



Design and Construction of Sewage Structures under High-Level Underground Water Conditions Using the Top-Down Method: A Case Study of Sewage Pumping Station PS2 in Dorood City

Bahador Mirzaei^{1*}, Abbas Pirayandeh², Hojjat Emami³

1. Senior Structural Engineer and Project/Design Manager, Water and Wastewater Consulting Engineers, Isfahan, Iran (Corresponding Author) bahador.mirzaei@alumni.znu.ac.ir
2. Chief Executive Officer, Water and Wastewater Consulting Engineers, Isfahan, Iran
3. Head of Civil Engineering Design/Drafting Dept., Water and Wastewater Consulting Engineers, Isfahan, Iran



<https://doi.org/10.22093/wwj.2023.416237.3370>

Case Study

Abstract

In this paper, various issues related to the design and construction of a pump station under high-level underground water conditions in Dorood City using different approaches are investigated. These methods include deep wells, sheet pile walls, and secant walls. By evaluating the deficiencies of these methods in dealing with high-level underground water conditions, a new approach called the Top-Down method is studied and introduced; it was previously presented for the construction of caissons and buildings. In comparison to other methods, the advantages and disadvantages of the Top-Down method are evaluated, leading to its selection; Subsequently, the problems, including the waterstop placement system and construction details were addressed and modified. Architectural and structural details for the construction of such structures applying the Top-Down method were then presented in the research. Finally, the efficiency and robustness of the proposed approach in the design and construction of concrete sewage structures exposed to high-level underground water, are demonstrated from the technical and economic perspectives, construction time, costs and safety level.

Keywords:

Pumping Station, Sewage, Top-Down Method, High Groundwater Level.



Received March 8, 2024

Revised: June 12, 2024

Accepted July 25, 2024

To cite this article:

Mirzaei, B., Pirayandeh, A. and Emami, H., 2024. Design and construction of sewage structures under high-level underground water conditions using the Top-Down method: a case study of sewage pumping station in Dorood City. *Water and Wastewater*, 35(3), 25-44. <https://doi.org/10.22093/wwj.2023.416237.3370>

Use your device to scan and read the article online



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



1. Introduction

To conduct studies for the second phase of the sewage network in the city of Dorood, field visits were first conducted at the site of the PS2 sewage pumping station. During these field visits, a high groundwater level was observed, which posed significant challenges for the construction of the structure. Therefore, after obtaining the geotechnical tests and report, the design engineer explored various options for the design and construction of the pumping station. After examining the different options, the Top-Down method was chosen as the preferred approach, and various construction and waterproofing issues were addressed during the construction.

2. Study area

The study area for the PS2 sewage pumping station is located in the city of Dorood, in Lorestan Province. The structure is circular, with a diameter of 12 meters, and features a wide-type foundation, with a depth of 14 meters below the natural ground surface.

According to the geotechnical report, the soil at the site primarily consists of a sequence of layers classified as clay with low plasticity (CL) and sandy silt (SM). In some depths, fine-grained layers appear as silts mixed with sand (ML). The estimated mechanical parameters of the soil layers based on the geotechnical report are presented in Table 1.

3. Literature review

There has been limited research conducted regarding the design and construction of wastewater structures in areas with high groundwater levels. Generally, various construction methods concerning this issue are as follows:

1. Dewatering and Groundwater Control Using Deep Wells

Dewatering involves reducing the water level outside the construction site and maintaining the groundwater level until the project is completed. (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020).

2. Sheet Pile Walls

Another method for protecting excavation walls involves driving sheet piles. Sheet piles are commonly used in marine and riverine environments. They are typically made of steel and have a trapezoidal profile. (Das, 2014; BS 8002, 1994; MPO, 2005; Bowles and Gou, 1996).

3. Excavation Using Continuous Peripheral Pile Driving System

In this method, piles are installed at regular intervals around the area to be excavated. Concrete piles can be implemented as either precast or cast-in-place. The piles bear the lateral soil pressure like cantilever beams (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020).

4. Top-Down Construction Method

This method, which was initially implemented for narrow shafts or caissons in high groundwater conditions beneath the base of bridge piers (Nemati, 2005), and later used in building construction (Li et al., 2014), is executed as follows: the structure is prefabricated step-by-step above the ground, and excavation is performed using earthmoving machinery, such as tall-reach excavators, alongside or within the structure. The walls are constructed gradually and lowered downwards. Once the structure reaches its designated elevation, the foundation and other structural elements are installed.

The pros and cons of all existing methods for concrete wastewater structures exposed to high groundwater levels were evaluated and compared using the Top-Down method. After thorough consideration, the Top-Down method was selected as the superior option over other methods for the following reasons:

- High speed of construction.
- More economical construction costs due to the lack of need for stabilizing the excavation wall slopes or retaining structures.
- Efficiency in handling deep excavations compared to other methods.
- Higher safety level during construction.

It should be noted that when using this method, necessary technical measures and considerations for waterproofing the structure must be taken into account, which are addressed in the waterproofing section.

4. Modeling and design of the structure

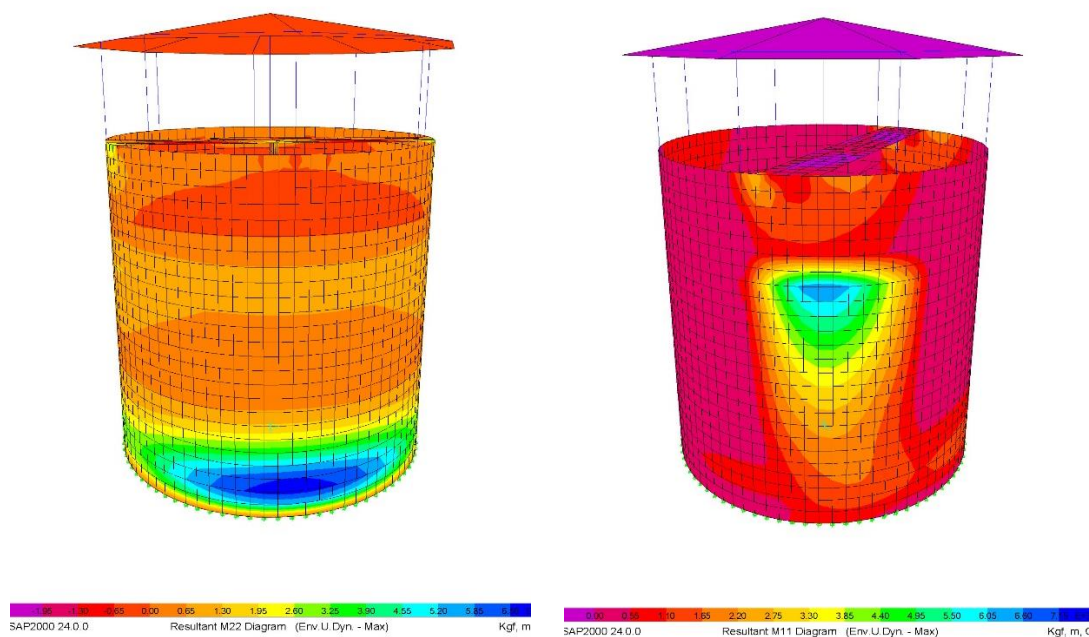
To analyze, load, and design of this structure, as well as control crack width and specify the technical characteristics of materials exposed to the corrosive effects of wastewater, relevant and accepted design codes for environmental and wastewater structures were utilized, including the ACI-350 standard. Additionally, relevant national regulations, such as the guidelines for the design and calculation of underground water tanks (Iranian Concrete Code No. 123), were employed in this context. Other reputable codes, such as ASCE/SEI 7-16, Standard 2800, and National Building Regulations (Chapter 6), were utilized for the loading criteria of the structure under both static and seismic conditions. For the design of the concrete structure, the ACI-318 standard, National Building Regulations (Chapter 9), and the Iranian Concrete Code (No. 120) were employed. In designing the shelter steel structure and specifying the steel materials, National Building Regulations (Chapter 10) was referenced.

Geometric modeling and design of the pumping station structure were performed using SAP2000 software version 21.0.2. The results obtained from the structural analysis in SAP2000, including the bending stresses M11 and M22, are illustrated in Fig. 1.



Table 1. Mechanical properties of the soil layers (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020)

Depth (m)	Material	C' (kg/cm ²)	ϕ' (°)	C' (kg/cm ²)	ϕ' (°)	γ_{wet} (g/cm ³)	E (kg/cm ²)	ν
0.5-4	CL	0.2	17	0.35	3	1.84	100-150	0.45-0.5
4-7	SM	0.1	25	0.20	5	1.91	50-100	0.3-0.33
7-8.5	CL	0.2	23	0.40	3	1.85	200-250	0.45-0.5
8.5-10	SM	0.1	28	0.45	5	1.95	150-200	0.3-0.33
10-19	CL	0.2	27	0.55	6	1.94	250-300	0.45-0.5
19-21	SM	0.15	35	0.45	5	1.99	250-300	0.3-0.33
21-26	CL	0.3	29	0.70	7	1.98	300-350	0.45-0.5
26-30	SM	0.15	35	0.45	5	1.99	300-350	0.3-0.33

**Fig. 1.** Resultant M11 & M22 Diagram in SAP2000

5. Construction phases of the structure

In general, the construction of the pumping station structure was carried out in four phases:

1. Construction of walls
2. Construction of foundation
3. Construction of internal structural components, including interior walls and columns
4. Construction of the steel roof over the pumping station

The walls of the structure were constructed on-site in 2 to 3-meter segments as precast concrete. In the first segment, the wall was designed with a wedge shape at the bottom to facilitate its embedding into the soil, as per the construction details in Fig. 2.

Then, excavation was performed from the inside of the first ring of the wall using an excavator to allow the structural components to move downward under their weight. Following this, the reinforced concrete placing for the subsequent parts was carried out above the structure, and excavation was again performed from the inside of the structure to facilitate further

downward movement of the structure under its weight.

This process continued until the structural components reached the required alignment level based on architectural drawings, allowing the structure to achieve balance and stability under its weight. Ultimately, the plumbness of the wall segments was verified using surveying instruments (Fig. 2).

