

EXTENDED ABSTRACT

Effect of soil structure on near-saturated hydraulic characteristics using a tension infiltrometer

N. Ramezani¹, G. A. Sayyad^{2*}, A. R. Barzegar³ and A. Landi⁴

- 1- PhD student, of Soil Physics and Conservation, College of Agriculture, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
- 2 *- Corresponding Author, Associate Professor of Soil Physics and Conservation, College of Agriculture, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran(gsayyad@gmail.com).
- 3- Professor of Soil Physics and Conservation, College of Agriculture, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran
- 4- Professor of Soil Genesis and Classification, College of Agriculture, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

Received: 9 December 2017

Revised: 22 June 2018

Accepted: 30 June 2018

Keywords: Hydraulic conductivity, Macroscopic capillary length, Steady uniform flow.

DOI: 10.22055/jise.2018.24415.1724.

Introduction

As one of the main indicators of soil quality, structure is related to hydraulic parameters which plays a significant role in predicting and estimating them (Pachepsky et al., 2008). Mohawesh et al, (2017) stated that hydraulic properties are key factors in the movement of water and the transport of pollutants, and the soil structure has a significant effect on the storage and movement of water in the soil. Tension infiltrometer is an effective tool to measure infiltration rate and the flow of water into pores using suctions less than 0 cm, where the macro and meso pores have highest rate of hydraulic activities for water and solution transportation. The measurement of hydraulic conductivity in different suctions is important for characterizing different aspects of unsaturated and near-saturated water in the soil. Although the hydraulic properties of the soil have been investigated from different aspects and by different methods, the role of soil structure specifically from comparison viewpoints of different types of structures and their effects on hydraulic properties has not yet been studied. The aim of this study was to measure and evaluate the hydraulic properties and quantitative parameters describing the water conductive active pores using tension infiltrometer in near-saturated condition of different soil structures.

Methodology

The area under study was located in Bayatan Village (Silakhore Bala plain), Borujerd, Lorestan Province, Iran. The study was conducted in laboratory conditions on 9 intact soil columns with three different structures and three classes of Granular (G1, G2, G3), Blocky (B1, B2, B3) and Massive (M1, M2, M3) with 3 replications for each column in a completely randomized design with different structures of the soil as main factor. The statistical analysis was performed using Generalized Linear Model in SAS (ver. 9.4). The 3 mm thick polyethylene columns with a diameter of 25 cm and a uniform height of 25 cm were prepared. The hydraulic properties of various soil structures were measured by a disk infiltrometer device with a diameter of 20 cm in suctions of 14, 10, 4 and 1 cm. Steady uniform

flow (Q), saturated hydraulic conductivity (K_s), unsaturated hydraulic conductivity ($K(h)$), macroscopic capillary length (λ_c), the number of water-conducting active pores (N), effective porosity (θ) in each matric potential were measured based on Wooding's equation (Wooding, 1968; Ankeny, 1991; Gardner, 1958; and Watson and Luxmoore, (1986).

Results and Discussion

The results of comparison of means test for the average percentage of sand, silt and clay particles in different soil structures showed that the distribution of particle size varied in different structures. Despite the variation in distribution of the particle size in the three under-studied structures, soil texture was loam in all three types of structure. The effect of structure on hydraulic properties was significant. The average number of pores per unit area (N) in two classes of pore size included macro pore ($0.375 \text{ mm} < \text{radius}$) and mesopore ($0.107 < \text{radius} < 0.375 \text{ mm}$). In order to calculate the number of pores, the smallest radius in each class was used in two successive suction and therefore, the maximum number of pores was calculated for each class.

The number of mesopores was manifold higher than the macro pores in all treatments. The highest number of macro and mesopores was observed in G3 and G2 and the lowest number was seen in massive M1, M3 and M2 soil. The presence of higher organic matter resulted in increased porosity, enhanced stability of the soil structure, and improved aggregation in granular class indicating that this class has higher number of macro and mesopores than the other two soil structures. Studying the role of soil structure on the pore functionality, Dorner et al. (2010) stated that the unstructured soils had lower number and continuity of the pore system than the structured soils. The number of macro and mesopores in G1 soil was significantly lower than the G3 and G2 soils. Despite its high organic matter content and granular structure, G1 had significantly lower number of pores compared to the two other granular structures due to the soil compaction of driving agricultural machinery. The highest flow rate in macro and mesopores was obtained from granular (G3 and G2) treatments and the lowest amount was obtained from massive soil (M1 M3, M2). The compacted G1 structure had the lowest variation of flow rate at different potentials due to heterogeneity and low number of pores and effective porosity. There was a significant difference between saturated and unsaturated hydraulic conductivity in different soil structures. In all structures, saturated and unsaturated hydraulic conductivity increased by suction reduction from 14 cm to zero (saturation). The difference between hydraulic conductivity values in different structures increased, and soared to its highest level for saturated hydraulic conductivity. Moosavi and Sepahkhah (2012) reported that the higher coefficient of variation for K_s in comparison to unsaturated hydraulic conductivity values is due to the larger size, the number and heterogeneity of the macro pores.

Granular soil (G3 and G2) had the highest amount of saturated hydraulic conductivity while massive soil (M1, M2, M3) proved the lowest. Karahan et. al (2016) simulated saturated hydraulic conductivity using soil morphological properties and showed that slight variations in soil structure significantly affects the saturation hydraulic conductivity, and the saturated hydraulic conduction is strongly controlled by soil pores. There was a significant difference between macroscopic capillary lengths in different structures. The maximum and minimum values for macroscopic capillary length belonged to the massive and granular soil structures, respectively. Capillary length is an effective factor for predicting the preferential flow. The greater the length of macroscopic capillary, the less the potential of the soil to create a preferential flow. Klute (1986) stated that macroscopic capillary length is low in macropores clay with a strong structure and high aggregates, but in clay soils without structure and aggregate, it is larger.

Conclusions

Soil structure significantly affected the hydraulic and physical properties. Considering physical and hydraulic properties, granular soils had the best condition compared to blocky and massive soils. Blocky soils ranked second in term of hydraulic conditions, followed by massive soils. Massive soils

(weakest soil) with maximum length of macroscopic capillary had the lowest probability of occurrence for preferential flow. Hydraulic properties had high variability in various suction rates. This variability increased by decreasing matric potential toward the saturated condition so that the maximum variation of hydraulic parameters among different soil structures was calculated in saturated conditions. In near saturated condition, hydraulic properties, independently from soil texture, were significantly affected by soil structure.

Acknowledgements

The authors would like to thank Ramin University staff for their cooperation in conducting some experiments in the soil laboratory.

References

- 1- Ankeny, M.D., Ahmed, M., Kasper, T.C. and R. Horton. 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of American Journal*, 55:476-470.
- 2- Dorner, J., Sandoval, P. and Dec, D., 2010. The role of soil structure on the pore functionality of an Ultisol. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(4), pp.495-508.
- 3- , W.R., 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85(4), pp.228-232.
- 4- Karahan, G. and S. Erşahin. 2016. Predicting saturated hydraulic conductivity using soil morphological properties. *Eurasian Journal Soil Science*, 5: 30 – 38.
- 5- Klute, A. 1986. Methods of soil analysis - Part 1 - physical and mineralogical methods. Soil Science Society of America Journal. American Society of Agronomy. Madison. Wisconsin. USA.
- 6- Kodešová, R., Vignozzi, N., Rohořková, M., Hájková, T., Kočárek, M., Pagliai, M., Kozák, J. and Šimůnek, J., 2009. Impact of varying soil structure on transport processes in different diagnostic horizons of three soil types. *Journal of Contaminant Hydrology*, 104(1-4), pp.107-125.
- 7- Mohawesh, O., Janssen, M., Maaitah, O. and B. Lennartz. 2017. Assessment the effect of homogenized soil on soil hydraulic properties and soil water transport. *Eurasian Journal Soil Science*, 5: 30 – 38.
- 8- Moosavi, A.A. and A.R. Sepaskhah. 2012. Spatial variability of physico-chemical properties and hydraulic characteristics of a gravelly calcareous soil. *Archives of Agronomy Soil Science*, 58: 631–656.
- 9- Pachepsky, Y., Gimenez, D., Lilly, A. and Nemes, A., 2008. Promises of hydropedology. *Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 3(040), pp.1-19.
- 10- Watson, K.W. and Luxmoore, R.J., 1986. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer 1. *Soil Science Society of America Journal*, 50(3), pp.578-582.
- 11- Wooding, R.A. 1968. Steady infiltration from a Shallow circular pond. *Water Resources Research*, 4: 1259-1273.





