



Drainage capability of degraded ballast aggregate mixed with discarded granulated rubber particles

M. Koohmishi, A. Azarhoosh*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Bojnord, Bojnord, North Khorasan, Iran.

ABSTRACT: The incorporation of crumb rubber (CR) among ballast aggregate is characterized as an advantageous way to considerably lessen the degradation rate of granular particles. Meanwhile, there is uncertainty about the proper drainage performance of the mixture whenever the ballast aggregate is further degraded. The present study evaluates the drainage capability of degraded ballast aggregate in which disparate percentages and sizes of discarded granulated rubber particles are incorporated. To provide degraded aggregate, the impact loading test under controlled conditions is implemented on fresh railway ballast. Afterward, the large-scale constant head permeability test is carried out on prepared mixtures of degraded aggregate and CR particles. The results confirm that the effect of CR size on the drainage potential of degraded ballast combined with discarded CR particles is more than the influence of CR percentage. Also, the nonlinear trend line observed between the applied hydraulic gradient and the water flow velocity approaches the conventional linear trend line represented by Darcy's law whenever the smaller-sized CR particles are incorporated into the most degraded ballast aggregate. As expected, a higher level of degradation of aggregate decreases the hydraulic conductivity of ballast specimens, meanwhile, the permeability is yet considerably more than the acceptable limit even for specimens subjected to the significant level of degradation combined with the smaller-sized crumb rubber particles.

Review History:

Received: Mar. 13, 2022

Revised: Feb. 26, 2023

Accepted: Mar. 17, 2023

Available Online: Apr. 21, 2023

Keywords:

Railway ballast

Degradation

Impact loading

Granulated rubber

Permeability

1- Introduction

Degradation of railway ballast aggregate is characterized as one of the most crucial deteriorations related to the ballasted railway tracks. Ballast aggregate subjected to the applied repeated loads experiences pulverization of particles in contact with each other as well as splitting of single particles [1, 2]. Meanwhile, the impact loads induced owing to wheel flats, rail corrugations, and transition zones further accelerate the occurrence of degradation phenomenon [3]. The ballast degradation unfavorably influences the performance of this granular course of railway track. As reported by Rohrman et al. [4], the abraded ballast demonstrated lesser particle-particle contact. Likewise, Jia et al. [5] observed weaker interlock between particles for recycled ballast which further exacerbated the settlement of the granular layer. To diminish this distress observed in the track substructure, different procedures have been developed. The utilization of rubberized materials like crumb rubber (CR) and tire-derived aggregate (TDA) is characterized as a conventional method to decelerate the process of degradation of the ballast course.

Drainage capability of the ballast course is characterized as a crucial physical property of utilized granular material. Schmidt et al. [6] utilized the constant head permeability test to figure out the detrimental efficacy of degradation

on permeability. As expected, further increment of the fouling index led to lower values of hydraulic conductivity. Meanwhile, the incorporation of CR particles can decrease the permeability of previous media like ballast material. In this relation, Masad et al. [7] observed that the addition of rubber particles to sand led to lower values of permeability coefficient. Also, Li et al. [8] observed a decrement in the permeability of sand-rubber mixtures by the further increment of rubber particles. In relation to the rubberized ballast, Koohmishi and Azarhoosh [9] assessed the drainage performance of fresh ballast aggregate combined with discarded crumb rubber particles. The results exhibited that the higher percentage of CR along with smaller-sized particles led to the reduction of the permeability of the mixture.

Generally, the results of various investigations corroborate that the CR particles can effectively lessen the level of degradation of ballast aggregate. Also, the mixture of fresh ballast and discarded crumb rubber demonstrates sufficiency in drainage level [9]. However, researches have been primarily limited to fresh ballast aggregate. As expected, the incorporation of fine-grained CR particles between coarse aggregate can adversely influence the permeability of the mixture whenever the granular material is further degraded. Therefore, detailed studies are deemed momentous to analyze

*Corresponding author's email: azarhoosh@ub.ac.ir



the drainage performance of mixture of ballast and discarded rubber particles under degraded conditions which are perused herein. Indeed, the present study discerns the effect of size and percentage of CR particles on the hydraulic conductivity of degraded ballast material combined with crumb rubber particles. Conventionally, the manufactured ballast material derived from the fresh railway ballast is utilized to conduct laboratory testing [3]. Likewise, index tests like LAA are established to generate the degraded particles [10-14]. As new procedure in the present study, the large-scale impact loading test is implemented on fresh ballast aggregate in order to generate degraded material. The testing method can more effectively simulate field loading conditions.

Scope of study

The main objective of the present study is to figure out the hydraulic conductivity of degraded ballast aggregate in which crumb rubber particles have been incorporated among granular particles. Hence, degraded ballast material derived from subjecting fresh aggregate to impact loading are combined with various percentages of CR particles, and then the permeability test is conducted on prepared specimens to analyze the deleterious effect of CR on the drainage potential of the ballast course.

2- Testing procedures

2- 1- Large-scale impact loading test

To produce degraded ballast material, large-scale impact loading test was utilized. The testing apparatus was previously manufactured to simulate the degradation process of ballast aggregate subjected to impact loads as reported in Koohmishi and Palassi [15]. A cylindrical mold with a diameter of 240 mm is used to accommodate the ballast material. The hammer with the weight of 50 kg is employed to apply impact load on the tested specimen so that the falling height of drop weight is adjusted to 420 mm. The assembly is anchored to the concrete base by provided base plate (characterized as rigid subgrade). Meanwhile, to simulate the flexible subgrade condition, a sand layer of 50 mm thickness is included between the tested specimen and the base plate. 7 loading steps are established to better simulate the degradation process of ballast aggregate in which 40 blows are implemented throughout each loading stage.

2- 2- Large-scale constant head permeability test

In the present study, large-scale constant head permeability test is utilized to assess the competence of hydraulic conductivity of degraded ballast aggregate in which the CR particles are infiltrated. The two main components of the developed apparatus include the main reservoir as well as the water tank. The former is employed to accommodate the 300 mm thickness of large-sized ballast specimen by the provision of the diameter of 450 mm. The latter is used to apply a defined hydraulic head on the provided sample. Wide ranges of hydraulic heads are applied on tested specimens which consequently lead to the establishment of various levels of hydraulic gradient.

3- Results and discussions

3- 1- Experimental results

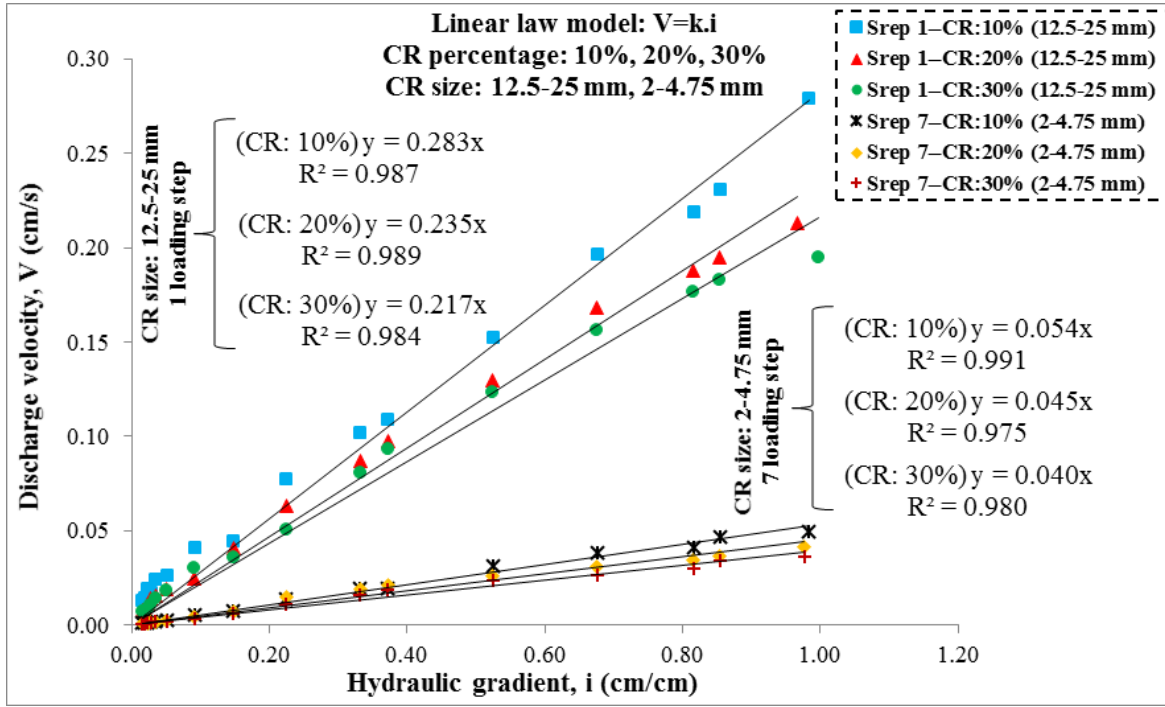
Various conditions were provided to implement large-scale constant head permeability test on degraded ballast aggregate combined with different percentages and sizes of discarded crumb rubber particles. The degraded ballast aggregate manufactured by applying 7 loading steps of drop hammer impact test on prepared samples over two distinct subgrade conditions. Fig. 1 depicts the water flow velocity with applied hydraulic gradient for established linear and power models, respectively. Generally, the variations confirm that the linear relationship described as Darcy's law can effectively consider the water flow regime through provided media. Indeed, the degradation of aggregate along with the incorporation of crumb rubber particles leads to the suitability of the establishment of laminar flow conditions. It is evident that extremely degraded aggregate combined with fine-grained rubber particles (2-4.75 mm) clearly follows laminar flow condition.

Generally, there is a major concern about drainage potential of ballast aggregate combined with CR particles whenever the granular material tolerates further degradation under applied loads. The value of 0.01 cm/s is normally discerned as a tolerable level of permeability of ballast course [16-18]. Fig. 2 illustrates the variation of k (based on Darcy's law) with FI for different characterized conditions to further elaborate the influence of CR size and content on the permeability of degraded ballast material combined with discarded crumb rubber particles. The given figure corroborates that the hydraulic conductivity of material is still more than the acceptable level even under extreme conditions. Meanwhile, the infiltration of external fine materials from surface can accelerate the reduction of permeability of ballast layer and inhibit drainage. Indeed, fines from abrasion of aggregate are larger-sized particles with higher weight so that the permeability of granular media is less drastically influenced. Paiva et al. [13] observed the same results by conducting hydraulic conductivity test on degraded aggregate derived from LAA test.

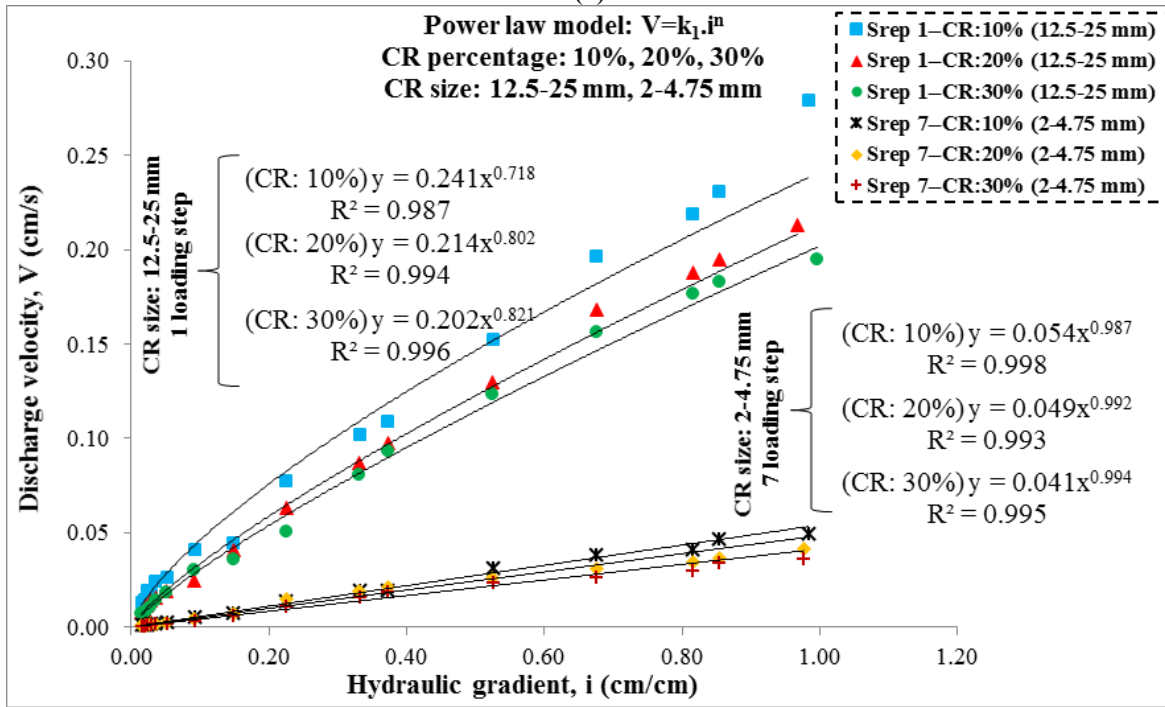
4- Conclusions

Based on the results obtained, the following conclusions are drawn:

