

Investigation and Comparison of Saturated and Unsaturated Flow in the Gilan-Gharb Embankment Dam

Samin Pourghani, Farzin Salmasi* , Bahram Nourani , Hadi Arvanaghi

Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

ABSTRACT: The purpose of this study is to investigate the characteristics of seepage flow in the Gilan-Gharb embankment dam in two saturated and unsaturated flow states using numerical simulation. The results of the numerical model for saturated flow and unsaturated flow indicated that the seepage flow rate in the unsaturated flow state is higher than the saturated flow state due to the addition of the amount of flow in the areas with capillary fringe flow. The comparison of the first flow line (phreatic line) in these two investigated states indicates that the phreatic line is in a lower location in the saturated flow compared to the unsaturated flow. The factor that has caused such conditions is the presence of suction in the areas above the phreatic line in an unsaturated state, which has provided the ability for the water flow to rise to a higher level. Also, the exit hydraulic gradient downstream of the dam was also evaluated in both cases, and the results of this study revealed that the highest values of the exit hydraulic gradient occur nearly after the toe of the dam, so that the exit hydraulic gradient in the unsaturated state is 1.8 times of the saturated state. Since the exit hydraulic gradient is less than one for both saturated and unsaturated states, the sand boiling phenomenon does not occur in the investigated earthen dam. It should be noted that the hydraulic gradient in the dam body was also investigated for two saturated and unsaturated states and the results showed that the hydraulic gradient in both states are not meaningfully different from each other and the hydraulic gradient values decrease significantly when exiting the dam core so that the value of this reduction in the state of unsaturated flow is more than that of saturated flow. The comparison of the results of the numerical model in both simulation modes indicates that the slope of the phreatic line in the central core is 0.947 for the unsaturated state and 0.905 for the saturated state, so the value of the phreatic line slope in the unsaturated state is 1.047 times of the saturated state.

Review History:

Received: Sep. 11, 2024
Revised: Nov. 11, 2024
Accepted: May, 07, 2025
Available Online: Jun. 09, 2025

Keywords:

Embankment Dam
Saturated and Unsaturated Flow
Phreatic Line
Uplift Force
Hydraulic Gradient

1- Introduction

Water flow through soil is a fundamental issue in soil mechanics. In this investigation, the most significant problem is pore-water pressure [1]. Both negative and positive pore-water pressure have a direct relationship with the shear strength and soil deformation properties. Much study has been prepared in this field, and the results confirm that even water flow in an unsaturated soil and the earth surface has a direct relationship with soil matric suction (or negative pore-water pressure). Consequently, if seepage is important, the pore-water pressure in the vertical soil profile should be carefully investigated [2]. Investigations related to flow in porous media are mainly limited to saturated soils. The water surface is considered an upper boundary, and the flows that may occur in the capillary region (above the water surface) are ignored. This simplification is not acceptable for unsaturated conditions, and thus an important component in the water flow of soil is ignored [3]. Seepage in earthen dams is a significant design consideration, and if it exceeds a specified

value, the dam may experience failure. There are numerous methods available for predicting seepage however, these methods produce varied findings with respect to the soil-water medium behavior, the complexity of layered soils, and the hydraulic conductivity of soil in earthen dams ([4];[5]).

2- Material and methods

The differential equation governing the flow in porous media for saturated and unsteady flow [6]:

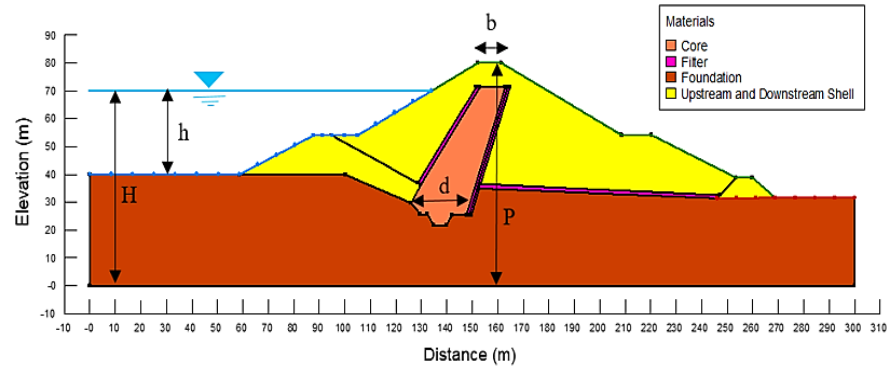
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

where, H is the water total head (m), Q is the flow rate ($m^3/s/m^3$), θ is the volumetric water content (m^3/m^3), k_x is the hydraulic conductivity in the x -direction (m/s), k_y is the hydraulic conductivity in the y -direction (m/s), and t is time (s).

*Corresponding author's email: salmasi@tabrizu.ac.ir

Table 1. Characteristics of soil materials used in this study

Dam component	Core	Filters	Foundation	Shells
Soil texture	Clay	Silty sand	Sand	Silt
Saturated volumetric water content (m^3/m^3)	0.525	0.4	0.35	0.45
Saturated hydraulic conductivity (m/s)	10^{-6}	0.01	10^{-8}	10^{-5}
Residual volumetric water content (m^3/m^3)	0.1	0.06	0.01	0.05

**Fig. 1. Simulated dam model**

The properties of the materials entered into the numerical model in the Gilan-Gharb earthen dam are listed in Table 1. The numerical model of the Gilan-Gharb earthen dam is presented in Fig. 1.

3- Results and discussion

Figures 2 and 3 show the location of the phreatic line in the body of the dam for $H = 70$ m, in a saturated and an unsaturated flow, respectively. As can be seen, in the unsaturated flow, the phreatic line reaches the upstream face of the clay core at a higher point than in the saturated state. The reason for this is capillarity flow, which increases the water level for the unsaturated flow in that zone by the rise of the water inside the small pores inside the dam core. Also, the phreatic line slope inside the clay core is different in saturated and unsaturated states. The slope of the phreatic line inside the clay core is 0.947 for the unsaturated case and 0.905 for saturated flow, so the slope of the phreatic line inside the clay core in the unsaturated flow is 1.047 times that of the saturated flow.

4- Conclusions

The most important results related to this study are presented below.

- The results obtained from the numerical simulation using SEEP/W software for saturated and unsaturated flows showed that soil matric suction (negative pore-water pressure) above the phreatic line means the existence of a

capillary fringe flow.

- Considering the height and the capillary fringe flow, the seepage from the body in the unsaturated flow was higher than for the saturated flow. The discharge in the unsaturated state increases as it reaches the core points of the dam, and the seepage of water from the dam body accounts for a larger percentage of the discharge. Also, the density of flow lines at the end points of the dam downstream and above the phreatic line shows the greater effect of the capillary flow on the flow passing through the dam body.
- The effect of unsaturated soil on the phreatic line inside the earthen dam has been investigated, and the higher density is evident in the core in the phreatic line area and above it in the center of the core compared to the shell. This indicates a greater flow resistance of clay grains for water and an increase in the volume of water content in the clay core. Compared to the shell, it can be concluded that the capillary flow is more significant in the clay core than in the shell.
- Installing one or more horizontal drains in the upstream shell of the dam can have a positive effect in reducing the pore water pressure. The decrease in pore-water pressure and the phreatic line loss will increase the dry zones in the dam shell, and with the increase in the shear strength of the soil, it will increase the stability of the slope of the dam body. At the same time, checking the stability of the upstream and downstream slopes and calculating their factor of safety against stability can be the subject of further study.

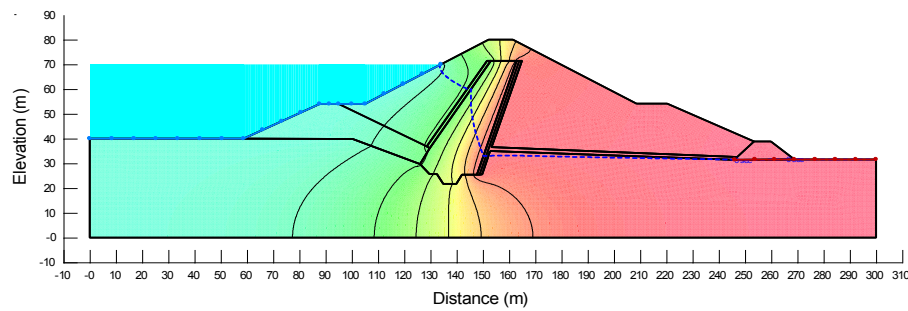


Fig. 2. Location of phreatic lines in the dam body for saturated flows

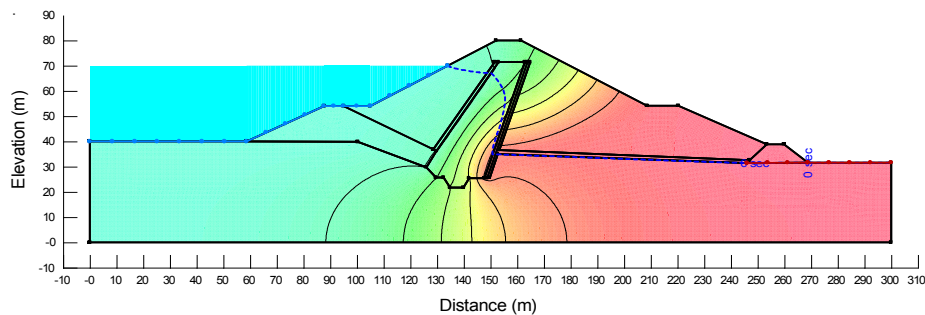


Fig. 3. Location of phreatic lines in a dam body for unsaturated flows

References

- [1] R. Hosseinzadeh Asl, Salmasi, F., Arvanaghi, H. , Numerical investigation on geometric configurations affecting seepage from unlined earthen channels and the comparison with field measurements, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1) (2020) 236-253.
- [2] F. Salmasi, Abraham, J., Predicting seepage from unlined earthen channels using the finite element method and multi variable nonlinear regression, *Agricultural Water Management*, 34(106148) (2020).
- [3] S.P. Nouri M, Salmasi F, Abraham J., Prediction of homogeneous earth slope safety factors using the forest and tree based modelling, *Geotech Geol Eng.*, (2021).
- [4] R. Norouzi, Salmasi, F., Arvanaghi, H., Uplift pressure and hydraulic gradient in Sabalan Dam Applied Water Science, 10(111) (2020) 1-12.
- [5] B. Nourani, Salmasi, F., Ghorbani M.A., Development of a new hybrid technique for estimating of relative uplift force in gravity dams based on whale optimization algorithm, *Journal of Hydraulic Structures*, 9(1) (2023) 43-62.
- [6] B. Nourani, Salmasi, F., Arvanaghi, H., Abraham, J., Development of explicit formulas for estimating Seepage characteristics underneath aprons with equal and unequal double vertical end piles, *International Journal of Geomechanics*, 22(12) (2023) 1-12.



بررسی و مقایسه عددی جریان اشباع و غیراشباع در سد خاکی گیلان غرب

ثمین پورغنی، فرزین سلماسی*^{id}، بهرام نورانی^{id}، هادی ارونقی

گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹

کلمات کلیدی:

سد خاکی

جریان اشباع و غیراشباع

خط فریاتیکی

نیروی بالا برنده

گرادیان هیدرولیکی

خلاصه: بررسی خصوصیات مختلف جریان نشتی مانند مقدار دبی جریان نشتی، موقعیت خط فریاتیکی، توزیع فشار آب منفذی و نیروی بالا برنده از مهمترین مسائل در پیش روی طراحان سازه های هیدرولیکی است. هدف از این تحقیق، بررسی خصوصیات جریان نشتی در بدنه سد خاکی غیرهمگن گیلان غرب در دو حالت جریان اشباع و غیراشباع با استفاده از شبیه سازی عددی است. نتایج حاصل از مدل عددی، نشان داد که دبی نشتی در حالت جریان غیراشباع به دلیل اضافه شدن مقدار جریان نواحی دارای جریان موئینه ای نسبت به حالت جریان اشباع بیشتر است. مقایسه خط فریاتیکی، نشان داد که خط فریاتیکی در جریان اشباع نسبت به جریان غیراشباع در موقعیت پایین تری قرار می گیرد. عاملی که باعث ایجاد چنین شرایطی می شود، وجود مکش ماتریک خاک در نواحی بالای خط فریاتیکی در حالت غیراشباع است که توانایی صعود جریان آب به تراز بالا را فراهم می کند. همچنین گرادیان هیدرولیکی خروجی در پایاب سد نیز در هر دو حالت، ارزیابی شد و نتایج این مطالعه نشان داد که مقدار گرادیان هیدرولیکی خروجی در جریان غیراشباع $1/8$ برابر مقدار نظیر آن در جریان اشباع است. لازم به ذکر است، گرادیان هیدرولیکی در بدنه سد برای این دو حالت نیز مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر گرادیان هیدرولیکی هنگام خروج از هسته سد کاهش چشمگیری پیدا می کند، به طوری که مقدار این کاهش در حالت جریان غیراشباع بیشتر از جریان اشباع می باشد. شیب خط فریاتیکی در درون هسته مرکزی برای حالت غیراشباع $0/947$ و برای حالت اشباع $0/905$ بدست آمد. لذا مقدار شیب خط فریاتیکی درون هسته در حالت غیراشباع $1/047$ برابر مقدار نظیر در حالت اشباع می باشد. مقادیر نیروی بالا برنده در هر دو حالت بعد از استخراج نحوه توزیع بار فشاری برآورد گردید. برآیند نیروی بالا برنده در جریان غیراشباع، حدود $8/3$ درصد نسبت به جریان اشباع افزایش دارد.

