«مجله علمی تخصصی علوم و فنون سازندگی»
سال اول، شماره ۱، پاییز ۱۳۹۷؛ صفحه ۵۳ الی ۶۵

روش بالا به پایین Top Down Method در اجرای سازه‌های زیرزمینی

مطالعه موردی: شفت میان تونلی M7N7 خط ۷ مترو تهران

هادی عسگرزاده*

کارشناس ارشد گرایش زلزله، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

(دریافت: ۹۷/۰۳/۱۵، پذیرش: ۹۷/۰۵/۲۰)

چکیده

از نقطه نظر پایدارسازی جداره‌ها و مهار گود، روش‌های مختلفی برای اجرای یک سازه زیرزمینی وجود دارد. به طور کلی اجرای یک سازه زیرزمینی می‌تواند با روش‌های ساخت پایین به بالا (Bottom Up Method (BUM)) یا بالا به پایین (Top Down Method (TDM) انجام شود. در روش پایین به بالا (BUM)، با اجرای سازه نگهبان، امکان دسترسی به تراز اجرای فونداسیون میسر شده و با اجرای فونداسیون، سازه اصلی از پایین به سمت بالا تا سطح زمین و بالاتر از آن اجرا می‌شود. این روش، به روش سنتی موسوم بوده و در اغلب پروژه‌های شهری و غیرشهری در کشور ما تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است. روش نوینی که امروزه در کشورهای پیشرفته و به‌منظور حذف هزینه‌های اجرای سازه نگهبان موقت (که عموماً تنها در حین اجرا استفاده داشته و پس از اجرای کامل پروژه بخشی از آن مدفون، برچیده و معیوب و بلااستفاده خواهد شد) مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش ساخت بالا به پایین (TDM) نامیده شده است. در این روش، عملیات با اجرای سازه اصلی شروع می‌شود و این سازه به نحوی طراحی و اجرا می‌شود، که هم به عنوان سازه نگهبان و هم سازه اصلی شرایط لازم کوتاه مدت و بلند مدت را فراهم خواهد کرد. استفاده از سیستم TDM نیازمند طراحی و اجرای پیچیده‌تر می‌باشد، ولی استفاده از این روش به‌صورت محسوسی از هزینه و زمان اجرای پروژه کاسته و می‌تواند ایمنی را نیز افزایش دهد.

کلیدواژه‌ها: سازه‌های زیرزمینی، سازه نگهبان، روش پایین به بالا، روش بالا به پایین

۱. مقدمه

این روش، یکی از روش‌های نوین پایدارسازی گودهای عمیق در جهان است. روش اجرای بالا به پایین یا معکوس، در آیین‌نامه BS8002/1994 انگلستان برای سازه‌های نگهبان ارائه شده است؛ و از ۲۰۰۱ میلادی تاکنون در کشورهای مختلفی چون انگلستان، آمریکا، فنلاند، چین، روسیه، ویتنام، سنگاپور و ایران مورد استفاده قرار گرفته است. این روش، به عنوان انقلابی در ساخت سازه‌های بزرگ زیرزمینی، برای اولین بار در دهه ۷۰ میلادی، در ساخت ایستگاه‌های مترو شهرهای پاریس و میلان مورد استفاده قرار گرفت. در سال‌های اخیر و در پروژه‌های بزرگ، استفاده از این روش جایگزین روش‌های سنتی در کشورهای صنعتی شده است. ایده اصلی این روش، طراحی سازه اصلی به عنوان سازه نگهبان است؛ به این معنی که عملاً هزینه و زمان اجرای سازه نگهبان جداگانه حذف شده و از طرفی فضای مفید ساخت و ساز نیز حداکثر می‌شود. به‌دلیل امکان اجرای هم‌زمان رو به بالا و پایین، سرعت پیشرفت پروژه نسبت به روش‌های سنتی بسیار بالاتر خواهد بود.

از مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- افزایش سرعت ساخت و اتمام عملیات به‌دلیل پیشرفت پروژه در دو جهت بالا و پایین؛

۲- حذف هزینه‌های سازه نگهبان و مهار گود با روش‌های سنتی مانند نیلینگ و انکراژ؛

۳- کاهش زمان ساخت منجر به کاهش هزینه‌های ساخت و ساز خواهد شد؛

۴- کاهش سطح آلودگی در محیط پروژه؛

۵- عدم نیاز به اخذ رضایت همسایگان همجوار و حل مسائل

* رایانامه نویسنده پاسخگو: hadi.asgarzadeh@gmail.com

حقوقی؛

۶- کاهش ریسک آسیب به ساختمان‌ها و سازه‌های مجاور به‌دلیل خود مهار بودن روش ساخت بالا به پایین؛

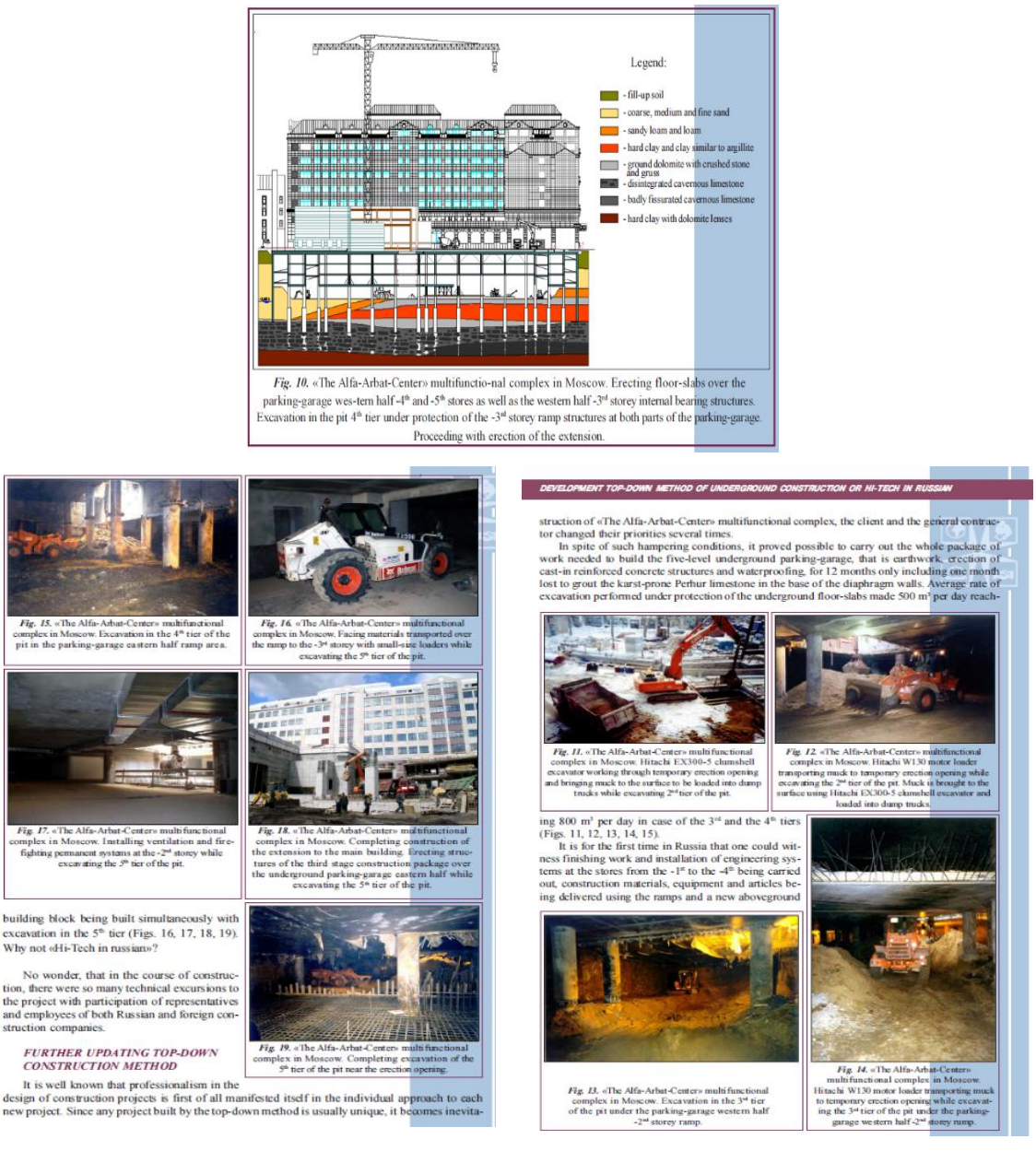
۷- کارایی بسیار بالا برای سازه‌های با تعداد طبقات زیرزمین زیاد؛

