Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 927-930
DOI:10.22060/ceej.2020.18247.6808

Study of water flow drainage in sandy soil due to surface recharge conditions using a laboratory model

J. Monfared[1], M. Parvizi[1*] , M. Rabeti Moghadam[1], M. Sedghi-Asl[2]

[1] Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.
[2] Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran.

ABSTRACT: In the present study, laboratory methods were used to investigate the drainage conditions of the steady-state with the surface recharging. In the study, fine and coarse sandy soil samples were used to study changes in groundwater level. The test specimen was poured into a large-scale flume, with 5.4 m long, which led to uniform vertical precipitation and vertical drains on both sides. The parameters of precipitation rate, soil gradation and water level within the drains were investigated as variables in this study. The results showed that the maximum change in water height in coarse sand due to increasing water height in drains from 0 to 40 cm is equal to 56.9 cm and 72.5 cm, respectively, which caused an increase of 15.6 cm. However, in fine sand, these changes are very small (2 cm) and equal to 87.2 cm in free drainage conditions and 89.2 cm in the conditions of 40 cm of water height inside the drains. The obtained laboratory results were compared with the Dupuit-Forchheimer analytical relationship. It was concluded that this relationship is able to accurately predict the level of water in the fine sand, but in coarse sand, the relationship underestimates the water table height in the soil.

Review History:
Received: Apr. 10, 2020
Revised: Jun. 23, 2020
Accepted: Jul. 24, 2020
Available Online: Aug. 22, 2020

Keywords:
Experimental investigation
Surface recharge
Vertical drain
Groundwater table
Dupuit-Forchheimer equation

1. INTRODUCTION

Increasing water content in the sandy soil reduces the shear strength of the soil and its bearing capacity and increases the soil settlement and the possibility of liquefaction. This issue is more important in areas where the groundwater level and rainfall rate are high. Therefore, designing appropriate drainages by considering the critical rainfall conditions to reduce the pore water pressure is one of the basic principles in geotechnical engineering. Accurate groundwater level determination despite lateral drainage and surface rainfall has always been a controversial issue for many researchers from the past to the present.

In order to determine the water table height under constant surface recharge, the Dupuit-Forchheimer equation has been widely used [1]. Engelund proposed an equation to predict the water table height under surface recharge with horizontal drainages by inspiring Dupuit-Forchheimer assumptions [2]. In 1959, Massland found an analytical solution to overcome the problem of water phreatic surface in two-layered soil with transient recharge [3]. Later, in 2003 Rushton modified the Dupuit-Forchheimer relation to present a better equation for predicting water table height between two drainages [4]. Casro-Orgaz and Giraldez showed that the Dupuit-Forchheimer equation could not appropriately predict the water phreatic surface in the case that rainfall does not occur, but they suggested this equation to determine the water table under surface recharge [5]. In 2017, Castro-Orgaz and Hager proposed an equation by modifying the Dupuit-Forchheimer solution [6].

There is not a comprehensive experimental study in order to analyze and determine the validity of the Dupuit-Forchheimer equation under different conditions of soil and recharge rate. Therefore, the main purpose of this study is to analyze the behavior of water table height under recharge and drainage condition using laboratory method and examine the precision of the Dupuit-Forchheimer equation.

2. METHODOLOGY

To study the groundwater table in the soil due to surface recharge and under drainages conditions, a laboratory flume was built in the Geotechnical Laboratory Center of Yasouj University. The flume has 5.4×0.6×1.0 m^3 dimensions (L*W*H). The system of recharge was installed from the top of the box using a plastic tube. The levels of water inside the ditches were controllable. Fig. 1 illustrates the experimental setup.

Two types of soil were used in the study: fine and coarse sand. The permeability of the fine sand and coarse sand was 0.0056 and 0.08 cm/s.

The sample was prepared for the experiments in the desired conditions with different rainfall rates and different water heights in the drains. After a steady-state water seepage through the soil, the water table was measured by the piezometers installed along the flume.

*Corresponding author's email: parvizi@yu.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Fig. 1. The experimental setup

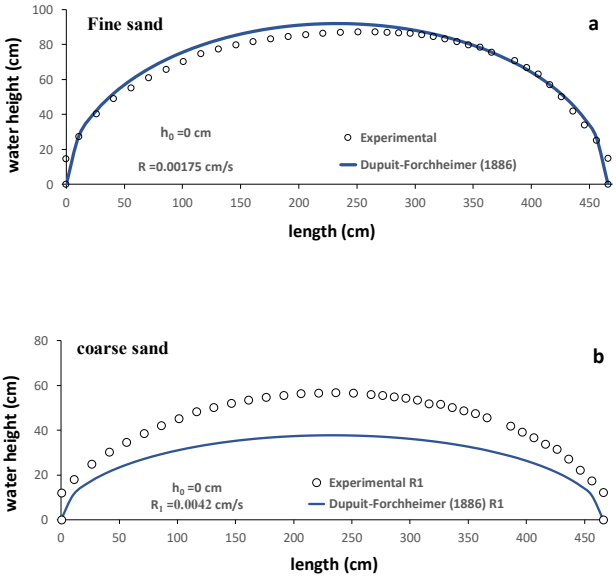


Fig. 2. The experimental results and predicted water table by Dupuit-Forchheimer equation in: a) fine sand b) coarse sand

3. RESULTS AND DISCUSSION

The results showed that the water table height in fined sand is higher than coarse sand, considering that the precipitation rate in coarse sand is 4.2 times higher than the recharge rate in fine sand. The maximum height of the water table is obtained in the mid-way of two drainages. The amount of maximum water table changes due to water level changes inside the drainages from 0 to 40 cm are not considerable in fine sand, however, this change is equal to 15.6 in coarse sand.

From the results obtained for the fine sandy soils under different water levels in the drains, the water height has increased with the increasing water level in the lateral drains. This increase is high in the areas close to the drains and decreases as it moves away from it, so that the least increase in water level in fine sand due to the increase in water level in the drains occurred in the center of the laboratory flume. It is concluded that in fine-grained sandy soils, the change in water height within the lateral drains has very little effect on the maximum water height within the soil profile.

In coarse sand, increasing the water level in the two drains and increasing the precipitation rate has increased the water level. However, this increase is the same throughout the coarse-grained soil sample and does not depend on midpoints close to the drains. The reason for these observations is that in coarse sand, due to the low energy loss, the increase in water level in the drains is effective throughout the sample. However, in fine sand, due to high energy loss, changes in water height inside the drains cannot change the water height of all sample points equally and has little effect on the middle points (farthest points of the drains). Due to the possibility of drainage in coarse sand, increasing the rainfall rate has increased the water level in the middle of the sample. On the other hand, changing the height of water in drains in coarse-grained soil causes a change in water height along the entire length of the soil profile.

Figures 2a and b indicate the comparison of the experimental results in fine and coarse sand with the Dupuit-Forchheimer equation in water level equal to zero in ditches, respectively. It can be seen that the Dupuit-Forchheimer relationship is not able to accurately predict the groundwater level in coarse sand and there is a large difference between the laboratory results and the values obtained from the Dupuit-Forchheimer relationship. **Also,** as depicted, it can be concluded that the Dupuit-Forchheimer relationship is able to accurately predict the water level in fine sand.

Based on results, the Dupuit-Forchheimer solution is recommended to use in fine sand, but it is vise to not to use this solution in coarse sand.

4. CONCLUSION

A series of experimental tests were conducted to determine the water table height under rainfall and drainage conditions. Fine and coarse sand were used in the experiments. The results showed that the water table height in fine sand is higher than coarse sand. The maximum height of the water table is obtained in the mid-way of two drainages. In coarse sand, increasing the water level in the two drains and increasing the precipitation rate has increased the water level. However, this increase is the same throughout the coarse-grained soil sample and does not depend on midpoints close to the drains. From the results obtained for the fine sandy soils under different water levels in the drains, the water height

has increased with the increasing water level in the lateral drains. Experimental results were compared with the Dupuit-Forchheimer equation. The comparison results indicate that this analytical solution can give a precise answer in fine sand, but it is not appropriate for predicting water table in coarse sand.

REFERENCES

[1] J. Dupuit, Etudes The´oriRues et PratiRues sur le Mouvement des Eaux dans les Canaux De´couverts et a´ Travers les Terrains Permeables, Dunod, ParisM (1863).

[2] F. Engelund, Mathematical discussion of drainage problems, Trans Dan. Acad. Tech. Sci (1951).

