روش‌های نوین اجرای زیرزمین سازه‌ها
در گودبرداری‌های عمیق شهری

مهتاب علی‌طالش
کارشناس ارشد مهندسی عمران–ژئوتکنیک

حسین امین
کارشناس ارشدمهندسی عمران–ژئوتکنیک

حمیدرضا خوشدل مفیدی
کارشناس‌عمران

■ چکیده

اجرای طبقات متعدد زیرزمین در سازه‌ها نیازمند اجرای گودبرداری در مجاورت ساختمان‌ها و تاسیسات شهری است. در این مقاله روش ساخت تاپ – دان که روشی نوین و ابتکاری در اجرای طبقات زیرزمین سازه‌ها است معرفی شده است. در روش تاپ–دان فرآیند اجرای سازه و گودبرداری از تراز صفر زمین آغاز می‌شود و همزمان با پیشروی اجرای سازه به سمت تراز زیر پی، عملیات خاکبرداری، تثبیت جبهه‌های خاکی در دیواره‌های گودبرداری شده و اجرای دیوارهای حایل سازه انجام می شود. در این روش همزمان با پیشروی ساخت سازه به سمت پایین می‌توان روسازه را نیز اجرا کرد. استفاده از این روش در گودبرداری‌های عمیق شهری، علاوه بر اینکه منجر به صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌شود، ضریب اطمینان پایداری دیواره‌ها را افزایش و تغییرشکل‌های همجواری‌های گود را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

کلید واژه‌ها: گودبرداری‌های عمیق شهری، روش ساخت از بالا به پایین، روش ساخت تاپ – دان، دیوار حایل

مقدمه

امروزه به‌دلیل توسعه روزافزون شهرها، افزایش تراکم جمعیت و به‌تبع آن کمبود و قیمت قابل توجه زمین، نیاز به ساخت ساختمان‌های بلندمرتبه در شهرها افزایش یافته است. بنابراین تامین فضاهای پارکینگ، انباری، بارگیری کالاها و خدمات در ساختمان‌ها ضروری خواهد بود. اگرچه ساخت طبقات زیرزمین گران و هزینه‌بر است، اما پتانسیل کسب درآمد و سود در آن وجود دارد، بنابراین احداث طبقات زیرزمین در ساختمان‌های بلندمرتبه ضروری است. اجرای طبقات متعدد زیرزمین در سازه‌ها نیازمند انجام گودبرداری در مجاورت ساختمان‌ها و تاسیسات شهری است. همانند تمامی شهرهای بزرگ دنیا، گودبرداری‌های عمیق در محیط‌های شهری در شهرهای بزرگ ایران نیز رشد روزافزونی داشته است. طبق آمار واحد گودبرداری سازمان نظام مهندسی ساختمان استان تهران، از حدود ۴۳۱۰ نمونه آماری از پروژه‌های شهر تهران در بازه زمانی ۱۳۹۳/۱۰/۰۱ تا ۱۳۹۴/۰۴/۳۱، ۲۱/۱% فاقد زیرزمین تا عمق ۲/۱ متر، ۲۳/۴ % یک طبقه زیرزمین تا عمق ۴ متر، ۲۰/۹ % دو طبقه زیرزمین تا عمق ۷ متر، ۱۸/۵ % پنج طبقه زیرزمین تا عمق ۱۶ متر و ۱۶/۱% بیش از پنج طبقه زیرزمین و عمیق‌تر از ۱۶ متر بوده‌اند. همین آمار بیان می‌کند که در گودبرداری‌های اجرا شده در این پروژه‌ها در حدود ۰/۹ % از مهار متقابل، ۰/۳۷ % از دیوار برلنی، ۰/۰۹% از تای‌بک (دوخت به پشت)، ۵/۲۴% از انکراژ، ۷۱/۷% از خرپا، ۹/۷۲% از میخ‌کوبی، ۰/۹۵ % از شمع‌های بتنی و ۱۱/۶۵% از سایر روش‌ها برای محافظ دیواره‌های گودبرداری استفاده کرده‌اند. با احتساب این آمار می‌توان گفت که در حدود ۳۵% از پروژه‌ها دارای گودبرداری‌های عمیق هستند. همچنین آمار دیگر این واحد نشان می‌دهد که طی بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۱، ۲۰۳۹ حادثه به‌دلیل گودبرداری و آوار در شهر تهران رخ داده است که در این حوادث ۲۱۶ نفر فوت شده و ۷۱۲ نفر مصدوم شده‌اند. این آمار نشان از حساسیت موضوع گودبرداری در محیط‌های شهری دارد.

ساخت زیرزمین‌های عمیق به‌روش‌های مختلفی دسته‌بندی می‌شود که از آن جمله ساخت زیرزمین با ایجاد حفاری باز، روش ساخت از پایین به بالا، روش ساخت از بالا به پایین و ترکیب روش ساخت از بالا به پایین و از پایین به بالا را می توان نام برد. در استاندارد BS:8002:1994 درباره سازه‌های نگهبان خاک، روش‌های مختلفی برای ساخت طبقات زیرزمین سازه ارایه شده است. در گودبرداری‌های عمیق همواره لازم است تا جبهه‌های خاکبرداری شده با استفاده از روش مناسبی پایدار شوند. روش‌های مختلفی برای پایدارسازی دیواره‌های یک گودبرداری عمیق وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به روش‌های زیر اشاره کرد:

- انکراژ دیواره‌های گودبرداری
- دیواره‌های میخ‌کوبی شده
- استفاده از سیستم ترکیبی شمع‌های مدفون فولادی یا بتنی (سولجرپایل ها) همراه با میخ‌کوبی یا انکراژ
- بهره‌گیری از روش‌های اجرای ابتکاری و نوین همچون روش اجرای تاپ-دان یا آپ- دان

در روش تاپ- دان فرآیند اجرای سازه و گودبرداری از تراز صفر زمین آغاز می‌شود و همزمان با پیشروی اجرای سازه به سمت تراز زیر پی، عملیات خاکبرداری، ثبیت جهبه‌های خاکی در دیواره‌های گودبرداری شده و اجرای دیوارهای حایل سازه صورت می‌پذیرد. در این روش همزمان با پیشروی ساخت سازه به سمت پایین می‌توان روسازه را نیز اجرا کرد. لازم به‌ذکر است که هر یک از روش‌های ذکر شده در بالا را می‌توان همزمان و به‌صورت ترکیبی در یک پروژه استفاده و اجرا کرد.