اثر ساختمان خاک بر خصوصیات هیدرولیکی نزدیک اشباع با استفاده از دستگاه نفوذسنج مکشی

نوشین رضانی^۱، غلامعباس صیاد^{۲*}، عبدالرحمن بزرگر^۳ و احمد لندی^۴

۱- دانشجوی دکتری فیزیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- دانشیار فیزیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز gsayyad@gmail.com

۳- استاد فیزیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴- استاد پیدایش و رده بندی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۹

بازنگری: ۱۳۹۷/۴/۱

دریافت: ۱۳۹۶/۹/۱۸

چکیده

ساختمان خاک به عنوان یکی از شاخص های اصلی کیفیت خاک نقش بسیار مهمی در خصوصیات هیدرولیکی دارد. این مطالعه با هدف اندازه گیری خصوصیات هیدرولیکی در ساختمان های مختلف خاک در استان لرستان صورت گرفت. مطالعه در شرایط آزمایشگاهی بر روی نه ستون دست نخورده با سه نوع ساختمان مختلف دانه ای، مکعبی و فشرده انجام شد. پارامترهای هیدرولیکی از نظیر شدت جریان پایدار (Q)، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) و غیراشباع ($K(h)$)، طول ماکروسکوپی موینگی (λ_c) و تعداد منافذ فعال هدایت کننده آب (N) با استفاده از دستگاه نفوذسنج مکشی و در مکش های مرز ورودی یک، چهار، ده و ۱۴ سانتی متر اندازه گیری شدند. نتایج نشان داد که ساختمان خاک به طور معنی داری بر پارامترهای هیدرولیکی تأثیر داشت. خاک های با ساختمان دانه ای و خاک های با ساختمان فشرده به ترتیب دارای بیشترین و کمترین تعداد منافذ درشت و متوسط بودند. متوسط تعداد منافذ درشت و متوسط در خاک های با ساختمان دانه ای به ترتیب ۹۳ درصد و ۸۹ درصد بیشتر از خاک های با ساختمان فشرده بود. در همه ساختمان ها شدت جریان پایدار، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع با کاهش مکش (از ۱۴ به یک سانتی متر) افزایش یافتند. هدایت هیدرولیکی اشباع نسبت به هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مکش های دیگر، دارای تغییرپذیری بیشتری بود. میزان اختلاف هدایت هیدرولیکی اشباع بین خاک های با ساختمان دانه ای و خاک های با ساختمان فشرده به طور متوسط ۹۱ درصد محاسبه شد. خاک های با ساختمان فشرده با بیشترین میزان طول ماکروسکوپی موینگی کمترین پتانسیل وقوع جریان ترجیحی آب در خاک را داشتند. به طور میانگین طول ماکروسکوپی موینگی در خاک های با ساختمان فشرده نسبت به خاک های با ساختمان دانه ای و مکعبی به ترتیب ۲۰ درصد و ۱۴ درصد بیشتر بود.

کلیدواژه ها: طول ماکروسکوپی موینگی، شدت جریان پایدار، هدایت هیدرولیکی.

مقدمه

می کنند. فرایندهای جریان آب در خاک، می توانند با اندازه گیری خصوصیات هیدرولیکی در مزرعه و آزمایشگاه تعیین و توصیف شوند. اندازه گیری خصوصیات هیدرولیکی در آزمایشگاه، زمان بر بوده و نتایج به علت حجم کمتر خاک مورد آزمایش، بهم خوردگی خاک در زمان نمونه برداری و ... ممکن است با آنچه در مزرعه اتفاق می افتد متفاوت باشد (Rezaei et al., 2016).

در دهه های اخیر پیشرفت نفوذسنج مکشی باعث سهولت مطالعات ساختمانی و خواص هیدرولیکی خاک در شرایط نزدیک اشباع شده است (Moret and Arrúe, 2007). دستگاه نفوذسنج مکشی وسیله مناسبی برای مطالعه خواص هیدرولیکی خاک سطحی است. از نکات مثبت این روش این است که این دستگاه می تواند تعداد منافذ درشت و متوسط که دارای بیشترین فعالیت هیدرولیکی هستند را مشخص کند و با اندازه گیری نفوذ آب در مکش های مختلف سهم این منافذ را در جریان آب ارزیابی کند (Zhang et al., 2014).

ساختمان خاک با تأثیر بر خصوصیات هیدرولیکی نقش بسیار مهمی در حرکت آب و انتقال املاح دارد. خصوصیات مورفولوژیکی خاک (از جمله ترکیب ساختمانی و منافذ خاک) و خصوصیات هیدرولیکی خاک (از جمله هدایت هیدرولیکی و پارامترهای توزیع اندازه منافذ خاک) پارامترهای بسیار مهمی در درک جنبه های مختلف جریان آب در خاک هستند (Kodesova et al., 2009). Mohawesh et al. (2017) بیان کردند که خصوصیات هیدرولیکی خاک نقش بسیار مهمی در حرکت آب و انتقال آلاینده ها دارند و ساختمان خاک تأثیر به سزایی در نگره داری و حرکت آب در خاک دارد. با استفاده از ویژگی های مورفولوژیکی خاک به ویژه ویژگی های مرتبط با ساختمان خاک می توان برخی تغییرات هدایت هیدرولیکی را ارزیابی کرد. Pachepsky et al. (2008) بیان کردند که خصوصیات ساختمانی خاک به پارامترهای هیدرولیکی مرتبط هستند و نقش مهمی را در پیش بینی و تخمین آن ها ایفا

و به‌طور کمی ارزیابی و مقایسه شدند. منطقه بیاتان در شمال شرق شهر اشترینان و هم‌مرز با شهرستان ملایر در استان همدان، در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی قرار دارد (شکل ۱). مطالعه در شرایط آزمایشگاهی بر روی نه ستون دست‌نخورده با سه نوع ساختمان مختلف دانه‌ای (Granular)، مکعبی (Blocky) و فشرده (Massive) با سه تکرار برای هر یک از نه ستون انجام شد. نمونه‌های با ساختمان دانه‌ای با اسامی (G_1, G_2, G_3)، ساختمان‌های مکعبی با نام‌های (B_1, B_2, B_3) و سه ساختمان فشرده با نام‌های (M_1, M_2, M_3) نام‌گذاری شدند. تجزیه واریانس به‌روش مدل خطی عمومی (Generalized Linear Model) GLM و با استفاده از طرح کاملاً تصادفی (Completely Randomized Design) در ساختمان‌های مختلف خاک به‌عنوان تیمار اصلی در نرم افزار SAS (نسخه ۹/۴) انجام شد. مقایسه میانگین با استفاده از آزمون دانکن در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ ($P < 0.05$) صورت گرفت. اثر ساختمان خاک بر مقادیر ویژگی‌های هیدرولیکی در خاک‌های مورد مطالعه بررسی و مقایسه شد.

نمونه‌برداری و آماده‌سازی ستون‌های دست‌نخورده

ابتدا پروفیل خاک تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری در مزرعه حفر و عمق هر لایه و نیز ساختمان خاک مشخص شد. به‌منظور مقایسه خصوصیات هیدرولیکی در ساختمان‌های مختلف خاک در شرایط یکسان، نمونه‌برداری به‌صورت دست‌نخورده از عمق‌ها و بخش‌های مختلف منطقه انجام شد. ستون‌ها با قطر ۲۵ سانتی‌متر (متناسب با قطر نفوذسنج صفحه‌ای) و ارتفاع یکسان ۲۵ سانتی‌متر (متناسب با ضخامت افق‌های خاک مورد مطالعه) از جنس پلی‌اتیلن و به ضخامت سه میلی‌متر تهیه شدند. پیش از نمونه‌گیری دیواره درونی ستون‌ها توسط پارافین مایع آغشته شد تا از ایجاد جریان ترجیحی در محل تماس خاک با ستون‌ها جلوگیری شود و اصطکاک بین خاک و دیواره درونی ستون در هنگام نمونه‌برداری کاهش یابد. در عملیات نمونه‌برداری، برای سهولت فروری ستون‌ها در خاک، لبه آن‌ها از طرف خارج تیز شد و سپس تا عمق مورد نظر به آرامی و با فشار دست وارد خاک شدند. برای نفوذ آسانتر ستون‌ها به درون خاک، هم‌زمان با ورود به خاک، مرتباً خاک اطراف آن‌ها حفاری و تخلیه گردید. پس از پر شدن استوانه از خاک، دهانه آن‌ها با توری پوشیده شدند تا از ریزش خاک جلوگیری شود. ستون‌های تهیه‌شده به آزمایشگاه منتقل و بر قیف‌های نصب‌شده روی سه پایه‌های فلزی قرار داده شدند (شکل ۲).

نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه و از عمق‌های مختلف انجام شد. بدین ترتیب نمونه‌های با ساختمان‌های دانه‌ای (G_1, G_2, G_3) از اعماق صفر تا ۲۵ سانتی‌متر، مکعبی (B_1, B_2, B_3) از عمق‌های ۲۵ تا ۵۰ سانتی‌متر و فشرده (M_1, M_2, M_3) از عمق‌های ۵۰ تا ۷۵ سانتی‌متر از قسمت‌های مختلف منطقه تهیه شدند.

استفاده از دستگاه نفوذسنج مکشی ساده و سریع است و اندازه‌گیری‌ها با حداقل بهم خوردگی خاک صورت می‌گیرد. Rauf et al. (2011) برای اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی در خاک‌های سنگین روش استفاده از دستگاه نفوذسنج مکشی را پیشنهاد کردند، زیرا ساختمان خاک در حین آزمایش حفظ و مانع از بهم خوردگی و مسدود شدن منافذ خاک می‌شود.

