

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 پایداری 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 به منظور 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 به صورت 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

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. به دلیل 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 به دلیل 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

این روش، یکی از روش‌های نوین پایداری 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

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 ۱-۳).

حقوقی؛

- ۶- کاهش ریسک آسیب به ساختمان‌ها و سازه‌های مجاور به دلیل 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 به دلیل 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

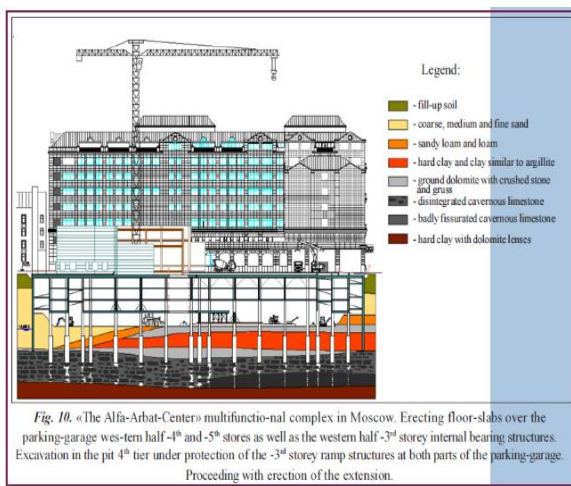


Fig. 15. «The Alfa-Arbat-Center» multifunctional complex in Moscow. Excavation in the 4th tier of the pit in the parking-garage eastern half ramp area.



Fig. 16. «The Alfa-Arbat-Center» multifunctional complex in Moscow. Facing materials transported over the ramp to the 3rd storey with small-size loaders while excavating the 5th tier of the pit.



Fig. 17. «The Alfa-Arbat-Center» multifunctional complex in Moscow. Installing ventilation and fire-fighting permanent systems at the 2nd storey while excavating the 5th tier of the pit.



Fig. 18. «The Alfa-Arbat-Center» multifunctional complex in Moscow. Completing construction of the extension to the main building. Erecting structures of the third stage construction package over the underground parking-garage eastern half while excavating the 5th tier of the pit.

building block being built simultaneously with excavation in the 5th tier (Figs. 16, 17, 18, 19). Why not «Hi-Tech in russians»?

No wonder, that in the course of construction, there were so many technical excursions to the project with participation of representatives and employees of both Russian and foreign construction companies.

FURTHER UPDATING TOP-DOWN CONSTRUCTION METHOD

It is well known that professionalism in the design of construction projects is first of all manifested itself in the individual approach to each new project. Since any project built by the top-down method is usually unique, it becomes inevita-



Fig. 19. «The Alfa-Arbat-Center» multifunctional complex in Moscow. Completing excavation of the 5th tier of the pit near the erection opening.

DEVELOPMENT TOP-DOWN METHOD OF UNDERGROUND CONSTRUCTION OR HI-TECH IN RUSSIAN

struction of «The Alfa-Arbat-Center» multifunctional complex, the client and the general contractor changed their priorities several times.

In spite of such hampering conditions, it proved possible to carry out the whole package of work needed to build the five-level underground parking-garage, that is earthwork, erection of cast-in reinforced concrete structures and waterproofing, for 12 months only including one month lost to grout the karst-prone Perhur limestone in the base of the diaphragm walls. Average rate of excavation performed under protection of the underground floor-slabs made 500 m³ per day reach-



Fig. 11. «The Alfa-Arbat-Center» multifunctional complex in Moscow. Hitachi EX300-5 clamshell excavator working through temporary erection opening and bringing truck to the surface to be loaded into dump trucks while excavating 2nd tier of the pit.



Fig. 12. «The Alfa-Arbat-Center» multifunctional complex in Moscow. Hitachi W130 motor loader transporting truck to temporary erection opening while excavating the 2nd tier of the pit. Truck is brought to the surface using Hitachi EX300-5 clamshell excavator and loaded into dump trucks.

ing 800 m³ per day in case of the 3rd and the 4th tiers (Figs. 11, 12, 13, 14, 15).

It is for the first time in Russia that one could witness finishing work and installation of engineering systems at the stores from the 1st to the 4th being carried out, construction materials, equipment and articles being delivered using the ramps and a new aboveground



Fig. 13. «The Alfa-Arbat-Center» multifunctional complex in Moscow. Excavation in the 3rd tier of the pit under the parking-garage western half 2nd-storey ramp.

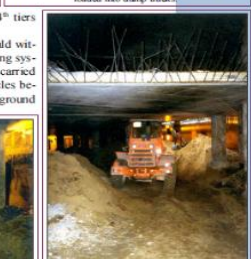


Fig. 14. «The Alfa-Arbat-Center» multifunctional complex in Moscow. Hitachi W130 motor loader transporting truck to temporary erection opening while excavating the 3rd tier of the pit under the parking-garage western half 2nd-storey ramp.

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

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



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 به صورت شمع



Excavation and construction of the basement slab using double-bit arrangement



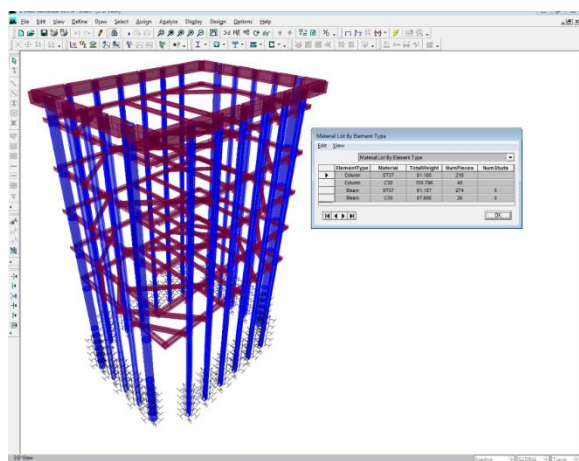
شکل (۳): اجرای سقف‌ها و فونداسیون

۳. پیکربندی و مشخصات سیستم سازه‌ای

ابعاد داخلی نهایی شفت فوق $۱۱/۵ \times ۱۶/۵$ 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.

