تابستان ۱۳۹۲، سال اول / شماره اول، ص. ۷۷-۸۷، (یادداشت فنی)

بررسی اجرای سازه‌های زیرزمینی با روش ساخت بالا به پایین (Top-Down)

مطالعه موردی ایستگاه نادری قطار شهری اهواز

ایرج رسولان(استادیار)

دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه شهید چمران اهواز

حمیدرضا هلاکویی(مربی)

گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان

عملیات ساخت سازه‌های زیرزمینی به روش سنتی که با روش گودبرداری و اجرای فونداسیون سازه زیرزمینی آغاز شده و با ساخت سازه اصلی از کف به سمت بالا ادامه و با تکمیل سقف نهایی پایان می‌یابد بنام روش Bottom-Up معروف است. برخلاف روش مذکور روش پیشرفته‌ای بنام Top-Down وجود دارد که در سال‌های اخیر در پروژه‌های بزرگ عملاً جایگزین روش ساخت سنتی در کشورهای صنعتی گردیده است. این روش برخلاف روش سنتی با ساخت دیوارهای دور، ستون‌ها و سقف نهایی آغاز و با تکمیل گودبرداری و ساخت فونداسیون سازه زیرزمینی به اتمام می‌رسد. از مهمترین مزایای این روش می‌توان به حذف و یا به حداقل رساندن سطوح قالب‌بندی، حذف مهاربندی‌های موقت در زمان گودبرداری، ایجاد برخی تسهیلات ترافیکی درحین ساخت سازه و امکان استفاده از آن در فضاهای محدود و پرتردد شهری اشاره نمود که علیرغم مزیت‌های فراوان متاسفانه در کشور ما هنوز شناخت کافی از این روش وجود ندارد، در صورتی که می‌توان از آن بعنوان یک گزینه بسیار مهم اجرایی، در کنار سایر روش‌های معمول در ساخت سازه‌های زیرزمینی استفاده نمود. در این یادداشت سعی می‌شود مزایا و محدودیت‌های این روش و تاثیرات آن در زمان و هزینه‌های ساخت و کاربرد آن در فضاهای شهری بررسی و در نهایت کاربرد آن در پروژه قطار شهری اهواز که برای اولین بار در کشور به این روش در حال اجرا است، اشاره شود.

واژگان کلیدی: سازه‌های زیرزمینی، روش Top-Down، اهواز.

*Rasoolan89@gmail.com
Holakooie@iran.ir

۱. مقدمه

نیاز روزافزون به زیرساخت‌های عمرانی از قبیل بزرگراه‌ها و خطوط زیرزمینی چند طبقه، قطارهای شهری زیرزمینی، پارکینگ‌های طبقاتی و ... از یک‌طرف و محدودیت‌های توسعه شهرها از سوی دیگر باعث شده بتدریج مسئله گودبرداری‌های عمیق در فضاهای شهری بسیار مورد توجه قرار گیرد. از این رو یکی از مهم‌ترین مسائلی که در سال‌های اخیر همواره ذهن مهندسین و سازندگان احداث سازه‌های زیرزمینی را به خود معطوف نموده است، مسئله انتخاب نحوه گودبرداری، نوع سیستم حفاظت گود و روش اجرایی مناسب برای ساخت سازه زیرزمینی با تامین کلیه شرایط اقتصادی، اجتماعی، ایمنی و ... طرح می‌باشد و بالطبع با توجه به موقعیت و شرایط اجرای عملیات، نظرات و راهکارهای متفاوتی ارائه می‌گردد که انتخاب دقیق روش اجرا در آینده پروژه بسیار موثر خواهد بود. در کنار این‌گونه مسائل، معضلات ساخت‌وسازهای زیرزمینی درون شهری خصوصاً در کلانشهرها، از قبیل خطرات ناشی از گودبرداری‌ها و ایجاد اختلال در عبور و مرور و ترافیک در مناطق شهری، مدیریت شهری را در این‌گونه پروژه‌ها همواره با چالش‌های بسیاری مواجه می‌نماید که از علل اصلی این نگرانی‌های موجه، می‌بتوان به سوابق استفاده از سیستم‌های حفاری، حفاظت گود و ساخت سازه‌های زیرزمینی بر اساس روش‌های سنتی معمول، عدم بازنگری این روش‌ها و عدم استفاده از تکنیک‌های پیشرفته ساخت‌وساز اشاره نمود.

در این خصوص نظر به اهمیت موضوع و به جهت قابلیت‌های فنی و اجرایی بسیار بالا، روش Top-Down method (بالا به پایین) در ساخت سازه‌های زیرزمینی ایستگاه‌های بخش جنوبی قطار شهری اهواز که بدلیل داشتن شرایط زمین‌شناسی نسبت به بخش شمالی اهواز بحرانی‌تر است، مورد استفاده قرار گرفته است.

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۰۳/۱۱، داوری ۱۳۹۲/۰۵/۰۵، پذیرش ۱۳۹۲/۰۵/۱۵

۲. معرفی روش و متدولوژی اجرای سازه‌های زیرزمینی به روش بالا به پایین (Top-Down Method)

این روش که به عنوان انقلابی در ساخت سازه‌های زیرزمینی بزرگ محسوب می‌شود در دهه ۷۰ میلادی با ایجاد تغییراتی در نحوه طراحی و محاسبات سازه و در اختیار داشتن برخی امکانات و تجهیزات خاص، در ساخت ایستگاه‌های مترو در شهرهای پاریس و میلان به منظور کاهش زمان و هزینه‌های اجرایی و کاهش اختلال در ترافیک شهری و زندگی مردم بکار گرفته شد[۱] و بدلیل مزایای بالای آن در سال‌های اخیر در پروژه‌های بزرگ عملاً جایگزین روش ساخت سنتی در کشورهای صنعتی گردیده است.

کاربرد این روش مختص ساخت سازه‌های زیرزمینی و برج‌های بلند با زیرزمین‌های عمیق بوده و عمدتاً در زمین‌های سست که نیاز به اجرای سازه حفاظت گود جهت جلوگیری از ریزش دیوارهای حفاری وجود دارد از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است.

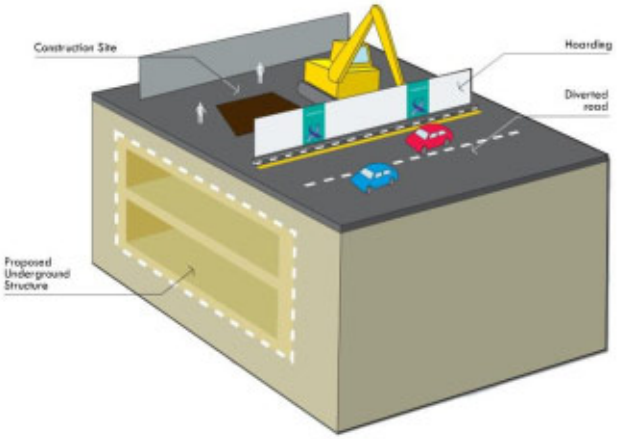
در این روش عموماً از دیوارهای دیافراگمی[۱] که به عنوان دیوارحفاظت گود(در زمین‌های سست) در ابتدا و قبل از آغاز عملیات گودبرداری احداث می‌شوند به عنوان دیوارهای اصلی سازه زیرزمینی استفاده می‌گردد. ستون‌های داخلی نیز قبل از اجرای عملیات گودبرداری با استفاده از یکی از سیستم‌های بارت‌های دیافراگمی، شمع‌های بتنی درجا و یا ستون‌های پیش ساخته بتنی یا فولادی اجرا گردیده و سپس نسبت به احداث سقف‌ها از بالاترین تراز به سمت پایین و خاک‌برداری زیر هر سقف اقدام می‌گردد، در این روش سقف طبقات به عنوان سازه‌های دائمی هستند که جایگزین مهار بندی‌های افقی داخلی(استرات‌ها[۲]) یا سایر سیستم‌های مهاربندی در روش اجرای Bottom-Up Method می‌شوند و وظیفه مهار دیوارهای سازه نگهبان در برابر بارهای جانبی ناشی از خاک پشت و سایر سربارها را برعهده دارند.