[3] M. Maasland, Water table fluctuation induced by intermittent recharge. Journal of Geophysical Research. 64(5) (1959) 549-559.

[4] K. R. Rushton, Groundwater hydrology, Department. John Wiley & Sons Ltd. 1st ed (2003).

[5] O. Castro-Orgaz, J. V. Giráldez, Steady-state water table height estimations with an improved pseudo-two-dimensional Dupuit-Forchheimer type model. Journal of hydrology 438 (2012) 194-202.

[6] O. Castro-orgaz, W. H. Hager, Non-hydrostatic free surface flows. 1st ed. Springer Nature (2017).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

J. Monfared, M. Parvizi , M. Rabeti Moghadam, M. Sedghi-Asl , Study of water flow drainage in sandy soil due to surface recharge conditions using a laboratory model, Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 927-930.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18247.6808

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۱۰، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۲۱۹ تا ۴۲۳۰
DOI: 10.22060/ceej.2020.18247.6808

مدل آزمایشگاهی زهکشی جریان در شرایط تغذیه سطحی در خاک ماسه‌ای

منصور پرویزی*[۱]، مسعود رابطی‌مقدم[۱]، جهان‌پور منفرد[۱]، محمد صدقی اصل[۲]

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
۲- دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

خلاصه: در مطالعه حاضر با استفاده از روش آزمایشگاهی به بررسی شرایط زهکشی جریان ماندگار در حالت تغذیه سطحی پرداخته شد. از دو نمونه خاک ماسه ریز و درشت رودخانه‌ای برای مطالعه‌ی نحوه تغییرات در تراز آب زیرزمینی استفاده شد. نمونه در یک فلوم بزرگ به طول ۵/۴ متر ساخته شد که تحت بارش یکنواخت سطحی قرار داشت و از طرفین به زهکش‌های قائم منتهی می‌گردید. پارامترهای نرخ بارش، دانه‌بندی مصالح و تراز آب درون زهکش‌ها به عنوان متغیر در این مطالعه بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع آب درون زهکش‌ها تراز آب در درون نمونه ماسه‌ای ریز و درشت افزایش یافت ولی تاثیر این تغییرات بر روی ارتفاع آب در دو نوع ماسه متفاوت بود. بازه تغییرات حداکثر ارتفاع آب در ماسه درشت با افزایش ارتفاع آب درون زهکش‌ها از ۰ به ۴۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۵۶/۹ سانتی‌متر و ۷۲/۵ سانتی‌متر است که افزایش ۱۵/۶ سانتی‌متری را موجب شده است. این در حالی است که در ماسه ریز این تغییرات بسیار ناچیز است و برابر با ۸۷/۲ سانتی‌متر در شرایط زهکش آزاد و برابر با ۸۹/۲ در شرایط ارتفاع آب ۴۰ سانتی‌متری درون زهکش‌ها است. نتایج آزمایشگاهی به دست آمده با رابطه تحلیلی دوپویی-فرشهایمر مقایسه گردید که بر اساس آن، این رابطه در خاک ماسه ریز قادر به پیش‌بینی دقیق تراز آب درون خاک است، اما در ماسه درشت این رابطه قادر به پیش‌بینی دقیق تراز آب درون خاک نمی‌باشد و ارتفاع آب در این خاک را نسبت به مقادیر آزمایشگاهی کمتر برآورد می‌کند.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۲
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۰۲
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۳
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۰۱

کلمات کلیدی:
مدل آزمایشگاهی
تغذیه سطحی
زهکش‌های قائم
تراز آب زیرزمینی
رابطه دوپویی-فرشهایمر.

۱- مقدمه

وجود آب در خاک باعث کاهش در مقاومت برشی خاک و میزان باربری آن و افزایش نشست و احتمال وقوع روانگرایی در آن می‌شود. این موضوع در ناحیه‌هایی که تراز آب زیرزمینی به سطح زمین نزدیک و میزان بارندگی در این مناطق زیاد است، از اهمیت بالاتری برخوردار است. از این رو، طراحی زهکش‌های مناسب با مد نظر قرار دادن شرایط بحرانی بارش جهت کاهش میزان فشار آب منفذی از اصول اساسی در مهندسی ژئوتکنیک محسوب می‌شود. همواره تعیین دقیق تراز آب زیرزمینی با وجود زهکش‌های جانبی و بارش سطحی مسئله مورد بحث بسیاری از محققان از گذشته تا به امروز بوده است.

فرشهایمر با بهره‌گیری از رابطه دوپویی توانست رابطه (۱) را برای تعیین ارتفاع آب در خاک با وجود بارش ارائه نماید. رابطه ارائه شده به رابطه کلاسیک دوپویی-فرشهایمر مشهور است [۱].

$$H_{DF} = \sqrt{(D^2 - x^2)q / K + H_0^2} \qquad (۱)$$

که در آن H_{DF} تراز آب بر اساس رابطه دوپویی-فرشهایمر، D نصف طول فاصله افقی دو زهکش از هم، K ضریب هدایت هیدرولیکی خاک، H_0 ارتفاع آب موجود در زهکش‌ها، x نقطه دلخواه در طول المان خاک و q نرخ بارش می‌باشد. با توجه به رابطه بالا حداکثر ارتفاع آب در نقطه میانی دو زهکش به دست می‌آید.

انگلاند در سال ۱۹۵۱ با ارائه رابطه‌ای قادر به پیش‌بینی تراز آب در درون خاک تحت بارش سطحی و زهکش‌های افقی شد. این در

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: parvizi@yu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

حالی می‌باشد که این رابطه را نیز می‌توان در زهکش‌های قائم مورد استفاده قرار داد [۲]. ماسلند با ارائه رابطه‌ای به تعیین تراز آب در خاک همگن و لایه‌بندی شده پرداخت، که به کمک آن وی توانست منحنی سهمی‌واری را برای تراز آب ارائه نماید [۳]. کرکام با ارائه روابطی که اساس طراحی زهکش‌ها در قرن اخیر بوده است، توانست روابطی را برای مشخص کردن تراز آب زیرزمینی ارائه نماید [۴]. یانگز با استفاده از روابط ارائه شده در زمینه تعیین ارتفاع آب در شرایط ماندگار توانست رابطه‌ای را برای شرایط غیرماندگار ارائه نماید [۵]. راشتن در کتاب هیدرولوژی آب‌های زیرزمینی با اصلاح رابطه دوپویی-فرشهایمر رابطه (۲) را برای تخمین ارتفاع آب زیرزمینی در شرایط زهکشی با کانال‌های قائم به صورت زیر ارائه نمود [۶].

$$h^2 = H^2 + q\frac{0.25L^2 - x^2}{K} \qquad (۲)$$

که در آن h تراز آب در خاک، H ارتفاع آب در کانال‌های زهکش، K ضریب هیدرولیکی خاک، x فاصله افقی از مرکز دو زهکش، L فاصله دو زهکش از یکدیگر و q نرخ بارش است.

کاسترو-ارگاز و گیرالدز با استفاده از مدل‌های یک بعدی و دو بعدی به بررسی و مقایسه روابط نایت و دوپویی-فرشهایمر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در حالت عدم وجود بارش رابطه دوپویی-فرشهایمر قادر به پیش‌بینی تراز آب نمی‌باشد. این در حالی است که در شرایط زهکشی از دو طرف نتایج به دست آمده با رابطه دوپویی-فرشهایمر سازگار است [۷].

در زمینه استفاده از روش عددی، نایت با اصلاح رابطه دوپویی-فرشهایمر توانست رابطه‌ای دیگری را برای مشخص کردن تراز آب در خاک تحت بارش و زهکشی ارائه نماید [۸]. رابطه دوپویی-فرشهایمر قادر به پیش‌بینی ارتفاع تراوش آب نمی‌باشد. از این رو راشتن و یانگز نیز با بهره‌گیری از روش عددی به اصلاح ارتفاع تراوش آب در خاک پرداختند و روابطی را برای این موضوع ارائه نمودند [۹].

جرجین و یانگز با استفاده از روش المان محدود به بررسی تغییرات ارتفاع آب در خاک همگن و ناهمگن بین دو زهکش جانبی پرداختند. نتایج حاصل شده با نتایج به دست آمده از رابطه دوپویی-فرشهایمر مقایسه گردید. این مطالعه نشان داد که این رابطه تحلیلی در خاک با نسبت نرخ بارش به ضریب هدایت هیدرولیکی برابر ۰/۱ ارتفاع آب را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند [۱۰].