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

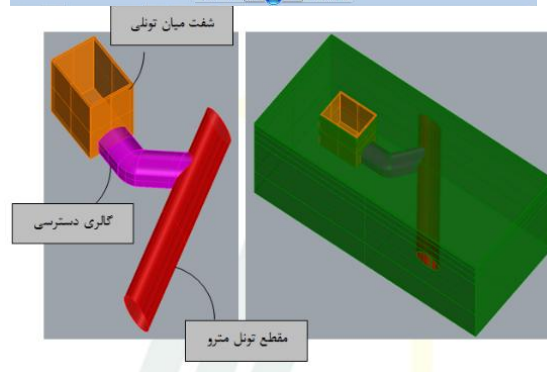


شکل (۷). مدل سه‌بعدی سازه نگهدارنده موقت

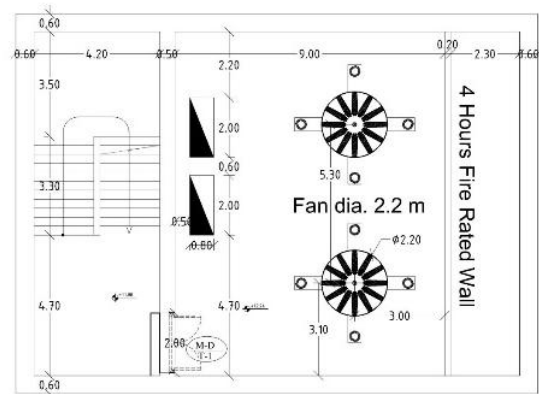
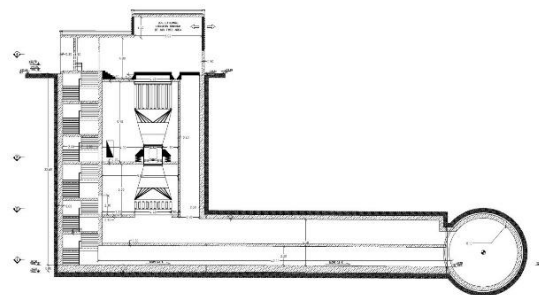
در جدول (۱) هزینه اجرای سازه نگهدارنده موقت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار فولاد مصرفی برای شمع‌های فلزی (ستون‌ها) حدود ۸۲ تن، استرات‌ها ۹۲ تن و با احتساب ۳۰ درصد اتصالات، سهم اتصالات نیز حدود ۵۲ تن خواهد بود. علاوه بر این، با توجه به ابعاد شفت (پلان ۱۹×۱۴ متر و ارتفاع ۲۳ متر) حدود 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 نگهدارنده فلزی موقت شفت M7N7

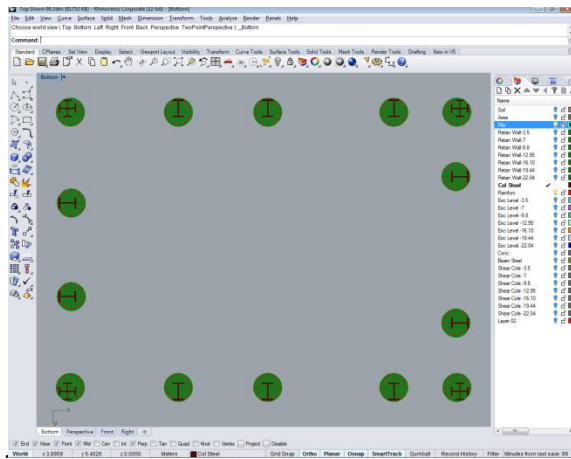
موضوع	مصالح	واحد	مقدار	هزینه واحد (ریال)	هزینه کل (ریال)
ستون فلزی	فولادی	تن	۸۲	۳۵,۰۰۰,۰۰۰	۲,۸۷۰,۰۰۰,۰۰۰
استرات فلزی	فولادی	تن	۹۲	۳۵,۰۰۰,۰۰۰	۳,۲۲۰,۰۰۰,۰۰۰
اتصالات	فولادی	تن	۵۲	۳۵,۰۰۰,۰۰۰	۱,۸۲۷,۰۰۰,۰۰۰
شمع بتنی	بتن مسلح	مترمکعب	۹۶	۱,۰۰۰,۰۰۰	۹۵,۶۰۰,۰۰۰
شات کریت	بتن مسلح	مترمربع	۱۵۱۸	۹۰۰,۰۰۰	۱,۳۶۶,۲۰۰,۰۰۰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



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

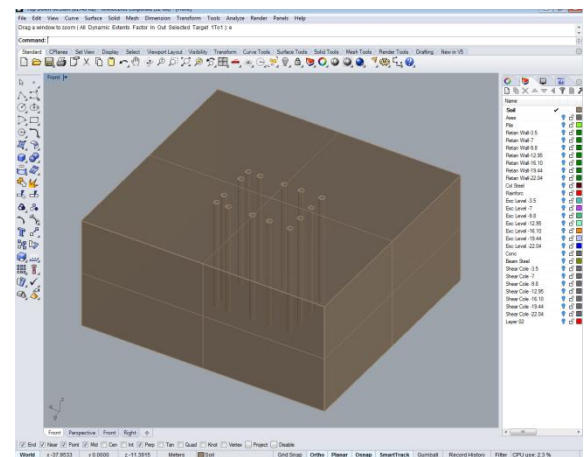
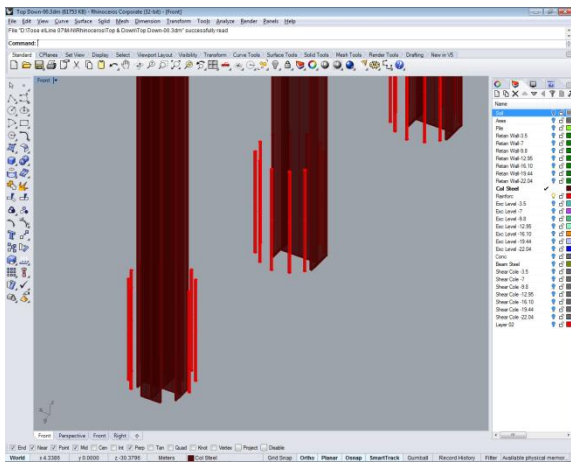