۳. معرفی مراحل انجام روش بالا به پایین[۸]

در ساخت سیستم‌های حمل‌ونقل سریع‌السیر زیرزمینی[۳] در برخی از ایستگاه‌ها از روش "Top-Down" استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا دیوارهای حائل[۴] نصب می‌شوند، که در بسیاری از موارد این دیوارهای حائل دیوارهای دیافراگمی بتنی هستند. این روش با خاکبرداری تا درست زیر تراز دال سقف سازه‌ی زیرزمینی ادامه می‌یابد و در این مدت بوسیله دیوارهای حائل و استرات‌های آن، خاک در کناره‌های سازه نگه داشته می‌شود.

سپس دال سقف ساخته می‌شود، که نقش یک نگهدارنده قوی را در مدت انجام خاکبرداری ایفا می‌کند. بازشوهای دسترسی در دال سقف به گونه‌ای تعبیه می‌شوند که امکان کارکردن به سمت پایین تا تراز دال کف در سازه‌ی زیرزمینی فراهم باشد.

به محض تکمیل دال کف، دیوارهای کناری ساخته شده و استرات‌های میانی تدریجاً حذف می‌شوند. سپس بازشوهای دسترسی موجود در دال سقف پر می‌شوند و متعاقباً سطح زمین خاکریزی و تسطیح می‌شود.

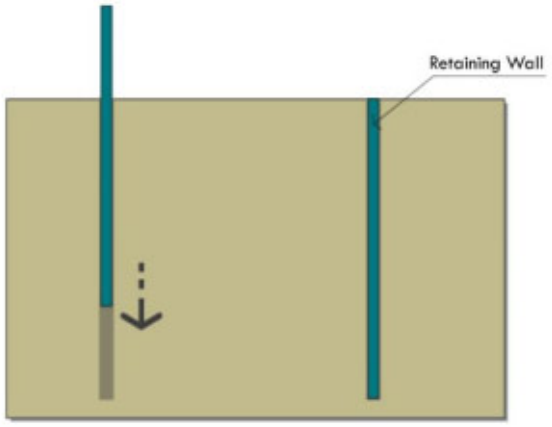


شکل شماره -۱- روش ساخت از بالا به پایین (Top-Down Construction Method)

در ادامه مراحل مختلف اجرای این روش به صورت مصور تشریح می‌شود.

۳-۱. نصب دیوار حائل

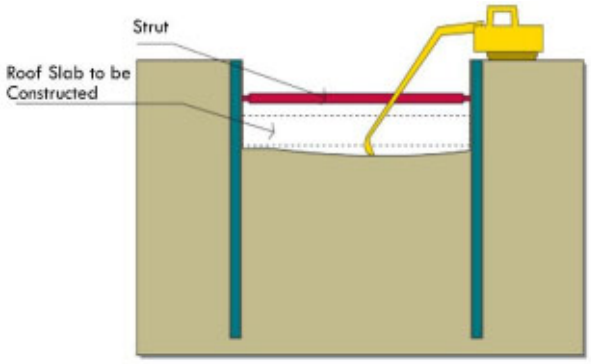
دیوار حائل زیرزمینی، که معمولاً یک دیوار دیافراگمی بتنی است، قبل از شروع خاکبرداری همانند شکل شماره ۲ نصب می‌شود.



شکل شماره -۲- دیوارهای حائل

۳-۲. خاکبرداری و نصب استرات‌های فولادی

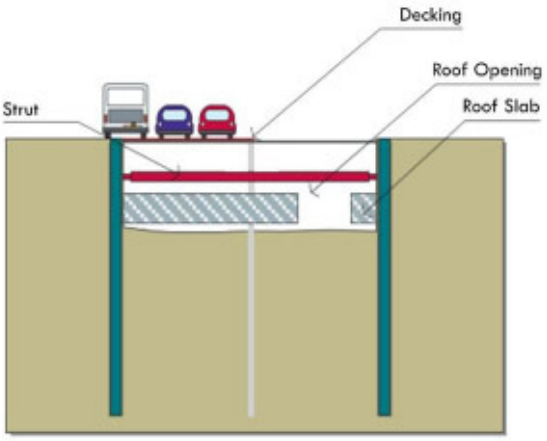
همانطور که در شکل شماره ۳ مشاهده خواهد شد، خاک تا زیر تراز سقف سازه‌ی زیرزمینی حفر می‌شود. استرات‌ها برای حفاظت از دیوارهای حائل نصب می‌شوند که به منظور نگه‌داشتن خاک در کناره‌ها می‌باشد.



شکل شماره -۳- خاکبرداری و نصب استرات‌های فولادی

۳-۳. ساخت سازه‌ی زیرزمینی

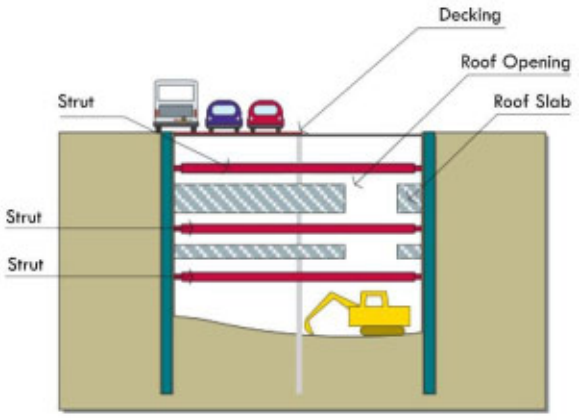
دال سقف همراه با بازشوهای دسترسی تعبیه شده روی آن که به منظور ایجاد امکان دسترسی به قسمت‌های پایینی می‌باشد، ساخته می‌شود. دال سقف علاوه بر اینکه یک تکیه‌گاه عمده در طول عملیات خاکبرداری ایجاد می‌کند، به عنوان مانع انتقال صدا نیز کاربرد دارد. (شکل شماره ۴)



شکل شماره -۴- ساخت سازه زیرزمینی به روش Top-Down

۳-۴. ادامه عملیات

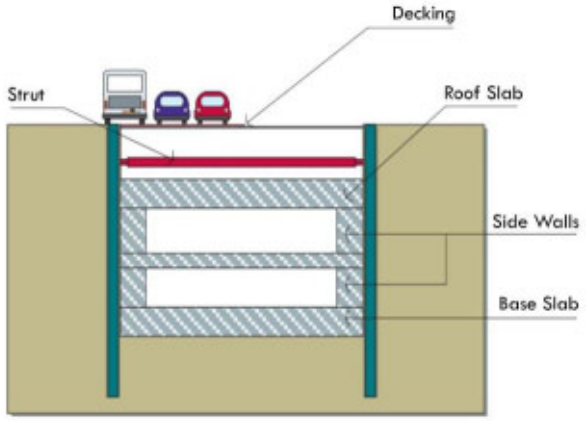
حفاری در زیر سقف میانی تا تراز بعدی دال ساخته می‌شود.(مطابق شکل ۵)، و این فرایند به سمت پایین ادامه می‌یابد تا اینکه دال کف تکمیل شود.



شکل شماره -۵- ادامه عملیات حفاری در زیر سقف میانی تا تراز اجرای فونداسیون

۳-۵. تکمیل سازه فونداسیون و بستن محل بازشوها

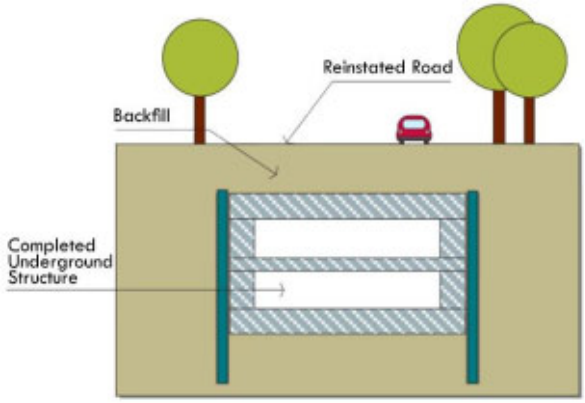
در ادامه همانطور که در شکل شماره ۶ مشاهده می‌گردد، پس از تکمیل فونداسیون سازه و خروج ماشین آلات حفاری از محل بازشوها، دیوارهای کناری رو به بالا ساخته می‌شوند، در ادامه استرات‌های میانی حذف و پس از آن بازشوهای دسترسی دال سقف پر می‌شوند.



