



Numerical Simulation of Pile Group Behavior by Proposed Optimum Mix Design of Plastic Concrete

M. Taghdisi Ali¹, M. Khabazian^{2*}, S. M. Sajjadi Attar³

¹ Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran

² Faculty member of Islamic Azad University of Bojnourd, Bojnourd, Iran

³ Montazeri College of Mashhad, Mashhad, Iran

ABSTRACT: Plastic concrete is a type of concrete that usually has high ductility and low permeability and it can be used in the construction of tangential piles in excavations that have a high groundwater level. In many cases, the project conditions for using plastic concrete with a proper mixing plan are not considered. The aim of this research is to present the optimal mixing plan in terms of mechanical and economic characteristics for plastic concrete piles. For this purpose, five different mix designs were considered for plastic concrete and the properties were evaluated. Finally, the group of tangential piles, including structural and plastic concrete piles with strut, was simulated in the vicinity of the deep excavation and the deformation and flow rate passing through the excavation wall were investigated. In the two-dimensional simulation, it is not possible to consider the characteristics of the plastic concrete pile in the modeling plane and check the deformation of the excavation wall between struts. For this reason, the simulation was done three-dimensionally. Results showed that if the groundwater level is kept constant, water infiltration into the project area is very low due to the very low permeability of plastic concrete piles and the subsidence and deformation created at the top of the piles as well as the swelling of the excavation bed is less than when the groundwater level is lowered. Also, by increasing the permeability of plastic concrete piles and soil, the flow rate through the excavation wall increases.

Review History:

Received: Jun. 26, 2022

Revised: Aug. 14, 2022

Accepted: Oct. 23, 2022

Available Online: Nov. 02, 2022

Keywords:

Plastic concrete

Optimum mix design

Numerical simulation

Permeability

Pile

1- Introduction

Plastic concrete is formable concrete that is obtained from the combination of water, cement, sand, and bentonite [1]. The purpose of using this type of concrete in many researches [2-5] is to reduce water seepage and facilitate drilling. Due to the use of bentonite in plastic concrete, this type of concrete usually has more ductility and less permeability than normal concrete. Many past researches have investigated the mixing plan of plastic concrete and the effect of the amount of each component on its properties on the properties of concrete. Zhang et al. [6] studied the ratio of water to bentonite and the amount of clay in plastic concrete. Results showed that by increasing of clay, the modulus of elasticity of plastic concrete decreases. International Committee for Large Dams [7] has made proposals for plastic concrete. According to the opinion of that committee, in order for plastic concrete to have good plasticity, there is no need for high compressive strength. They [7] suggested that the amount of cement consumed be between 100 and 200 kg per cubic meter, the amount of bentonite consumed be between 30 and 80 kg per cubic meter. The volume of granular materials should be about 50% of the total volume of concrete and their amount should be between 1300 and 1500 kg per cubic meter. The permeability of plastic concrete made of bentonite is acceptable between

10^{-8} and 10^{-7} m/s.

2- Experimental tests of plastic concrete

In order to evaluate the properties of plastic concrete, five different mixing designs were considered, in the first one, light sand was used and, in the others, bentonite was used. In the second and third mixing plan, dry bentonite was used and in the fourth and fifth mixing plan, wet (processed) bentonite was used to make plastic concrete. It should be noted that for the processing of wet bentonite, bentonite was stirred for 24 hours after mixing with the required water, and then it was used in the preparation of plastic concrete. The purpose of choosing five plastic concrete mixing plans is to compare the physical and mechanical characteristics of the samples made with dry and wet bentonite and also to compare their characteristics with plastic concrete obtained from light sand. For this purpose, the amount of cement used in all the samples was equal to 150 kg/m^3 . All five mixing plans were chosen in such a way that the slump of the samples was close to each other. It should be noted that the first mixing plan, which is prepared using light sand, has the lowest cost and time required for preparation. Meanwhile, in the fourth and fifth mixing plans, due to the bentonite processing time of at least 24 hours, the cost of equipment and manpower as well

*Corresponding author's email: Masoud.khabazian@iau.ac.ir



Table 1. Specifications of 5 mix designs of plastic concrete

Mix design No.	Bentonite (kg/m ³)	Light sand (kg/m ³)	Water (lit/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)
1	0	169.57	216	943.7	759.4
2	55	0	282.47	882.41	795.05
3	35	0	275.56	901.8	801
4	55	0	355.37	1052.37	411.88
5	35	0	304.82	853.75	764.35

as more time is spent. Examining the cost of making samples showed that the cost of producing plastic concrete with the fourth mixing plan is about 35% higher than the production of plastic concrete with the first mixing plan. Table 1 shows the specifications of five plastic concrete mixing designs. Table 2 shows the test results of all five mixing designs.

3- Pile group simulation

In order to investigate the practical properties of plastic concrete, the retaining wall of a project located in the city of Mashhad with a depth of 31 meters was simulated in three dimensions. For this purpose, 3D Plaxis 2020 software was used. For simulation, the finite element method, hardening soil behavior model and consolidation analysis were used. The retaining wall implemented in the mentioned project includes piles tangent to each other and struts. The piles with a diameter of one meter are divided into structural piles (made of ordinary reinforced concrete) and plastic concrete piles (made of plastic concrete). The plastic concrete mixing plan in the plastic concrete piles implemented in the project is the same as the fourth mixing plan. The underground water level at the beginning of the project was at a depth of 25 meters. Due to the fact that the depth of the excavation in the mentioned project is equal to 31 meters, it was possible for water to enter the project. According to what happened in the implementation, 10 stages were considered for simulation. To reduce the computational cost, a part of the project with dimensions of 10 × 16.8 meters was simulated.

The simulations were performed in two modes. In the first case, the retaining wall implemented in the target project was simulated. Due to the fact that in the implementation of the plastic concrete pile of the project, the fourth mixing design has been used, the permeability and resistance characteristics of the plastic concrete pile of the fourth mixing design (28-day compressive strength, 28-day tensile strength, modulus of elasticity and permeability) in the simulation was used. In the second mode of simulation, a new program was proposed. For this purpose, the specifications of the first plastic concrete mixing design (which has the highest compressive and tensile strength and modulus of elasticity as well as the lowest production cost) should be used for plastic concrete

Table 2. Test results of 5 mix designs of plastic concrete

Mix design No.	7 days Compressive strength (kg/cm ²)	28 days Compressive strength (kg/cm ²)	28 days Elasticity modulus (kg/cm ²)	28 days Tensile strength (kg/cm ²)	Permeability (cm/s)
1	28	43.2	6700	4.11	4.08e-6
2	15	32.1	5000	3.05	1.41e-7
3	18.9	34.1	5200	4.21	1.53e-7
4	11.3	23.5	2200	2.44	1.34e-7
5	15.7	30.3	4200	3.53	1.42e-7

piles. Also, in this case, the underground water level is kept constant at the same depth of 25 meters to reduce the occurrence of consolidation settlements that can cause heavy damages to the nearby structures. Results showed that by keeping the underground water level constant and using plastic concrete piles, according to the first mixing design, it is possible to reduce about 15% of the maximum deformation of the excavation wall, 12% of the maximum settlement of the excavation wall, and 25% of the swelling of the excavated floor. In addition, the cost of plastic concrete made from the first mixing plan is 35% less than the cost of plastic concrete made from the fourth mixing plan.

In order to investigate the effect of plastic concrete pile permeability, six analyzes were performed. Results showed that the permeability of the plastic concrete pile has little effect on the settlement and deformation of the excavation. By increasing the permeability of the plastic concrete pile, the flow through the wall and the swelling of the excavated floor increases. One of the factors affecting the flow through the excavation wall is the permeability of the soil behind the wall. To investigate this factor, the soil permeability was considered different from the depth of 29 to 32 meters. By increasing soil permeability, the flow rate passing through the wall increases.

4- Conclusions

To determine plastic concrete with the best mixing plan, five different mixing plans were considered. In the first mixing plan, light sand was used, in the second and third, dry bentonite was used, and in the fourth and fifth, processed wet bentonite was used. The results showed that the first mixing design has the highest compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity and lowest cost.

Tangential pile group including structural piles and plastic concrete piles with struts in the vicinity of the deep excavation was simulated in three dimensional. The simulation results showed that if the underground water level is kept constant and the first mixing plan is used, compared to the case where the underground water level is reduced by 10 meters and the fourth plan is used for plastic concrete, the maximum deformation of the excavation wall, the maximum settlement

of and the swelling of the excavated floor is reduced. The effect of plastic concrete pile permeability was investigated. Results showed that the permeability of the plastic concrete pile has little effect on the settlement and deformation of the wall. By increasing the permeability of the plastic concrete, the flow rate passing through the excavation wall increases. The effect of soil permeability behind the excavation wall on the flow rate of the flow was investigated. Results showed that by increasing soil permeability, the flow rate passing through the wall increases.

References

- [1] M.A. Fadaie, M. Nekooei, P. Javadi, Effect of Dry and Saturated Bentonite on Plastic Concrete, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23 (2019) 3431-3442.
- [2] F. Jafarzadeh, S.H. Mousavi, Effect of Specimen's Age on Mechanical Properties of Plastic Concrete Walls in Dam Foundations, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17 (2012) 473-482.
- [3] Y. Pashang Pisheh, M. Mir Mohammad Hosseini, Laboratory Study on the Cyclic and Postcyclic Behavior of Plastic Concrete Used in Cutoff Walls of Embankment Dams, *Journal of Materials in Civil Engineering* 32(5) (2020) 1-15.
- [4] S. Hinchberger, J. Weck, T. Newson, Mechanical and hydraulic characterization of plastic concrete for seepage cut-off walls, *Canadian Geotechnical Journal*, 47 (2010) 461-471.
- [5] A. Pashazadeh, M. Chekaniazar, Estimating an Appropriate Plastic Concrete Mixing Design for Cutoff Walls to Control Leakage under the Earth Dam, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 1(9) (2011) 1295-1299.
- [6] P. Zhang, Q. Guan, Q. Li, Mechanical Properties of Plastic Concrete Containing Bentonite, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5 (2013) 1317-1322.
- [7] ICOLD, "Filling Materials for Watertight Cutoff Walls, in: International Committee on Large Dams, Paris, 1985.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Taghdisi Ali, M. Khabazian, S. M. Sajjadi Attar, Numerical Simulation of Pile Group Behavior by Proposed Optimum Mix Design of Plastic Concrete, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(12) (2023) 969-972.