شرایط رطوبتی خاک از جمله جریان اشباع و غیراشباع و شدت جریان در چگونگی حرکت آب، اصلاح و آلاینده‌ها در خاک اهمیت دارد. در شرایط اشباع، جریان در منافذ درشت در انتقال املاح نقش داشته و به‌طور معنی‌داری انتشار املاح را افزایش می‌دهد. ولی در شرایط غیراشباع منافذ متوسط و ریز در انتقال آب و املاح شرکت دارند و بسته به درجه اشباع خاک، سرعت انتقال و حرکت املاح متفاوت است. ساختمان خاک به‌طور غیرمستقیم بر جریان آب و انتشار املاح تأثیر می‌گذارد که به تغییرات مقدار رطوبت ناشی از اختلاف در توزیع اندازه منافذ مربوط می‌شود (Bejat et al., 2000). ترکیب‌های مختلف اجزای ساختمان خاک، در خصوصیات مختلف خاک منعکس شده که این خصوصیات بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و به دنبال آن، جریان آب و حرکت آلاینده‌ها تأثیر می‌گذارد. بنابراین اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی در مکش‌های مختلف، به‌منظور توصیف جنبه‌های مختلف جریان غیراشباع و نزدیک اشباع آب در خاک اهمیت بسیاری دارد. اگرچه خصوصیات هیدرولیکی از جنبه‌ها و روش‌های مختلف در مطالعات گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است اما هنوز نقش ساختمان خاک به‌ویژه از جنبه مقایسه انواع ساختمان‌های مختلف و اثر آن‌ها بر خصوصیات هیدرولیکی به‌خوبی بررسی نشده است. هدف از انجام این مطالعه اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی و پارامترهای کمی توصیف‌کننده منافذ فعال هدایت‌کننده آب از قبیل تعداد منافذ درشت و متوسط خاک، تخلخل مؤثر (Effective porosity) و درصد جریان عبوری از این منافذ (Percentage of flow through the active pores)، شدت جریان پایدار (Steady-state flow rate)، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع (Saturated and unsaturated hydraulic conductivity) و طول ماکروسکوپی موینگی (Macroscopic capillary length) و ارزیابی آن‌ها در ساختمان‌های مختلف خاک در شرایط نزدیک اشباع با استفاده از دستگاه نفوذسنج مکشی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در بیاتان از توابع شهرستان بروجرد واقع در دشت سیلاخور بالا در استان لرستان بود. علت انتخاب این منطقه، وجود سه نوع ساختمان متفاوت و قابل تفکیک در اعماق مختلف و با اقلیم و مواد مادری و بافت مشابه بود. بنابراین خصوصیات هیدرولیکی در ساختمان‌های مختلف و در شرایط مشابه

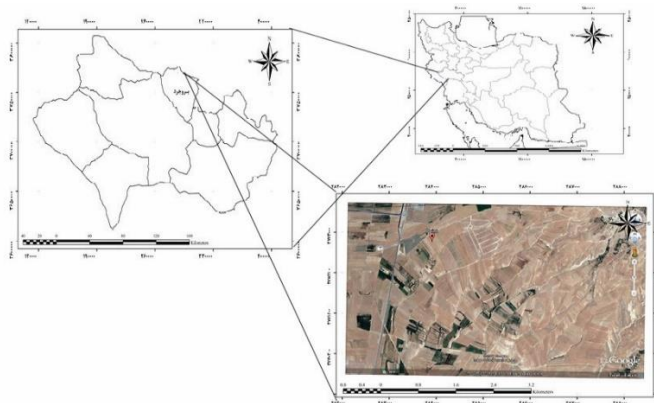


Fig. 1- Location of the studied area in Lorestan- Iran
شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی در ایران و در استان لرستان



Fig. 2- Placement of infiltrometer device on the soil column
شکل ۲- نحوه قرار گرفتن دستگاه نفوذسنج مکشی بر روی ستون خاک

(Luxmoore., 1986)، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) و غیراشباع ($K(h)$)، طول ماکروسکوپی موینگی (λ_c)، تعداد منافذ فعال هدایت کننده آب (N)، تخلخل مؤثر و درصد جریان عبوری از منافذ (Ψ) محاسبه شدند.

در زمان انجام آزمایش به منظور برقراری اتصال خوب صفحه نفوذسنج با خاک، پس از برداشت سنگ ریزه‌های سطحی و آماده‌سازی سطح خاک در هر ستون، یک لایه شن ریز مرطوب با ذرات حدود ۱۰۰ میکرومتر به ضخامت ۰/۱ تا ۰/۲۵ میلی‌متر در زیر صفحه نفوذسنج ریخته شد. ذرات شن قبل از این که زیر صفحه نفوذسنج ریخته شوند مرطوب شدند تا از پر شدن منافذ خاک توسط ذرات خشک شن جلوگیری شود. پس از آماده‌سازی، صفحه نفوذسنج روی سطح شن قرار داده شد. ابتدا مکش ۱۴ سانتی‌متر و بعد از آن به ترتیب مکش‌های ده، چهار و یک سانتی‌متر اعمال شدند. روند کاهش مکش برای ممانعت از پدیده پسماند توصیه شده است (Jarvis and Messing, 1995). در هر مکش در سه دقیقه اول هر ۲۰ ثانیه یک قرائت و پس از آن تا هفت دقیقه پس از شروع آزمایش، هر ۳۰ ثانیه سطح آب مخزن یادداشت شد. سپس هر یک

اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی

خصوصیات هیدرولیکی ساختمان‌های مختلف خاک توسط دستگاه نفوذسنج مکشی ساخت ایالات متحده آمریکا (شرکت Soil Measurement Systems) با قطر صفحه ۲۰ سانتی‌متر و در مکش‌های مرز ورودی ۱۴، ده، چهار و یک سانتی‌متر آب انجام شد. قبل از استقرار دستگاه نفوذسنج بر روی خاک، هر کدام از ستون‌های خاک به مدت ۲۴ ساعت در تشت‌های آب قرار گرفتند و به‌طور کامل اشباع شدند. به‌منظور خروج بهتر هوای محبوس و اشباع کامل، فرایند اشباع شدن ستون‌ها به‌صورت تدریجی و از سمت پایین به بالا توسط بار آبی ایجادشده در انتهای ستون‌ها صورت گرفت. از آن‌جا که نفوذسنج در محیط‌های کاملاً اشباع کار نمی‌کند، ستون‌های اشباع‌شده به مدت ۴۸ ساعت بر روی سه‌پایه‌های فلزی قرار گرفتند تا آب اضافی از انتهای آن‌ها زهکشی و خارج شده و رطوبت نزدیک ظرفیت مزرعه حاصل شود. با استفاده از دستگاه نفوذسنج شدت جریان پایدار آب به خاک (شدت نفوذ نهایی) اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از روابط (Wooding, 1968)، (Ankeny et al., 1991)، (Gardner, 1958) و (Watson and)

Ankeny et al (۱۹۹۱) برای از بین بردن خطاهای ناشی از تغییرات مکانی یا متراکم شدن خاک روشی را ارائه دادند که در آن آزمایش نفوذ توسط یک دیسک با قطر ثابت در دو یا چند مکش متوالی صورت می‌گیرد. اگر برای یک دیسک داده‌های نفوذ ماندگار در چند مکش موجود باشد، با جایگزینی معادله Gardner در معادله Wooding می‌توان نوشت (رابطه ۳):

$$q = K_s \exp\left(\frac{-h}{\lambda_c}\right) \left[1 + \frac{4\lambda_c}{\pi r_0}\right] \quad (3)$$

در رابطه (۳) عبارت اول سهم نیروی ثقل و عبارت دوم سهم نیروی موئینه و مشخصه‌های هندسی منبع تغذیه آب در جریان آب به درون خاک را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری شدت جریان پایدار برای n مکش، n معادله به دست می‌دهد که در هر یک از این معادله‌ها K_s و λ_c مجهول است. براساس روابط (Ankeny et al., 1991)، روابط (۴) و (۵) برای محاسبه میزان شدت جریان پایدار در دو مکش متوالی (h_1 و h_2) به دست آمدند.

$$q_1 = K_s \exp\left(\frac{-h_1}{\lambda_c}\right) \left[1 + \frac{4\lambda_c}{\pi r_0}\right] \quad (4)$$

$$q_2 = K_s \exp\left(\frac{-h_2}{\lambda_c}\right) \left[1 + \frac{4\lambda_c}{\pi r_0}\right] \quad (5)$$

اگر $n=2$ باشد، مقدار λ_c از تقسیم دو معادله برای دو مکش مختلف به دست می‌آید که نتیجه آن به صورت رابطه (۶) است:

$$\lambda_c = \frac{|h_2 - h_1|}{\ln q_2 / q_1} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، q_1 و q_2 شدت‌های جریان ماندگار نظیر مکش‌های ماتریک h_1 و h_2 هستند. مقدار K_s از جای گذاری λ_c در رابطه (۳) به دست می‌آید. اگر اندازه‌گیری در سه مکش یا بیش‌تر انجام گیرد مقدار K_s و λ_c از یک روش برازش غیرخطی (پهنه‌سازی) برای رابطه (۳) به دست می‌آیند. با توجه به این که داده‌های شدت نفوذ ماندگار برای چهار مکش موجود بود، برای مقادیر K_s و λ_c از برازش بهترین خط برای رابطه (۳) توسط نرم‌افزار Excel Solver و حداقل کردن میانگین مربعات خطا بین مقادیر q اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده به دست آمد (رابطه ۷).

$$SSE = \sum (q_{\text{measured}} - q_{\text{predicted}})^2 \quad (7)$$

در این معادله q_{measured} و $q_{\text{predicted}}$ به ترتیب شدت جریان پایدار اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط رابطه (۳) است. برای تخمین اولیه مقادیر K_s و λ_c ابتدا توسط رابطه (۶) از داده‌های جفت مکش متوالی، مقدار λ_c محاسبه شد و سپس از قراردادن مقدار میانگین λ_c در رابطه (۳) یک تخمین اولیه هم از مقدار K_s به دست آمد.

دقیقه سطح آب مخزن یادداشت شد و تا زمانی برداشت داده‌ها برای هر مکش ادامه یافت که در پنج قرائت متوالی یک دقیقه‌ای، میزان افت سطح آب مخزن یکسان شد. براساس دستورالعمل دستگاه نفوذسنج مکشی، هنگامی که در پنج بازه زمانی یک دقیقه‌ای، میزان نفوذ تجمعی مشابه به دست آید، می‌توان فرض کرد که شدت جریان ماندگار حاصل شده است، هر چند ممکن است مدت زمان لازم برای رسیدن به شدت جریان ماندگار بیش‌تر از این مقدار باشد. مدت زمان لازم برای رسیدن به جریان پایدار در مکش ۱۴ سانتی‌متر در دامنه ۱۵-۱۲ دقیقه و در مکش دو سانتی‌متر در دامنه ۱۸-۲۴ دقیقه و در کاهش مکش مدت زمان لازم برای رسیدن به شدت جریان پایدار کاهش یافت. ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از داده‌های نفوذ جمع‌آوری و توسط رویکرد حل تحلیلی Wooding محاسبه شدند (Wooding, 1968).