شکل شماره -۶- تکمیل سازه فونداسیون و بستن محل بازشوها

۳-۶. خاکریزی و تسطیح

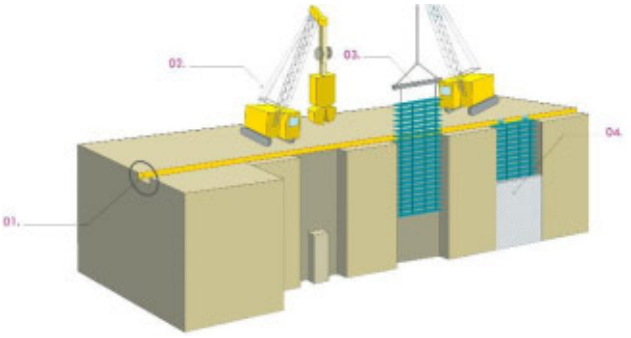
پس از آنکه سازه زیرزمینی تکمیل شد، خاکریزی تا تراز استرات، قبل از بین بردن آن، انجام می‌شود. این مرحله با تکمیل خاکریزی در بالای سازه‌ی زیرزمینی ادامه می‌یابد و در نهایت صاف کردن سطوح انجام (مطابق شکل شماره ۷) می‌شود.



شکل شماره -۷- بستن محل بازشوها، انجام عملیات تکمیلی

۴. مراحل نصب دیوار حائل – دیوار دیافراگمی

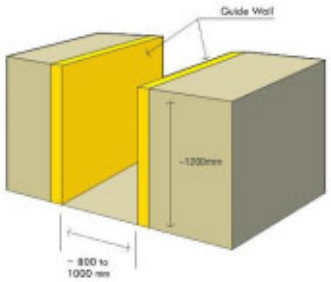
همانطور که در راهنمای تصویری شکل شماره ۸ قابل مشاهده است، مراحل ساخت یک نمونه دیوار دیافراگمی نشان داده شده است. این نوع از دیوار حائل برای ساخت در روش بالا به پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد که در ادامه بحث به صورت تصویری مراحل انجام کار شرح خواهد شد.



شکل شماره-۸- راهنمای تصویری مراحل اجرای دیوار حائل – دیوار دیافراگمی

۴-۱. ساخت دیوار راهنما

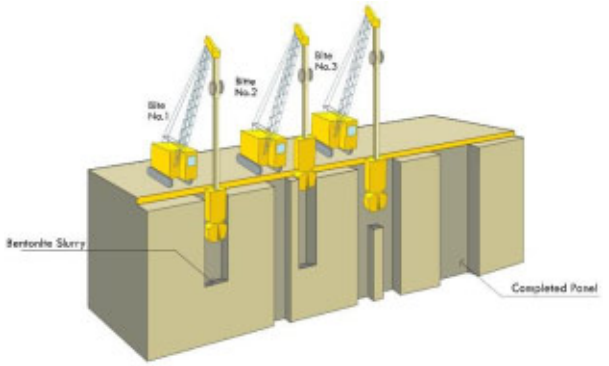
شکل شماره ۹ نحوه اجرای دیوار راهنما برای تنظیم محل دیوار دیافراگمی را نشان می‌دهد.



شکل شماره-۹- دیوار راهنما محل قرارگیری دیوار دیافراگمی

۴-۲. خاکبرداری یا حفاری پانل

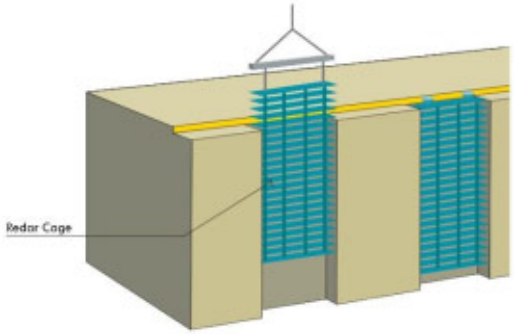
تیغ ماشین حفار خاک را برش می‌دهد و به خارج منتقل می‌کند تا پانل شکل بگیرد. گودبرداری از طریق پرکردن آن با گل بنتونیت که برای حفاظت از دیوار گودبرداری است، تثبیت می‌شود. (شکل شماره ۱۰)



شکل شماره-۱۰- نحوه حفاری پانل

۴-۳. نصب شبکه(سبد) میلگرد

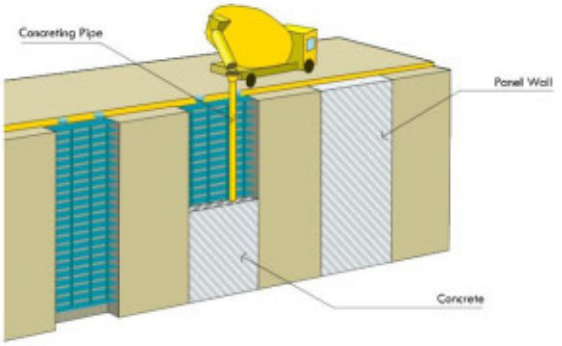
همانطور که در شکل شماره ۱۱ قابل مشاهده است، جرثقیل سبد میلگردی را بلند می‌کند و آن را در پانل قرار می‌دهد.



شکل شماره-۱۱- نحوه نصب سبد میلگرد در محل پانل توسط جرثقیل

۴-۴. بتن‌ریزی پانل

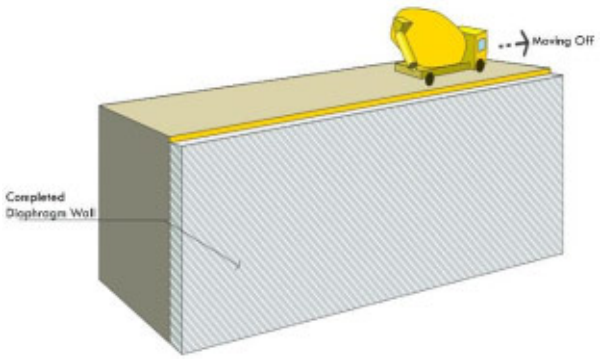
پس از نصب و استقرار سبد میلگرد، پانل آماده بتن‌ریزی می‌باشد، مطابق شکل شماره ۱۲ بتن در پانل‌ها پاشیده می‌شود تا اینکه دیوار پانل شکل گیرد.



شکل شماره-۱۲- نحوه بتن‌ریزی در پانل‌ها

۴-۵. تکرار مراحل

۲ تا ۴ برای ادامه خاک باقیمانده دیوار دیافراگمی در بین پانل‌ها تکرار می‌شود تا اینکه تمام طول دیوار دیافراگمی به طور کامل ساخته شود. (شکل شماره ۱۲)



شکل شماره-۱۲- تکمیل دیوار دیافراگمی

۵. مزایای استفاده از روش Top-Down

برخی مزایای اصلی استفاده از این روش می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:[۶]

۱- کاهش نشست خاک در محدوده اطراف باکس حفاری، افزایش صلبیت و کاهش حرکات جانبی دیوار حفاظت گود و ایمنی بسیار بالا در حین گودبرداری و ساخت سازه زیرزمینی خصوصاً در زمین‌های سست بدلیل استفاده از سقف طبقات بجای مهاربندی‌های موقت.