عوامل مختلفی انتخاب روش پایدارسازی و اجرای یک گودبرداری عمیق را دیکته می‌کنند، همانند:

- داده‌ها و شرایط ژئوتکنیکی
- آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های موجود
- بررسی‌های میدانی
- ابعاد پروژه
- منابع موجود برای اجرای پروژه
- سیستم‌های سازه نگهبان
- شرایط آب زیرزمینی
- سازه‌های مجاور دیوارهای حایل
- روش طراحی
- مونیتورینگ

انواع دیوارهای حایل که برای محافظت از خاک و مقاومت در برابر فشار در گودبرداری‌های عمیق استفاده می‌شود عبارتند از:

سپری‌ها: سپری‌های فولادی به‌عنوان روش شناخته شده‌ای برای اجرای دیوارهای حایل به‌کار می‌رود. ورق‌های فولادی با پروفیل‌های مختلف به‌صورت کوبشی یا با استفاده از لرزش داخل خاک تا عمق موردنظر رانده می‌شود. می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف اقدام به آب‌بندی موقتی یا دایمی اتصال بین ورق‌های فولادی کرد تا از عبور آب از میان اتصالات جلوگیری شود. این ورق‌های فولادی را در اغلب خاک‌ها می‌توان فرو کرد اما در مورد خاک‌های سخت نیاز به استفاده از پروفیل‌های با سطح مقطع بزرگتر به‌منظور اعمال نیروی بیشتر برای راندن است که استفاده از این پروفیل‌ها را غیراقتصادی می کند. در مورد وجود سنگ بستر باید از پیش، با استفاده از حفاری‌های مناسب اقدام به راندن ورق‌های فولادی کرد. چکش‌هایی که به‌منظور رانش این نوع سپری‌ها استفاده می‌شود می‌تواند منجر به ایجاد صدا یا ارتعاش شود، هرچند اخیراً چکش‌های مدرن لرزاننده با فرکانس بالا به‌طور موفقیت‌آمیزی در مجاورت سازه‌های موجود استفاده شده است. به‌طور متداول سپری‌ها به‌عنوان سیستم‌های حایل موقتی

استفاده می‌شود و پس از تکمیل دیوار دایمی زیرزمین سازه از زمین خارج می‌شود. به‌طور کلی استفاده از سپری‌ها در خاک‌های سست مناسب‌تر است.

شمع‌گذاری پیوسته: اجرای شمع‌های پیوسته شامل نصب شمع‌های بتنی درجا در فواصل مرکز به مرکز ۱/۵ تا ۳/۰ برابر قطر شمع است. این نوع از سیستم‌های نگهبان تنها در برخی از انواع خاک به‌کار می‌رود تا بتوان پراکندگی خاک و خروج آب زیرزمینی را کنترل یا از آن جلوگیری کرد. برای مثال چنین روشی می‌تواند برای ساختگاه متشکل از رس مناسب باشد اما در جایی که شن آبدار وجود دارد استفاده از آن مناسب نیست. شمع‌گذاری پیوسته را می‌توان در اغلب خاک‌ها و سنگ‌ها مشروط به استفاده از تجهیزات و ماشین‌آلات مناسب انجام داد.

شمع‌های سکانتی: شامل نصب شمع‌های بتنی است که در یکدیگر قفل و بست شده و بنابراین یک دیوار بتنی پیوسته را تشکیل داده‌اند. شمع‌ها معمولاً به‌صورت سخت – نرم (در اغلب موارد) یا به‌صورت سخت – سخت یک در میان کنار یکدیگر ریخته می‌شود. شمع‌های نرم در ابتدا با استفاده از یک ترکیب بتنی نرم ریخته می‌شود که این شمع‌ها غیرمسلح است. پس از آن شمع‌های سخت با استفاده از بتن سازه‌ای مابین شمع‌های نرم و به‌صورت سکانتی اجرا می‌شود. بنابراین شمع‌های سخت تمام مقاومت و سختی سازه‌ای را تامین می‌کند و مسلح است. مشروط به فراهم کردن رواداری‌های لازم کیفیت و لایه‌بندی، یک دیوار شمع‌های سکانتی می‌تواند تقریباً شرایط یک پرده آب‌بند را در شرایط موقتی فراهم کند. در شرایط دایمی باید ملاحظات مربوط به آب‌بند کردن دیوار مطابق با آیین‌نامه‌های موجود در نظر گرفته شود.

دیوارهای دیافراگمی: این دیوارها با استفاده از حفاری یک ترانشه باریک به‌وسیله چنگک معلق از جرثقیل یا برش‌دهنده فرزی ساخته می‌شود. به‌منظور محافظت از ترانشه، آن را با یک سیال مهندسی شده محافظ که معمولاً دوغاب بنتونیت است پر می‌کنند تا زمانی که مصالح دایمی جایگزین سیال محافظ شود. معمولاً دیوارهای دیافراگمی با بتن مسلح ساخته می‌شود، هرچند استفاده از دیوارهای غیرمسلح نیز امکان پذیر است. اجرای دیوار معمولاً به‌صورت دهانه به دهانه است و در نهایت یک دیواره یکپارچه و پیوسته ایجاد خواهد شد. ضخامت این دیوارها معمولاً از ۵۰ سانتی‌متر تا ۱۵۰ سانتی‌متر متغیر است و تا عمق ۵۰ متر یا بیشتر را می‌توان با استفاده از این روش حفاری کرد. این نوع دیوارها برای زیرزمین‌های عمیق، ایستگاه‌های راه‌آهن زیرزمینی، کاربری‌های تونل، ایستگاه‌های پمپاژ و نظایر آن مناسب است. دیوارهای دیافراگمی را می‌توان در نزدیکی سازه‌های موجود نصب کرد. از این نوع دیوارها اغلب در روش ساخت تاپ-دان استفاده می‌شود. دیوارهای دیافراگمی به‌عنوان دیوارهای بسیار سخت به‌منظور کنترل جابجایی زمین در نظر گرفته می‌شود و همچنین می‌تواند نقش پرده آب‌بند را در شرایط وجود آب زیرزمینی داشته باشد.