DOI: [10.22060/ceej.2022.21533.7754](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.21533.7754)





شبیه‌سازی عددی رفتار گروه شمع با طرح اختلاط بهینه پیشنهادی بتن پلاستیک

محمود تقی‌دسی علی^۱، مسعود خبازیان^{۲*}، سید محمد سجادی عطاری^۳

۱- دانشگاه علوم و فنون دریایی، خرمشهر، ایران

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بجنورد، ایران

۳- دانشکده فنی شهید منتظری، مشهد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱

کلمات کلیدی:

بتن پلاستیک
طرح اختلاط بهینه
شبیه‌سازی عددی
نفوذپذیری
شمع

خلاصه: بتن پلاستیک نوعی از بتن محسوب می‌شود که معمولاً دارای شکل‌پذیری زیاد و نفوذپذیری کم است و می‌توان از آن در اجرای شمع‌های مماسی در مجاورت گودهایی که دارای تراز آب زیرزمینی بالایی هستند، استفاده نمود. در بسیاری از مواقع، به شرایط پروژه جهت استفاده از بتن پلاستیک با طرح اختلاط مناسب توجه نمی‌شود. هدف از پژوهش حاضر، ارائه طرح اختلاط بهینه از نظر مشخصات مکانیکی و اقتصادی برای بتن پلاستیک شمع‌ها است. به این منظور پنج طرح اختلاط متفاوت برای بتن پلاستیک در نظر گرفته شد و خصوصیات آن‌ها ارزیابی شد. در نهایت، گروه شمع مماسی شامل شمع‌های سازه‌ای و شمع‌های بتن پلاستیک به همراه مهار متقابل در مجاورت گود عمیق شبیه‌سازی شد و تغییر شکل و دبی جریان عبوری از دیواره گود بررسی گردید. در شبیه‌سازی دو بعدی، امکان در نظر گرفتن ویژگی‌های شمع بتن پلاستیک در صفحه مدل‌سازی و بررسی تغییر شکل دیواره گود، مابین مهارهای متقابل وجود ندارد. به همین دلیل، شبیه‌سازی به صورت سه بعدی انجام شد. نتایج نشان داد که اگر تراز آب زیرزمینی ثابت نگه داشته شود، به دلیل نفوذپذیری کم شمع بتن پلاستیک، نفوذ آب به محدوده پروژه بسیار اندک است و نشست و تغییر شکل ایجاد شده در بالای شمع‌ها و نیز تورم کف گود کمتر از حالتی است که تراز آب زیرزمینی پایین آورده شود. همچنین با افزایش نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک و خاک پشت دیواره گود، دبی عبوری از دیواره گود افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

هدف از کاربرد این نوع بتن در بسیاری از موارد، کاهش تراوش آب و سهولت حفاری است. با توجه به کاربرد بنتونیت در بتن پلاستیک، این نوع بتن معمولاً دارای شکل‌پذیری بیشتر و نفوذپذیری کمتری نسبت به بتن معمولی است. تغییر مقدار هر یک از اجزای تشکیل دهنده بتن می‌تواند سبب تغییر مقاومت، نفوذپذیری و شکل‌پذیری بتن پلاستیک شود. بسیاری از پژوهش‌های گذشته [۲-۵]، به بررسی طرح اختلاط بتن پلاستیک و اثر مقدار هر جزء تشکیل دهنده بر خواص آن و همچنین اثر سن نمونه‌ها بر خواص بتن پرداخته‌اند. هدف از بررسی طرح اختلاط بهینه می‌تواند کاهش هزینه تولید بتن پلاستیک و دستیابی به خواص مکانیکی مورد نظر باشد. حیدرزاده و همکاران [۶] به بررسی اثر ساخت دیوار آب‌بند بتن پلاستیک به عنوان دیوار تکمیلی در سد کرخه بر کاهش نفوذپذیری و گرادیان هیدرولیکی جریان آب پرداختند. نتایج نشان داد که پس از استفاده از بتن پلاستیک در دیوار آب‌بند، نفوذ آب به میزان ۲۵٪ و گرادیان هیدرولیکی بین ۹٪ تا ۲۰٪ کاهش یافته است. استوارزبجردی و همکاران [۷] طرح اختلاط‌های متنوعی از بتن پلاستیک را مورد مطالعه قرار دادند. به این منظور

بتن پلاستیک^۱ نوعی از بتن شکل‌پذیر است که از ترکیب آب، سیمان، شن و ماسه به دست می‌آید که برای تولید آن می‌توان از بنتونیت استفاده کرد [۱]. همچنین می‌توان از مواد افزودنی با توجه به نیاز استفاده نمود. بنتونیت ماده‌ای است معدنی از دسته رس‌ها که از کانی‌های متورم شونده تشکیل شده است و عموماً شامل مونتموریلونیت است. بتن پلاستیک برای اهداف مختلف استفاده می‌شود که برخی از کاربردهای آن عبارتند از: جلوگیری از گسترش و پخش مواد آلوده ناشی از کارخانه‌ها و کارگاه‌های صنعتی در آب‌های زیرزمینی

کنترل تراوش در زیر پی سدها
ایجاد دیوار آب‌بند در محل احداث سازه به منظور تخلیه آب از محل گودبرداری شده جهت ساخت سازه و بالا نگه داشتن سطح آب در زمین‌هایی با نفوذپذیری بالا و ...

1 Plastic Concrete

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Masoud.khabazian@iau.ac.ir



تعدادی طرح اختلاط برای بتن پلاستیک در نظر گرفته شد و پس از تعیین طرح اختلاط بهینه، اثر الیاف بر مشخصات بتن پلاستیک بررسی شد. نتایج پژوهش [۷] نشان داد که مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن پلاستیک متأثر از مقدار بنتونیت و نسبت آب به بنتونیت است و با افزایش این دو مقدار، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. همچنین افزودن الیاف سبب زیاد شدن تغییر شکل بتن می‌شود. مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته با گذشت زمان به صورت خطی افزایش می‌یابد و نرخ رشد مدول الاستیسیته کمتر از نرخ رشد مقاومت فشاری بتن است.

پاسبانی خیابوی و علی قربانی [۸] به مطالعه آزمایشگاهی اثر میکروسلیس بر نفوذپذیری بتن پلاستیک پرداختند. آن‌ها [۸] بخشی از سیمان در بتن پلاستیک را با میکروسلیس جایگزین کرده و اثر آن را بر ویژگی‌های بتن پلاستیک ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از میکروسلیس سبب کاهش نفوذپذیری و در عین حال حفظ مقاومت و مدول الاستیسیته بتن پلاستیک می‌شود. کاظمیان و قره [۹] اثر سیمان، بنتونیت و سنگدانه را در سد بش‌فارداد مطالعه کردند. نتایج نشان داد که کاهش نسبت بنتونیت در بتن پلاستیک سبب افت مقاومت می‌شود که دلیل آن زیاد شدن آب آزاد، در صورت ثابت بودن سایر اجزای بتن است. با افزایش مقدار سیمان، در صورتی که مقدار آب و سایر اجزای بتن ثابت بماند، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن پلاستیک زیاد می‌شود. همچنین با افزایش مقدار سیمان، نفوذپذیری بتن پلاستیک کاهش می‌یابد که دلیل آن پر شدن فضاهای خالی بتن است.

فرج‌زاده و همکاران [۱۰] اثر نانوسیلیس بر مقاومت تک‌محوری و سه‌محوری بتن پلاستیک را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش سن نمونه‌ها، مقاومت تک‌محوری و سه‌محوری افزایش می‌یابد. با افزایش نانوسیلیس، مقاومت بتن پلاستیک زیاد شده، کارایی آن کاهش یافته و مدول الاستیسیته نمونه‌ها تقریباً ثابت می‌ماند. فدایی و همکاران [۱۱] تاثیر بنتونیت خشک و مرطوب در رفتار بتن پلاستیک را بررسی کردند. مزیت ساخت بتن پلاستیک با بنتونیت خشک نسبت به بنتونیت مرطوب، کاهش زمان و هزینه تولید است [۱۱]. نتایج نشان داد که در بعضی از نمونه‌ها مقاومت فشاری حاصل از بتن پلاستیک با بنتونیت خشک بیشتر از بتن پلاستیک با بنتونیت مرطوب است. تولید بتن پلاستیک با بنتونیت خشک، زمان و هزینه کمتری دارد و مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتن پلاستیک با بنتونیت خشک و مرطوب تفاوت زیادی ندارند که این اختلاف با افزایش سن نمونه‌ها کاهش می‌یابد. اسلامپ و نفوذپذیری نمونه‌های ساخته شده به دو روش

هم بسیار بهم نزدیک بود. ۵۰٪ افزایش بنتونیت سبب افزایش ۵٪ تا ۱۰٪ مقاومت کششی، ۴۰٪ تا ۶۰٪ کاهش مقاومت فشاری، کاهش نفوذپذیری و ۱ تا ۲ سانتی‌متر افت اسلامپ می‌شود.

پشنگ‌پیشه و میرمحمد حسینی [۱۱] به بررسی آزمایشگاهی رفتار مکانیکی بتن پلاستیک در دیوار آب‌بند پرداختند. نتایج نشان داد که در طرح اختلاط یکسان و سن مشابه نمونه‌ها، پارامترهای مقاومتی و شکل‌پذیری متأثر از تنش همه‌جانبه اعمالی است. در آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده، فشار آب حفره‌ای مثبت که نشان دهنده رفتار انقباضی است، در ابتدای بارگذاری اتفاق می‌افتد و با ادامه بارگذاری، رفتار انبساطی می‌شود. با افزایش مقدار سیمان و کاهش بنتونیت، مقاومت و مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد که نرخ افزایش به طرح اختلاط بستگی دارد. همچنین رفتار مکانیکی بتن پلاستیک به شرایط عمل‌آوری بتن بستگی دارد.

استروسکی [۱۲] به بررسی آزمایشگاهی خواص بتن پلاستیک پرداخت و ویژگی‌های آن را با خواص خاک-سیمان مقایسه کرد. به این منظور چندین تست آزمایشگاهی تعریف شد و نتایج در طرح اختلاط‌های متفاوت نشان داد که با افزایش بنتونیت، نفوذپذیری کاهش می‌یابد. ژنگ و همکاران [۱۳] نسبت آب به بنتونیت و مقدار رس در بتن پلاستیک را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که با افزایش رس، زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های برش یافته افزایش و مدول الاستیسیته بتن پلاستیک کاهش می‌یابد.

عباس‌لو و همکاران [۱۴] به بررسی طرح اختلاط مناسب برای بتن پلاستیک پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش رس و سیمان، اثر سن بر خصوصیات بتن پلاستیک زیاد می‌شود. با افزایش لای و رس، مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین افزایش مقدار رس در نمونه‌ها، سبب کاهش نسبی نفوذپذیری بتن پلاستیک می‌شود. نادری [۱۵] با در نظر گرفتن طرح اختلاط‌های متفاوت برای بتن پلاستیک، اثر سن و مقدار اجزاء تشکیل دهنده بتن پلاستیک را بررسی کرد. اسلامپ نمونه‌ها بین ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر بود که با افزایش سن نمونه‌ها، کاهش می‌یافت. نتایج نشان داد که به طور کلی با افزایش سن نمونه و مقدار سیمان، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن پلاستیک (به جز در بعضی از نمونه‌ها) افزایش می‌یابد.

کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ [۱۶] به ارائه پیشنهاداتی برای بتن پلاستیک پرداخته است. مطابق نظر آن کمیته [۱۶]، برای آن که بتن پلاستیک، شکل‌پذیری مطلوب داشته باشد، نیازی به مقاومت فشاری زیاد نیست. ضمن آن که پیشنهاد داد که مقدار سیمان مصرفی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰

رفتار به حالت شمع تکی نزدیک تر می شود. به گونه ای که در فاصله بیش از ۸ برابر قطر شمع، رفتار گروه شمع همانند شمع تکی است. با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، تحمل بار شمع ها بیشتر و تغییر شکل آن ها کمتر می شود.

ارکان [۲۴] به شبیه سازی سه بعدی گروه شمع تحت بار جانبی پرداخت. نتایج نشان داد که قطر شمع برخلاف فاصله شمع ها، عامل مهمی برای توزیع نیرو در گروه شمع نیست. تغییر شکل گروه شمع قرار گرفته در رس نرم بیشتر از گروه شمع قرار گرفته در رس سفت است و با افزایش بار جانبی، تغییر شکل ها افزایش زیادی نشان می دهد. همچنین مدول الاستیسیته رس، تاثیر کمی در توزیع نیرو در گروه شمع دارد. ژنگ و همکاران [۲۵] گروه شمع قرار گرفته در مجاورت گود به عمق ۳۱ متر را به صورت سه بعدی مدل سازی کردند. به این منظور از مدل رفتاری خاک سخت شونده^۲ استفاده شد. روند نمودار نتایج شبیه سازی و مقادیر اندازه گیری شده مشابه بود. نتایج نشان داد که تاثیر گروه بر بیشینه لنگر خمشی برای شمع های میانی کمتر از شمع های کناری است.

صادقی مقدم و همکاران [۲۶] به بررسی عملکرد شمع های T شکل حاصل از اختلاط عمیق خاک، در مجاورت خاکریزهای خطوط پر سرعت ریلی پرداختند. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن آرایش های مختلف برای قرارگیری شمع ها، می توان مقدار نشست خاک های شل را کاهش داد.

النیر و همکاران [۲۷] به بررسی رفتار دیواره شمع سازه ای به صورت کوچک مقیاس پرداختند. به این منظور، نیروی محوری و خمش شمع های دیواره گود مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج با روابط تجربی موجود مقایسه شد.

رمضان و مگوید [۲۸] رفتار دیوار حاصل از شمع های مماس بر هم را در خاک ماسه ای بررسی کردند. به این منظور از شبیه سازی سه بعدی به روش اجزای محدود استفاده شد. نتایج نشان داد که تغییر شکل دیواره گود به سختی ماسه، عمق گود، سختی خمشی دیواره گود و اندرکنش شمع و خاک بستگی دارد.

ماهش و کومار [۲۹] اثر قطر شمع های مماس بر هم در دیواره گود را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش قطر شمع از ۰/۶ متر به ۰/۸ متر سبب کاهش جابه جایی جانبی لبه گود و افزایش لنگر خمشی در شمع های مماس برهم می شود. همچنین افزودن سرشمع^۳ سبب کاهش جابه جایی جانبی و لنگر خمشی می گردد.

کیلوگرم در متر مکعب، مقدار بنتونیت مصرفی بین ۳۰ تا ۸۰ کیلوگرم در متر مکعب و دوغاب بنتونیت بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم در متر مکعب باشد. حجم مصالح دانه ای حدود ۵۰٪ کل حجم بتن باشد و مقدار آن ها بین ۱۳۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلوگرم در متر مکعب باشد. نفوذپذیری بتن پلاستیک ساخته شده از بنتونیت بین ۸-۱۰ تا ۷-۱۰ متر بر ثانیه قابل قبول است.

بعضی از پژوهش ها [۱۷ و ۱۸] به مطالعه اثر شمع و پهسازی خاک بر بهبود عملکرد آن پرداخته اند. کی و همکاران [۱۹] به مطالعه تغییر شکل جانبی گروه شمع به کمک شبیه سازی عددی پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش عمق و فشار اعمالی، تغییر شکل جانبی گروه شمع بیشتر می شود. همچنین با افزایش مدول الاستیسیته شمع، تغییر شکل ها به صورت غیرخطی کاهش می یابد. جسمانی و همکاران [۲۰] به مقایسه نتایج شبیه سازی دو بعدی و سه بعدی سپر در گودبرداری پرداختند. بر اساس نتایج روند نمودارها و رفتار سپر در هر دو دسته شبیه سازی مشابه است. اگر نسبت طول به ارتفاع سپر کمتر از یک باشد، نتایج شبیه سازی دو بعدی محافظه کارانه تر از شبیه سازی سه بعدی است. با افزایش نسبت طول به ارتفاع سپر، توزیع فشار جانبی و مقدار لنگر خمشی بیشینه در شبیه سازی سه بعدی بیشتر از شبیه سازی دو بعدی است. بنابراین با افزایش نسبت طول به ارتفاع سپر، از نتایج شبیه سازی دو بعدی با احتیاط بیشتری باید استفاده شود. هازار و همکاران [۲۱] به شبیه سازی دو بعدی و سه بعدی شمع تحت بار جانبی پرداختند و نتایج را با مقادیر اندازه گیری شده مقایسه کردند. نتایج نشان داد که تغییر شکل جانبی شمع حاصل از شبیه سازی سه بعدی بسیار نزدیک به مقادیر اندازه گیری شده است. این در حالیست که نتایج شبیه سازی دو بعدی با مقادیر اندازه گیری شده اختلاف دارد. با افزایش مقدار بار جانبی، اختلاف بین نتایج شبیه سازی دو بعدی و مقادیر اندازه گیری شده بیشتر می شود.

الحکیم و همکاران [۲۲] به بررسی سه بعدی گروه شمع تحت بار جانبی پرداختند. به این منظور از نرم افزار Plaxis سه بعدی و از مدل رفتاری موهر کولمب^۱ استفاده شد. نتایج نشان داد که روند نمودار بار-تغییر شکل شمع در شبیه سازی سه بعدی و نتایج آزمایشگاهی مشابه بوده، اما دارای اختلاف تا ۲۰٪ است. با افزایش تراکم خاک، تغییر شکل شمع های قرار گرفته در گروه شمع بهم نزدیک تر می شود. در خاک شل، تغییر شکل شمع تکی از تغییر شکل شمع های قرار گرفته در گروه شمع کمتر است. کاهیاگلو و همکاران [۲۳] گروه شمع تحت بار جانبی را به کمک Plaxis سه بعدی شبیه سازی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش فاصله شمع ها در گروه شمع،

2 Hardening Soil

3 Pile Cap

1 Mohr-Coulomb

جدول ۱. مشخصات بنتونیت مورد استفاده

Table 1. Specifications of used bentonite

شاخص خمیری (%)	حد خمیری (%)	چگالی
۲۳۴	۳۳	۲/۷۷

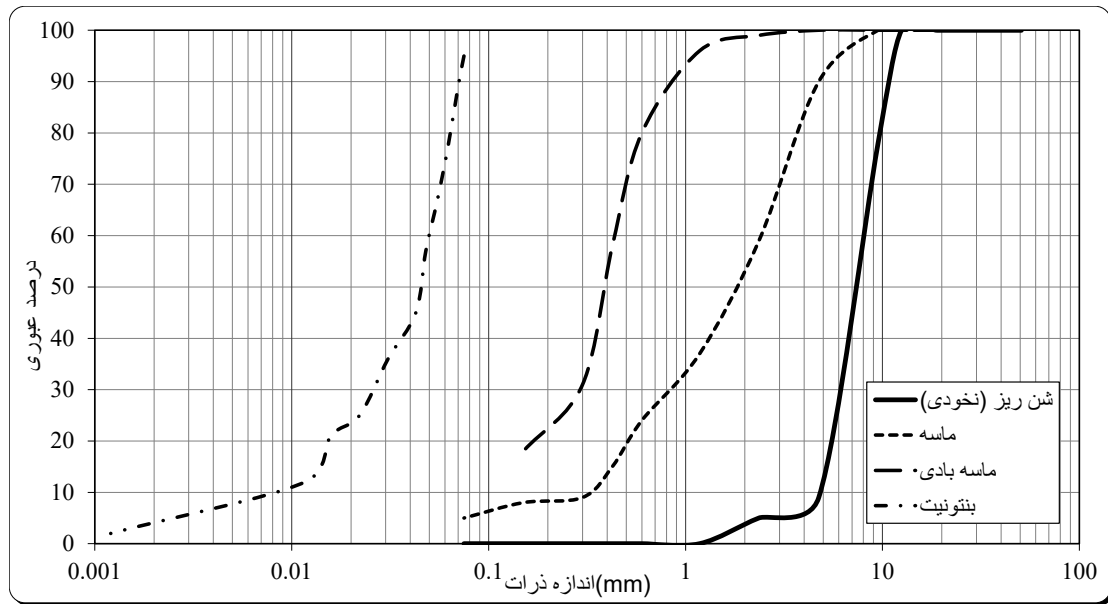
نمونه‌ها برابر با ۱۵۰ کیلوگرم در متر مکعب و مقدار بنتونیت مصرفی در طرح اختلاط‌های دوم تا پنجم برابر با ۵۵ و ۳۵ کیلوگرم در متر مکعب لحاظ گردید و هر پنج طرح اختلاط به گونه‌ای انتخاب شدند که اسلامپ نمونه‌ها بهم نزدیک باشد. لازم به ذکر است که طرح اختلاط اول که در تهیه آن از ماسه بادی استفاده شده است، دارای کمترین هزینه و زمان لازم برای تهیه است. این در حالیست که در طرح اختلاط چهارم و پنجم، به دلیل عمل‌آوری بنتونیت به مدت زمان حداقل ۲۴ ساعت، هزینه تجهیزات و نیروی انسانی و همچنین زمان بیشتری صرف می‌گردد. بررسی هزینه ساخت نمونه‌ها نشان داد که هزینه تولید بتن پلاستیک با طرح اختلاط چهارم، حدود ۳۵٪ بیشتر از تولید بتن پلاستیک با طرح اختلاط اول است. به همین دلیل تولید بتن با طرح اختلاط چهارم نیازمند صرف بیشترین هزینه و زمان است.