۲- عدم نیاز به تهیه، ساخت و نصب استرات‌ها و سایر سیستم‌های مهاربندی دیوار حفاظت گود و بالطبع کاهش هزینه‌های مهاربندی موقت و همچنین کاهش خطرات مونتاژ و دمونتاژ آنها.

۳- حذف یا به حداقل رساندن اجرای عملیات‌های زمان‌بر قالب‌بندی در دیوارهای محیطی، سقف‌ها و ستون‌ها بدلیل استفاده از زمین طبیعی بعنوان قالب در کلیه بخش‌های اجرایی و بالطبع کاهش چشمگیر زمان و هزینه‌های این بخش از عملیات.

۴- عدم نیاز به تمهیدات ایمنی گسترده مربوط به حفاری‌های عمیق از قبیل نصب نرده و گارد ریل‌های محافظ دور تا دور محدوده باکس حفاری و بالطبع افزایش ایمنی در کارگاه.

۵- امکان برنامه‌ریزی جهت سه شیفت کاری در طول دوران ساخت و در همه فصول بدلیل انجام کلیه عملیات اجرایی در زیر سقف طبقات و در محیطی قابل کنترل.

۶- افزایش مساحت محوطه تجهیز کارگاه پس از اجرای سقف اول که این امر بدلیل محدودیت فضا جهت تجهیز کارگاه‌ها در مناطق شهری از اهمیت بسزایی برخوردار است.

۷- امکان استفاده از فضای زیر سقف طبقات در اسرع وقت بعنوان انبار سرپوشیده در حین ساخت که نیاز به احداث انبارهای سرپوشیده و هزینه‌های مربوطه در زمان تجهیز کارگاه را کاهش می‌دهد.

۸- امکان کاهش زمان احداث سازه زیرزمینی بدلیل امکان همپوشانی فعالیت‌های اجرایی.

۹- امکان تسریع در شروع عملیات اجرایی تاسیسات مکانیکی و برقی.

۱۰- کاهش مدت زمان اجرای سازه‌های بلند با زیرزمین‌های عمیق بدلیل امکان اجرای همزمان بخش‌های زیرزمینی و روزمینی.

۱۱- امکان کنترل بالازدگی‌های فاز کوتاه مدت در زمان گودبرداری بدلیل گودبرداری و بارگذاری‌های متناوب در حین ساخت.

۶. محدودیت‌های استفاده از روش Top-Down

برخی از محدودیت‌های اجرایی در استفاده از این روش عبارتند از:[۶]

۱- کمبود تجارب فنی و اجرایی در دسترس در خصوص این روش بدلیل محدودیت پروژه‌های اجرا شده.

۲- عدم قابلیت کاربرد در اجرای سازه‌های زیرزمینی کوچک و متوسط بدلیل نیاز به تجهیزات خاص حفاری و محدودیت‌های عملکرد ماشین‌آلات در این‌گونه سازه‌ها.

۳- ایجاد جداشدگی بین کارگاه زیرزمینی با تجهیزات و تاسیسات روزمینی و بالطبع ایجاد محدودیت‌های دسترسی بدلیل استفاده از بازشوهای موقت.

۴- لزوم دقت در مراحل طراحی و اجرای سازه زیرزمینی در مواردی از قبیل ارتفاع طبقات، موقعیت و فواصل ستون‌ها و دیوارها به منظور ایجاد فضای لازم جهت جلوگیری از اختلال در عملکرد ماشین آلات.

۵- کندی عملیات حفاری در تراز زیر سقف‌ها بدلیل جبهه‌های کاری محدود برای عملکرد ماشین آلات و بالطبع افزایش هزینه‌های خاکبرداری و انتقال خاک.

۶- لزوم افزایش عمق و ابعاد ستون‌های میانی بمنظور تامین باربری لازم در زمان ساخت و بالطبع افزایش هزینه‌های اجرایی در این بخش.

۷- احتمال ایجاد انحراف بیش از حد مجاز در دیوارهای محیطی و ستون‌ها در حین اجرا از سطح زمین.

۸- نیاز به برخی ماشین‌آلات خاص حفاری بمنظور اجرای دیوارهای محیطی وستون‌های میانی از سطح زمین.

۹- لزوم کاربرد مداوم سیستم تهویه مناسب در طول مدت ساخت بمنظور کنترل گازهای سمی تولید شده توسط ماشین آلات و گرد و غبار حاصل از عملیات گودبرداری در ترازهای زیر سقف.

۱۰- نیاز مداوم به سیستم‌های روشنایی در تمام مدت اجرای عملیات در شیفت‌های روز و شب.

۱۱- پیش‌بینی تمهیدات لازم بمنظور امکان بالا کشیدن ماشین آلات حفاری از طریق بازشوهای تعبیه شده در سقف طبقات.

۷. پروژه قطار شهری اهواز

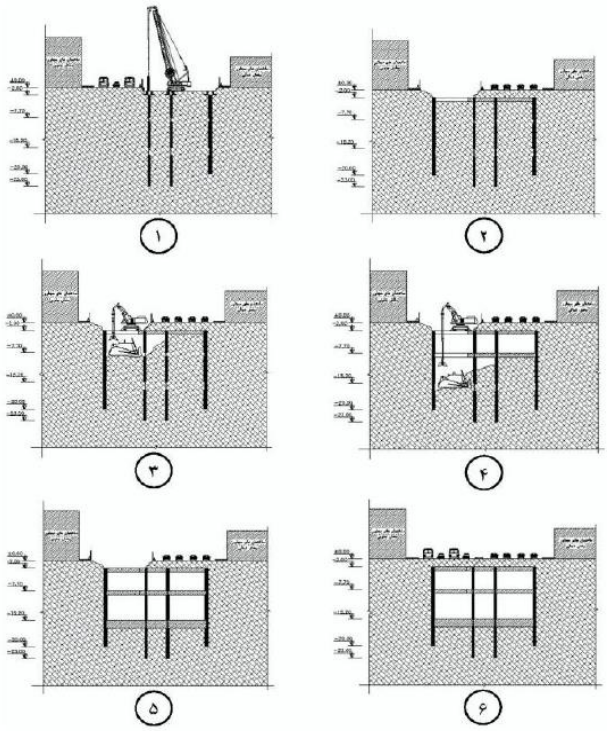
مسیرخط یک قطار شهری اهواز بطول تقریبی ۲۳ کیلومتر، شمال-شرقی شهر را با عبور از بخش مرکزی و رودخانه‌ی کارون به جنوب-غربی آن متصل می‌نماید. این مسیر با ۲۴ ایستگاه پیش‌بینی شده است که ۰/۵ کیلومتر از این مسیر روباز، یک کیلومتر آن به صورت تونل‌های نیمه عمیق است که به صورت cut and cover اجرا می-شود و ۲۱/۵ کیلومتر دیگر به صورت تونل عمیق اجرا خواهد شد. شکل شماره ۱۳ مسیر خط یک قطارشهری را نشان می‌دهد.