دیوارهای شاه‌تیر: دیوارهای شاه‌تیر اگر در زمینی با شرایط مناسب ساخته شود، می‌تواند جایگزین اقتصادی مناسبی باشد. اساساً این دیوارها متشکل از نصب تکیه‌گاه‌های قائم سازه‌ای (شاه‌تیر) در فواصل مختلف (معمولاً ۲ تا ۴ متر) و خالی کردن فضای بین تکیه‌گاه‌های قائم و نصب مصالحی به‌عنوان دهانه‌های افقی است. این مصالح می‌تواند از جنس چوب، فولاد یا اغلب از نوع بتن درجا یا پیش‌ساخته باشد. خالی کردن فاصله بین شاه‌تیرها معمولاً به روش از بالا به پایین انجام می‌شود. بنابراین لازم است تا خاک حفاری شده بتواند بدون هیچ‌گونه محافظی بایستد تا المان‌های افقی نصب شود. این نوع دیوارها خاصیت آب‌بندی کمی داشته و نمی‌تواند به‌عنوان پرده آب‌بند عمل کند. جابجایی دیوار در این نوع دیوارها نسبت به دیوارهای دیگر بیشتر است و بنابراین اجرای این دیوارها در نزدیکی بناهایی که به نشست حساس‌اند مناسب نیست.

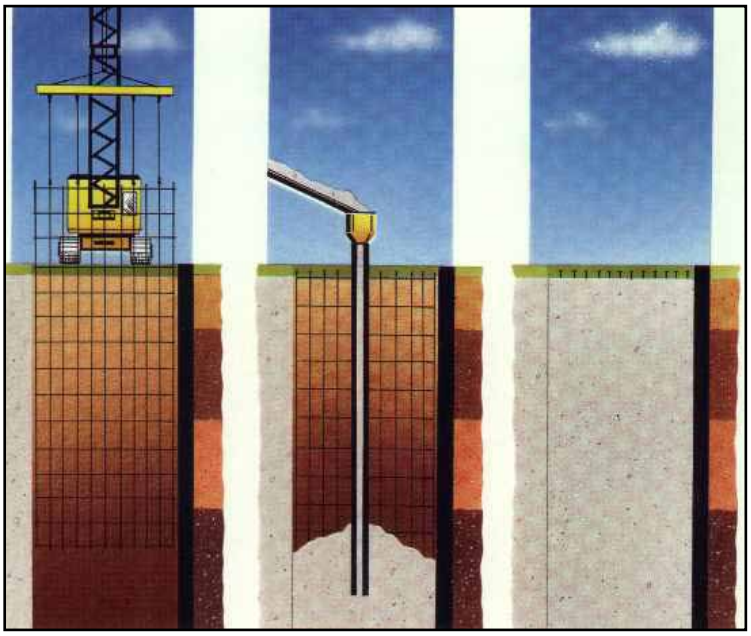
دیوارهای خاک مخلوط: دیوار خاک مخلوط با استفاده از جایگزینی نسبی خاک برجا با مصالح سخت‌تر سیمانی ساخته می‌شود. روش‌های مختلفی برای مخلوط کردن خاک وجود دارد، از جمله، روش مکانیکی، روش هیدرولیکی با و

دیوار شمع‌های سکانتی، دوبلین

بـــدون هوا و ترکیب هر دو نوع. با اجرای یک ردیـــف منفرد از دیوار خاک مخلوط در پیرامون سایتی که باید حفاری شود می‌توان دیواری احداث کرد که در مقابل نیروی خاک مقاومـــت می‌کند. می‌توان از ایـــن دیوارها در ترکیب با میخ‌کوبی یا انکراژ نیز استفاده کرد.

معرفی روش ساخت تاپ – دان

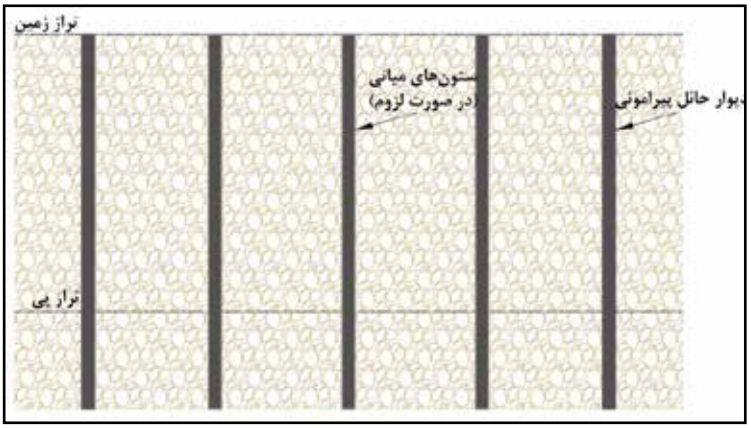
روش تـــاپ – دان یـــک روش ســـاخت برای زیرزمین‌های عمیق اســـت که در آیین‌نامه BS:8002 نیز برای ســـازه‌های نگهبان ارایه شـــده اســـت. این روش از اوایل دهه ۶۰ میلادی به‌تصویب رســـید و تاکنون در کشورهای مختلفی براساس نیاز ســـاختگاه استفاده شده است. روش تـــاپ – دان یـــک روش نوآورانه حفاری است که کم کم در حال کسب مقبولیت در صنعت است (لانگ، ۲۰۰۱). در روش ساخت تاپ – دان امکان اجرای همزمان طبقات زیر زمین همراه با پیشـــروی به تراز زیر پی و انجام عملیات خاکبرداری وجـــود دارد. در روش آپ – دان امکان ســـاخت همزمان بخش روسازه بالاتر از ســـطح زمین همراه با پیشروی طبقات زیرزمین و اجـــرای عملیات گودبرداری وجـــود دارد. اصول روش ســـاخت از بالا به پاییـــن بر این قـــرار دارد که در ابتدا المان‌های باربر قائمی نصب می‌شـــود و سیستم سازه نگهبان از تراز طبیعی سطح زمین با اســـتفاده از شمع‌ها و دیوارهای حایل، پیش از انجام هرگونه خاکبرداری، ساخته می‌شود. سپس یک پوشش درجا ریخته شده (طبقه همکف معلق آینده) با پوشاندن مساحتی که باید حفاری شود، ساخته می‌شـــود. این کار با دنبال کردن خاکبرداری زیر پوشش درجا ریخته شده تا عمق موردنیاز انجام می‌پذیرد. این در حالی اســـت که به‌طور همزمان ساخت روسازه نیز پیش می‌رود. استفاده از این روش خلاقانه در گودبرداری‌های عمیق منجر به شتاب گرفتن زمان بندی اجرای پروژه‌ها در مقایسه با روش‌های متداول موقتی اســـت. برخلاف روش‌های سنتی،