۱- مقدمه

بررسی جریان آب در خاک یکی از مسائل بنیادی در مباحث مکانیک خاک می باشد. در بررسی جریان آب در خاک، مهمترین مسأله، فشار آب منفذی است. فشار آب منفذی چه مثبت و چه منفی نسبت مستقیم با مقاومت برشی و خصوصیات تغییر شکل خاک دارد. در چند دهه گذشته، تحقیقات زیادی در این زمینه انجام گرفته است و نتایج نشان می دهند که حتی جریان آب در خاک غیراشباع و نزدیک سطح زمین، با مکش خاک (فشار منفی آب) رابطه ای مستقیم دارد. بنابراین، اگر برآورد دبی جریان نشت هدف اصلی باشد، فشار آب منفذی در نیمرخ عمودی خاک، باید به طور دقیق بررسی شود. تاکنون، تحلیل های مرتبط با جریان در محیط های متخلخل بیشتر برای خاک های اشباع صورت می گرفت. از این رو، سطح آزاد آب به صورت یک مرز فوقانی در نظر گرفته شده و از جریان هایی که ممکن است

در ناحیه مویینگی (بالای خط آزاد آب) به وجود آید، صرف نظر می شد. این ساده سازی و صرف نظر از جریان غیراشباع بالای سطح آزاد آب، قابل قبول نبوده و با این کار، از یک جزء با اهمیت در جریان آب در خاک چشم پوشی می شود. نکته مهم تر این است که انواع مسائلی که می تواند مورد تحلیل قرار گیرد، محدود می گردد. در برخی از مسائل بایستی با توجه به ماهیت فیزیکی مساله، جریان در محیط متخلخل به صورت غیراشباع تحلیل شود تا قضاوت و تصمیم سازی در مورد نتایج آن به صورت دقیق و منطقی ارائه گردد.

اصطلاح نشت یا تراوش، معمولاً به وضعیت هایی که نیروی رانش (موجد حرکت) اولیه توسط گرانش زمین کنترل می شود، اطلاق می شود. نظیر تراوش و افت های مربوطه از یک مخزن که نیروی رانش، مجموع اختلاف بار هیدرولیکی بین نقاط ورودی و خروجی است. یعنی حرکت آب صرفاً ناشی از نیروی گرانشی است. همچنین این عنوان برای حرکت آب در خاک های اشباع و غیراشباع استفاده می گردد. مدل سازی عددی نشت به

* نویسنده عهده دار مکاتبات: salmasi@tabrizu.ac.ir



صورت اشباع و غیراشباع یک مسأله غیرخطی بوده که برای حل معادلات حاکم، به تکنیک‌های تکرار شونده نیاز دارد. در روشهای حل عددی تکراری، روابط حاکم بر جریان آب، توسط روش المان محدود، گسسته‌سازی می‌شود و سپس دستگاه معادلات خطی، حل می‌شود [۲] بررسی خصوصیات جریان مرتبط با نشست در محیط‌های متخلخلی همچون پی و بدنه سد خاکی توسط محققان مختلف به روش آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد.

حشمتی و موحد [۳] در مطالعه خود، روش‌های تحلیلی پاولوسکی، شافرناک، کاساگراند و دوپویی را با حل عددی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که حل پاولوسکی، با خطای ۷/۷۵ درصد نسبت به حل عددی، نزدیک‌ترین نتیجه به حل عددی را می‌دهد و پس از آن به ترتیب روش‌های شافرناک، کاساگراند و دوپویی قرار می‌گیرند. نبویان‌پور و سامانی [۴] در تحقیق خود با استفاده از گسسته‌سازی معادله تراوش به روش حل عددی و نیز با حل تحلیلی معادلات حاصل از منقطع کردن معادله تراوش در حالت کلی (غیرهمسان، غیرهمگن) محل سطح آزاد و مکان خروجی آب در پایین دست را محاسبه کردند. باید توجه داشت که دانستن محل دقیق سطح آزاد نشست، منجر به یافتن محل‌هایی که باید در هنگام ساخت سد خاکی به آن‌ها توجه ویژه داشت، می‌گردد. احمدی و همکاران [۵] در تحقیقی، به مقایسه موقعیت خط نشست آزاد به‌دست آمده توسط روش مرسوم تقریبی و مدل عددی با استفاده از روش اجزا محدود در نرم‌افزار MATLAB پرداختند. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن بود که معادله تقریبی مرسوم در بالادست سد خاکی دارای خطای مشهودی بوده و خط نشست در این ناحیه بالاتر از خط نشست به‌دست آمده از معادلات تقریبی است. اما با نزدیک شدن به قسمت پایین‌دست سد خاکی تطابق قابل‌قبولی بین دو روش وجود خواهد داشت. ملک‌پور و همکاران [۶] در تحقیق خود، تاثیر ضخامت لایه زهکش افقی در مدل آزمایشگاهی و در محدوده طول‌های زهکش برآورد شده توسط روابط تحلیلی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش ضخامت و طول زهکش، پارامتر پوشش شیب پایین‌دست به مقدار زیادی افزایش یافته؛ در حالی که تاثیر پارامتر ضخامت در روابط تحلیلی موجود لحاظ نگردیده است. همچنین شدت دبی نشست با افزایش ضخامت زهکش به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که این نرخ افزایش دبی، با افزایش مقدار ضخامت حداکثر مورد نظر در این تحقیق کاهش می‌یابد. انصاری و همکاران [۷] در مقاله‌ای پروفیل جریان‌های زیرسطحی درون مصالح سنگریز را با استفاده از یک مدل عددی شبیه‌سازی کرده و

سپس با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. سپس با استفاده از یک مدل عددی شبیه‌سازی و با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها با استفاده از مدل SEEP/W که مبتنی بر روش المان محدود است، شبیه‌سازی عددی جریان را انجام دادند. مدل آزمایشگاهی شامل یک زهکش سنگریز به طول ۷ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع ۱ متر ساخته شده و از مصالح سنگریزهای گوشه‌دار شکسته به‌عنوان محیط متخلخل در مدل عددی تعریف و برای حالت‌های مختلف دبی جریان و شیب افقی، آزمایش‌ها اجرا و پروفیل و دبی جریان نشست یافته محاسبه و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که هر چند که مدل عددی می‌تواند دبی جریان را به خوبی شبیه‌سازی نماید، اما خط فریاتیکی نشست را کمتر از مقدار آزمایشگاهی و واقعی آن برآورد می‌نماید. قضاوی و همکاران [۸] در مقاله‌ای به بررسی عددی تأثیر اندرکنش زهکش افقی و دیوار آب‌بند بر فاصله خط آزاد جریان تا شیب پایین‌دست سدهای خاکی همگن با پی نفوذپذیر و نفوذناپذیر پرداختند. برای بررسی عددی نشست، از روش المان محدود استفاده کرده و پارامترهای طول دیواره آب‌بند و نسبت نفوذپذیری خاک بدنه سد به خاک پی در شرایط غیر ایزوتروپیک را مقایسه کردند. نتایج مقایسه نشان داد که نفوذپذیری مصالح سد تأثیر زیادی بر جابجایی خط آزاد جریان نسبت به شیب پایین‌دست دارد. جی و همکاران [۹]، در مطالعات خود یک روش ساده برای ترکیب تحلیل خاک‌های غیراشباع و شبیه‌سازی عددی آبیگری در سدهای خاکی - سنگی ارائه نمودند و نیز فشار آب منفذی و خط فریاتیکی را هم‌زمان علاوه بر تنش و جابجایی در سد به‌دست آوردند. نتایج محاسباتی نشان دهنده اثر بهم پیوسته بین تغییر شکل و فشار آب منفذی است. توسعه خط فریاتیکی در هسته سد، سریع‌تر از تحلیل تراوش غیراشباع بدون ترکیب با تغییر شکل، محاسبه شده است. تغییرات فشار آب منفذی تنها مرتبط با تراوش غیراشباع به‌دست آمده با تغییرات سطح آب نیست، بلکه فشار آب منفذی مازاد، متأثر از تغییر شکل مصالح سد نیز است.

کاربرد قانون دارسی برای جریان غیراشباع، مستلزم تعیین دقیق شیب منحنی مشخصه رطوبتی و بیان هدایت هیدرولیکی به صورت تابعی از رطوبت یا مکش ماتریک است. اغلب، نشست و هدایت هیدرولیکی در محیط غیر اشباع نادیده گرفته می‌شود که لازم است برای تعیین میزان تراوش و مکان هندسی آب موجود در یک محیط متخلخل و همچنین توسعه محاسبات در پایین‌دست سد و یا در داخل فیلتر، مورد توجه قرار گیرد [۱۰]. محمدیان و همکاران [۱۱] به شبیه‌سازی عددی جریان از بدنه سد خاکی غیرهمگن علویان مراغه به روش عددی در دو حالت اشباع و غیراشباع پرداختند. ایشان،

و مقدار دبی نشستی، تغییرات گرادیان هیدرولیکی، تغییرات فشار آب منفذی و نیروی بالابرنده و مقایسه آن‌ها در دو حالت جریان اشباع و غیراشباع می‌باشد. برای نیل به این هدف، شبیه‌سازی عددی برای سد خاکی گیلان غرب انجام می‌شود. از نرم‌افزار SEEP/W که متعلق به بسته نرم‌افزاری Geo-Studio است، استفاده می‌شود که با روش اجزا محدود، معادلات حاکم بر جریان آب در خاک، حل می‌شوند. نتایج حاصل از آن، برای دو حالت جریان اشباع و غیراشباع مورد مقایسه قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند در تصمیمات مهندسان طراح، مورد استفاده قرار گیرد تا بتوانند یک طرحی بهینه و مطلوب را فراهم نمایند. برای سد خاکی گیلان غرب، داده‌های دقیق مرتبط با مصالح خاکی مورد استفاده در هر یک از قسمت‌های بدنه سد در دسترس نبودند و منحنی‌های مشخصه رطوبتی و تابع هدایت هیدرولیکی برای هر یک از مصالح خاکی ابتدا با روش‌های موجود در مدل عددی تخمین زده شدند و سپس از این مقادیر و توابع در مدل‌سازی‌ها بهره برده شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان

معادله دیفرانسیلی حاکم بر جریان در محیط‌های متخلخل در جریان اشباع برای شرایط جریان غیرماندگار، به صورت رابطه ۱ می‌باشد [۱۶]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن، H بار کل (متر)، Q نرخ حجمی جریان (مترمکعب بر ثانیه) در هر مترمکعب از خاک، θ شاخص رطوبت حجمی آب (مترمکعب آب بر مترمکعب خاک)، k_x هدایت هیدرولیکی در جهت x (متر بر ثانیه)، k_y هدایت هیدرولیکی در جهت y (متر بر ثانیه) و t زمان (ثانیه) می‌باشند. معادله ۱ در حالت جریان ماندگار به صورت رابطه ۲ تغییر می‌یابد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (2)$$

اگر محیط همگن و ایزوتروپ باشد ($k_x = k_y = k$) و هیچ جریان جانبی به محیط خاک وارد و خارج نشود، یعنی $Q=0$ می‌توان نوشت:

از نرم‌افزار SEEP/W استفاده کردند و نتایج مدل‌سازی‌ها نشان داد که مقدار دبی نشستی در مقاطع مختلف مورد بررسی در حالت غیراشباع نسبت به حالت اشباع بیشتر می‌باشد. محاسبات عددی چاپویس و آبورتین [۱۲] نشان داد که جریان نشت در سد خاکی در شرایط جریان غیراشباع بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بیشتر از مقدار نظیر آن برای سد در شرایط اشباع است. البته لازم به یادآوری است که شبیه‌سازی انجام شده در مطالعه یاد شده، برای سد خاکی غیرهمگن با هسته رسی ولی با مقطع فرضی انجام شد که فاقد فیلتر در کنار هسته بود. بدیهی است که وجود فیلتر در هدایت جریانهای نشستی و افت خط فریاتیک نقش بسزایی دارد که میبایست در مدل‌سازیها مد نظر قرار گیرد. یکی از نیروهای مخرب در جهت واژگونی سدهای وزنی، نیروی بالابرنده است که میبایست در طراحیها مد نظر قرار گیرد. نورانی و همکاران [۱۳] در تحقیق خود برای تخمین نیروی بالابرنده در زیر سدهای وزنی، از الگوریتم هیبریدی وال استفاده کردند و نشان دادند که این روش با دقت زیادی، نیروی بالابرنده را تخمین می‌زند. در تحقیق دیگری، نورانی و همکاران [۱۴] نشان دادند که با استفاده از روش رگرسیون کلاسیک میتوان خصوصیات جریان نشستی از زیر بدنه یک سازه هیدرولیکی را با دقت مناسبی برآورد کرد. معادلات رگرسیونی مختلفی ارائه شد که توسط آنها میتوان فشار آب منفذی در نقاط کلیدی مانند کناره‌های دیوارهای آبنند را تخمین زد. در تحقیق مذکور، دیوارهای آبنند در ابتدا و انتهای سازه با عمقهای متفاوت در نظر گرفته شد که مخصوصا برای طراحی سدهای انحرافی مفید هستند. طاهری اقدم و همکاران [۱۵] به مطالعه تاثیر تعبیه زهکش در زیر سدهای وزنی پرداختند. آبهای نفوذی به پی سدها می‌تواند وارد این زهکش‌ها شده و علاوه بر کاهش فشار آب منفذی، موجب کاهش نیروی بالابرنده در زیر سدهای وزنی می‌شود که به بهبود وضعیت پایداری سد کمک می‌کند. قطر، عمق و فاصله نصب زهکش‌ها از جمله متغیرهای مستقل هستند که مورد مطالعه قرار گرفتند.