۸- امکان انجام عملیات ساخت در بدترین شرایط جوی به‌دلیل مدفون بودن سازه و همچنین عمل‌آوری مناسب‌تر بتن؛

۹- اجرای همزمان عایق‌بندی پشت دیوارهای حائل که موجب آب‌بند شدن کل سازه مدفون تا زیر فونداسیون می‌شود؛

۱۰- برخلاف روش‌های سنتی مهار خاک که موقت بوده و برای زلزله محتمل دوره ساخت طراحی نمی‌شوند و حتی در صورت توقف پروژه دچار ضعف خواهند بود، روش TDM قابلیت بهره‌برداری بی‌وقفه را حتی در صورت بروز زمین لرزه و توقف پروژه فراهم می‌آورد.

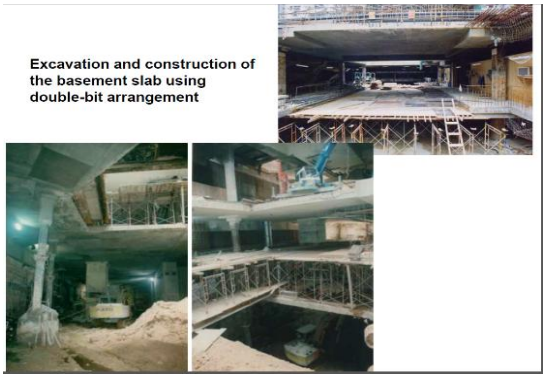
جزئیات اجرایی در روش اجرای TDM، می‌بایست با توجه به ابعاد، عمق گود، پلان ستون‌گذاری، نوع سقف‌ها و ... پروژه تعیین شود، که این موضوع نشان می‌دهد طراحی و اجرای این روش نیازمند دیدگاه اجرایی و انعکاس آن در شرایط طراحی می‌باشد. همچنین با توجه به ساخت مرحله‌ای اسکلت ساختمان، می‌بایست علاوه بر کنترل سازه ساختمان در شرایط نهایی و بهره‌برداری، در زمان گودبرداری و ساخت مرحله‌ای نیز کنترل‌های لازم (مانند تلاش‌های مرحله‌ای ایجاد شده در دیوار حائل و سازه) انجام گردد (شکل‌های ۳-۱).



شکل (۱). ساختمان Aifa-Albat در روسیه روش TDM (بالا به پایین)

Steel stanchion (column) placed on top of the bore pile as support for top-down basement as well as permanent column for future structure

شکل (۲). اجرای تعدادی از ستون‌های به‌صورت شمع



شکل (۳). اجرای سقف‌ها و فونداسیون

۲. معرفی خط ۷ مترو تهران و شفت M7-N7

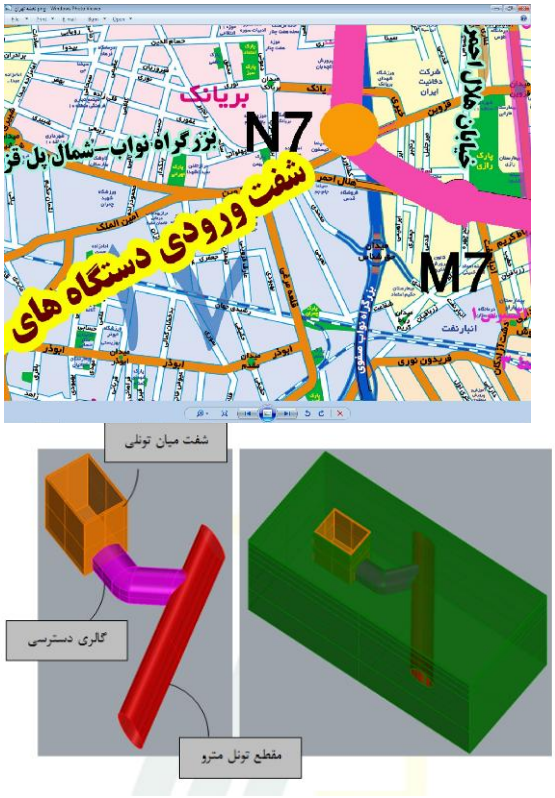
خط ۷ متروی تهران دارای ۲۷ کیلومتر طول و ۲۲ ایستگاه می‌باشد. این خط مترو از شهرک امیرالمؤمنین(ع) واقع در جنوب شرقی تهران در امتداد شرقی– غربی شروع و پس از عبور از تقاطع محلاتی– ۱۷ شهریور و میدان محمدیه، در تقاطع نواب– قزوین تغییر جهت داده و در امتداد جنوبی– شمالی یعنی بزرگراه نواب صفوی ادامه می‌یابد. این خط مترو بعد از حرکت به موازات تونل توحید و عبور از کنار برج میلاد در منطقه سعادت‌آباد واقع در شمال‌غرب تهران پایان می‌یابد. پلان این خط مترو در شکل (۴)، به همراه مشخصات اصلی آن و جانمایی شفت M7-N7 ارائه شده است.

شکل (۴): مشخصات مترو خط ۷ تهران

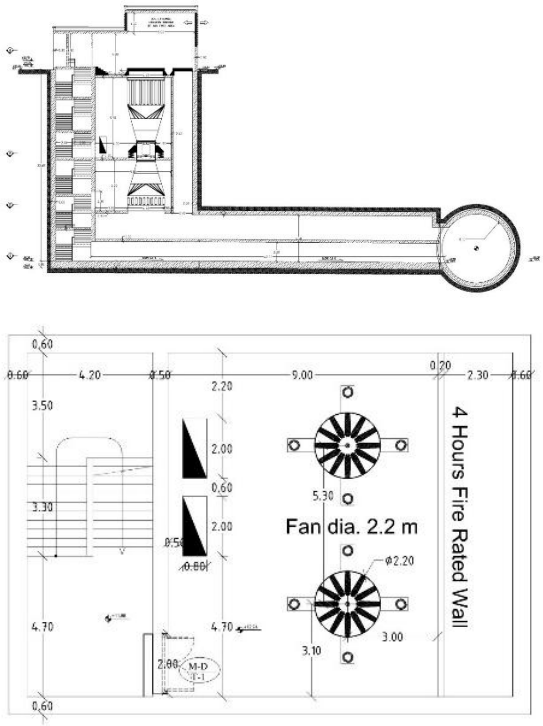
۳. پیکربندی و مشخصات سیستم سازه‌ای

ابعاد داخلی نهایی شفت فوق ۱۱/۵ × ۱۶/۵ متر و عمق آن از سطح زمین تا تراز زیر فونداسیون در حدود ۲۳/۶ متر می‌باشد.

در تصاویر زیر پلان جانمایی؛ نقشه‌های معماری و هندسه سه‌بعدی مجموعه نشان داده شده است.