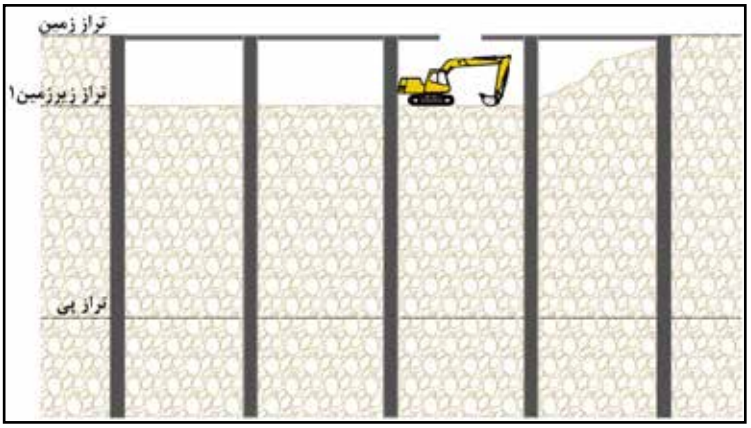
نمایش شماتیک اجرای دیوار دیافراگمی

ساخت دیوار شاه‌تیر در کالج کسب و کار باترشاو، انگلستان

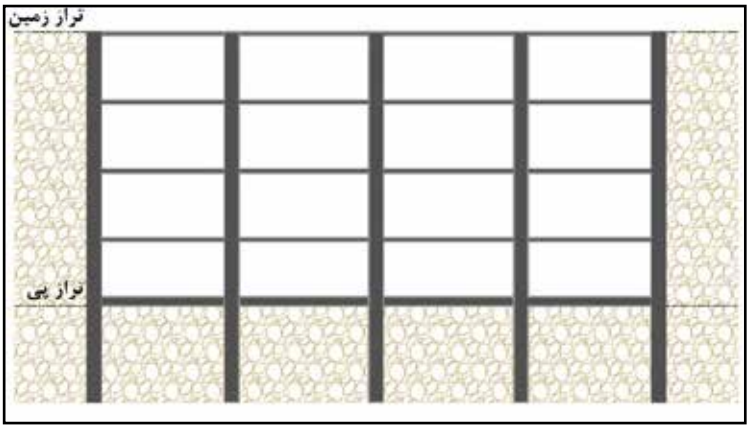
در روش تاپ – دان، ابتدا دیوار پیرامونی ساخته می‌شود و معمولاً پی‌های شمعی و ســـتون‌ها از تراز زمین نصب می‌شود. دال طبقـــه همکف نیز ریخته می‌شـــود و ســـپس حفـــاری طبقـــات زیرزمین با اســـتفاده از یک بازشدگی که داخل دال ایجاد شده است، انجام می‌پذیرد. اساساً در روش ساخت از بالا به پایین نیازمندی به خاکبرداری زیر تراز زمین و ایجاد یک گود را منتفی می‌کند و ســـاختگاه پروژه برای ساخت از روز اول در دسترس است. ایـــن روش به‌طور قابـــل توجهی میزان خسارت به ســـازه‌های همجوار پروژه که به تغییرشکل و حرکت خاک حساس اند را کاهش می‌دهـــد. همچنین این روش به‌طور قابل‌توجهی سرعت تحویل پروژه



نصب دیوار حایل پیرامونی و ستون‌های میانی سازه اصلی در صورت لزوم



اجرای دال سقف تراز زمین و سپس خاکبرداری اولین زیرزمین؛ بازشدگی داخل سقف امکان انتقال خاک به بیرون را می‌دهد



اجرای فونداسیون و بستن بازشدگی‌های سقف‌ها و تکمیل سازه زیرزمین

به کارفرما را تسریع می‌کند، سبب کاهش استفاده از منابع و همچنین آلودگی شده و منجر به بهره‌وری در هزینه‌ها می‌شد.

تعدادی گام‌های جزیی به‌عنوان بخش‌هایی از روند انجام این کار وجود دارد که شامل موارد زیر است:

گام ۱: شمع‌های درجا که به‌عنوان ستون‌های زیرزمین و سیستم نگهبان پیرامونی به کار می‌رود از زیر تراز ستون‌ها و دیوارهای همکف، ریخته می‌شود.

گام ۲: دال طبقه همکف در بالای شمع‌ها و دیوارهای پیرامونی ریخته می‌شود.

گام ۳: ساخت سازه بالای تراز زمین می‌تواند آغاز شود.