همانطور که از منابع قبلی مشهود است، تاکنون اکثر تحلیل‌های مرتبط با جریان آب در خاک در سازه‌های ژئوتکنیکی بر روی جریان اشباع، متمرکز بوده است و منابع کمی در مورد بررسی جریان قسمت غیراشباع وجود دارد. بر خلاف تصور اکثر طراحان و مهندسان، حجم آب جا به جا شده در قسمت غیراشباع خاک در مقایسه با حجم آب جا به جا شده در قسمت اشباع خاک قابل صرف نظر کردن نمی‌باشد. در این تحقیق، از سد خاکی گیلان غرب برای بررسی این موضوع استفاده می‌شود. هدف از این تحقیق بررسی خصوصیات جریان نشستی از جمله موقعیت خط فریاتیک یا اولین خط جریان



شکل ۱. مخزن و بدنه سد خاکی گیلان غرب

Fig. 1. The reservoir and body of Gilan-Gharb embankment dam

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(H) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(H) \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (۵)$$

$$k \nabla^2 H = 0 \quad (۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(H) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(H) \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0 \quad (۶)$$

در محیط خاک، $k \neq 0$ می‌باشد، بنابراین رابطه ۳ به رابطه ۴ که به معادله لاپلاس معروف می‌باشد، تبدیل می‌گردد. معادله لاپلاس، در جریان اشباع برای بررسی جریان نشت ماندگار در محیط‌های همگن و ایزوتروپ، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در مدل‌های عددی، برای شرایط ذکر شده در بالا، معادله لاپلاس به صورت فشرده شده زیر، استفاده می‌شود.

$$\nabla^2 H = 0 \quad (۴)$$

۲-۲- معرفی سد خاکی مورد مطالعه در تحقیق حاضر
سد خاکی گیلان غرب، یک سد خاکی با هسته رسی می‌باشد که در ۵ کیلومتری شرق شهر گیلان غرب و در ۱۶۰ کیلومتری غرب شهر کرمانشاه واقع شده است. این سد، در حد واسط دو روستای کلاشک بالائی و کلاشک پائینی قرار دارد. ارتفاع از روی پی این سد خاکی ۵۸ متر می‌باشد. این سد به منظور تامین آب شرب و مصارف کشاورزی و همچنین کاربردهای هیدروالکتریکی بر روی رودخانه گیلان غرب به دست کارشناسان و متخصصان تلاشگر صنعت آبی ایران احداث شده است. در شکل ۱، عکس مخزن و بدنه سد گیلان غرب ارائه شده است. طول و عرض تاج به ترتیب ۷۵۵ و ۹/۲۵ متر است. تراز نرمال دریاچه ۹۳۲ متر از سطح آزاد دریا است. حجم مخزن سد برابر ۱۹/۵ میلیون مترمکعب می‌باشد. سد از نوع خاکی با هسته رسی مایل است. ضخامت پی آبرفتی حدود ۴۰ متر است.

همانطور که اشاره گردید روابط اشاره شده در بالا، بیشتر برای شرایط خاک‌های اشباع مطرح می‌باشد. در جریان غیراشباع، هدایت هیدرولیکی همانند جریان اشباع، ثابت نبوده و تابعی از مقدار رطوبت یا مکش خاک است که به صورت تابع برای مصالح مختلف خاک در نظر گرفته می‌شود و به تابع هدایت هیدرولیکی معروف می‌باشد. لذا شکل کلی معادله حرکت آب در خاک برای جریان غیراشباع و غیرماندگار که به معادله ریچاردز معروف است، به صورت رابطه ۵ می‌باشد. رابطه ۵ در جریان ماندگار برای محیط همگن و ایزوتروپ یعنی با شرایط $Q=0$ و $k_x(H) = k_y(H) = k(H)$ به صورت رابطه ۶ تغییر می‌یابد:

جدول ۱. مشخصات مصالح خاکی استفاده شده در تحقیق حاضر

Table 1. Soil properties used in present study

پوسته‌ها	پی	فیلترها	هسته	
Silt	Sand	Silty sand	Clay	بافت خاک
۰/۴۵	۰/۳۵	۰/۴	۰/۵۲۵	محتوای حجمی آب در حالت اشباع (m^3/m^3)
۱۰ ^{-۵}	۱۰ ^{-۸}	۰/۰۱	۱۰ ^{-۶}	هدایت هیدرولیکی اشباع (m/s)
۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۱	محتوای آب باقی‌مانده (m^3/m^3)

۲-۳- نحوه مدل‌سازی عددی سد خاکی مورد مطالعه

همانطور که اشاره شد، هدف تحقیق حاضر، ارزیابی و مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی جریان اشباع و غیراشباع در سد خاکی گیلان‌غرب می‌باشد که برای این منظور از نرم‌افزار SEEP/W که یکی از زیر مجموعه‌های نرم‌افزار Geo-Studio است، استفاده می‌شود. در ادامه به فرایند و نحوه شبیه‌سازی این سد خاکی مورد مطالعه پرداخته می‌شود.

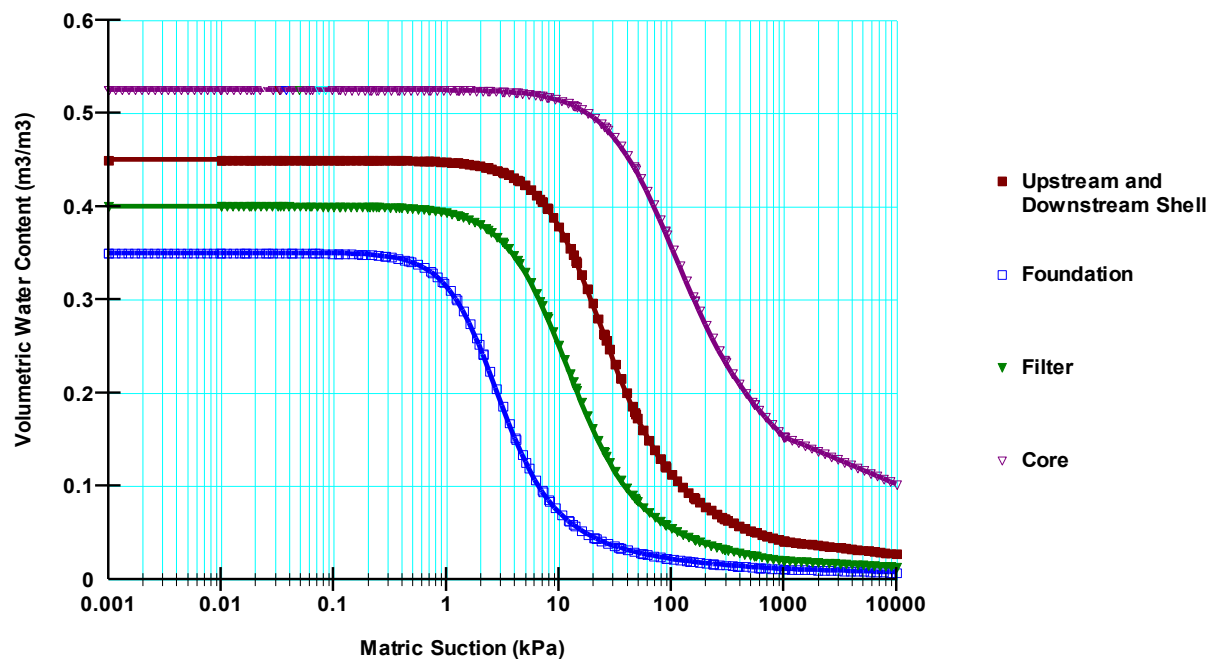
فلسفه هدایت هیدرولیکی از نظر تئوری به این صورت است که نفوذپذیری خاک‌ها در حالت غیراشباع کمتر از حالت اشباع است. زیرا هوای موجود در خاک، مانع حرکت راحت آب در خاک می‌شوند در نتیجه، آنالیز تراوش و جریان آب در خاک‌های غیر اشباع در حالت اشباع به نتایج غیرواقعی منجر می‌شود. از آنجایی هدف تحقیق حاضر، مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی جریان اشباع و غیراشباع در سد خاکی گیلان‌غرب می‌باشد، لذا نیاز است نحوه تخصیص هدایت هیدرولیکی در این دو حالت نیز معرفی گردد. در نرم‌افزار SEEP/W هدایت هیدرولیکی را می‌توان در دو حالت اشباع و غیراشباع بیان کرد. هدایت هیدرولیکی در حالت غیراشباع تابعی از مکش خاک می‌باشد. این تابع به این صورت تعریف می‌شود که در فشار آب منفذی منفی (مکش ماتریک)، هدایت هیدرولیکی خاک حداقل مقدار را دارد و در فشار آب منفذی صفر یا مکش مربوط به محتوای آب در خاک اشباع، مقداری برابر با هدایت هیدرولیکی خاک اشباع (k_{sat}) را دارا باشد. لذا در شرایط غیراشباع، هدایت هیدرولیکی به صورت تابعی از مکش و در حالت جریان اشباع هدایت هیدرولیکی ثابت (برابر بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی) در نظر گرفته می‌شود. مشخصات مصالح وارد شده به مدل عددی در سد خاکی گیلان‌غرب به صورت جدول (۱) است. با به کارگیری

این مقادیر، تابع محتوای آب و تابع هدایت هیدرولیکی در جریان غیراشباع برای مصالح مختلف بدنه سد خاکی با استفاده از روش ون گنختین [۱۷] استخراج شدند که این توابع در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه شده‌اند.

نمایی از سد خاکی گیلان‌غرب در مدل عددی بعد از اختصاص هدایت هیدرولیکی به هر یک از بخش‌های مختلف سد، در شکل (۴) ارائه شده است. در جدول (۲)، برخی از مشخصات هندسی و هیدرولیکی سد خاکی گیلان‌غرب آورده شده است.

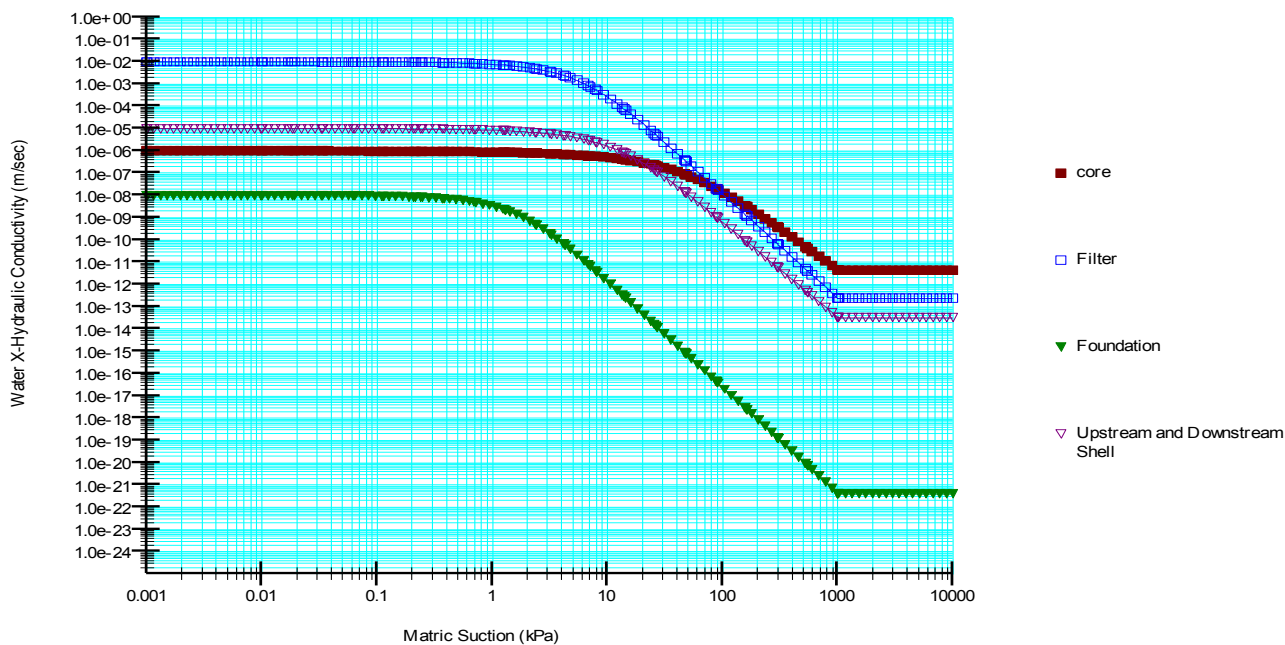
یکی از اصلی‌ترین عناصر در آنالیز عددی، تعیین شرایط مرزی است. بدون وجود شرایط مرزی، رسیدن به نتایج و نمایش آن در نرم‌افزار SEEP/W غیرممکن خواهد بود. نرم‌افزار SEEP/W برای تعریف شرایط مرزی از سطح مبنای تعریف شده برای مسئله استفاده می‌کند. به طوری که برای سطح بالادست که در تماس با آب مخزن باشد، ارتفاع آب از سطح مبنا به عنوان شرط مرزی تعریف می‌شود. یعنی تمامی این سطوح، دارای بار آبی یکسان خواهند بود و برای پایین‌دست نیز ارتفاع آب پایین‌دست لحاظ می‌گردد. نحوه اعمال شرایط مرزی در سد خاکی مورد مطالعه، در شکل (۵) نشان داده شده است. برای تحقیق حاضر، شرط مرزی برای مرز بالادست و پایین‌دست سد خاکی به ترتیب برابر با بار آبی کل ۷۰ متر و بار فشاری صفر متر (فشار اتمسفریک) در نظر گرفته شده است.

