

Research Paper

The effect of geocell in gravel on runoff parameters under varying rainfall intensities (Experimental study)

Hamidreza Ghazvinian¹, Hojat Karami^{2*}

¹ PhD in Water Resources Management and Engineering, Department of Water and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. Hamidrezaghazvinian@semnan.ac.ir

² Associate Professor, Department of Water and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. (*Corresponding author: Hkarami@semnan.ac.ir)



10.22125/iwe.2025.482645.1833

Received:

August 14, 2025

Accepted:

November 10, 2025

Available online:

December 25, 2025**Keywords:****runoff, geocell, sand, rainfall simulator, rainfall intensity scenario****Abstract**

Gravel pavements, a type of permeable pavement, can mitigate the adverse impacts of urbanization on the hydrological cycle and environment in urban and rural areas. This study evaluated the performance of porous gravel pavements without (O) and with one (G1), two (G2), or three (G3) layers of plastic geocells, focusing on runoff volume reduction, time to runoff onset (TR), runoff coefficient (C), runoff end time (TER), and peak flow rate (PF). Experiments were conducted under three rainfall intensity scenarios and two slope levels using a rainfall simulator. A total of 24 laboratory-scale physical models were tested, each consisting of 15 cm of sandy loam soil overlaid with 15 cm of gravel, with geocell layers incorporated into the gravel as applicable. Data were analyzed using the factorial method and Duncan's multiple range test in SPSS 21 software. Significant differences ($p < 0.05$) were observed in TR and C across all treatments. Variations in rainfall intensity and treatment type also significantly affected PF and TER. The G3 treatment consistently exhibited the lowest cumulative runoff volume, indicating superior runoff reduction compared to G2, G1, and O treatments. Additionally, increasing geocell layers delayed the onset of runoff. The G3 pavement was also more cost-effective than other treatments in terms of C and PF. However, no definitive conclusions could be drawn regarding the TER parameter.

1. Introduction

Urbanization significantly impacts the hydrological cycle, leading to increased runoff and flooding in urban areas. To mitigate these effects, Low Impact Development (LID) techniques have gained traction, emphasizing sustainable practices to manage stormwater. Among these techniques, permeable pavements, particularly those incorporating geocells, have shown promise in improving infiltration and reducing runoff. This study investigates the effectiveness of geocell-reinforced sand pavements in controlling runoff parameters under variable rainfall intensities. The research aims to evaluate how the number of geocell layers affects runoff volume reduction, time to start runoff, runoff coefficient, and peak flow rate, providing insights into optimizing urban flood management strategies.

* Corresponding Author: Hojat Karami

Address: Department of Water and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Email: hkarami@semnan.ac.ir
Tel: 02331535205

2. Materials and Methods

The experimental setup consisted of 24 physical models designed to simulate various conditions of sand pavements with differing geocell configurations. The models were categorized into four groups: one without geocells (control) and three with one (G1), two (G2), and three (G3) layers of geocells. Two slope conditions (0% and 5%) were applied to assess their influence on runoff behavior.

Using a rainfall simulator, three distinct scenarios of variable rainfall intensities were tested, based on the Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves of Semnan, Tabriz, and Rasht, representing dry, moderate, and wet climates, respectively. The rainfall intensities varied from 45 to 200 mm/h across different scenarios, each lasting 15 minutes. The runoff parameters measured included total runoff volume, time to start runoff (TR), runoff coefficient (C), runoff end time (TER), and peak flow rate (PF). Statistical analyses were performed using SPSS21, applying factorial methods and Duncan's multiple range test to assess significant differences at the 5% level.

3. Results

The findings indicate a noteworthy impact of geocell layers on runoff parameters. The cumulative runoff volume was significantly lower in the G3 treatment compared to G1, G2, and the control treatment across all rainfall scenarios. For instance, the cumulative runoff volume in the G3 models consistently demonstrated superior performance, suggesting enhanced runoff absorption and retention capability.

Time to start runoff (TR) was delayed with each additional layer of geocell. Specifically, for scenario 1 at a 5% slope, the TR for G3 was 44 minutes, compared to 56 minutes for the control. This trend emphasizes that more geocell layers contribute to prolonged water retention, thus delaying runoff initiation. The runoff coefficient (C) also decreased with an increasing number of geocell layers, indicating improved efficiency in managing stormwater.