برای شناسایی مشخصات بنتونیت، آزمایشات چگالی، هیدرومتری و حدود آتربرگ بنتونیت انجام شد. جدول ۱، مشخصات بنتونیت مورد استفاده در تهیه چهار طرح اختلاط را نشان می‌دهد. شکل ۱ منحنی‌دانه‌بندی مصالح سنگی و بنتونیت مورد استفاده در تهیه بتن پلاستیک را نشان می‌دهد. مشخصات پنج طرح اختلاط بتن پلاستیک در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به آن که مصالح انتخابی برای شمع‌ها از نوع بتن است، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و نفوذپذیری آن باید به عنوان ورودی به نرم‌افزار وارد شود. به منظور تعیین مشخصات بتن پلاستیک، نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری برای تعیین مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۴۲ روزه و همچنین نمونه‌های استوانه‌ای ۲۰×۱۰ سانتی‌متری برای تعیین مقاومت کششی و نفوذپذیری استفاده شدند. تعیین مقاومت فشاری بتن پلاستیک در سن ۷ و ۴۲ روزه نیز به جهت ارزیابی صحت مقاومت فشاری اندازه‌گیری شده در سن ۲۸ روزه انجام شد. برای تعیین مقاومت فشاری، از آزمون تک‌محوری [۳۰] استفاده شد. همچنین جهت تعیین مقاومت کششی،

هدف از پژوهش حاضر، ارائه طرح اختلاط بهینه برای بتن پلاستیک است که به کمک آن بتوان هزینه تولید را کاهش داده و در عین حال ویژگی‌های فنی بتن پلاستیک شامل مقاومت و نفوذپذیری را تامین نمود. به این منظور، تعدادی طرح اختلاط برای بتن پلاستیک در نظر گرفته و نمونه‌های بتن درست شدند. به کمک آزمایشات آزمایشگاهی، خصوصیات نمونه‌ها شامل اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، نفوذپذیری و مدول الاستیسیته ارزیابی شده و طرح اختلاط بهینه مشخص گردید. سپس شبیه‌سازی عددی گروه شمع ساخته شده از بتن با طرح اختلاط بهینه انجام شد و تغییر شکل و نشست آن بررسی گردید تا عملکرد شمع بتن پلاستیک با طرح اختلاط بهینه ارزیابی شود. با توجه به آن که در شبیه‌سازی دو بعدی، امکان در نظر گرفتن ویژگی‌های شمع بتن پلاستیک وجود نداشته و بررسی تغییر شکل دیواره گود بین اعضای مهار متقابل مقدور نیست، شبیه‌سازی به صورت سه بعدی انجام شد.

۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی بتن پلاستیک

برای ارزیابی خصوصیات بتن پلاستیک، پنج طرح اختلاط متفاوت در نظر گرفته شد که در اولین آن‌ها از ماسه بادی و در سایرین از بنتونیت استفاده شد. در طرح اختلاط دوم و سوم از بنتونیت خشک و در طرح اختلاط چهارم و پنجم از بنتونیت مرطوب (عمل‌آوری شده) برای ساخت بتن پلاستیک استفاده شد. لازم به ذکر است که برای عمل‌آوری بنتونیت مرطوب، بنتونیت پس از ترکیب با آب مورد نیاز، ۲۴ ساعت هم‌زده شد و پس از آن در تهیه بتن پلاستیک به کار برده شد. هدف از انتخاب پنج طرح اختلاط بتن پلاستیک، مقایسه مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های ساخته شده با بنتونیت خشک و مرطوب و همچنین مقایسه خصوصیات آن‌ها با بتن پلاستیک حاصل از ماسه بادی است. به این منظور، مقدار سیمان مصرفی در تمامی



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی و بنتونیت مورد استفاده در بتن پلاستیک

Fig. 1. Grading curve of particles and bentonite used in plastic concrete

جدول ۳. نتایج آزمایشات پنج طرح اختلاط بتن پلاستیک

Table 3. Test results of 5 mix designs of plastic concrete

شماره طرح	سیمان (kg/m ³)	بنتونیت (kg/m ³)	ماسه بادی (kg/m ³)	آب (l/m ³)	ماسه (kg/m ³)	شن (kg/m ³)
۱	۱۵۰	۰	۱۶۹/۵۷	۲۱۶	۹۴۳/۷	۷۵۹/۴
۲	۱۵۰	۵۵	۰	۲۸۲/۴۷	۸۸۲/۴۱	۷۹۵/۰۵
۳	۱۵۰	۳۵	۰	۲۷۵/۵۶	۹۰۱/۱۸	۸۰۱
۴	۱۵۰	۵۵	۰	۳۵۵/۳۷	۱۰۵۲/۳۷	۴۱۱/۸۸
۵	۱۵۰	۳۵	۰	۳۰۴/۸۲	۸۵۳/۷۵	۷۶۴/۳۵

نتایج آزمایشات هر پنج طرح اختلاط را نشان می‌دهد. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب انجام آزمون تک‌محوری و نفوذپذیری در نمونه طرح اختلاط اول را نشان می‌دهند.

از آزمون کششی برزیلی [۳۱] و برای تعیین نفوذپذیری نمونه‌ها، از آزمون نفوذپذیری هد افتان [۳۲ و ۱] استفاده گردید. بر اساس استاندارد ASTM D2166 [۳۳] مدول الاستیسیته بتن در سن ۲۸ روزه با ترسیم شیب نمودار تنش در مقابل کرنش، در بخش نخست نمودار حاصل شد [۳۴]. جدول ۳

جدول ۳. نتایج آزمایشات پنج طرح اختلاط بتن پلاستیک

Table 3. Test results of 5 mix designs of plastic concrete

شماره طرح	اسلامپ بتن تازه (cm)	وزن مخصوص بتن تازه (gr/cm ³)	مقاومت فشاری ۷ روزه مکعبی (kg/cm ²)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه مکعبی (kg/cm ²)	الاستیسیته ۲۸ روزه مکعبی (kg/cm ²)	مقاومت فشاری ۴۲ روزه مکعبی (kg/cm ²)	مقاومت کششی ۲۸ روزه (kg/cm ²)	میانگین نفوذ پذیری (cm/s)
1	۱۷	۲/۲۴	۲۸	۴۳/۲	۶۷۰۰	۶۰/۴	۴/۱۱	۴/۰۸ e-۶
2	۱۷/۵	۲/۲۰	۱۵	۳۲/۱	۵۰۰۰	۳۷/۱	۳/۰۵	۱/۴۱ e-۷
3	۱۷/۵	۲/۲۱	۱۸/۹	۳۴/۱	۵۲۰۰	۳۰/۴	۴/۲۱	۱/۵۳ e-۷
4	۱۷/۵	۲/۱۹	۱۱/۳	۲۳/۵	۲۲۰۰	۲۸/۹	۲/۴۴	۱/۳۴ e-۷
5	۱۷/۵	۲/۱۷	۱۵/۷	۳۰/۳	۴۲۰۰	۳۴/۶	۳/۵۳	۱/۴۲ e-۷



شکل ۲. آزمون مقاومت فشاری تک محوری در نمونه طرح اختلاط اول

Fig. 2. Uniaxial compression test in the first mix design



شکل ۳. آزمون نفوذپذیری در نمونه طرح اختلاط اول

Fig. 3. Permeability test in the first mix design

۳- شبیه‌سازی گروه شمع

متصل شده‌اند که فاصله افقی اعضای مهار متقابل برابر با شش متر است. طرح اختلاط بتن پلاستیک در شمع‌های بتن پلاستیک اجرا شده در پروژه، همان طرح اختلاط چهارم است. تراز آب زیرزمینی در ابتدای پروژه در عمق ۲۵ متر بوده است. با توجه به آن که عمق گود در پروژه مذکور برابر با ۳۱ متر است، امکان ورود آب به داخل پروژه وجود داشته است. به این منظور از سه پمپ برای پایین آوردن سطح آب استفاده شده تا بتوان تراز آب را تا عمق ۳۵ متری پایین آورد. این در حالیکه که پایین آوردن سطح آب می‌تواند سبب بروز نشست‌های فزاینده شود. برای ارزیابی تغییر شکل و نشست دیواره گود، در پروژه مورد نظر از اکتسنومتر^۴ استفاده شد. ولی نصب این تجهیزات، پس از اتمام گودبرداری انجام شد و داده‌های آن‌ها صرفاً برای مرحله ساخت پی و دیوار حائل بتنی مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین داده‌ای برای صحت‌سنجی وجود نداشت.

مطابق با آنچه در اجرا رخ داده است، ۱۰ مرحله برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. جدول ۴ مراحل شبیه‌سازی عددی را نشان می‌دهد. خصوصیات خاک و لایه‌بندی آن‌ها، مطابق با گزارش مکانیک خاک و ویژگی بتن شمع‌ها و همچنین خصوصیات مهارهای متقابل، بر اساس نقشه‌ها و نتایج آزمایشگاه مستقر در پروژه در نظر گرفته شد. جدول ۵ مشخصات هندسی

به منظور بررسی کاربردی ویژگی‌های بتن پلاستیک، سازه نگهبان پروژه‌ای واقع در شهر مشهد به عمق ۳۱ متر، به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شد. به این منظور از نرم‌افزار Plaxis سه بعدی ۲۰۲۰ بهره گرفته شد. در شبیه‌سازی دو بعدی، امکان در نظر گرفتن خصوصیات شمع بتن پلاستیک وجود ندارد. زیرا مدل‌سازی در صفحه انجام می‌شود و فقط می‌توان ویژگی‌های شمع سازه‌ای را لحاظ نمود. ضمن آن که در مدل‌سازی دو بعدی، امکان بررسی تغییر شکل و نشست دیواره گود قرار گرفته بین دو عضو مهار متقابل^۱ که با فاصله نسبت بهم قرار گرفته‌اند، وجود ندارد. بنابراین از شبیه‌سازی سه بعدی استفاده شد. برای شبیه‌سازی، از روش اجزای محدود، مدل رفتاری خاک سخت شونده و تحلیل تحکیمی^۲ بهره گرفته شد. سازه نگهبان اجرا شده در پروژه مذکور، شامل شمع‌های مماس^۳ بر هم و مهار متقابل است. شمع‌ها به قطر یک متر به صورت یک در میان شامل شمع سازه‌ای (ساخته شده از بتن معمولی به صورت مسلح) و شمع بتن پلاستیک (ساخته شده از بتن پلاستیک) است. لازم به ذکر است که شمع‌های مقابل هم، در سه ردیف به کمک عضو مهار متقابل به یکدیگر

-
- 1 Strut
 - 2 Consolidation
 - 3 Secant

4 Extensometer

جدول ۴. گام‌های شبیه‌سازی عددی

Table 4. Numerical simulation stages

مرحله شبیه‌سازی	توضیحات
-	مرحله ابتدایی ساخت مدل هندسی
۱	فعال شدن تمامی بارهای سطحی به اندازه ۲۰ کیلوپاسکال
۲	غیرفعال شدن بار سطحی روی ناحیه گودبرداری و خاک‌برداری ۰/۵ متر ابتدایی
۳	فعال شدن شمع‌های دو طرف هسته مرکزی
۴	خاک‌برداری تا ۵/۵ متر ابتدایی
۵	فعال شدن اولین ردیف مهار متقابل در عمق ۴/۹ متر
۶	خاک‌برداری تا عمق ۱۲ متر
۷	فعال شدن دومین ردیف مهار متقابل در عمق ۱۱/۵ متر
۸	خاک‌برداری تا عمق ۱۷/۱۵ متر
۹	فعال شدن سومین ردیف مهار متقابل در عمق ۱۶/۷ متر
۱۰	خاک‌برداری تا عمق ۳۱ متر

برای کاهش هزینه محاسباتی، بخشی از پروژه به ابعاد $10 \times 16/8$ مترمربع شبیه‌سازی شد. ضمن آن که پروژه حاضر برای طول ۱۶ متر هم شبیه‌سازی شد. شکل ۴ مقایسه تغییر شکل بالای شمع و شکل ۵ مقایسه نشست بالای شمع در دو حالت طول ۱۰ متر و عرض ۱۶ متر برای مدل را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج در دو حالت بسیار بهم نزدیک هستند و کمتر از ۱۰٪ اختلاف دارند. شکل ۶ نمایی از مدل سه بعدی ساخته شده را نشان می‌دهد. شرایط مرزی مدل ساخته شده در جدول ۷ ذکر شده است.