گام ۴: پس از اینکه دال بتنی به مقاومت مشخصی رسید، خاکبرداری زیر دال طبقه همکف ادامه پیدا می‌کند.

در صورتی که طبقات متعدد زیرزمین موردنیاز باشد، می توان این فرآیند را تکرار کرد. این روش برای سازه‌ای که از نظر تئوری دارای ارتفاع نامحدود باشد، مجاز است.

روش تاپ – دان در بسیاری از کشورهای دنیا استفاده شده است. در هریک از پروژه‌های مختلف می‌توان رویکردهای متفاوتی در احداث طبقات زیرزمین مشاهده کرد. از جمله پروژه‌های اجرا شده در سراسر دنیا می‌توان به ساختمان دفتر مرکزی شرکت بانکداری هنگ کنگ و شانگهای در هنگ کنگ، ساختمان زینگیه بانک شانگهای، مرکز خرید گالریز لندن، بلوک اداری خیابان ویکتوریا لندن، مرکز کنفرانس کویین الیزابت ۲ در ویستمینستر لندن، مرکز آلفا-آربت روسیه، فستیوال واک هنگ کنگ، آی اف سی (مرکز تجارت بین‌المللی) هنگ کنگ، برج بایتکسکو در ویتنام، اسکای سیتی ویتنام، رویال سیتی ویتنام، ایستگاه ام آر تی ویستا بونا در سنگاپور، مرکز آئودی در جنوب فنلاند، هالیوود پلازادر آمریکا و پروژه‌های بسیار زیاد دیگری در نقاط مختلف دنیا از این روش استفاده کرده‌اند. در ایران نیز

روش تاپ – دان روشی نوظهور است. از جمله پروژه‌های اجرا شـده به این روش در ایران می‌توان به پروژه ایسـتگاه قطار شـهری اهواز، پروژه ساختمان مسکونی شقایق در محله یوسف‌آباد تهران، پروژه ساختمان شـیخ‌بهایی و مجتمع تجاری لاهـور در شـهر اصفهـان و پروژه‌های انگشت‌شـمار دیگر در شهر مشهد اشاره کرد.

■ مراحل اجرایی روش تاپ – دان برای زیرزمین‌های عمیق را می‌توان به‌شرح زیر بیان کرد:

۱- شمع‌های درجا که به‌عنوان ستون‌های زیرزمین و سیسـتم نگهبـان پیرامونی اسـت از زیر تراز سـتون‌ها و دیوارهای همکف، ریخته می‌شـود. ابتدا دیوارهای پیرامونـی زیرزمین اجرا می‌شـود. این دیوار می‌توانـد از نوع دیـوار درجاریز، دیوارهای دیافراگمی پیش‌سـاخته بتنی یا با اسـتفاده از روش دوغاب بنتونیت، شمع‌های سکانتی، شمع‌های پیوسته یا سپری‌های فولادی باشد. استفاده از انواع دیوارهـای حایل که پیش از این توضیح داده شد، در این روش امکان پذیر است.

۲- پس از اجرای دیوار حایل با توجه به شرایط پروژه و عمق گودبرداری می‌توان ستون‌های میانی سازه را اجرا کرد.

۳- پیش از هرگونه عملیات خاکبرداری، دال سـقف زیرزمیـن اول از تراز زمین موجود اجرا می‌شود. دال سقف به‌عنوان یک مهار متقابل عمل می‌کند. در داخل دال یک بازشـدگی تعبیه خواهد شد تا خاک‌های حاصل از عملیات خاکبرداری از طریـق آن به بیرون از سـایت انتقال یابد. پس از اجرای دال سقف اولین طبقه زیرزمیـن، عملیات خاکبـرداری اولین زیرزمین انجام می‌شود.

۴- پس از پایان یافتن خاکبرداری اولین زیرزمین و رسیدن به تراز سقف زیرزمین دوم، مجدداً عملیات اجرای دال سقف و پس از آن خاکبرداری انجام می‌شود. این روند تا رسیدن به تراز زیر پی ادامه پیدا می‌کند.

۵- پـس از پایان عملیـات خاکبرداری آخرین زیرزمین با رسیدن به تراز زیر پی سازه عملاً گودبرداری پایان می‌پذیرد.

۶- در مرحلـه آخر فونداسـیون سـازه اجرا و بازشـدگی‌های ایجاد شده در دال سقف‌ها بسته می‌شـود و سازه زیرزمین تکمیل می‌شود.

لازم اسـت ذکر شود که در عمل هریک از مراحل مذکور با توجه به شرایط ویژه یک سـایت انجام می‌شود و ممکن است نحوه اجرا از یک سـایت به سایت دیگر متفاوت باشـد. لذا شـرایط ژئوتکنیکی سـاختگاه، ملاحظات طراحی و مسایل اجرایـی و همجـواری پروژه اسـت که تعیین می‌کند از چه روشـی برای اجرا استفاده شود. در مواردی که امکان اخذ رضایت از همسایه‌های مجاور گودبرداری یا مقابله با تراز بالای سطح آب زیرزمینی در پروژه مطرح باشـد، تقریباً تنها روش مطمئن و قابل اجرا است.

■ مزایای روش ساخت تاپ – دان

برخی از مزایای روش ساخت تاپ – دان را می‌توان به‌شرح زیر بیان کرد:

– در روش تاپ – دان درصورت احداث دیوار حایل دایمی با حذف سازه نگهبان موقـت صرفه‌جویی در زمـان و هزینه ایجاد می‌شود.

– در روش تـاپ – دان تغییر باری که از طریق ساخت تدریجی سازه جایگزین خاک حفاری شده می‌شـود، به حداقل می‌رسد و بنابراین تغییرشکل‌های سازه جدید و سازه‌های مجاور کاهش می‌یابد (کات‌زنبچ و همکاران، ۱۹۹۸). با استفاده از این روش نشست‌های ناشی از احداث سازه جدید بسیار کاهش می‌یابد.