- Nonlinear trend line seems to be more appropriate in the case of less degraded ballast. Meanwhile, the establishment of the linear trend line (known as Darcy's law) can effectively consider the water flow through provided granular media whenever the aggregate is further degraded.
- As expected, further degradation of ballast aggregate leads to the measurement of lower values of hydraulic conductivity. Increment in loading steps of impact testing as well as provision of rigid subgrade results in a higher level of degradation.
- Both utilization of smaller-sized and higher content of discarded crumb rubber particles lead to a decrease in permeability. Meanwhile, the size of CR particles is observed as a more influential parameter so the smaller-sized particles



(a)



(b)

Fig. 1. Comparison of two different trend lines applied on variation of water flow velocity with hydraulic gradient, a) Linear relationship (laminar flow regime), b) Power law relationship (non-laminar flow regime)

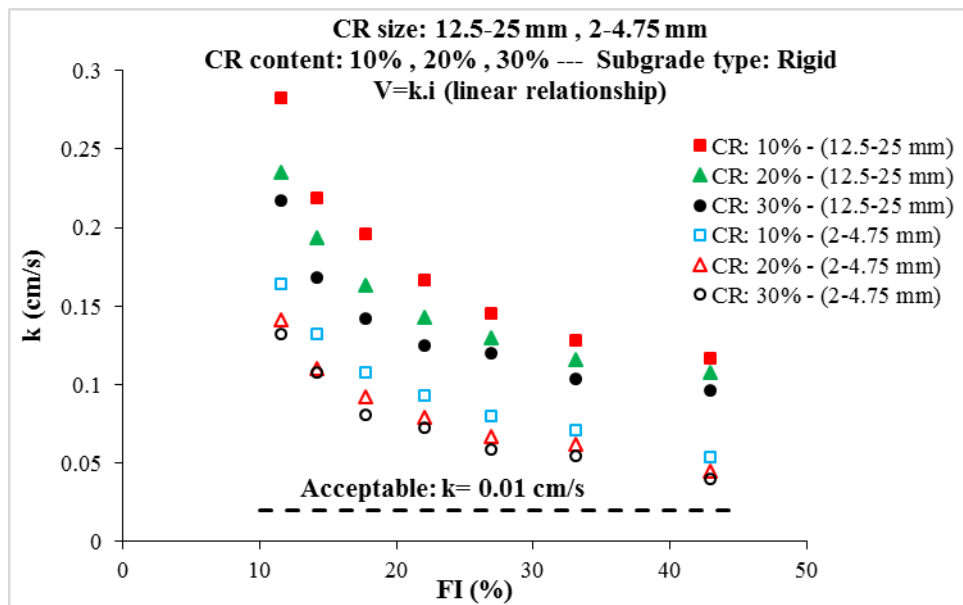


Fig. 2. Effect of fouling ratio on hydraulic conductivity of degraded ballast combined with different percentages and sizes of rubber material

considerably reduce the permeability (by 45%).

- The highly degraded ballast aggregate combined with the smaller-sized CR particles (characterized as the most severe condition) yet demonstrates an acceptable level of hydraulic conductivity.

References

- [1] T.R. Sussmann, M. Ruel, S.M. Chrimer, Source of ballast fouling and influence considerations for condition assessment criteria, *Transportation Research Record*, 2289(1) (2012), 87-94.
- [2] D. Li, J. Hyslip, T. Sussmann, S Chrimer, *Railway geotechnics*, CRC Press, (2015).
- [3] T.N. Ngo, B. Indrarnatna, C. Rujikiatkamjorn, Improved performance of ballasted tracks under impact loading by recycled rubber mats, *Transportation Geotechnics*, 20 (2019) 100239.
- [4] A.K. Rohrman, H.F. Kashani, C.L. Ho, Effects of natural abrasion on railroad ballast strength and deformation properties, *Construction and Building Materials*, 247 (2020) 118315.
- [5] W. Jia, V. Markine, Y. Guo, G. Jing, Experimental and numerical investigations on the shear behaviour of recycled railway ballast, *Construction and Building Materials*, 217 (2019) 310-320.
- [6] S. Schmidt, S. Shah, M. Moaveni, B.J. Landry, E. Tutumluer, C. Basye, D. Li, Railway ballast permeability and cleaning considerations, *Transportation Research Record*, 2607(1) (2017) 24-32.
- [7] E. Masad, R. Taha, C. Ho, T. Papagiannakis, Engineering properties of tire/soil mixtures as a lightweight fill material, *Geotechnical testing journal*, 19(3) (1996) 297-304.
- [8] B. Li, M. Huang, X. Zeng, Dynamic behavior and liquefaction analysis of recycled-rubber sand mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(11) (2016) 04016122.
- [9] M. Koohmishi, A. Azarhoosh, Hydraulic conductivity of fresh railway ballast mixed with crumb rubber considering size and percentage of crumb rubber as well as aggregate gradation, *Construction and Building Materials*, 241 (2020) 118133.
- [10] Y. Qian, E. Tutumluer, Y.M. Hashash, J. Ghaboussi, Effects of ballast degradation on permanent deformation behavior from large-scale triaxial tests, In *ASME/IEEE Joint Rail Conference*, 45356 (2014) V001T01A022. American Society of Mechanical Engineers.
- [11] Y. Qian, E. Tutumluer, D. Mishra, H. Kazmee, Behavior of geogrid reinforced ballast at different levels of degradation, In the 2014 GeoShanghai International Congress: Ground Improvement and Geosynthetics, (2014) 333-342, Shanghai.
- [12] Y. Qian, H. Boler, M. Moaveni, E. Tutumluer, Y.M. Hashash, J. Ghaboussi, Degradation-

- related changes in ballast gradation and aggregate particle morphology, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(8) (2017) 04017032.
- [13] Paiva, C.E., Pereira, M.L., and Pimentel, L.L. 2017. Study of railway ballast fouling by abrasion-originated particles. In 14th International Conference of Railway Engineering, Edinburgh, Scotland, U.K.
- [14] Y. Guo, V. Markine, W. Qiang, H. Zhang, G. Jing, Effects of crumb rubber size and percentage on degradation reduction of railway ballast, *Construction and Building Materials*, 212 (2019) 210-224.
- [15] M. Koohmishi, M. Palassi, Effect of particle size distribution and subgrade condition on degradation of railway ballast under impact loads, *Granular matter*, 19(3) (2017) 63.
- [16] E.T. Selig, J.M. Waters, *Track geotechnology and substructure management*, Thomas Telford, (1994) London.
- [17] P. Anbazhagan, B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn, L. Su, Using a seismic survey to measure the shear modulus of clean and fouled ballast, *International Journal of Geomechanics and Geoengineering*, 5(2) (2010) 117-126.
- [18] B. Indraratna, S. Nimbalkar, N.C. Tennakoon, The behavior of ballasted track foundations: Track drainage and geosynthetic reinforcement. *GeoFlorida*, ASCE, USA, (2010) 2378-2387.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Koohmishi, A. Azarhoosh, Drainage capability of degraded ballast aggregate mixed with discarded granulated rubber particles, Amirkabir J. Civil Eng., 55(5) (2023) 219-224.

DOI: [10.22060/ceej.2023.21215.7654](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21215.7654)





بررسی قابلیت زهکشی سنگ دانه های خرد شده بالاست ترکیب شده با خرده لاستیک

مهدی کوه میشی، علیرضا آذر هوش*

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، خراسان شمالی، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۲
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱

کلمات کلیدی:

بلاست راه آهن
خردشده
بار ضربه‌ای
خرده لاستیک
نفوذپذیری

خلاصه: اضافه نمودن خرده لاستیک بین سنگ‌دانه‌های بالاست یک روش مناسب برای کاهش میزان خردشده‌ی سنگ‌دانه‌های بالاست است. با وجود این، عدم قطعیت‌هایی در ارتباط با زهکشی مناسب لایه دانه‌ای بدست آمده به ویژه در صورت وقوع خردشده‌ی قابل ملاحظه، وجود دارد. در این مطالعه، تراوایی مصالح بالاست که دچار خردشده‌ی گردیده‌اند و در آن اندازه‌ها و مقدارهای مختلفی از ذرات خرده لاستیک اضافه شده است، بررسی می‌شود. برای تهیه مصالح خرد شده بالاست، آزمایش بارگذاری ضربه تحت شرایط کنترل شده روی سنگ‌دانه‌های دست نخورده انجام می‌شود. سپس، آزمایش نفوذپذیری با ارتفاع ثابت، روی مخلوط بدست آمده از ترکیب سنگ‌دانه خرد شده بالاست و خرده لاستیک صورت می‌گیرد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که اثر اندازه ذرات خرده لاستیک در مقایسه با مقدار درصد مورد استفاده، روی ضریب هدایت هیدرولیکی مخلوط بدست آمده بیشتر است، به نحوی که تا ۴۵٪ باعث کاهش ضریب هدایت هیدرولیکی می‌شود. همچنین، هنگامی که ذرات ریزتر خرده لاستیک با بالاست دارای خردشده‌ی بالا ترکیب می‌شود، نتایج آزمایش نفوذپذیری روی مخلوط دانه‌ای بدست آمده تایید می‌کند که خط برازش داده شده روی تغییرات گرادیان هیدرولیکی اعمالی با سرعت جریان آب از حالت غیرخطی به سمت حالت خطی رایج میل می‌کند که تحت عنوان قانون داریسی شناخته می‌شود. مطابق انتظار، وقوع درصد بالاتر خردشده‌ی در سنگ‌دانه‌های بالاست باعث آلودگی این مصالح و در نتیجه افت ضریب هدایت هیدرولیکی می‌گردد، با این وجود میزان نفوذپذیری حتی برای نمونه‌های با میزان خردشده‌ی قابل ملاحظه و ترکیب شده با ذرات ریز خرده لاستیک، بالاتر از حداقل مشخص شده است.

۱- مقدمه

قرار دهد. در این ارتباط، روح‌رمان^۱ و همکاران [۴] مشاهده نموده‌اند که در نمونه‌های بالاست خرد شده، تماس دانه با دانه کمتر است. به همین ترتیب، جیا^۲ و همکاران [۵] ملاحظه نموده‌اند که تماس بین دانه‌های بالاست بازیافت شده ضعیف‌تر است که موجب افزایش نشست لایه دانه‌ای می‌گردد. به منظور کاهش این خرابی در سازه خط، روش‌های مختلفی گسترش داده شده‌اند. که می‌توان به اضافه نمودن مصالح لاستیکی نظیر خرده لاستیک^۳ و لاستیک دانه‌ای بدست آمده از تایر^۴ به این محیط دانه‌ای اشاره کرد.

به طور کلی، لاستیک فرسوده بدست آمده در سازه‌های مختلف مربوط به حمل و نقل استفاده می‌شود. مادوسودان^۵ و همکاران [۶] اثر مشخصات فیزیکی و مکانیکی مخلوط تهیه شده از ترکیب ماسه رودخانه‌ای و خرده

خردشده‌ی سنگ‌دانه‌های بالاست به عنوان یکی از خرابی‌های رایج در خطوط بالاستی شناخته می‌شود. لایه بالاست که در معرض بارهای اعمالی قرار می‌گیرد، خردشده‌ی در آن به دو صورت شکستن هر یک از دانه‌ها و ساییش گوشه‌های آنها در تماس با یکدیگر روی می‌دهد [۱ و ۲]. همچنین، سازه خط راه‌آهن اغلب در معرض بارهای ضربه‌ای قرار می‌گیرد که ناشی از نشست نسبی به دلیل تغییر ناگهانی در سختی خط بین قسمت قبل از پل و محل پل است، و یا خوردگی ریل و صاف شدن چرخ سبب اندرکنش بین ریل و چرخ و در نتیجه ایجاد بار ضربه‌ای می‌شود. بارهای ضربه‌ای ایجاد شده نیز سبب افزایش میزان خردشده‌ی دانه‌ها می‌گردد [۳]. وقوع خردشده‌ی در بالاست عملکرد این لایه دانه‌ای و در نتیجه کل سازه خط را تحت تاثیر

- 1 Rohrman
- 2 Jia
- 3 Crumb Rubber (CR)
- 4 Tire Derived Aggregate (TDA)
- 5 Madhusudhan

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: azarhoosh@ub.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.



ثابت تایید کردند که افزایش مقدار خرده لاستیک و کاهش اندازه ذرات آن، باعث تقلیل نفوذپذیری مخلوط متراکم شده بالاست-خرده لاستیک می شود.