شرایط مرزی مربوط به پایین‌ترین نقطه آب‌رفت (ارتفاع صفر) و نیز مرزهای کناری راست و چپ به صورت صلب (غیرقابل نفوذ) در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است، به منظور جلوگیری از تاثیر ابعاد المان‌ها در نتایج، نیاز است تا مدل عددی مورد نظر از این نظر مورد ارزیابی اولیه قرار گیرد. در مدل‌سازی با روش اجزای محدود، این ارزیابی به آزمون مستقل از المان



شکل ۲. منحنی‌های محتوای آب حجمی مصالح خاکی مورد استفاده در تحقیق حاضر

Fig. 2. Volumetric water content curves of soil materials used in present study



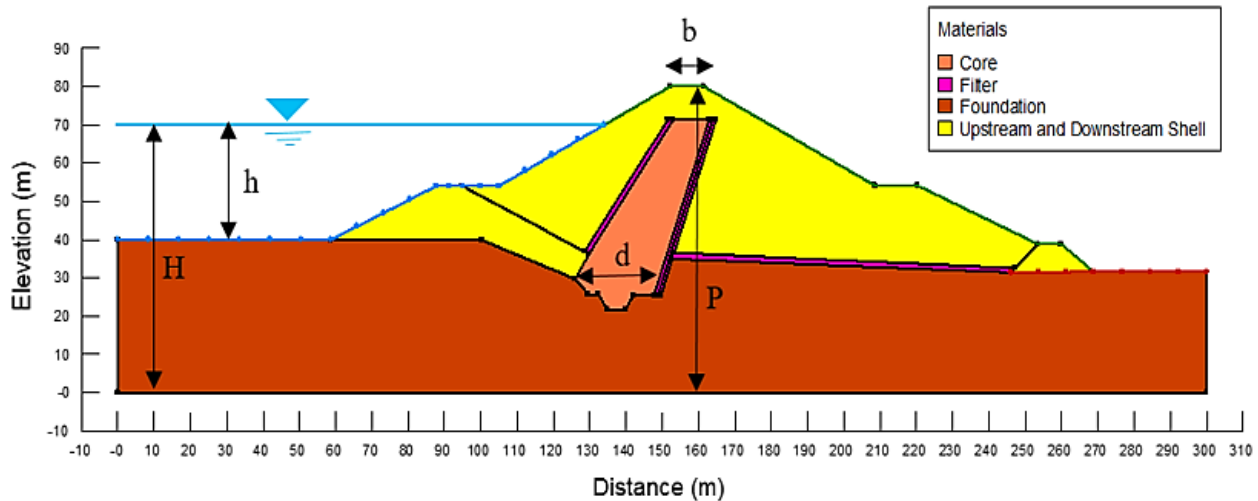
شکل ۳. تغییرات هدایت هیدرولیکی مصالح خاکی نسبت به مکش ماتریک خاک

Fig. 3. Changes of hydraulic conductivity of soil materials compared to soil matric suction

جدول ۲. مقادیر مشخصات هندسی و هیدرولیکی ثابت به کار رفته در مدل عددی

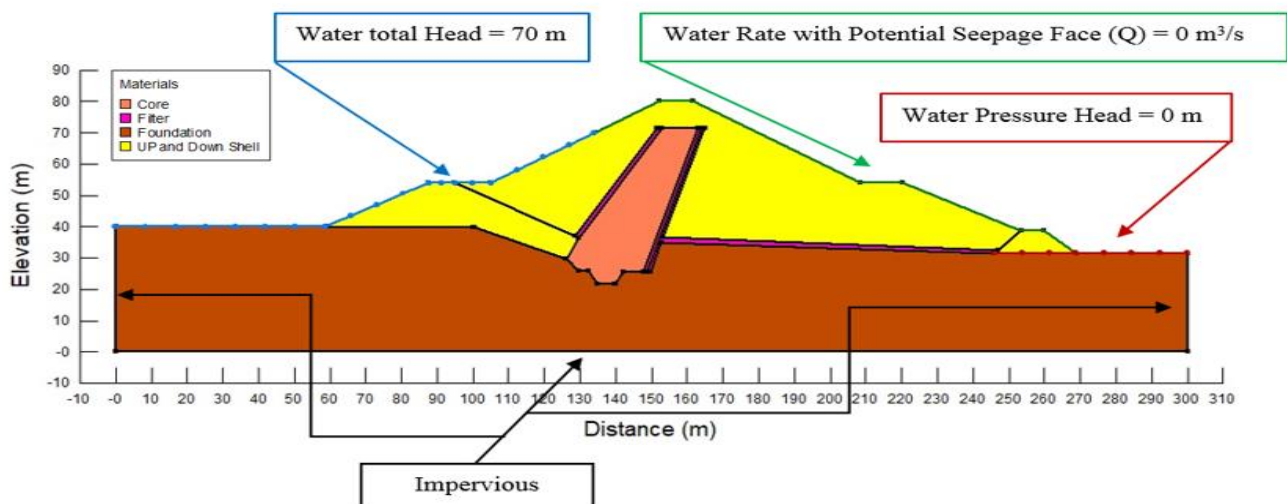
Table 2. The values of constant geometric and hydraulic characteristics used in the numerical model

b (m)	d (m)	P (m)	H (m)	h (m)
۹/۲۵	۲۱/۷۲	۸۰	۷۰	۳۰



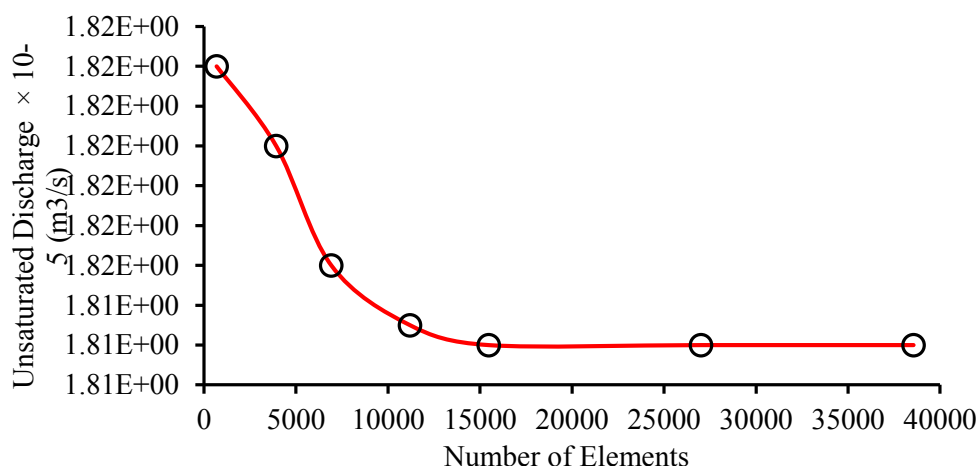
شکل ۴. طرح کلی از سد شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار

Fig. 4. Dam Model Simulated in the Software



شکل ۵. شرایط مرزی تعریف شده برای هندسه سد خاکی گیلان‌غرب

Fig. 5. Defined Boundary Conditions for the Geometry of Gilan Gharb Earth Dam



شکل ۶. نمودار مستقل از شبکه‌بندی مدل عددی برای تحقیق حاضر

Fig. 6. Element independent test of numerical model for present study

معروف می‌باشد. با توجه به اینکه هندسه سد خاکی در هر دو حالت جریان اشباع و غیراشباع یکسان می‌باشد، این ارزیابی برای جریان غیراشباع که شرایط آن مطابق با شرایط واقعی برای مساله حاضر می‌باشد، بررسی گردید و سپس این تعداد از المان در جریان اشباع نیز مد نظر قرار گرفت تا تعداد المان‌ها در هر دو مدل به صورت یکسان در شبیه‌سازی‌های عددی در نظر گرفته شده باشد. بنابراین در تحقیق حاضر، شبکه‌هایی با ابعاد مختلف در نظر گرفته شدند و به ازای هر یک از این شرایط، مقدار دبی جریان نشستی در حالت جریان غیراشباع از مدل عددی استخراج گردید و در نهایت دیاگرام دبی نشستی در برابر تعداد المان‌ها، رسم شد. مطابق شکل (۶)، دبی نشستی در جریان غیراشباع به ازای تعداد المان ۱۵۰۰۰ و بیشتر، تقریباً ثابت باقی مانده است. به بیان دیگر، نتایج حاصل از مدل عددی به ازای تعداد المان‌های بیش از این مقدار، تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد. در تحقیق حاضر، تعداد گره و المان به ترتیب برابر با ۱۵۷۵۴ و ۱۵۴۶۲ انتخاب شد و در این حالت، ابعاد المان‌ها برابر $1\text{m} \times 1\text{m}$ است و این مقدار در تمام شبیه‌سازی‌ها ملاک عمل قرار گرفت. لازم به ذکر است، در شبیه‌سازی‌های عددی، از یک الگوی بی‌ساختار که اجزای مثلثی و چهارگوش را تولید می‌کند، استفاده شده است. در شکل (۷) نحوه شبکه‌بندی مقطع عرضی سد خاکی گیلان غرب نشان داده شده است.

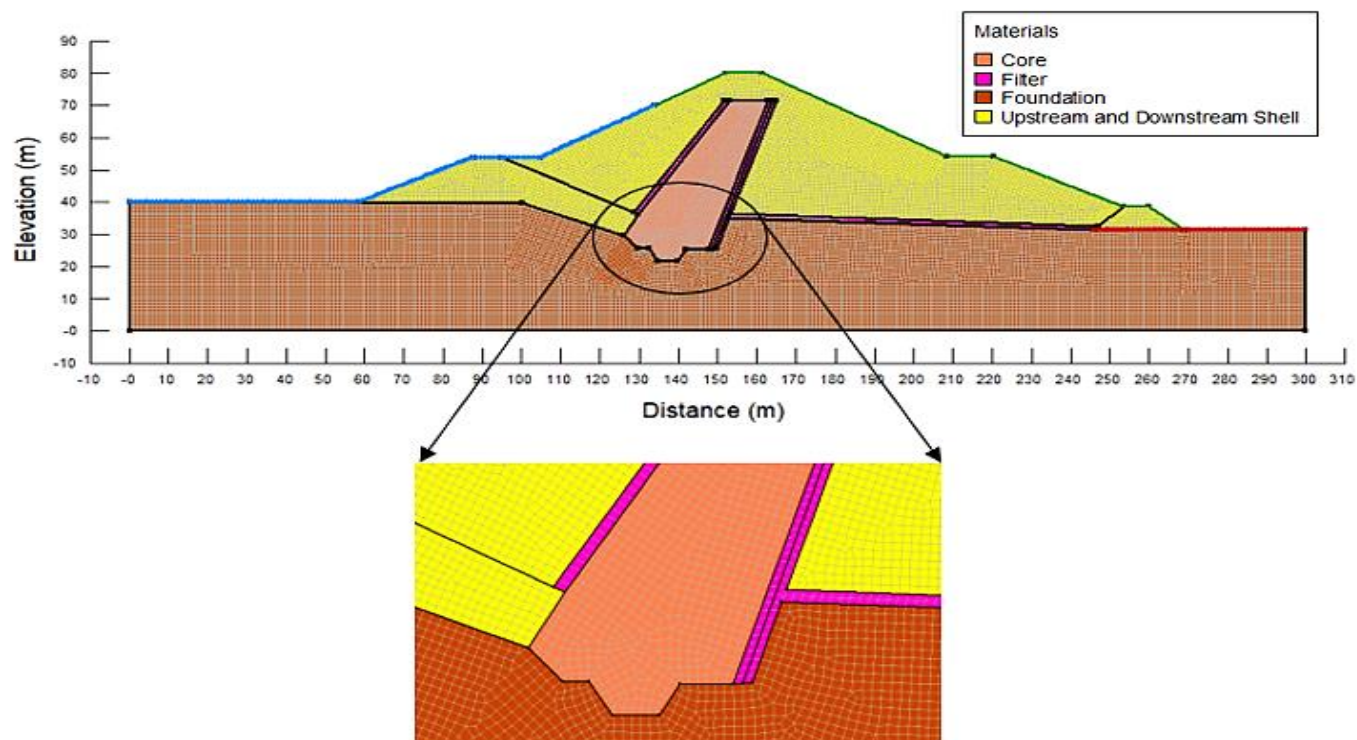
قبل از بیان شد، علت آن صعود موینگی آب درون خاک است. به منظور مقایسه بهتر موقعیت خط فریاتیکی در دو جریان اشباع و غیراشباع، موقعیت قرارگیری اولین خط جریان (خط فریاتیکی) در هر دو حالت، استخراج و در شکل (۱۰) نشان داده شد. خط فریاتیکی برای جریان