یانگز و راشتن با حل عددی رابطه لاپلاس و مقایسه آن با نتایج به دست آمده از رابطه دوپویی-فرشهایمر به این نتیجه رسیدند که رابطه دوپویی-فرشهایمر به خوبی قادر به پیش‌بینی تراز آب در هنگام بارش است [۱۱]. از جمله مطالعات عددی دیگر در این زمینه می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط بیر [۱۲] و سرانو [۱۳] اشاره نمود. تحقیقات آن‌ها به ارائه راه حل عددی جهت تعیین تراز آب زیرزمینی انجامید.

الجبری و یانگز با استفاده از روش عددی به شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی بین دو زهکش لوله‌ای که دارای سطح نفوذناپذیر در بی‌نهایت است، پرداختند. نتایج به دست آمده در خاک غیراشباع با حل عددی رابطه لاپلاس مقایسه گردید. نتایج نشان داد پیش‌بینی رابطه تحلیلی بیشتر از مقادیر به دست آمده برای تراز آب زیرزمینی است [۱۴].

کاسترو-ارگاز و هگر با انتشار کتاب خود با بررسی حرکت جریان‌های آب در خاک در حالات و شرایط مختلف و همچنین با بررسی تاریخچه پیدایش رابطه‌ها در این زمینه، توانستند درک روشن‌تری از نحوه پیش‌بینی و حرکت جریان‌های سطحی و زیرسطحی را ایجاد نمایند [۱۵].

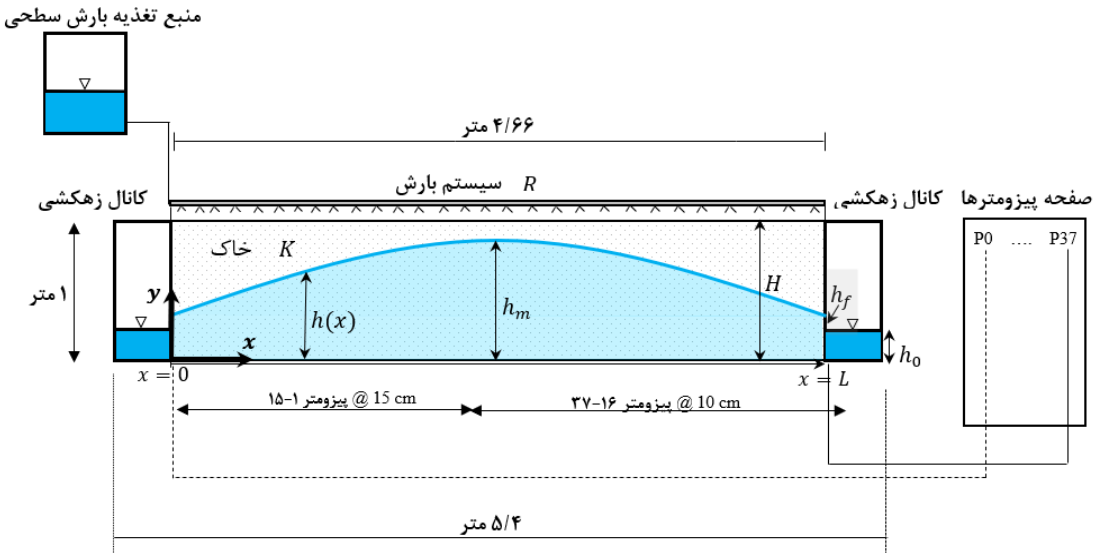
مطالعه‌های انجام شده در زمینه تعیین ارتفاع آب در خاک، بیشتر با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی صورت پذیرفته است. این در حالی است که روش آزمایشگاهی مناسبی که بتوان با استفاده از آن تراز واقعی آب در خاک را مشخص کرد و با بهره‌گیری از آن روش بتوان بستر مناسبی جهت راستی‌آزمایی نتایج روابط به دست آورد، وجود ندارد. از این رو، در مطالعه حاضر به بررسی شرایط زهکشی جریان ماندگار در حالت تغذیه با بارش (تغذیه سطحی) با استفاده از روش آزمایشگاهی پرداخته شده است. سپس، بر اساس نتایج آزمایشگاهی، رابطه کلاسیک دوپویی-فرشهایمر مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

۲-۱-۱- دستگاه آزمایش

برای مطالعه تعیین سطح آب زیرزمینی در درون خاک ماسه‌ای که به زهکش‌های قائم در دو طرف ختم شد و تحت تغذیه بارش از



شکل ۱. طرح شماتیک فلوم آزمایشگاهی استفاده شده

Fig. 1. Schematic illustration of the laboratory flume

شکل ۲. فلوم آزمایشگاهی استفاده شده برای پیش‌بینی تراز آب بین دو زهکش قائم

Fig. 2. Laboratory flume for predicting water table between two drainages

سطح قرار داشت، یک مدل آزمایشگاهی با استفاده از اسکلت فولادی و جداره پلکسی‌گلاس، که شکل شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده است، در دانشگاه یاسوج طراحی و تکمیل شد. در این شکل، h_m حداکثر ارتفاع آب در درون خاک، h_f ارتفاع تراوش آب، h(x) ارتفاع آب در نقطه افقی مورد نظر، h_0 ارتفاع آب در درون زهکش‌ها، K ضریب هدایت هیدرولیکی خاک، R نرخ بارش سطحی، x فاصله افقی دلخواه بین دو زهکش و L فاصله افقی دو زهکش از هم می‌باشد.

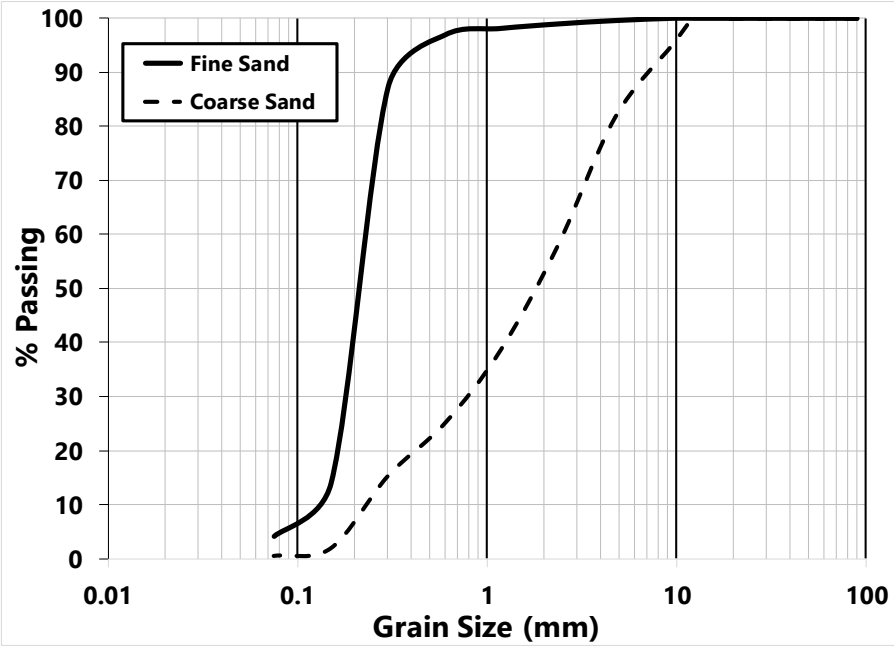
شکل ۲ تصویری از فلوم آزمایشگاهی به کار رفته در این مطالعه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. این فلوم به طول ۵/۴۰ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۱ متر است. در دو طرف فلوم زهکش‌های قائم که تا سطح نفوذناپذیر برای شبیه‌سازی شرایط زهکشی عمودی خاک

الف

ب

شکل ۳. مصالح استفاده شده الف) ماسه ریز ب) ماسه درشت

Fig. 3. The soil used in the experiments a) fine sand b) coarse sand



شکل ۴. نمودار دانه‌بندی خاک: ماسه ریز و ماسه درشت [۱۶]