رویکرد حل تحلیلی Wooding به منظور اندازه‌گیری شدت جریان پایدار، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع و طول ماکروسکوپی موئینی

معادلات جریان آب در خاک می‌توانند به صورت تحلیلی برای نفوذ حاصل از یک سطح مقطع استوانه‌ای با شعاع r با یک مکش ثابت در سطح خاک حل شوند. جریان آب از نفوذسنج مکشی یک جریان سه‌بعدی است و نتایج آن تابع نیروی ثقل در حرکت رو به پایین، نیروی موئینی در همه جهات و مشخصه‌های هندسی منبع تغذیه آب (دیسک) است. برای زمان‌های طولانی وودینگ نشان داد که معادله جریان در حالت ماندگار به شکل رابطه (۱) است:

$$q = K_h \left[1 + \frac{4\lambda_c}{\pi r_0}\right] \quad (1)$$

که در این رابطه q شدت جریان پایدار در واحد سطح (LT^{-1})، شعاع دیسک نفوذسنج (L) ، هدایت هیدرولیکی (LT^{-1}) نظیر مکش اعمال شده (h) و طول ماکروسکوپی موئینی (L) هستند. طول ماکروسکوپی موئینی پارامتری است که نشان‌دهنده تأثیر نیروی موئینی بر حرکت آب در خاک است (Wooding, 1968). این پارامتر نشان‌دهنده مؤلفه عمودی جریان آب در فرایند نفوذ آب به خاک است و تأثیر موئینی را در کشش آب در خلاف جهت ثقل نشان می‌دهد. به عبارتی تمایل خاک را برای انتقال آب در خلاف جهت جریان ترجیحی و نیروی ثقل نشان می‌دهد. Wooding فرض کرد خاک یکنواخت، همگن و تورم‌ناپذیر است و هدایت هیدرولیکی آن از معادله (Gardner, 1958) به شکل رابطه (۲) پیروی می‌کند:

$$k(h) = K_s \left(\frac{-h}{\lambda_c}\right) \quad (2)$$

که در این معادله K_h هدایت هیدرولیکی غیراشباع (LT^{-1}) در مکش ماتریک (L) و K_s هدایت هیدرولیکی اشباع (LT^{-1}) خاک است.

درصد جریان آب عبوری از منافذ درشت و متوسط
 سهم نسبی منافذ درشت و متوسط خاک در انتقال جریان (Ψ)، براساس هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در پتانسیل‌های ماتریک صفر، ۴- و ۱۴- با استفاده از رابطه (۱۱) به دست آمد (Cameria et al., 2003; Watson and Luxmoore, 1986)

$$\Psi(\%) = \frac{K_i - K_{i-1}}{K_0} 100 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (11)$$

در این معادله n تعداد اندازه‌گیری‌های پی در پی، i مکش، K_i و K_{i-1} هدایت هیدرولیکی در دو مکش پی در پی و K_0 هدایت هیدرولیکی اشباع است.

در پایان اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی و پس از رسیدن به شدت جریان ماندگار، دستگاه نفوذسنج مکشی از روی خاک برداشته شد. پس از کنار زدن شن از زیر صفحه نفوذسنج در هر ستون دست‌نخورده خاک، نمونه‌های دست‌نخورده برای اندازه‌گیری‌های جرم مخصوص ظاهری و همچنین نمونه دست‌خورده برای اندازه‌گیری برخی خصوصیات شیمیایی با سه تکرار تهیه شدند. برای تعیین جرم مخصوص ظاهری، از هر ستون سه نمونه دست‌نخورده توسط سیلندرهای استیل تهیه و جرم مخصوص ظاهری اندازه‌گیری شد (Barzegar, 2010b). درصد مواد آلی به روش اکسایش با اسید کرومیک و سپس تیتراژ کردن با فروآمونیم سولفات (Sadzawka et al., 2006) pH گل اشباع به وسیله pH متر و هدایت الکتریکی (EC) عصاره گل اشباع توسط دستگاه هدایت‌سنجی (EC سنج) اندازه‌گیری شدند. لازم به ذکر است که در این مطالعه بافت خاک و توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری اندازه‌گیری شدند (Barzegar, 2010a).

نتایج و بحث

جدول (۱) میانگین توزیع اندازه ذرات را در ساختمان‌های مختلف مورد مطالعه نشان می‌دهد. نتایج مقایسه میانگین درصد ذرات شن، سیلت و رس در ساختمان‌های مختلف نشان داد که توزیع اندازه ذرات در ساختمان‌های مختلف متفاوت بود. با وجود تغییرات توزیع اندازه ذرات در سه ساختمان مورد مطالعه، براساس مثلث بافت خاک، بافت خاک در هر سه نوع ساختمان لوم می‌باشند. میانگین pH خاک‌های مورد مطالعه در حدود خنثی و دامنه تغییرات آن بین ۷/۰۹ تا ۷/۵۶ و هدایت الکتریکی آن‌ها بین ۰/۴ تا ۰/۵ اندازه‌گیری شد. در جدول (۱) مقایسه میانگین مقادیر مواد آلی در ساختمان‌های مختلف ارائه شده است. اختلاف معنی‌داری بین مقادیر مواد آلی در ساختمان‌های مختلف وجود داشت. خاک‌های دارای ساختمان دانه-ای (G_1, G_2, G_3)، دارای بیشترین مقدار ماده آلی بودند و دارای اختلاف معنی‌داری (در سطح ۰/۰۱) با مقادیر ماده آلی در خاک‌های با ساختمان مکعبی (B_1, B_2, B_3) و فشرده (M_1, M_2, M_3) بودند. کمترین درصد ماده آلی در خاک‌های با ساختمان فشرده مشاهده شد. خاک‌های با ساختمان دانه‌ای به علت وجود کاه و کلش و بقایای

شعاع میانگین و تعداد منافذ درشت و متوسط (شعاع میانگین منافذ در دو مکش متوالی)

منافذ درشت خاک به عنوان آن دسته از منافذی تعریف می‌شوند که در مکش‌های کوچک‌تر از چهار سانتی‌متر (منافذی با شعاع بزرگ‌تر از ۰/۳۷۵ میلی‌متر) قابل زهکشی خواهند بود. از طرفی منافذ متوسط خاک نیز به آن دسته از منافذی اطلاق می‌شود که در مکش‌های بین چهار و ۱۴ سانتی‌متر (منافذی با شعاع بین ۰/۱۰۷ و ۰/۳۷۵ میلی‌متر) زهکشی می‌شوند. شعاع منافذ با استفاده از معادله مویبگی محاسبه شد (رابطه ۸) (Watson and Luxmoore, 1986).

$$r = \frac{2\sigma \cos \alpha}{\rho g h} \cong \frac{15}{h} \quad (8)$$

در این معادله σ کشش سطحی آب (MT^{-2})، α زاویه تماس بین آب و دیواره منافذ که صفر فرض می‌شود، ρ چگالی آب (ML^{-3})، g شتاب گرانشی (LT^{-2})، h مکش ماتریک اعمال شده (L) در دستگاه نفوذسنج مکشی و r شعاع منافذ (L) است. تعداد منافذ (N) با اندازه r در واحد سطح منطقه نفوذ با استفاده از روش (Watson and Luxmoore, 1986)، یعنی کاربرد کوچکترین شعاع منافذ در هر کلاس و کاربرد معادله مویبگی پواز (Poiseuille's Law) مرتبط با جریان در لوله‌های مویبگی به صورت رابطه (۹) به دست آمد:

$$N = \frac{\mu(K_i - K_{i-1})}{\rho g \pi (r)^4} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

که μ ویسکوزیته آب ($ML^{-1}T^{-1}$)، K_i و K_{i-1} تفاوت هدایت هیدرولیکی در دو مکش متوالی (LT^{-1})، ρ چگالی آب (ML^{-3})، g شتاب گرانش زمین (LT^{-2}) و r شعاع منافذ (L) است.

تخلخل مؤثر

تخلخل مؤثر (نسبت تخلخل مرتبط با محدوده منافذ هدایت-کننده آب به تخلخل کل) برای هر کلاس از اندازه منافذ (θ_c)، به صورت زیر قابل محاسبه است (رابطه ۱۰) (Watson and Luxmoore, 1986):

$$\theta_c = N \pi r^2 \quad (10)$$

θ_c تخلخل مؤثر (L^3L^{-3}) به عنوان بخشی از منافذ درشت خاک که هدایت‌کننده آب هستند، در نظر گرفته می‌شود. در این رابطه، r شعاع منافذ (L) و N تعداد منافذ در هر کلاس و به دست آمده توسط رابطه (۹) است. در رابطه (۱۰) فرض شده است که جریان ورقه‌ای و منافذ درشت کاملاً پر از آب هستند و این منافذ پیوستگی و اعوجاج ندارند، بنابراین N تعداد دقیق منافذ را نشان نمی‌دهد اما می‌توان از آن به عنوان تخمین تقریبی منافذ استفاده کرد.

دیگر (G₂ و G₃) مشاهده شد. با توجه به اختلاف مقادیر جرم مخصوص ظاهری در تکرارهای مختلف خاک G₁ با دو نمونه خاک ساختمان دانه‌ای (G₂ و G₃)، نمونه‌برداری و اندازه‌گیری مجدد انجام شد و این اطمینان حاصل شد که نمونه خاک G₁ از سطح خاک و نزدیک‌ترین قسمت به جاده برداشت شده بود. عبور و مرور تراکتور و ماشین‌آلات کشاورزی منجر به فشردگی خاک، کاهش تخلخل خاک و افزایش جرم مخصوص ظاهری این خاک نسبت به دو ساختمان دانه‌ای دیگر (G₂ و G₃) شد.

