  متر؛  $0/8$  متر و  $1$  متر می‌باشد همچنین تمامی شمعه‌ها توسط تیر افقی (تیر سینه بند) به یکدیگر متصل می‌شوند. (شکل ۲-۴)



شکل ۲-۴ دیوار شمعی پیوسته

<sup>1</sup> Contiguous

<sup>2</sup> Secant