Fig. 4. Particle size distribution curves for fine and coarse sand

امتداد دارند، در فاصله ۴/۶۶ متری از هم طراحی و نصب شدند. قابلیت زهکشی آزاد و تنظیم سطح آب در ترازهای مشخص در درون زهکش‌ها از طریق جایگذاری لوله‌های تو خالی تخلیه آب میسر شد. همچنین تغذیه سطحی نمونه خاک که به صورت بارش یکنواخت از سطح خاک انجام شد، از مخزن آب نصب شده در بالای نمونه خاک تامین گردید، که این منبع تغذیه خود به صورت دائمی در معرض تغذیه آب لوله کشی از طریق شلنگ آب قرار گرفت. شبیه‌سازی بارش با استفاده از لوله‌های نواری پلاستیکی نصب شده در بالای سطح خاک قرار داده شده، صورت پذیرفت. یکی از چالش‌های اصلی در انجام این آزمایش‌ها ایجاد بارش یکنواخت بود. برای این که فشار آب در طول آزمایش‌ها ثابت باشد، ابتدا هد آب درون منبع کار گذاشته شده در ارتفاع ثابت شد. برای این منظور از لوله پی وی سی تو خالی که

درون منبع آب جهت تخلیه آب اضافی کار گذاشته شده بود استفاده گردید. با این روش از تغییرات ارتفاع آب درون منبع جلوگیری شد و همواره آب در ارتفاع ثابتی (مساوی با ارتفاع لوله) درون منبع آب باقی ماند. در مرحله بعدی توزیع بارش به صورت یکنواخت بر روی نمونه خاک صورت گرفت که برای انجام آن از لوله‌های نواری آبیاری استفاده شد. این لوله‌ها دارای سوراخ‌های استانداری هستند که در فواصل مشخص از هم کار گذاشته شده‌اند و با توجه به اندازه لوله انتخابی (۲۰ سانتی‌متر) تمام سطح خاک را پوشش داد. برای اطمینان از یکنواختی بارش سطحی، به صورت میانگین ۳ بار از ۴ نقطه بارش نمونه توسط ظرف مخصوص در مدت زمان مشخص جمع آوری شد و توسط روش حجمی دبی هر نقطه به دست آمد که یکنواختی بارش را تایید نمود.

در این آزمایش از دو نوع خاک ماسه‌ای ریز و درشت استفاده گردید. با بهره‌گیری از ۳۷ عدد پیزومتر با قطر مشخص که دارای سطح شفاف است و در کف دستگاه به کار گرفته شده است، ارتفاع آب موجود در درون خاک را در زمان آزمایش اندازه‌گیری شد. انتهای دیگر این پیزومترها بر روی بورد پیزومتر قرار گرفت. بورد به صورت قائم نصب شده است تا از خطاهای احتمالی جلوگیری شود و به صورتی مدرج است که بتوان ارتفاع آب موجود در خاک را به واحد سانتی متر قرائت نمود.

۲-۱-۲- خاک

در این آزمایش‌ها از دو نمونه خاک ماسه‌ای با اندازه دانه‌های ریز و درشت استفاده شد. در بیشتر موارد جریان‌های آب زیرزمینی در خاک‌های آبرفتی که دارای سطوحی گرد گوشه هستند، روی می‌دهند. از این رو خاک مورد استفاده در آزمایش‌های مورد نظر از نوع خاک‌های ماسه‌ای آبرفتی بستر رودخانه‌ای انتخاب گردید. نمونه خاک‌ها از محل پروژه سد سازی تنگ سرخ در استان کهگیلویه و بویراحمد تهیه شد. خاک ماسه‌ای ریز استفاده شده در آزمایش‌ها دارای ۰/۴۲ درصد شن، ۹۵/۵۱ درصد ماسه و ۴/۰۷ درصد ریزدانه است. در حالی که خاک ماسه‌ای درشت شامل ۱۸/۲۵ درصد شن، ۸۱/۱۹ درصد ماسه و ۰/۵۶ درصد ریزدانه بود. شکل ۳ تصاویری از دو نمونه خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها را نمایش می‌دهد.

در شکل ۴ منحنی دانه‌بندی ماسه ریز (D_{50}=0.22 mm) و ماسه درشت (D_{50}=1.9 mm) به کار رفته در آزمایش‌ها نشان داده شده است. با توجه به منحنی‌های دانه‌بندی و بر اساس سیستم طبقه بندی متحد (USCS)، ماسه درشت از نوع ماسه خوب دانه‌بندی شده SW و ماسه ریز از نوع خاک ماسه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت SP طبقه‌بندی گردید [۱۶].

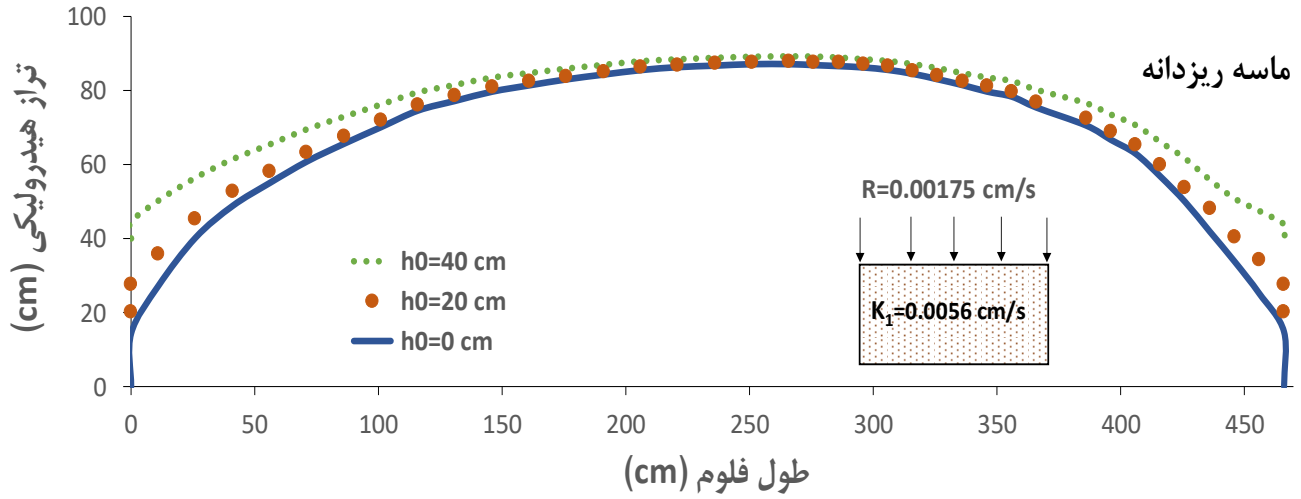
نفوذپذیری هر دو خاک به وسیله ی آزمایش تعیین نفوذپذیری با هد ثابت اندازه‌گیری شد. نفوذپذیری خاک ماسه‌ای ریز برابر با ۰/۰۰۵۶ سانتی‌متر بر ثانیه و خاک ماسه‌ای درشت برابر ۰/۰۸ سانتی‌متر بر ثانیه به دست آمد.

۲-۲- روش انجام آزمایش‌ها

به منظور انجام آزمایش‌ها، ابتدا به بررسی و آب‌بندی دستگاه پرداخته شده تا از عدم آب‌دهی و خطای احتمالی پیش آمده آن اطمینان حاصل شود. برای این منظور، زمانی که فلوم خالی از خاک بود، آن را از آب پر کرده و ناحیه‌هایی که نشت آب داشت (به صورت غیر کنترل شده) علامت‌گذاری و با چسب ضد آب مخصوص از آب‌دهی بدنه فلوم جلوگیری گردید. خاک مورد آزمایش در سه لایه ریخته و توسط وزنه ۲۰ کیلوگرمی که از ارتفاع ثابت بر روی خاک رها می‌شود، به صورت یکنواخت متراکم شد تا خاکی کاملا یکنواخت در تمامی قسمت‌ها به وجود آید. پس از این که خاک مورد نظر تا ارتفاع و طول مشخص در درون فلوم قرار گرفت، سیستم ایجاد تغذیه سطحی بالاتر از بستر خاک قرار گرفت و به مخزن تغذیه سطحی متصل گردید. در مراحل قبلی آزمایش هیچ گونه آبی وجود نداشت، از این رو به آن مرحله خشک آزمایش گفته می‌شود.