Typically, if the excavation around the structure is performed uniformly from all sides using an excavator, the wall sections will move downward under their weight and the structure will be constructed plumbed. During the construction of this structure, it was also observed that it moved downward, balanced, and plumbed under its weight. Ultimately, when the walls reached their installation level according to the construction drawings, the plumbness of the structure was verified using surveying instruments. Observations and surveying checks indicated that the structure had been installed in a



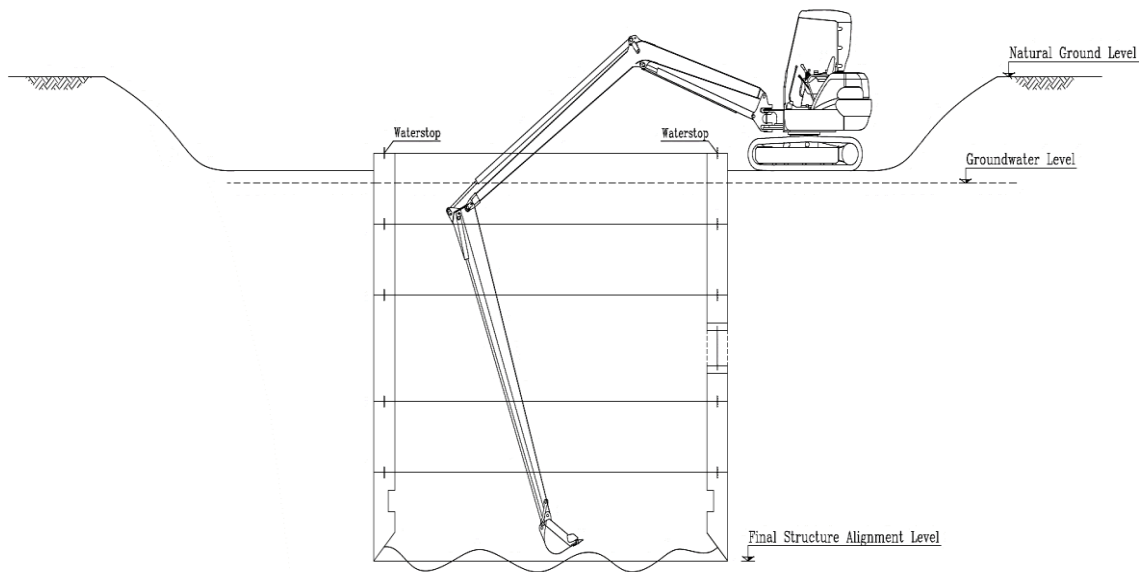


Fig. 2. Construction of the next parts of the wall to reach structural foundation level

balanced and plumb condition under its weight. Finally, after verifying the plumbness of the walls, the last section of the edge wall—designed to control the uplift pressure—was constructed at the natural ground level, and compaction was performed on the edge of the walls to aid in the stability and balance of the structure.

In cases where any lack of plumbness or imbalance is observed during the construction of the structure's walls and their downward alignment, hydraulic jacks or horizontal braces can be used to achieve stability and plumbness of the structure.

After ensuring the stability and plumbness of the structure and executing the surrounding edge beams, the foundation of the structure was constructed. Due to the high groundwater level in the foundation area, a pumping pit was initially created beneath the foundation. Then, while the pump was draining the groundwater surroundings of the structure, the foundation's concrete was placed according to the construction details shown in Fig. 4.

All the walls, internal columns, and other structural components were constructed in the next phase. Following that, the steel roof of the pumping station was erected, along with all the internal utilities and equipment of the structure. The final configuration of the constructed structure is shown in Fig. 3.

6. Control of uplift pressure

Since the concrete walls are to be cast in place at a depth of 3 meters below the ground, and based on the calculations performed for controlling

uplift pressure, the weight of the structure alone is insufficient to resist this pressure. Therefore, to control the uplift pressure, a footing was designed around the walls at a depth of 3 meters (above the groundwater level), which appropriately increases the weight of the structure. The weight of the soil above this footing was also utilized to mitigate the uplift pressure.

7. Waterproofing of the structure

To waterproof the structure, PVC waterstops were used in all segments of the walls. In the area where the foundation connects to the wall, a combination of bentonite and hydrophilic waterstops was employed according to the waterproofing details, as illustrated in Fig. 4.

8. Conclusion

In this paper, various methods for designing and constructing wastewater concrete structures exposed to high groundwater levels were examined, taking into account the sensitivity of the waterproofing in these structures. After conducting technical and economic evaluations, the Top-Down construction method was selected as the superior option for the construction of these structures in high groundwater-level conditions. This method offers significant advantages including high construction speed, greater safety, and more economical construction due to the lack of need for stabilizing the excavation slope or retaining structures. It also demonstrates effectiveness in deep excavations compared to other methods. The necessary technical measures and precautions for waterproofing the structure are also implemented.



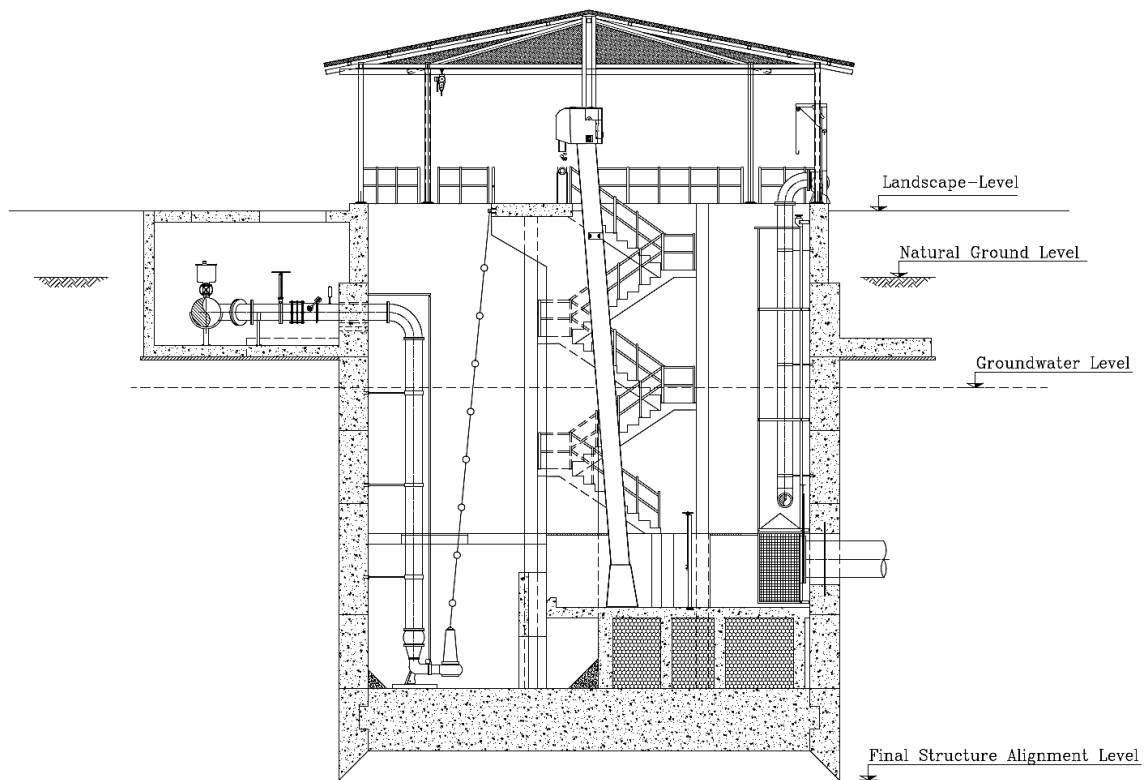


Fig. 3. Final constructed structure

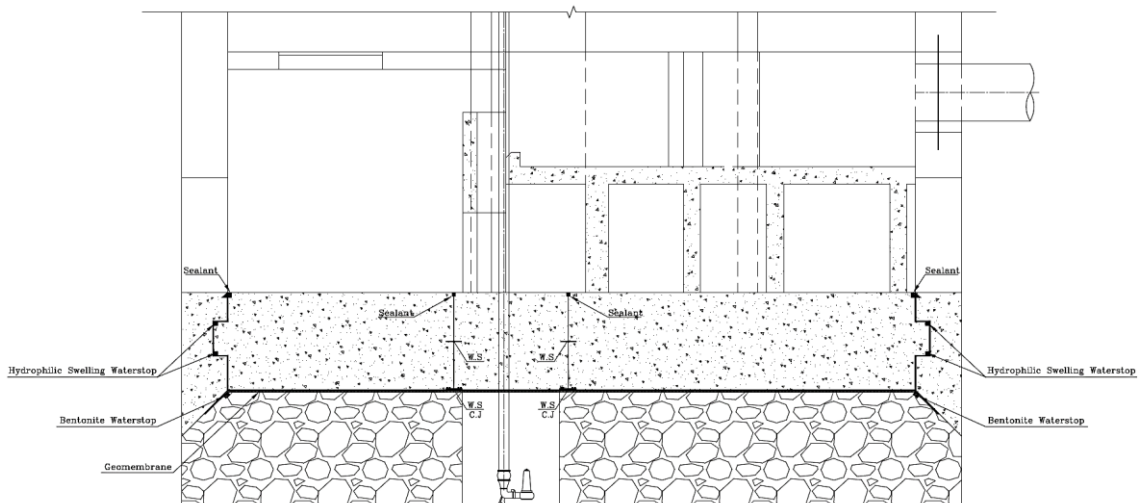


Fig. 4. Construction details of waterstop system for the foundation





طراحی و اجرای سازه‌های بتنی فاضلابی در شرایط آب زیرزمینی بالا با استفاده از روش اجرای از بالا به پایین Top-Down : مطالعه موردی ایستگاه پمپاژ فاضلاب PS2 شهر دورود

بهادر میرزائی^{۱*}، عباس پیراینده^۲، حجت امامی^۳

۱- مهندس طراح سازه و مدیر پروژه طراحی، شرکت مهندسی مشاور طرح و تحقیقات آب و فاضلاب اصفهان، اصفهان، ایران (نویسنده مسئول) bahador.mirzaei@alumni.znu.ac.ir
۲- مدیر عامل شرکت، شرکت مهندسی مشاور طرح و تحقیقات آب و فاضلاب اصفهان، اصفهان، ایران
۳- مدیر واحد محاسبات و طراحی، شرکت مهندسی مشاور طرح و تحقیقات آب و فاضلاب اصفهان، اصفهان، ایران



<https://doi.org/10.22093/wwj.2023.416237.3370>

مطالعه موردی

چکیده

واژه‌های کلیدی:
ایستگاه پمپاژ، فاضلاب،
اجرای از بالا به پایین،
تراز آب زیرزمینی بالا