شکل (۶). پلان و برش معماری شفت میان تونلی M7N7



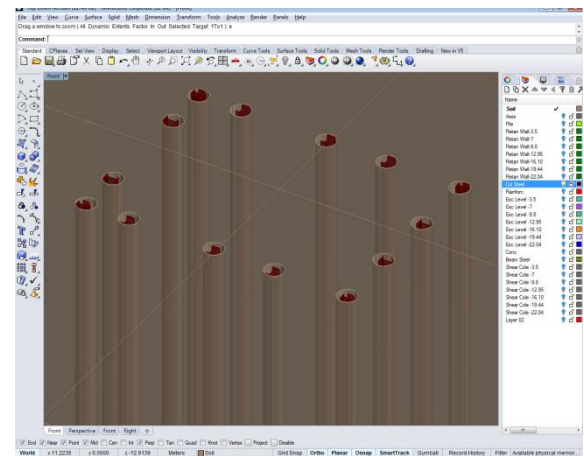
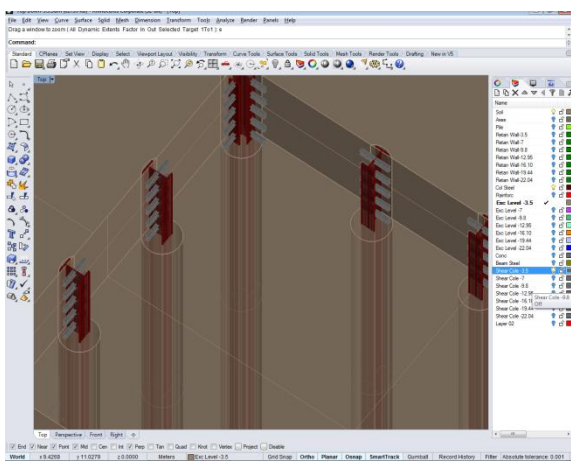
شایان ذکر است که هزینه سازه فلزی در روش TDM (بالا به پایین) نیز تقریباً معادل با مقدار فوق خواهد بود، اما بایستی توجه داشت که در این روش سازه اجرا شده نقش سازه اصلی را داشته و نیازی به اجرای سازه اصلی در روش سنتی نخواهد بود. همچنین روش TDM (بالا به پایین) را می‌توان با پذیرفتن محدودیت‌های اجرایی، از 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:



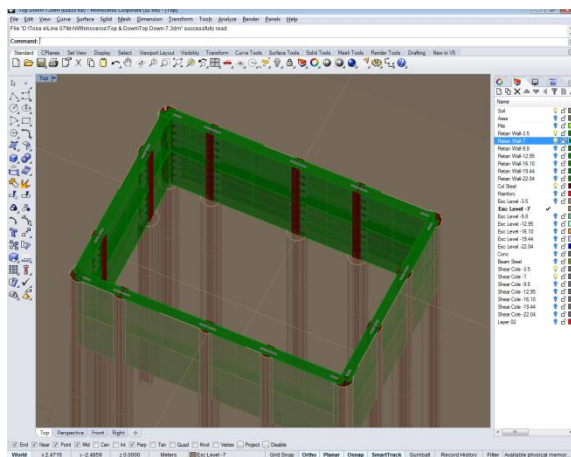
شکل (۱۰). مرحله سوم، اجرای پی بتن مسلح موقت ستون‌های فلزی در تراز ۲ متر پایین‌تر از تراز زیر پی

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

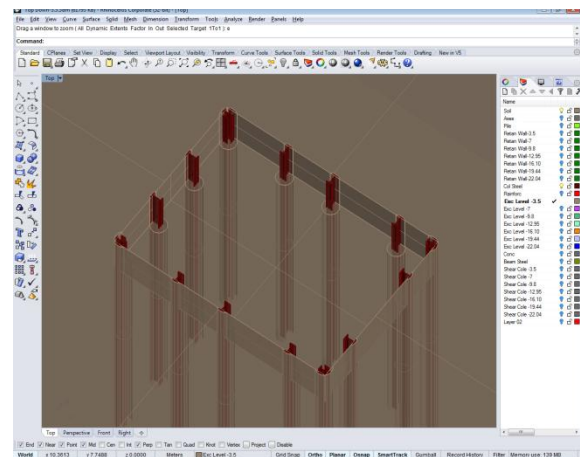


شکل (۱۱). مرحله چهارم، پر کردن محل شمع‌ها

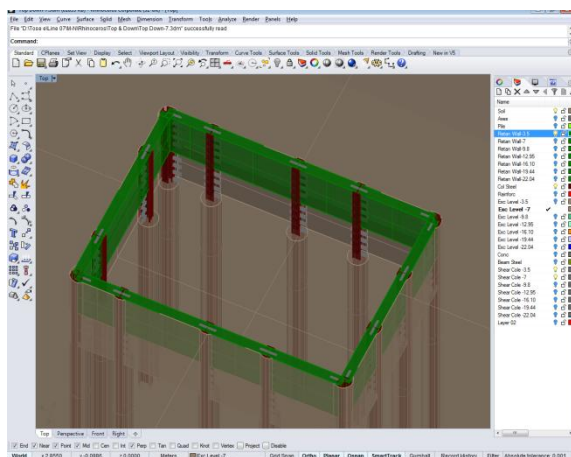
شکل (۹). مرحله دوم، جاگذاری ستون‌های فلزی داخل شمع‌های حفاری‌شده



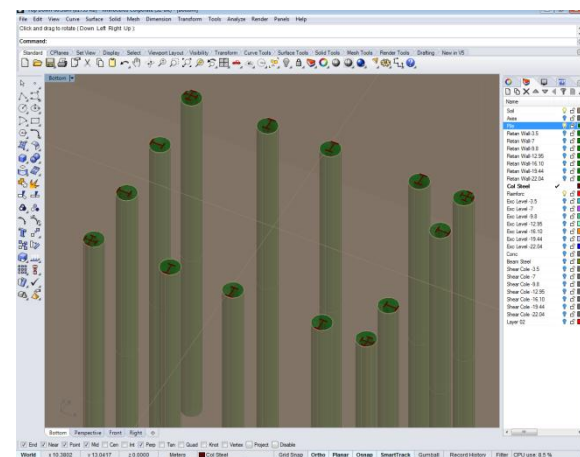
شکل (۱۵). مرحله هشتم، حفاری تا تراز ۷/۳۰- اجرای برش گیرها