به طور کلی، نتیجه تحقیقات مختلف تایید می کند که خرده لاستیک می تواند به طور موثری مقدار خردشدگی سنگدانه های بالاست را تحت بارهای اعمالی کاهش دهد. همچنین، میزان تراوایی مخلوط بدست آمده از ترکیب بالاست تمیز و خرده لاستیک جهت زهکشی آب، مناسب است [۱۵]. با این وجود، تحقیق های انجام شده به طور عمده به مصالح تمیز بالاست محدود هستند. مطابق انتظار، اضافه نمودن ذرات ریز خرده لاستیک بین دانه های درشت بالاست می تواند نفوذپذیری این محیط دانه ای را به مقدار قابل توجهی کاهش دهد که این اثر در حالت وقوع خردشدگی بیشتر در سنگدانه ها، قابل ملاحظه تر است. بنابراین، در مطالعه فعلی، اثر اندازه و مقدار خرده لاستیک اضافه شده به بالاست خرد شده، روی ضریب نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی ترکیب بدست آمده بررسی می شود. به طور معمول، در پژوهش های مختلف انجام شده، بالاست خرد شده از مصالح دست نخورده بالاست تهیه می شود تا سپس آزمایش های مورد نظر انجام شوند [۳]. به همین ترتیب، آزمایش هایی که یک شاخص نسبی از مرغوبیت مصالح در برابر سایش و ضربه را بدست می دهند (نظیر آزمایش سایش لوس آنجلس) به کار گرفته می شوند تا مصالحی خردایش یافته مورد نیاز را تولید نمایند [۱۶-۱۹]. در این پژوهش، آزمایش ضربه با وزنه افتان استفاده می گردد تا با اعمال بار ضربه ای روی مصالح دست نخورده بالاست، مصالح خرد شده مورد نیاز جهت اضافه نمودن خرده لاستیک به آن، تهیه گردد.

هدف اصلی از مطالعه فعلی تعیین ضریب هدایت هیدرولیکی ترکیب حاصل از اضافه نمودن خرده لاستیک به سنگدانه های خرد شده بالاست است. بنابراین، بالاست خرد شده که از قرار گرفتن مصالح تمیز در معرض بارگذاری ضربه ای بدست می آیند، با درصد های مختلفی از ذرات خرده لاستیک که دارای محدوده اندازه های مختلف هستند، ترکیب شده و سپس آزمایش نفوذپذیری با ارتفاع ثابت روی نمونه های آماده شده انجام می شود تا اثر اندازه و درصد ذرات ریز خرده لاستیک روی قابلیت زهکشی بالاست بررسی گردد. همچنین، اثر میزان خردشدگی سنگدانه های بالاست روی ضریب نفوذپذیری بدست آمده برای ترکیب های مورد نظر، بررسی می شود.

لاستیک را بررسی نموده اند. صابریان و لی^۱ [۷] عملکرد زیراساس و اساس که متشکل از سنگدانه های بتن ضایعاتی و اندازه های مختلف ذرات خرده لاستیک بودند، بررسی نمودند. برسی^۲ و همکاران [۸] استفاده از مخلوط بتن آسفالتی ترکیب شده با ذرات لاستیک را مورد بررسی قرار دادند. در ارتباط با استفاده از مواد لاستیکی در لایه های سازه خط راه آهن، Guo و همکاران [۱۰] اثر اندازه و درصد خرده لاستیک را روی خردشدگی سنگدانه های بالاست راه آهن با انجام آزمایش سایش لوس آنجلس بررسی کردند. نتایج بدست آمده تایید نمودند که استفاده از ذرات لاستیک دارای اندازه نزدیک به اندازه سنگدانه های بالاست، اثر قابل ملاحظه ای در کاهش میزان خردشدگی مصالح این لایه ندارد. به همین ترتیب، جو^۳ و همکاران [۱۰] عملکرد استاتیکی و دینامیکی بالاست ترکیب شده با خرده لاستیک را بررسی نموده و مشاهدات آزمایشگاهی تایید کردند که لاستیک با اندازه ریز بهترین جایگزین سنگدانه های بالاست است که سبب بهبود عملکرد می شود. فتحعلی و همکاران [۱۱] نیز نتیجه گرفتند که هزینه بسیار کم سنگدانه های بدست آمده از تایلر مستعمل، و کاهش قابل ملاحظه نوسان های ایجاد شده ناشی از عبور قطار باعث می شود تا ترکیب سنگدانه بالاست و TDA به عنوان یک مخلوط مناسب در نظر گرفته شود.

تراوایی بالاست در زهکشی آب های نفوذ کرده به سازه خط به عنوان یک ویژگی فیزیکی مهم مصالح دانه ای این لایه شناخته می شود. اشمیت^۴ و همکاران [۱۲] آزمایش نفوذپذیری با ارتفاع ثابت را انجام دادند تا اثر وقوع خردشدگی در سنگدانه ها روی قابلیت نفوذپذیری آن بررسی شود. مطابق انتظار، افزایش شاخص آلودگی بالاست باعث افت ضریب نفوذپذیری این مصالح دانه ای می شود. در همین ارتباط، افزودن خرده لاستیک می تواند سبب افت نفوذپذیری محیطی متخلخل نظیر مصالح بالاست گردد. مساد^۵ و همکاران [۱۳] مشاهده نموده اند که افزودن ذرات پودر لاستیک به ماسه باعث کاهش مقدار ضریب نفوذپذیری مخلوط بدست آمده از ترکیب ماسه و لاستیک می شود. به همین ترتیب، لی و همکاران [۱۴] نتیجه گرفتند که افزایش مقدار پودر لاستیک باعث افت نفوذپذیری مخلوط ماسه-لاستیک می شود. در ارتباط با بالاست دارای لاستیک، کوه میشی و آذروش [۱۵] ضریب نفوذپذیری سنگدانه بالاست تمیز ترکیب شده با خرده لاستیک را بررسی نموده اند. مشاهدات بدست آمده از آزمایش نفوذپذیری با ارتفاع

- 1 Li
- 2 Bressi
- 3 Guo
- 4 Schmidt
- 5 Masad



شکل ۱. اندازه‌های مختلف ذرات خرد شده لاستیک ترکیب شده با سنگ‌دانه‌های بالاست، (الف) اندازه ذرات: ۲۵-۱۲/۵ میلی‌متر، (ب) اندازه ذرات: ۹/۵-۴/۷۵ میلی‌متر، (ج) اندازه ذرات: ۲-۴/۷۵ میلی‌متر

Fig. 1. Distinct sizes of CR particles mixed with ballast aggregate

۲- مواد و مصالح

۲-۱ سنگ‌دانه‌های بالاست

مصالح تمیز بالاست از نوع بازالت (بدست آمده از معدن باغ‌سالار فریمان واقع در ۷۵ کیلومتری مشهد) استفاده می‌شوند تا با انجام آزمایش ضربه، نمونه‌های خرد شده مورد نیاز از بالاست راه‌آهن تهیه شوند. توده ویژه سنگ‌دانه‌های تمیز برابر با $2/72$ و میزان جذب آب آنها $0/56$ درصد است. همچنین، محدوده اندازه سنگ‌دانه‌های تمیز (قبل از وقوع خردشدگی)، مطابق با دانه‌بندی دانه‌بندی گروه ۳ در نشریه ۳۰۱ یا همان AREMA No. 3 انتخاب شد به نحوی که 60% وزن مصالح در محدوده $50-37/5$ میلی‌متر و 40% وزن مصالح در محدوده $25-37/5$ میلی‌متر می‌باشد [۲۰ و ۲۱].

۲-۲ ذرات خرد شده لاستیک

مصالح لاستیکی مورد استفاده در این مطالعه، از تایر دوچرخه بدست آمده دارای وزن مخصوص در حدود $1/1$ و شکل کاملاً نامنظم می‌باشند. سه اندازه مشخص در نظر گرفته شده از ذرات خرد شده لاستیک شامل اندازه‌های کوچک ($2-4/75$ میلی‌متر)، اندازه متوسط ($4/75-9/5$ میلی‌متر) و اندازه بزرگ ($12/5-25$ میلی‌متر) می‌باشند تا اثر اندازه ذرات بررسی شود. شکل ۱ نمونه‌های متراکم بدست آمده از ترکیب مصالح بالاست با اندازه‌های مختلفی از ذرات خرد شده لاستیک را نمایش می‌دهد.

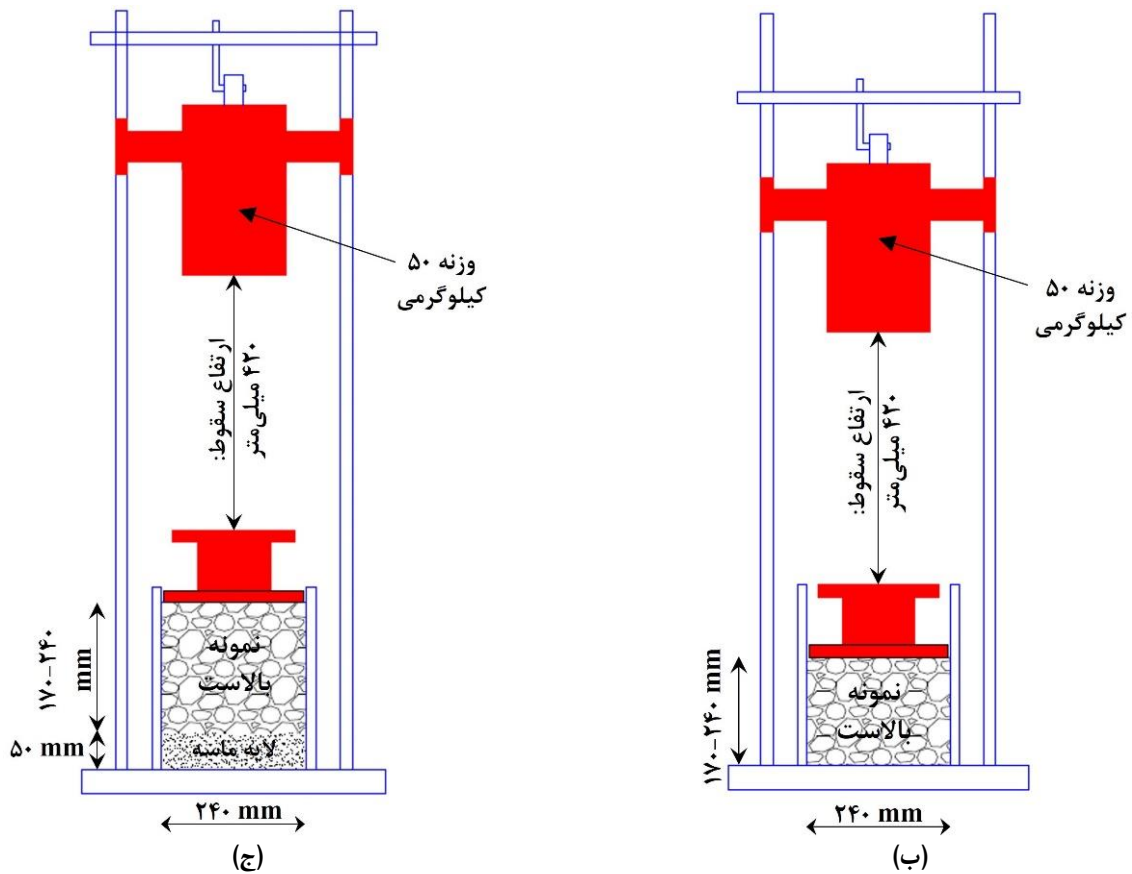
۳- روش انجام آزمایش‌های مورد نظر و شاخص‌های مورد استفاده

۳-۱- آزمایش ضربه با وزنه افتان و با مقیاس بزرگ

در مطالعه فعلی، این آزمایش به منظور تولید مصالح خرد شده بالاست انجام می‌شود. شکل ۲ دستگاه بارگذاری ضربه تحت وزنه افتان را نمایش می‌دهد. این وسیله بر مبنای استاندارد EN 1097-2، و با اعمال تغییراتی جهت شبیه‌سازی وقوع خردشدگی در سنگ‌دانه‌های بالاست راه‌آهن ساخته شده است [۲۲]. بر این اساس نمونه بالاست در داخل قالب استوانه‌ای به قطر 240 میلی‌متر قرار گرفته و بار ضربه‌ای بوسیله یک وزنه 50 کیلوگرمی که از ارتفاع 420 میلی‌متری سقوط می‌کند، به نمونه اعمال می‌شود. مجموعه بوسیله یک صفحه فولادی و بولت به بستر بتنی متصل می‌گردد که این بستر بتنی تحت عنوان بستر صلب شناخته می‌شود. به منظور در نظر گرفتن اثر بستر انعطاف‌پذیر، یک لایه متراکم شده ماسه‌ای با ضخامت 50 میلی‌متر و درصد تراکم 95% بین نمونه و صفحه فولادی قرار داده می‌شود. تعداد ۷ چرخه بارگذاری در نظر گرفته می‌شود که در هر مرحله دفعات تکرار بار ضربه‌ای 40 مرتبه است. روش بارگذاری مرحله‌ای (تا ۷ مرحله) موجب می‌شود که مصالح خرد شده که دانه‌بندی آنها با درصد‌های مختلفی نسبت به دانه‌بندی اولیه بالاست تمیز تغییر نموده است، تولید شود.