در مرحله بعدی آزمایش‌ها که به مرحله تر آزمایش معروف است، به پر کردن مخزن تغذیه سطحی و زهکش‌های جانبی جهت اشباع نمودن کامل خاک و برقراری جریان در درون آن، پرداخته شد. پس از گذشت مدت زمان چند ساعتی از برقراری بارش و اشباع کامل خاک باید پیزومترها از حباب هوا که در درون لوله‌های پیزومتر هستند، خالی می‌شدند. زیرا که این حباب‌ها باعث نمایش بیشتر ارتفاع آب در درون پیزومترها می‌شدند. پیزومترها باز شده و در کف زمین برای مدت زمان محدودی قرار گرفتند و حباب‌های هوا به صورت کامل خارج شدند.

پس از اتصال مجدد پیزومترها بر روی تابلوی چوبی، شرایط مورد



شکل ۵. نتایج به دست آمده از مدل آزمایشگاهی برای ماسه ریز

Fig. 5. Experimental results for water table in fine sand

نظر برای انجام آزمایش (از لحاظ تنظیم مقدار دبی ورودی بارش و میزان ارتفاع آب در درون زهکش‌ها) ایجاد گردید. سپس با گذشت مدت زمانی که برای ماندگار شدن شرایط آزمایش باید سپری می‌شد (باید توجه داشت که در این مدت شرایط یاد شده همواره باید ثابت باشد) قرائت پیزومترها انجام پذیرفت و همچنین میزان دبی خروجی از کانال‌های زهکشی با تعیین مقدار حجم آب گذشته نسبت به زمان، اندازه‌گیری و محاسبه گردید. برای به دست آوردن عدد دقیق‌تر و به دور از خطا دبی خروجی سه بار اندازه‌گیری شد و میانگین آن‌ها به عنوان عدد مورد نظر انتخاب گردید.

پس از انجام یک مرحله از آزمایش، نمونه برای انجام آزمایش‌های دیگر در شرایط مورد نظر با دبی‌های بارشی مختلف و ارتفاع آب مختلف در درون زهکش‌ها آماده شد و اعداد مربوط به آن قرائت گردید. سپس با اندازه‌گیری تمام حالت‌های موجود بر روی یک نمونه، خاک داخل فلوم آزمایش تخلیه و خاک با دانه‌بندی و ضریب هیدرولیکی متفاوت جایگزین آن شد.

۲-۳-روش ارزیابی نتایج رابطه تحلیلی با نتایج آزمایش‌ها

جهت ارزیابی میزان خطای نتایج به دست آمده از رابطه دوپویی-فرشهایمر و نتایج آزمایشگاهی از رابطه (۳) استفاده شد. NOF نسبت خطای میانگین مربعات ریشه (RMSE) به میانگین کلی داده‌های تجربی X است [۱۷].

$$\mathrm{NOF}=\frac{\mathrm{RMSE}}{\mathrm{X}} \qquad (۳)$$

که در آن RMSE و X از روابط (۴) و (۵) به دست می‌آید:

$$\boldsymbol{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\boldsymbol{x_i}-\boldsymbol{y_i}\right)^2}{\boldsymbol{N}}} \qquad (۴)$$

$$\boldsymbol{X}=\frac{1}{\boldsymbol{N}}\sum_{\boldsymbol{i}=1}^{\boldsymbol{N}}\boldsymbol{x_i} \qquad (۵)$$

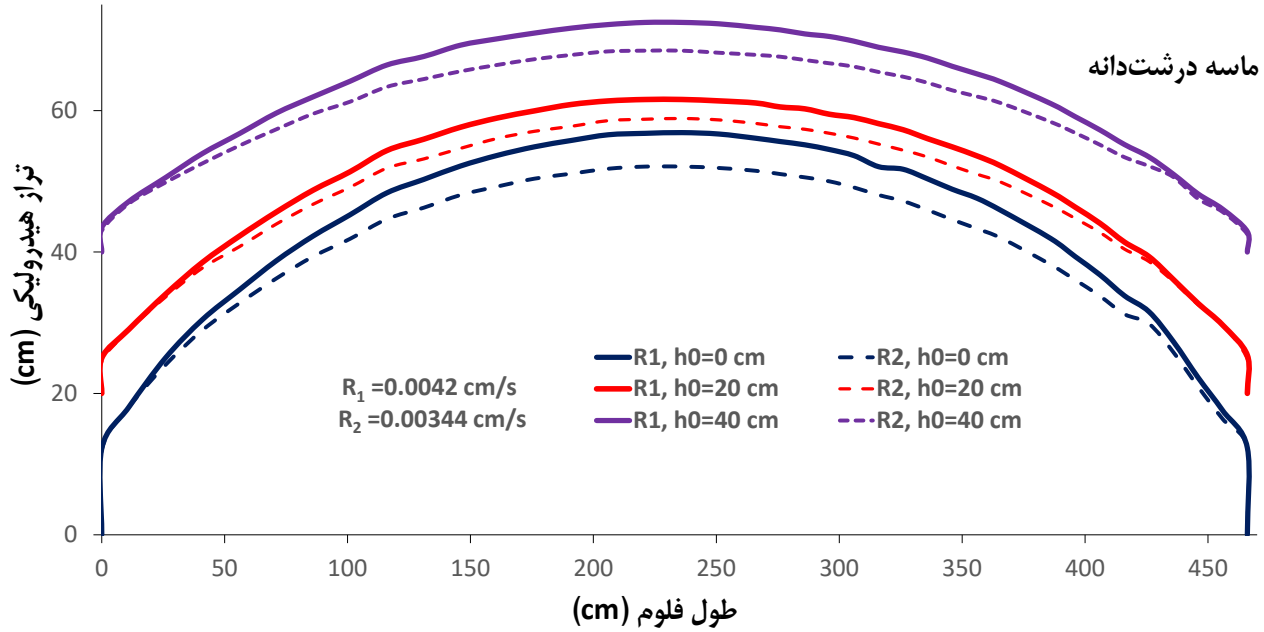
که در این روابط N تعداد داده‌های آزمایشگاهی، X میانگین داده‌های آزمایشگاهی، $\boldsymbol{x_i}$ مقدار داده آزمایشگاهی و $\boldsymbol{y_i}$ مقدار داده‌های تئوری است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایش‌ها

نتایج آزمایشگاهی به دست آمده برای خاک ماسه ریز در ۳ تراز مختلف آب درون زهکش‌ها (۰، ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متر) به دست آمده است. شکل ۵ این نتایج را در قالب نمودار نشان می‌دهد.

همان گونه که از نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی بارش در خاک



شکل ۶. نتایج به دست آمده از مدل آزمایشگاهی برای خاک ماسه درشت

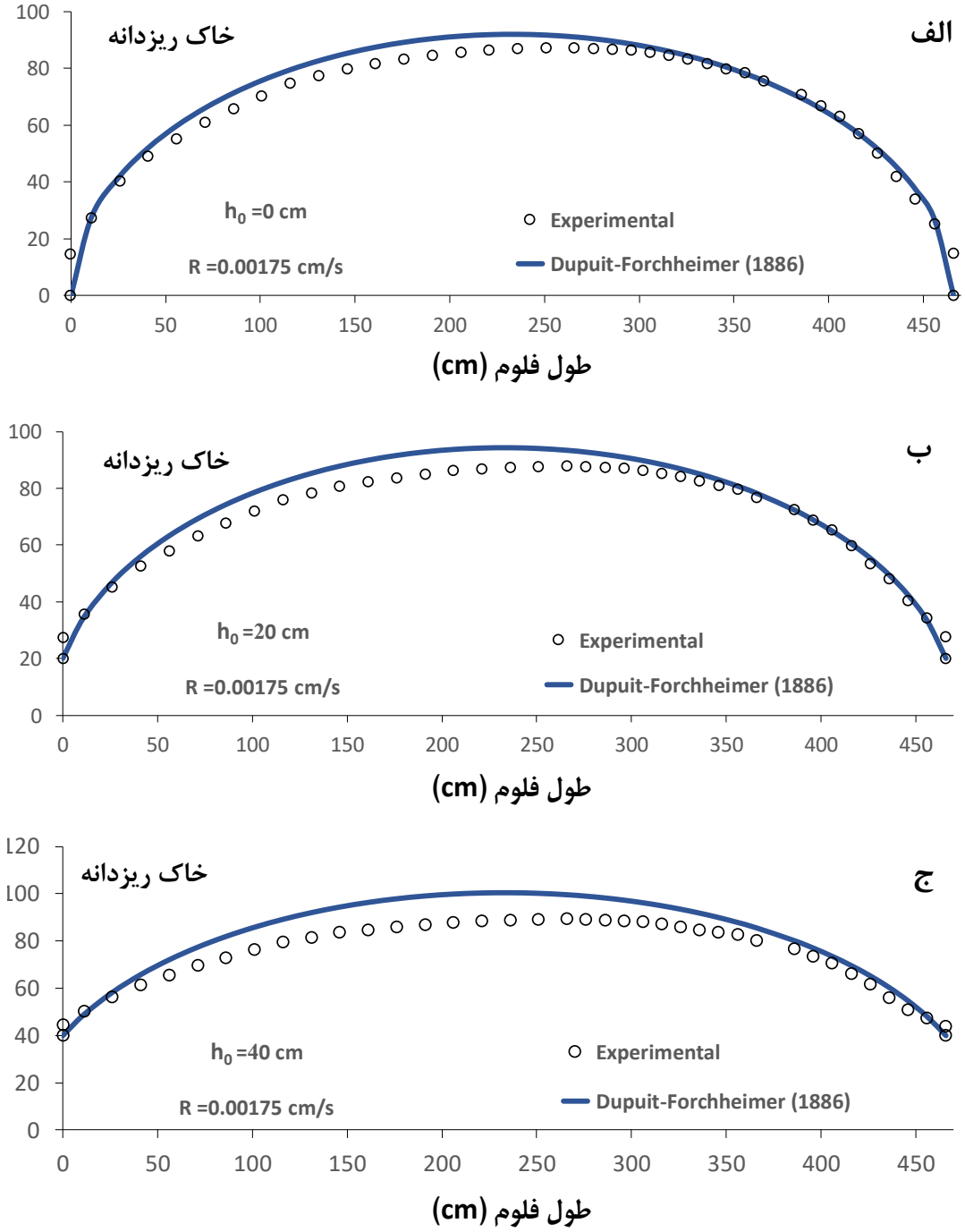
Fig. 6. Experimental results for water table in coarse sand