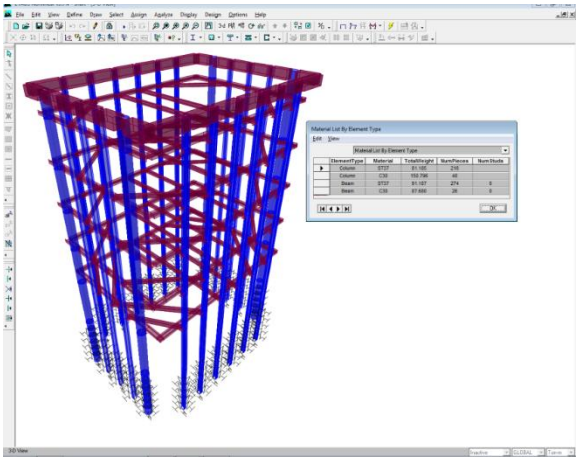


شکل (۵). هندسه سه بعدی جانمایی شفت هواده در تقاطع خیابان هلال احمر و بزرگراه نواب صفوی



شکل (۶). پلان و برش معماری شفت میان تونلی M7N7

همان‌طور که بیان شد، با استفاده از روش TDM (بالا به پایین) امکان حذف سازه نگهبان فراهم خواهد آمد. طرح سازه موقت نگهبان برای این شفت از نوع شمع و استرات بوده که در نرم‌افزار Etabs مدل‌سازی شده است. در شکل (۷) هندسه سه‌بعدی آن مشاهده می‌شود.



شکل (۷). مدل سه‌بعدی سازه نگهبان موقت

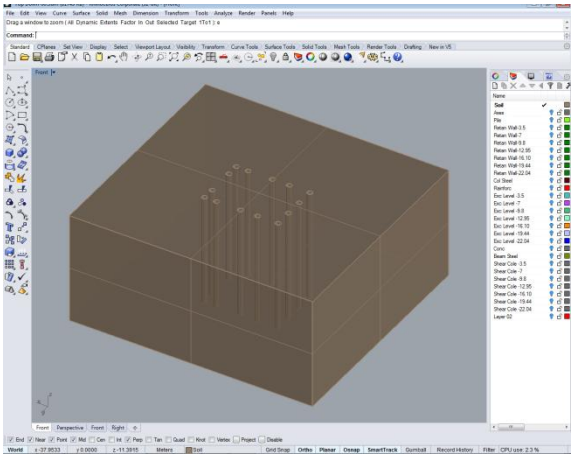
در جدول (۱) هزینه اجرای سازه نگهبان موقت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار فولاد مصرفی برای شمع‌های فلزی (ستون‌ها) حدود ۸۲ تن، استرات‌ها ۹۲ تن و با احتساب ۳۰ درصد اتصالات، سهم اتصالات نیز حدود ۵۲ تن خواهد بود. علاوه بر این، با توجه به ابعاد شفت (پلان ۱۹×۱۴ متر و ارتفاع ۲۳ متر) حدود ۱۵۰۰ مترمربع سطح شات کریت به ضخامت ۱۵ سانتیمتر با یک شبکه آرماتورهای افقی و قائم با قطر ۸ میلی‌متر به فواصل ۱۵ سانتیمتری خواهد بود.

جدول (۱). برآورد اقتصادی هزینه اجرای سازه نگهبان فلزی موقت شفت M7N7

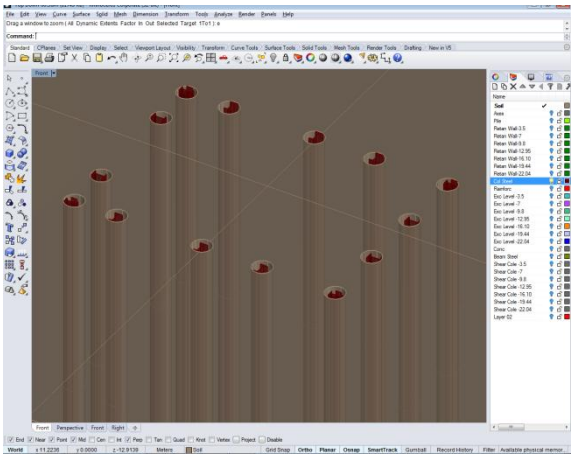
موضوع	مصالح	واحد	مقدار	هزینه واحد (ریال)	هزینه کل (ریال)
ستون فلزی	فولادی	تن	۸۲	۳۵،۰۰۰،۰۰۰	۲،۸۷۰،۰۰۰،۰۰۰
استرات فلزی	فولادی	تن	۹۲	۳۵،۰۰۰،۰۰۰	۳،۲۲۰،۰۰۰،۰۰۰
اتصالات	فولادی	تن	۵۲	۳۵،۰۰۰،۰۰۰	۱،۸۲۷،۰۰۰،۰۰۰
شمع بتنی	بتن مسلح	مترمکعب	۹۶	۱،۰۰۰،۰۰۰	۹۵،۶۰۰،۰۰۰
شات کریت	بتن مسلح	مترمربع	۱۵۱۸	۹۰۰،۰۰۰	۱،۳۶۶،۲۰۰،۰۰۰
		جمع هزینه (ریال)			۹،۳۷۸،۸۰۰،۰۰۰

شایان ذکر است که هزینه سازه فلزی در روش TDM (بالا به پایین) نیز تقریباً معادل با مقدار فوق خواهد بود، اما بایستی توجه داشت که در این روش سازه اجرا شده نقش سازه اصلی را داشته و نیازی به اجرای سازه اصلی در روش سنتی نخواهد بود. همچنین روش TDM (بالا به پایین) را می‌توان با پذیرفتن محدودیت‌های اجرایی، از نوع بتن مسلح اجرا نمود و لذا به دنبال آن هزینه را کاهش داد. این مسئله می‌تواند در گزارشات آتی مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.

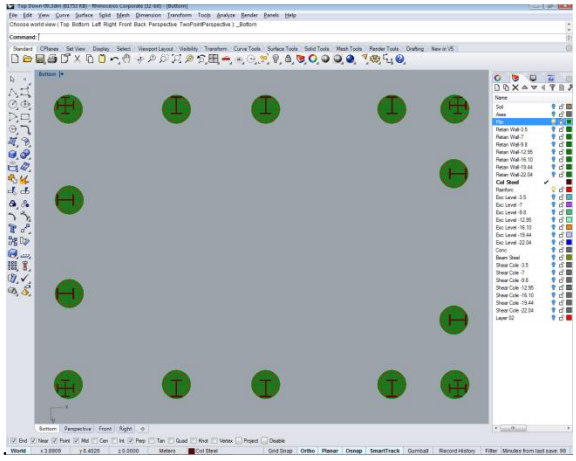
در شکل‌های (۲۱-۸) زیر نحوه اجرا و همچنین هندسه سه بعدی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار نشان داده شده است:

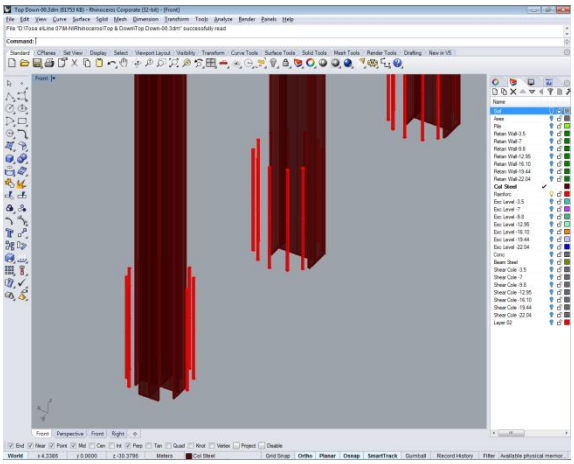


شکل (۸). مرحله اول، حفاری محل ستون‌ها تا ارتفاع حدود ۲ متر پایین‌تر از تراز زیر پی