(الف)



شکل ۲. دستگاه آزمایش ضربه با وزنه افتان جهت اعمال بار ضربه‌ای به مصالح بالاست، الف) دستگاه آزمایش ضربه، ب) شکل شماتیک از دستگاه آزمایش ضربه: بستر صلب، ج) شکل شماتیک از دستگاه آزمایش ضربه: بستر انعطاف‌پذیر

Fig. 2 Drop-weight impact loading test apparatus for implementing impact loads on ballast material

L : طول نمونه متخلخل در امتداد جریان آب (cm)

i : گرادیان هیدرولیکی

همچنین، Fwa و همکاران [۲۴] فرمول ریاضی بر مبنای قانون توانی (نظیر رابطه زیر) استفاده نموده‌اند تا نفوذپذیری مصالح دانه‌ای با توجه به ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان آب تعیین گردد:

$$V = k_1 i^n \quad (2)$$

k_1, n : ضرایب ثابت مدل غیرخطی برازش داده شده

در واقع، قانون توانی به عنوان یک مدل مناسب شناخته می‌شود که رابطه غیرخطی جریان آب از میان مصالح متخلخل (نظیر بالاست راه‌آهن) را مدل می‌کند.

۳-۴- تعیین کمی میزان خردشدگی مصالح بالاست

برای تعیین میزان خردشدگی سنگ‌دانه‌های بالاست تحت بارهای ضربه‌ای، دو شاخص به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

۱. شاخص آلودگی^۱ بالاست (FI): بیان‌گر جمع درصد‌های عبوری از الک ۴/۷۵ میلی‌متر (الک نمره ۴) و الک ۰/۰۷۵ میلی‌متر (الک نمره ۲۰۰) مطابق با دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های بالاست است [۲۵].

۲. شاخص نسبت خردشدگی^۲ (B_g): بر اساس مجموع مقادیر مثبت اختلاف بین درصد وزنی باقی‌مانده روی هر الک مشخص قبل از انجام آزمایش و پس از انجام آن، تعیین می‌گردد [۲۶]:

$$B_g = \sum_{(+)} (W_{ki} - W_{kf}) \quad (3)$$

W_{ki} : درصد وزنی سنگ‌دانه باقی‌مانده روی یک الک مشخص (نظیر k) نسبت به وزن کل مصالح الک شده، قبل از اعمال بارگذاری
 W_{kf} : درصد وزنی سنگ‌دانه باقی‌مانده روی یک الک مشخص (نظیر k) نسبت به وزن کل مصالح الک شده، بعد از اعمال بارگذاری

۳-۲- آزمایش نفوذپذیری با ارتفاع ثابت و با مقیاس بزرگ

لایه بالاست به عنوان یک لایه دانه‌ای شناخته می‌شود که جهت تامین زهکشی کافی در سازه خط راه‌آهن استفاده می‌گردد و به همین جهت، اندازه دانه‌های مورد استفاده در این لایه به نسبت بزرگ انتخاب می‌شود. بنابراین، جهت مدل‌سازی آزمایشگاهی تراوش آب از این محیط متخلخل متشکل از دانه‌های بزرگ، لازم است که دستگاه مورد نظر با ابعاد بزرگ ساخته شود تا اثر شرایط مرزی به حداقل برسد. در مطالعه فعلی، آزمایش نفوذپذیری با ارتفاع ثابت روی ترکیب‌های مختلف تهیه شده انجام می‌شود تا کفایت زهکشی مصالح بالاست خرد شده که در آن ذرات خرده لاستیک اضافه گردیده‌اند، بررسی گردد. شکل ۳ اجزای اصلی تشکیل دهنده دستگاه آزمایش نفوذپذیری مورد استفاده را نشان می‌دهد. اجزای اصلی دستگاه شامل مخزن اصلی و مخزن آب بزرگ می‌باشند. مخزن استوانه‌ای اصلی جهت قرار دادن نمونه‌های بالاست استفاده می‌شود و دارای ضخامت ۳۰۰ میلی‌متر و قطر ۴۵۰ میلی‌متر است. مخزن آب بزرگ‌تر که دارای حجم بسیار بیشتری است، جهت اعمال بار هیدرولیکی به نمونه تهیه شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. با در نظر گرفتن محدوده‌های وسیعی از هد هیدرولیکی با توجه به سطح آب در داخل مخزن استوانه‌ای بزرگ، مقادیر مختلفی از گرادیان هیدرولیکی به نمونه اعمال می‌شود.

۳-۳- مدل‌های خطی و غیرخطی برای مدل‌سازی جریان آب از میان محیط متخلخل

قانون دارسی به عنوان بهترین رابطه جهت در نظر گرفتن ارتباط بین سرعت جریان آب از داخل محیط مورد نظر با گرادیان هیدرولیکی اعمالی شناخته می‌شود که در آن یک رابطه خطی بین این دو متغیر در نظر گرفته می‌شود. در واقع، ارتباط بین سرعت جریان آب و گرادیان هیدرولیکی اعمالی به صورت زیر است [۲۳]:

$$V = k \left(\frac{\Delta H}{L} \right) = ki \quad (1)$$

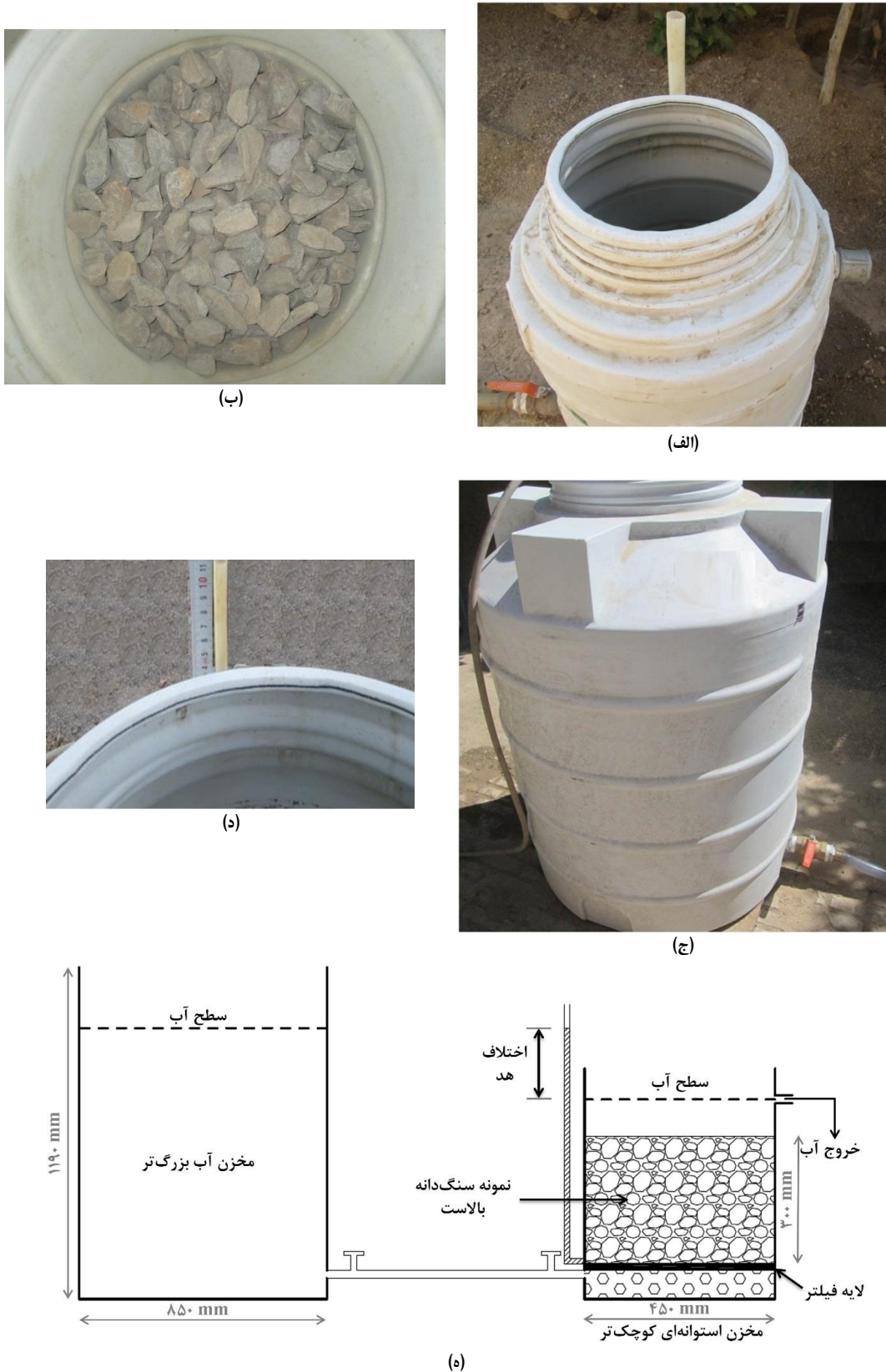
V : سرعت جریان آب از بین نمونه (cm/s)

k : ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی (cm/s)

ΔH : اختلاف هد بین دو نقطه مشخص (cm) - ثابت در طول

آزمایش

1 - Fouling Index
 2 - Breakage Ratio



شکل ۳. دستگاه آزمایش نفوذپذیری با ارتفاع ثابت داری مقیاس بزرگ مورد استفاده جهت تعیین ضریب نفوذپذیری بالاست، الف) مخزن اصلی (مخزن کوچک‌تر)، ب) نمونه بالاست قرار گرفته داخل مخزن کوچک‌تر (نمونه بالاست تمیز - دانه‌بندی مطابق با AREMA No ۳)، ج) مخزن آب بزرگ‌تر برای اعمال بار هیدرولیکی، د) اندازه‌گیری بار هیدرولیکی اعمالی به نمونه، ه) شکل شماتیک از دستگاه آزمایش نفوذپذیری با ارتفاع ثابت.

Fig. 3 Large-scale constant head permeability test setup for measurement of hydraulic conductivity of ballast



شکل ۴. اضافه نمودن درصدهای مختلفی از ذرات خرده لاستیک با اندازه ۲-۴/۷۵ میلی‌متر به بالاست خرد شده در ۳ مرحله بارگذاری ضربه‌ای تحت شرایط بستر صلب (نمونه‌های قرار گرفته در داخل مخزن اصلی دستگاه نفوذپذیری)

Fig. 4 Incorporation of various percentages of discarded crumb rubber particles (2-4.75 mm) into the degraded ballast aggregate (samples inside the main chamber of the permeability apparatus)

۴- نتایج و تحلیل

۴-۱- خلاصه نتایج آزمایش‌های انجام شده

با فراهم نمودن شرایط مختلف، آزمایش نفوذپذیری با ارتفاع ثابت روی نمونه‌های خرد شده بالاست که با خرده لاستیک ترکیب شده‌اند، انجام شد. در واقع، با اعمال ۷ چرخه بارگذاری ضربه‌ای ناشی از سقوط وزنه افتان روی سنگ‌دانه‌ها و آماده نمودن دو نوع شرایط مختلف برای بستر (صلب و انعطاف‌پذیر) در حین اعمال بار، نمونه‌های خردایش یافته از سنگ‌دانه بالاست، تهیه شدند. جدول ۱ مقادیر میانگین بدست آمده برای شاخص‌های خردشده‌گی دانه‌های بالاست خرد شده تحت شرایط مختلف چرخه‌های

۳-۵- تعیین کمی مقدار ذرات خرده لاستیک

با توجه به اختلاف قابل‌ملاحظه بین وزن مخصوص مصالح لاستیکی و دانه‌های بالاست، ذرات خرده لاستیک بر مبنای نسبت حجمی مشخص با سنگ‌دانه‌های بالاست مخلوط می‌شوند. در واقع، ابتدا حجم حفره‌های هوای بین سنگ‌دانه‌های محیط دانه‌ای متراکم شده اندازه گرفته می‌شود، سپس مقدار ذرات لاستیک به صورت درصدی از حجم حفره‌های هوای تعیین شده در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴ ترکیب سنگ‌دانه‌ها خرد شده و خرده لاستیک را برای درصد مشخصی از خردشده‌گی و اندازه معینی از مصالح لاستیکی نشان می‌دهد.