ماسه ریز تحت ترازهای مختلف آب درون زهکش‌ها مشخص است، ارتفاع آب با افزایش تراز آب در درون زهکش‌های جانبی افزایش یافته است. این افزایش در نقاط نزدیک به زهکش‌ها زیاد و با دور شدن از آن کاهش یافته است، به گونه‌ای که کمترین میزان افزایش ارتفاع آب در ماسه ریز در اثر افزایش تراز آب درون زهکش‌ها، در مرکز فلوم آزمایشگاهی روی داده است. چنین نتیجه می‌شود که در خاک ماسه‌ای ریزدانه تغییر ارتفاع آب درون زهکش های جانبی تاثیری بسیار ناچیزی بر حداکثر ارتفاع آب درون پروفیل خاک دارد.

حداکثر ارتفاع آب برای ماسه ریز در تراز آب ۰، ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متر درون زهکش‌ها برابر با برابر با ۸۷/۲، ۸۷/۷ و ۸۹/۲ سانتی‌متر به دست آمد. یکی از پارامترهایی که مورد مطالعه قرار گرفت ارتفاع تراوش آب بود که نتایج نشان داد این مقدار با افزایش تراز آب درون زهکش‌های جانبی کاهش یافته است. مقدار ارتفاع تراوش آب در ماسه ریز در تراز آب درون زهکش ۰، ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۱۴/۴، ۷/۳ و ۴/۵ سانتی‌متر حاصل شد. می‌توان نتیجه گرفت که در خاک ماسه‌ای ریزدانه با افزایش ارتفاع آب درون زهکش‌های جانبی، ارتفاع تراوش آب کاهش می‌یابد.

شکل ۶ نتایج به دست آمده از ارتفاع آب درون ماسه درشت را در ۳ تراز مختلف آب درون زهکش‌ها را نشان می‌دهد. این نتایج با شبیه‌سازی دو نرخ مختلف بارش انجام پذیرفته است. همان گونه که از این شکل مشخص می‌باشد، افزایش تراز آب درون دو زهکش و افزایش نرخ بارش، باعث افزایش تراز آب در درون خاک ماسه درشت شده است. این در حالی است که این افزایش در طول نمونه خاک درشت‌دانه یکسان است و به نقاط میانی و نزدیک به زهکش‌ها بستگی ندارد. دلیل این مشاهدات این است که در ماسه درشت به دلیل کم بودن میزان افت انرژی، افزایش تراز آب درون زهکش‌ها در تمام طول نمونه تاثیر گذار است. این در حالی است که در ماسه ریز به دلیل افت انرژی بالا، تغییرات ارتفاع آب درون زهکش‌ها نمی‌تواند ارتفاع آب تمام نقاط نمونه را به میزان یکسان تغییر دهد و تاثیر ناچیزی بر روی نقاط میانی (دورترین نقاط از زهکش‌ها) دارد. به دلیل امکان زهکشی در ماسه درشت، افزایش نرخ بارش باعث افزایش تراز آب در نقاط میانی نمونه شده است. از طرفی، تغییر ارتفاع آب درون زهکش‌ها در خاک درشت دانه باعث تغییر ارتفاع آب در کل طول پروفیل خاک می‌گردد.

نتایج نشان داد که در ماسه درشت ترازهای آب به دست آمده برای حداکثر ارتفاع آب و ارتفاع تراوش آب نسبت به ارتفاع آب در



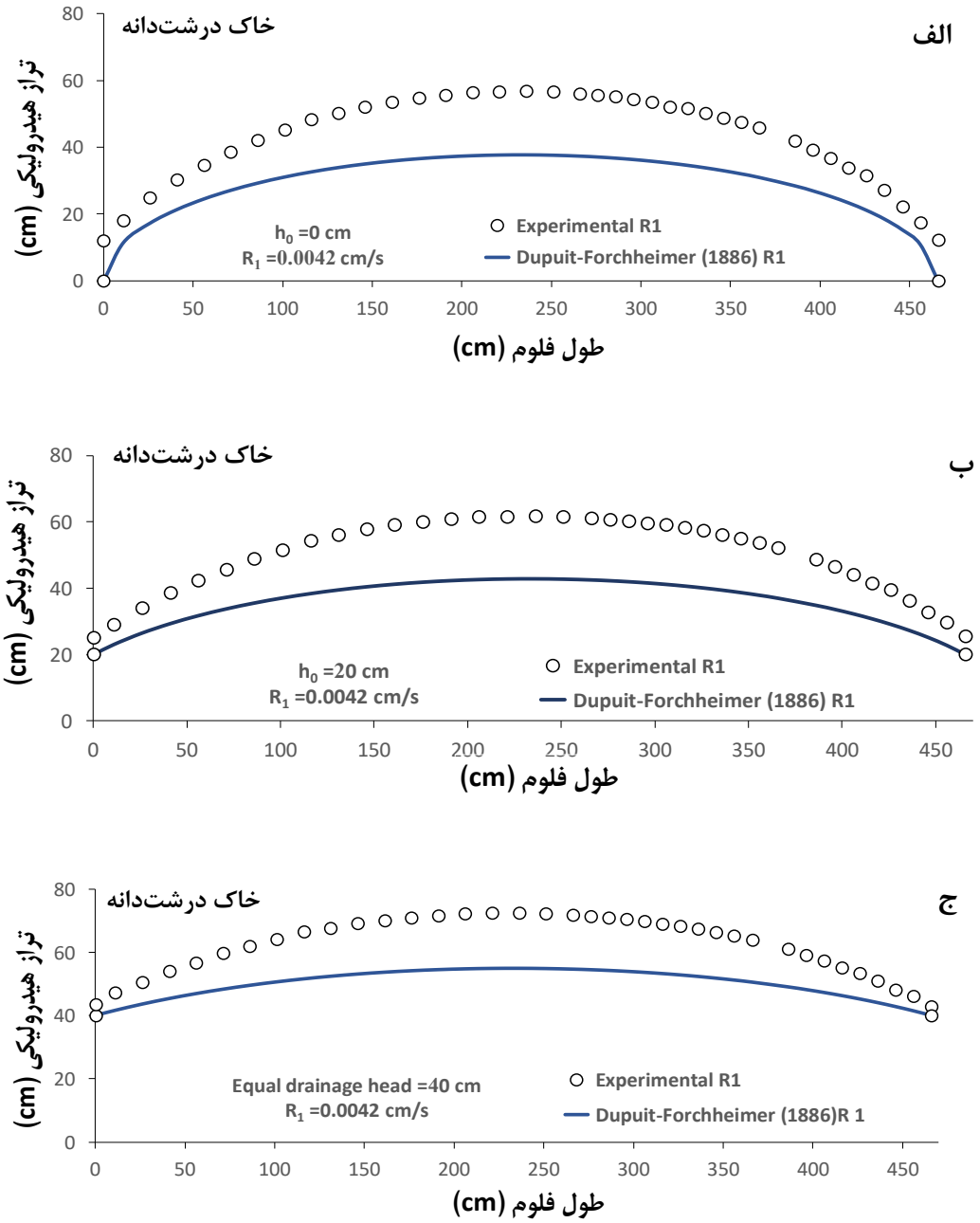
شکل ۷. نمودار مقایسه نتایج آزمایشگاهی به دست آمده با رابطه (۱) دوپویی-فرشهایمر در شرایط تغذیه ثابت خاک ماسه ریزدانه و ارتفاع آب در درون زهکش‌های قائم برابر با: الف) صفر سانتی‌متر ب) ۲۰ سانتی‌متر ج) ۴۰ سانتی‌متر