توزیع اندازه منافذ، تخلخل مؤثر و درصد جریان عبوری از منافذ فعال هدایت‌کننده آب

نتایج تجزیه آماری خصوصیات هیدرولیکی در ساختمان‌های مختلف در جدول (۲) ارائه شده است. اثر ساختمان بر خصوصیات هیدرولیکی معنی‌دار بود. با توجه به بافت مشابه در تیمارهای مورد مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که ساختمان خاک مستقل از بافت، خصوصیات هیدرولیکی خاک را تحت تأثیر قرار داد. Kelishadi et al. (2014) خصوصیات هیدرولیکی را در کاربری‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که خصوصیات هیدرولیکی از جمله هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع و طول ماکروسکوپی موینگی تحت تأثیر بافت خاک نیستند و در کاربری‌های مختلف و مستقل از بافت خاک تغییرات معنی‌داری دارند. شدت جریان پایدار اندازه‌گیری‌شده در مکش‌های ۱۴، ده، چهار و یک سانتی‌متر با نام‌های به ترتیب Q₁₄، Q₁₀، Q₄ و Q₁، هدایت هیدرولیکی در مکش‌های مذکور به ترتیب با نام‌های K₁₄، K₁₀، K₄ و K₁ و هدایت هیدرولیکی اشباع به صورت K_s نشان داده شده است. میانگین تعداد منافذ محاسبه شده بر واحد سطح (N) با استفاده از رابطه (۹) در دو کلاس اندازه منافذ شامل منافذ متوسط و درشت مربوط به هر تیمار در جدول (۳) آورده شده است.

گیاهی در سطح خاک از مواد آلی بالاتری نسبت به دو خاک دیگر برخوردار بودند. ماده آلی همبستگی مثبتی با ساختمان خاک دارد. رابطه بین ماده آلی و ساختمان خاک دوطرفه است، از یک سو با تشکیل ساختمان خاک، کربن آلی درون خاکدانه‌ها محبوس و به طور فیزیکی از دسترس ریزجانداران و اکسیژن هوا محافظت می‌شود و در نتیجه تجزیه بیولوژیکی و اکسیداسیون کربن آلی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، به واسطه پیوستگی میان کربن آلی و ذرات خاک، پایداری خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد (Bagherifam et al., 2013). Martinez et al. (2008) بیان کردند که بقایای گیاهی، ماده آلی را به‌ویژه در سطح خاک افزایش می‌دهند که می‌تواند منجر به لایه‌ای از خاک با پایداری خاکدانه بهتر و بیشتر شود. اختلاف میانگین مقادیر جرم مخصوص ظاهری بین تیمارهای با ساختمان‌های دانه‌ای (G₂ و G₃) با خاک با ساختمان دانه‌ای G₁ و ساختمان‌های مکعبی (B₁, B₂, B₃) و فشرده (M₁, M₂, M₃) معنی‌دار بود (جدول ۱). ساختمان خاک به‌طور معنی‌داری بر جرم مخصوص ظاهری تأثیر داشت. بدین صورت که جرم مخصوص ظاهری مربوط به خاک‌های با ساختمان دانه‌ای (G₂ و G₃) کمتر از ساختمان مکعبی (B₁, B₂, B₃) و آن‌ها کمتر از ساختمان فشرده (M₁, M₂, M₃) بود. این نشان می‌دهد که نوع ساختمان خاک بر جرم مخصوص ظاهری تأثیر دارد. خاک‌های G₂ و G₃ کمترین میزان جرم مخصوص ظاهری را داشتند. وجود مواد آلی و در نتیجه فعالیت‌های بیولوژیکی و فرایندهای خاکدانه‌سازی در خاک‌های با ساختمان دانه‌ای و افزایش تعداد منافذ فعال هدایت‌کننده آب از دلایل کاهش جرم مخصوص ظاهری در این ساختمان بود. خاک‌های G₂ و G₃ با بیشترین میزان مواد آلی، کمترین جرم مخصوص ظاهری را داشتند. Ahad et al. (2015) بیان کردند که جرم مخصوص ظاهری وابسته به مقدار مواد آلی خاک، توزیع اندازه ذرات و تخلخل خاک است. اختلاف معنی‌داری بین مقادیر جرم مخصوص ظاهری در خاک G₁ با دو خاک با ساختمان دانه‌ای

جدول ۱- مقایسه میانگین پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در ساختمان‌های مختلف

Table 1- Comparison of the mean of the measured parameters in different structures

Sample	Sand (Percent) (0.05-2 mm)	Silt (Percent) (0.002-0.05 mm)	Clay (Percent) (<0.002)	Bulk density (mg/m ³)	Organic matter (Percent)
G1	40.00a	38.33a	21.66b	1.22b	0.83a
G2	40.63a	38.39a	20.97b	1.12c	0.84a
G3	40.30a	37.87a	21.82b	1.13c	0/80a
B1	39.55a	34.24a	26.20a	1.21b	0.56b
B2	40.32a	33.72a	26.29a	1.33b	0.58b
B3	39.65a	33.75a	26.59a	1.26b	0.63b
M1	40.06a	33.97a	25.96a	1.39a	0.32c
M2	39.73a	33.75a	26.30a	1.44a	0.29c
M3	40.23a	33.77a	25.99a	1.47a	0.26c

In each column, the dissimilar letters indicate significant difference and same letters show non-significant difference between various structures ($p < 0.05$ Duncan). (G, B and M indicate Granular, Blocky and Massive structure respectively, and each subscript number of them represents number of soil sample)

سهم هر کلاس اندازه منافذ از تخلخل کل خاک با محاسبه درصد تخلخل مؤثر با استفاده از رابطه (۱۰) مشخص شد. شکل (۳-الف) درصد تخلخل مؤثر برای هر یک از کلاس منافذ را در هر تیمار نشان می‌دهد. در همه تیمارها اختلاف درصد تخلخل مؤثر بین منافذ درشت و متوسط معنی‌دار بود و بیشترین مقدار مربوط به دسته منافذ متوسط بود. بدین معنی که در همه خاک‌ها منافذ متوسط بخش عمده تخلخل خاک را تشکیل دادند. در هر دو کلاس منافذ، بیشترین درصد تخلخل مؤثر مربوط به خاک‌های با ساختمان دانه‌ای (G_2 و G_3) و کمترین مقدار آن در خاک‌های با ساختمان فشرده مشاهده شد. تعداد بالای منافذ درشت و متوسط در خاک‌های G_2 و G_3 تخلخل مؤثر در این خاک‌ها را افزایش داد. ساختمان خاک دارای تأثیر معنی‌داری بر درصد جریان عبوری از منافذ درشت در خاک بود ولی اختلاف معنی‌داری بین درصد جریان عبوری از منافذ متوسط در ساختمان‌های مختلف وجود نداشت (جدول ۲). ساختمان‌های دانه‌ای G_2 و G_3 و مکعبی (B_1, B_2, B_3) بدون اختلاف معنی‌داری بیشترین درصد جریان عبوری از منافذ درشت را به خود اختصاص دادند. خاک‌های با ساختمان فشرده (M_1, M_2, M_3) با اختلاف معنی‌دار نسبت به دو ساختمان دیگر (به جز G_1) کمترین درصد جریان عبوری از منافذ درشت را داشتند (شکل ۳-ب). خاک G_1 به علت تعداد منافذ و تخلخل مؤثر کمتر، درصد جریان عبوری کمتری نسبت به دو خاک دانه‌ای دیگر داشت. در همه خاک‌ها، بیشترین درصد جریان عبوری از منافذ مربوط به منافذ درشت بود و بیش از ۴۵ درصد جریان عبوری از این منافذ صورت گرفت. منافذ درشت با این که کمترین تعداد منافذ خاک در هر ساختمان خاک بودند (جدول ۳) و درصد بسیار کمی از تخلخل مؤثر خاک را تشکیل دادند (شکل ۳-الف) ولی اصلی‌ترین منافذ در حرکت آب در خاک بوده و بیشترین درصد جریان عبوری به خاک از این منافذ صورت گرفت. Dashtaki et al. (2012) گزارشی کردند که نفوذ آب به خاک به شدت تحت تأثیر منافذ درشت است که فراوانی آن‌ها تحت تأثیر ساختمان خاک است.

در محاسبه تعداد منافذ در هر کلاس کوچکترین شعاع در هر کلاس در دو مکش متوالی استفاده و بنابراین حداکثر تعداد منافذ در هر کلاس محاسبه شد. با توجه به نتایج تجزیه واریانس اثر ساختمان خاک بر هر دو کلاس اندازه منافذ معنی‌دار بود (جدول ۲). در همه تیمارها تعداد منافذ متوسط چندین برابر منافذ درشت بود. بیشترین تعداد منافذ درشت و متوسط در دو خاک G_2 و G_3 و کمترین تعداد این منافذ در خاک‌های با ساختمان فشرده با نام‌های M_1 ، M_2 و M_3 مشاهده شد. بعد از خاک G_2 و G_3 ، خاک‌های با ساختمان مکعبی (B_1, B_2, B_3) از بیشترین تعداد منافذ درشت و متوسط برخوردار بودند. متوسط تعداد منافذ درشت در خاک‌های با ساختمان دانه‌ای (G_2 و G_3) به ترتیب ۳۲ درصد و ۹۳ درصد از متوسط تعداد این منافذ در خاک‌های با ساختمان مکعبی و فشرده بیشتر بود. همچنین اختلاف متوسط تعداد منافذ متوسط بین خاک‌های G_2 و G_3 با خاک‌های با ساختمان مکعبی و خاک‌های با ساختمان فشرده به ترتیب ۳۰ درصد و ۸۹ درصد محاسبه شد. وجود مواد آلی زیاد و جرم مخصوص ظاهری کم (تخلخل زیاد) در خاک‌های با ساختمان دانه‌ای دلالت بر تعداد بالاتر منافذ درشت و متوسط نسبت به دو ساختمان دیگر دارد. Dorner et al. (2010) با مطالعه‌ای بر روی نقش ساختمان خاک بر عملکرد منافذ بیان کردند که خاک‌های بدون ساختمان دارای تعداد و پیوستگی منافذ کمتری نسبت به خاک‌های با ساختمان هستند. خاک‌های با ساختمان فشرده با ضعیف‌ترین ساختمان کمترین تعداد منافذ درشت و متوسط را داشتند. تعداد منافذ درشت و متوسط در خاک G_1 به طور معنی‌داری کمتر از دو خاک G_2 و G_3 بود. در خاک G_1 منافذ درشت و متوسط به ترتیب ۳۵ درصد و ۲۶ درصد نسبت به تعداد این منافذ در خاک‌های G_2 و G_3 کاهش داشتند. به علت نزدیکی موقعیت مکانی خاک G_1 به جاده، همچنین باتوجه به افزایش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری در این خاک نسبت به دو خاک با ساختمان دانه‌ای دیگر (جدول ۳)، احتمال زیاد می‌رود که عبور و مرور ماشین‌آلات کشاورزی و تراکم خاک تعداد منافذ درشت و متوسط را در این خاک نسبت به دو خاک با ساختمان دانه‌ای دیگر (G_2 و G_3) به طور معنی‌داری کاهش داده است.