– بـا اسـتفاده از ایـن روش آلودگـی صوتی ناشـی از حفاری بخش زیادی از گودبرداری به‌وسـیله طبقـات زیرزمین جذب می‌شود و به حداقل می‌رسد.

با اسـتفاده از این روش حین سـاخت، فضاهایی به‌عنوان انبار در اختیار خواهد بود که بسیار ارزشمند است زیرا بخشی از فضای تـراز زمین در تمامی لحظات و پـس از آن به‌تدریج طبقات زیرزمین در دسترس خواهد بود.

– درصـورت کنترل و طراحی مرحله‌ای ساخت سازه، سـاخت طبقات روسازه را می‌توان بـه محض تکمیل طبقه همکف شـروع کرد و پیـش از تکمیل طبقات زیرزمین به پایان برد. با این کار می‌توان چندین ماه برنامه ساخت کلی را کاهش داد. با تکمیـل زودهنگام پروژه می‌توان درآمد زودهنگام داشت و کارفرما می‌تواند پروژه‌هـای جدیـد را آغاز کنـد. برغم اینکه اگـر در اجرای دیوارهای پیرامونی حتی از دیـوار دیافراگمی کـه گران‌تر از دیگر روش‌هاسـت، اسـتفاده شـود، اتمـام زودهنگام پروژه می‌تواند منجر به صرفه‌جویی اقتصادی قابل‌توجهی شود. به‌عنوان مثال در زیرزمین پروژه خیابان آلدرسـگیت لندن ایـن روش منجر به تکمیل ۷ طبقه از روسـازه شد در حالی که ۱۴ تراز ریخته شده زیرزمین در حال ساخت بود (مارچاند، ۱۹۹۳b).

– دال سـقف‌ها پیـش از انجام هرگونه عملیـات خاکبـرداری اجرا می‌شـود. بنابرایـن زمیـن به‌عنوان یـک قالب و تکیه‌گاه برای ساخت دال به‌کار می‌رود. ایـن موضـوع در زمـان و هزینه نصب و برپایـی قالب‌های سـقف صرفه‌جویی می‌کند.

– در روش سـاخت از پاییـن به بالا و روش مهار متقابل برای مهار دیوار حایل از مقاطع فولادی اسـتفاده می‌شود. در روش تاپ – دان دیوارهای پیرامونی در تراز‌های مختلف با اسـتفاده از دال‌های دایمی نگهداشته می‌شود. یک دال بتنی دایمی شاید بهترین شـکل از مهارهای موقت باشـد (رولی و یـاروود، ۱۹۸۸)، زیـرا می‌توانـد تکمیل کننده شـرایط دایمی باشـد و بسیار سـخت‌تر از فولاد اسـت. به‌دلیل اینکه دال سـقف یکبار در محل قرار می‌گیـرد، دیگر نیازی به جابجایی مهارهای سـنگین‌وزن فولادی با بارهای قفل‌شـدگی بسیار زیاد نیست. همچنین مهارهـای موقت که در روش سـاخت از پایین به بالا بـه‌کار می‌رود، باعث می‌شـود که جایجایـی مصالح و

(الف)

(ب)

انجام حفاری طبقه زیرزمین. خاک در زیر تراز دال طبقه همکف حفاری می‌شود در حالی که یک بازشدگی برای دسترسی به طبقات پایین‌تر برای انتقال خاک برداشته شده به بالا ایجاد می‌شود. کامیون‌ها برای حمل خاک در بالا و تراز زمین کنار بالابر خاک قرار می‌گیرند تا پر شوند و خاک را حمل کنند. (الف) انتقال خاک برداشته شده از داخل بازشدگی توسط جرثقیل، (ب) دال سقف سه طبقه زیرزمین، خاک زیر پایین‌ترین دال در حال حفاری است و در مرکز جمع‌آوری می‌شود تا توسط بالابر به سطح منتقل شود.

انجام خاکبرداری زیر دال اجرا شده در حالی که ستون‌ها و سقف طبقات فوقانی اجرا شده است.

تجهیزات با مشکل مواجه شود.
– بـا اسـتفاده از روش تـاپ – دان میـزان دخالت و مزاحمـت در ترافیک خیابان‌های پیرامونی به حداقل می‌رسد. به ویـژه در کارهای مربـوط به حمل و نقل عمومی اسـتفاده از این روش سبب می‌شود که راه‌های حمل و نقل به زودی احیا شود.
– بـا سـاخت زیرزمین و احـداث دال سقف در تراز همکف در شروع کار، تاثیر شـرایط بد آب و هوایی بـر روی خاک زیرین از بین می‌رود.
– با استفاده از روش ساخت تاپ – دان دیگر نیازی به اخذ مجوز یا جلب رضایت از همسـایه‌ها به‌دلیل رفع ضرورت نفوذ به حریم محاذی املاک مجاور (ماده ۳۸ قانون مدنی) در مقایسه با روش نیلینگ و انکراژ نیسـت. در روش‌های نیلینگ و انکراژ اسـتفاده از زمین املاک مجاور و نفوذ به زیر سـاختمان‌های همسایه که طبق قانون مورد تملک همسـایه مجاور است، ضروری و غیرقابل اجتناب است.