در این پژوهش، به بررسی مشکلات زیادی که در خصوص طراحی و اجرای یکی از پروژه‌های اجرایی به نام ایستگاه پمپاژ فاضلاب در شهر دورود در شرایط تراز آب زیرزمینی بالا وجود داشت، پرداخته شد. سپس روش‌های مختلف طراحی و اجرای سازه‌های بتنی فاضلابی در معرض تراز آب زیرزمینی بالا بررسی شد. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش خشک‌سازی و گودبرداری با حفر چاه‌های عمیق و نقطه‌ای، سپرکوبی و روش شمع‌کوبی با شمع‌های پیوسته پیرامونی اشاره کرد. پس از بررسی و مشاهده نقاط ضعف روش‌های موجود، روش جدیدی به نام روش اجرای از بالا به پایین Top-Down که برای ساختمان‌ها و چاه‌های با قطر کم ارائه شده بررسی شد. پس از ارزیابی دقیق و مقایسه مزایا و مشکلات هر یک از روش‌های موجود در اجرای سازه با روش اجرای از بالا به پایین در نهایت روش جدید انتخاب شد. مشکلات موجود در روش ارائه شده از جمله آب‌بندی و شرایط اجرای آن اصلاح شد. در نهایت نقشه‌های اجرایی این سازه با استفاده از روش اجرای از بالا به پایین برای اجرا ارائه شد. با ارزیابی‌های انجام شده برتری و کارایی این روش در طراحی و اجرای سازه‌های بتنی فاضلابی در معرض تراز آب زیرزمینی بالا از نقطه‌نظر فنی، اقتصادی، سرعت اجرا و درجه ایمنی نسبت به سایر روش‌ها نشان داده شد.



دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۸

اصلاح: ۱۴۰۳/۳/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۴

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

میرزائی، ب.، پیراینده، ع.، امامی، ح.، ۱۴۰۳، طراحی و اجرای سازه‌های بتنی فاضلابی در شرایط آب زیرزمینی بالا با استفاده از روش اجرای از بالا به پایین Top-Down: مطالعه موردی ایستگاه پمپاژ فاضلاب PS2 شهر دورود.

آب و فاضلاب، ۳۵(۳)، ۴۴-۲۵

<https://doi.org/10.22093/wwj.2023.416237.3370>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



۱- مقدمه

ژئوتکنیک محل احداث پروژه به صورت جدول ۱ است (Kara).
(Azmoon Sazeh Azma, 2020)
بر اساس گزارش ژئوتکنیک محل احداث (Kara Azmoon)
(Sazeh Azma, 2020) و آیین‌نامه ۲۸۰۰ (BHRC, 2014)
طبقه‌بندی زمین از نوع III و شتاب مبنای طرح با توجه به اینکه
محل پروژه در منطقه با خطر نسبی بسیار زیاد قرار می‌گیرد،
۳۵g/۰ توصیه شده است. بر اساس گزارش ژئوتکنیک (Kara)
(Azmoon Sazeh Azma, 2020) با توجه به سطح آب زیرزمینی
بالا و همچنین از آنجایی که سازه ایستگاه پمپاژ در معرض فاضلاب
است، استفاده از سیمان نوع ۵ در اولویت قرار گرفته است
(PBO and BHRC, 2021, ACI 318-19, 2019).

۳- مروری بر پژوهش‌های گذشته

در خصوص طرح و اجرای سازه‌های فاضلابی در شرایط آب
زیرزمینی بالا، پژوهش‌های اندکی انجام شده است. به‌طور کلی با
توجه به پژوهش‌های گذشته روش‌های مختلف اجرای دیگر سازه‌ها
در مجاورت شرایط آب زیرزمینی بالا به شرح زیر است:

۳-۱- خشک‌سازی و کنترل آب زیرزمینی و گودبرداری با
روش حفر چاه‌های عمیق و نقطه‌ای

خشک‌سازی شامل اقداماتی است که می‌تواند به صورت کاهش
سطح آب در خارج از محل پروژه و پایین نگه داشتن سطح آب
زیرزمینی تا زمانی که اقداماتی مانند کارهای بتنی و اجرای طبقات
یا تأسیسات در زیر تراز سطح آب زیرزمینی به پایان برسد، باشد.
این نوع از خشک‌سازی در صورتی قابل انجام است که قبل از آن،
یک بررسی کامل از امکان‌سنجی این روش از نظر آسیب به
عوارض هم‌جوار پروژه انجام شده باشد. زیرا این روش می‌تواند بر
روی چاه‌های مجاور اثر بگذارد، موجب نشست در سازه‌های مجاور
شود و جهت جریان آب‌های زیرزمینی را معکوس و در نتیجه موجب
گسترش آلودگی‌های موجود در آب‌های زیرزمینی به مناطقی که قبل
از آن تحت تأثیر نبوده‌اند، شود (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020).

در صورتی که مصالح نفوذپذیری زیادی داشته و عمق گود نیز
زیاد باشد، استفاده از روش حفر چاه‌های عمیق مؤثر خواهد بود. در

در راستای انجام مطالعات مرحله دوم شبکه جمع‌آوری و انتقال
فاضلاب شهر دورود، ابتدا از محل احداث سازه ایستگاه پمپاژ
فاضلاب PS2 این شهر بازدیدهای میدانی انجام شد. طی
بازدیدهای میدانی تراز آب زیرزمینی بالا مشاهده شد که مشکلات
زیادی برای اجرای سازه در حالت متعارف ایجاد کرد. از این رو
طراح سازه پس از دریافت نتایج آزمایش‌ها و گزارش ژئوتکنیک
به بررسی گزینه‌های مختلف طراحی و اجرای سازه ایستگاه پمپاژ
پرداخت. پس از بررسی گزینه‌های مختلف روش اجرای سازه بالا به
پایین Top-Down به‌عنوان گزینه برتر انتخاب شد و مشکلات
مختلف اجرا و آب‌بندی سازه در حین اجرا اصلاح شد.

۲- منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی ایستگاه پمپاژ فاضلاب PS2 شهر دورود واقع در
استان لرستان است. محدوده و موقعیت محل احداث این سازه در
عکس هوایی شکل ۱ نشان داده شده است.
سازه به صورت دایره‌ای شکل با قطر ۱۲ متر و با فونداسیون از
نوع گسترده بود و عمق سازه درون خاک ۱۴ متر از سطح زمین
طبیعی است.

مطابق گزارش ژئوتکنیک خصوصیات فیزیکی لایه‌های خاک
محل احداث، بر اساس نتایج و سیستم طبقه‌بندی متحد
آزمایش‌های متداول دانه‌بندی، هیدرومتری، حدود روانی و خمیری
بر روی نمونه‌های دست‌خورده، خاک محل عمدتاً شامل توالی
لایه‌هایی با طبقه‌بندی رس با خاصیت خمیری کم (CL) و ماسه
لای دار (SM) است. البته در برخی از اعماق لایه‌های ریزدانه
به صورت لای همراه با ماسه (ML) خود را نشان می‌دهند. لایه‌های
ریزدانه رسی و لای در برخی موارد مقدار قابل توجهی ماسه دارند،
همچنان که لایه‌های ماسه لای دار نیز درصد قابل توجهی از ذرات
ریزدانه را در خود دارند (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020).

بر اساس گزارش ژئوتکنیک محل احداث سازه پروفیل
تحت‌الارضی، زمین محل پروژه به صورت شکل ۲ به‌دست آمده
است (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020).

پارامترهای مکانیکی تخمینی لایه‌های خاک بر اساس گزارش



Fig. 1. Satellite image of the project in Google Earth

شکل ۱- عکس هوایی از محدوده محل پروژه

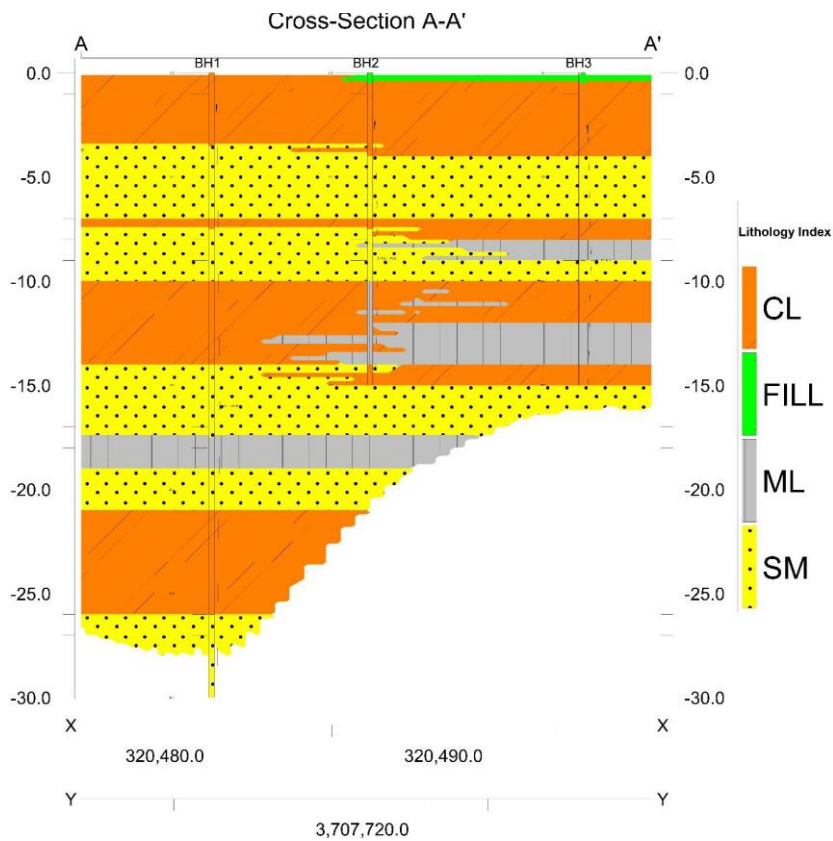


Fig. 2. Subsoil profile (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020)

شکل ۲- پروفیل تحت الارضی زمین در محل پروژه (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020)



جدول ۱- پارامترهای مکانیکی تخمینی لایه‌های خاک (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020)

Table 1. Mechanical properties of the soil layers (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020)