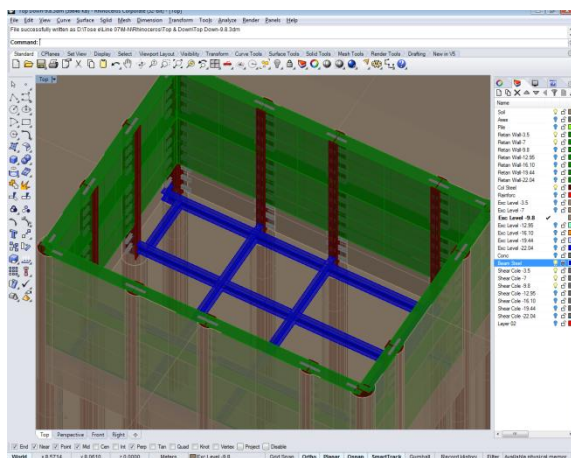
شکل (۱۲). مرحله پنجم، اجرای گودبرداری تا تراز و پیرامون



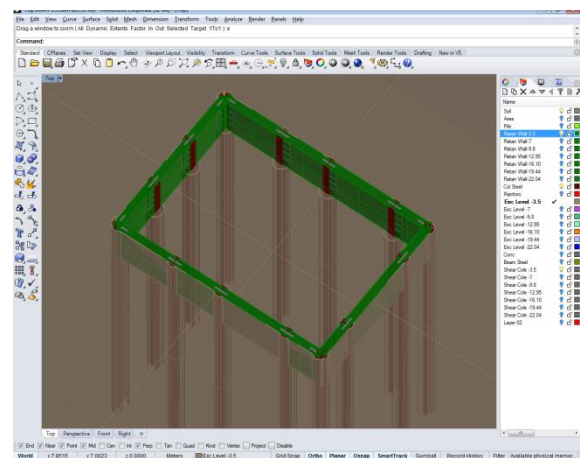
شکل (۱۶). مرحله نهم، اجرای دیوار حائل توسط کوپلرهاى انتهایى تا تراز گودبرداری



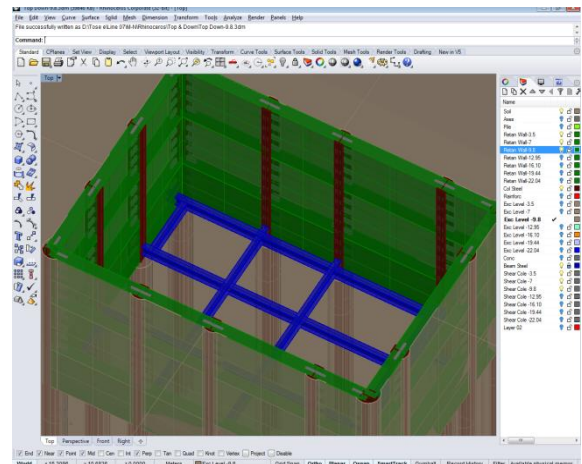
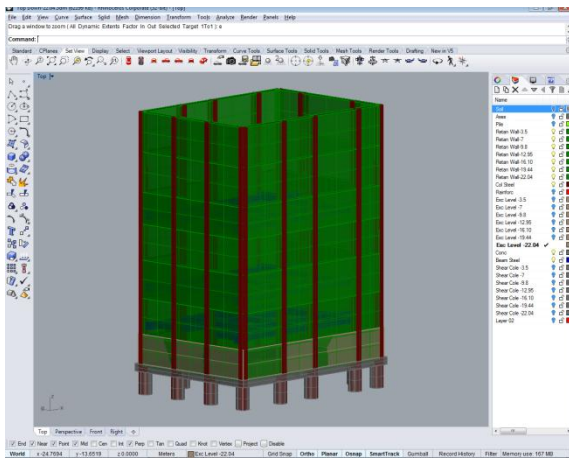
شکل (۱۳). مرحله ششم، اجرای برش گیرهای ستون‌ها کوپلرهای انتهایی تا تراز گودبرداری



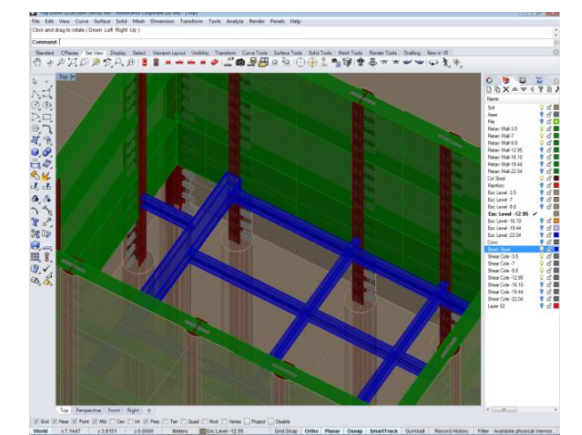
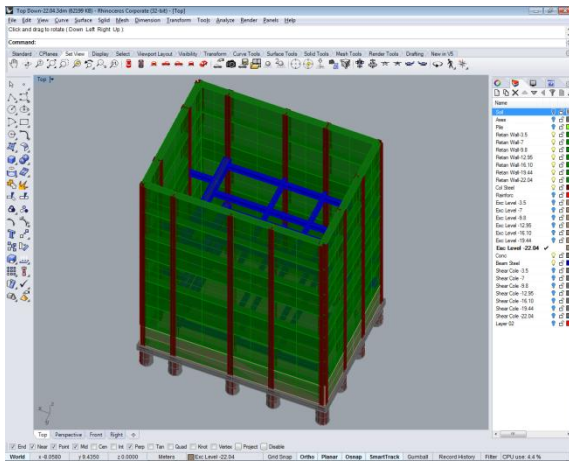
شکل (۱۷). مرحله دهم، حفاری تا تراز ۹/۸۰- گیرها، و تیرهای فلزی سقف