مشکلات روش ساخت تاپ – دان

از جمله مشـکلاتی که در روش اجرای تـاپ – دان وجود دارد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
– عملیات خاکبرداری و حفاری زیر دال سقف مشکل است. این موضوع می‌تواند بـرای کارگـران به‌دلیل شـرایط کاری سخت ایجاد فشار کند.
– اگر در کار با هرگونه شرایط پیش‌بینی نشـده همچون پی مدفـون یا لایه‌های خاک سخت مواجه شود، کار حفاری به مشکل برخورد خواهد کرد.
– انجـام عملیـات خاکـی کندتـر از روش‌های متداول است.
– بایـد بین مدیـر پـروژه و کارگران هماهنگی بسـیار خوبی وجود داشـته باشـد. مصالح سـاختمانی، انبار کردن، حمل و نقل، انتقال و تمامی فعالیت‌های دیگر باید برنامه‌ریزی شده باشد.
پـس از تکمیل بتن‌ریـزی دال طبقات نمی‌توان بلافاصله حفـاری را آغاز کرد، زیرا نمی‌تـوان خاک زیـر دال را پیش از آنکه بتن به مقاومت موردنیاز برسـد خارج کرد.
رولی و یاروود (۱۹۸۸) پیشـنهاد کردند که تنها از پی‌های متکی بر شـمع برای روش تاپ – دان می‌توان اسـتفاده کرد. از این رو تصمیم برای اسـتفاده از روش تاپ – دان انتخاب نوع پی و ستون‌های زیرزمین را محدود می‌کند.
می‌توان با ایجاد بازشـدگی‌های بزرگتر در دال سـقف‌ها بر برخی از مشکلات مذکـور غلبه کـرد. به‌منظـور ایجاد مسـیرهای مجزا برای انتقـال مصالح به داخل و خـارج می‌توان دو یا تعداد بیشـتری بازشـدگی در دال سـقف طراحی کرد.
نمونه‌ای از روش سـاخت تـاپ – دان تصاویـری از مرکز تجاری آی اف سـی (سـاختمان مرکز تجـارت بین‌المللی) هنگ کنـگ که یک مجموعـه هتل و سـاختمان تجاری اسـت و در مجاورت بندرگاهـی در هنگ کنگ قـرار گرفته

اجرای فرآیند تاپ – دان در طبقات زیرزمین. شمع‌های فولادی که پیش از اجرای خاکبرداری نصب شده‌اند در این تصویر دیده می‌شوند که دال سقف‌ها را نگاه می‌دارد

جابجایی پای دیواره گودبرداری شده به روش تاپ – دان پس از رسیدن به کف گود ناشی از عدم اجرای سقف‌ها و تیرهای قاب و شمع پای ستون، تهران- منطقه ۱۱شهرداری.

است. ساخت این برج که سومین برج بلند دنیاست در سال ۱۹۹۷ آغاز شد و در سال ۲۰۰۳ پایان یافت.

ملاحظات طراحی در روش ساخت تاپ – دان

در روش اجرای تاپ – دان باید فرآیند اجرا را در ملاحظات طراحی وارد کرد. در ساخت یک سازه به‌روش تاپ – دان لازم است تا علاوه بر کنترل‌های متداول سازه‌ای، همزمان ملاحظات ژئوتکنیکی در فرآیند طراحی و اجرای سازه وارد شود. به این منظور باید سازه همزمان توسط مهندس سازه و مهندس ژئوتکنیک کنترل و طراحی شود. نادیده ماندن برخی عوامل مختلف در فرآیند کنترل و طراحی که بعدها در شرایط ساخت به سازه تحمیل خواهد شد، گاهی باعث عواقب جبران‌ناپذیری خواهد شد. همانگونه که در طراحی گودبرداری‌های متداول چنین امری محتمل است و خطا در برداشت داده‌های ژئوتکنیکی و کنترل و طراحی منجر به ریزش‌های دیواره‌ها و تخریب همجواری‌ها خواهد شد، در روش ساخت تاپ – دان هم این اتفاق ممکن است رخ دهد. با استفاده از کنترل دقیق، مدل سازی صحیح و در نظر گرفتن همزمان ملاحظات ژئوتکنیکی و سازه‌ای می‌توان از بروز خسارت جلوگیری کرد.

به‌عنوان مثال ریزش یک پروژه حفاری عمیق در مجاورت بزرگراه نیکول در سنگاپور در ۲۰ آوریل ۲۰۰۴ می‌تواند نمونه‌ای از اشتباهات مهندسی در محاسبات و کنترل سازه زیرزمینی باشد. ریزش این پروژه منجر به کشته شدن ۴ نفر و یک تاخیر در بخشی از پروژه متروی سیرکل لاین شد. گسیختگی دلایل اصلی مختلفی از جمله شرایط پیش‌بینی نشده خاک، گسیخته شدن ناگهانی سیستم انکرینگ یا مهاری (به‌عنوان مثال کمانش یا عدم اتصال کافی به دیوار) و نقص در مراحل ساخت طراحی‌شده پیش از حفاری داشت. در اغلب موارد عملکرد پیش از گسیختگی مهم است و می‌توان تلاش‌های قابل توجهی برای درک مشخصه‌های تغییرشکل‌های خاک و سازه کرد. برای کاهش تغییرشکل‌های ناشی از گودبرداری‌ها لازم است تا دیوار حایل و سیستم نگهبان مناسبی طراحی و روش‌های اجرای مناسب به‌کار برده شود. هرچه ابعاد حفاری بزرگتر و عمیق‌تر می‌شود و در خاک مساله‌دار احداث می‌شود، چالش‌های بیشتری برای محققان، طراحان و سازندگان حفاری‌های عمیق ایجاد خواهد شد.

عمق گودبرداری پروژه بزرگراه نیکول، ۳۳/۳ متر، عرض آن حدود ۲۰ متر و روش حفاری خاکبرداری- خاکریزی بود. دیوار حایل پیرامونی پروژه دیوار دیافراگمی با ضخامت ۰/۸ متر بود و این دیوار در ده تراز توسط مهارهای پیش‌بارگذاری شده متقابل متعدد همراه با سرشمع دو عدد شمع تزریق فشاری پیوسته نگاهداشته شده بود. یکی از دلایل بروز این حادثه رفتار زهکشی نشده رس ساختگاه موردنظر بود زیرا طی بازه زمانی ساخت فرصت زهکشی برای آب حفره‌ای وجود ندارد و این موضوع در طراحی اولیه لحاظ نشده بود و این رفتار زهکشی نشده منجر به تغییرشکل‌های بزرگتر دیواره و در نتیجه

ایجاد لنگر خمشی و نیروهای بزرگتر در مهارها شـد که در پارامترهای طراحی اصلی انتظار آن نرفته بود. گسـیختگی اتصـالات مهارهـا در تراز نهم سـبب آغـاز فروریزش کامل سیسـتم نگهبان حفاری شد.