The peak flow rate (PF) was significantly reduced in the G3 treatment compared to the control. This reduction highlights the effectiveness of geocell structures in mitigating flooding risks by controlling the rate at which water is discharged into drainage systems.

4. Discussion and Conclusion

The study reinforces the potential of geocells as a valuable component in urban stormwater management systems. By effectively delaying runoff and reducing peak flow rates, geocell-reinforced pavements can significantly enhance the hydrological performance of urban landscapes. The results align with existing literature that advocates for permeable pavements as effective tools for flood management.

The findings suggest that integrating multiple layers of geocells in pavement design not only improves runoff control but also offers a cost-effective solution compared to traditional impervious surfaces. Future research should explore the long-term performance and maintenance aspects of geocell pavements, as well as their environmental benefits in promoting urban sustainability.

In conclusion, this study contributes to the growing body of knowledge on innovative stormwater management practices, providing empirical evidence supporting the use of geocells in permeable pavements. The successful application of this technology can lead to more resilient urban infrastructures capable of coping with the challenges posed by climate change and urbanization.

5. Six important references

- 1) Ahn, J., Nguyen, T. H., Yoo, I. K., and Oh, J. 2021. Investigation of Mechanical and Hydrologic Characteristics of Porous Asphalt Pavement with a Geocell Composite. *Materials*, 14(12): 3165.
- 2) Bigurra-Alzati, C. A., Ortiz-Gómez, R., Vázquez-Rodríguez, G. A., López-León, L. D., and Lizárraga-Mendiola, L. 2020. Water Conservation and Green Infrastructure Adaptations to Reduce Water Scarcity for Residential Areas with Semi-Arid Climate: Mineral de la Reforma, Mexico. *Water*, 13(1): 45.
- 3) Chen, W., Zheng, M., Gao, Q., Deng, C., Ma, Y., and Ji, G. 2021. Simulation of surface runoff control effect by permeable pavement. *Water Science and Technology*, 83(4): 948–960.
- 4) Liu, W., Feng, Q., Chen, W., and Deo, R. C. 2020. Stormwater runoff and pollution retention performances of permeable pavements and the effects of structural factors. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(24): 30831–30843.

- 5) Song, X., Huang, M., He, S., Song, G., Shen, R., Huang, P., and Zhang, G. 2021b. Erosion Control Treatment Using Geocell and Wheat Straw for Slope Protection. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1): 5553221.
- 6) Tasalloti, A., Marshall, A. M., Heron, C. M., and Hashemi, M. A. 2020. Geocellular railway drainage systems: Physical and numerical modelling. *Transportation Geotechnics*, 22: 100299.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



اثر ژئوسل در شن بر پارامترهای رواناب تحت شدت‌های متغیر بارندگی (مطالعه آزمایشگاهی)

حمیدرضا قزوینیان^۱، حجت کرمی^{۲*}

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۵/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

مقاله پژوهشی

چکیده

پوشش شن یک نوع روسازی نفوذپذیر است که می‌تواند برای کاهش اثرات منفی شهرنشینی بر چرخه هیدرولوژیکی آب و محیط زیست در برخی از نقاط شهر و روستا مورد استفاده قرار گیرد. در تحقیق حاضر به بررسی و مقایسه عملکرد سنگدانه شنی متخلخل بدون ژئوسل پلاستیکی (O) و با یک (G1)، دو (G2) و سه لایه (G3) ژئوسل‌های پلاستیکی در میزان کاهش حجم رواناب، زمان شروع رواناب (TR)، ضریب رواناب (C)، زمان پایان رواناب (TER) و دبی پیک (PF) در بعد آزمایشگاهی در ۳ سناریو مختلف شدت بارش (i) و ۲ سطح شیب (s) مختلف با کمک دستگاه شبیه‌ساز باران پرداخته شد. در این پژوهش، در مجموع ۲۴ مدل فیزیکی در سطح آزمایشگاه در نظر گرفته شد. ۱۵ سانتی‌متر خاک لومی شنی در کف حوضچه‌های دستگاه ریخته شد و ۱۵ سانتی‌متر شن بر روی آن قرار گرفت. لایه‌های ژئوسل تنها در شن جاگذاری شدند. نتایج حاصل از آزمایش با روش فاکتوریل و Duncan در نرم‌افزار SPSS21 مورد ارزیابی قرار گرفت. برای متغیرهای وابسته TR و C در تمامی حالات اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد بین داده‌ها وجود دارد. تغییرات سناریو بارش و نوع تیمار می‌تواند در نتایج TER و PF تفاوت معنی‌داری را ایجاد کند. حجم تجمعی G3 در تمامی حالات آزمایش نسبت به بقیه تیمارها کمتر است. این نشان می‌دهد که شن با پوشش G3 می‌تواند در کاهش رواناب موثرتر نسبت به پوشش‌های G1، G2 و O باشد. با اجرای لایه‌های بیشتر ژئوسل می‌توان در زمان شروع رواناب تاخیر ایجاد کرد. همچنین پوشش G3 نسبت به سایر پوشش‌ها C و PF را کمتر کند. اما در مورد پارامتر TER نمی‌توان نظر قطعی داد.