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



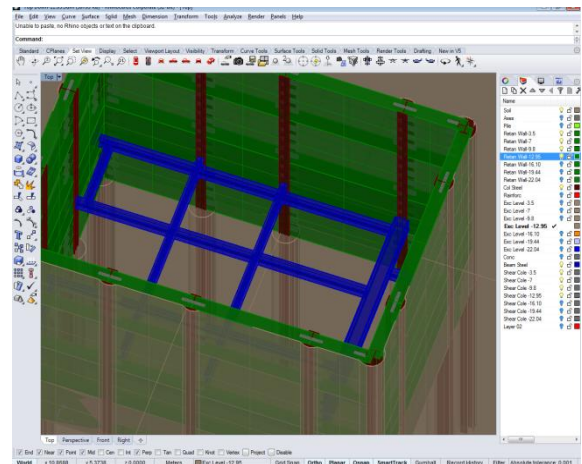
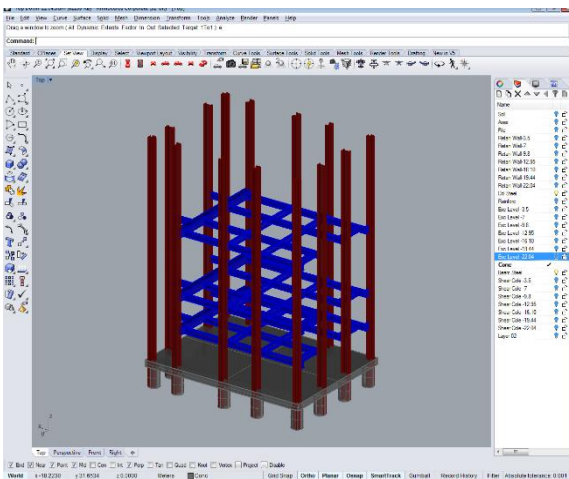
شکل (۱۸). مرحله یازدهم، اجرای دیوار حائل توسط اجرای برش کوپلهای انتهایی تا تراز گودبرداری



شکل (۲۱). نمای سه‌بعدی سازه شفت

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

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.



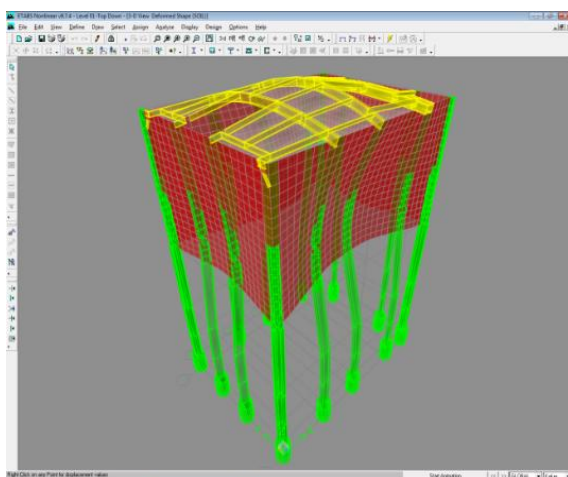
شکل (۲۲). نمای سه‌بعدی سازه شفت (بدون نمایش دیوار حائل)

شکل (۲۰). مرحله سیزدهم، اجرای دیوار حائل توسط کوپلهای انتهایی تا تراز گودبرداری

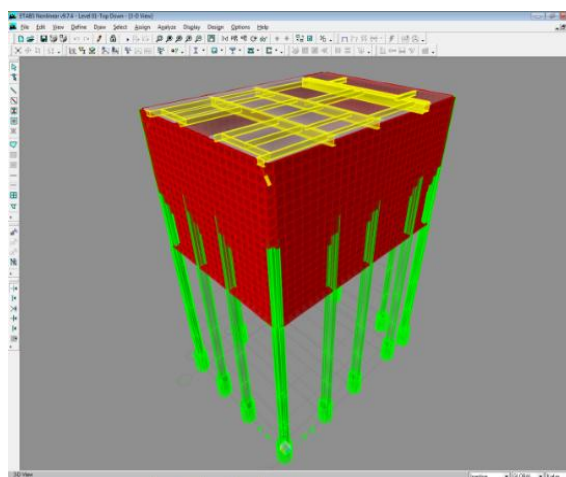
نرم افزار Etabs2000 با توجه به ترازهای مختلف گودبرداری و استفاده از مدل فنر برای احتساب اندرکنش خاک و شمع (سختی جانبی شمع) کفایت مقاطع ستون، تیر و دیوار حائل در مراحل مختلف روش TDM (بالا به پایین) در ساخت شفت میان تونلی M7N7 صورت گرفته است. در شکل‌های (۲۶-۲۳) هندسه مدل‌ها و نیز نسبت تنش‌های موجود نشان داده شده است:

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

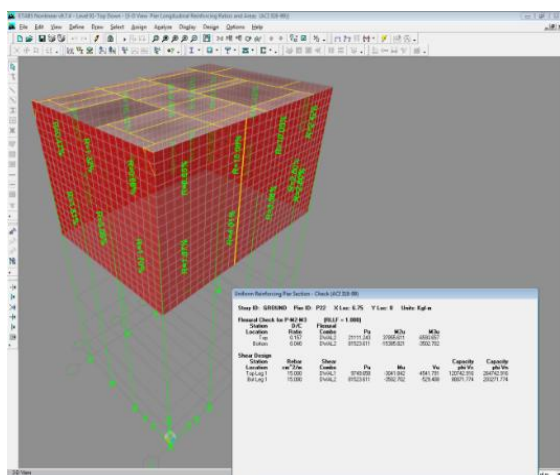
علاوه بر تهیه یک مدل با بارگذاری‌های کامل ثقلی و جانبی (زلزله و فشار جانبی خاک) و طراحی اعضای سازه‌ای با توجه به ساخت مرحله ای در روش فوق، توسط مدل‌سازی مرحله‌ای در



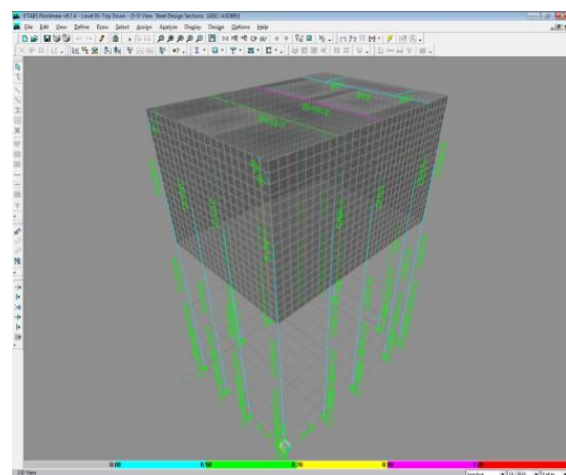
(ب)