جدول ۱. خلاصه نتایج مربوط به میزان خردشدگی بدست آمده برای سنگ‌دانه‌های بالاست تحت بار ضربه‌ای اعمالی

Table 1. Summary results of degradation level of ballast aggregate subjected to impact loading

شاخص خردشدگی مورد نظر				مرحله بارگذاری
میانگین B_g (%)	میانگین FI (%)	میانگین B_g (%)	میانگین FI (%)	
نوع بستر: انعطاف پذیر		نوع بستر: صلب		
۳۳/۲	۴/۶	۳۹/۹	۱۱/۶	مرحله ۱
۴۲/۳	۶/۱	۴۹/۳	۱۴/۲	مرحله ۲
۴۷/۲	۸/۵	۵۵/۵	۱۷/۷	مرحله ۳
۵۳/۴	۱۰/۳	۶۳/۷	۲۲/۱	مرحله ۴
۵۹/۸	۱۴/۰	۷۰/۹	۲۶/۹	مرحله ۵
۶۶/۰	۱۶/۸	۷۷/۴	۳۳/۱	مرحله ۶
۷۲/۰	۲۳/۶	۸۳/۹	۴۲/۹	مرحله ۷

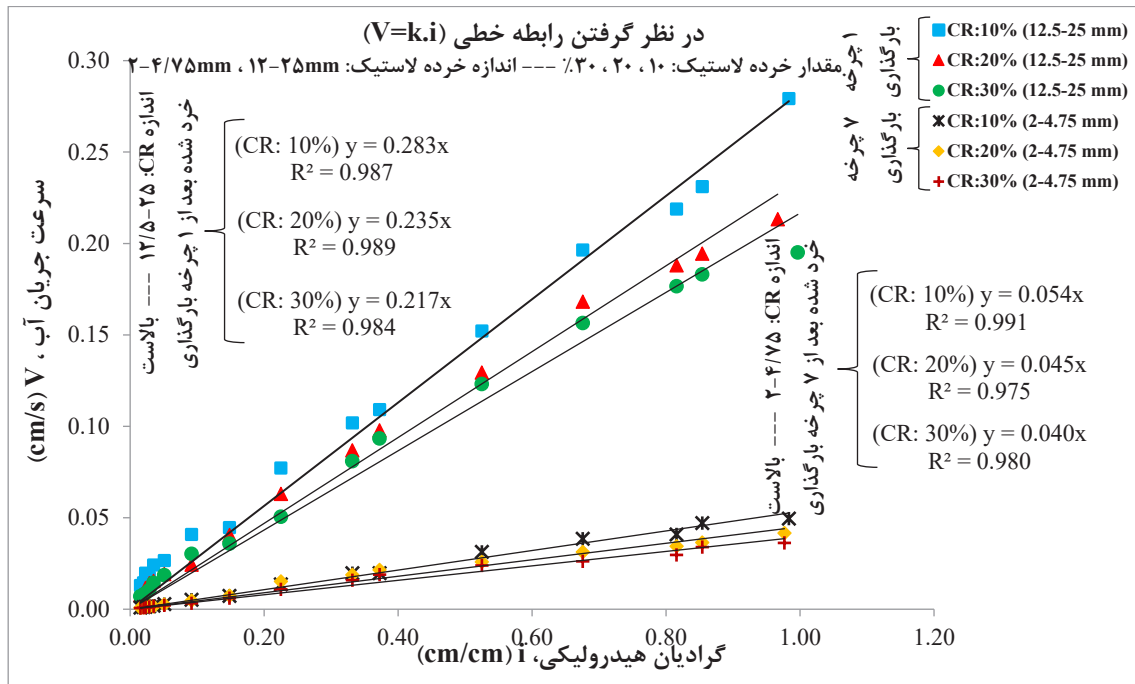
بارگذاری و شرایط خاک بستر کاملاً متفاوت است. در این ارتباط، نیم‌بالکار^۱ و همکاران [۲۸] مشاهده نموده‌اند که میزان وقوع خردشدگی در سنگ‌دانه‌های بالاست تحت بار ضربه‌ای، در حالت قرارگیری روی بستر صلب بسیار بیشتر است. شکل ۶ اثر تعداد چرخه‌های بارگذاری و شرایط خاک بستر را روی مقدار ضریب نفوذپذیری بدست آمده برای نمونه‌های متشکل از بالاست خرد شده و خرده لاستیک نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که افزایش چرخه‌های بارگذاری و استفاده از بستر صلب باعث اعمال بارهای ضربه‌ای بالاتر، افزایش قابل‌ملاحظه خردشدگی مصالح و در نتیجه افت ضریب نفوذپذیری می‌شود. به طور کلی، لایه بدست آمده از تراکم سنگ‌دانه‌های دست نخورده بالاست دارای تراکم کمتری است، و مصالح ریز خرده لاستیک که به آن اضافه شده‌اند، راحت‌تر می‌توانند بین اسکلت دانه‌ها نفوذ کنند که خود موجب کاهش سرعت جریان آب از این محیط متخلخل می‌شود. در این ارتباط، روح‌رمان^۲ و همکاران [۴] مشاهده نمودند که مصالح بالاست خرد شده به مقدار بیشتری جابه‌جا شده و یک مجموعه متراکم‌تری را ایجاد می‌کند که باعث تغییر شکل بیشتر می‌گردد. در میان شرایط مختلف در نظر گرفته شده، بدترین شرایط از نظر قابلیت زهکشی زمانی روی می‌دهد که نمونه بالاست روی ساب‌گرید صلب قرار گرفته و تعداد ۷ چرخه کامل بارگذاری ضربه‌ای به آن اعمال شود.

بارگذاری و دو نوع بستر معین را ارائه می‌دهد. در ادامه، سنگ‌دانه‌های خرد شده تحت شرایط مشخص با درصدها و اندازه‌های مختلف از ذرات خرده لاستیک ترکیب گردید تا آزمایش نفوذپذیری با ارتفاع ثابت انجام شد. شکل ۵، تغییرات سرعت جریان آب از داخل مخلوط متراکم شده با گرادیان هیدرولیکی اعمالی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، مدل‌های خطی و غیرخطی روی داده‌ها بکار گرفته شده‌اند. به طور کلی، تغییرات نشان داده شده تایید می‌کنند که رابطه خطی (همان قانون داری) می‌تواند به طور مناسبی رژیم جریان آب از محیط متخلخل را مدل کند. در واقع، وقوع خردشدگی در سنگ‌دانه‌ها همراه با نفوذ ذرات خرده لاستیک موجب شکل‌گیری شرایط جریان آرام می‌شود. هرچند مطالعات قبلی گزارش داده‌اند که مدل غیرخطی (قانون توانی) برای در نظر گرفتن شرایط جریان آب از مصالح تمیز بالاست مناسب‌تر است [۱۲ و ۲۷]. جدول ۲ به طور خلاصه نتایج بدست آمده از برآزش مدل‌های خطی و غیرخطی روی داده‌های آزمایش نفوذپذیری با ارتفاع ثابت تحت شرایط مختلف در نظر گرفته شده نظیر میزان خردشدگی سنگ‌دانه‌های بالاست، اندازه ذرات لاستیک، و درصد خرده لاستیک را ارائه می‌دهد.

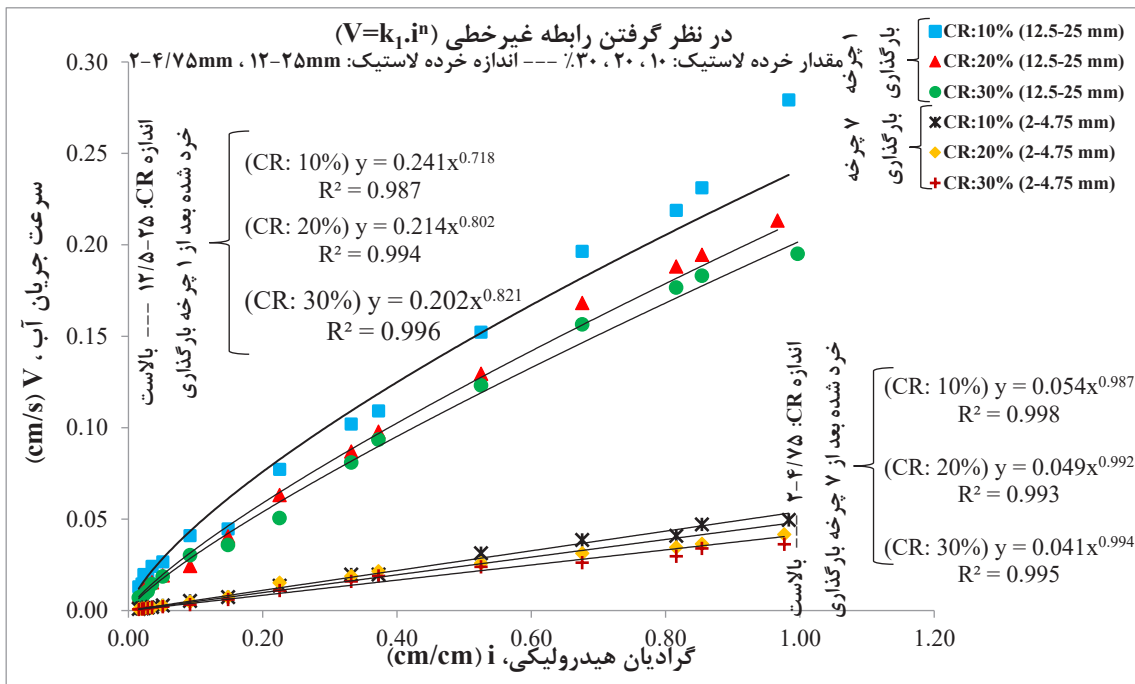
۴-۲- بررسی اثر میزان خردشدگی سنگ‌دانه‌ها روی ضریب هدایت هیدرولیکی ترکیب مصالح بالاست با خرده لاستیک

میزان خردشدگی سنگ‌دانه‌های بالاست به دلیل تغییر در تعداد مراحل

1 Nimbalkar
2 Rohrman



(الف)



(ب)

شکل ۵. مقایسه دو مدل مختلف اعمال شده روی تغییرات سرعت جریان آب با گرادیان هیدرولیکی، (الف) رابطه خطی بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت عبور جریان آب (شرایط جریان ناآرام)، (ب) رابطه غیرخطی بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت عبور جریان آب (شرایط جریان آرام)

Fig. 5. Comparison of two different trend lines applied on variation of water flow velocity with hydraulic gradient

جدول ۲. خلاصه نتایج مربوط به انجام آزمایش نفوذپذیری با ارتفاع ثابت روی سنگ‌دانه‌های خرد شده بالاست ترکیب شده با درصد‌ها و اندازه‌های مختلفی از خرده لاستیک

Table 2. Summary results of conducting large-scale constant head permeability test on degraded ballast aggregate combined with different percentages and sizes of discarded crumb rubber