Depth (m)	Material	C' (kg/cm ²)	φ' (°)	C' (kg/cm ²)	φ' (°)	γ _{wet} (g/cm ³)	E (kg/cm ²)	ν
0.5-4	CL	0.2	17	0.35	3	1.84	100-150	0.45-0.5
4-7	SM	0.1	25	0.20	5	1.91	50-100	0.3-0.33
7-8.5	CL	0.2	23	0.40	3	1.85	200-250	0.45-0.5
8.5-10	SM	0.1	28	0.45	5	1.95	150-200	0.3-0.33
10-19	CL	0.2	27	0.55	6	1.94	250-300	0.45-0.5
19-21	SM	0.15	35	0.45	5	1.99	250-300	0.3-0.33
21-26	CL	0.3	29	0.70	7	1.98	300-350	0.45-0.5
26-30	SM	0.15	35	0.45	5	1.99	300-350	0.3-0.33



Fig. 3. Sheet pile Wall (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020)

شکل ۳- دیوار حائل سپرکوبی شده (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020)

به پایین انداختن آب در کف گود با کوبیدن سپر تا اعماق مشخصی از زیر تراز استقرار فونداسیون بهره‌مند شد. در این روش ابتدا سپرها تا عمق معلوم کوبیده شده و سپس خاک جلوی سپر برداشته و سازه اجرا می‌شود (شکل ۳). (Kara BS8002, 1994, Das, 2014, Azmoon Sazeh Azma, 2020, Bowles and Gou, 1996, MPO, 2005, BHRC, 2020d)

مزایا:

- سرعت اجرای کار بسیار زیاد است؛
- درجه ایمنی کار بسیار بالا است؛
- عمر سرویس سیستم نگهدارنده در بالا یا پایین آب زیرزمینی، با
- حداقل تمهیدات حفاظتی، طولانی است؛
- امکان استفاده مجدد از مصالح سپری وجود دارد؛
- فضای داخل گود کمتر اشغال می‌شود (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020)

صورت کم عمق بودن گود و نفوذپذیری کمتر مصالح (مانند سیلت‌ها و ماسه‌های ریز) می‌تواند از چاهک‌های نقطه‌ای با تعداد زیاد استفاده کرد. در صورت لزوم می‌تواند از دو ردیف چاهک استفاده کرد که مستلزم گودبرداری به صورت شیب‌دار یا پله‌ای است (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020).

۲-۳- دیوار حائل با سپرکوبی^۱

یکی دیگر از روش‌های حفاظت از دیواره گود، کوبش سپرها است. سپرها بیشتر در محوطه‌های دریایی و رودخانه‌ها استفاده می‌شوند. سپرها معمولاً از جنس فولاد، با نیم‌رخ دوزنقه‌ای شکل هستند. در این پروژه با توجه به بالا بودن سطح آب زیرزمینی و نفوذپذیری کم خاک محل، از این روش می‌توان ضمن ایجاد یک حائل، نسبت

¹ Sheet Pile Wall



در این پروژه با توجه به سطح آب زیرزمینی می‌توان از روش اجرای دیوار با شمع‌های پیوسته به‌منظور کنترل نشست آب و همچنین کنترل مناسب جابه‌جایی توده خاک ضعیف و اشباع بهره‌مند شد. شکل شماتیک روش اجرای سیستم شمع‌های پیوسته در شکل ۴ نشان داده شده است.

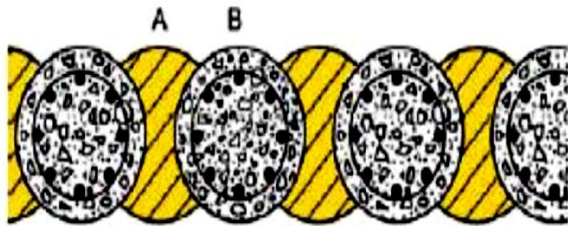


Fig. 4. Schematic figure for secant walls

شکل ۴- شکل شماتیک روش اجرای سیستم شمع‌های پیوسته

این روش به دو صورت قابل اجرا است:

- ۱- (دیوار با شمع‌های سخت-نرم) بتن مسلح-مخلوط سیمان و بنتونیت
 - ۲- (دیوار با شمع‌های سخت-سفت) بتن مسلح-بتن غیرمسلح.
- در روش نخست ابتدا شمع‌هایی از جنس بتن ضعیف به‌طور یک‌درمیان حفاری و اجرا می‌شوند و سپس با رعایت هم‌پوشانی، شمع‌های سازه‌ای و اصلی در حد فاصل شمع‌های اولیه اجرا می‌شوند تا یک زنجیره پیوسته و آب‌بند از بتن به دست آید. در روش دوم ابتدا شمع‌هایی از جنس بتن با مقاومت زیاد و یا در برخی موارد بتن مسلح، به‌طور یک‌درمیان حفاری و اجرا می‌شوند و سپس با فاصله مناسب، شمع‌های سازه‌ای و اصلی در حد فاصل شمع‌های اولیه اجرا می‌شوند. برای سوراخ کردن محل شمع‌های ثانویه در میان شمع‌های اولیه و اجرای آنها، از ماشین‌آلات حفاری دورانی که مجهز به سرمته‌های مخصوص هستند، استفاده می‌شود.

نحوه گودبرداری با این روش در شکل ۵ نشان داده شده است. (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020, Bowles and Gou, 1996)

مزایا:

- ایمنی سیستم عملیات اجرایی بسیار بالا است؛
- در احجام زیاد گودبرداری، هزینه عملیات با این روش کاهش می‌یابد؛

معایب:

- کوبیدن سپرها در زمین‌های سنگی و یا خاک‌های بسیار متراکم به‌سختی انجام‌پذیر است؛
 - سپرکوبی در اعماق بیش از ۱۰ متر با دشواری روبه‌رو خواهد بود؛
 - در محیط‌های شهری به دلیل وجود تأسیسات زیربنایی شهری، ایجاد لرزش و سروصدای زیاد و یا نشست خاک در اثر ارتعاشات، عملیات سپرکوبی با محدودیت مواجه است؛
 - تهیه سپر استاندارد نسبت به روش‌های خشک‌سازی با چاه عمیق هزینه‌بر بوده و از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیستند؛
 - به دلیل مسئله کمانش و نیروهای مقاوم ناشی از اصطکاک جدار، استفاده از این روش برای پایدارسازی گودهای با عمق زیاد با محدودیت مواجه خواهد بود؛
 - در این روش به دستگاه سپرکوب، که به هر حال یک دستگاه ویژه می‌باشد، نیاز است؛
 - در قیاس با روش‌های ساده‌تر، اجرای این روش به نیروهای با تخصص بیشتر نیاز دارد (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020).
- در این پروژه با توجه به اینکه عمق سازه درون خاک ۱۴ متر بوده و هزینه نیز بسیار مهم بود، این روش گزینه مناسبی نبود.

۳-۳- گودبرداری با سیستم شمع‌کوبی با شمع‌های پیوسته پیرامونی^۱

در این روش، در پیرامون زمینی که قرار است گودبرداری شود، در فواصل معینی از هم، شمع‌هایی اجرا می‌شود. شمع‌های بتنی را می‌توان به‌صورت پیش‌ساخته یا درجا ریز اجرا کرد. شمع‌ها فشار جانبی خاک را به‌صورت تیرهای طره‌ای تحمل می‌کنند. طول گیرداری لازم در انتهای شمع‌ها بر اساس ملاحظات پایداری و تغییر شکل‌های مجاز دیواره گود تعیین می‌شود. پس از اجرای شمع‌ها، می‌توان عملیات گودبرداری را اجرا کرد. در صورت لزوم باید شمع‌ها را در امتداد دیواره گود مهاربندی کرد (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020, Bowles and Gou, 1996).

برای اجرای شمع‌های درجاریز، سه شیوه رایج وجود دارد. این سه روش عبارت است از اجرای دیوار با شمع‌های ناپیوسته، پیوسته و مماسی.

¹ Secant Walls – Hard/Soft or Hard/Firm



دکل بلند در کنار و یا داخل سازه انجام شده و به صورت مرحله به مرحله ابتدا دیوارها اجرا شده و به پایین برده می‌شود و پس از رسیدن سازه به تراز استقرار خود، فونداسیون و دیگر اعضای سازه‌ای آن اجرا می‌شود. شکل شماتیک مراحل و روش اجرای از بالا به پایین Top-Down برای چاهک‌های با قطر کم (کیسون) در شکل ۶ و برای ساختمان‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است.

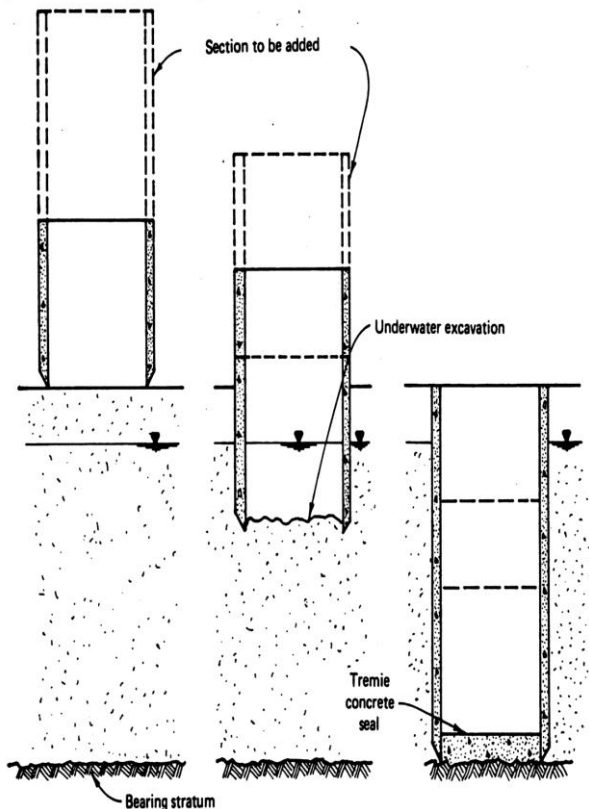


Fig. 6. Schematic sequence of caisson installation (Nemati, 2005)

شکل ۶- روش اجرای از بالا به پایین در چاهک‌های با قطر کم (کیسون) (Nemati, 2005)

مزایا:

- سرعت عملیات اجرایی بسیار بالا است؛
- نیاز به هیچ‌گونه سازه جانبی برای پایداری شیب جداره حفاری نیست؛
- هزینه اجرا نسبت به سایر روش‌های پایدارسازی مناسب‌تر است؛
- در ارتفاع گودبرداری زیاد نسبت به سایر روش‌ها بسیار کارآمد است.