(الف)

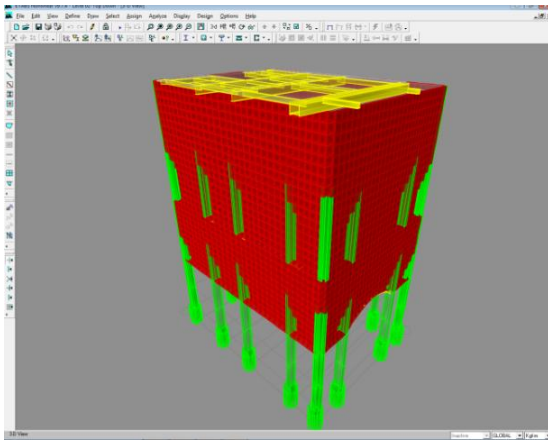


(د)

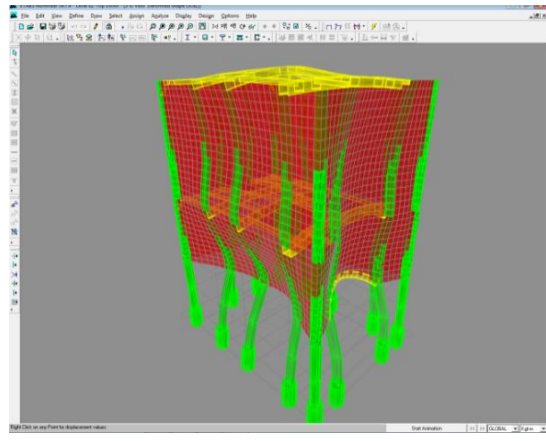


(ج)

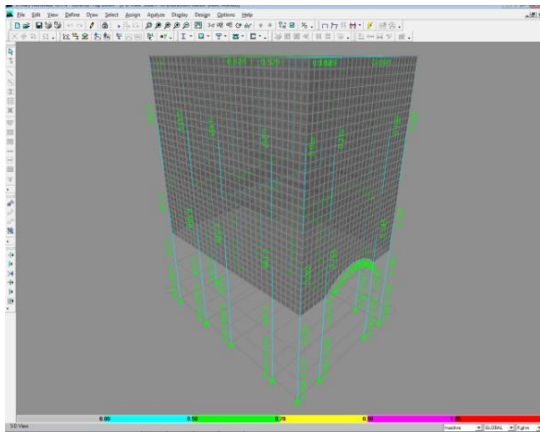
شکل (۲۳). نمای سه‌بعدی مدل سازه شفت- گودبرداری تا تراز ۹/۸۰-



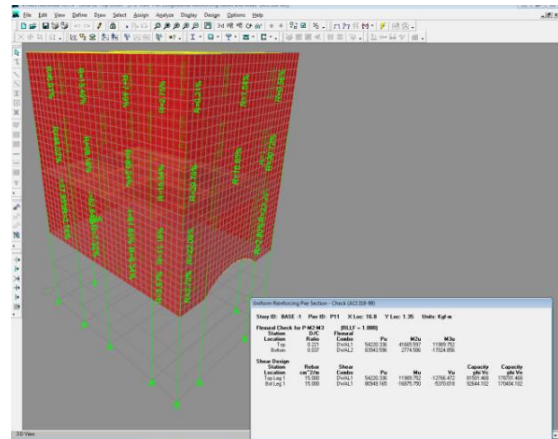
(ب)



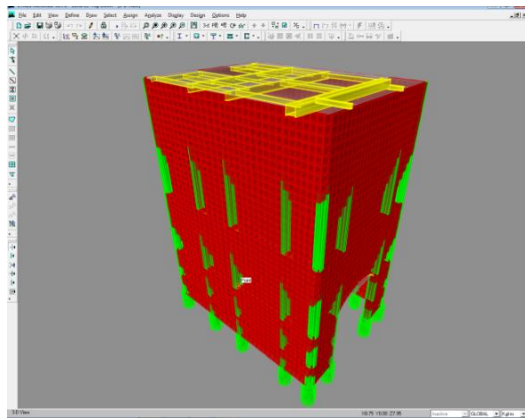
(الف)



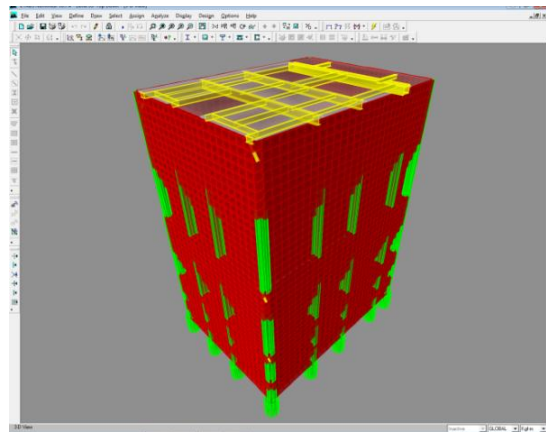
(د)



(ج)

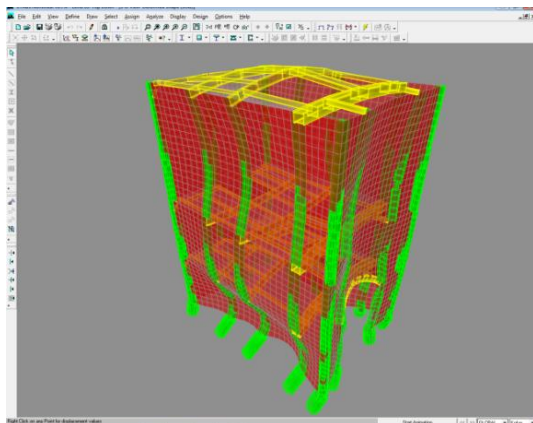


(و)

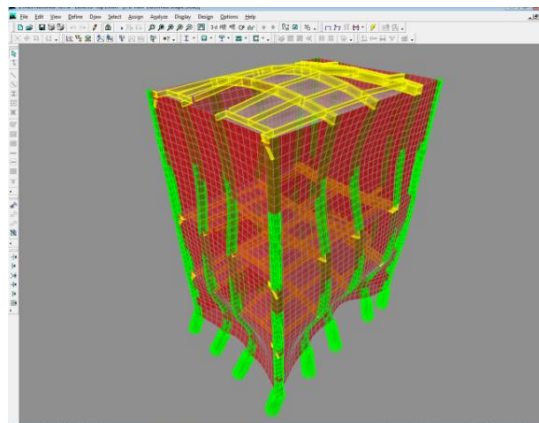


(ه)