مدل ساخته شده و جدول ۶ مشخصات لایه‌های خاک را نشان می‌دهد. ابعاد پروژه $65 \times 16/8$ مترمربع است که با توجه به تعدد لایه‌های خاک- که به سبب آن تعداد اجزای مدل بسیار زیاد شد- و همچنین تحلیل تحکیمی مورد استفاده، زمان تحلیل برای یک مدل سه بعدی کامل، بسیار طولانی می‌شد. بنابراین با توجه به تکرار اعضای سازه نگهبان (شمع‌های مماسی و اعضای مهار متقابل) در طول پروژه، طول مدل به اندازه ۱۰ متر انتخاب شد تا در مدل ساخته شده، امکان بررسی تغییر شکل و نشست گود بین اعضای مهار متقابل (با فاصله شش متر نسبت بهم) فراهم گردد. به این منظور،

جدول ۵. مشخصات هندسی مدل سه بعدی ساخته شده و اجزای آن

Table 5. Geometry specifications of 3D model and its details

طول شمع‌ها (متر)	قطر شمع‌ها (متر)	فاصله افقی مهارهای متقابل نسبت بههم (متر)	طول مهارهای متقابل (متر)	فاصله شمع‌های دو طرف گود نسبت بههم (متر)	ارتفاع گود (متر)	ارتفاع مدل (متر)	عرض مدل (متر)	طول مدل (متر)
۴۱	۱	۶	۱۶/۸	۱۶/۸	۳۱	۶۰	۱۰	۶۰

جدول ۶. مشخصات لایه‌های خاک در شبیه‌سازی

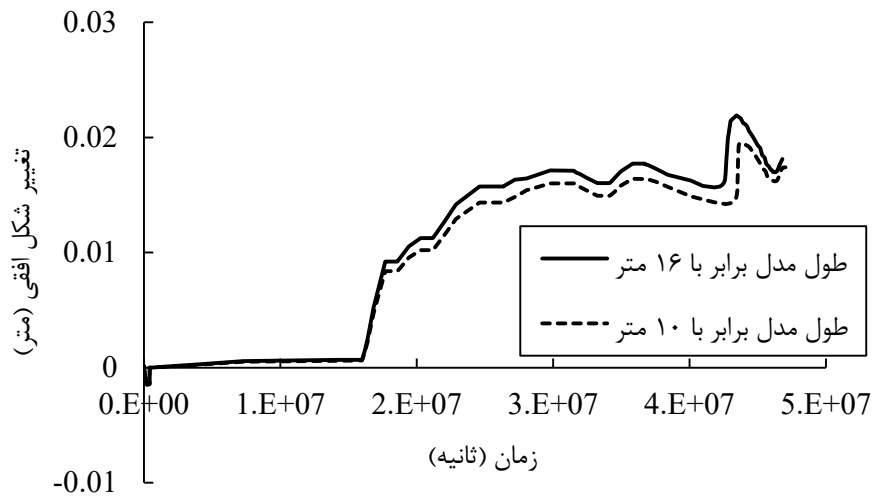
Table 6. Specifications of soil layers in the simulation

عمق (متر)	وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)	مدول الاستیسیته (کیلوگرم بر متر مربع)	چسبندگی (کیلوگرم بر متر مربع)	زاویه اصطکاک داخلی خاک (درجه)	نفوذپذیری (متر بر ثانیه)
۵/۵ تا ۰	۱۸۰۰	۱/۵e۶	۴۰۰	۱۵	۱/۱۵e-۶
۷ تا ۵/۵	۲۰۸۰	۱/۷e۶	۲۰۰	۳۲/۶	۱/۱۵e-۶
۱۰ تا ۷	۱۹۰۰	۲e۶	۱۳۰۰	۲۳/۷	۱/۱۵e-۷
۱۵ تا ۱۰	۲۰۹۰	۱/۵e۶	۷۰۰	۳۲	۱/۱۵e-۷
۱۹ تا ۱۵	۲۰۵۰	۳/۳e۶	۳۹۰۰	۱۵	۱/۱۵e-۷
۲۲ تا ۱۹	۲۱۰۰	۳/۱e۶	۳۰۰۰	۱۶	۱/۱۵e-۷
۲۹ تا ۲۲	۲۱۰۰	۲/۰۵e۶	۵۰۰	۳۰	۱/۱۵e-۶
۳۲ تا ۲۹	۲۰۳۰۰	۲/۲۵e۶	۳۸۰۰	۲۴	۱/۱۵e-۷
۳۷/۵ تا ۳۲	۲۱۴۰۰	۵/۲e۶	۷۰۰	۳۱	۱/۱۵e-۶
۴۶ تا ۳۷/۵	۲۰/۵	۲/۱۵e۶	۵۴۰۰	۲/۵	۱/۱۵e-۷
۶۰ تا ۴۶	۲۰/۵	۲/۴e۶	۴۲۰۰	۱۵	۱/۱۵e-۷

جدول ۷. شرایط مرزی در مدل ساخته شده

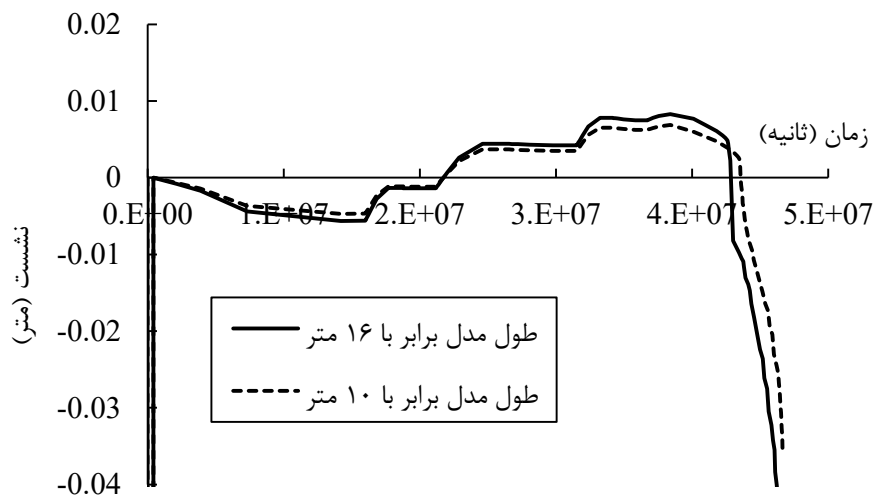
Table 7. Boundary conditions in the generated model

Zmax	Zmin	Ymax	Ymin	Xmax	Xmin
آزاد	مقید به صورت کامل	مقید به صورت افقی	مقید به صورت افقی	مقید به صورت نرمال	مقید به صورت نرمال



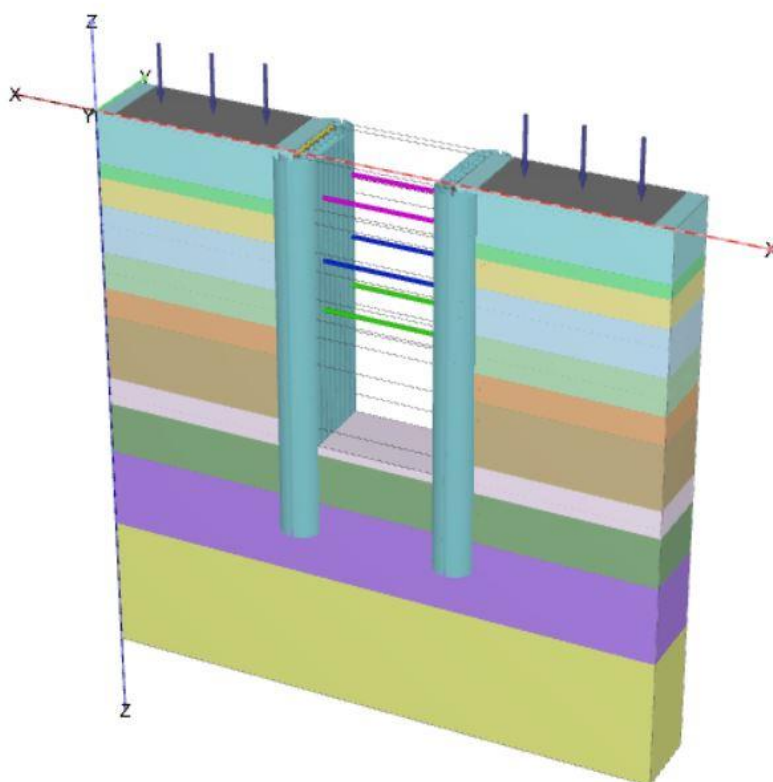
شکل ۴. مقایسه تغییر شکل بالای شمع، در دو طول مدل برابر با ۱۰ و ۱۶ متر

Fig. 4. Displacement comparison in top of pile, at model lengths of 10 m and 16 m



شکل ۵. مقایسه نشست بالای شمع، در دو طول مدل برابر با ۱۰ و ۱۶ متر.

Fig. 5. Settlement comparison in top of pile, at model lengths of 10 m and 16 m



شکل ۶. مدل سه بعدی ساخته شده از گود پروژه مورد نظر

Fig.6. 3D generated model of the intended excavation project

از بین شمع‌ها خیلی بیشتر از نفوذ آب از بدنه شمع است. بنابراین شمع را نفوذناپذیر در نظر گرفتند. با توجه به آن که آزمایشات برای تعیین نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک انجام شده و به سبب تفاوت در تجهیزات و شیوه انجام آزمایش، نفوذپذیری شمع سازه‌ای مشخص نشده است، اطلاعاتی از مقدار دقیق نفوذپذیری و ترک ایجاد شده در شمع بر اساس عملکرد آن موجود نیست. بنابراین شمع سازه‌ای در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی به صورت غیرقابل نفوذ فرض شد.