گاهی اوقات می‌توان از شمع‌ها به عنوان سازه نگهدارنده دائم (مانند دیوار حائل) یا بخشی از آن نیز استفاده کرد (Kara Azmoon, 2020) (Sazeh Azma, 2020)



Fig. 5. Secant walls

شکل ۵- شمع‌های پیوسته پیرامونی

معایب:

- در صورتی که ارتفاع گودبرداری زیاد باشد، باید از مقاطع سازه‌ای قوی‌تری برای اجرای کار استفاده کرد؛
 - اجرای شمع‌ها هزینه‌بر بوده و نسبت به دیگر روش‌ها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیستند؛
 - برای اجرای شمع‌های سازه‌ای نیاز به ماشین‌آلات حفاری دورانی است (Kara Azmoon Sazeh Azma, 2020).
- با توجه به اینکه در این پروژه پارامتر اقتصادی و هزینه بسیار مهم بود، این روش نیز گزینه مناسبی نبود.

۳-۴- روش اجرای از بالا به پایین^۱

در این روش که در ابتدا برای چاهک‌های با قطر کم یا صندوقه هوا (کیسون)^۲ در پی زیر پی پایه پل در شرایط آب زیرزمینی بالا اجرا شد (Nemati, 2005) و سپس در اجرای ساختمان‌ها نیز به کار گرفته شد (Li et al., 2014)، به این صورت است که سازه به صورت پیش ساخته به صورت مرحله به مرحله در بالای زمین اجرا شده و حفاری توسط ماشین‌آلات خاک برداری از جمله بیل‌های

¹ Top-Down Method

² Caisson



به پایین، ارزیابی و مقایسه شد. پس از همه بررسی‌ها روش اجرای از بالا به پایین به دلایل زیر به‌عنوان گزینه برتر نسبت به سایر روش‌ها انتخاب شد:

- سرعت عملیات اجرایی بسیار بالا؛
- هزینه اجرای اقتصادی‌تر به دلیل عدم نیاز به پایدارسازی شیب جداره حفاری یا سازه نگهدارنده؛
- کارآمد بودن آن در ارتفاع گودبرداری زیاد نسبت به سایر روش‌ها؛
- درجه ایمنی بیشتر اجرا.

لازم به ذکر است در استفاده از این روش باید تمهیدات و ملاحظات فنی لازم برای آب‌بندی سازه مدنظر قرار گیرد که در بخش آب‌بندی سازه به آن پرداخته شده است.

۴- مدل‌سازی و طراحی سازه

مدل‌سازی هندسی و طراحی سازه ایستگاه پمپاژ در نرم‌افزار SAP2000 v21.0.2 (CSI, 2017) انجام شد. مدل هندسی سازه در این نرم‌افزار در شکل ۸ نشان داده شده است.

برای تحلیل، بارگذاری و طراحی این سازه و کنترل عرض ترک و همچنین مشخصات فنی مصالح در معرض خوردگی فاضلاب از آیین‌نامه‌های معتبر طراحی سازه‌های محیط‌زیست و فاضلابی مانند استاندارد ACI-350 (ACI 350-06, 2006) استفاده شد. در این زمینه همچنین ضوابط معتبر داخلی همچون ضوابط طرح و محاسبه مخازن آب زمینی (نشریه ۱۲۳) (MPO, 2016) استفاده شد. از دیگر آیین‌نامه‌های معتبر همچون مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (BHRC, 2020a)، استاندارد ۲۸۰۰ (BHRC, 2014) و استاندارد ASCE/SEI 7-16 (ASCE/SEI 7-16, 2016) برای ضوابط بارگذاری سازه در حالت استاتیکی و لرزه‌ای استفاده شد.

برای طراحی سازه بتنی و دیگر ضوابط بتن استاندارد ACI-318 (ACI 318-19, 2019)، مبحث نهم مقررات ملی ساختمان (BHRC, 2020b) و آیین‌نامه بتن ایران (نشریه ۱۲۰) (PBO and BHRC, 2021) استفاده شد. در طراحی بخش‌های فولادی سازه و مشخصات فولاد مصرفی مبحث دهم مقررات ملی (BHRC, 2020c) استفاده شد.

نتایج حاصل از تحلیل سازه در نرم‌افزار SAP2000 شامل تنش‌های خمشی M11 و M22 در شکل ۹ نشان داده شده است.

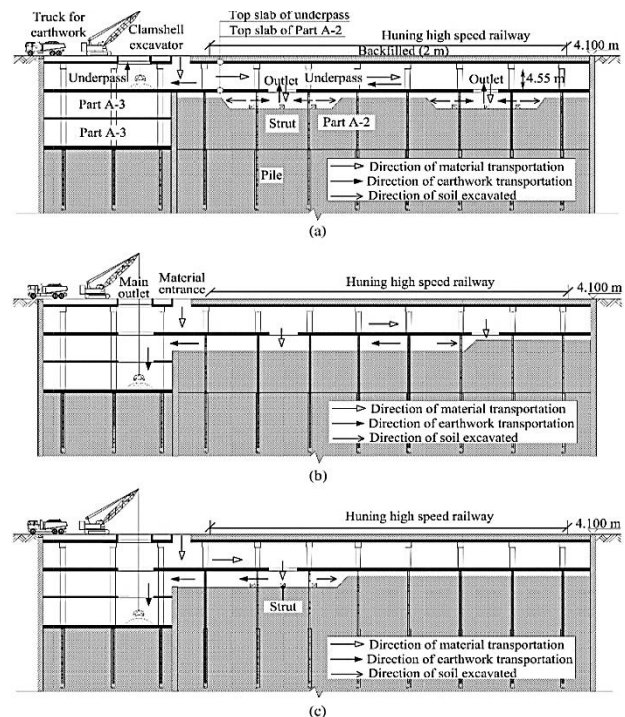


Fig. 7. Conventional excavation schemes for the Top-Down Method in buildings (Li et al., 2014)

شکل ۷- روش معمول حفاری و اجرای از بالا به پایین در ساختمان‌ها (Li et al., 2014)

همان‌طور که اشاره شد، به‌طور کلی این روش برای چاه‌های با قطر کم در شرایط آب زیرزمینی بالا و ساختمان‌ها طراحی و اجرا شده و هنوز برای سازه‌های فاضلابی بزرگ مقیاس که در آنها مباحث خوردگی فاضلاب، کنترل ترک و آب‌بندی سازه مطرح است، در مرحله طراحی و اجرا قرار نگرفته است. در این پژوهش سعی بر این بود که کلیه معایبی که در زیر به آنها اشاره شده است، بررسی و حل شود.

معایب:

- برای آب‌بندی سازه در این روش باید ملاحظات ویژه‌ای انجام شود؛
 - برای اعماق زیاد حفاری نیاز به بیل‌های مکانیکی دکل بلند است؛
 - در سازه‌های با ابعاد بزرگ و با عمق زیاد باید نیروی برکنش با تمهیدات مناسب کنترل شود.
- معایب و مزایای کلیه روش‌های موجود برای سازه‌های بتنی فاضلابی در معرض تراز آب زیرزمینی بالا با روش اجرای از بالا

(شکل ۱۲).

سپس آرماتوربندی و بتن‌ریزی پارت‌های بعدی در هر مرحله در بالای سازه انجام شد و دوباره حفاری توسط بیل مکانیکی از داخل سازه انجام شد تا سازه تحت وزن خود پایین‌تر برود (شکل ۱۳).

این کار تا رسیدن به تراز نهایی استقرار سازه در نقشه‌های اجرایی ادامه می‌یابد تا سازه تحت وزن خود به تعادل و پایداری برسد و در نهایت شاقولی قطعات دیوار با دوربین نقشه‌برداری کنترل شد (شکل ۱۴).

به‌طور معمول در صورتی که حفاری از اطراف سازه توسط بیل مکانیکی از همه جوانب سازه به‌صورت یکسان انجام شود قطعات دیوار تحت وزن خودشان به پایین حرکت می‌کنند. در این حالت سازه به‌صورت شاقول پیاده و اجرا خواهد شد. در اجرای این سازه در عمل نیز مشاهده شد، سازه به‌صورت متعادل و شاقول تحت وزن خود به پایین حرکت می‌کند. در نهایت زمانی که دیوارها بر اساس نقشه‌های اجرایی به تراز استقرار خود رسیدند، شاقولی سازه توسط دوربین‌های نقشه‌برداری کنترل شد. مشاهدات و کنترل‌های نقشه‌برداری نشان داد سازه تحت وزن خود به‌صورت متعادل و شاقول پیاده شده است. در نهایت پس از کنترل شاقولی دیوارها، پارت آخر دیوار پاشنه‌ای که برای کنترل فشار برکنش طراحی شده بود، در تراز زمین طبیعی اجرا شد و پرسازی روی پاشنه دیوارها انجام شد تا به پایداری و تعادل سازه نیز کمک کند (شکل ۱۵).

در صورتی که در اجرای دیوارهای سازه و هدایت دیوارها به پایین هرگونه ناشاقولی و عدم تعادل در دیوار مشاهده شود می‌توان از روش‌هایی زیر همچون جک‌های هیدرولیکی و یا مهارهای افقی برای ایجاد تعادل و شاقولی سازه استفاده کرد (شکل ۱۶).

پس از کنترل تعادل و شاقولی سازه و اجرای پاشنه‌های پیرامونی سازه، فونداسیون سازه اجرا شد که به دلیل تراز آب زیرزمینی بالا در محل فونداسیون به خاطر تجمع آب در کف، ابتدا چاله پمپاژ در زیر فونداسیون ایجاد شد و سپس در حین تخلیه آب چاهک توسط پمپ، بتن‌ریزی فونداسیون با جزئیات اجرایی نشان داده شده در شکل ۱۷ انجام شد.