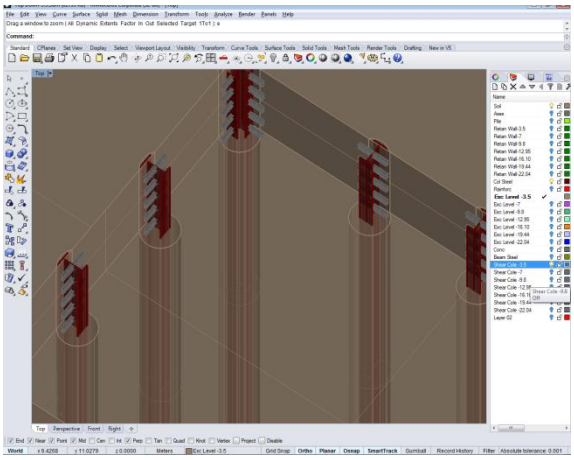


شکل (۹). مرحله دوم، جاگذاری ستون‌های فلزی داخل شمع‌های حفاری‌شده

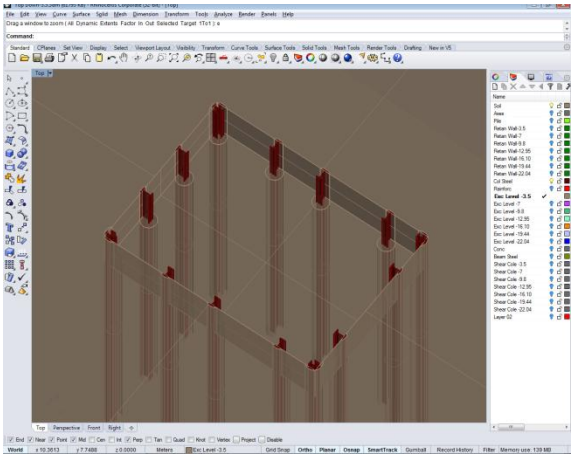




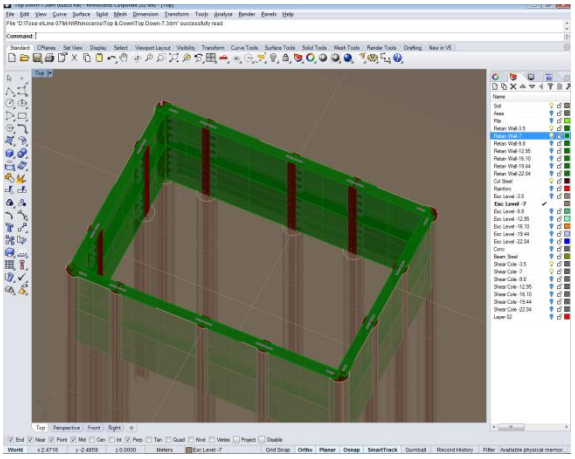
شکل (۱۰). مرحله سوم، اجرای پی بتن مسلح موقت ستون‌های فلزی در تراز ۲ متر پایین‌تر از تراز زیر پی



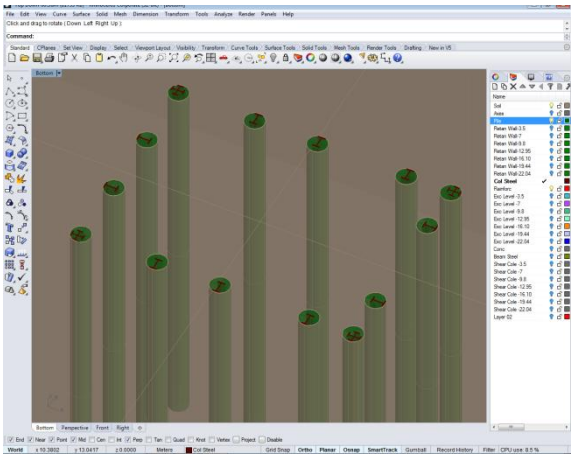
شکل (۱۱). مرحله چهارم، پر کردن محل شمع‌ها



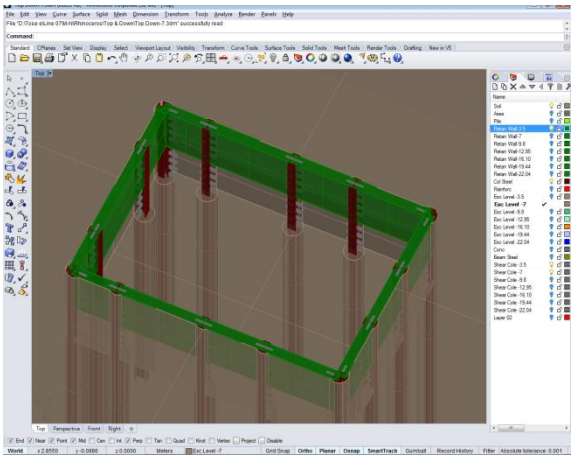
شکل (۱۲). مرحله پنجم، اجرای گودبرداری تا تراز و پیرامون



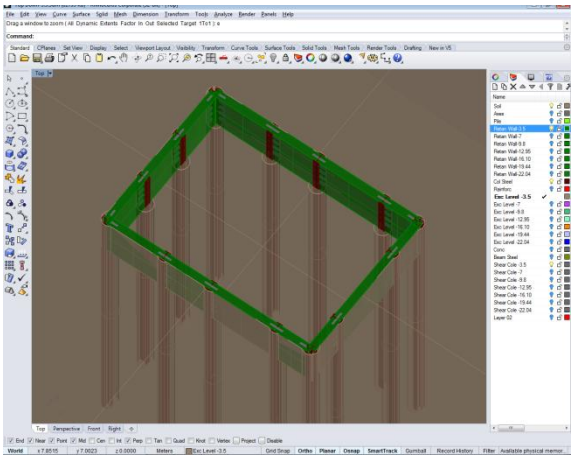
شکل (۱۵). مرحله هشتم، حفاری تا تراز ۷/۳۰- اجرای برش گیرها



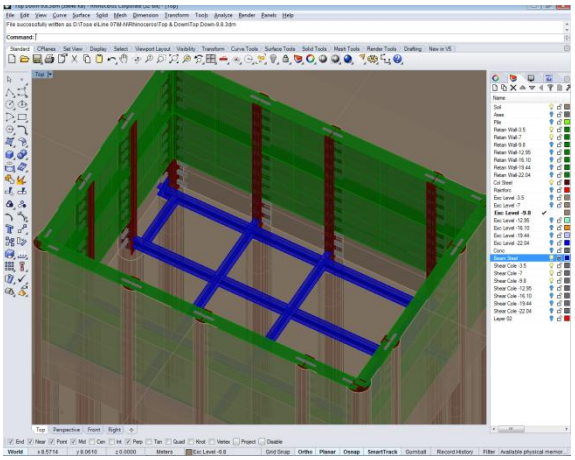
شکل (۱۳). مرحله ششم، اجرای برش گیرهای ستون‌ها کوپلرهای انتهایی تا تراز گودبرداری



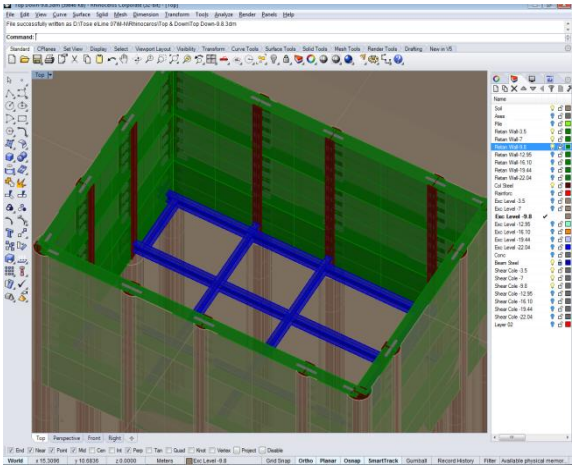
شکل (۱۶). مرحله نهم، اجرای دیوار حائل توسط کوپلرهای انتهایی تا تراز گودبرداری