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر ساختمان بر شدت جریان پایدار، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع در مکش‌های مختلف

Table 2- Statistical analysis of structure effect on Steady- state flow and saturated and unsaturated hydraulic conductivity in different suctions

Source of variation	df	Fvalue								
		Q14	Q10	Q4	Q1	K14	K10	K4	K1	Ks
Soil structure	8	41.61**	373.10**	92.01**	3209.18**	462.43 ^{ns}	137.02**	842.29**	1505.26**	3088.04**
		Ψ_{mezopore}	$\Psi_{\text{macropore}}$	N_{mezopore}	$N_{\text{macropore}}$	θ_{mezopore}	$\theta_{\text{macropore}}$	λ_c		
		1.92 ^{ns}	9.21**	51959**	3231.62**	2347.94**	1394.62**	67.86**		

Letter K and Q show hydraulic conductivity and on Steady- state flow respectively. subscripts display various matrix suctions; letter N" indicates number of pores.

جدول ۳- مقایسه میانگین تعداد منافذ درشت و متوسط در هر مترمربع در ساختمان‌های مختلف
Table 3- Comparison of the mean comparison of macropores and mesopores number per square meter in different structures

Soil's Name	Pore size	
	Mesopore 0.107 < radius(mm) < 0.375	macropore 0.375 (mm) < radius
G ₁	20167b	140c
G ₂	27261a	216a
G ₃	27306a	214a
B ₁	18430c	147b
B ₂	18552c	148b
B ₃	18554c	149b
M ₁	2429d	14d
M ₂	2489d	14d
M ₃	2425d	15d

In each column, the dissimilar letters indicate significant difference and same letters show non-significant difference between various structures ($p < 0.05$ Duncan). (G, B and M indicate Granular, Blocky and Massive structure respectively, and each subscript number of them represents number of soil sample)

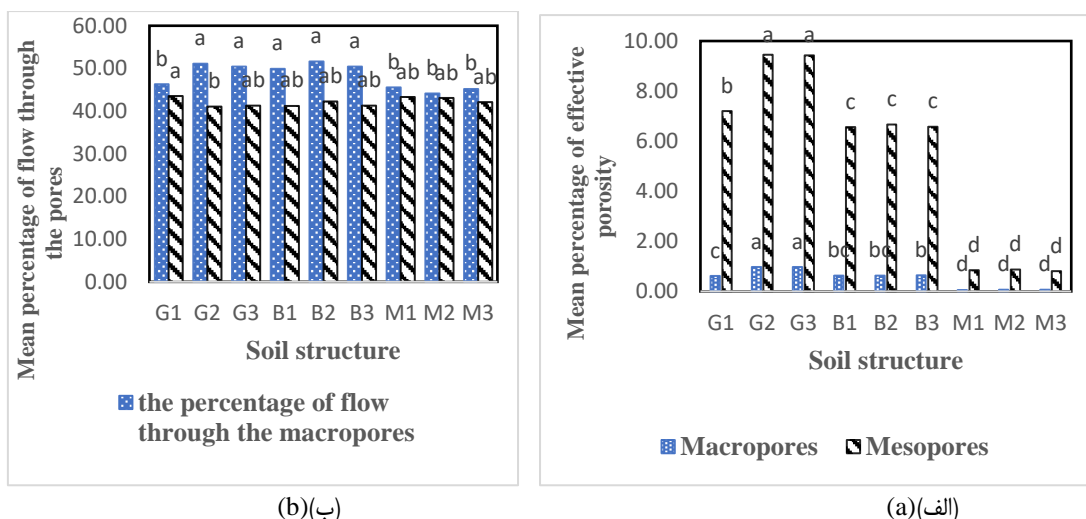


Fig. 3- Mean percentage of effective porosity (a) and mean percentage of flow through each pore class in different soil structures. The dissimilar letters indicate significant difference and same letters show non-significant difference between various structures ($p < 0.05$ Duncan). (G, B and M indicate Granular, Blocky and Massive structure respectively, and each subscript number of them represents number of soil sample)

شکل ۳- میانگین درصد تخلخل مؤثر (الف) و میانگین درصد جریان عبوری (ب) از هر کلاس از منافذ در ساختمان‌های مختلف (حروف غیر مشابه در هر کلاس منافذ نشان‌دهنده معنی‌داری و حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم معنی‌داری در ساختمان‌های مختلف است ($p < 0.05$)). (حروف G, B و M به ترتیب بیان‌کننده ساختمان دانه‌ای، مکعبی و فشرده و اندیس‌ها بیان‌کننده شماره نمونه‌ها هستند).

اختلاف مقادیر شدت جریان پایدار در مکش یک سانتی‌متر نسبت به مکش ۱۴ سانتی‌متر در بین ساختمان‌های مختلف بیشتر بود. به نحوی که اختلاف شدت جریان پایدار بین خاک‌های با ساختمان دانه‌ای (G₂ و G₃) و خاک‌های با ساختمان فشرده در مکش ۱۴ سانتی‌متر به‌طور متوسط ۵۰ درصد و در مکش یک سانتی‌متر ۹۲ درصد محاسبه شد. این تفاوت به اختلاف بین منافذ درشت و غیریکنواختی آن‌ها در مکش‌های نزدیک اشباع در ساختمان‌های مختلف برمی‌گردد. (Kelishadi et al. (2014)

شدت جریان پایدار، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع تأثیر ساختمان بر شدت جریان پایدار در پتانسیل‌های مختلف در شکل (۴-الف) به نمایش در آمده است. در همه ساختمان‌ها شدت جریان پایدار با کاهش مکش (از ۱۴ به یک سانتی‌متر) افزایش یافت. با کاهش مکش به سمت شرایط نزدیک اشباع، منافذ درشت شرکت‌کننده در جریان آب باعث افزایش شدت جریان پایدار آب در خاک شدند.

و هدایت هیدرولیکی اشباع به شدت به وسیله منافذ خاک (هندسه، اندازه و جهت منافذ) کنترل می‌شود. در بحث ساختمان خاک، پیوستگی و توزیع اندازه منافذ خاک، به‌ویژه حجم و پیوستگی منافذ فعال هدایت‌کننده (منافذ درشت و متوسط)، تأثیر عمده‌ای بر هدایت هیدرولیکی خاک دارند. Verwoort و Cattle (2003) بیان کردند که بین پیوستگی منافذ و هدایت هیدرولیکی رابطه معنی‌داری برقرار است که نشان‌دهنده اهمیت ساختمان خاک و پیوستگی منافذ در حرکت آب و انتقال املاح در خاک است. در مکش‌های ماتریک نزدیک صفر عمدتاً جریان آب و املاح در منافذ متوسط و درشت رخ می‌دهد که مسیرهای ترجیحی آب در خاک هستند. خاک‌های با ساختمان دانه‌ای G_2 و G_3 به‌علت وجود منافذ درشت و متوسط زیاد دارای گذرگاه‌های ترجیحی و احتمال وقوع جریان ترجیحی بیشتری نسبت به خاک‌های دیگر بودند. در خاک G_1 اختلاف معنی‌داری بین مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع با دو خاک G_2 و G_3 مشاهده شد. موقعیت خاک G_1 در نزدیک جاده و عبور و مرور تراکتور منجر به افزایش جرم مخصوص ظاهری و کاهش درصد تخلخل شد که کاهش معنی‌دار شدت جریان و به‌دنبال آن کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع نسبت به دو خاک G_2 و G_3 را به دنبال داشت. تغییر مقادیر جرم مخصوص ظاهری، تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع را به دنبال دارد که نشان‌دهنده حساسیت ساختمانی خاک در روش‌های مدیریتی خاک است. Soracco et al. (2015) با بررسی اثر رفت و آمد ماشین‌های کشاورزی بر شکل و توزیع منافذ خاک بیان کردند که تراکم خاک با کاهش تعداد منافذ خاک به‌طور معنی‌داری خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی به‌ویژه هدایت هیدرولیکی را تغییر می‌دهد.