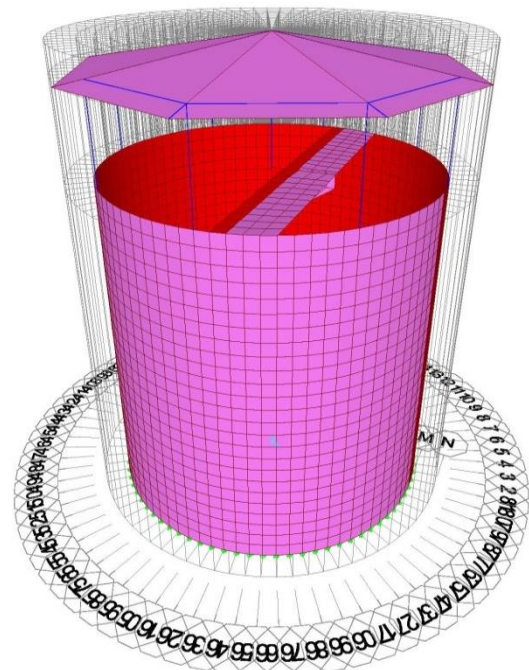


Fig. 8. Structural model in SAP2000
شکل ۸ - مدل هندسی سازه در نرم‌افزار SAP2000

۵- مراحل اجرای سازه

به‌طور کلی اجرای سازه ایستگاه پمپاژ در ۴ مرحله انجام شد:

۱- اجرای دیوارها؛

۲- اجرای فونداسیون؛

۳- اجرای اعضای سازه‌ای داخلی شامل دیوارها و ستون‌ها؛

۴- اجرای سقف سازه فولادی روی ایستگاه پمپاژ.

ترتیب و روش اجرای کل سازه شامل دیوارها، فونداسیون، اعضای سازه‌ای داخلی شامل دیوارها و ستون‌ها و اجرای سقف سازه فولادی روی ایستگاه پمپاژ به‌صورت مرحله‌به‌مرحله به همراه توضیحات در شکل‌های بعد نشان داده شده است.

دیوارهای سازه در پارت‌های ۲ تا ۳ متری به‌صورت پیش‌ساخته بتنی در محل احداث ایستگاه پمپاژ اجرا شد که در اولین پارت دیواره به‌منظور فرو رفتن راحت‌تر دیوار در خاک از انتهای دیوار به‌صورت گوه‌ای با جزئیات اجرایی به‌صورت شکل‌های ۱۰ و ۱۱ طراحی شد.

سپس توسط بیل مکانیکی حفاری از داخل اولین حلقه دیوار از روی زمین انجام شد تا قطعات سازه تحت وزن خود پایین‌تر بروند



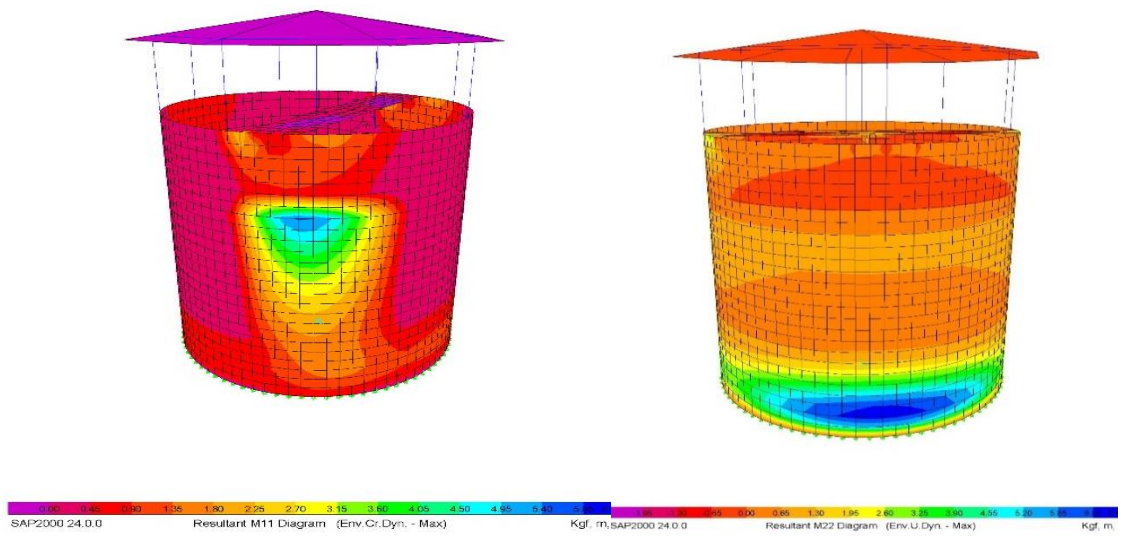


Fig. 9. Resultant M11 & M22 Diagram in SAP2000
شکل ۹- دیگرام تنش‌های خمشی M11 و M22 در نرم‌افزار SAP2000



Fig. 10. First part of the wall with wedge-shaped section
شکل ۱۰- اولین پارت دیوار با مقطع گوه‌ای شکل

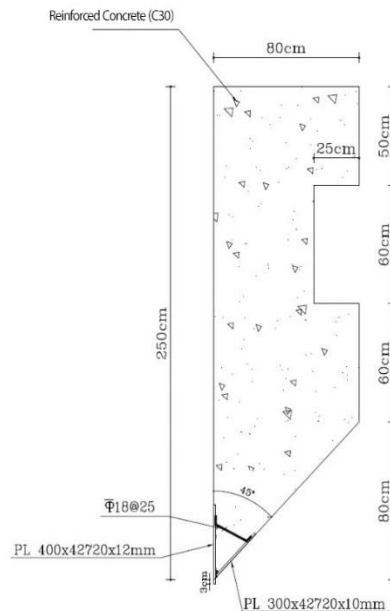


Fig. 11. Architectural detail of first part of the wall with wedge-shaped section

شکل ۱۱- جزئیات معماری اولین پارت دیوار با مقطع گوه‌ای شکل



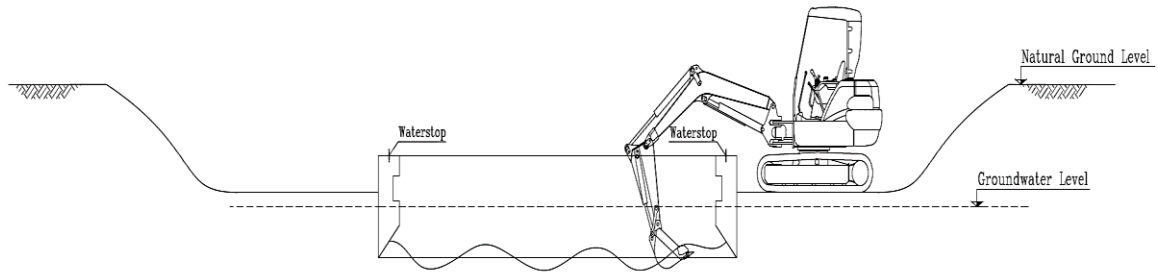


Fig. 12. Construction of the first part of the wall with wedge-shaped section

شکل ۱۲- اجرای اولین پارت دیوار با مقطع گوه‌ای شکل

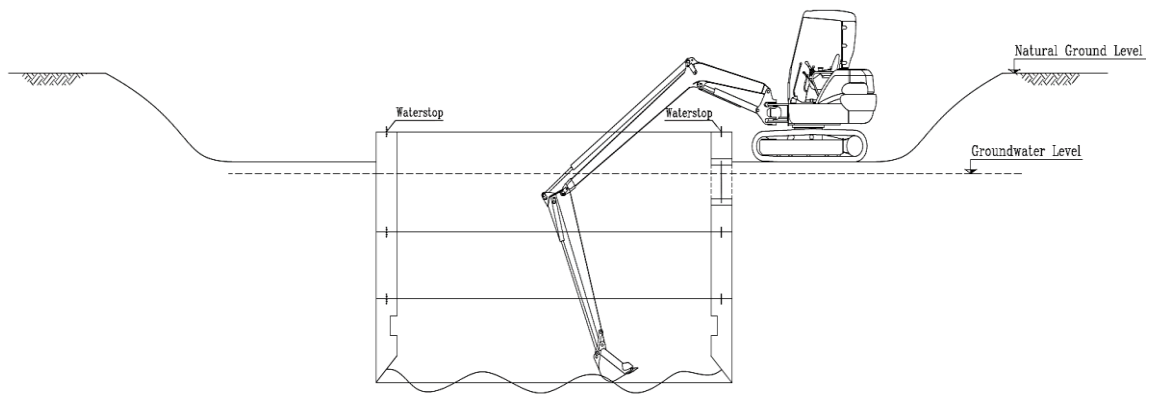


Fig. 13. Construction of the next parts of the wall

شکل ۱۳- اجرای پارت‌های بعدی دیوار

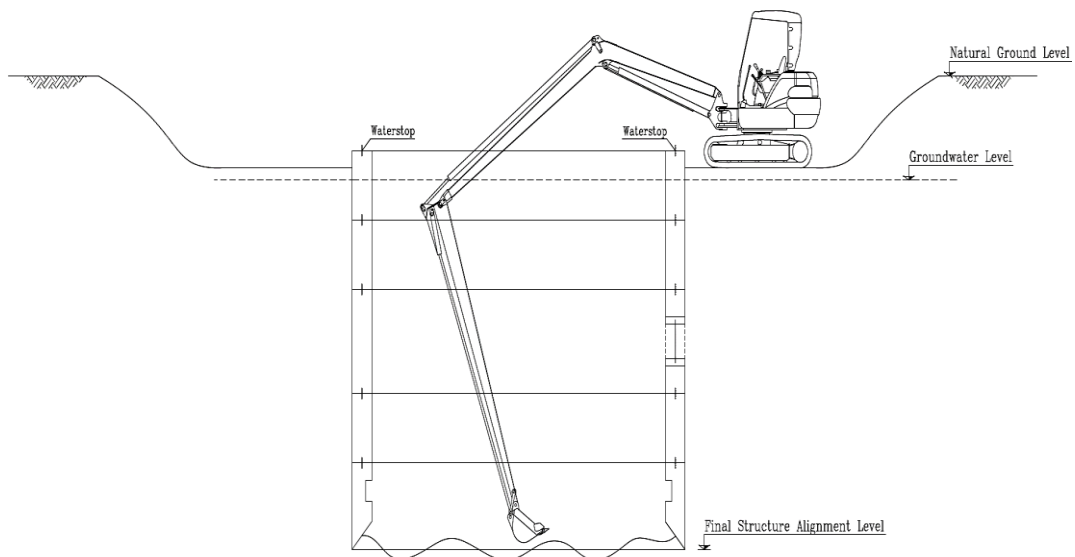


Fig. 14. Construction of the next parts of the wall to reach structural foundation level