Fig. 7. Comparison diagram of experimental results with the Dupuit-Forchhiemer equation under constant surface recharge for fine sand and water height with in ditches equal to a) 0 cm b) 20 cm c) 40 cm

ماسه ریز، مقادیر بسیار کمتری است (با توجه به ۲/۴ برابر بودن نرخ بارش در ماسه درشت نسبت به نرخ بارش در ماسه ریز). در تراز آب ۰، ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متر درون زهکش‌های جانبی مقادیر ۵۶/۹، ۶۱/۶ و ۷۲/۵ سانتی‌متر برای حداکثر ارتفاع آب و مقادیر ۱۲/۲، ۵/۱ و ۳/۵ سانتی‌متر برای ارتفاع تراوش آب در ماسه درشت حاصل شد. با مقایسه شکل‌های ۵ و ۶، چنین نتیجه می‌شود که ارتفاع آب در پروفیل خاک در خاک ماسه درشت به مراتب پایین‌تر از ماسه‌ریز است.

۳-۲- ارزیابی رابطه دوپویی-فرشهایمر (۱۸۸۶) با نتایج آزمایش‌ها

در این بخش نتایج به دست آمده از مدل آزمایشگاهی با روابط



شکل ۸. نمودار مقایسه نتایج آزمایشگاهی به دست آمده با رابطه دوپویی-فرشهایمر در شرایط تغذیه ثابت خاک ماسه درشت‌دانه و ارتفاع آب در درون زهکش‌های قائم برابر با: الف) صفر سانتی‌متر ب) ۲۰ سانتی‌متر ج) ۴۰ سانتی‌متر

Fig. 8. Comparison diagram of experimental results with the Dupuit-Forchhiemer equation under constant surface recharge for coarse sand and water height with in ditches equal to a) 0 cm b) 20 cm c) 40 cm

تحلیلی دوپویی-فرشهایمر (رابطه ۱) برای ماسه ریز و ماسه درشت مقایسه گردیده است. نتایج حاصل از مقایسه ارتفاع آب به دست آمده در ماسه ریز در نمودارهای شکل ۷ در سه تراز مختلف آب درون زهکش‌ها نشان داده شده است.

همان‌گونه که از نمودارها قابل مشاهده است، می‌توان چنین نتیجه گرفت که رابطه دوپویی-فرشهایمر قادر به پیش‌بینی دقیق تراز آب در خاک ماسه ریز است. یانگز و راشتن نیز در مطالعات خود به این مهم رسیدند که رابطه دوپویی-فرشهایمر در شرایط ماندگار بارش به خوبی قادر به پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی است [۱۹ و ۱۸]. دقت این رابطه با افزایش ارتفاع آب درون زهکش‌ها در طول نمونه خاک ریزدانه کاهش یافته است.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی به دست آمده در ماسه درشت با نتایج

جدول ۱. میزان خطای NOF به دست آمده در خاک ماسه ریزدانه و درشت‌دانه با رابطه دوپویی-فرشهایمر
Table 1. NOF error value for fine and coarse sand using Dupuit-Forchheimer equation

h_0 (cm)	۰	۲۰	۴۰
مقدار NOF برای ماسه ریزدانه	۰/۰۵۷	۰/۰۶۷	۰/۱۰۵
مقدار NOF برای ماسه درشت‌دانه	۰/۳۵	۰/۳	۰/۲۱

تحلیلی دوپویی-فرشهایمر به صورت نمودارهای شکل ۸ ارائه شده است. مقایسه صورت گرفته در دبی ثابت بارش صورت پذیرفته است. با مشاهده نمودارهای شکل ۸ می‌توان به این نتیجه رسید که رابطه دوپویی-فرشهایمر به درستی قادر به پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در ماسه درشت نمی‌باشد و بین نتایج آزمایشگاهی با مقادیر حاصله از رابطه دوپویی-فرشهایمر اختلاف زیادی وجود دارد. نتایج حاصل از مطالعه جرجین و یانگز نیز نشان داد رابطه دوپویی-فرشهایمر میزان ارتفاع آب در بین دو زهکش جانبی را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند [۱۰].

در رابطه دوپویی-فرشهایمر از سرعت قائم آب صرف نظر شده و خطوط جریان همواره افقی فرض شده است. در ماسه ریز سرعت قائم آب به دلیل نفوذپذیری پایین ناچیز و تقریبا برابر با صفر است. از این رو به دلیل این که شرایط در ماسه ریز با فرضیات رابطه دوپویی-فرشهایمر صادق است و در ماسه درشت به دلیل نفوذپذیری بالا فرضیات رابطه صادق نیست، در نتیجه این رابطه در ماسه ریز بهتر از ماسه درشت قادر به پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی است.

در جدول ۱ میزان خطای NOF برای دو نوع ماسه ریزدانه و درشت‌دانه در ترازهای آب مختلف داخل زهکش‌های جانبی به دست آمده است. به منظور ارزیابی با روش NOF بهترین انطباق بین نتایج آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی زمانی حاصل می‌شود که این مقدار برابر با صفر باشد، هر چند که در مقدار NOF کمتر از یک هنوز رابطه تحلیلی قابل اعتماد است [۲۰]. نتایج نشان داد که رابطه دوپویی-فرشهایمر به خوبی قادر به پیش‌بینی ارتفاع آب زیرزمینی در ماسه ریزدانه است. این در حالی می‌باشد که رابطه دوپویی-فرشهایمر نتوانسته است ارتفاع آب زیرزمینی را در خاک درشت‌دانه تخمین بزند. کمترین مقدار خطای NOF در خاک ریزدانه و درشت‌دانه به ترتیب در تراز آب درون زهکش صفر و ۴۰ سانتی‌متر برابر با ۰/۰۵۷ و ۰/۲۱ حاصل گردید. با افزایش تراز آب درون زهکش‌های جانبی در ماسه ریزدانه به میزان خطا افزوده شده است. این در حالی است که میزان خطای NOF با افزایش ارتفاع آب درون زهکش‌ها در ماسه درشت‌دانه کاهش یافته است.

طبق نتایج به دست آمده از شکل ۷ و جدول ۱ چنین نتیجه شد که رابطه دوپویی-فرشهایمر در خاک ریزدانه دقت بالایی در برآورد سطح آب در درون خاک در شرایط بارش و زهکش‌های جانبی دارد. با توجه به شکل ۸ و جدول ۱ می‌توان نتیجه گرفت که این رابطه ارتفاع آب در خاک درشت‌دانه را نسبت به مقادیر آزمایشگاهی کمتر برآورد می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر با استفاده از روش آزمایشگاهی به بررسی شرایط زهکشی جریان ماندگار در حالت تغذیه سطحی پرداخته شد که در مدیریت منابع آب، بهره‌برداری آب، کشاورزی و طراحی زهکش‌های مناسب کاربرد فراوانی دارد. در این آزمایشات از دو نمونه خاک ماسه ریز و ماسه درشت رودخانه‌ای برای مطالعه‌ی نحوه تغییرات در تراز آب زیرزمینی استفاده گردید. آزمایش‌ها در یک فلوم به طول ۵/۴ متر انجام شد. پارامترهای تراز آب درون زهکش‌ها، نرخ بارش و دانه‌بندی مصالح به عنوان متغیر در این مطالعه بررسی شد. بر اساس آزمایش‌های انجام گرفته مشاهده شد که با افزایش ارتفاع آب درون زهکش‌ها، تراز آب در درون نمونه ماسه‌ای ریز و درشت افزایش یافت. با این تفاوت که این افزایش در خاک ماسه ریز باعث افزایش تراز نقاط نزدیک به زهکش‌ها شد و بر روی نقاط میانی نمونه تاثیر کمتری داشت. حداکثر ارتفاع آب در ماسه درشت و ریز در تراز آب

۰، ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری درون زهکش‌های جانبی به ترتیب برابر با ۵۶/۹، ۶۱/۶ و ۷۲/۵ سانتی‌متر برای ماسه درشت‌دانه و برابر با ۸۷/۲، ۸۷/۷ و ۸۹/۲ سانتی‌متر برای ماسه ریزدانه به دست آمد که تغییرات حداکثر برابر با ۱۵/۶ سانتی‌متر و ۲ سانتی‌متر را برای ماسه درشت و ریز حاصل نمود.