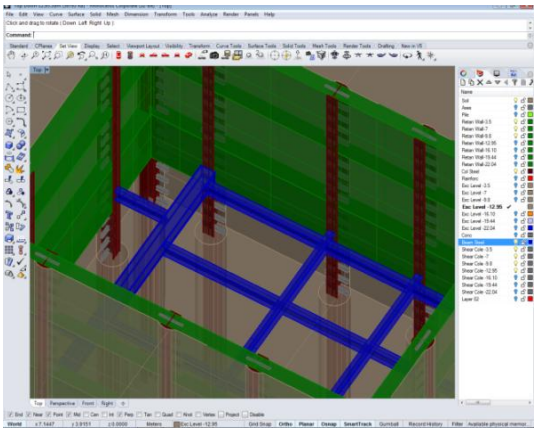
شکل (۱۴). مرحله هفتم، اجرای دیوار حائل تا تراز گودبرداری



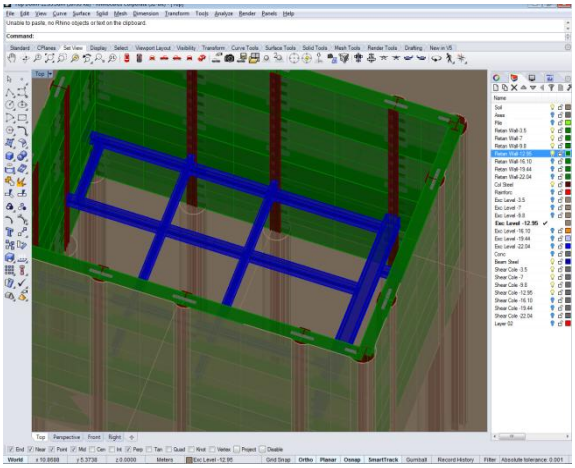
شکل (۱۷). مرحله دهم، حفاری تا تراز ۹/۸۰- گیرها، و تیرهای فلزی سقف



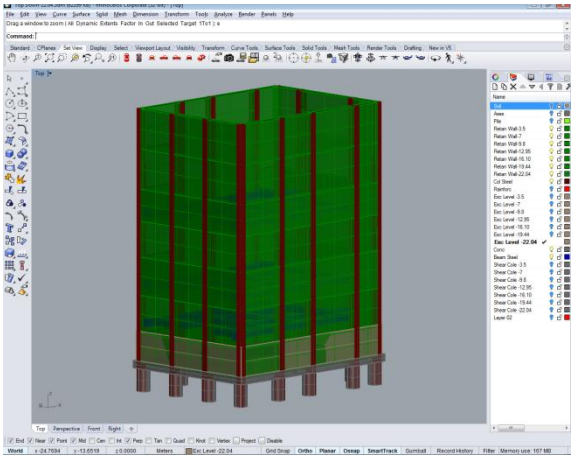
شکل (۱۸). مرحله یازدهم، اجرای دیوار حائل توسط اجرای برش کوپلرهای انتهایی تا تراز گودبرداری

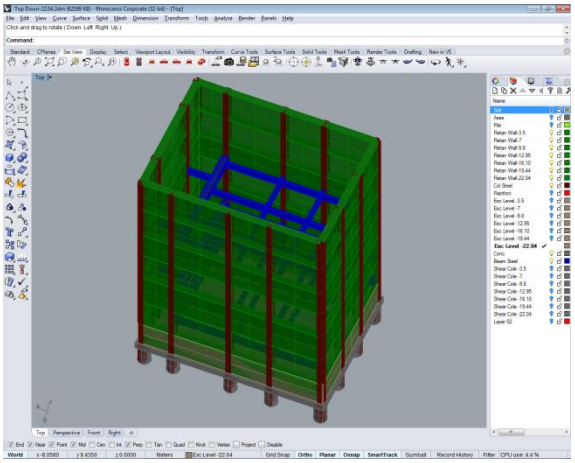


شکل (۱۹). مرحله دوازدهم، حفاری تا تراز ۱۲/۹۵- اجرای برش گیرها



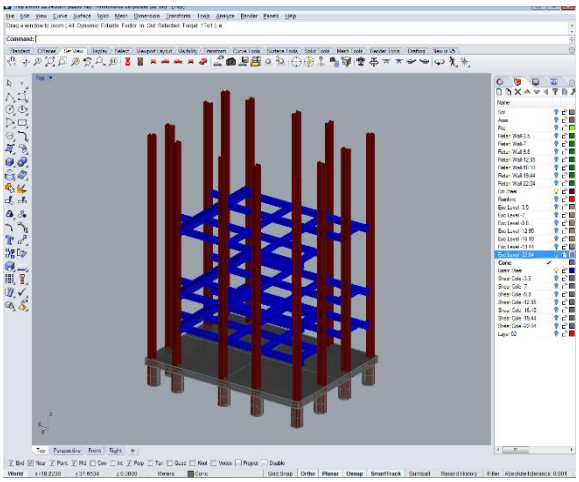
شکل (۲۰). مرحله سیزدهم: اجرای دیوار حائل توسط کوپلرهای انتهایی تا تراز گودبرداری





شکل (۲۱). نمای سه‌بعدی سازه شفت

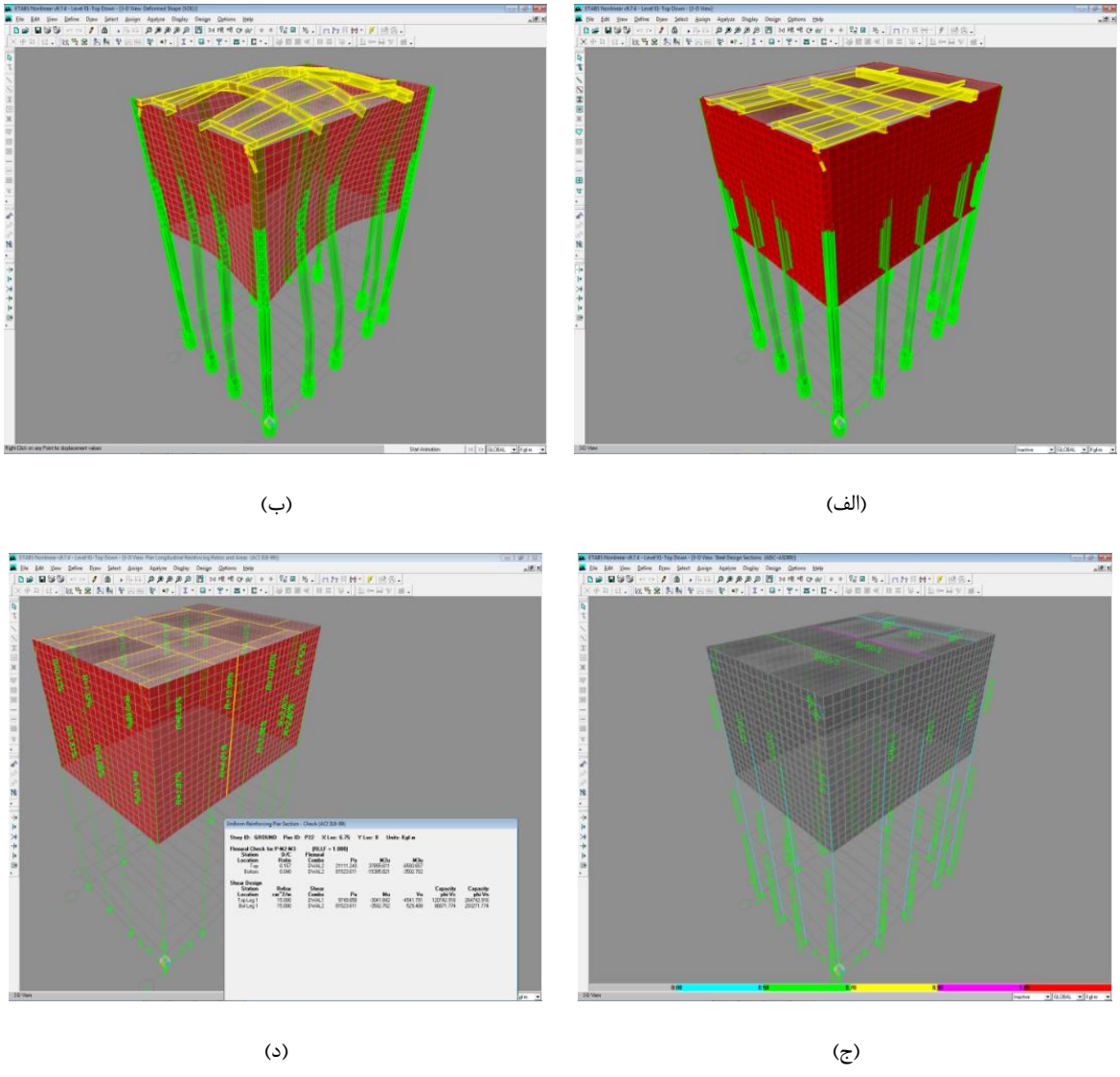
همان‌طوری که در تصاویر فوق نمایان است، گودبرداری و اجرای سازه از قسمت فوقانی در گام‌های مشخص تا رسیدن به تراز پی انجام گرفته و در پایان، فونداسیون شفت اجرا خواهد شد.