معروف می‌باشد. با توجه به اینکه هندسه سد خاکی در هر دو حالت جریان اشباع و غیراشباع یکسان می‌باشد، این ارزیابی برای جریان غیراشباع که شرایط آن مطابق با شرایط واقعی برای مساله حاضر می‌باشد، بررسی گردید و سپس این تعداد از المان در جریان اشباع نیز مد نظر قرار گرفت تا تعداد المان‌ها در هر دو مدل به صورت یکسان در شبیه‌سازی‌های عددی در نظر گرفته شده باشد. بنابراین در تحقیق حاضر، شبکه‌هایی با ابعاد مختلف در نظر گرفته شدند و به ازای هر یک از این شرایط، مقدار دبی جریان نشستی در حالت جریان غیراشباع از مدل عددی استخراج گردید و در نهایت دیاگرام دبی نشستی در برابر تعداد المان‌ها، رسم شد. مطابق شکل (۶)، دبی نشستی در جریان غیراشباع به ازای تعداد المان ۱۵۰۰۰ و بیشتر، تقریباً ثابت باقی مانده است. به بیان دیگر، نتایج حاصل از مدل عددی به ازای تعداد المان‌های بیش از این مقدار، تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد. در تحقیق حاضر، تعداد گره و المان به ترتیب برابر با ۱۵۷۵۴ و ۱۵۴۶۲ انتخاب شد و در این حالت، ابعاد المان‌ها برابر $1\text{m} \times 1\text{m}$ است و این مقدار در تمام شبیه‌سازی‌ها ملاک عمل قرار گرفت. لازم به ذکر است، در شبیه‌سازی‌های عددی، از یک الگوی بی‌ساختار که اجزای مثلثی و چهارگوش را تولید می‌کند، استفاده شده است. در شکل (۷) نحوه شبکه‌بندی مقطع عرضی سد خاکی گیلان غرب نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

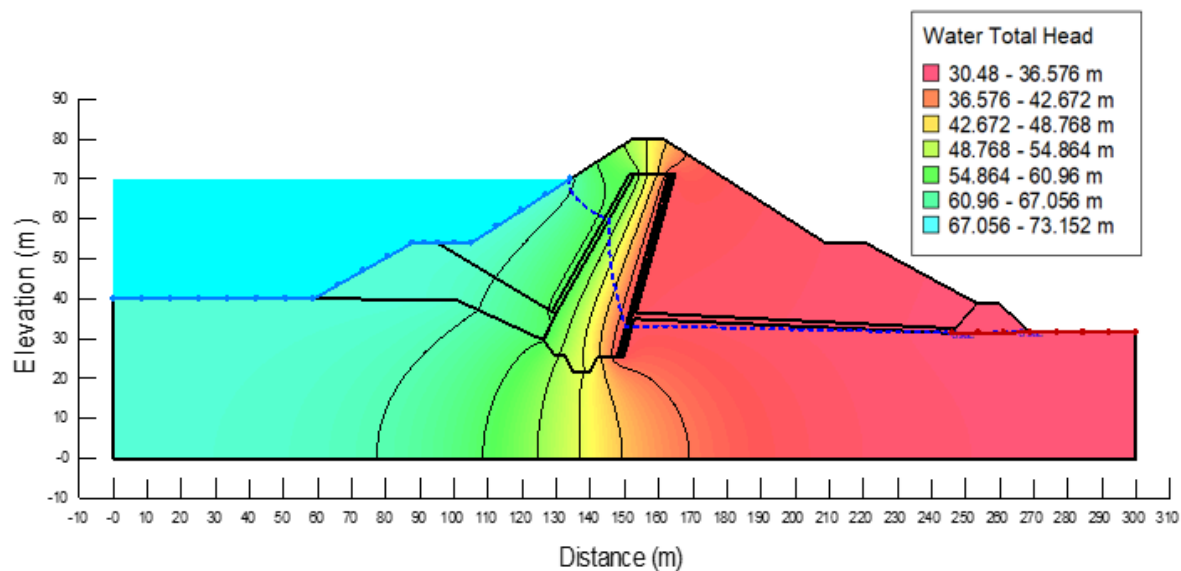
۳-۱- بررسی موقعیت خط فریاتیکی در سد خاکی مورد مطالعه

در شکل‌های (۸) و (۹) موقعیت قرارگیری خط فریاتیکی در بدنه سد خاکی مورد مطالعه به ازای بار کل ۷۰ متر، پس از شبیه‌سازی عددی به ترتیب برای



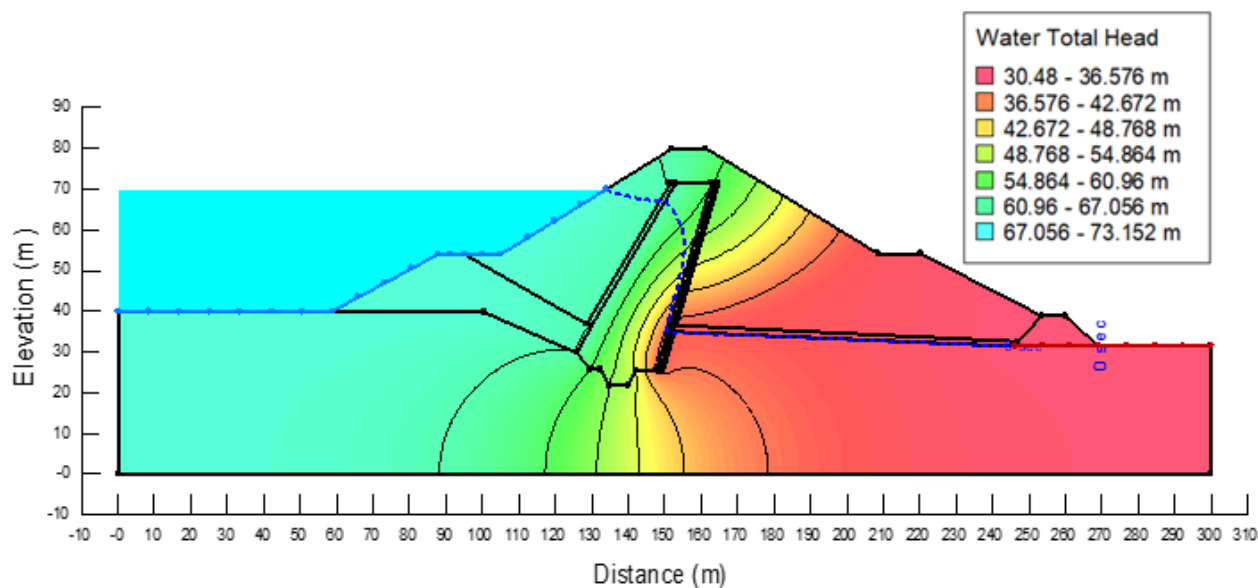
شکل ۷. نمایی از بزرگترین مقطع سد خاکی گیلان غرب

Fig. 7. View of the largest section of the Gilan-Gharb embankment dam



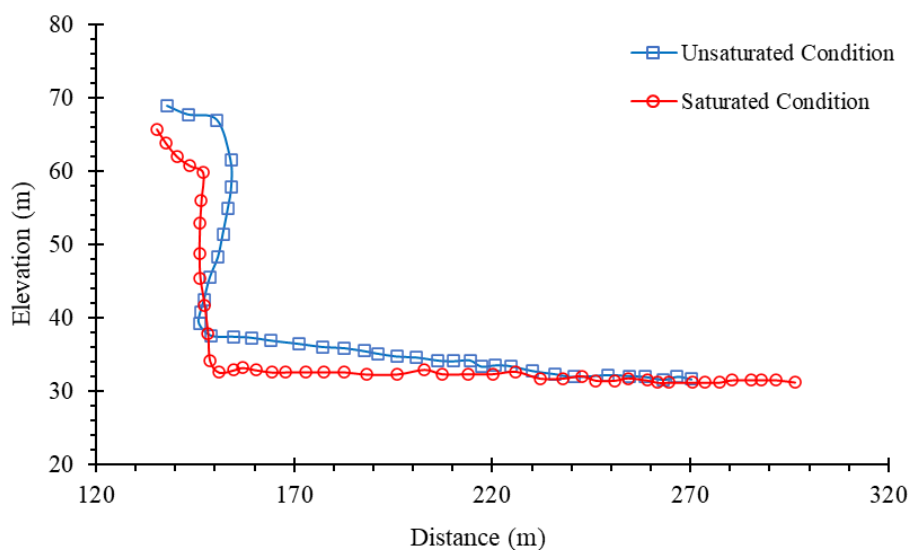
شکل ۸. موقعیت خط فریاتیك در بدنه سد برای حالت اشباع

Fig. 8. Location of phreatic line in dam body for saturated condition



شکل ۹. موقعیت خط فریاتیك در بدنه سد برای حالت غیراشباع

Fig. 9. Location of phreatic line in dam body for unsaturated condition



شکل ۱۰. موقعیت خط فریاتیك در بدنه سد خاکی برای جریان اشباع و غیراشباع

Fig. 10. Location of phreatic line in embankment dam body for saturated and unsaturated flow

است که اولین خط نشت جریان در داخل هسته و پوسته پایین دست در حالت جریان غیراشباع نسبت به جریان اشباع در موقعیت خیلی نزدیکی به زهکش دودکشی قرار گرفته است و این بیان می کند که در جریان اشباع، جریان از زهکش دودکشی می تواند در یک وضعیت جریان آزاد برقرار گردد.

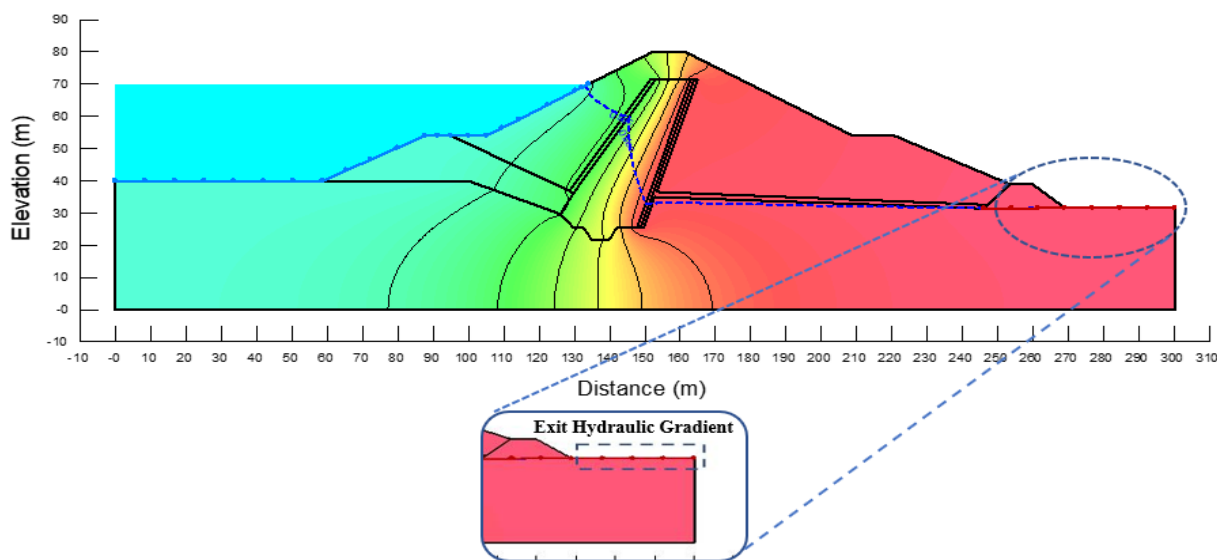
غیراشباع در موقعیت بالاتری نسبت به جریان اشباع قرار گرفته است. عاملی که باعث ایجاد چنین شرایطی شده است، خیز مویینگی آب است که در حالت غیراشباع، توانایی صعود جریان آب به تراز بالا را فراهم نموده است. نکته دیگری که در مقایسه این دو شرایط می توان به آن اشاره کرد، این

۳-۲- بررسی گرادیان هیدرولیکی در پایاب سد خاکی برای جریان اشباع و غیراشباع

در شکل (۱۱)، محل بررسی مقادیر گرادیان هیدرولیکی در پایاب سد خاکی گیلان غرب نشان داده شده است. تغییرات گرادیان هیدرولیکی در پایاب سد برای جریان اشباع و غیراشباع در شکل (۱۲) ارائه شده است. گرادیان هیدرولیکی در پایین‌دست (محل خروج آب از زهکش‌های سد)، برای هر دو حالت جریان اشباع و غیراشباع روند کاهشی دارد. بیشترین مقادیر گرادیان هیدرولیکی خروجی بلافاصله بعد از پنجه سد اتفاق می‌افتد که مقادیر آن‌ها برای دو حالت اشباع و غیراشباع به ترتیب ۰/۰۰۲۹ و ۰/۰۰۵۲ است.