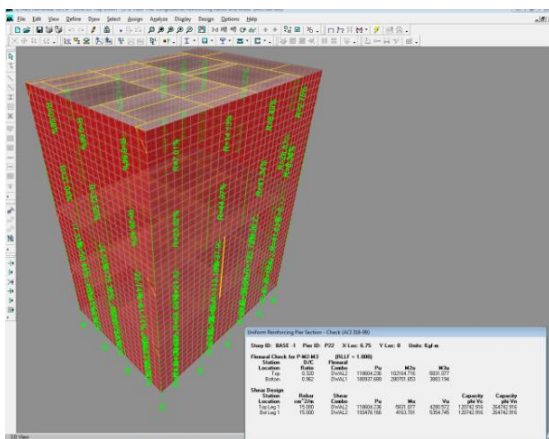
شکل (۲۴). نمای سه‌بعدی مدل سازه شفت



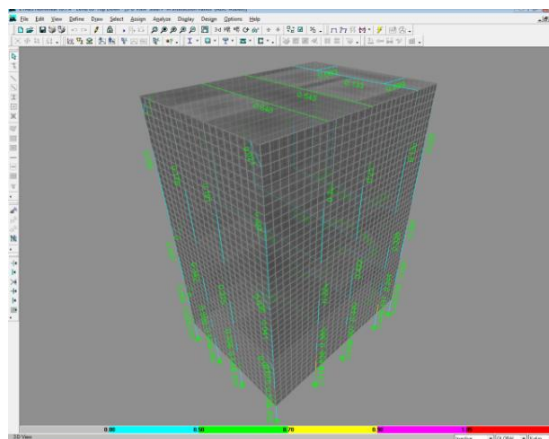
(ب)



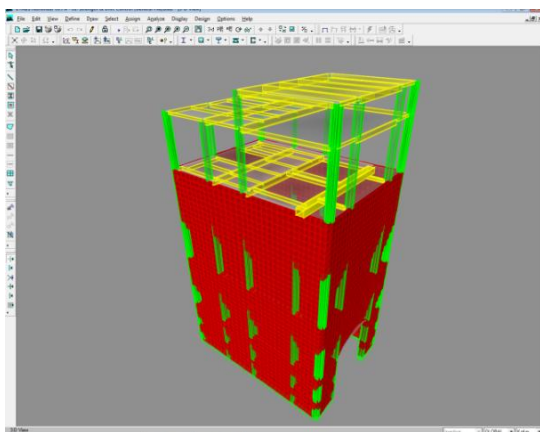
(الف)



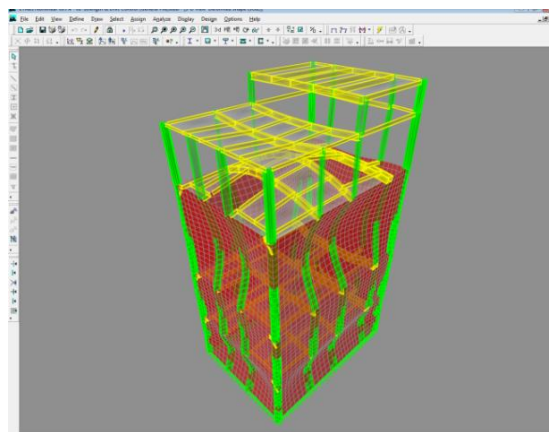
(د)



(ج)

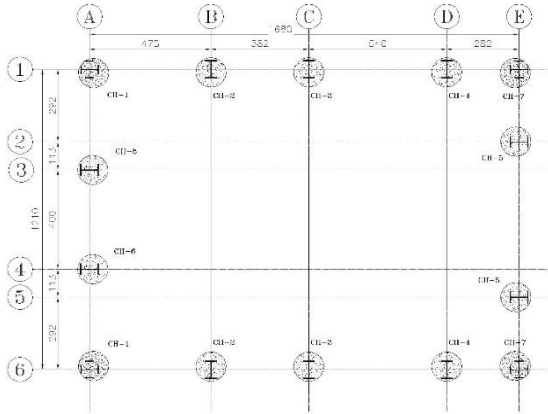


(و)

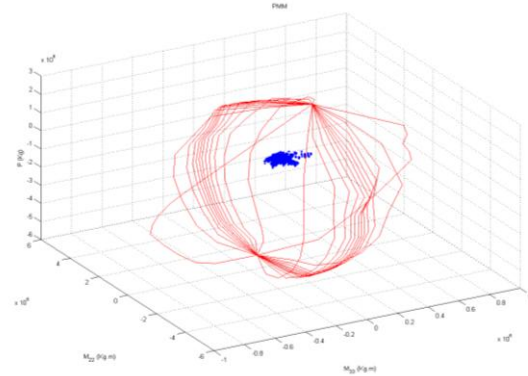


(ه)