شکل (۲۲). نمای سه‌بعدی سازه شفت (بدون نمایش دیوار حائل)

کنترل کفایت مقاطع ستون، تیر و دیوار حائل در مراحل مختلف روش TDM (بالا به پایین) در ساخت شفت میان تونلی M7N7

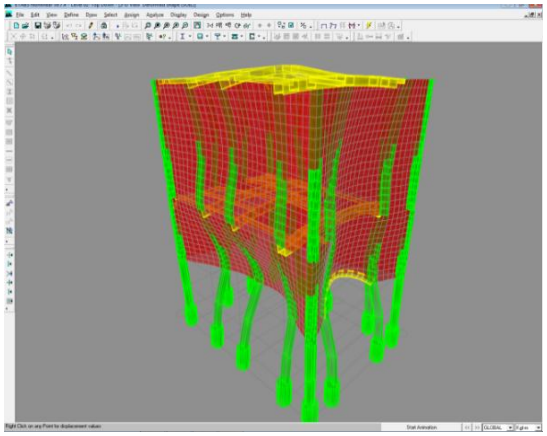
علاوه بر تهیه یک مدل با بارگذاری‌های کامل ثقلی و جانبی (زلزله و فشار جانبی خاک) و طراحی اعضای سازه‌ای با توجه به ساخت مرحله ای در روش فوق، توسط مدل‌سازی مرحله‌ای در نرم‌افزار Etabs2000 با توجه به ترازهای مختلف گودبرداری و استفاده از مدل فنر برای احتساب اندرکنش خاک و شمع (سختی جانبی شمع) کفایت مقاطع ستون، تیر و دیوار حائل در مراحل مختلف روش TDM (بالا به پایین) در ساخت شفت میان تونلی M7N7 صورت گرفته است. در شکل‌های (۲۶-۲۳) هندسه مدل‌ها و نیز نسبت تنش‌های موجود نشان داده شده است:



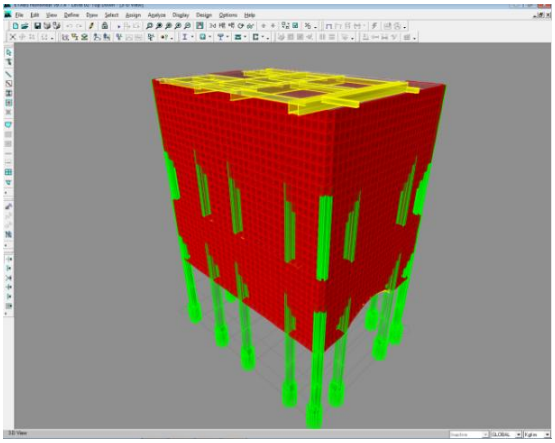
(الف) (ب)

(ج) (د)

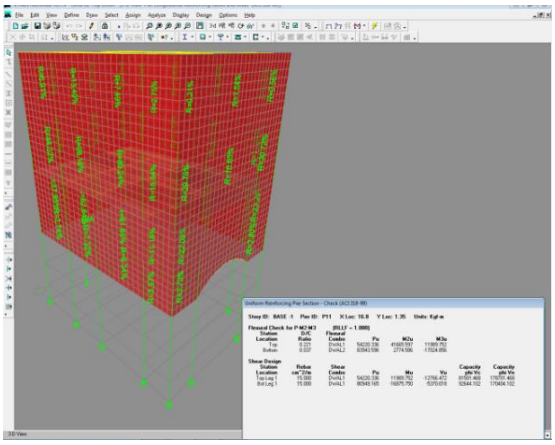
شکل (۲۳). نمای سه‌بعدی مدل سازه شفت- گودبرداری تا تراز ۹/۸۰-



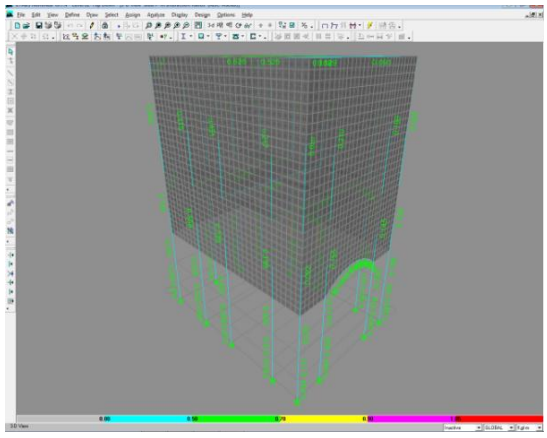
(الف)



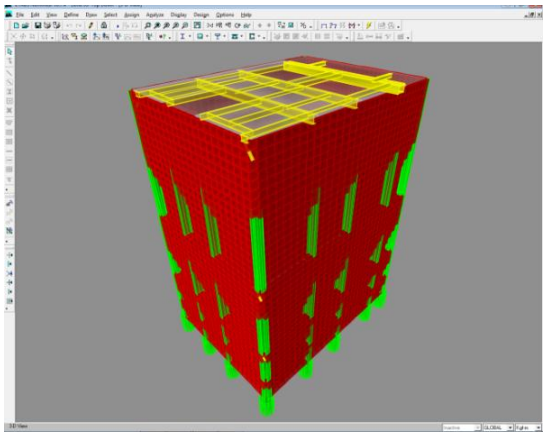
(ب)



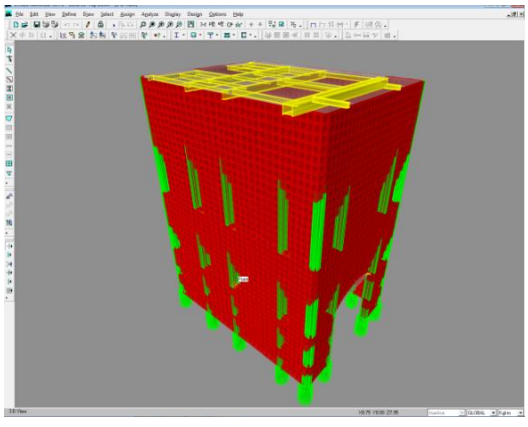
(ج)



(د)

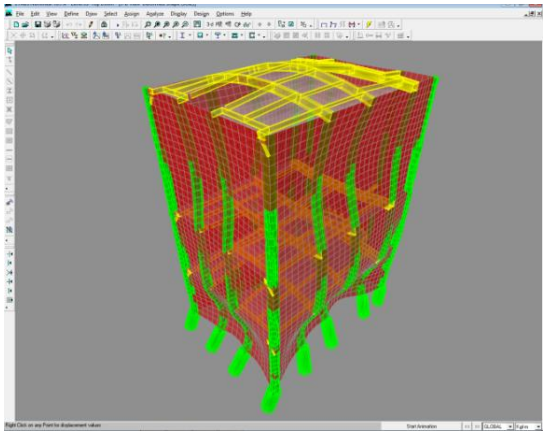


(ه)