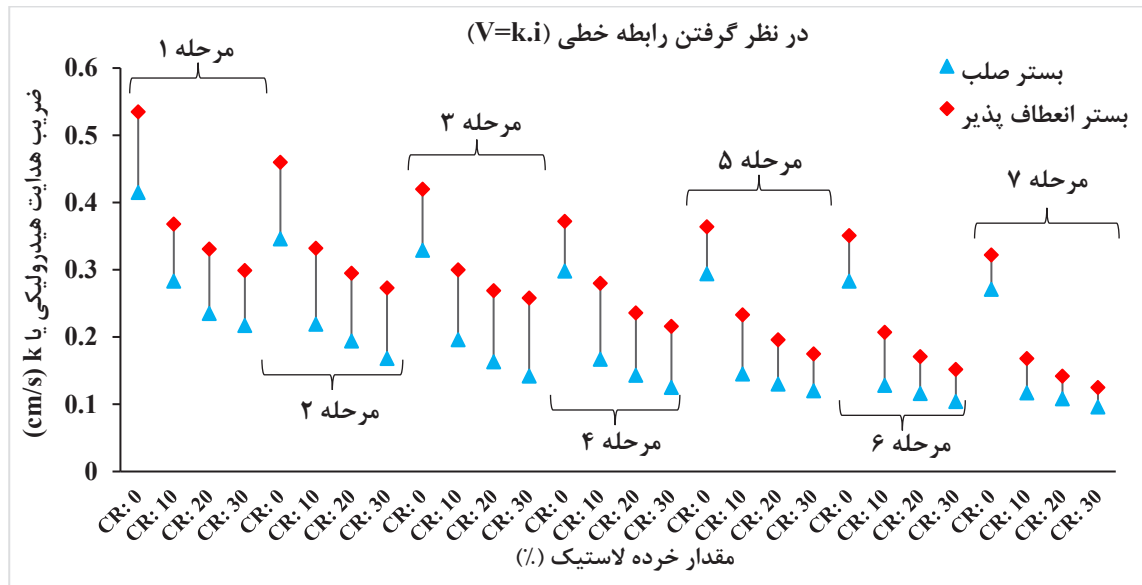
$V=k.I$		$V=k.I.I^n$		$V=k.I$		$V=k.I.I^n$		محدوده اندازه خرده لاستیک (mm)	مرحله بارگذاری
k	n	k_I	k	n	k_I	مقدار خرده لاستیک (%)	مقدار خرده لاستیک (%)		
نوع بستر: انعطاف‌پذیر			نوع بستر: صلب						
۰/۵۳۵	۰/۶۱۳	۰/۴۳۸	۰/۴۱۵	۰/۶۲۷	۰/۳۷۴	فقط بالاست خرد شده			
۰/۳۶۸	۰/۶۴۲	۰/۳۱۰	۰/۲۸۳	۰/۷۱۸	۰/۲۴۱	۱۰	۱۰	۱۲/۵-۲۵	
۰/۳۳۱	۰/۶۵۲	۰/۲۸۴	۰/۲۳۵	۰/۸۰۲	۰/۲۱۴	۲۰	۲۰		
۰/۲۹۹	۰/۶۷۵	۰/۲۶۱	۰/۲۱۷	۰/۸۲۱	۰/۲۰۲	۳۰	۳۰		
۰/۳۱۹	۰/۶۶۳	۰/۲۷۸	۰/۲۲۹	۰/۸۰۶	۰/۲۱۱	۱۰	۱۰	۴/۷۵-۹/۵	مرحله ۱
۰/۲۹۷	۰/۶۸۴	۰/۲۵۵	۰/۲۰۶	۰/۸۲۹	۰/۱۹۱	۲۰	۲۰		
۰/۲۸۳	۰/۷۱۸	۰/۲۴۱	۰/۱۹۴	۰/۸۳۳	۰/۱۸۱	۳۰	۳۰		
۰/۲۴۵	۰/۷۴۸	۰/۲۲۵	۰/۱۶۴	۰/۸۵۰	۰/۱۵۴	۱۰	۱۰	۲-۴/۷۵	
۰/۲۳۷	۰/۸۰۱	۰/۲۱۴	۰/۱۴۱	۰/۹۴۱	۰/۱۳۹	۲۰	۲۰		
۰/۲۱۵	۰/۸۱۱	۰/۲۰۵	۰/۱۳۲	۰/۹۵۲	۰/۱۳۱	۳۰	۳۰		
۰/۴۶۰	۰/۶۲۳	۰/۳۸۷	۰/۳۴۶	۰/۶۴۰	۰/۳۲۸	فقط بالاست خرد شده			
۰/۳۳۲	۰/۶۶۲	۰/۲۸۰	۰/۲۱۹	۰/۸۲۶	۰/۲۰۵	۱۰	۱۰	۱۲/۵-۲۵	
۰/۲۹۵	۰/۶۸۴	۰/۲۵۴	۰/۱۹۴	۰/۸۳۳	۰/۱۸۰	۲۰	۲۰		
۰/۲۷۳	۰/۷۱۱	۰/۲۳۸	۰/۱۶۸	۰/۸۴۶	۰/۱۵۹	۳۰	۳۰		
۰/۲۹۴	۰/۶۸۵	۰/۲۵۲	۰/۱۸۸	۰/۸۴۰	۰/۱۷۶	۱۰	۱۰	۴/۷۵-۹/۵	مرحله ۲
۰/۲۵۵	۰/۷۱۹	۰/۲۳۲	۰/۱۶۸	۰/۸۵۵	۰/۱۵۸	۲۰	۲۰		
۰/۲۳۶	۰/۸۰۰	۰/۲۱۷	۰/۱۵۰	۰/۸۹۸	۰/۱۴۳	۳۰	۳۰		
۰/۲۱۴	۰/۸۱۶	۰/۲۰۵	۰/۱۳۲	۰/۹۵۱	۰/۱۳۱	۱۰	۱۰	۲-۴/۷۵	
۰/۰۴۰	۰/۸۲۹	۰/۱۹۱	۰/۱۱۰	۰/۹۵۹	۰/۱۱۲	۲۰	۲۰		
۰/۱۹۹	۰/۸۳۱	۰/۱۸۱	۰/۱۰۸	۰/۹۶۵	۰/۱۰۶	۳۰	۳۰		
۰/۴۲۰	۰/۶۲۸	۰/۳۵۱	۰/۳۲۹	۰/۶۴۴	۰/۲۹۷	فقط بالاست خرد شده			
۰/۳۰۰	۰/۶۸۰	۰/۲۵۹	۰/۱۹۶	۰/۸۳۶	۰/۱۷۵	۱۰	۱۰	۱۲/۵-۲۵	
۰/۲۶۹	۰/۷۱۰	۰/۲۳۷	۰/۱۶۳	۰/۸۵۸	۰/۱۵۴	۲۰	۲۰		
۰/۲۵۸	۰/۷۲۲	۰/۲۲۹	۰/۱۴۲	۰/۹۴۶	۰/۱۳۷	۳۰	۳۰		
۰/۲۴۲	۰/۷۸۵	۰/۲۲۴	۰/۱۵۴	۰/۸۸۵	۰/۱۴۷	۱۰	۱۰	۴/۷۵-۹/۵	مرحله ۳
۰/۲۱۶	۰/۸۱۳	۰/۲۰۴	۰/۱۳۵	۰/۹۵۲	۰/۱۳۲	۲۰	۲۰		
۰/۲۰۸	۰/۸۲۸	۰/۱۹۳	۰/۱۲۴	۰/۹۵۸	۰/۱۲۲	۳۰	۳۰		
۰/۱۷۸	۰/۸۴۴	۰/۱۷۰	۰/۱۰۸	۰/۹۶۳	۰/۱۰۵	۱۰	۱۰	۲-۴/۷۵	
۰/۱۶۰	۰/۸۶۹	۰/۱۵۲	۰/۰۹۲	۰/۹۷۲	۰/۰۹۴	۲۰	۲۰		
۰/۱۳۸	۰/۹۴۱	۰/۱۳۸	۰/۰۸۱	۰/۹۷۷	۰/۰۸۰	۳۰	۳۰		
۰/۳۷۲	۰/۶۳۷	۰/۳۲۸	۰/۲۹۸	۰/۶۵۵	۰/۲۸۳	فقط بالاست خرد شده			
۰/۲۸۰	۰/۷۰۴	۰/۲۴۱	۰/۱۶۷	۰/۸۵۶	۰/۱۵۶	۱۰	۱۰	۱۲/۵-۲۵	
۰/۲۳۶	۰/۸۰۰	۰/۲۱۶	۰/۱۴۳	۰/۹۴۵	۰/۱۳۹	۲۰	۲۰		
۰/۲۱۶	۰/۸۲۰	۰/۲۰۱	۰/۱۲۵	۰/۹۵۷	۰/۱۲۴	۳۰	۳۰		
۰/۲۱۶	۰/۸۱۰	۰/۲۰۴	۰/۱۳۵	۰/۹۵۲	۰/۱۳۲	۱۰	۱۰	۴/۷۵-۹/۵	مرحله ۴
۰/۲۰۲	۰/۸۳۰	۰/۱۸۹	۰/۱۱۱	۰/۹۶۲	۰/۱۰۹	۲۰	۲۰		
۰/۱۹۱	۰/۸۳۵	۰/۱۷۹	۰/۱۰۲	۰/۹۷۱	۰/۱۰۱	۳۰	۳۰		
۰/۱۶۳	۰/۸۶۸	۰/۱۵۸	۰/۰۹۳	۰/۹۷۱	۰/۰۹۴	۱۰	۱۰	۲-۴/۷۵	
۰/۱۴۴	۰/۹۴۱	۰/۱۳۹	۰/۰۷۹	۰/۹۷۷	۰/۰۸۲	۲۰	۲۰		
۰/۱۳۳	۰/۹۵۱	۰/۱۳۱	۰/۰۷۳	۰/۹۸۱	۰/۰۷۶	۳۰	۳۰		

۰/۳۶۴	۰/۶۵۱	۰/۳۱۸	۰/۲۹۴	۰/۶۶۸	۰/۲۷۰	فقط بالاست خرد شده	
۰/۲۳۳	۰/۸۰۸	۰/۲۱۹	۰/۱۴۵	۰/۹۳۴	۰/۱۳۹	۱۰	
۰/۱۹۶	۰/۸۲۵	۰/۱۸۵	۰/۱۳۰	۰/۹۵۵	۰/۱۲۸	۲۰	۱۲/۵-۲۵
۰/۱۷۵	۰/۸۴۴	۰/۱۶۸	۰/۱۲۰	۰/۹۶۰	۰/۱۱۷	۳۰	
۰/۲۰۸	۰/۸۲۸	۰/۱۹۳	۰/۱۲۲	۰/۹۵۹	۰/۱۲۰	۱۰	
۰/۱۷۱	۰/۸۵۰	۰/۱۶۷	۰/۱۰۶	۰/۹۶۷	۰/۱۰۵	۲۰	۴/۷۵-۹/۵
۰/۱۵۵	۰/۸۸۹	۰/۱۴۹	۰/۰۹۶	۰/۹۷۳	۰/۰۹۵	۳۰	
۰/۱۵۲	۰/۸۹۱	۰/۱۴۸	۰/۰۸۰	۰/۹۷۸	۰/۰۷۹	۱۰	
۰/۱۲۳	۰/۹۵۹	۰/۱۲۱	۰/۰۶۷	۰/۹۸۵	۰/۰۶۸	۲۰	۲-۴/۷۵
۰/۱۰۶	۰/۹۶۴	۰/۱۰۶	۰/۰۵۹	۰/۹۸۷	۰/۰۶۱	۳۰	
۰/۳۵۱	۰/۶۶۰	۰/۳۰۷	۰/۲۸۳	۰/۶۷۹	۰/۲۵۹	فقط بالاست خرد شده	
۰/۲۰۷	۰/۸۳۵	۰/۱۹۸	۰/۱۲۸	۰/۹۵۷	۰/۱۲۴	۱۰	
۰/۱۷۱	۰/۸۵۰	۰/۱۶۷	۰/۱۱۶	۰/۹۶۵	۰/۱۱۲	۲۰	۱۲/۵-۲۵
۰/۱۵۲	۰/۸۹۱	۰/۱۴۷	۰/۱۰۴	۰/۹۶۸	۰/۱۰۴	۳۰	
۰/۱۷۱	۰/۸۵۰	۰/۱۶۷	۰/۱۰۸	۰/۹۶۵	۰/۱۰۶	۱۰	
۰/۱۴۷	۰/۹۰۰	۰/۱۴۳	۰/۰۹۰	۰/۹۷۱	۰/۰۸۹	۲۰	۴/۷۵-۹/۵
۰/۱۳۴	۰/۹۵۱	۰/۱۳۱	۰/۰۸۳	۰/۹۷۷	۰/۰۸۲	۳۰	
۰/۱۲۹	۰/۹۵۴	۰/۱۲۷	۰/۰۷۱	۰/۹۸۳	۰/۰۷۱	۱۰	
۰/۱۱۰	۰/۹۶۲	۰/۱۰۹	۰/۰۶۲	۰/۹۸۷	۰/۰۶۲	۲۰	۲-۴/۷۵
۰/۰۹۷	۰/۹۶۹	۰/۰۹۸	۰/۰۵۵	۰/۹۹۰	۰/۰۵۷	۳۰	
۰/۳۲۲	۰/۶۶۵	۰/۲۹۵	۰/۲۷۱	۰/۶۸۸	۰/۲۵۰	فقط بالاست خرد شده	
۰/۱۶۸	۰/۸۶۱	۰/۱۶۲	۰/۱۱۷	۰/۹۶۳	۰/۱۱۶	۱۰	
۰/۱۴۲	۰/۹۴۱	۰/۱۳۷	۰/۱۰۸	۰/۹۶۶	۰/۱۰۷	۲۰	۱۲/۵-۲۵
۰/۱۲۵	۰/۹۴۸	۰/۱۲۱	۰/۰۹۶	۰/۹۷۱	۰/۰۹۷	۳۰	
۰/۱۴۲	۰/۹۴۱	۰/۱۳۷	۰/۰۹۶	۰/۹۷۳	۰/۰۹۵	۱۰	
۰/۱۱۸	۰/۹۵۹	۰/۱۱۷	۰/۰۸۰	۰/۹۷۸	۰/۰۷۹	۲۰	۴/۷۵-۹/۵
۰/۱۰۴	۰/۹۷۰	۰/۱۰۳	۰/۰۷۰	۰/۹۸۴	۰/۰۷۰	۳۰	
۰/۰۹۸	۰/۹۶۹	۰/۰۹۹	۰/۰۵۴	۰/۹۸۷	۰/۰۵۴	۱۰	
۰/۰۸۵	۰/۹۷۵	۰/۰۸۵	۰/۰۴۵	۰/۹۹۲	۰/۰۴۹	۲۰	۲-۴/۷۵
۰/۰۷۶	۰/۹۸۱	۰/۰۷۵	۰/۰۴۰	۰/۹۹۴	۰/۰۴۱	۳۰	

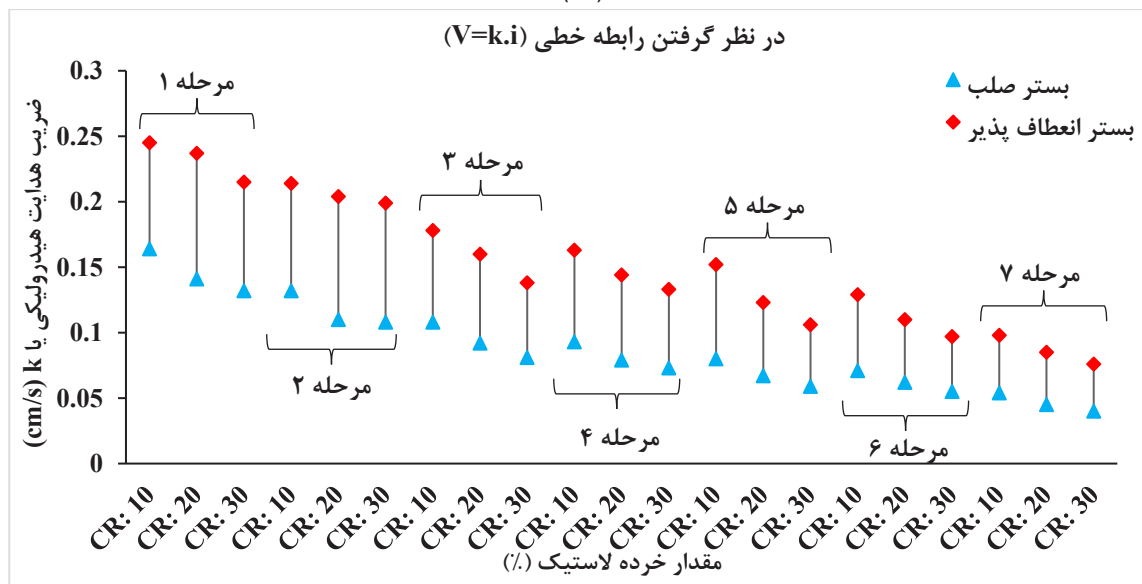
خرده لاستیک اضافه شده را نشان می‌دهد. مطابق انتظار، افزودن درصد بیشتری از خرده لاستیک در بالاست باعث بدست آمدن مقادیر کمتری از ضریب هدایت هیدرولیکی می‌شود. با وجود این، روند ملاحظه شده در این شکل تایید می‌کند که اثر تغییر در اندازه خرده لاستیک روی نفوذپذیری به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از اثر درصد آن است و می‌تواند تا ۴۵٪ منتج به تغییر در ضریب هدایت هیدرولیکی شود. در واقع، لاستیک به عنوان ماده‌ای شناخته‌ای می‌شود که دارای رفتار انعطاف‌پذیر است و در نتیجه ذرات ریزتر خرده لاستیک (محدوده ۴/۷۵-۲ میلی‌متر) به طور آزادانه‌تری می‌توانند بین سنگ‌دانه‌ها نفوذ کنند. در نتیجه، مسیرهای جریان آب از میان