شکل ۱۴- اجرای پارت‌های بعدی دیوار تا رسیدن به تراز استقرار



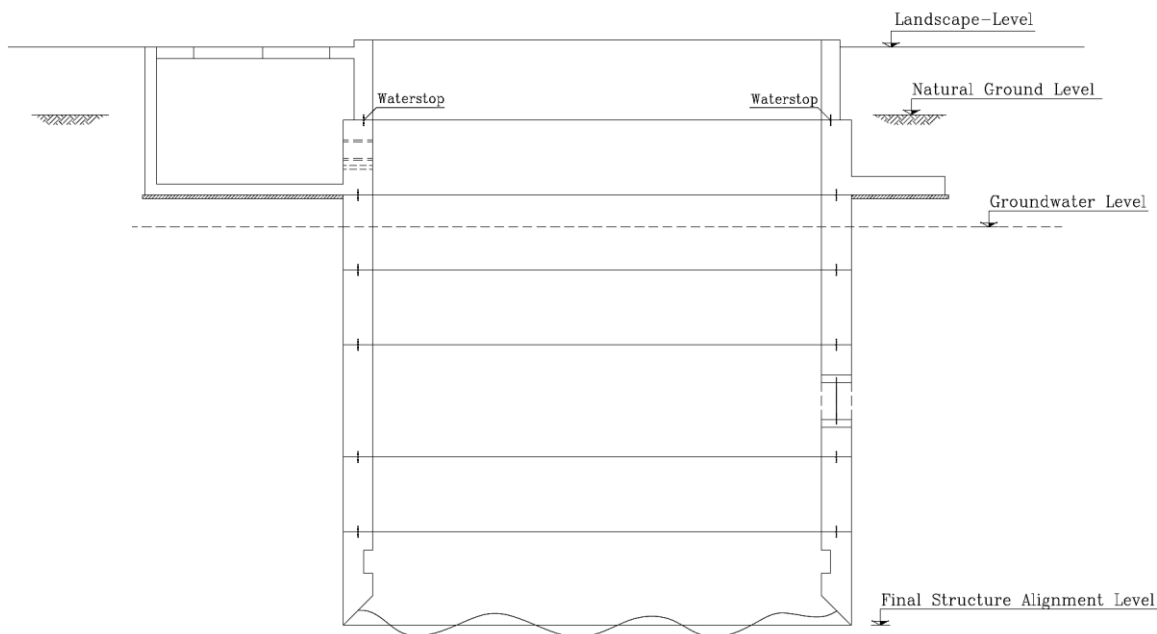


Fig. 15. Construction of all parts of the wall and circumferential structure

شکل ۱۵- اجرای همه پارت‌های دیوار و پاشنه پیرامونی

در مرحله بعد سقف سازه فولادی روی ایستگاه پمپاژ به همراه کلیه تأسیسات و تجهیزات داخلی سازه اجرا شد. شکل نهایی سازه اجرا شده در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

در حین اجرای فونداسیون آرماتورهای انتظار دیوارها و ستون‌های داخلی و دستگاه پله نیز قرار داده شد و در مرحله بعد کلیه دیوارها و ستون‌های داخلی و دستگاه پله اجرا شدند (شکل ۱۸).

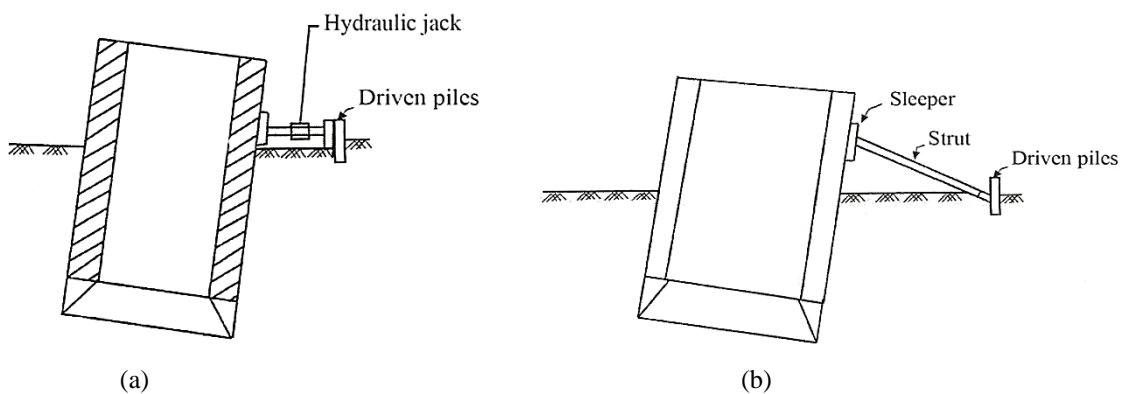


Fig. 16. Stabilizing the structure using a) hydraulic jack and b) strutting of the wall

شکل ۱۶- ایجاد تعادل و شاقولی در دیوارهای سازه با استفاده از (a) جک‌های هیدرولیکی و (b) مهارهای افقی