شکل (۲۵). نمای سه‌بعدی مدل سازه شفت

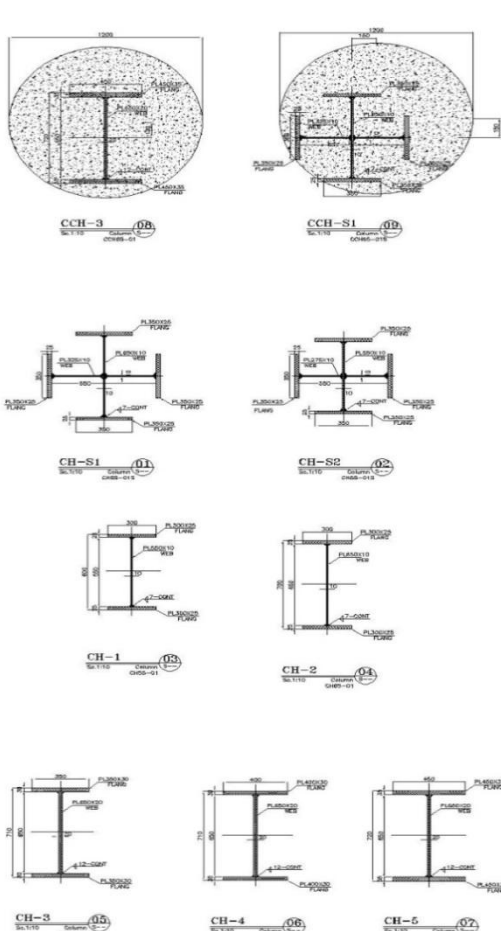


شکل (۲۷). پلان آکس‌بندی شمع/ ستون‌ها در روش TDM

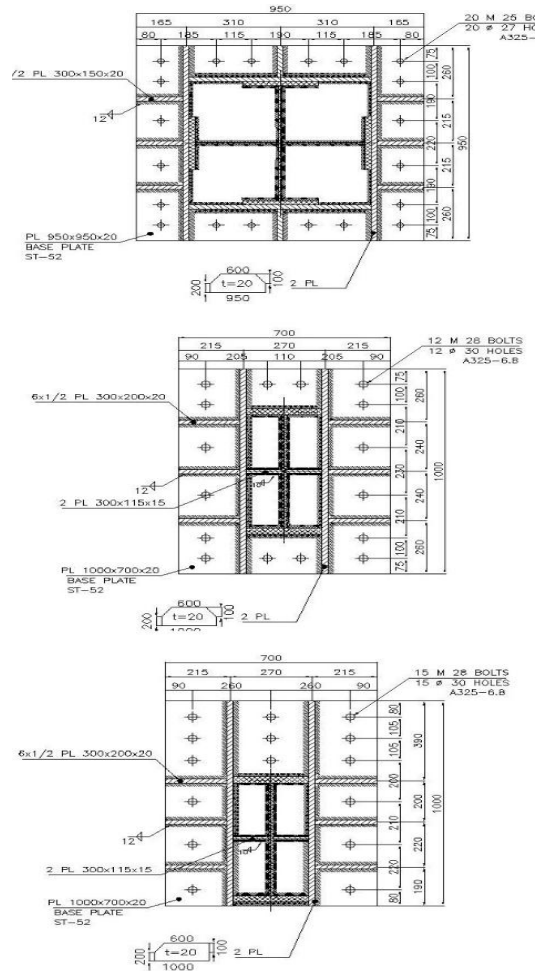


شکل (۲۶). منحنی سه‌بعدی اندرکنش نیروی محوری و لنگرهای خمشی PMM و کنترل کفایت مقطع دیوار حائل جزئیات‌بندی روش TDM (بالا به پایین):

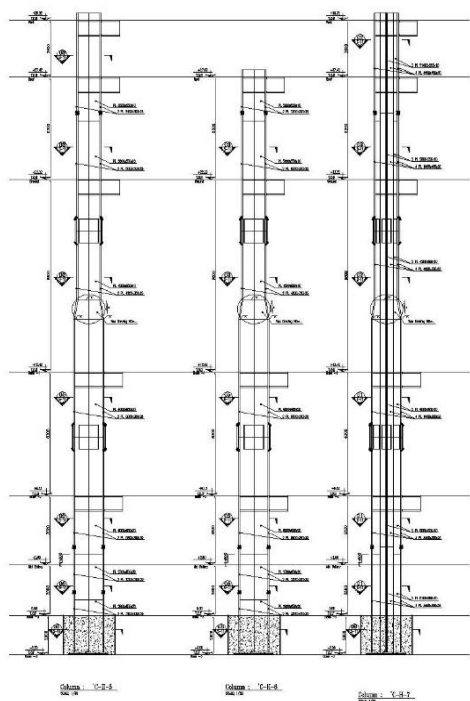
در شکل‌های (۲۸-۳۱) نقشه‌های اجرایی سازه فولادی با سقف عرشه فولادی در روش TDM (بالا به پایین) نمایش داده شده است:



شکل (۲۹). نمایش مقاطع ستون‌ها در روش TDM



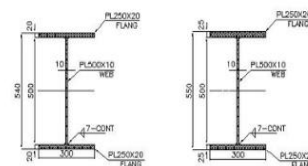
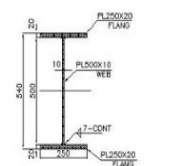
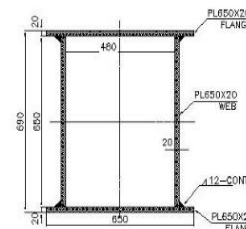
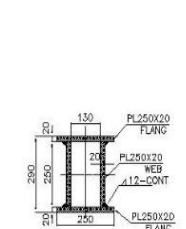
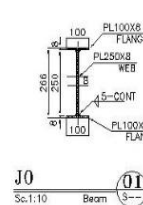
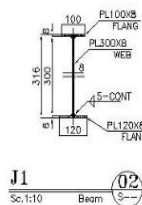
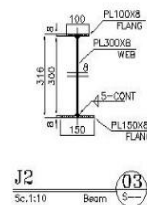
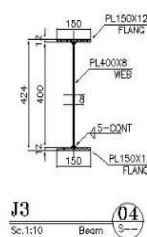
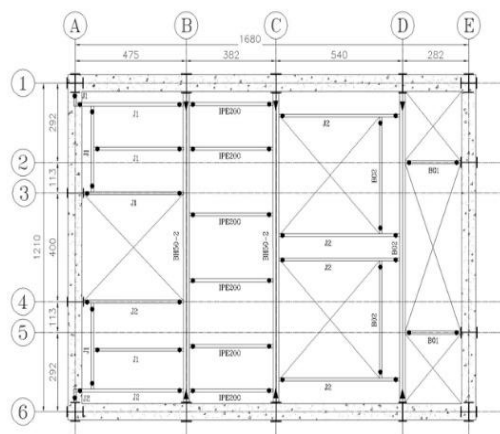
شکل (۲۸). نمایش صفحه ستون‌ها در روش TDM



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 بحرانی تبدیل می‌شود. در این موارد، قسمت زیادی از هزینه مالی و زمانی پروژه صرف احداث سازه‌های نگهدارنده 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 به دلیل 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 هزینه‌فایده استفاده از این روش در مقایسه با روش‌های سنتی مانند مهار متقابل، برای پروژه شفت میان تونلی خط ۷ مترو تهران تحلیل شد.



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

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