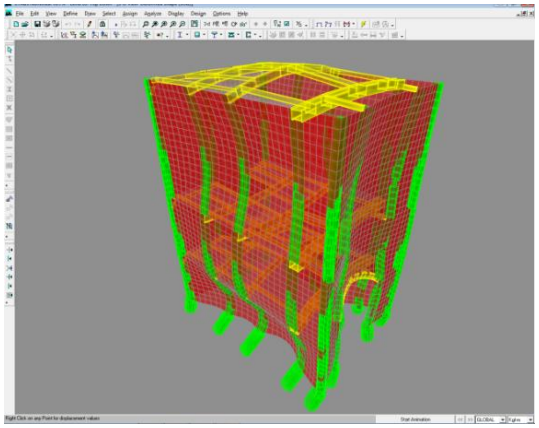


(و)

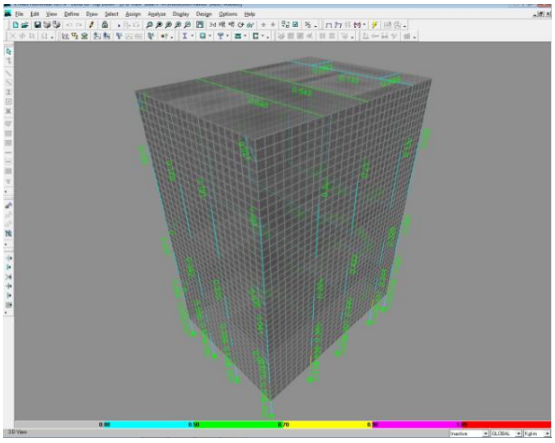
شکل (۲۴). نمای سه‌بعدی مدل سازه شفت



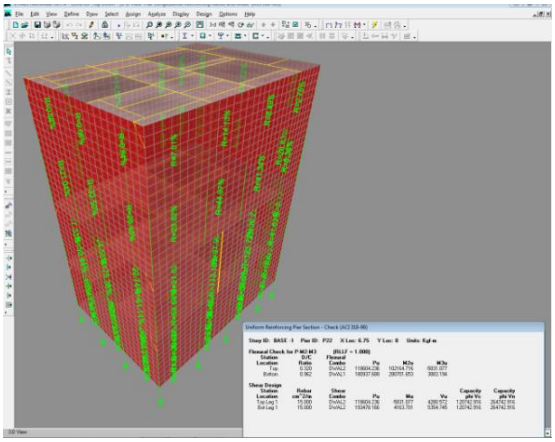
(الف)



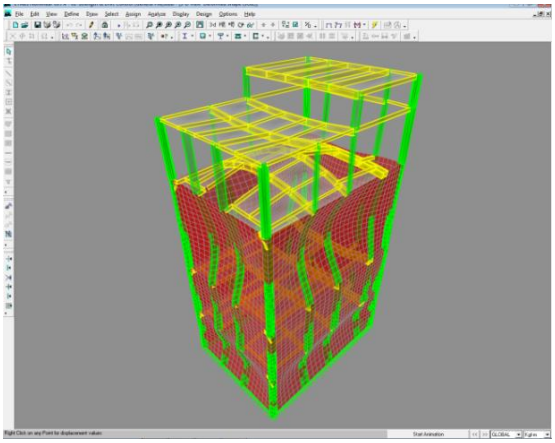
(ب)



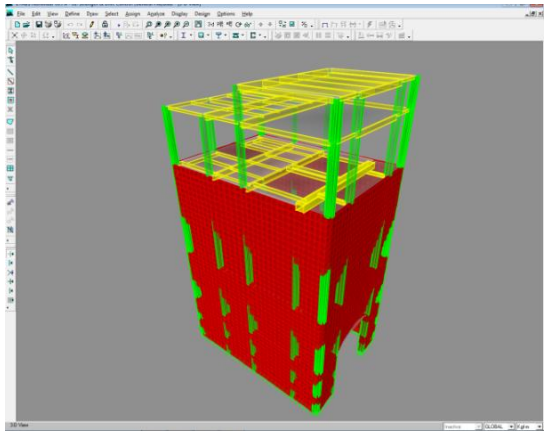
(ج)



(د)

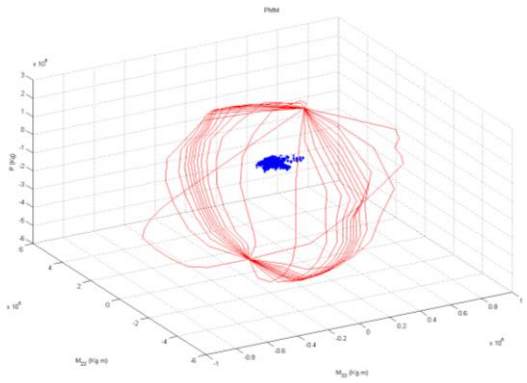


(ه)

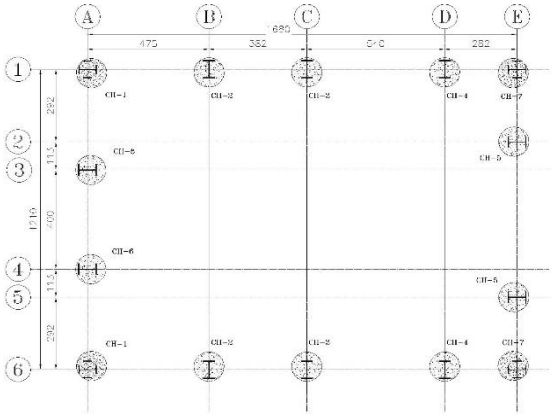


(و)

شکل (۲۵). نمای سه‌بعدی مدل سازه شفت



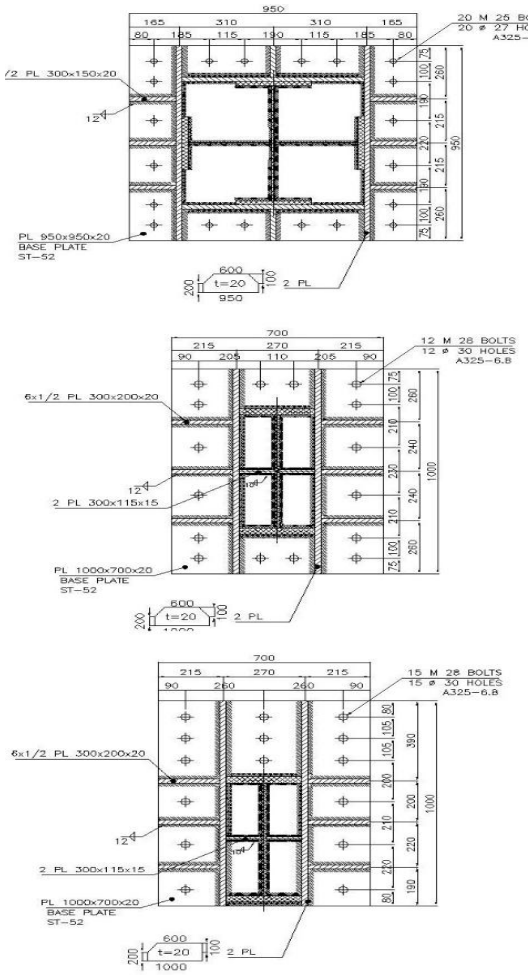
شکل (۲۶). منحنی سه‌بعدی اندرکنش نیروی محوری و لنگرهای خمشی PMM و کنترل کفایت مقطع دیوار حائل