در پژوهش حاضر، مصالح خاک و شمع از نوع خاک و سطوح مشترک انتخاب شدند. انتخاب مصالح شمع‌ها از نوع خاک و سطوح مشترک، به دلیل امکان در نظر گرفتن اندرکنش بین شمع و خاک انجام شد. این در حالیکه اگر شمع‌ها از نوع تیر آ یا تیر گیردار انتخاب می‌شدند، امکان در نظر گرفتن اندرکنش بین شمع و خاک وجود نداشت. به این منظور،

- 1 Soil and Interfaces
- 2 Beam
- 3 Embedded Beam

۳-۱- اثر افت تراز آب زیرزمینی بر نشست و تغییر شکل گود شبیه‌سازی‌های این بخش در دو حالت انجام شد. در حالت اول، سازه نگهبان اجرا شده در پروژه مورد نظر، شبیه‌سازی گردید. با توجه به آن که در اجرای شمع بتن پلاستیک پروژه، از طرح اختلاط چهارم بهره گرفته شده است، از نفوذپذیری و مشخصات مقاومتی شمع بتن پلاستیک طرح اختلاط چهارم (مقاومت فشاری ۲۸ روزه، مقاومت کششی ۲۸ روزه، مدول الاستیسیته و نفوذپذیری) در شبیه‌سازی استفاده گردید. نفوذپذیری شمع سازه‌ای بسیار اندک و کمتر از نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک است [۸ و ۱]. برای تهیه بتن سازه‌ای شمع‌ها، از ریزدانه استفاده شد و دانه‌بندی آن از بتن معمولی، ریزتر در نظر گرفته شد. بعضی از پژوهش‌ها [۳۶ و ۳۵] به بررسی نفوذپذیری شمع بتنی بر اساس عملکرد آن پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که بر اساس سطح عملکرد و ترک ایجاد شده در شمع بتنی، مقدار نفوذپذیری آن متفاوت است. بعضی از پژوهش‌ها [۳۷ و ۳۸] نفوذپذیری شمع قرار گرفته در دیواره گودبرداری را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که نفوذ آب

جدول ۸. مشخصات شمع در شبیه‌سازی

Table 8. Pile specifications in the simulation

شمع بتن پلاستیک	شمع سازه‌ای	پارامتر
۲۲۵۰	۲۵۰۰	وزن مخصوص (kg/m^3)
$۲/۲ \times ۱۰^۷$	$۲/۵ \times ۱۰^۹$	مدول الاستیسیته (kg/m^2)
۰/۲	۰/۲	ضریب پواسن
$۶/۶۳ \times ۱۰^۴$	$۲/۵ \times ۱۰^۶$	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/m^2)

جدول ۹. قطر اعضای مهار متقابل در شبیه‌سازی

Table 9. strut members diameters in the simulation

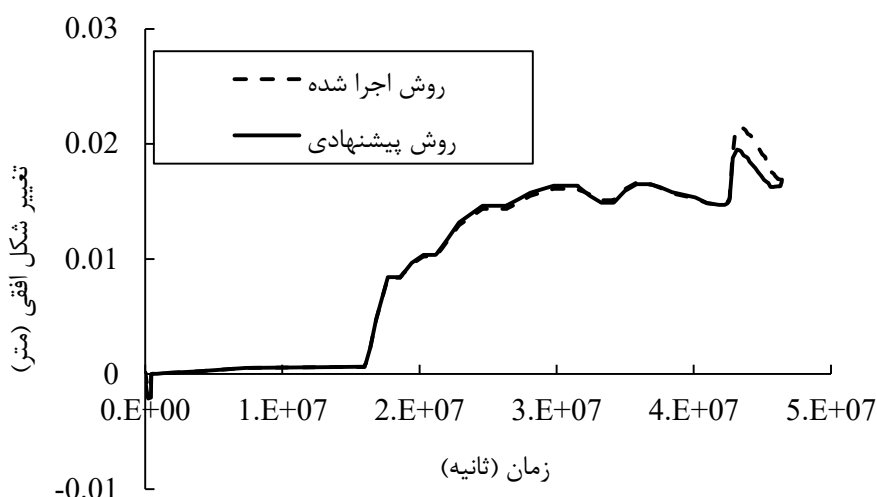
مهار متقابل ردیف سوم	مهار متقابل ردیف دوم	مهار متقابل ردیف اول	پارامتر
۱/۳	۱/۲	۰/۵	قطر (متر)

شبیه‌سازی، مطابق با آنچه در اجرا رخ داده است، تراز آب زیرزمینی از عمق ۲۵ متر به عمق ۳۵ متر، به صورت مرحله‌ای کاهش یافت.

در حالت دوم شبیه‌سازی، برنامه‌ای جدید برای اجرای سازه نگهبان پیشنهاد شد. به این منظور، از مشخصات اولین طرح اختلاط بتن پلاستیک (که دارای بیشترین مقاومت فشاری و کششی و مدول الاستیسیته و همچنین کمترین هزینه تولید است) برای شمع‌های بتن پلاستیک استفاده گردید. همچنین در این حالت، تراز آب زیرزمینی در همان عمق ۲۵ متر ثابت نگه داشته شده تا وقوع نشست‌های تحکیمی که می‌تواند سبب تحمیل خسارت‌های گزاف به سازه‌های مجاور شود، کاهش یابد. به این منظور، تراز آب زیرزمینی در اطراف گود در عمق ۲۵ متر و در کف گود در عمق ۳۱ متر تعریف شد. به عبارت دیگر فقط کف کف‌بند آب در کف گود جمع نشود. سایر مشخصات مدل حالت دوم با مشخصات مدل حالت اول یکسان در نظر گرفته می‌شود. نتایج نشان داد که با ثابت نگه داشتن تراز آب زیرزمینی و استفاده از شمع بتن پلاستیک، مطابق با طرح اختلاط اول می‌توان حدود ۱۵٪ تغییر شکل حداکثر دیواره گود، ۱۲٪ نشست حداکثر دیواره گود و ۲۵٪ تورم کف گود را کاهش داد. ضمن آن که هزینه هر متر مکعب بتن

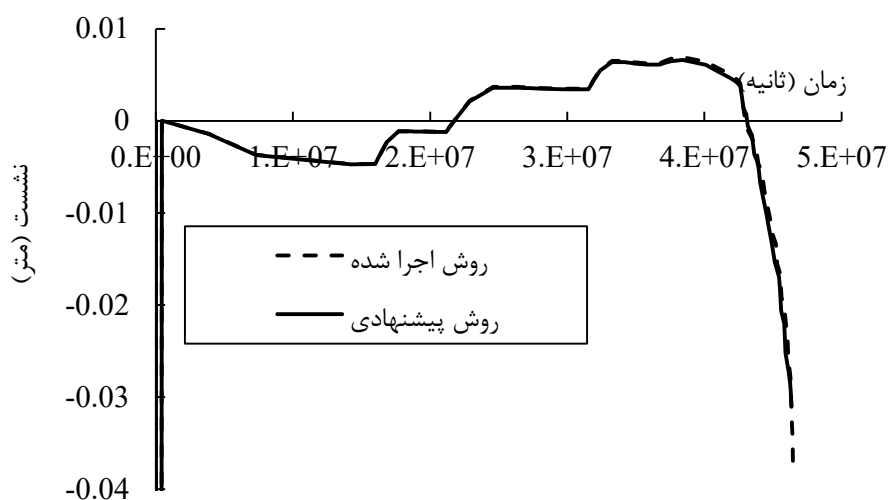
سطح مشترک در هر دو جهت، در اطراف شمع‌ها تعریف شد و مقدار ضریب درگیری بین شمع و خاک برابر با ۰/۷ تعریف گردید. مدل رفتاری مصالح خاکی از نوع خاک سخت شونده^۱ و مصالح شمع سازه‌ای و همچنین شمع بتن پلاستیک از نوع بتن انتخاب شدند. ابعاد اجزای مدل نیز به صورت متوسط^۲ انتخاب گردید که در این صورت، تعداد اجزای مدل برابر با ۹۵۰۰۰ جزء شد. دلیل انتخاب ابعاد اجزای مدل، زمان محاسبات است. زیرا همانطور که ذکر شد، با توجه به تعدد لایه‌های خاک، انتخاب شمع از نوع خاک و سطوح مشترک، تحلیل تحکیمی و جریان آب، مدت زمان تحلیل طولانی بود. اعضای مهار متقابل نیز به صورت تیر با مقطع دایروی مدل‌سازی شده و به صورت ارتجاعی^۳ در نظر گرفته شدند. جدول ۸ مشخصات شمع و جدول ۹ مشخصات اعضای مهار متقابل را نشان می‌دهد. به این منظور، مقدار وزن مخصوص فولاد برابر با ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مدول الاستیسیته آن برابر با ۲×۱۰^{۱۰} کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شد. در حالت اول

- 1 Hardening Soil
- 2 Concrete
- 3 Medium
- 4 Elastic



شکل ۷. مقایسه تغییر شکل افقی شمع در هر دو حالت شبیه‌سازی

Fig. 7. Comparison of pile horizontal displacement, in both simulations

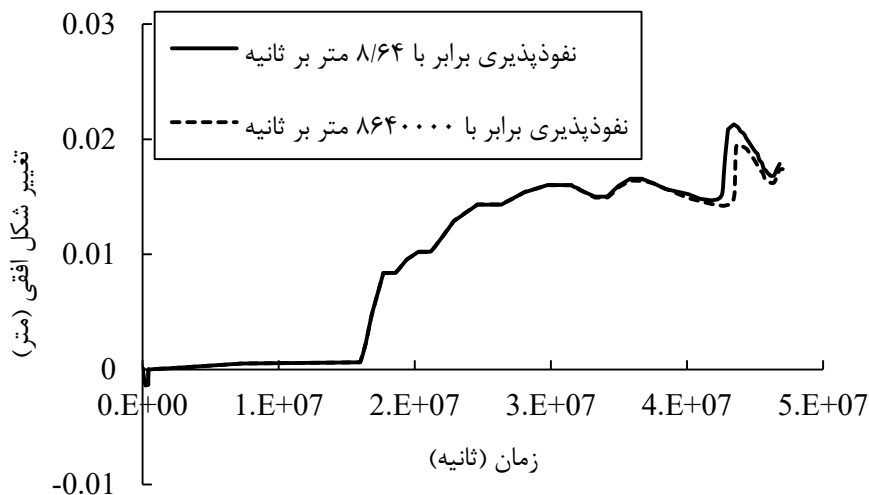


شکل ۸. مقایسه نشست بالای شمع در هر دو حالت شبیه‌سازی

Fig.8. Comparison of pile settlement, in both simulations

۷-۹۷/۲ لیتر بر متر مربع ثانیه است که مقدار آن ۲۰٪ از دبی خروجی حالت اول بیشتر بوده، اما همچنان از نظر مشاور پروژه قابل قبول است. دلیل بیشتر بودن دبی خروجی حالت دوم نسبت به حالت اول، بیشتر بودن نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک طرح اختلاط اول نسبت به طرح اختلاط چهارم است. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب، تغییر شکل افقی و نشست بالای شمع در هر دو حالت شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. تا انتهای گام نهم شبیه‌سازی که مراحل در جدول ۴ توضیح داده شده بود، خاک‌برداری به اندازه ۱۷/۱۵ متر