طول ماکروسکوپی موینگی

شکل (۵) روند تغییرات میانگین طول ماکروسکوپی موینگی را در ساختمان‌های مختلف نشان می‌دهد. اختلاف معنی‌داری بین طول ماکروسکوپی موینگی در ساختمان‌های مختلف دیده شد. بیشترین طول ماکروسکوپی موینگی مربوط به خاک‌های با ساختمان فشرده (با کمترین تعداد منافذ و هدایت هیدرولیکی) و کمترین میزان این پارامتر مربوط به خاک‌های با ساختمان دانه‌ای (با بیشترین تعداد منافذ و هدایت هیدرولیکی) بود. به‌طور میانگین طول ماکروسکوپی موینگی در خاک‌های با ساختمان فشرده نسبت به خاک‌های با ساختمان دانه‌ای (G_2 و G_3) و مکعبی به‌ترتیب ۲۰ درصد و ۱۴ درصد بیشتر بود. Dashtaki et al. (2012) بیان کردند که در خاک‌هایی که در یک کلاس بافتی قرار دارند با کاهش جرم مخصوص ظاهری، تخلخل خاک افزایش و طول ماکروسکوپی موینگی کاهش می‌یابد که به دنبال آن افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع را به دنبال دارد.

طول ماکروسکوپی موینگی فاکتوری مؤثر برای پیش‌بینی وقوع جریان ترجیحی است و تمایل خاک را برای انتقال آب در

خصوصیات هیدرولیکی نزدیک اشباع خاک از جمله شدت جریان پایدار را با استفاده از دستگاه نفوذسنج صفحه‌ای در کاربری‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه میزان جریان با کاهش مکش‌های اعمال‌شده به سمت اشباع، افزایش یافت. ایشان علت این افزایش را شرکت منافذ درشت در جریان آب نزدیک اشباع عنوان کردند. بیشترین میزان شدت جریان عبوری از منافذ درشت و متوسط در تیمارهای با ساختمان دانه‌ای (G_2 و G_3) و کمترین میزان پارامتر مذکور در ساختمان‌های فشرده (M_1 , M_2 , M_3) که دارای کمترین تعداد منافذ فعال هدایت‌کننده آب بودند، محاسبه شد. ساختمان‌های فشرده به‌علت یکنواختی و تعداد کم منافذ و تخلخل مؤثر، کمترین اختلاف شدت جریان را در پتانسیل‌های مختلف دارا بودند. شکل (۴-ب) میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع را در ساختمان‌ها و مکش‌های مختلف نشان می‌دهد. اختلاف معنی‌داری بین هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع در ساختمان‌های مختلف مشاهده شد. در همه مکش‌ها خاک‌های G_2 و G_3 دارای بیشترین مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع نسبت به خاک‌های با ساختمان مکعبی (B_1 , B_2 , B_3) و خاک‌های با ساختمان فشرده (M_1 , M_2 , M_3) بودند. وجود مواد آلی زیاد و جرم مخصوص کم در خاک‌های با ساختمان دانه‌ای، تعداد منافذ فعال هدایت‌کننده آب بیشتری به‌دنبال داشت که باعث ایجاد هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع بیشتری در این خاک‌ها شد. در همه تیمارها مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع با کاهش مکش از ۱۴ سانتی‌متر به صفر (اشباع) افزایش یافتند. مطابق شکل (۴-ب) با کاهش مکش اختلاف بین مقادیر هدایت هیدرولیکی در ساختمان‌های مختلف بیشتر شد و این اختلاف در هدایت هیدرولیکی اشباع به بیشترین میزان خود رسید. به‌عبارت دیگر هدایت هیدرولیکی اشباع نسبت به هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مکش‌های دیگر، دارای بیشترین تغییرپذیری بود. میزان اختلاف هدایت هیدرولیکی اشباع بین خاک‌های با ساختمان دانه‌ای (G_2 و G_3) و خاک‌های با ساختمان فشرده به‌طور متوسط ۹۱ درصد محاسبه شد. Moosavi و Sepaskhah (2012) گزارش کردند که ضریب تغییرات بالاتر مربوط به K_s در مقایسه با مقادیر هدایت هیدرولیکی غیراشباع، به اندازه بزرگتر و تعداد و غیریکنواختی منافذ درشت مربوط است. هم‌چنین بیان کردند که ضریب تغییرات کم مربوط به پارامترهای شدت جریان و هدایت هیدرولیکی در پتانسیل‌های ماتریک بالاتر به اندازه کوچک‌تر و یکنواختی اندازه این منافذ است. خاک‌های با ساختمان دانه‌ای (G_3 و G_2) بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع و خاک‌های با ساختمان فشرده (M_1 , M_2 , M_3) کمترین میزان این پارامتر را به خود اختصاص دادند. Erşahin و Karahan (2016) هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را با استفاده از خصوصیات مورفولوژیکی خاک شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که تغییرات اندک در ساختمان خاک به‌طور قابل توجهی بر هدایت هیدرولیکی اشباع تأثیر می‌گذارد

مخصوص ظاهری و طول ماکروسکوپی مویبگی شد که در نتیجه کاهش هدایت هیدرولیکی در این خاکها را در پی داشت. با توجه این مطلب پتانسیل وقوع جریان ترجیحی در خاکهای مورد مطالعه به صورت زیر است:

خاکهای با ساختمان دانه‌ای (G_2 و G_3) بیشتر از خاکهای با ساختمان مکعبی (B_1, B_2, B_3) و آن‌ها بیشتر از خاکهای با ساختمان فشرده (M_1, M_2, M_3) هستند.

میانگین طول ماکروسکوپی مویبگی در خاک G_1 افزایش معنی‌داری نسبت به دو خاک G_2 و G_3 داشت. جرم مخصوص بیشتر به‌عنوان شاخصی از تراکم در خاک G_1 باعث مقدار بیشتر طول ماکروسکوپی مویبگی در این خاک شد. Radcliffe و Simunek (2010) بیان کردند که طول ماکروسکوپی مویبگی همبستگی مثبتی با درجه تراکم خاک دارد. همچنین گزارش کردند که با افزایش طول ماکروسکوپی مویبگی نسبت مشارکت نیروهای مویبگی به نیروهای ثقلی در نفوذ آب به خاک افزایش می‌یابد.

خلاف جهت جریان ترجیحی و نیروی ثقل نشان می‌دهد. هرچه میزان طول ماکروسکوپی مویبگی بیشتر باشد، پتانسیل خاک به ایجاد جریان ترجیحی کمتر است. Dinauer و Klute (1986) بیان کرد طول ماکروسکوپی مویبگی در رس‌های با ساختمان قوی و خاکدانه‌های زیاد که خلل و فرج درشت دارند، کم است. اما در خاکهای رسی بدون ساختمان و خاکدانه این فاکتور مقدار بزرگ‌تری دارد.

هدایت هیدرولیکی اشباع و طول ماکروسکوپی مویبگی تحت‌تأثیر ویژگی‌های ساختمانی خاک از جمله جرم مخصوص ظاهری خاک هستند (Dashtaki et al., 2012). اختلاف تعداد منافذ در ساختمان‌های مختلف باعث تفاوت در جرم مخصوص ظاهری در بین خاکهای مورد مطالعه شد. خاکهای با ساختمان دانه‌ای با کمترین میزان جرم مخصوص ظاهری کمترین مقدار طول ماکروسکوپی مویبگی و به دنبال آن بیشترین میزان هدایت هیدرولیکی را به خود اختصاص دادند. کاهش تعداد منافذ در خاک‌های با ساختمان فشرده (M_1, M_2, M_3) باعث افزایش جرم

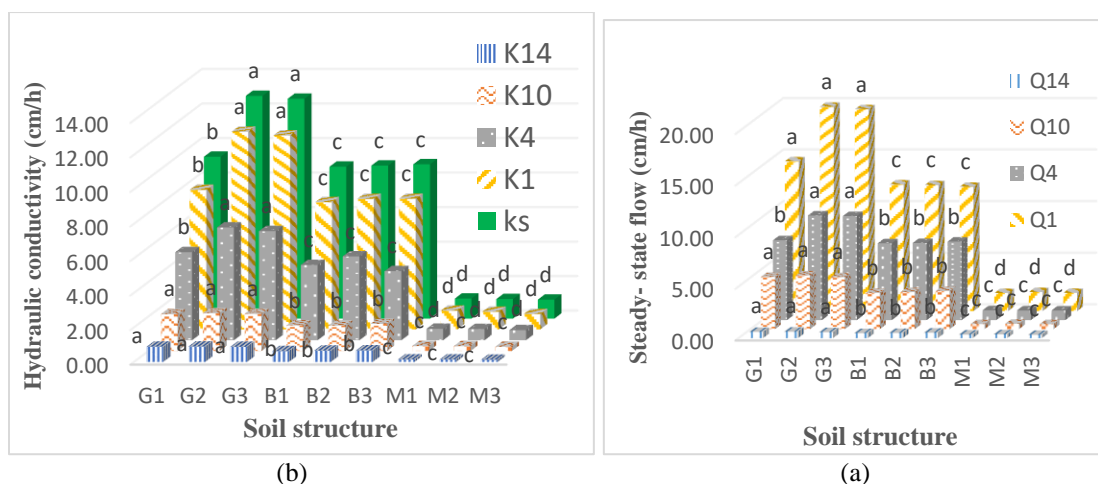


Fig. 4- Mean of steady- state flow (a) and mean of saturated and unsaturated hydraulic conductivity in different suctions and soil structures. The dissimilar letters indicate significant difference and same letters show non-significant difference between various structures ($p < 0.05$ Duncan). (G, B and M indicate Granular, Blocky and Massive structure respectively, and each subscript number of them represents number of soil sample. Letter K and Q show hydraulic conductivity and on Steady- state flow respectively. subscripts display various matric suctions)

شکل ۴- میانگین شدت جریان پایدار (الف) و میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع (ب) در مکش‌ها و ساختمان‌های مختلف حروف غیرمشابه در هر مکش نشان‌دهنده معنی‌داری و حروف مشابه نشان‌دهنده عدم معنی‌داری در ساختمان‌های مختلف است ($p < 0.05$). (حروف G, B, M به ترتیب بیان‌کننده ساختمان دانه‌ای، مکعبی و فشرده و اندیس‌ها بیان‌کننده شماره نمونه‌ها هستند. حرف Q نشان‌دهنده شدت جریان پایدار، و حرف K نشان‌دهنده هدایت هیدرولیکی و اندیس‌ها بیان‌کننده مکش‌های مختلف هستند).