شکل شماره-۱۳- موقعیت مسیر و ایستگاه‌های خط یک قطارشهری اهواز

۸. کاربرد روش Top-Down در خط یک پروژه قطار شهری اهواز

با توجه به طرح مسیرخط یک پروژه، ابعاد هر ایستگاه در حدود ۲۳×۱۱۸ متر و عمق اجرا در حدود ۱۷ متر از سطح زمین تعیین گردید. ترتیب و روش ساخت سازه حفاظت گود ایستگاه‌ها در پروژه قطار شهری اهواز با استناد به مطالعات زمین شناسی و بررسی نتایج حاصل از گمانه‌های حفر شده توسط شرکت مشاور در محل اجرای هر ایستگاه، وضعیت زمین محل اجرای ایستگاه‌ها، تراز آب‌های زیرزمینی و تجهیزات در دسترس و مورد نیاز در ابتدای پروژه تعیین گردید که عمده روش‌ها عبارت بودند از: استفاده از سیستم دیوارهای شمعی درجا و دیوارهای دیافراگمی که روش اصلی در اجرای دیوار حفاظت گود ایستگاه‌ها بر اساس روش دیوار دیافراگمی و نوع مهاربندی آن نیز استفاده از استراتها در نظر گرفته شد که بدلیل وضعیت زمین شناسی بخش جنوبی پروژه که عمدتاً بصورت لایه‌های سیلت و رس بوده و سنگ بستر نیز در اعماق پایین‌تری قرار دارد. عمق دیوارهای حفاظت گود ایستگاه‌ها در این بخش و تعداد ردیف‌های مهاربندی با استراتها بیشتر از ایستگاه‌های بخش شمالی تعیین گردید. اما نکته قابل توجه این است که وجه مشترک کلیه روش‌های اجرای ایستگاه‌ها، استفاده از روش ساخت پایین به بالا (Bottom – Up) تعیین گردیده بود.[۷] که با توجه به مشکلات اجرایی و شرایط دشوار محیطی از قبیل سستی بیش از حد زمین، تراز آب زیرزمینی بالا و نزدیکی به ساختمان‌های مجاور، روش Top – Up Method جایگزین روش ساخت سنتی گردید که از آن جمله می‌توان به ایستگاه‌های سه راه فروردین، امام خمینی، نادری غربی و ... اشاره نمود.

در شکل ۱۴ روند شماتیک ساخت ایستگاه نادری غربی (در پرترافیک‌ترین مسیر بخش مرکزی شهر اهواز)، بر اساس این طرح علیرغم عرض محدود خیابان نادری نشان داده شده است. در کلیه مراحل اجرایی امکان استفاده از یک لاین عبوری در همه مراحل ساخت ایستگاه وجود خواهد داشت که این امر کمک شایانی به کاهش بار ترافیکی مسیرهای جایگزین خواهد نمود. ضمناً استفاده از این روش ریسک عملیات گودبرداری به روش سنتی (بدلیل مجاورت ساختمان‌ها با محوطه اجرای ایستگاه زیرزمینی) را از بین خواهد برد.



شکل شماره -۱۴- روند شماتیک اجرای ایستگاه نادی غربی

۹. روش‌های اجرا ساخت Top-Down Method

۹-۱. حفاظت گود توسط شمع‌های درجا

یکی از روش‌های متداول در پایدارسازی و حفاظت گودها استفاده از شمع‌های درجاست که در برخی موارد علاوه بر ایفای نقش حفاظت جانبی تاحدودی نقش آب‌بندی را نیز انجام می‌دهد.

در این روش ابتدا شمع‌ها را حفاری و با بتن سازه‌ای و پلاستیک یک در میان اجرا می‌شوند. سپس با رعایت هم‌پوشانی شمع‌های اصلی و سازه‌ای، جداره‌ی زنجیره‌ای پیوسته‌ای را تشکیل می‌دهند و سپس سازه‌ی اصلی ایستگاه اجرا خواهد شد.

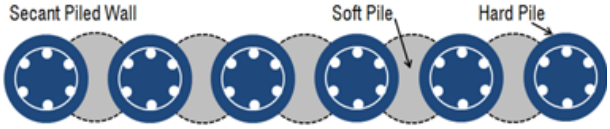
شمع‌ها می‌توانند همواره در صورت نیاز بار قائم را نیز تحمل کنند. مهاربندی جداره‌ها توسط شمع‌های درجا در موارد زیر به عنوان گزینه برتر برای سیستم‌های حفاظت جانبی گود مطرح می‌باشند:

- در مواردی که امکان اجرای سپر فولادی(کوبیدن و نصب) وجود ندارد و یا سختی و تراکم زمین بیش از حد توان سپرکوبی و با دشواری زیادی مواجه می‌باشد.

- در شرایطی که بدلیل وجود آب‌های زیرزمینی و بالا بودن سطح آن نیاز به آب‌بند بودن جداره می‌باشد.
- در مواردی که امکان ایجاد مهارهای جانبی(کششی) در زیر ساختمان‌های مجاور ناشی از گودبرداری وجود ندارد و یا در تلاقی با تاسیسات زیربنایی شهری و مستحدثات زیرزمینی (تونل) باشد.
- در مواقعی که امکان استفاده از سیستم حفاظت گود به عنوان بخشی از سازه‌ی اصلی و باربری وجود داشته باشد.

روش‌های مختلف برای اجرای تکنیک‌های شمع‌های درجا نیز وجود دارد که متداول‌ترین آنها عبارتند از:

الف) اجرای دیوار محافظت پیوسته (آب‌بند): در این روش ابتدا شمع‌هایی با بتن پلاستیک، یک در میان حفاری و اجرا شده سپس با رعایت هم‌پوشانی شمع‌های اصلی و سازه‌ای و با رعایت احداث جداره زنجیره‌ای و پیوسته مطابق شکل زیر اجرا می‌گردد.



شکل شماره-۱۵- دیوار محافظت پیوسته

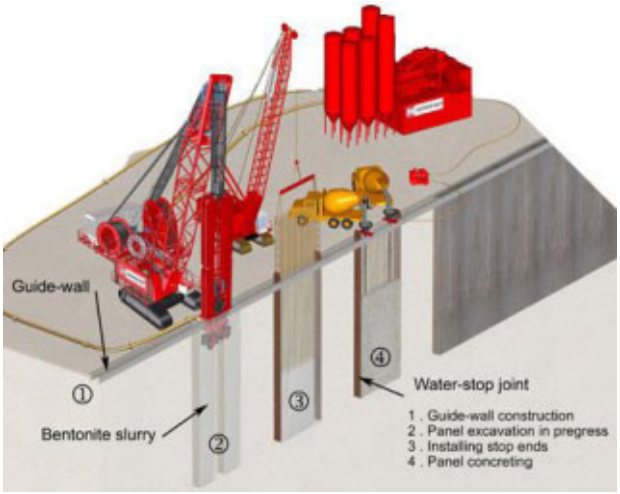
ب) اجرای دیوار محافظت ناپیوسته: در مواردی که توده‌ی خاک و سنگ دارای چسبندگی زیاد و سطح آب‌های زیر پایین باشد، می‌توان از شمع‌های درجای ریز ناپیوسته و با فاصله استفاده نمود.(مطابق شکل ۱۶) در این روش بدلیل چسبندگی بین دانه‌ها، خاک بین شمع‌ها با وجود پدیده قوس‌خوردگی پایداری جانبی وجود دارد. با در نظر گرفتن شرایط و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک، معمولاً حداکثر فاصله محور تا محور شمع‌های اصلی دو برابر قطر شمع‌ها می‌باشد همچنین در این روش، پایداری در برابر نیروهای جانبی نیز مدنظر قرار می‌گیرد. همچنین در پایداری‌های کوتاه‌مدت کارایی داشته و در اثر مرور زمین، احتمال هوازدگی بین شمع‌ها وجود دارد و در دراز مدت نیز تغییر مشخصات خاک و برخی از پارامترهای آن مانند از دست دادن آب و یا حالت اشباع شدن آن باعث ریزش خاک بین شمع‌ها می‌شود که برای جلوگیری از آن می‌توان از بتن‌پاشی (شاتکریت) و بستن مش پوشش لازم را جهت پایداری ایجاد نمود.

شکل شماره-۱۶- دیوار محافظت ناپیوسته

لازم به ذکر است روش اجرا و حفاظت توسط شمع‌های درجا در متروی شهر اهواز همان گونه که در قسمت فوق شرح داده شده به صورت آب‌بند می‌باشد.