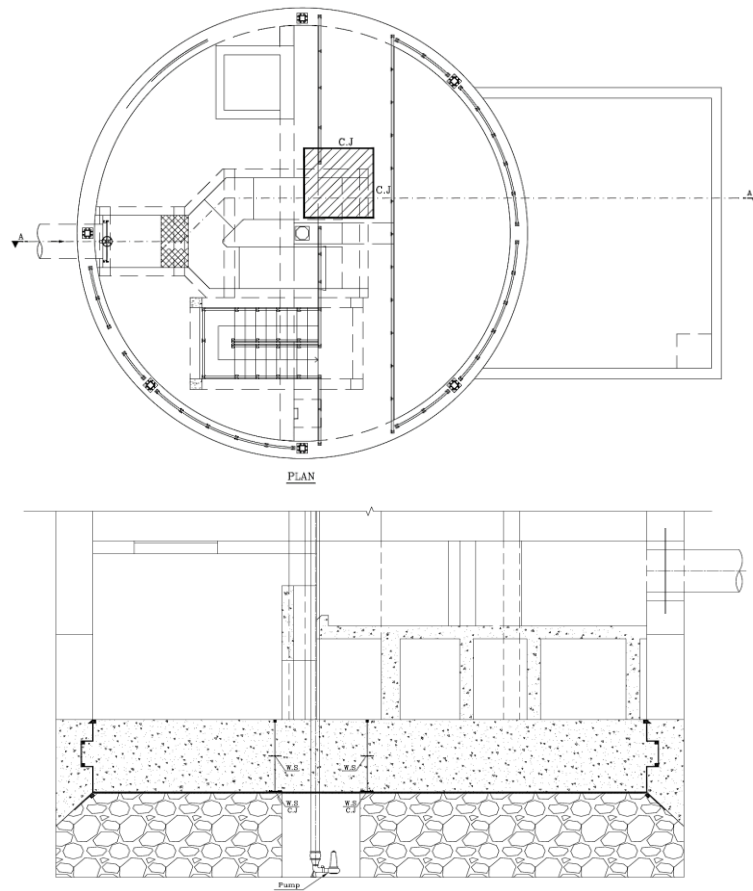


Fig. 17. Construction details of foundation

شکل ۱۷- جزئیات اجرایی فونداسیون سازه

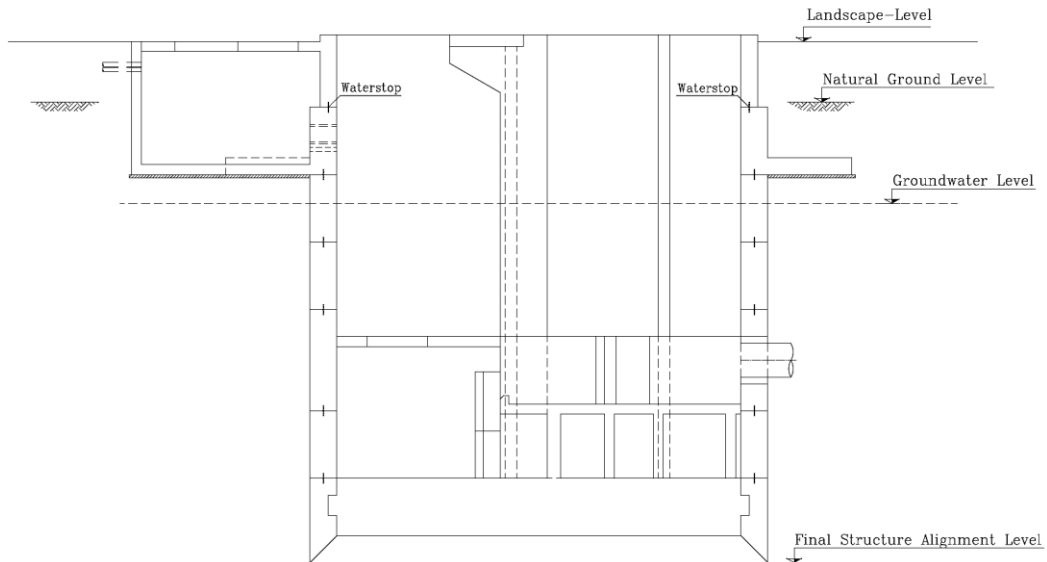


Fig. 18. Construction of interior walls and columns

شکل ۱۸- اجرای دیوارها و ستون‌های داخلی



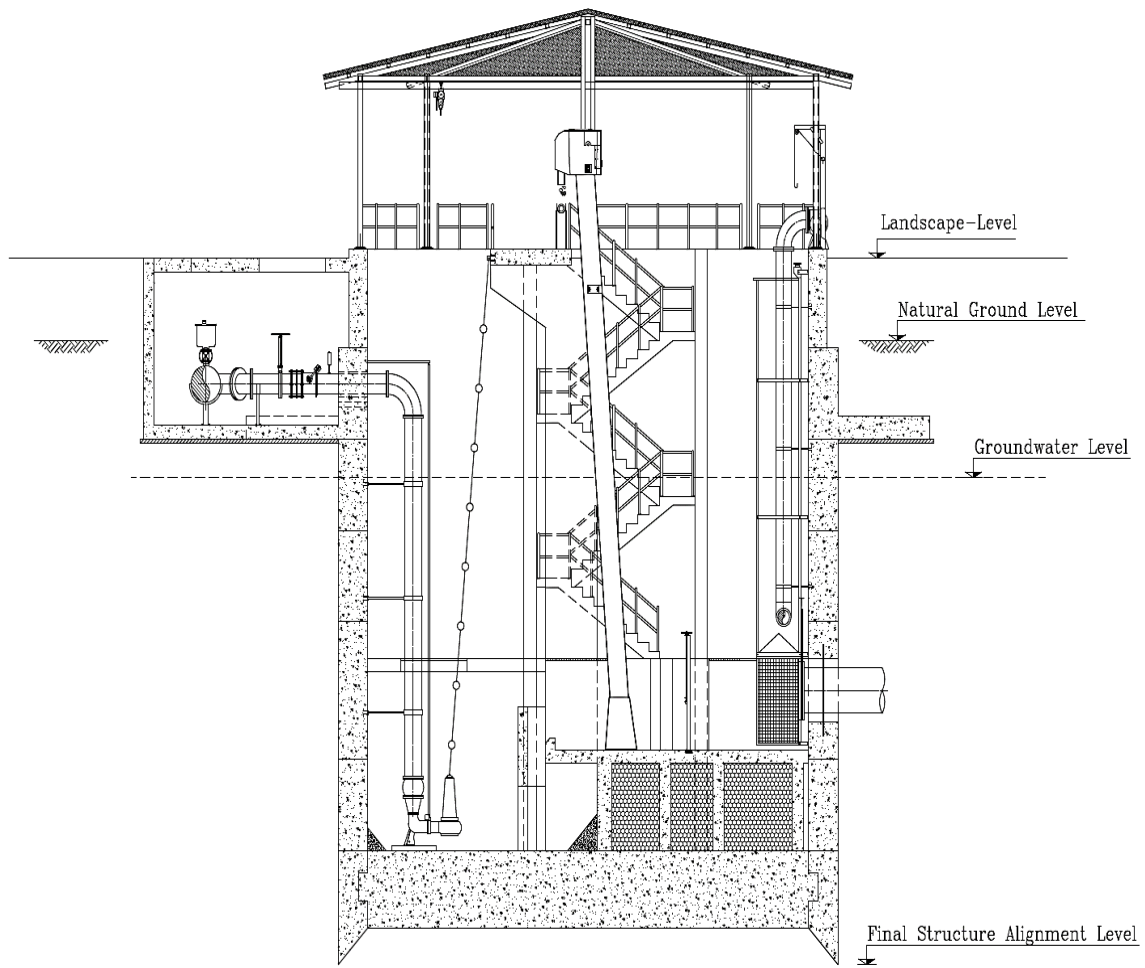


Fig. 19. Final constructed structure

شکل ۱۹- سازه اجرا شده نهایی

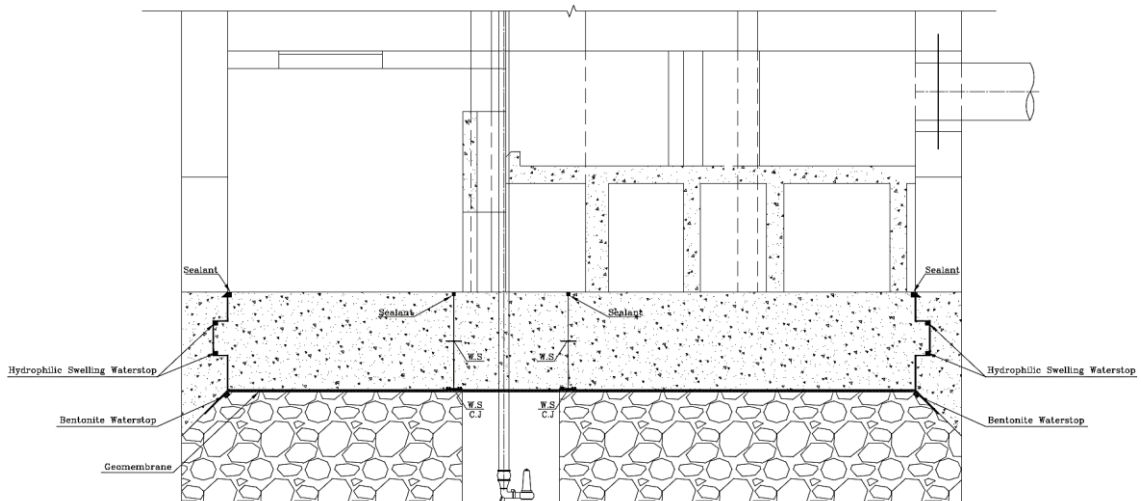


Fig. 20. Construction details of waterstop system for foundation

شکل ۲۰- جزئیات اجرایی سیستم آب‌بندی فونداسیون



۶- کنترل فشار برکنش^۱

با توجه به تراز آب زیرزمینی بالا در این سازه و همچنین ابعاد بزرگ و عمق زیاد سازه فشار برکنش باید کنترل شود (ACI 350-06, 2006). با توجه به اینکه در تراز ۳ متری زمین دیوارهای بتنی به صورت درجا اجرا می‌شوند و همچنین با توجه به محاسبات انجام شده برای کنترل فشار برکنش، وزن سازه به تنهایی قادر به تحمل فشار برکنش نیست. از این رو برای کنترل این فشار ضمن افزایش متناسب وزن سازه، در تراز ۳ متری زمین (بالا تر از تراز آب زیرزمینی) پاشنه‌ای در پیرامون دیوار محاسبه و طراحی شد. از وزن خاک روی این پاشنه نیز برای کنترل فشار برکنش استفاده شد. در شکل ۱۵ پاشنه طراحی شده برای سازه نشان داده شده است.

۷- آب‌بندی سازه

به منظور آب‌بندی سازه در همه پارت‌های ۲ متری دیوارهای سازه از واترستاپ‌های نواری پی‌وی‌سی^۲ استفاده شد (شکل ۱۵) و در محل فونداسیون سازه و اتصال آن به دیوار از ترکیب واترستاپ‌های بتنونیته و هیدروفیلی^۳ مطابق جزئیات اجرایی آب‌بندی به صورت شکل ۲۰ استفاده شد.

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روش‌های مختلف طراحی و اجرای سازه‌های بتنی فاضلابی در معرض تراز آب زیرزمینی بالا با توجه به حساسیت آب‌بندی این سازه‌ها بررسی شد. پس از بررسی‌های فنی و اقتصادی روش اجرایی از بالا به پایین Top-Down برای سازه‌های بتنی فاضلابی در معرض تراز آب زیرزمینی بالا به عنوان گزینه برتر انتخاب شد. این روش از نظر سرعت عملیات اجرایی بسیار زیاد، درجه ایمنی بیشتر کار و هزینه اجرای اقتصادی‌تر به خاطر عدم نیاز به پایدارسازی شیب جداره حفاری یا سازه نگهبان و کارآمد بودن آن در ارتفاع گودبرداری زیاد نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد. همچنین لازم است در این روش تمهیدات و ملاحظات فنی لازم برای آب‌بندی سازه در حین اجرای آن مدنظر قرار گیرد که در این پژوهش به آنها اشاره شد.

۹- قدردانی

نویسندگان از آقایان مهندسین ایرانی، کریمی، شیخ انصاری، فاضلی و خانم مهندس حاجیان برای همکاری در انجام این پروژه قدردانی می‌کنند.

¹ Uplift

² PVC Waterstop

³ Hydrophilic Swelling Waterstop

References

- American Concrete Institute, 2006. *ACI 350-06, Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures*. USA. [\[Link\]](#)
- American Concrete Institute, 2019. *ACI 318-19, Building Code Requirements for Structural Concrete*. USA. [\[Link\]](#)
- American Society of Civil Engineers, 2016. *ASCE/SEI 7-16, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. USA. <https://doi.org/10.1061/9780784414248>.
- British Standards Institution, 1994. *BS 8002, Code of Practice for Earth Retaining Structures (AMD 8851) (AMD 12062)*. [\[Link\]](#)
- Bowles, J. E. and Gou, Y., 1996. *Foundation Analysis and Design*, (Vol.5, P.127), McGraw-Hill, New York, USA. [\[Link\]](#)
- Computers & Structures, Inc., 2017. *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000*, Berkeley, California, USA. [\[Link\]](#)
- Das, B. M., 2014. *Principles of Foundation Engineering*, 8th Edition, Cengage Learning, Boston. MA, USA. [\[Link\]](#)



- Kara Azmoon Sazeh Azma Consulting Engineering Co., 2020. *Geotechnical Report for Pump Station No. 2 in Dorood City*. (In Persian)
- Li, M. G., Chen, J. J., Xu, A. J., Xia, X. H. and Wang, J. H., 2014. Case study of innovative top-down construction method with channel-type excavation. *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 140(5), 05014003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000828](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000828).
- Management and Planning Organization (MPO), Ministry of Energy, Bureau of Technical, Engineering, Social and Environmental Standards of Water and Wastewater, 2016. *Design and Analysis of Ground Concrete Water Reservoirs (Code No. 123). (First Revision)*. (In Persian) [[Link](#)]
- Management and Planning Organization (MPO), Ministry of Energy, Bureau of Technical, Engineering, 2005. *Guideline for Design of Retaining Walls. No. 308. (Second Revision)*. (In Persian) [[Link](#)]
- Nemati, K. M. Tokyo Institute of Technology, Department of Civil Engineering, ATCE-II, Advanced Topics in Civil Engineering, 2005, *Construction Dewatering and Ground Freezing*, Tokyo, Japan.
- Plan and Budget Organization (PBO), Road, Housing & Urban Development Research Center (BHRC), 2021. *Iranian Concrete Code No. 120. 3 Volumes (Second Revision)*. (In Persian) [[Link](#)]
- Road, Housing & Urban Development Research Center (BHRC), 2014. *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Building, Standard 2800, 4th Edition*. (In Persian) [[Link](#)]
- Road, Housing & Urban Development Research Center (BHRC), 2020a. *Iranian National Building Regulations No. 6*. (In Persian) [[Link](#)]
- Road, Housing & Urban Development Research Center (BHRC), 2020b. *Iranian National Building Regulations No. 9*. (In Persian) [[Link](#)]
- Road, Housing & Urban Development Research Center (BHRC), 2020c. *Iranian National Building Regulations No. 10*. (In Persian) [[Link](#)]
- Road, Housing & Urban Development Research Center (BHRC), 2020d. *Iranian National Building Regulations No. 7*. (In Persian) [[Link](#)]