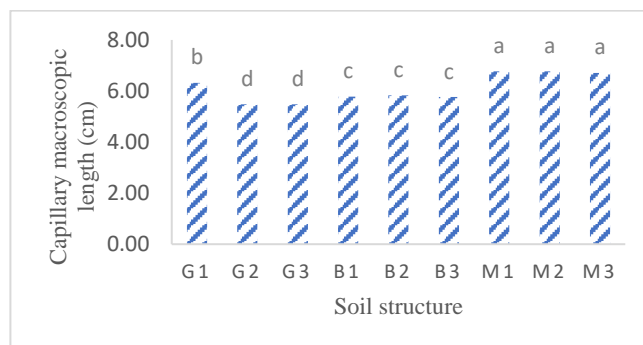


Fig. 5- Mean of capillary macroscopic length in different soil structures. The dissimilar letters indicate significant difference and same letters show non-significant difference between various structures ($p < 0.05$ Duncan). (G, B and M indicate Granular, Blocky and Massive structure respectively, and each subscript number of them represents number of soil sample).

شکل ۵- میانگین تغییرات طول ماکروسکوپی مویبگی در ساختمان‌های مختلف

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده معنی‌داری و حروف مشابه نشان‌دهنده عدم معنی‌داری در ساختمان‌های مختلف است (p < 0.05). (حروف G، B و M به ترتیب بیان‌کننده ساختمان دانه‌ای، مکعبی و فشرده و اندیس‌ها بیان‌کننده شماره نمونه‌ها است).

دانه‌ای با جرم مخصوص ظاهری کمتر) می‌شود. تشکیل منافذ فعال هدایت‌کننده آب بیشتر در این خاک‌ها، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع بیشتری را به دنبال داشت که احتمال وقوع جریان ترجیحی در این ساختمان را نسبت به ساختمان مکعبی و فشرده زیادتیر می‌کند. خصوصیات هیدرولیکی دارای تغییرپذیری زیادی در مکش‌های مختلف بودند که این تغییرپذیری با کاهش پتانسیل ماتریک به سمت اشباع بیشتر شد. به‌علت افزایش منافذ درشت شرکت‌کننده در جریان آب بیشترین میزان اختلاف پارامترهای هیدرولیکی بین ساختمان‌های مختلف در شرایط اشباع مشاهده شد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از کارکنان دانشگاه رامین برای همکاری در انجام برخی آزمایشات در آزمایشگاه خاکشناسی تشکر می‌کنند.

نتیجه‌گیری

ساختمان خاک به‌طور معنی‌داری بر خصوصیات هیدرولیکی تأثیر داشت. در خاک‌های با ساختمان دانه‌ای (با بیشترین میزان ماده آلی) به‌علت دارا بودن بالاترین تعداد منافذ فعال و تخلخل مؤثر نسبت به خاک‌های با ساختمان مکعبی و فشرده، بیشترین میزان مقدار شدت جریان پایدار، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع مشاهده شد. کمترین میزان تعداد منافذ فعال، تخلخل مؤثر، شدت جریان پایدار، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع در خاک‌های با ساختمان فشرده اندازه‌گیری شدند. خاک‌های با ساختمان دانه‌ای با کمترین مقدار طول ماکروسکوپی به‌علت نسبت بیشتر نیروی ثقلی به نیروی مویبگی، از بیشترین پتانسیل وقوع جریان ترجیحی برخوردار بودند.

به‌طور کلی وجود ماده آلی به‌عنوان یکی از عوامل مهم خاک دانه‌سازی باعث به‌وجود آمدن ساختمان خاک قوی‌تری (ساختمان

References

- Ahad, T., Kanth, T.A. and Nabi, S., 2015. Soil bulk density as related to texture, organic matter content and porosity in kandi soils of district Kupwara (Kashmir Valley), India. *Geography*, 4(1), 198-200.
- Ankeny, M.D., Ahmed, M., Kaspar, T.C. and Horton, R., 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 55(2), pp.467-470.
- Bagherifam, S., Karimi, A.R., Lakzian, A. and IZANLOO, E., 2013. Effects of land use management on soil organic carbon, particle size distribution and aggregate stability along hillslope in semi-arid areas of northern Khorasan. *Journal of Water and Soil Conservation*, 20(4), 51- 73. (In Persian).
- Barzegar, A.R., 2010a. *Advanced soil physics*. 2nd Edition. Shahid Chamran University Press. (In Persian)
- Barzegar, A.R., 2010b. *Fundamental of soil physics*. 2nd Edition. Shahid Chamran University Press. (In Persian).

- 6- Bejat, L., Perfect, E., Quisenberry, V.L., Coyne, M.S. and Haszler, G.R., 2000. Solute transport as related to soil structure in unsaturated intact soil blocks. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), pp.818-826.
- 7- Cameira, M.R., Fernando, R.M. and Pereira, L.S., 2003. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam alluvial soil in southern Portugal. *Soil and Tillage Research*, 70(2), pp.131-140.
- 8- Dashtaki, S.G., Baniani, S.D., Khodaverdiloo, H., Mohammadi, J. and Khalilmoghaddam, B., 2012. Estimation of saturated hydraulic conductivity and inverse of macroscopic capillary length using ptfs. *Journal of Water and Soil Science -Isfahan University of Technology*, 16(60), pp.145-157. (In Persian)
- 9- Dorner, J., Sandoval, P. and Dec, D., 2010. The role of soil structure on the pore functionality of an Ultisol. *Journal of soil Science and Plant Nutrition*, 10(4), pp.495-508.
- 10- Gardner, W.R., 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85(4), pp.228-232.
- 11- Jarvis, N.J. and Messing, I., 1995. Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometers. *Soil Science Society of America Journal*, 59(1), pp.27-34.
- 12- Karahan, G. and Erşahin, S., 2016. Predicting saturated hydraulic conductivity using soil morphological properties. *Eurasian Journal of Soil Science*, 5(1), pp.30-38.
- 13- Kelishadi, H., Mosaddeghi, M.R., Hajabbasi, M.A. and Ayoubi, S., 2014. Near-saturated soil hydraulic properties as influenced by land use management systems in Koohrang region of central Zagros, Iran. *Geoderma*, 213, pp.426-434.
- 14- Klute, A. and Dinauer, R.C., 1986. Physical and mineralogical methods. *Planning*, 8, p.79.
- 15- Kodešová, R., Vignozzi, N., Rohošková, M., Hájková, T., Kočárek, M., Pagliai, M., Kozák, J. and Šimůnek, J., 2009. Impact of varying soil structure on transport processes in different diagnostic horizons of three soil types. *Journal of Contaminant Hydrology*, 104(1-4), pp.107-125.
- 16- Martínez, E., Fuentes, J.P., Silva, P., Valle, S. and Acevedo, E., 2008. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a mediterranean environment of Chile. *Soil and Tillage Research*, 99(2), pp.232-244.
- 17- Mohawesh, O., Janssen, M., Maaitah, O. and Lennartz, B., 2017. Assessment the effect of homogenized soil on soil hydraulic properties and soil water transport. *Eurasian Soil Science*, 50(9), pp.1077-1085.
- 18- Moosavi, A.A. and Sepaskhah, A.R., 2012. Spatial variability of physico-chemical properties and hydraulic characteristics of a gravelly calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(6), pp.631-656.
- 19- Moret, D. and Arrúe, J.L., 2007. Characterizing soil water-conducting macro and mesoporosity as influenced by tillage using tension infiltrometry all rights reserved. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), pp.500-506.
- 20- Pachepsky, Y., Gimenez, D., Lilly, A. and Nemes, A., 2008. Promises of hydropedology. *Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 3(040), pp.1-19.
- 21- Radcliffe, D.E. and Simunek, J., 2010. *Soil physics with HYDRUS: Modeling and Applications*. CRC press.
- 22- Rauf, M., Sadraddini, S. A. A., Na Zenu, A.H. and Maroofi, S. 2011. Effect of land slope on infiltration and some physical properties of soil. *Water and Soil Science*. 1, 57-68. (In Persian)

- 23-Rezaei, M., Seuntjens, P., Shahidi, R., Joris, I., Boëne, W., Al-Barri, B. and Cornelis, W., 2016. The relevance of in-situ and laboratory characterization of sandy soil hydraulic properties for soil water simulations. *Journal of Hydrology*, 534, pp.251-265.
- 24-Sadzawka, A., Carrasco, M., Grez, R., Mora, M., Flores, H. and Neaman, A., 2006. *Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile Revisión*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias-INIA. Santiago-Chile.
- 25-Soracco, C.G., Lozano, L.A., Villarreal, R., Palancar, T.C., Collazo, D.J., Sarli, G.O. and Filgueira, R.R., 2015. Effects of compaction due to machinery traffic on soil pore configuration. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(2), pp.408-415.
- 26-Vervoort, R.W. and Cattle, S.R., 2003. Linking hydraulic conductivity and tortuosity parameters to pore space geometry and pore-size distribution. *Journal of Hydrology*, 272(1-4), pp.36-49.
- 27-Watson, K.W. and Luxmoore, R.J., 1986. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer 1. *Soil Science Society of America Journal*, 50(3), pp.578-582.
- 28-Wooding, R.A., 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research*, 4(6), pp.1259-1273.
- 29-Zhang, Z.B., Zhou, H., Zhao, Q.G., Lin, H. and Peng, X., 2014. Characteristics of cracks in two paddy soils and their impacts on preferential flow. *Geoderma*, 228, pp.114-121.