۳-۴ اثر اندازه و درصد خرده لاستیک روی هدایت هیدرولیکی ترکیب بالاست خرد شده و ذرات لاستیک

شکل ۷ به صورت دایره‌ای، درصد تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی مخلوط بالاست خرد شده و خرده لاستیک را نشان می‌دهد که در آن اثر اندازه و درصد خرده لاستیک روی نتایج بدست آمده بررسی شده است. در شکل ۷-الف، هر خط شعاعی مشخص، نشان‌دهنده محدوده اندازه مشخصی از ذرات خرده لاستیک می‌باشد که از اتصال مقادیر k بدست آمده برای ترکیب درصدهای خردشدگی مختلف سنگ‌دانه‌های بالاست و خرده لاستیک بدست آمده است. شکل ۷-ب نیز به صورت مشابه، اثر مقدار



(الف)



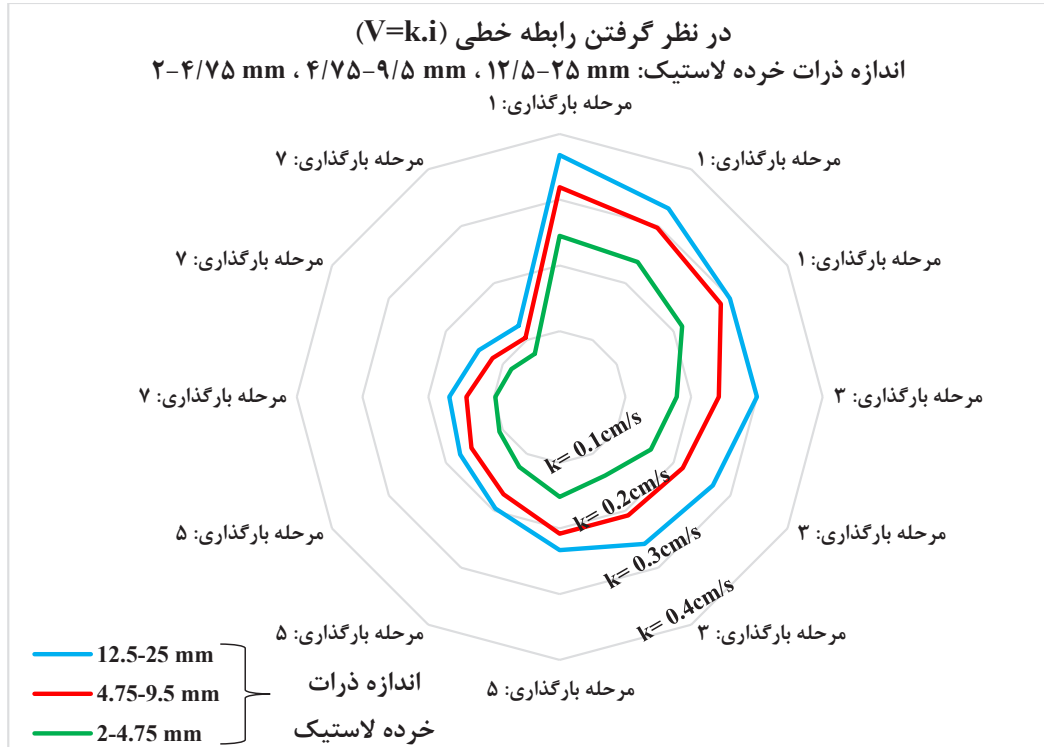
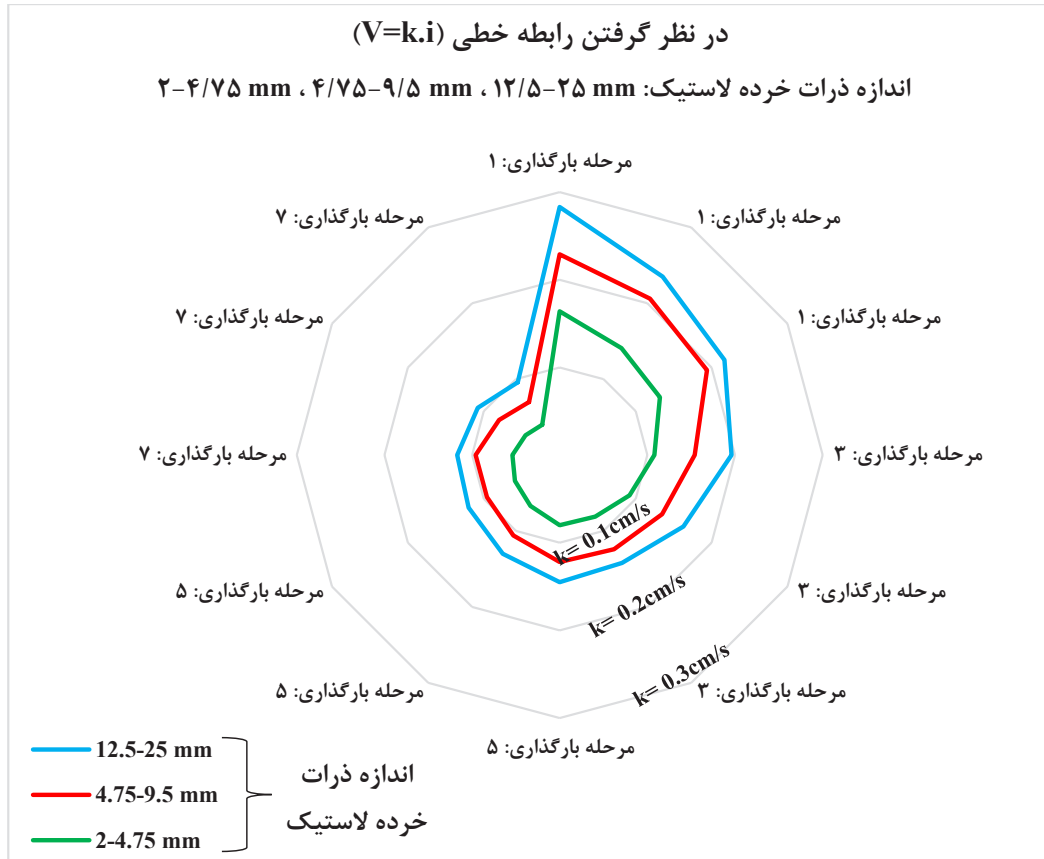
(ب)

شکل ۶. اثر تعداد چرخه‌های بارگذاری و شرایط بستر روی ضریب هدایت هیدرولیکی (بر مبنای مدل خطی)، (الف) اندازه ذرات خرده لاستیک: ۲۵-۳۵ میلی‌متر، (ب) اندازه ذرات خرده لاستیک: ۴/۷۵-۲ میلی‌متر

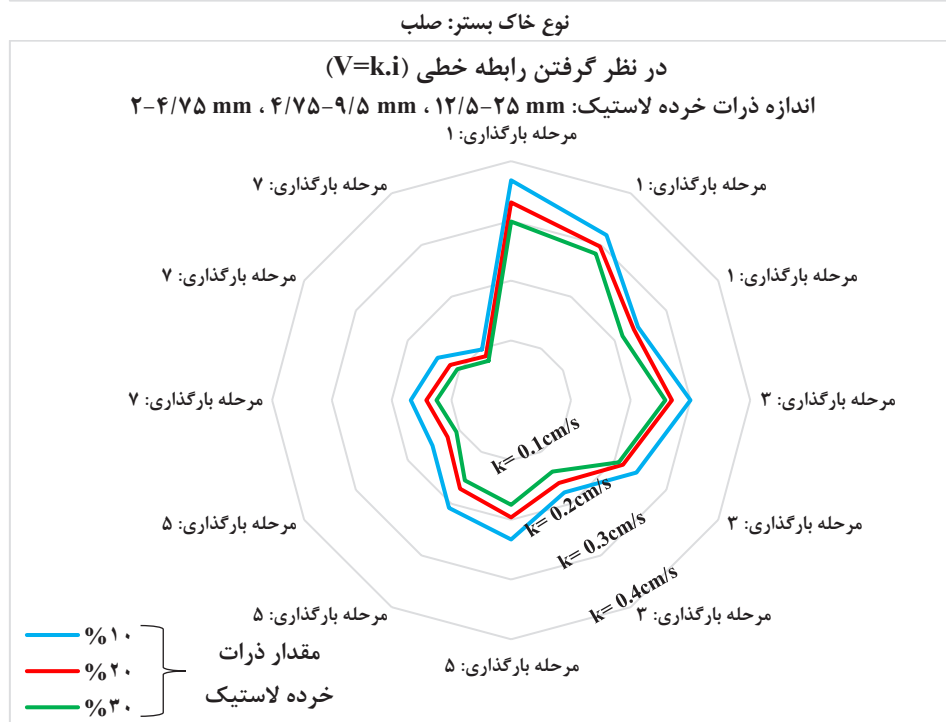
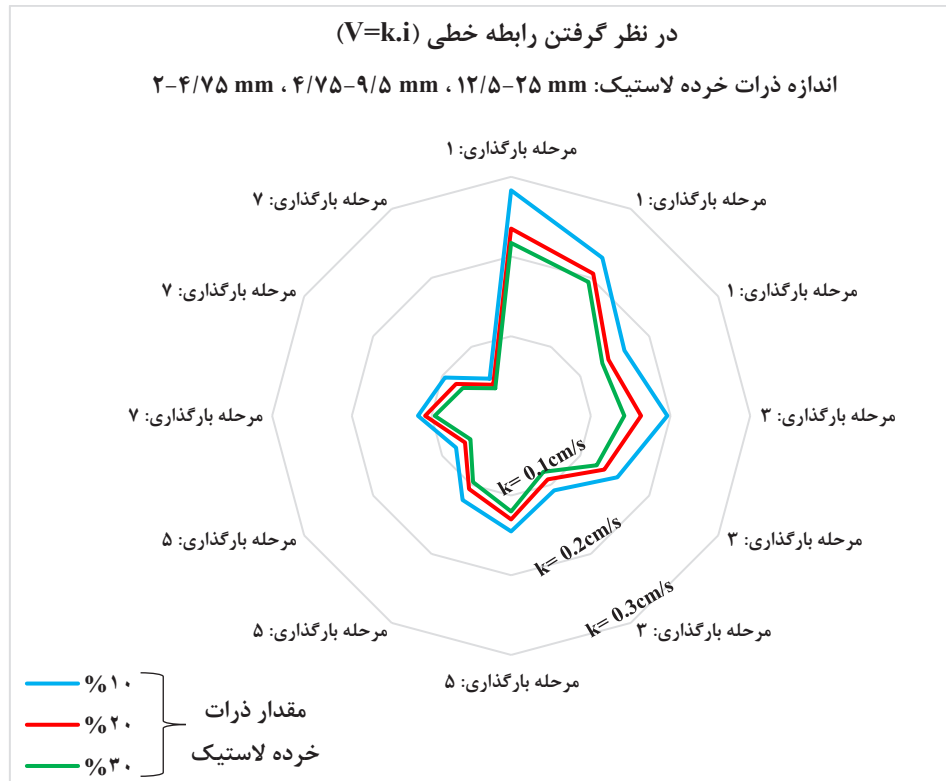
Fig. 6 Effect of loading steps and subgrade conditions on hydraulic conductivity (considering linear relationship)

به مقدار قابل ملاحظه‌تری ضریب نفوذپذیری را تقلیل می‌دهد. پژوهش‌های قبلی که اثر درصد‌های مختلف لاستیک را روی نفوذپذیری مخلوط خاک بررسی نموده‌اند، روند مشابهی را گزارش نموده‌اند [۶ و ۱۴].