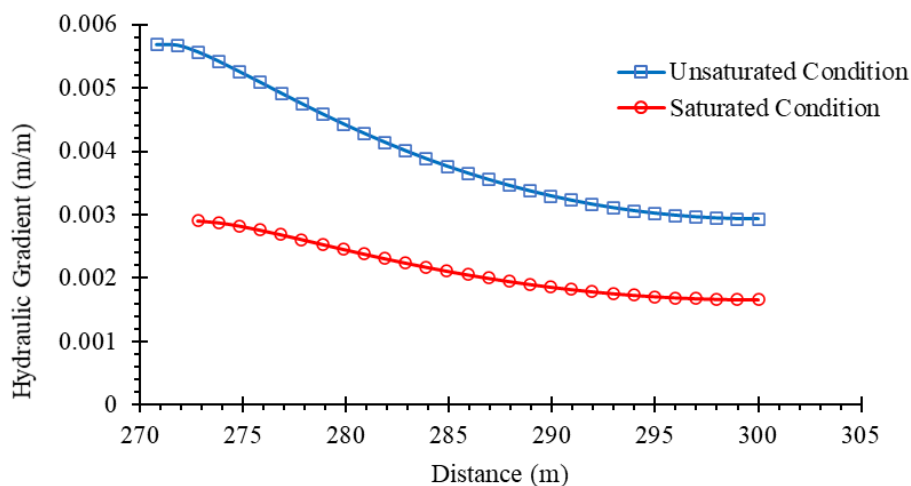
لذا می‌توان نتیجه گرفت مقدار گرادیان هیدرولیکی خروجی در جریان غیراشباع ۱/۸ برابر مقدار نظیر آن در جریان اشباع می‌باشد. لذا در مدل‌سازی بایستی دقت کرد که اگر مقطع سد خاکی به صورت اشباع شبیه‌سازی گردد، مقدار گرادیان هیدرولیکی خروجی ممکن است، کمتر از شرایط واقعی به دست آید و لذا طراحان بایستی تاثیر چنین حالتی را در طرح‌های مهندسی خود، مورد توجه قرار دهند. لازم به ذکر است که برای ماسه با چگالی ۲/۶۷

همچنین با دقت در وضعیت قرارگیری خط فریاتیک در موقعیت قبل از ورود به هسته و داخل هسته برای دو جریان اشباع و غیراشباع مشاهده می‌گردد که خط فریاتیک در قبل از ورود به هسته سد خاکی برای جریان غیراشباع در یک وضعیت بالاتری قرار دارد و در داخل هسته نیز موقعیت قرارگیری خط فریاتیک در جریان اشباع به مراتب پایین‌تر از جریان غیراشباع می‌باشد. دلیل وقوع چنین شرایطی به مقدار هدایت هیدرولیکی مصالح خاکی این قسمت‌ها مربوط می‌شود که در جریان اشباع، به دلیل یکسان در نظر گرفته شدن مقدار هدایت هیدرولیکی (اعمال حداکثر هدایت هیدرولیکی خاک) برای قسمت‌های مختلف سد خاکی در مدل عددی چنین وضعیتی اتفاق افتاده است. با توجه به ماهیت فیزیکی مساله چنین شرایطی در حالت واقعی به وجود نمی‌آید و بایستی مقدار هدایت هیدرولیکی به صورت تابعی از مکش خاک (تابع هدایت هیدرولیکی) تعریف گردد تا نتایج حاصل از مدل عددی به نتایج واقعی نزدیک‌تر گردد که چنین شرایطی در جریان غیراشباع برقرار می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌گردد برای مدل جریان غیراشباع سطح بیشتری از هسته در زیر خط فریاتیک قرار گرفته است، این در حالی است این سطح برای وضعیت جریان اشباع به مراتب کمتر می‌باشد.



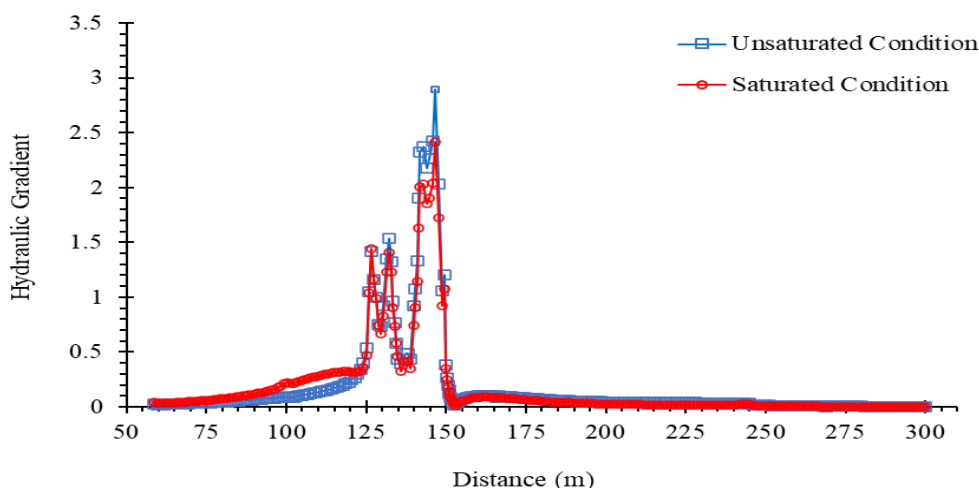
شکل ۱۱. موقعیت استخراج گرادیان هیدرولیکی خروجی در پایین دست سد

Fig. 11. The location of extracting the exit hydraulic gradient in the downstream of the dam



شکل ۱۲. تغییرات گرادیان هیدرولیکی خروجی در پایاب سد خاکی برای دو حالت جریان اشباع و غیراشباع

Fig. 12. The changes of the exit hydraulic gradient in the downstream of the embankment dam for two saturated and unsaturated flow conditions



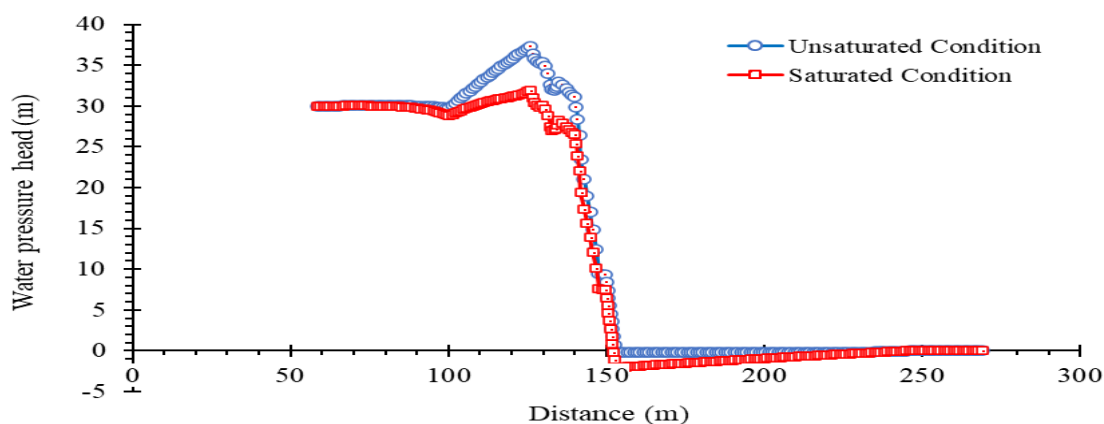
شکل ۱۳. تغییرات گرادیان هیدرولیکی در بدنه سد خاکی

Fig. 13. Variation of hydraulic gradient in the body of dam

۳-۳- بررسی گرادیان هیدرولیکی در بدنه سد خاکی برای جریان اشباع و غیراشباع

شکل (۱۳) گرادیان هیدرولیکی در بدنه سد برای دو حالت اشباع و غیراشباع را نشان می‌دهد. گرادیان هیدرولیکی در هر دو حالت، تفاوت چشمگیری با یکدیگر ندارند. همچنین گرادیان هیدرولیکی در هر دو حالت جریان اشباع و غیراشباع هنگام خروج از هسته کاهش چشمگیری پیدا

و تخلخل ۴۰ درصد، گرادیان هیدرولیکی بحرانی تقریباً برابر یک است. بدین معنی که گرادیان هیدرولیکی بیشتر از آن، باعث فرسایش درونی و حرکت ماسه می‌شود که به جوشش ماسه معروف است و برای پایداری سد بسیار خطرناک است. در سد خاکی مورد مطالعه با مشخصات در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر، گرادیان هیدرولیکی خروجی بسیار کمتر از عدد یک است و از این نظر، خطری وجود ندارد.



شکل ۱۴. توزیع فشار آب منفذی در بدنه سد خاکی

Fig. 14. Pore-water pressure distribution in the embankment dam body

۳-۵- بررسی توزیع بار فشاری در مقاطع افقی بدنه سد خاکی برای جریان اشباع و غیراشباع

به منظور بررسی نحوه تغییرات بار فشاری در مقاطع مختلف افقی از بدنه سد خاکی مورد مطالعه، دو مقطع در دو تراز افقی مختلف در نظر گرفته شد که در شکل (۱۵) آورده شده است. توزیع فشار آب منفذی درون خاک در مقاطع افقی ۱ و ۲، به ترتیب در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) ارائه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که در هر دو مقطع افقی در نظر گرفته شده، روند تغییرات بار فشاری به گونه‌ای می‌باشد که مقادیر بار فشاری در جریان غیراشباع، بیشتر از مقادیر آن در جریان اشباع می‌باشد. در حالت جریان غیراشباع، صعود مویینگی آب درون خلل و فرج خاک، باعث افزایش فشار آب منفذی خاک می‌شود. منحنی تغییرات فشار آب منفذی در حالت جریان اشباع، فقط تا محل تقاطع با خط فریاتیکی ادامه یافته است، زیرا در بیرون آن، جریان نشتی وجود ندارد. همچنین وجود مکش یا فشار آب منفذی منفی در حالت خاک غیراشباع، حاکی از آن است که در دورتر از خط فریاتیکی، مکش ماتریک خاک افزایش می‌یابد. در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نیز تغییرات بار آبی کل برای هر دو مقطع افقی به منظور مقایسه ارائه شده است.

۳-۶- بررسی گرادیان هیدرولیکی در بدنه سد خاکی در مقاطع افقی برای جریان اشباع و غیراشباع

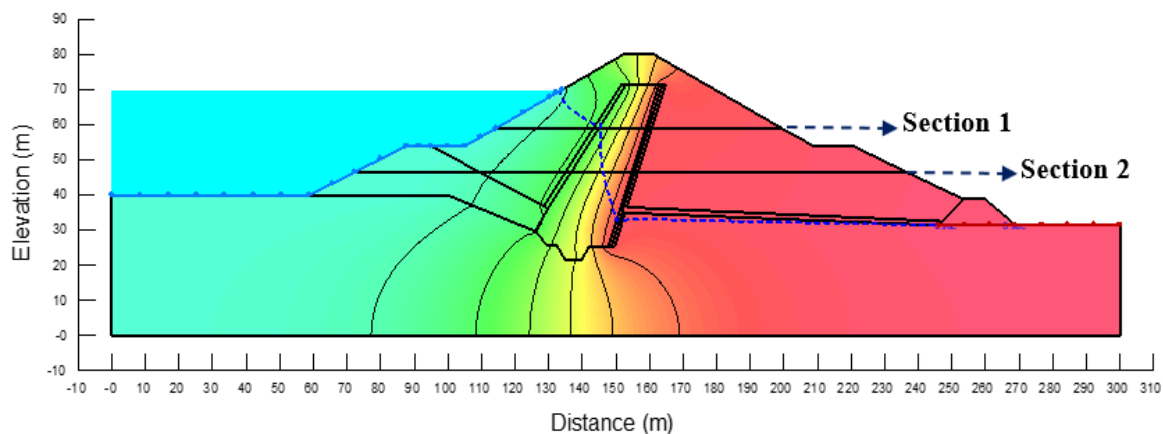
به منظور مقایسه نحوه تغییرات گرادیان هیدرولیکی در مقاطع افقی داخل بدنه سد خاکی مورد مطالعه برای جریان اشباع و غیراشباع، دو شکل

می‌کنند، به طوری که مقدار این کاهش در حالت جریان غیراشباع بیشتر از جریان اشباع می‌باشد. دلیل این کاهش در گرادیان هیدرولیکی بعد از هسته، وجود فیلتر و زهکش دودکشی در محل اتصال هسته به پوسته پایین دست است که فشار آب منفذی را کاهش می‌دهد و جریان آب نشتی به سهولت به پایاب سد خاکی منتقل می‌شود.