۹-۲. مهاربندی توسط دیوار دیافراگمی Diaphragm walls-Slurry wall

یکی دیگر از روش‌های محافظت از جداره‌ی گود، احداث دیوار دیافراگمی و یا دیوار دوغابی Slurry Wall می‌باشد. در این روش ابتدا توسط دستگاه‌های گراب متناسب با شرایط زمین، حفاری قسمتی از دیوار انجام می‌شود و همزمان جهت پایداری جداره‌ی دیواره حفاری صورت گرفته و جهت جلوگیری از ریزش‌های موضعی از دوغاب بنتونیت استفاده می‌شود. تشکیل کیک بنتونیت در داخل دیواره حفاری شده و نفوذ در لایه‌های دانه‌ای جداره باعث می‌گردد جداره همواره پایدار بماند سپس بلافاصله پس از رسیدن به عمق موردنظر آرماتورگذاری شده و در نهایت بتن‌ریزی می‌گردد. این روش در زیر هسته‌ی سدهای خاکی نیز کاربرد بسیار دارد و از هرگونه نشتی جلوگیری می نماید. استفاده از این تکنیک در مناطق شهری با محدودیت‌هایی نظیر استفاده از روش مهاربندی افقی و مایل و المان‌های کششی روبروست. شکل زیر مراحل اجرای دیوار دیافراگمی را نشان می‌دهد.



شکل شماره-۱۷- مراحل اجرای دیوار دیافراگمی

۹-۳. استفاده از دیوار آب‌بند در ساخت ایستگاه‌های مترو، روش اجرای دیواره دیافراگمی ایستگاه:

مراحل اجرای دیواره آب‌بند و دیوار دیافراگمی به شرح زیر است:

۹-۳-۱. اجرای دیوار راهنما و پیش حفاری

حفاری توسط بیل مکانیکی پس از پیاده کردن مسیر دیوار توسط نقشه‌بردار، برداشت و برش آسفالت حدود ۱/۲ متر (از تراز روی آسفالت) با شیب مناسب که پایداری خاک ترانشه را تأمین نماید، صورت می‌گیرد. دیوار راهنما برای استقرار اولیه‌ی دستگاه حفاری، قرارگیری مناسب در محل اجرای پانل، جلوگیری از انحراف‌های اولیه، حفظ راستای دیوار، جلوگیری از پیچش پانل، حفظ گل حفاری، جلوگیری از پخش شدن گل، استحکام بخشیدن به قسمت فوقانی

گودال در مقابل بارهای سنگین نظیر وزن دستگاه حفاری و جلوگیری از ریزش لبه‌های گودال به درون آن، اجرا می‌شود. این دیوار به صورت دو دیوار موازی هم و با فاصله مناسب برای دستگاه حفاری (که معمولاً مساوی ضخامت دیوار+ ۴ سانتیمتر است) اجرا می‌شود. تراز بالای دیوار راهنما بایستی حدوداً کمتر از سکوی اجرا باشد. معمولاً بارهای وارده بر دیوار راهنما شامل بار خاک‌ریزی دیوار و وزن دستگاه حفار و ماشین‌آلات بوده و مشابه یک دیوار حائل طراحی می‌شود. همچنین حرکت ماشین‌آلات از روی دیوار راهنما بار بیل مکانیکی که عمل پیش حفاری را انجام می‌دهد، مورد نظر قرار می‌گیرد. از آنجا که پمپ گل دستگاه حدود ۳ متر بالاتر از ابتدای کاتر قرار گرفته است، به منظور غرق شدن آن در گل، لازم است قبل از شروع حفاری، به عمق ۳ تا ۳/۵ متر از تراز روی دیوار راهنما پیش حفاری صورت گیرد. طرح اولیه و مراحل اجرایی دیوار راهنما و عملیات پیش حفاری مطابق شکل ۱۸ می‌باشد.

شکل شماره ۱۸- آرماتوربندی(a) ، پر کردن مصالح پشت دیوار (b) و عملیات پیش-حفاری دیوار راهنما(c)

۹-۳-۲. حفاری دیوار

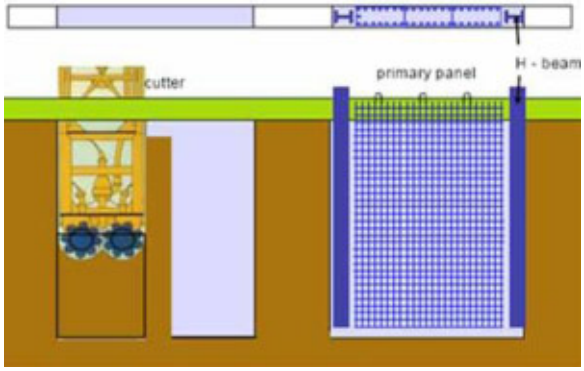
الف- *آماده‌سازی سکوی اجرا، مونتاژ دستگاه حفاری و تجهیزات وابسته:*

با توجه به شرایط خاص دستگاه، سکوی استقرار آن باید از شرایط فنی خاصی برخوردار باشد. برای مثال شیب سکو نباید از ۳ درجه تجاوز کند و شرایط تراکم آن به نحوی باشد که با توجه به وزن دستگاه شاهد نشست‌های پیش‌بینی نشده نباشیم. از این رو با توجه به شرایط محلی و موقعیت ایستگاه، مونتاژ دستگاه، اقدامات مربوط به نصب و مونتاژ دیسندر (قسمت پایین رونده) و تأسیسات حوضچه گل حفاری در محدوده‌ی طرح صورت می‌گیرد. در شکل ۱۹ تصویری از دستگاه هیدروفرز نشان داده شده است.

شکل شماره ۱۹- نمایی از دستگاه هیدروفرز مستقر در محدوده‌ی ایستگاه پردیس اهواز

ب- *اجرای پانل‌ها:* پس از اجرای دیوار راهنما، اطراف آن با مصالح مناسب پر می‌شود. سپس نقشه‌برداری به منظور تعیین محل پانل‌ها، با علامت‌گذاری بوسیله‌ی میخ‌های فولادی و یا رنگ روی دیوار راهنما، ابتدا و انتهای پانل‌ها مشخص می‌گردد. اجرای پانل‌ها با منظورکردن مسائل فنی و با توجه به شرایط اجرایی از جمله زمین‌شناسی ساختگاه، شرایط اجرایی، فضای کار، ابنیه‌های مجاور و... به صورت یک، دو و یا سه پانلی انجام می‌گیرد.

در ابتدا عملیات اجرایی به صورت تک پانلی انجام می‌گردد بدین صورت که پانل‌های اولیه به صورت یک در میان به طول ۲/۸ متر حفاری و پس از نصب قفسه‌ی آرماتور و در صورت لزوم، واتر استاپ نصب و سپس بتن‌ریزی شده و پس از آن پانل‌های ثانویه با منظورکردن همپوشانی لازم (در صورت عدم نصب واتر استاپ) اجرا می‌گردد. از آنجا که اجرای پانل‌های بزرگ به صورت دو پانلی با مشکلات اجرایی همراه بوده و مستلزم صرف زمان می‌باشد، از این رو در صورت حصول شرایط فنی و اجرایی مناسب و ایجاد اطمینان لازم، ادامه عملیات اجرایی، به صورت پانل‌های بزرگ (سه پانلی) پیشنهاد می‌گردد (شکل ۲۰). در این پروژه با توجه به جزئیات اجرایی، درز بین پانل‌ها و نحوه‌ی اجرای واتر استاپ، *دو روش جهت اجرای پانل‌ها* توضیح داده می‌شود.