محیط متخلخل کاهش یافته و مقاومت در برابر جریان آب افزایش می‌یابد. در این ارتباط، اثر ذرات درشت خرده لاستیک (محدوده اندازه ۲۵-۱۲/۵ میلی‌متر) روی ایجاد مانع در مسیر جریان آب به مراتب کمتر است. به همین جهت، تغییر در اندازه ذرات افزودنی در مقایسه با تغییر در مقدار اضافه شده،



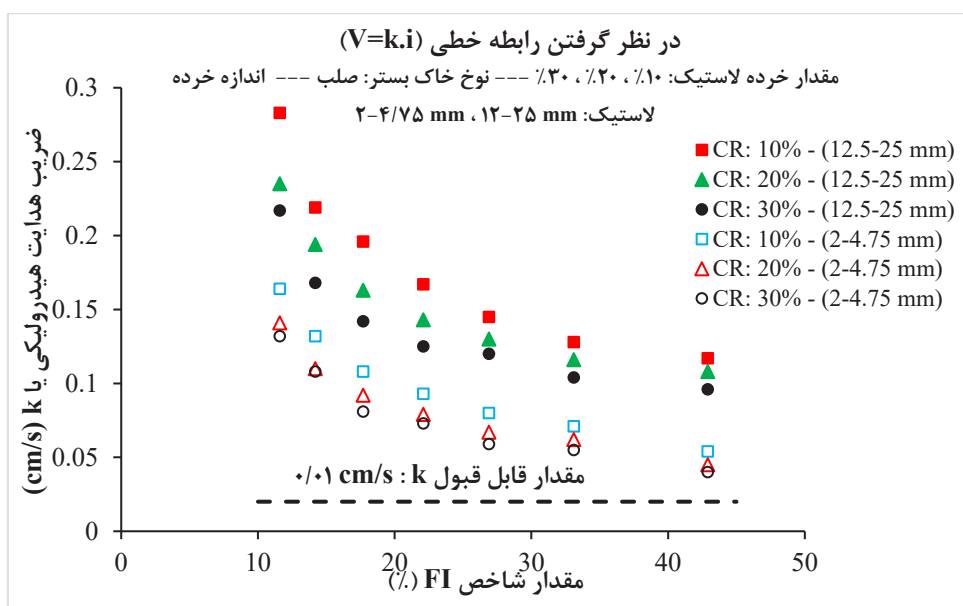
(الف)



نوع خاک بستری: انعطاف پذیر
 (ب)

شکل ۷. اثر اندازه و درصد ذرات لاستیک روی ضریب هدایت هیدرولیکی ترکیب بالاست خرد شده و خرده لاستیک (بر مبنای مدل خطی)، الف) اثر اندازه ذرات خرده لاستیک، ب) اثر مقدار ذرات خرده لاستیک

Fig. 7. Effect of rubber size and rubber content on hydraulic conductivity (considering linear model)



شکل ۸. اثر میزان آلودگی بالاست روی ضریب هدایت هیدرولیکی بالاست خرد شده ترکیب شده با اندازه‌ها و درصد‌های مختلفی از ذرات خرده لاستیک

Fig. 8 Effect of fouling ratio on hydraulic conductivity of degraded ballast combined with different percentages and sizes of rubber material

خرد شده تحت بیشترین تعداد دوران در آزمایش سایش لوس آنجلس، دارای ضریب هدایت هیدرولیکی تا اندازه ۵ برابر بیشتر از بالاست آلوده شده با ۱۰٪ ذرات ریزدانه (لای یا رس) بودند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مناسب بودن زهکشی مصالح بالاست که در آن خردشده روی داده و با درصد‌ها و اندازه‌های مختلفی از خرده لاستیک ترکیب شده‌اند، بررسی گردید. به منظور شبیه‌سازی خردشده سنگ‌دانه‌های بالاست، آزمایش بارگذاری ضربه روی مصالح دانه‌ای دست نخورده انجام شد. بر مبنای مشاهده‌های آزمایشگاهی انجام شده، موارد زیر نتیجه گرفته شدند:

- رابطه غیرخطی در حالت مصالح بالاست با خردشده کمتر، مناسب‌تر است. به همان سان، برای نمونه‌های با درصد خردشده قابل ملاحظه، در نظر گرفتن رابطه خطی (بر مبنای قانون داریسی) می‌تواند به طور مناسبی ارتباط بین گرادبان هیدرولیکی اعمالی و سرعت عبور جریان آب از این محیط دانه‌ای را پوشش دهد.

- مطابق انتظار، وقوع خردشده بیشتر در بالاست باعث افت مقدار

۴-۴- تحلیل و بررسی نتایج

به طور کلی، در ارتباط با توانایی زهکشی سنگ‌دانه‌های بالاست که با خرده لاستیک ترکیب شده‌اند، به ویژه هنگامی که دانه‌ها به مقدار زیادی خرد می‌شوند، نگرانی وجود دارد. مقدار حداقل ضریب نفوذپذیری برای لایه بالاست ۰/۰۱ سانتی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود [۲۵ و ۲۹ و ۳۰]. شکل ۸ تغییرات مقدار k (بر مبنای قانون داریسی) را با میزان خردشده سنگ‌دانه‌ها (بر مبنای FI) برای شرایط مختلف در نظر گرفته شده نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی حتی تحت بدترین شرایط، بالاتر از حداقل مقدار مجاز (cm/s) ۰/۰۱ است. با وجود این، آلودگی دانه‌های بالاست ناشی از نفوذ ذرات ریز خارجی از سطح و خاک بستر می‌تواند افت ضریب هدایت هیدرولیکی مصالح را تسریع و توانایی زهکشی لایه را از بین ببرد. در واقع، ذرات ریز حاصل از سایش سنگ‌دانه‌ها دارای اندازه بزرگ‌تری در مقایسه با ذرات خارجی نفوذی می‌باشند و به همین جهت نفوذپذیری را کمتر تحت تاثیر قرار می‌دهد. پایوا و همکاران [۱۹] با انجام آزمایش نفوذپذیری روی سنگ‌دانه‌های خرد شده بالاست، نتایج مشابهی را مشاهده کرده‌اند، به نحوی که نمونه‌های بالاست

of crumb rubber in base and sub-base applications, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121 (2019) 436-441.

- [8] S. Bressi, J. Santos, M. Giunta, L. Pistonesi, D.L. Presti, A comparative life-cycle assessment of asphalt mixtures for railway sub-ballast containing alternative materials, *Resources, Conservation and Recycling*, 137 (2018) 76-88.
- [9] Y. Guo, V. Markine, W. Qiang, H. Zhang, G. Jing, Effects of crumb rubber size and percentage on degradation reduction of railway ballast, *Construction and Building Materials*, 212 (2019) 210-224.
- [10] Y. Guo, Y. Ji, Q. Zhou, V. Markine, G. Jing, Discrete element modelling of rubber-protected ballast performance subjected to direct shear test and cyclic loading, *Sustainability*, 12(7) (2020) 2836.
- [11] M. Fathali, M. Esmacili, F.M. Nejad, Influence of tire-derived aggregates mixed with ballast on ground-borne vibrations, *Journal of Modern Transportation*, 27(4) (2019) 355-363.
- [12] S. Schmidt, S. Shah, M. Moaveni, B.J. Landry, E. Tutumluer, C. Basye, D. Li, Railway ballast permeability and cleaning considerations, *Transportation Research Record*, 2607(1) (2017) 24-32.
- [13] E. Masad, R. Taha, C. Ho, T. Papagiannakis, Engineering properties of tire/soil mixtures as a lightweight fill material, *Geotechnical testing journal*, 19(3) (1996) 297-304.
- [14] B. Li, M. Huang, X. Zeng, Dynamic behavior and liquefaction analysis of recycled-rubber sand mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(11) (2016) 04016122.
- [15] M. Koohmishi, A. Azarhoosh, Hydraulic conductivity of fresh railway ballast mixed with crumb rubber considering size and percentage of crumb rubber as well as aggregate gradation, *Construction and Building Materials*, 241 (2020) 118133.
- [16] Y. Qian, E. Tutumluer, Y.M. Hashash, J. Ghaboussi, Effects of ballast degradation on permanent deformation behavior from large-scale triaxial tests, In *ASME/IEEE*

ضریب هدایت هیدرولیکی می‌شود. افزایش تعداد چرخه‌های بارگذاری و فراهم کردن بستر صلب باعث ایجاد خردشدگی بیشتر در طی آزمایش ضربه می‌گردد.

- استفاده از ذرات خرده لاستیک با اندازه کوچک‌تر و مقدار بیشتر، باعث کاهش نفوذپذیری ترکیب بدست آمده می‌شود. با وجود این، اثر اندازه ذرات خرده لاستیک در مقایسه با درصد مورد استفاده، به مراتب بیشتر است به نحوی که ذرات ریز خرده لاستیک به مقدار قابل توجهی نفوذپذیری را (تا ۴۵٪) کاهش می‌دهند.

- مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی نمونه‌های بالاست با خردشدگی زیاد که با ذرات ریزتر خرده لاستیک ترکیب شده‌اند (بدترین شرایط برای تراوایی محیطی)، همچنان قابل قبول است.

منابع

- [1] T.R. Sussmann, M. Ruel, S.M. Chrismer, Source of ballast fouling and influence considerations for condition assessment criteria, *Transportation Research Record*, 2289(1) (2012), 87-94.
- [2] D. Li, J. Hyslip, T. Sussmann, S. Chrismer, *Railway geotechnics*, CRC Press, (2015).
- [3] T.N. Ngo, B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn, Improved performance of ballasted tracks under impact loading by recycled rubber mats, *Transportation Geotechnics*, 20 (2019) 100239.
- [4] A.K. Rohrman, H.F. Kashani, C.L. Ho, Effects of natural abrasion on railroad ballast strength and deformation properties, *Construction and Building Materials*, 247 (2020) 118315.
- [5] W. Jia, V. Markine, Y. Guo, G. Jing, Experimental and numerical investigations on the shear behaviour of recycled railway ballast, *Construction and Building Materials*, 217 (2019) 310-320.
- [6] B.R. Madhusudhan, A. Boominathan, S. Banerjee, Engineering properties of sand-rubber tire shred mixtures, *International Journal of Geotechnical Engineering*, (2019) 1-17.
- [7] M. Saberian, J. Li, Long-term permanent deformation behaviour of recycled concrete aggregate with addition

- Dalmont, (1856) Paris.
- [24] T.F. Fwa, S.A. Tan, C.T. Chuai, Permeability measurement of base materials using falling-head test apparatus, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, (1998) 1615, 94-99. Washington, D.C.
- [25] E.T. Selig, J.M. Waters, Track geotechnology and substructure management, Thomas Telford, (1994) London.
- [26] R.J. Marsal, Large-scale testing of rockfill materials, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 93(2) (1967) 27-43.
- [27] M. Koohmishi, M. Palassi, Effect of gradation of aggregate and size of fouling materials on hydraulic conductivity of sand-fouled railway ballast, Construction and Building Materials, 167 (2018) 514-523.
- [28] S. Nimbalkar, B. Indraratna, S.K. Dash, D. Christie, Improved performance of railway ballast under impact loads using shock mats, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 138(3) (2012) 281-294.
- [29] P. Anbazhagan, B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn, L. Su, Using a seismic survey to measure the shear modulus of clean and fouled ballast, International Journal of Geomechanics and Geoengineering, 5(2) (2010) 117-126.
- [30] B. Indraratna, S. Nimbalkar, N.C. Tennakoon, The behavior of ballasted track foundations: Track drainage and geosynthetic reinforcement. GeoFlorida, ASCE, USA, (2010) 2378-2387.
- Joint Rail Conference, 45356 (2014) V001T01A022. American Society of Mechanical Engineers.
- [17] Y. Qian, E. Tutumluer, D. Mishra, H. Kazmee, Behavior of geogrid reinforced ballast at different levels of degradation, In the 2014 GeoShanghai International Congress: Ground Improvement and Geosynthetics, (2014) 333-342, Shanghai.
- [18] Y. Qian, H. Boler, M. Moaveni, E. Tutumluer, Y.M. Hashash, J. Ghaboussi, Degradation-related changes in ballast gradation and aggregate particle morphology, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 143(8) (2017) 04017032.
- [19] Paiva, C.E., Pereira, M.L., and Pimentel, L.L. 2017. Study of railway ballast fouling by abrasion-originated particles. In 14th International Conference of Railway Engineering, Edinburgh, Scotland, U.K.
- [20] Code 301, Railway track super structure general technical specifications, Transportation Research Institute, Deputy of Education Research and Technology, Ministry of Road and Transportation, (2005) (in Persian)
- [21] AREMA, Manual for railway engineering, Vol. 1: Track, Ch. 1: Roadway and Ballast, American Railroad Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA), (2010) Washington, D.C.
- [22] M. Koohmishi, M. Palassi, Effect of particle size distribution and subgrade condition on degradation of railway ballast under impact loads, Granular matter, 19(3) (2017) 63.
- [23] H. Darcy, Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Koohmishi, A. Azarhoosh, Drainage capability of degraded ballast aggregate mixed with discarded granulated rubber particles, Amirkabir J. Civil Eng., 55(5) (2023) 1021-1038.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21215.7654