۳-۴- بررسی دیاگرام توزیع فشار آب منفذی در بدنه سد خاکی

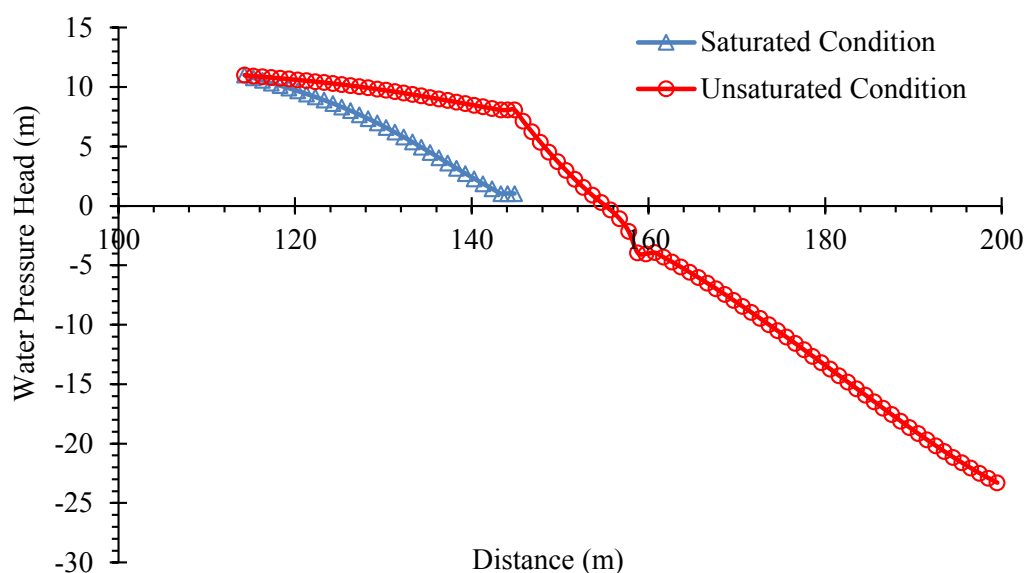
توزیع فشار آب منفذی در سرتاسر محل اتصال بدنه به پی سد خاکی برای دو حالت جریان اشباع و غیراشباع از مدل عددی استخراج و در شکل (۱۴) ارائه شده است. به طور کلی، در زیر هسته، فشار آب منفذی افت چشمگیری را نشان می‌دهد. دلیل آن، نفوذپذیری کم هسته است که باعث افت زیاد پتانسیل آب می‌شود. همین افت انرژی زیاد در طول اندک، باعث افزایش گرادیان هیدرولیکی می‌شود که در بخش قبلی مورد بررسی قرار گرفت.

مقدار فشار آب منفذی در زیر بدنه سد با تغییر حالت شبیه‌سازی از حالت جریان اشباع به جریان غیراشباع افزایش می‌یابد. در تحلیل جریان اشباع دلیل منفی بودن فشار آب منفذی هنگام خروج از زیر هسته و ورود به قسمت افقی زهکش، موقعیت خط فریاتیکی است که تراز خروجی آن پایین‌تر از زهکش قرار گرفته است، این در حالی که در حالت جریان غیراشباع، جریان نشتی هنگام خروجی از هسته در موقعیت نزدیک‌تری نسبت به زهکش جریان می‌یابد.



شکل ۱۵. نمایش محل استخراج بار فشاری و بار کل در مقاطع افقی

Fig. 15. Viewing the extracting location of pressure head and total head in the horizontal sections



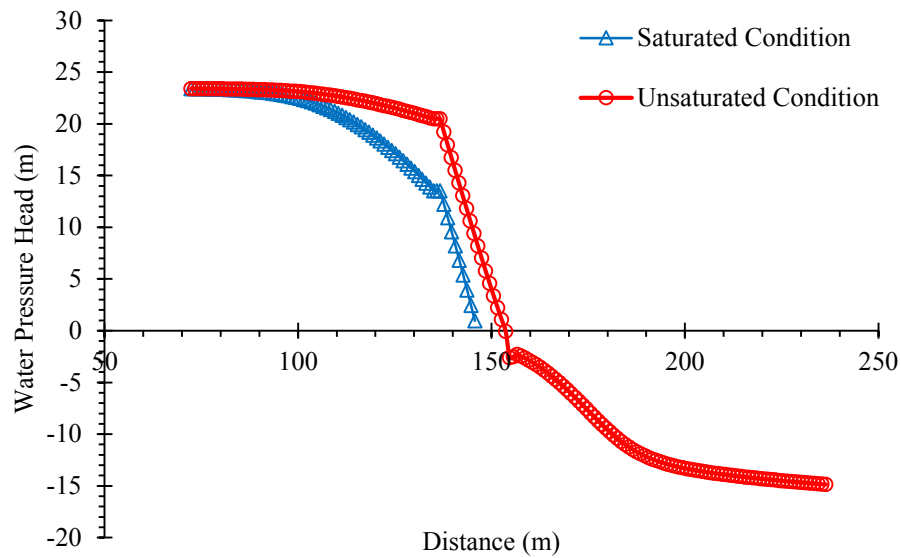
شکل ۱۶. توزیع بار فشار در مقطع افقی یک (Section 1) برای جریان اشباع و غیراشباع

Fig. 16. Distribution of pressure head in a horizontal section (Section 1) for saturated and unsaturated flow

۳-۷- بررسی نیروی بالابرنده وارد بر سد خاکی برای دو جریان اشباع و غیراشباع

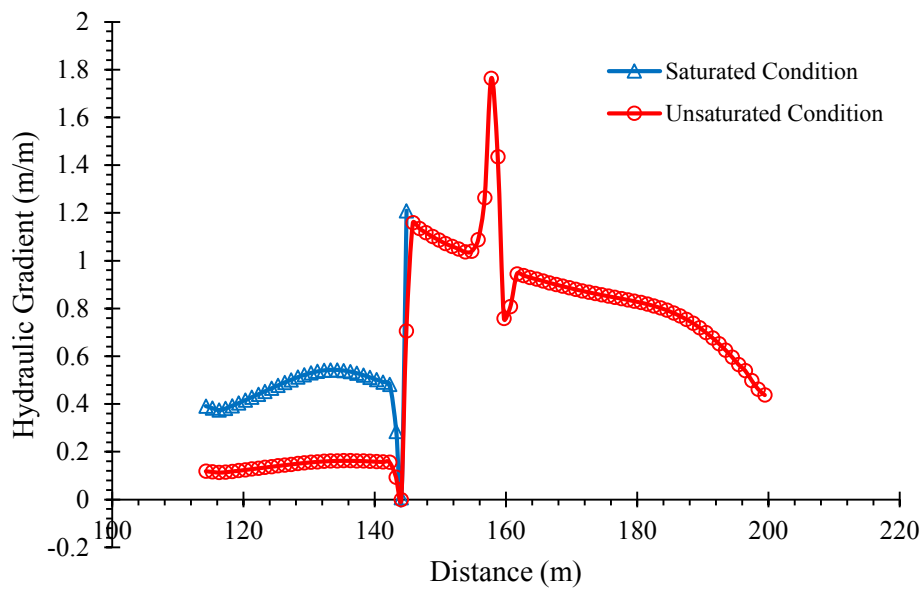
به منظور برآورد مقدار نیروی بالابرنده در هر یک از حالت‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر، یعنی جریان اشباع و غیراشباع، نیاز است ابتدا دیاگرام توزیع زیرفشار در محل اتصال بدنه سد به پی استخراج گردد. بدین

(۱۸) و (۱۹) ارائه می‌شود. مقادیر گرادیان هیدرولیکی در پوسته بالادست و هسته برای جریان اشباع، بیشتر از مقادیر متناظر آن‌ها در جریان غیراشباع است. لازم به ذکر است که ادامه منحنی تغییرات گرادیان هیدرولیکی در خارج از خط فریاتیک برای جریان اشباع رسم نشده است. زیرا در این مناطق، جریان نشی وجود ندارد.



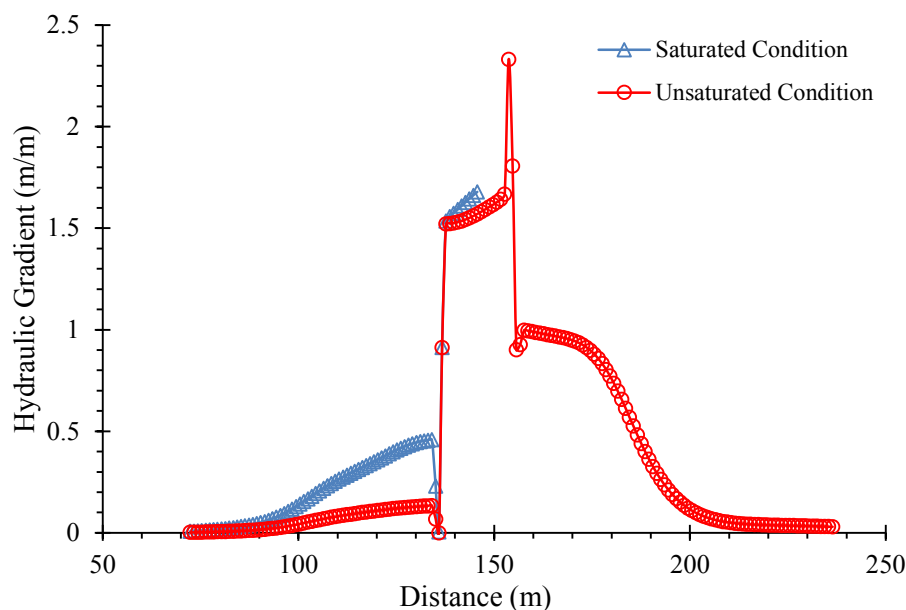
شکل ۱۷. توزیع بار فشار در مقطع افقی ۲ (Section 2) برای جریان اشباع و غیراشباع

Fig. 17. Distribution of pressure head in horizontal section (Section 2) for Saturated and Unsaturated Flow



شکل ۱۸. گرادیان هیدرولیکی در مقطع افقی ۱ (Section 1) برای جریان اشباع و غیراشباع

Fig. 18. Hydraulic gradient in horizontal section (Section 1) for saturated and unsaturated flow



شکل ۱۹. گرادیان هیدرولیکی در مقطع افقی ۲ (Section 2) برای حالت اشباع و غیراشباع

Fig. 19. Hydraulic gradient in horizontal section (Section 2) for saturated and unsaturated flow

فریاتیکی نیز در مقدار دبی نشتی دخالت دارد. به منظور بررسی نحوه تغییرات جریان نشتی در جریان اشباع و غیراشباع، ۵ مقطع عمودی در نظر گرفته شد که در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) به ترتیب برای حالت غیراشباع و حالت اشباع خاک ارائه می‌شود. به دلیل وجود جریان‌های موئین در حالت خاک غیراشباع، لازم است علاوه بر مقدار جریان در زیر خط فریاتیکی، مقدار جریان در بالای خط فریاتیکی نیز در گزارش دبی جریان نشتی از این نوع جریان لحاظ گردد.

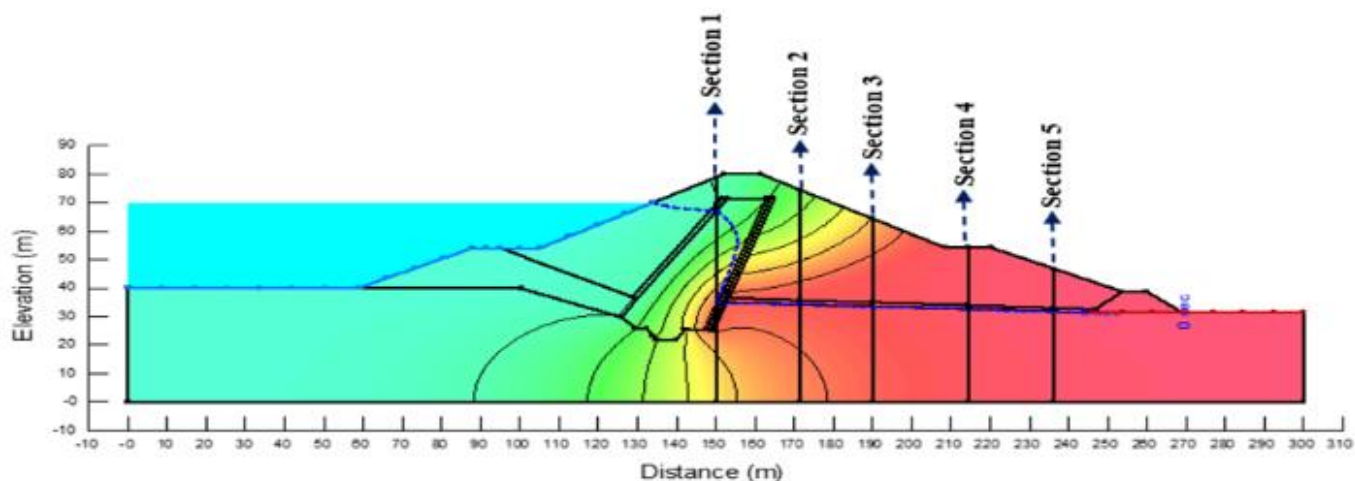
در جدول ۳ مقادیر جریان نشتی برای جریان اشباع و غیراشباع ارائه شده است. لازم به ذکر است که جریان نشتی برای جریان اشباع، در زیر خط فریاتیکی محاسبه شده است. مقدار جریان نشتی در هر دو حالت جریان اشباع و غیراشباع در حرکت از مقطع شماره ۱ تا ۵ به دلیل تغییر موقعیت خط فریاتیکی، کاهش پیدا می‌کند. از آنجایی که خط فریاتیکی در جریان اشباع نسبت به جریان غیراشباع در موقعیت پایین‌تری قرار گرفته است، مقدار جریان نشتی از زیر خط فریاتیکی در جریان اشباع کمتر از مقدار نظیر آن برای جریان غیراشباع است. در جدول ۴ نیز مقدار جریان در بالای خط فریاتیکی در جریان غیراشباع و مقدار جراین نشتی کل از سد خاکی ارائه شده است.

منظور بعد از شبیه‌سازی عددی، ابتدا این نمودار در زیر بدنه سد ترسیم گردید و سپس با محاسبه مساحت زیر آن اقدام به محاسبه نیروی بالابرنده گردید. مقدار برآیند نیروی بالابرنده در واحد طول برای جریان غیراشباع ۲۹۹۹۵/۶ کیلونیوتن بر واحد متر و در جریان اشباع ۲۷۶۹۷/۹۵۶ کیلونیوتن بر واحد متر برآورد گردید و این نشان می‌دهد که مقدار نیروی بالابرنده در جریان غیراشباع ۸/۳ درصد نسبت به جریان اشباع افزایش داشته است.