کلید واژه‌ها: رواناب، ژئوسل، شن، شبیه‌ساز بارش، سناریو شدت بارش

^۱ دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

Hamidrezaghazvinian@semnan.ac.ir

^۲ دانشیار گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. (*نویسنده مسئول: Hkarami@semnan.ac.ir)

مقدمه

گسترده‌گی و پیچیدگی اثرات اقتصادی، زیست محیطی، اجتماعی و فرهنگی مرتبط با سیلاب‌های شهری، استفاده از انواع جدید تکنیک‌های برنامه‌ریزی و سیستم‌های مهندسی شده را ضروری می‌کند (Drake et al. 2013; Ghazvinian and Karami 2025b; Ziari et al. 2025). توسعه کم تاثیر (LID) یک روش مناسب برای رفع چالش‌های طراحی و مدیریت آب گرفتگی و سیلاب‌های شهری است (Ghazvinian and Karami 2023b). LID یک فلسفه طراحی است که شامل روش‌ها، برنامه‌ریزی‌ها و فن‌آوری‌های مدیریت سیلاب می‌شود تا اثرات منفی که معمولاً با سیلاب‌های شهری مرتبط است از جمله پایین آمدن کیفیت آب‌های زیرزمینی و سطحی، فرسایش و از دست دادن تنوع آبی است را به حداقل برساند (Coffman 2000; Dietz 2007; Drake et al. 2013). همچنین این روش رویکردهای نوآورانه مورد تأکید قرار می‌گیرند، که هدف آن ارتقای نفوذ سایت و بازیابی یکپارچگی اکوسیستم در مناطق شهری است (Liu et al. 2021b; Saadat Foomani and Malekmohammadi 2020; Shafique and Kim 2017). هدف از اجرای LID ها، کاهش رواناب، آب گرفتگی، بهبود کیفیت آب که همزمان به دنبال کاهش هزینه در ساخت، بهره برداری و نگهداری زیرساخت‌ها است (Akther et al. 2018; Dhakal and Chevalier 2015; Fisher-Jeffes et al. 2017; Houle et al. 2013; Rodrigues et al. 2021). از جمله LID های پرکاربرد می‌توان به بام سبز (Berndtsson et al. 2006; Carson et al. 2013; Deska et al. 2020; Fan et al. 2020; Liu et al. 2021a; Rowe 2011)، روسازی نفوذپذیر (Ahiablame et al. 2013; Brunetti et al. 2016; Drake et al. 2013; Li et al. 2019; Shuster et al. 2013; Walsh et al. 2014) و ترانشه نفوذ (Abdelkebir et al. 2021; Bonneau et al. 2017; Conley et al. 2020; Hager et al. 2019; Newcomer et al. 2014) اشاره کرد. بهترین راهکارهای مدیریتی (BMPs) (Kim et al. 2017) بهترین روش برای مدیریت، جلوگیری، کنترل، حذف، کاهش یا تصفیه رواناب شهری و آلودگی رواناب قبل

از ورود آلاینده‌ها به آب‌های دریافت کننده هستند که شامل برنامه‌ها، روش‌ها یا راهکارهای عملکردی، سیستم‌های مهندسی، تکنولوژی‌ها، فرآیندها و معیارهای مکان‌یابی هستند (Rodrigues et al. 2021). BMP ها می‌توانند غیر سازه‌ای یا سازه‌ای باشند (Sun et al. 2014).