پلاستیک ساخته شده از طرح اختلاط اول ۳۵٪ از هزینه هر متر مکعب بتن پلاستیک ساخته شده از طرح اختلاط چهارم کمتر است. پس با ثابت نگه داشتن تراز آب زیرزمینی و استفاده از شمع بتن پلاستیک ساخته شده از طرح اختلاط اول، به جای شمع بتن پلاستیک تهیه شده با طرح اختلاط چهارم می‌توان هزینه و زمان اجرا را تا حد زیادی کاهش داد. با توجه به آنکه تراز آب زیرزمینی در کنار گود، در عمق ۲۵ متری در نظر گرفته شده است، تراوش از دیواره به درون گود انجام می‌شود که مقدار دبی خروجی آب برابر با



شکل ۹. مقایسه تغییر شکل بالای شمع در دو نفوذپذیری مختلف شمع بتن پلاستیک

Fig. 9. Displacement comparison of the top of pile at two different permeability of plastic concrete

فرض شده) نشان می‌دهند. با توجه به آن که تفاوت مقادیر در دو نفوذپذیری حدود ۰.۵٪ است، می‌توان نتیجه گرفت که نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک، اثر کمی بر نشست و تغییر شکل گود دارد. شکل ۱۱ تغییرات دبی عبوری جریان از دیواره گود و شکل ۱۲ تورم کف گود در مقابل نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۱، با تغییر نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک از $1/15-4e$ به $1/15-3e$ متر بر ثانیه، دبی جریان عبوری از دیواره گود سه برابر می‌شود. بر اساس شکل ۱۲، با افزایش نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک، دبی عبوری از دیواره و تورم کف گود تا ۱۰۰٪ افزایش می‌یابد.

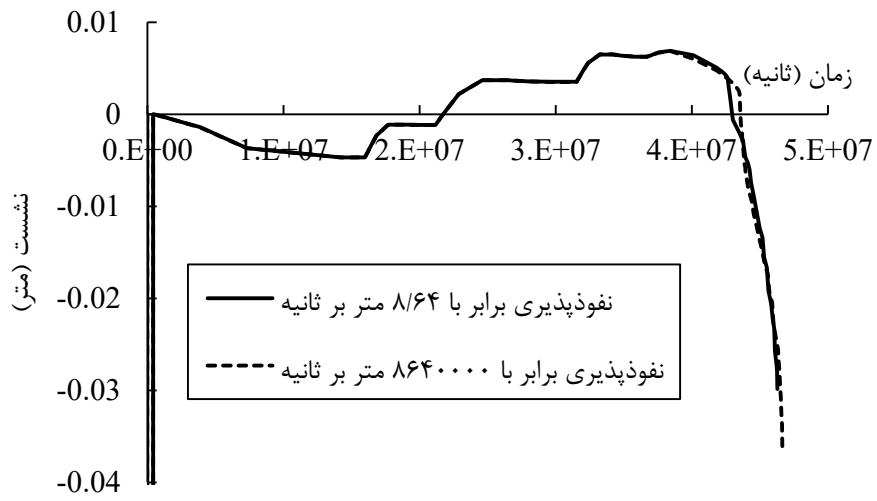
۳-۳- اثر نفوذپذیری خاک بر دبی جریان از دیواره گود

یکی از عوامل اثرگذار بر دبی عبوری از دیواره گود، نفوذپذیری خاک پشت دیواره است. برای بررسی این عامل، نفوذپذیری خاک از عمق ۲۹ تا ۳۲ متری (خاک قرار گرفته در زیر تراز آب زیرزمینی و بالای کف گود) برابر با $1/15-7e$ متر بر ثانیه (رس)، $1/15-6e$ متر بر ثانیه (رس لای دار)، $1/15-5e$ متر بر ثانیه (ماسه ریز) و $1/15-4e$ متر بر ثانیه (ماسه درشت) در نظر گرفته شد و دبی عبوری از دیواره و همچنین نشست و تغییر شکل بیشینه گود بررسی شد. شکل ۱۳ دبی عبوری از دیواره گود برحسب نفوذپذیری‌های متفاوت خاک را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش نفوذپذیری خاک، دبی جریان عبوری از دیواره تا ۷ برابر افزایش می‌یابد.

انجام شده و سومین ردیف مهار متقابل نصب شده است. تا این مرحله، اختلاف نتایج بین دو حالت اجرا شده و پیشنهاد شده کم است. ولی در گام دهم، خاک‌برداری، بدون نصب مهار متقابل تا عمق ۳۱ متر ادامه می‌یابد. هر قدر عمق گودبرداری بیشتر شود، اختلاف نتایج بین دو حالت بیشتر می‌شود. زیرا اختلاف مقاومت شمع بتن پلاستیک طرح اول و چهارم، سبب ایجاد اختلاف در نتایج، با افزایش عمق گود می‌شود. ضمن آن که تحلیل انجام شده از نوع تحکیمی است که کاملاً وابسته به زمان است. بنابراین با توجه به آن که زمان اجرای گام دهم ۱۲۰ روز است، با افزایش زمان، اختلاف نتایج بیشتر می‌شود. استفاده از طرح پیشنهادی، سبب کاهش ۱۰٪ تغییر شکل و ۱۷٪ نشست بالای شمع نسبت به سازه نگهبان اجرا شده می‌گردد.

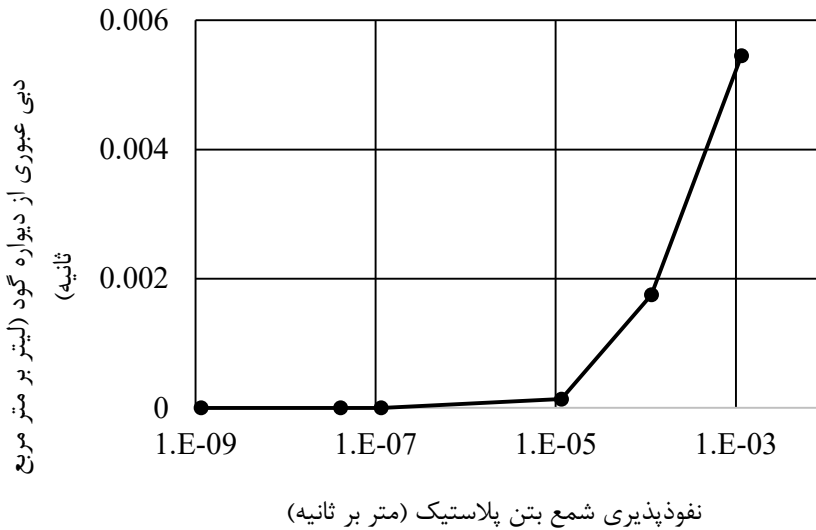
۳-۲- اثر نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک بر دبی جریان آب از دیواره گود

برای بررسی اثر نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک بر نشست و تغییر شکل بیشینه دیواره گود و همچنین دبی جریان عبوری از دیواره، شش تحلیل انجام شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک در تحلیل‌ها برابر با $1/15-9e$ ، $4-8e$ ، $1/15-7e$ ، $1/15-5e$ ، $1/15-4e$ و $1/15-3e$ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد و سایر مشخصات شبیه‌سازی، بدون تغییر باقی ماند. شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب تغییر شکل و نشست بالای شمع در مقابل زمان را در دو نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک برابر با $1/15-9e$ و $1/15-3e$ متر بر ثانیه (کمترین و بیشترین نفوذپذیری



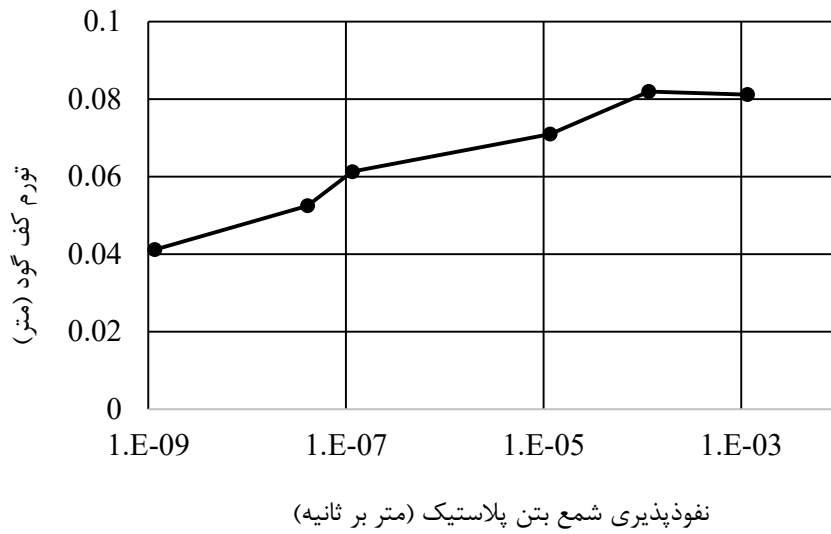
شکل ۱۰. مقایسه نشست بالای شمع در دو نفوذپذیری مختلف شمع بتن پلاستیک

Fig. 10. Settlement comparison of the top of pile at two different permeability of plastic concrete



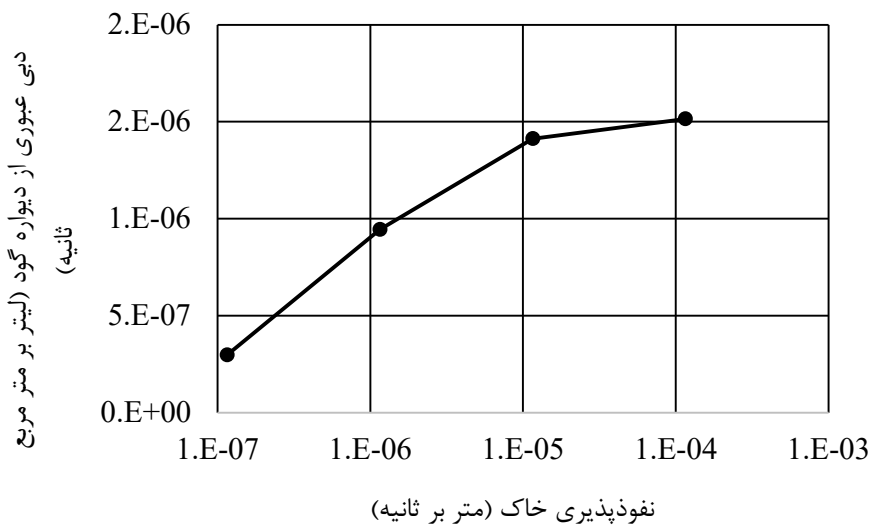
شکل ۱۱. دبی جریان عبوری از دیواره گود در مقابل نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک

Fig. 11. Flow passed in excavated wall versus concrete pile permeability



شکل ۱۲. تورم کف گود در مقابل نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک

Fig. 12. Excavated based swelling versus permeability of plastic concrete



شکل ۱۳. دبی جریان عبوری از دیواره گود در مقابل نفوذپذیری خاک

Fig. 13. Flow passed in wall excavated versus soil permeability

۴- نتیجه گیری

منابع

- [1] M.A. Fadaie, M. Nekooei, P. Javadi, Effect of Dry and Saturated Bentonite on Plastic Concrete, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23 (2019) 3431-3442.
- [2] F. Jafarzadeh, S.H. Mousavi, Effect of Specimen's Age on Mechanical Properties of Plastic Concrete Walls in Dam Foundations, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17 (2012) 473-482.
- [3] Y. Pashang Pishneh, M. Mir Mohammad Hosseini, Laboratory Study on the Cyclic and Postcyclic Behavior of Plastic Concrete Used in Cutoff Walls of Embankment Dams, *Journal of Materials in Civil Engineering* 32(5) (2020) 1-15.
- [4] S. Hinchberger, J. Weck, T. Newson, Mechanical and hydraulic characterization of plastic concrete for seepage cut-off walls, *Canadian Geotechnical Journal*, 47 (2010) 461-471.
- [5] A. Pashazadeh, M. Chekaniazar, Estimating an Appropriate Plastic Concrete Mixing Design for Cutoff Walls to Control Leakage under the Earth Dam, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 1(9) (2011) 1295-1299.
- [6] M. Heidarzadeh, A.A. Mirghasemi, H. Niroomand, F. Eslamin, Construction and performance of the Karkheh dam complementary cut-of wall: an innovative engineering solution, *International Journal of Civil Engineering*, 17 (2019) 859-869.
- [7] A. Ostovarzijerdi, A. Ghanbari, M. Karkon, Investigating the Behavior of the Plastic Concrete Made with Different Types of Fibers with an Approach to the Mixing Plans of Plastic Concrete, *Civil Engineering Journal*, 5 (2019) 227-245.
- [8] M. Pasbani Khiavi, M. Ali Ghorbani, Effects of Micro Silica on Permeability of Plastic Concrete, *Journal of Materials Science and Engineering*, 4 (2014) 372-375.
- [9] S. Kazemian, S. Ghareh, Effects of Cement, Different Bentonite, and Aggregates on Plastic Concrete in Besh-Ghardash Dam, Iran, *Journal of Testing and Evaluation*, 45., (2017) 242-248 .

بتن پلاستیک نوعی از بتن محسوب می‌شود که معمولاً دارای شکل‌پذیری بیشتر و مقاومت کمتر نسبت به بتن سازه‌ای است. با توجه به شکل‌پذیری زیاد و نفوذپذیری کم می‌توان از آن در اجرای شمع‌های مماسی در مجاورت گودهایی که دارای تراز آب زیرزمینی بالایی هستند، استفاده نمود. برای تعیین بتن پلاستیک با بهترین طرح اختلاط، پنج طرح اختلاط متفاوت در نظر گرفته شد و خصوصیات نمونه‌ها ارزیابی شد. در طرح اختلاط اول از ماسه بادی، در طرح اختلاط دوم و سوم از بنتونیت خشک و در طرح اختلاط چهارم و پنجم از بنتونیت مرطوب عمل‌آوری شده استفاده گردید. نتایج نشان داد که طرح اختلاط اول، دارای بیشترین مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و کمترین هزینه تولید و طرح اختلاط چهارم دارای کمترین مقاومت فشاری و کششی و بیشترین هزینه تولید است. به گونه‌ای که هزینه تولید آن حدوداً ۳۵٪ بیشتر از هزینه طرح اختلاط اول است.

گروه شمع مماسی شامل شمع‌های سازه‌ای و شمع‌های بتن پلاستیک به همراه مهار متقابل در مجاورت گود عمیق، به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که اگر تراز آب زیرزمینی ثابت نگه داشته شود و از طرح اختلاط اول استفاده شود، نسبت به حالتی که تراز آب زیرزمینی ۱۰ متر کاهش یابد و از طرح چهارم برای بتن پلاستیک بهره گرفته شود، ۱۵٪ تغییر شکل حداکثر دیواره گود، ۱۲٪ نشست حداکثر دیواره گود و ۲۵٪ تورم کف گود کاهش می‌یابد. همچنین استفاده از طرح پیشنهادی، سبب کاهش ۱۰٪ تغییر شکل و ۱۷٪ نشست بالای شمع می‌گردد. اثر نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک بر تورم کف گود، نشست و تغییر شکل دیواره و دبی عبوری از دیواره گود بررسی شد. نتایج نشان داد که با توجه به آن که تفاوت مقادیر در دو نفوذپذیری حداقل و حداکثر حدود ۵٪ است، نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک، اثر کمی بر نشست و تغییر شکل گود دارد. با تغییر نفوذپذیری شمع بتن پلاستیک از ۱/۱۵-۴e به ۱/۱۵-۳e متر بر ثانیه، دبی جریان عبوری از دیواره گود سه برابر می‌شود. در بخش پایانی پژوهش، اثر نفوذپذیری خاک پشت دیواره گود بر دبی جریان عبوری بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش نفوذپذیری خاک، دبی جریان عبوری از دیواره تا ۷ برابر افزایش می‌یابد.

- between 2d and 3d behavior of sheet piles by finite element method, *Kuwait Journal of Science & Engineering*, 28 (2011) 1-14.
- [21] L. Hazzar, M.N. Hussien, M. Karray, Two-dimensional modelling evaluation of laterally loaded piles based on three-dimensional analyses, *Geomechanics and Geoengineering*, (2019) 1-18.
- [22] A.F. Elhakim, M. El Khouly, R. Awad, Three dimensional modeling of laterally loaded pile groups resting in sand, *Housing and Building National Research Center*, 12(1) (2014) 78-87.
- [23] M.R. Kahyaoglu, G. Imancli, A.U. Öztürk, A.S. Kayalar, Computational 3D finite element analyses of model passive piles, *Computational Materials Science*, 46 (2009) 193-202.
- [24] A. Ercan, Behavior of pile groups under lateral loads, Middle east technical university, 2010.
- [25] R. Zhang, A. Teck Chee Goh, W. Zhang, 3D numerical analysis of passive pile groups adjacent to deep braced excavation in soft clay, *International Journal of Civil Infrastructure*, 3 (2020) 7-14.
- [26] M. Sadeghi Moghadam, A. Zad, M. Yazdi, Performance of T-Shaped and conventional Cement-Soil deep mixing piles to stabilize soft base of High-Speed trains, *International Journal of Geotechnical Engineering*, (2022) 1-15.
- [27] M.T. El-Nimr, A. Basha, M.M. Abo-Raya, M.H. Zakaria, Structural behavior of small-scale reinforced concrete secant pile wall, *World Journal of Engineering*, 11 (2022) 21-29.
- [28] M. Ramadan, M. Meguid, Behavior of Cantilever Secant Pile Wall Supporting Excavation in Sandy Soil Considering Pile-Pile Interaction, *Arabian Journal of Geosciences*, 13(12) (2020) 1-13.
- [29] A. Mahesh, S. Kumar, Effect of Diameter of Secant Pile Wall in Deep Excavation Analysis, *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 7(6) (2019) 871-876.
- [30] ASTM, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in
- [10] S. Farajzadehha, R. Ziaei Moayed, M. Mahdikhani, Comparative study on uniaxial and triaxial strength of plastic concrete containing nano silica, *Construction and Building Materials*, 244 (2020) 1-9.
- [11] Y. Pashang Pisheh, M. Mir Mohammad Hosseini, Experimental Investigation of Mechanical Behavior of Plastic Concrete in Cutoff Walls *Journal of Materials in Civil Engineering* 31(1) (2019) 1-12.
- [12] J.L. Ostrowsky, A new approach for evaluating the ductility, volumetric stiffness and permeability of cut-off wall backfill materials, *Journal of the Deep Foundations of civil and environmental engineering*, 11 (2018) 109-113.
- [13] P. Zhang, Q. Guan, Q. Li, Mechanical Properties of Plastic Concrete Containing Bentonite, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5 (2013) 1317-1322.
- [14] H. Abbaslou, A.R. Ghanizadeh, A. Tavana Amlashi, The compatibility of bentonite/sepiolite plastic concrete cut-off wall material, *Construction and Building Materials*, 124 (2016) 1165-1173
- [15] M. Naderi, Effects of different constituent materials on the properties of plastic concrete, *International Journal of Civil Engineering*, 3 (2005) 10-19.
- [16] ICOLD, "Filling Materials for Watertight Cutoff Walls, in: International Committee on Large Dams, Paris, 1985.
- [17] F. Wang, K. Li, Y. Liu, Optimal water-cement ratio of cement-stabilized soil, *Construction and Building Materials*, 320 (2022).
- [18] R. Alipour, A.A. Heshmati, J. Karimiazar, N. Esazadefar, E. Asghari-Kalajahi, S.H. Bahmani, Resistance and swelling of Tabriz marl soils stabilised using nano-silica and nano-alumina, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, (2022)
- [19] Y. Cai, B.X. Tu, J. Yu, Y. Zhu, J. Zhou, Numerical Simulation Study on Lateral Displacement of Pile Foundation and Construction Process under Stacking Loads, *Complexity of Construction Mega Infrastructure Project*, 1(1-17) (2018).
- [20] M. Jesmani, I. Mehdipour, A. Ajamai, Comparison

- [35] J. He, M. Tang, R. Gao, H. Hu, J. Hong, Damage – Permeability analysis of pretensioned spun high strength concrete pipe piles based on stochastic damage model, *Engineering Failure Analysis*, 140 (2022)
- [36] R.J. Torrent, R.D. Neves, K. Imamoto, *Concrete Permeability and Durability Performance, From Theory to Field Applications*, Routledge, 2022.
- [37] C. Wiggan, D. Richards, W. Powrie, Numerical modelling of groundwater flow around contiguous pile retaining walls, in: 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013, 2013.
- [38] C. Wiggan, D. Richards, W. Powrie, Seepage and pore pressures around contiguous pile retaining walls, *Géotechnique*, 66(7) (2016) 10-10.
- Compression, in, ASTM International, 2002.
- [31] ASTM, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, in, ASTM International, 2004.
- [32] K.H. Head, R. Epps, *Manual of soil laboratory testing*, Pentech Press, 1(2) (1986)
- [33] ASTM, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, in, ASTM International, 2000.
- [34] M. Soroush, A. Mojtahedi, An Overview of Design and Implementation of Plastic Concrete Cutoff Walls in Dams' Foundation, in: *Proceedings of Specialized and Workshop Articles of Special Issues of Designing Dams and Its Related Organizations*, Isfahan University of Technology, 2002.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Taghdisi Ali, M. Khabazian, S. M. Sajjadi Attar, Numerical Simulation of Pile Group Behavior by Proposed Optimum Mix Design of Plastic Concrete, Amirkabir J. Civil Eng., 54(12) (2023) 4789-4808.

DOI: 10.22060/ceej.2022.21533.7754