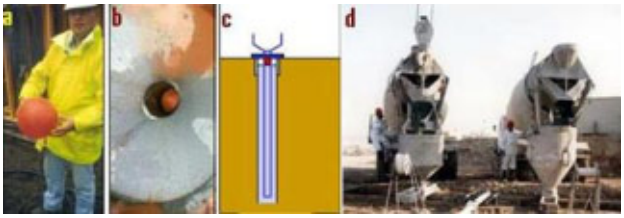
شکل شماره ۲۰- استفاده از تیرهای H شکل برای هدایت شبکه آرماتور به درون پانل سه پانلی

❐ **روش اول:**

در این روش جهت آب‌بندی درز بین پانل‌ها بجای استفاده از واتراستاپ، عملیات اضافه برش پانل‌های اولیه (همپوشانی پانل‌ها) انجام می‌شود، بدین‌صورت که ابتدا پانل‌های اولیه با استفاده از روش حفاری پانل‌های بزرگ حفاری می‌شود. طول پانل‌های اولیه با توجه به حفاری سه مرحله‌ای این پانل‌ها و با توجه به همپوشانی ۲۰ سانتیمتر از هر طرف در پانل میانی معادل ۷/۶ متر می‌باشد که به لحاظ پایداری باید بررسی شود. در این روش بلافاصله پس از حفاری، عملیات آماده‌سازی پانل جهت بتن‌ریزی با کنترل مشخصات گل و

برس‌زنی پانل جهت از بین بردن لایه کیک بنتونیتی در ناحیه درزها انجام می‌شود. سپس جهت جلوگیری از انحراف قفسه‌ی آرماتور و تسهیل در استقرار آن و با توجه به این که طول ۷/۶ متری پانل با دو شبکه آرماتور پوشش داده می‌شود، سه تیر H شکل (با عرض جان ۴۰ سانتیمتر) که به تیرهای راهنمای موقت معروف هستند در ابتدا، انتها و وسط پانل به صورت قائم مستقر می‌شوند(شکل ۲۰). پس از استقرار هر دو شبکه‌ی آرماتور در دو طرف، تیر راهنمای میانی خارج می‌گردد. شبکه‌ی آرماتور موجود، در کارگاه آرماتوربندی بافته می‌شود و جهت جابجایی و حمل آنها توسط جرثقیل از قاب‌های توزیع‌کننده نیرو (جهت جلوگیری از خمیدگی و خرابی شبکه آرماتور) استفاده می‌گردد.

پس از این مرحله لوله‌های ترمی به ترتیب به‌وسیله متصل‌کننده‌ها به یکدیگر وصل شده و تقریباً تا یک متری کف پانل پایین داده می‌شوند. پس از نصب قیف، توپ جدا کننده‌ی بتن از گل، درون لوله انداخته می‌شود و عملیات بتن‌ریزی با استفاده از سیستم ترمی جداگانه انجام می‌شود. در ابتدای بتن‌ریزی در هر پانل، چون لوله‌ی ترمی درون گل قرار دارد، به منظور جلوگیری از اختلاط گل و بتن، قبل از بتن‌ریزی، توپ را درون لوله قرار داده و بتن‌ریزی آغاز می‌گردد (شکل ۲۱). وزن بتن قرار گرفته روی توپ مذکور باعث می‌شود که گل از لوله ترمی خارج شده و بتن در کف پانل قرار گرفته و با توجه به اختلاف چگالی بتن و گل، با ادامه بتن‌ریزی گل به سمت بالا حرکت کرده و در نهایت کل آن خارج و بتن‌ریزی پانل کامل می‌گردد.



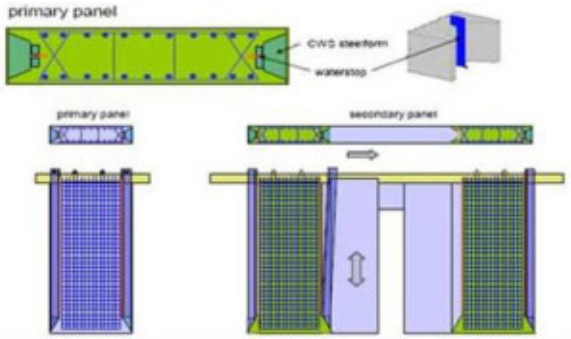
شکل شماره -۲۱- توپ جداکننده بتن از گل(a) ، قیف برای هدایت بتن به درون لوله(b) ، سیستم لوله ترمی برای انتقال بتن به درون پانل (c) و عملیات بتن‌ریزی پانل(d)

در حین عملیات بتن‌ریزی، تیرهای راهنما بالا کشیده می‌شوند. همپوشانی پانل ثانویه با پانل اولیه ۲۰ سانتیمتر است. بنابراین طول مفید پانل ثانویه ۲/۴ متر می‌باشد. در این روش به دلیل رعایت همپوشانی بین پانل‌ها و برس‌زنی درزها، تقریباً لایه‌ی نازک بنتونیتی بین درزها از بین می‌رود و می‌توان دیوار را آب‌بند فرض نمود.

❐ روش دوم:

در این روش جهت آب‌بندی درز بین پانل‌ها از Stop end و واتراستاپ استفاده می‌شود. بدین صورت که ابتدا پانل‌های اولیه حفاری می‌گردد. بعد از نصب واتر استاپ، در شیار موجود در دو طرف پانل، CWS (Contignous waterstop streelform) مطابق شکل ۲۲ نصب می‌گردد. طول پانل‌های اولیه می‌تواند ۲/۸ متر و یا به صورت سه پانلی حدود ۷/۶ متر باشد که با توجه به مشکلات اجرای نصب Stop end، هر چه تعداد آنها کمتر باشد به لحاظ زمانی و اجرایی بهتر است. پس از آن تیر H شکل راهنما در وسط قرار می‌گیرد و سپس شبکه آرماتور مطابق روشی که قبلاً توضیح داده شد درون پانل قرار گرفته و بتن‌ریزی با لوله‌های ترمی انجام می‌شود. پس از سپری شدن زمان مناسب گیرش بتن، پانل‌های ثانویه حفاری می‌شود.

در هنگام حفاری پانل ثانویه در صورتی که طول پانل به صورت تک پانلی معادل ۸/۲ متر باشد یک سری فضادهنده (Spacer) به ضخامت ۲/۵ سانتیمتر در دو طرف کاتر نصب شده تا از برخورد ناخن‌های کاتر با Stop end جلوگیری شود. همچنین جهت جلوگیری از انحراف کاتر باید در قسمت بالایی آن هم فضادهنده نصب شود.



شکل شماره -۲۲- نصب واتراستاپ و CWS

۹-۳-۳. بتن‌ریزی پانل‌ها

بتن‌ریزی پانل‌ها با استفاده از لوله ترمی انجام می‌گیرد(شکل ۲۱). یک لوله ترمی از لوله‌ای به قطر ۲۰ تا ۳۰ سانتیمتر و یک قیف در سر آن تشکیل گردیده که بتن از انتهای آن درون پانل ریخته می‌شود. این وسیله طوری تنظیم می‌گردد که می‌توان آن را به آسانی بالا آورده و لوله‌ها را از آن جدا نمود.

۱۰. مشکلات اجرایی و راه حل آنها

۱۰-۱. عبور ماشین‌آلات سنگین در نزدیکی دیوار

تأثیر عبور ماشین آلات سنگین در مجاورت دیوار به خصوص آن دسته از ماشین‌آلاتی که ایجاد ارتعاش می‌نمایند، در زمان‌های مختلف نسبت به اجرای پانل‌های دیوار قابل بررسی می‌باشد. در هر صورت این اثرات کاملاً به وضعیت و خصوصیات زمین شناسی محل بستگی دارد. اثرات ارتعاش به دو صورت سبب آثار نامطلوب می‌گردد:

الف- پانلی که در مرحله حفاری و یا در حال بتن‌ریزی است ارتعاشات زمین باعث ریزش جداره می‌شود که اگر این عمل در حین بتن‌ریزی

صورت گیرد، موجب ایجاد اثرات نامطلوبی از جمله ریزش مصالح در بتن می‌گردد که خود امکان ایجاد لایه‌های نفوذپذیر را فراهم می‌سازد.

ب- اثرات ارتعاشی در پانلی که بتن‌ریزی آن انجام شده ولی به مقاومت مطلوب نرسیده، سبب ایجاد ترک می‌شود.