Ferguson (2005) انواعی از روسازی‌های نفوذپذیر را بررسی کرد که شامل سنگدانه متخلخل، چمن متخلخل، ژئوسل‌های پلاستیکی، بلوک‌های سنگ‌فرش با درز باز یا سنگ‌فرش‌های بتنی به هم پیوسته نفوذپذیر، شبکه‌های سنگ‌فرش سلول‌باز، بتن متخلخل (یا بتن نفوذی)، آسفالت متخلخل بود.

خانواده ژئوسل مواد روسازی توسط شبکه‌های پلاستیکی ساخته شده تعریف می‌شود که سلول‌های آن را می‌توان با سنگدانه یا یک بستر کاشت برای چمن پر کرد (Ferguson 2005; Papakos et al. 2010). ژئوسل‌ها پانل‌های پلاستیکی هستند که شبکه‌هایی از سلول‌های جعبه‌مانند را تشکیل می‌دهند که با مواد خاکی پر شده‌اند (Ferguson 2005).

Dreelin et al. (2006) عملکرد یک پارکینگ آسفالتی و یک پارکینگ روسازی متخلخل از سنگ‌فرش‌های چمن همراه با ژئوسل در آتن، جورجیا، ایالات متحده آمریکا را در مورد رویدادهای بارانی با طول بارش و شدت کم مقایسه کردند. نتایج نشان داد که روسازی‌های متخلخل یک گزینه مناسب برای کاهش رواناب و برخی آلاینده‌های ناشی از سیلاب‌های کوچک در خاک‌های رسی هستند.

در تحقیق Tasalloti et al. (2020) به مدل‌سازی فیزیکی و عددی یک سیستم زهکشی راه آهن با کمک ژئوسلولار پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که در صورت استفاده از سیستم زهکشی ژئوسلولار زیر مسیر، مزایای بالقوه‌ای را از نظر حفظ سطح ایستایی پایین‌تر در سطح زیرین و همچنین در کمک به مهاجرت ریزدانه‌ها به بیرون از بالاست ارائه می‌کند. در یک پژوهش X. Song et al. (2021) با استفاده از ساختارهای ژئوسل و ترکیب آن با کاه گندم، یک روش ترکیبی به منظور تصفیه خاک، کنترل فرسایش، حفاظت شیب و کاهش رواناب پرداختند. همچنین در تحقیقات Rosen, (2013); Sato and



از اثرات افزایش لایه‌های ژئوسل بر زمان شروع رواناب (TR)، زمان پایان رواناب (TER)، ضریب رواناب (C)، دبی پیک (PF) و حجم تجمعی رواناب ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

توضیحات مدل

در این پژوهش، در مجموع ۲۴ مدل فیزیکی در سطح آزمایشگاه و در مقیاس کوچک ایجاد شد. این مدل‌ها به ۴ گروه طبقه‌بندی شدند. گروه اول پوشش شن بدون ژئوسل، گروه دوم، سوم و چهارم به ترتیب پوشش یک لایه، دو لایه و سه لایه ژئوسل بکار گرفته شد. دو نوع شیب صفر درصد و ۵ درصد برای تیمارها که براساس پژوهش‌های (Hou et al. (2022) و Li et al. (2020) می‌باشند، در نظر گرفته شد. به نظر می‌رسد مطالعات محدودی بر سناریوهای مختلف بارش انجام شده است. شدت بارش متغیر ممکن است به حوضچه‌های سطحی اجازه دهد تا قبل از شروع مجدد باران تا حدی از بین بروند. بنابراین، در نهایت، آزمایش‌ها نیاز به پرداختن به شدت بارش متغیر با پیک تک قله دارند. بنابراین ۳ سناریو شدت بارش متغیر در طول بارندگی براساس شرایط بارندگی و نمودار IDF شهرهای سمنان، تبریز و رشت در نظر گرفته شدند (Dehghanipour et al. 2021b; Karami et al. 2023). این روش براساس پژوهش‌های (Parsons and Stone, (2006) و Stone and Paige, (2003) در نظر گرفته شد. شدت بارش ۴۵ و ۵۵ میلی متر بر ساعت براساس دوره بازگشت ۵ و ۱۰ سال (Bigurra-Alzati et al. 2020) و زمان ۱۰ دقیقه IDF (Bigurra-Alzati et al. 2020) شهر سمنان، شدت بارش ۷۰، ۹۰ میلی متر بر ساعت براساس دوره بازگشت ۵ و ۱۰ سال و زمان ۱۰ دقیقه IDF شهر تبریز، شدت بارش ۱۷۰، ۲۰۰ میلی متر بر ساعت براساس دوره بازگشت ۵ و ۱۰ سال و زمان ۱۰ دقیقه IDF شهر رشت انتخاب شدند. این روش در تحقیق (Tasalloti et al. (2020) استفاده شد. هر آزمایش سه بار تکرار بصورت همزمان انجام شد. لازم به ذکر است سه شهر سمنان، تبریز و رشت براساس روش دومارتن به ترتیب در سه اقلیم خشک، مدیترانه‌ای و بسیار مرطوب قرار گرفته‌اند (Ghazvinian and Karami 2025a; Dehghanipour et al. 2021a; b)