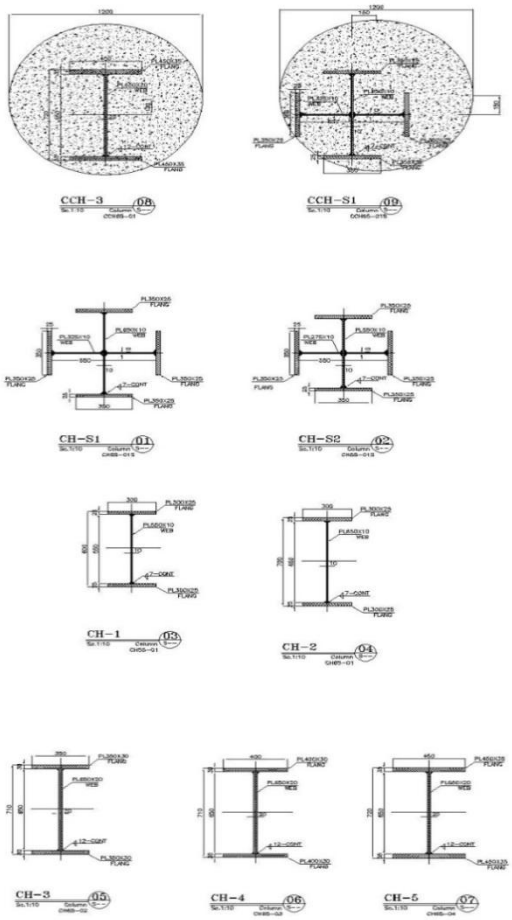
شکل (۲۷). پلان آکس‌بندی شمع/ ستون‌ها در روش TDM

جزئیات‌بندی روش TDM (بالا به پایین):

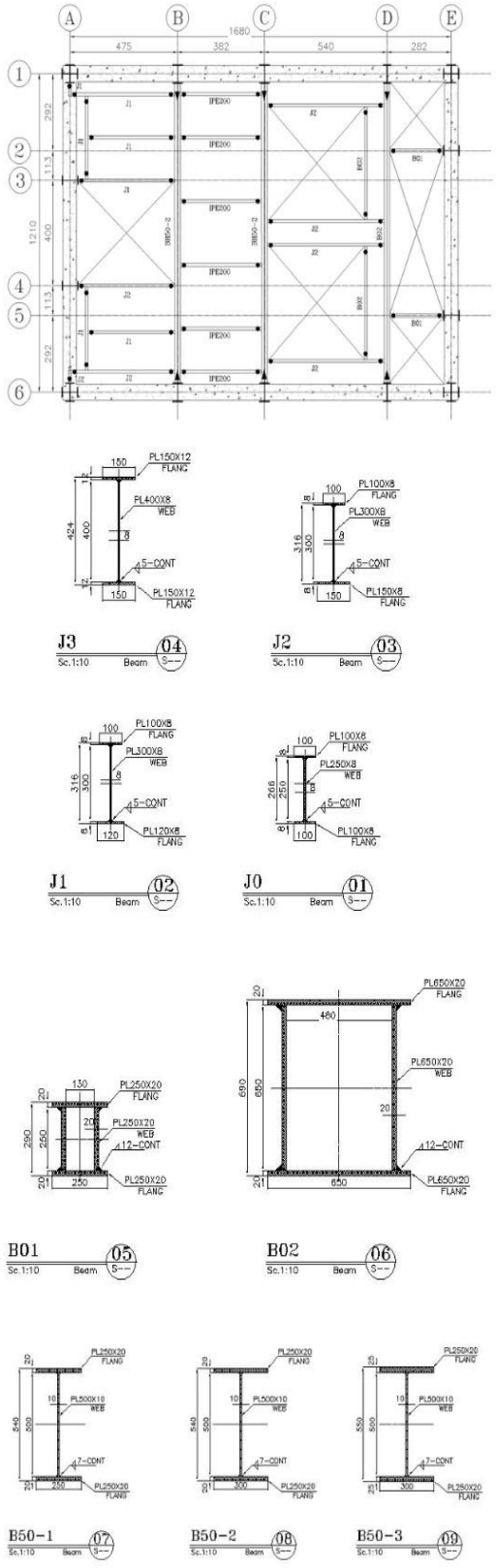
در شکل‌های (۳۱-۲۸) نقشه‌های اجرایی سازه فولادی با سقف عرشه فولادی در روش TDM (بالا به پایین) نمایش داده شده است:



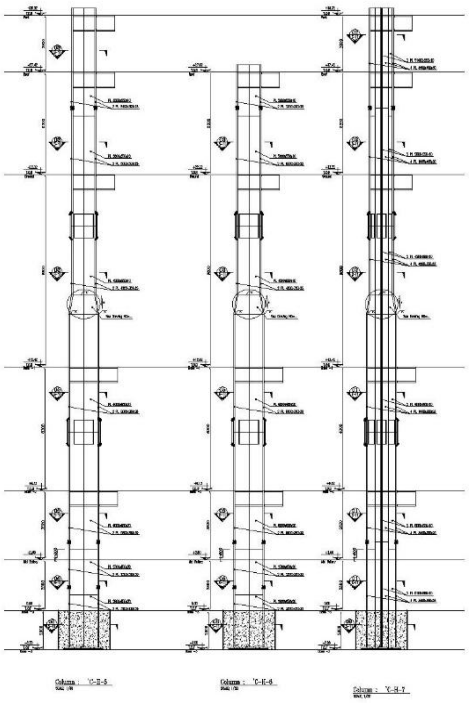
شکل (۲۸). نمایش صفحه ستون‌ها در روش TDM



شکل (۲۹). نمایش مقاطع ستون‌ها در روش TDM



شکل (۳۰). پلان تیرریزی و نمایش مقاطع تیرها در روش TDM



شکل (۳۱). نمایش مقاطع ستون‌ها در روش TDM

۴. نتیجه‌گیری

گسترش فضاهای شهری از یک سو و کمبود فضاهای ساخت در سوی دیگر، ساخت و ساز شهری را به خصوص در زمینه ساخت طبقات زیر زمین دچار چالش می‌کند. در مناطق شهری با جمعیت زیاد، گاهی تعداد طبقات زیر زمین به قدری زیاد است، که حفر گود به مسئله بسیار بغرنجی تبدیل می‌شود. در این موارد، قسمت زیادی از هزینه مالی و زمانی پروژه صرف احداث سازه‌های نگهبان موقت نظیر خرپا، نیلینگ یا انکراژ می‌شود. علاوه بر این، استفاده از روش‌های سنتی شناخته شده، یا فضای مفید ساخت را کاهش می‌دهد و یا به‌دلیل تجاوز به حریم املاک مجاور، مشکلات حقوقی به همراه دارد. با توجه به این مشکلات، استفاده از روشی کارآمد که تمامی این کاستی‌ها را برطرف نماید، ضروری می‌نماید. در چند دهه اخیر روش ساخت معکوس یا بالا به پایین (Top Down Construction Method) به عنوان پاسخ مناسبی در کشورهای صنعتی رواج یافته است. تلاش در جهت استفاده هر چه بیشتر از این روش برای به‌روز رسانی صنعت ساخت و ساز کشور ضروری است. در این مطالعه موردی، کارآمدی و هزینه فایده استفاده از این روش در مقایسه با روش‌های سنتی مانند مهار متقابل، برای پروژه شفت میان تونلی خط ۷ مترو تهران تحلیل شد.

۵. مراجع

۱. مباحث بیست‌گانه مقررات ملی ساختمانی ایران به ویژه مباحث ذیل:

- مبحث ششم: بارهای وارد بر ساختمان
- مبحث هفتم: پی و پی‌سازی
- مبحث نهم: طرح و اجرای ساختمان‌های بتن مسلح
- مبحث دهم: طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی

۲. آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم)

آیین‌نامه بارگذاری امریکا ASCE07-2005

آیین‌نامه طراحی سازه‌های بتنی ACI 318-05

۳. آیین‌نامه طراحی سازه‌های فولادی AISC ASD-05