به‌عنوان نمونه‌ای دیگر می‌توان به پروژه گودبرداری اجرا شده با روش تاپ – دان در شهر تهران که تصاویر آن در شکل ۱۸ ارایه شده است، اشاره کرد. در این پروژه که دارای ۹ طبقه پارکینگ در زیرزمین اسـت، متاسـفانه به‌دلیل عـدم رعایت حداقـل نکات طراحـی و اجرایی روش تاپ – دان، این پروژه دچار گسـیختگی شـد و جابجایـی در حـدود ۶ متر در پاشـنه دیوار بتنی و ستون‌های فلزی در پایین‌ترین تراز اجرایی گودبرداری ایجاد شد. به‌عبارت دیگر جابجایی افقی معادل ۶ متر به‌ازای ۲۴ متر ارتفاع گودبرداری، در پای دیوار رخ داده است. بررسی دلایل وقوع این حادثه بیانگر عدم رعایت نکات اصلی طراحی و مراحل اجرای منطبق با آن اسـت. از جمله موارد اصلی بروز این حادثـه می‌توان به عدم اجرای شـالوده شمعی زیر ستون‌های سازه، عدم اتصال و تکمیل سـقف‌های طبقات در مراحل گودبرداری، عدم اجرای زهکش مناسب و خارج کردن نشـت فاضلاب همسایه، اجرای نادرسـت اتصالات پنل‌های بتنی دیوار حایل به سـتون‌ها و سـقف و در نتیجه توزیع نامناسب بار خاک به سازه فلزی، اشاره کرد.

جمع‌بندی

در ایـن مقاله به معرفی روش سـاخت تـاپ – دان پرداختـه شـد. روش تـاپ – دان یک روش ابتـکاری برای اجرای طبقات زیرزمین در سـازه است. در روش تاپ – دان فرآیند اجرای سازه و گودبـرداری از تراز صفـر زمین آغاز می‌شـود و همزمان با پیشـروی اجرای سـازه به سـمت تراز زیر پی، عملیات خاکبـرداری، تثبیـت جبهه‌های خاکی در دیواره‌های گودبرداری شده و اجرای دیوارهای حایل سـازه صورت می‌پذیرد. در این روش همزمان با پیشروی ساخت سازه به سـمت پایین می‌توان روسازه را نیز اجرا کرد.

اسـتفاده از روش تـاپ – دان با حذف سازه نگهبان موقت منجر به صرفه‌جویی در زمـان و هزینه‌های پروژه می‌شـود. همچنین با استفاده از این روش به‌دلیل ساخت تدریجی سازه و جایگزینی آن با خاک برداشته شده، میزان نشست سازه و تغییرشکل همجواری‌ها کاهش می‌یابد. همچنین با اسـتفاده از روش ساخت از بالا به پایین امکان بهره‌برداری سـریع‌تر از سـازه وجود دارد و می‌توان در حالی که طبقات زیرین در حال ساخت است، از طبقات روسـازه بهره‌برداری کرد. در این روش به‌دلیل وجود دال سـقف‌های زیرزمیـن آلودگـی صوتی بـه حداقل می‌رسد و همچنین شرایط جوی تاثیری برای اجرای پـروژه در حین گودبرداری نمی‌گذارد. با توجه به اینکه روش ساخت تـاپ – دان دارای مزایایـی اسـت اما به‌دلیل شـرایط خاص اجرا سازه، انجام عملیات خاکی یکی از چالش برانگیزترین بخش‌های اجرا به این روش است.

در کنترل و طراحی یک پروژه که روش اجرای آن تاپ – دان است لازم است تا فرآیند اجرا کاملاً در نظر گرفته شـده و گام‌های اجرایی به‌دقت بررسی شود. در سـاخت یک سـازه به روش تاپ – دان باید علاوه بر کنترل‌های متداول سازه‌ای همزمان ملاحظات ژئوتکنیکی در فرآیند طراحی و اجرای سـازه وارد شود. به این منظور باید سازه هم توسط یک مهندس سازه و هم توسط یک مهندس ژئوتکنیک کنترل و طراحی شـود. نادیـده ماندن برخی عوامـل مختلف در فرآیند کنترل و طراحی که بعدها در شـرایط ساخت به سازه تحمیل خواهد شد، عواقبی گاه جبران‌ناپذیـر را در پی خواهد داشـت. همانگونه که در طراحی گودبرداری‌های متداول چنین امری محتمل است و خطا در برداشت داده‌های ژئوتکنیکی و کنترل و طراحی منجر به ریزش‌های دیواره‌ها و تخریب همجواری‌ها خواهد شد در روش سـاخت تاپ – دان نیز این اتفاق ممکن است رخ دهد. با استفاده از کنترل دقیق، مدل سـازی صحیح و در نظـر گرفتن همزمان ملاحظات ژئوتکنیکی و سازه‌ای می‌توان از بروز خسارت جلوگیری کرد.

منابع

BS 8002: BRITISH STANDARD. (1994) "Code of practice for Earth retaining structures".

Katzenbach, R., Moormann, C. and Quick, H. (1998). "A new concept for the excavation of deep building pits in inner urban areas combining top/down method and piled raft foundation". Proceeding of 7th international conference and exhibitions on piling and deep foundation, Austria, 5.17.1-5.17.14, A. A.

Long, M. (2001). "Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127(3): pp. 203-224.

Marchand, S. P. (1993). "A deep basement in Aldersgate Street, London. Part 2: Construction". Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering, 97, May., 67-76.

Marchand, S. P. (1993a). "A deep basement in Aldersgate Street, London. Part1: Contractor's design and planning". Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering, 93, Feb., 19-26.

Rowley, F. N. and Yarwood, N. G. A. (1988). "Method on design". Proceedings of the conference of Economic construction techniques: temporary works and their interaction with permanent works, organized by Institution of Civil Engineers and held in London on 16 Nov. 1998.