ریزش در فاصله‌ی زمانی پس از شستشوی پانل و قبل از بتن‌ریزی مشکل‌ساز است. ریزش جداره‌ی ناشی از ارتعاش زمین باعث ایجاد یک لایه‌ی ضعیف و سست هم به لحاظ امکان ایجاد زهکشی در کف و هم لایه‌ای که در آینده نشست‌های بیشتری خواهد داشت می‌شود. در حین بتن‌ریزی نیز ریزش جداره، عامل عدم یکنواختی بتن می‌شود. آثار مهم ارتعاشات زمین در اثر عبور ماشین‌آلات سنگین، در فاصله زمانی قبل از گیرش بتن حادث می‌شود. بتنی که خود را گرفته است ولی هنوز مقاومت کافی کسب نکرده است، با اعمال ارتعاشات در آن ایجاد ترک بخصوص در محل درزهای بتن قدیم و جدید (پانل‌های اولیه و ثانویه) خواهد شد.

۱۰-۲. پانل‌های بلند

برای اجرای این پانل‌ها در ابتدا گودال‌هایی با فاصله مناسب از هم توسط دستگاه هیدروفرز حفر شده و سپس محل‌های بین آنها حفاری می‌گردد. در نهایت کل کف گودال بزرگ حفر شده، تمیز شده و در نهایت پانل بزرگ حاصله یکباره بتن‌ریزی می‌گردد. برای جلوگیری از کاهش سرعت حفاری، بین پانل‌های بزرگ حفر شده تنها محلی برای اجرای یک پانل با یک بار حفر با هیدروفرز قرار داده می‌شود. بدین ترتیب پس از اجرای پانل‌های اولیه بزرگ، پانل‌های ثانویه کوچک به سرعت اجرا می‌گردند.

۱۰-۳. ریزش پانل‌های دیوار

در حفاری دیوار، با توجه به پربودن ترانشه از گل بنتونیت، در صورت پایداری ترانشه و تشکیل کیک بنتونیتی روی جدار پانل و تثبیت دیواره، معمولاً ریزش حاصل نمی‌شود. اما گاهی به دلایل مختلف ریزش حادث می‌گردد. در حین حفاری گودال دیوار و یا بتن‌ریزی آن، بخشی از مصالح دیواره ترانشه در تعدادی از پانل‌ها ممکن است جدا شده (لغزش پیدا کرده) و به درون پانل سقوط کند و باعث یک گود افتادگی در جدار گودال شود. اگر این ریزش‌ها زیاد باشد و در حین حفاری صورت گیرد، ممکن است باعث خسارت به دستگاه حفاری شده و در بدترین حالت باعث گیر افتادن و حتی مدفون شدن کاتر گردد. چنانچه ریزش در حین بتن‌ریزی رخ دهد باعث عدم یکنواختی و ورود مصالح به درون بتن، و نهایتاً بوجود آمدن ناحیه نفوذپذیر در محل اجتماع مصالح ریزشی می‌شود.

برخورد با لایه سست و ریزشی ناپایدار در حین حفاری دیواره، یکی از علل ریزش می‌باشد. اگر چه بنتونیت به سبب وزن مخصوص بالا و تشکیل کیک بنتونیتی عامل پایداری و تثبیت جداره دیوار پانل، ترانشه و چاهک‌ها می‌باشد ولی کانی‌های رسی از عوامل اصلی لغزش محسوب می‌گردند.

۱۰-۴. انحراف و بالازدگی شبکه آرماتور

یکی از مشکلات اجرایی، انحراف و بالازدگی شبکه آرماتور می‌باشد که جهت رفع این معضل آرماتورهای نشانه بر روی شبکه جوش می‌دهند و با سونداژ مرتب و اطمینان از عدم ریزش، بالازدگی کنترل می‌گردد. همچنین با استفاده از تیرهای I شکل راهنما در طرفین پانل و نصب فضادهنده (Spacer) حلقوی بر روی شبکه آرماتور، انحرافات آن به حداقل می‌رسد.

شکل شماره -۲۳- نحوه استقرار شبکه آرماتور

۱۰-۵. مشکلات اجرایی Stop End

یکی از مشکلات اجرایی، باز نمودن Stop end پس از بتن‌ریزی می‌باشد زیرا نفوذ بتن به پشت آنها محتمل می‌باشد که باید با بکار بردن تمهیدات خاص باز نمودن آنها انجام شود.

شکل شماره -۲۴- ایستگاه نادری غربی قطار شهری اهواز

شکل شماره -۲۵- ایستگاه نادری غربی قطار شهری اهواز

شکل شماره -۲۶- ایستگاه نادری غربی قطار شهری اهواز

۱۱. نتیجه و جمع‌بندی

علی‌رغم مزایای فراوان روش ارائه شده در این یاداشت در ساخت سازه‌های زیرزمینی، متاسفانه تاکنون این روش در کشور ناشناخته مانده و کاربرد زیادی نداشته است که علت اصلی این امر احتمالاً فقدان آگاهی لازم از وجود چنین روش اجرایی و عدم آشنایی مدیران و کارشناسان دست‌اندرکار در ساخت سازه‌های زیرزمینی در کشورمان از مزایای این روش اجرایی است در حالیکه وجود پتانسیل‌های طراحی و اجرای این روش در کشور با کاربرد آن برای اولین بار در پروژه قطار شهری اهواز توسط کارشناسان داخلی اثبات گردیده است. در این راستا امید است که کلیه دست اندرکاران ساخت و ساز اعم از کارفرمایان، مشاورین و پیمانکارانی که بنحوی با ساخت سازه‌های زیرزمینی در کشور در ارتباط هستند با در نظر گرفتن آثار مثبت استفاده از این روش اجرایی و انجام مطالعات دقیق و در نظر گرفتن عواملی از قبیل تاثیرات مهم آن در ایمنی در حین اجرای عملیات و همچنین کاهش چشمگیر زمان مسدود شدن معابر در ساخت و سازهای زیرزمینی در مناطق پر ترافیک شهری و حذف عملیات‌های زمانبر در اجرای پروژه‌ها، امکان کاربرد این روش را بعنوان یک گزینه مهم اجرایی در طرح‌های بزرگ خصوصاً در مناطق شهری و زمین‌های سست در کنار سایر روش‌های معمول در کشور بیش از پیش مد نظر قرار داده و در صورت تامین نیازهای طرح و امکان اجرای آن، با جایگزینی این روش بجای روش‌های سنتی و یا استفاده از تلفیق این روش با روش‌های معمول و ایجاد روش‌های متنوع در ساخت سازهای زیرزمینی، موجبات پیشرفت این تکنولوژی در کشور را فراهم آورند.

پانوشت

1- Diaphragm wall
2- Struts
3- Rapid Transit System
4- Retaining Wall

منابع

1. Puller, Malcolm; Deep Excavations: a practical manual, 2rd Edition, Thomas Telford, 2003.

۲. قویدل اقدم، امید؛ بررسی متدولوژی اجرای سازه‌های نیمه عمیق و عمیق در خاک‌های سست به روش‌های Bottom-Up و Top-Down با رویکرد ویژه جهت انتخاب گزینه برتر عملیات اجرایی ایستگاه‌های زیرزمینی پروژه قطار شهری اهواز، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، علوم و تحقیقات خوزستان. (۱۳۸۶)

3. Wong, R.W.M; "The construction of Deep and Complex Basements and Underground Structures within Extremely Difficult Urban Environment", Technology, Hong King, December 2002.

4. Pearlman,S., walker,M., Boscardin,M.; "Deep Underground Basements for Major Urban Building Construction", ASCE Geo-Support, Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods and Specialty Foundations , Orlando,FL, Jan 2004.

5. Thasnanipan,N., Maung,A.W., Aye,Z.Z.; "Practical installation of stanchions for top-down construction in Bangkok subsoil", GEOTECH, Developments in Geotechnical Engineering, Bangkok, November 2000.

6. The institution of structural engineers.; "Design and construction of deep basements including cut and cover structures", IStructE, London, 2004.

۷. قویدل اقدم، امید؛ دستورالعمل ساخت و مهندسی ارزش اجرایی ایستگاه‌های پروژه قطار شهری اهواز به روش Top-Down، AUR100-KHC-S00- PRC-002-00 شرکت کیسون، پروژه قطار شهری اهواز. (۱۳۸۶)

8. Top –Down Construction, "Land Transport Authority" , march, 2005.