۳-۸- بررسی دبی جریان نشتی از بدنه و پی در دو حالت جریان اشباع و غیراشباع

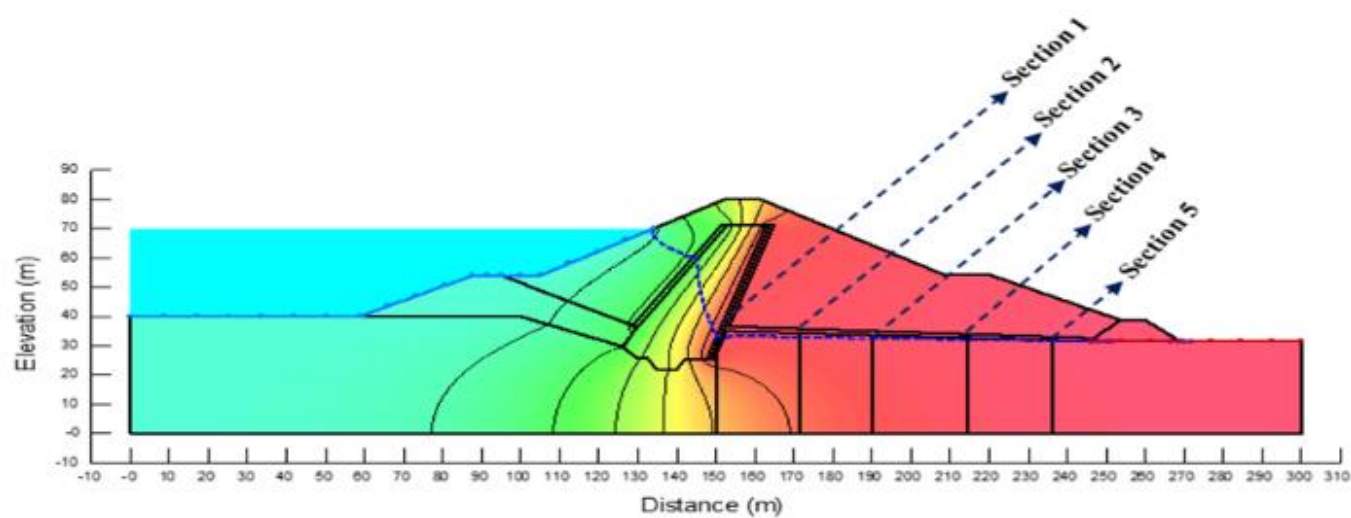
محاسبه مقادیر جریان نشتی معمولاً هدف اصلی در تحلیل‌های مرتبط با تراوش یا جریان در محیط‌های متخلخل است که در تحقیق حاضر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، مقدار دبی نشتی از بدنه و پی سد در دو حالت جریان اشباع و غیراشباع مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که دبی جریان نشتی در حالت غیراشباع بیشتر از جریان اشباع می‌باشد. لازم به ذکر است که در جریان اشباع فقط جریان زیر سطح ایستابی ولی در جریان غیراشباع، علاوه بر جریان زیر سطح ایستابی، جریان آب نشتی در منطقه موئین بالای خط



شکل ۲۰. مقاطع مشخص شده برای برآورد دبی نشت از محیط غیراشباع

Fig. 20. Specified cross-sections for estimating leakage flow from unsaturated Flow



شکل ۲۱. مقاطع مشخص شده برای تحلیل دبی نشت از محیط اشباع

Fig. 21. Specified sections for analysis of leakage flow from saturated Flow

جدول ۳. مقادیر دبی نشتی از مقاطع مختلف برای جریان غیراشباع

Table 3. Seepage values from different sections for unsaturated flow

مقدار جریان نشتی در واحد طول سد از زیر خط	مقدار جریان نشتی در واحد طول سد در بالای	مقطع
فریاتیک برای جریان غیراشباع (m^3/s)	خط فریاتیک برای جریان غیراشباع (m^3/s)	
$4/3 \times 10^{-7}$	$1/77 \times 10^{-5}$	۱
$1/111 \times 10^{-5}$	$1/51 \times 10^{-8}$	۲
$1/121 \times 10^{-5}$	$8/55 \times 10^{-9}$	۳
$1/125 \times 10^{-5}$	$4/86 \times 10^{-9}$	۴
$1/127 \times 10^{-5}$	$2/93 \times 10^{-9}$	۵

جدول ۴. مقادیر دبی نشتی از مقاطع مختلف در جریان اشباع و غیراشباع

Table 4. Seepage values from different sections for saturated and unsaturated flow

مقدار جریان نشتی در واحد طول سد از کل مقطع	مقدار جریان نشتی در واحد طول سد در زیر خط فریاتیک	مقطع
برای جریان غیراشباع (m^3/s)	برای جریان اشباع (m^3/s)	
$1/113 \times 10^{-5}$	$4/82 \times 10^{-6}$	۱
$1/113 \times 10^{-5}$	$1/19 \times 10^{-8}$	۲
$1/113 \times 10^{-5}$	$6/05 \times 10^{-9}$	۳
$1/113 \times 10^{-5}$	$2/93 \times 10^{-9}$	۴
$1/113 \times 10^{-5}$	$1/73 \times 10^{-9}$	۵

۴- نتیجه گیری

بررسی خصوصیات جریان نشتی از مهمترین مسائل در پیش روی طراحان سازه های هیدرولیکی است. لذا در تحقیق حاضر به ارزیابی و مقایسه جریان اشباع و غیراشباع در سد خاکی گیلان غرب به عنوان یک مطالعه موردی با استفاده از شبیه سازی عددی پرداخته شده است، تا خصوصیات جریان نشتی همچون دبی نشت از بدنه و پی سد، موقعیت خط فریاتیک، فشار آب منفذی، و نیروی بالا برنده در این دو حالت از جریان در مدل سازی مورد بررسی قرار

گیرد. نتایج این تحقیق می تواند در اتخاذ یک تصمیم در نحوه شبیه سازی مدل عددی مورد توجه قرار گیرد. مهمترین نتایج مرتبط با این ارزیابی در ادامه ارائه شده است:

۱- نتایج برگرفته از شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار SEEP/W برای محیط های اشباع و غیراشباع به ترتیب با تعیین فشارهای آب منفذی مثبت و منفی نشان داد که مکش های کمتر در بالای خط فریاتیک به معنی وجود حاشیه موینگی است. حاشیه موینگی، بر دبی نشتی در مقاطع مختلف

of Technology Publications, 1389 (in Persian).

از سد موثر می‌باشد.

- [3] A. Heshmati, Movahed, V., Comparison of analytical and numerical methods in evaluating the amount of seepage from the body of a homogeneous earth dam located on an impermeable foundation, in: The second national conference on dam construction, 2018, pp. 20-29.
- [4] M. Naboyanpour, Samani, H., Determining the exact location of the phreatic line using boundary element methods, in: 4th National Congress of Civil Engineering, 2017, pp. 30-36 (in Persian).
- [5] A. Ahmadi, Fatahi, A. Iqbalzadeh, A., Comparison of numerical and analytical solution of phreatic line position of homogeneous earthen dam using MATLAB numerical model (case study of Shian earthen dam), the first International Conference and 3rd National Conference on Dams and Hydropower Plants, (2013) 30-36.
- [6] A. Malekpour, Farsadizadeh, D., Hosseinzadeh Delir, A., Sadr Karimi, J., Laboratory investigation of the effect of length and thickness of horizontal drains on permanent seepage from the body of a homogeneous earthen dam, Journal of Water and Soil Science, 21(2) (2018) 51-63 (in Persian).
- [7] A. Ansari, Sadeghi Asl, M., Parvizi, M., Numerical and experimental study of flow characteristics in gravel drains, in: 11th Iran Hydraulic Conference, 2013, pp. 45-51 (in Persian).
- [8] M. Ghadavi, Mahdipour, A., Abdul Alizadeh, S., Numerical study of the effect of the interaction of horizontal drainage blanket and cutoff wall on the phreatic line to the downstream slope of homogeneous earthen dam, in: 9th International Congress of Civil Engineering, 2013, pp. 70-77 (in Persian).
- [9] Y. Jie, Wen, Y., Deng, G., Chen, R., Xu, Z., Impact of Soil Deformation on Phreatic Line in Earth-Fill Dams, Computers and Geosciences Journal, 46 (2012) 44-50.
- [10] D. Bertoldo, Stability analysis of an earth embankment subjected to rainfall infiltration, Padova, ICEA, 2013.
- [11] P. Mohammadian, Salmasi, F., Abbaspour, A., Comparison of seepage in saturated and unsaturated state

۲- با در نظر گرفتن ارتفاع و حاشیه موینگی، دبی ناشی از بدنه در حالت غیراشباع زیاده‌تر از حالت اشباع بدست آمد. دبی در محیط غیراشباع با رسیدن به نقاط هسته سد بیشتر شده و درصد بیشتری از دبی نشت آب از بدنه سد را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین با توجه به تراکم خطوط جریان در نقاط انتهایی سد در پایین دست و در بالای خط فریاتیک، تأثیر بیشتر حاشیه موینگی بر دبی عبوری از بدنه سد را نشان می‌دهد.

۳- تأثیر خاک غیراشباع بر خط فریاتیک داخل سد خاکی بررسی شده و تراکم بیشتر مشهود در هسته در ناحیه خط فریاتیک و بالای آن در مرکز هسته نسبت به پوسته نشانگر مقاومت بیشتر دانه‌های رسی برای عبور آب از آن و افزایش میزان محتوای حجمی آب در هسته نسبت به پوسته است که می‌توان نتیجه گرفت که حاشیه موینگی در هسته بیشتر از پوسته می‌باشد.

۴- برای سد خاکی گیلان غرب، داده‌های اندازه‌گیری دبی نشت و یا اطلاعات فشار آب درون خاک در دسترس نبود. لذا پیشنهاد می‌شود که چنین تحقیقی برای سدهای خاکی دیگر، دارای اطلاعات اندازه‌گیری انجام شود و مدل عددی با داده‌های ثبت شده مقایسه شوند. تعبیه یک و یا چند زهکش افقی در پوسته بالادست سد می‌تواند در کاهش فشار آب منفذی اثر مثبتی داشته باشد. کاهش فشار آب منفذی و افت خط فریاتیک، باعث افزایش نواحی خشک در پوسته سد شده و با افزایش مقاومت برشی خاک، موجب پایداری بیشتر شیب بدنه سد خواهد شد. ضمناً، بررسی پایداری شیب بالادست و پایین دست و محاسبه ضریب اطمینان آن‌ها در برابر پایداری نیز می‌تواند موضوع تحقیق بعدی باشد. معمولاً شکل درهای که سد در آن ساخته می‌شود، از تراز بالا به پایین، کم عرض‌تر می‌شود و برای حصول دقت بیشتر، مدلسازی باید به صورت سه بعدی انجام شود. در این تحقیق، شبیه‌سازی دوبعدی انجام شد و بزرگ‌ترین مقطع سد در نظر گرفته شد. لذا پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، سد به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شود.

منابع

- [1] P. Mohammadian, Estimating of saturated and unsaturated seepage discharge through Alavian embankment dam using seep/w software, University of Tabriz, 1395 (in Persian).
- [2] H. Ghasemzadeh, Seepage in saturated and unsaturated soil, first edition ed., Khaje-Nasiruddin Tusi University

- [15] A. Taheri Aghdam, Salmasi, F., Abraham, J., Arvanaghi, H. , Effect of drain pipes on uplift force and exit hydraulic gradient and the design of gravity dams using the finite element method, *Geotechnical and Geological Engineering* 5(2021).
- [16] F. Salmasi, Nourani, B., Abraham, J., Norouzi R., Numerical investigation of relief well performance for decreasing uplift pressure under embankment dams, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18 (2021) 2819–2830.
- [17] M.T. Van Genuchten, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal* 44(5) (1980) 892-898.
- [18] J.L. Sherard, arth and earth-rock dams, 3rd edition ed., John Wiley and Sons, New York., 1967.
- from the body of Alavian earthen dam using SEEP/W software, in: the second national hydrology conference of Iran, 2016 (in Persian).
- [12] R.P. Chapuis, Aubertin, M., A simplified method to estimate saturated and unsaturated seepage through dikes under steady state conditions, *Canadian Geotechnical Journal*, 38 (2001) 1321–1328.
- [13] B. Nourani, Salmasi, F., Ghorbani M.A., Development of a new hybrid technique for estimating of relative uplift force in gravity dams based on whale optimization algorithm, *Journal of Hydraulic Structures*, 9(1) (2023) 43-62.
- [14] B. Nourani, Salmasi, F., Arvanaghi, H., Abraham, J., Development of Explicit Formulas for Estimating Seepage Characteristics Underneath Aprons with Equal and Unequal Double Vertical End Piles, *International Journal of Geomechanics*, 22(12) (2023) 04022237.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Pourghani, F. Salmasi, B. Nourani, H. Arvanaghi, *Investigation and Comparison of Saturated and Unsaturated Flow in the Gilan-Gharb Embankment Dam*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(5) (2025) 717-740.

DOI: [10.22060/ceej.2025.23522.8177](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.23522.8177)