هم چنین مشاهده شد که افزایش نرخ بارش باعث افزایش تراز آب در درون نمونه خاک درشت‌دانه می‌شود، به گونه‌ای که بیشترین ارتفاع آب در مرکز نمونه (۲x/۳۳= سانتی‌متر) در نرخ بارش cm/s ۰/۰۰۴۲ و در تراز آب ۴۰ سانتی‌متر درون زهکش‌ها حاصل شد. نتایج به دست آمده از تغییرات نوع خاک نشان داد که با کاهش نفوذپذیری خاک ارتفاع آب در درون نمونه خاک افزایش یافت، به گونه‌ای که با وجود ۲/۴ برابر بودن نرخ بارش در ماسه درشت نسبت به ماسه ریز، تراز آب زیرزمینی در ماسه درشت به مراتب پایین‌تر از تراز آب در ماسه ریز قرار گرفت.

ارتفاع تراوش آب به عنوان پارامتر دیگر در این مطالعه بررسی گردید و نتایج نشان داد که ارتفاع تراوش آب در کانال‌های زهکشی با افزایش تراز آب درون زهکش‌ها و افزایش ضریب هدایت هیدرولیکی خاک کاهش می‌یابد. با توجه به اختلاف ۲/۴ برابری نرخ بارش در ماسه درشت نسبت به ماسه ریز، ارتفاع تراوش آب در تراز آب درون زهکش برابر با ۰، ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متر به ترتیب مقادیر ۱۲/۲، ۵/۱ و ۳/۵ سانتی‌متر برای ماسه درشت و مقادیر ۱۴/۴، ۷/۳ و ۴/۵ سانتی‌متر برای ماسه ریز به دست آمد.

همچنین به کمک نتایج آزمایشگاهی، رابطه کلاسیک دوپویی-فرشهایمر (۱۸۸۶) مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور از ارزیابی به کمک خطای NOF استفاده شد. از مقایسه نتایج چنین نتیجه شد که کمترین مقدار خطای NOF در ماسه ریزدانه و زمانی که ارتفاع آب درون زهکش‌های جانبی صفر (زهکشی آزاد) است، به دست می‌آید که نشانگر دقت بالاتر این رابطه در پیش بینی تراز آب در ماسه ریز است. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده حاصل از مقایسه نتایج آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی می‌توان به این مهم دست یافت که در خاک ماسه ریز رابطه دوپویی-فرشهایمر قادر به پیش‌بینی دقیق تراز آب درون خاک است. هر چند که دقت این رابطه با افزایش ارتفاع آب درون زهکش‌ها در طول نمونه ماسه ریز کاهش می‌یابد. این در حالی است که در خاک ماسه درشت رابطه دوپویی-فرشهایمر قادر به پیش‌بینی دقیق تراز آب درون خاک نمی‌باشد و ارتفاع آب در این خاک را نسبت به مقادیر آزمایشگاهی کمتر برآورد می‌کند. به صورت کلی می‌توان بیان کرد که رابطه دوپویی-فرشهایمر در حالت‌هایی که بتوان از سرعت قائم صرف نظر کرد (ماسه ریزدانه) پیش‌بینی کاملا منطبقی با نتایج واقعی حاصل می‌نماید. ضعف اساسی این رابطه در تعیین ارتفاع تراوش آب و در پیش‌بینی تراز آب در ماسه درشت است.

لازم به ذکر است تاکنون مدل آزمایشگاهی با فلومی با ابعاد پژوهش حاضر جهت بررسی نحوه تغییرات آب زیرزمینی با شرایط زهکشی و بارش صورت نگرفته بود و مطالعه حاضر به عنوان اولین مطالعه آزمایشگاهی صورت گرفته با شرایط یاد شده است که می‌تواند مبنای راستی‌آزمایی نتایج مطالعات تحلیلی یا عددی در این زمینه قرار گیرد.

مراجع

[1] J. Dupuit, Etudes The´oriRues et PratiRues sur le Mouvement des Eaux dans les Canaux De´couverts et a´ Travers les Terrains Permeables, Dunod, ParisM (1863).

[2] F. Engelund, Mathematical discussion of drainage problems, Trans Dan. Acad. Tech. Sci (1951).

[3] M. Maasland, Water table fluctuation induced by intermittent recharge. Journal of Geophysical Research. 64(5) (1959) 549-559.

[4] D. Khirkham, Explenation of paradoxes in Dupuit-Foorchheimer seepage theory. Water Resource Research. 3(2) (1967) 609-622.

[5] E. G. Youngs, A simple drainage equation for predicting water-table drawdowns. J. agric. Engng Res. 31(4) (1985) 321-328.

[6] K. R. Rushton, Groundwater hydrology, Department. John Wiley & Sons Ltd. 1st ed (2003).

[7] O. Castro-Orgaz, J. V. Giráldez, Steady-state water table height estimations with an improved pseudo-two-dimensional Dupuit-Forchheimer type model. Journal of hydrology 438 (2012) 194-202.

[8] J. H. Knight, Improving the Dupuit-Forchheimer grownd water free surface approximation. Advances in water. Resources, 28(10) (2005) 1048-1056.

[9] K. R. Rushton, E. G. Youngs, Drainage of recharge to

surface flows. 1st ed. Springer Nature (2017).

[16] American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, sec. 4, vol. 04(8) (2014), ASTM, West Conshohocken, PA.

[17] M. Sedghi-Asl, H. Rahimi, R. Salehi, Non-Darcy flow of water through a packed column test. Transp. Porous Med., 101 (2014) 215-227.

[18] E. G. Youngs, K. R. Rushton, Dupuit-forchheimer analyses of steady-state water-table heights due to accretion in drained lands overlying undulating sloping impermeable beds." Journal of Irrigation and Drainage Engineering 135(4) (2009) 467-473.

[19] E. G. Youngs, K. R. Rushton, Steady-state ditch-drainage of two-layered soil regions overlying an inverted V-shaped impermeable bed with examples of the drainage of ballast beneath railway tracks. Journal of hydrology 377(3-4) (2009) 367-376.

[20] K. N. Moutsopoulos, I. N. E. Papaspyros, V. A. Tsihrintzis, Experimental investigation of inertial flow processes in porous media. Journal of hydrology 374(3-4) (2009) 242-254.

symmetrically located downstream boundaries with special reference to seepage faces. J. Hydrol. 380 (2010) 94–103.

[10] A. B. Gureghian, E. G. Youngs, The calculation of steady-state water-table heights in drained soils by means of the finite-element method. Journal of hydrology 27(1-2) (1975) 15-32.

[11] K. R. Rushton, E. G. Youngs, Drainage of recharge to symmetrically located downstream boundaries with special reference to seepage faces. Journal of Hydrology 380(1-2) (2010) 94-103.

[12] J. Bear, Dynamics of fluids in porous media. Courier Corporation, (2013).

[13] S. E. Serrano, Analytical solutions of the nonlinear groundwater flow equation in unconfined aquifers and the effect of heterogeneity. Water Resources Research 31(11) (1995) 2733-2742.

[14] S. A. Al Jabri, E. G. Youngs, Steady-state water tables in drained lands modeled using the HYDRUS package and compared with theoretical analyses. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 141(9) (2015) 04015010.

[15] O. Castro-orgaz, W. H. Hager, Non-hydrostatic free

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Monfared J., Parvizi M. , Rabeti Moghadam M., Sedghi-Asl M. , Study of water flow drainage in sandy soil due to surface recharge conditions using a laboratory model, Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 4219-4230.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18247.6808