(Kojma, (2018); Wesseloo et al., (2009) با بررسی-های ترکیبی پوشش‌های مختلف با ژئوسل، پی بردند که این ترکیبات می‌توانند در حفاظت شیب، کنترل رواناب و فرسایش کارساز باشند. در یک تحقیق مشابه دیگر، G. Song et al. (2021) به منظور تقویت خاک برای رشد پوشش گیاهی و بهبود پایداری شیب از ساختار ژئوسل استفاده کردند. ترکیب ژئوسل و خاک در دو سایز کوپک و بزرگ و در دو شیب و در سه شدت بارش متفاوت بررسی شد. نتایج مانند تحقیقات (Rosen, (2013); Sato and Kojma, (2018); X. Song et al. (2021); Wesseloo et al. (2009) از کارایی مناسب ژئوسل برخوردار بود. توجه اصلی طراحی یک سیستم روسازی نفوذپذیر ساختار آن است که باید مشخصات مکانیکی و هیدرولوژیکی مورد نیاز را برآورده کند (Weiss et al. 2019). در همین راستا (Ahn et al. (2021) به ارزیابی ویژگی‌های هیدرولوژیکی روسازی‌های آسفالتی متخلخل، با و بدون کامپوزیت ژئوسل با آزمایش شبیه‌سازی بارندگی انجام دادند. مشاهده آزمایش‌های شبیه‌سازی بارندگی روی روسازی تقویت‌شده نشان می‌دهد که روسازی تقویت‌شده به طور موثر رواناب سطحی را کنترل می‌کند.

از یک طرف با توجه به اهمیت بسیار بالایی که روش-های مختلف کنترل رواناب و آبگرفتگی شهری در تمام نقاط دنیا دارد و از طرف دیگر تحقیقات محدودی در بررسی ترکیبی روسازی‌های متخلخل بخصوص ژئوسل با سنگدانه-ها انجام شده است. همچنین بررسی رگبارهای طبیعی نشان می‌دهد که شدت بارندگی در طول یک رخداد متغیر است. به شکلی که ممکن است در طی رگبار بیشینه شدت بارندگی چند برابر متوسط بارندگی آن رگبار باشد. هرچند مطالعات متعددی بر عملکرد روسازی‌های نفوذپذیر و کاربرد ژئوسل در حفاظت از شیب‌ها یا سیستم‌های زهکشی تمرکز کرده‌اند، پژوهش‌های تجربی سیستماتیک که به‌طور همزمان تأثیر تعداد لایه‌های ژئوسل و الگوهای شدت بارش متغیر (مشتق از منحنی‌های IDF در اقلیم‌های متنوع) را بر پارامترهای کلیدی رواناب در مقیاس آزمایشگاهی مقایسه کنند، محدود هستند. مطالعه حاضر با هدف پر کردن این خلأ، از طراحی فاکتوریل، ۲۴ مدل فیزیکی و تحلیل آماری بهره می‌گیرد تا برآوردهای معتبر و کاربردی

سناریوهای شدت بارش در این مطالعه بر اساس بررسی رگبارهای طبیعی طراحی شده‌اند، که در آن‌ها شدت بارش در طول یک رخداد متغیر است و ممکن است بیشینه شدت چند برابر متوسط باشد. سناریو ۲ (افزایشی) برای شبیه‌سازی رگبارهای تدریجی مناسب است، جایی که شدت از کم به زیاد تغییر می‌کند و اجازه می‌دهد تا اثرات تجمعی نفوذ اولیه خاک بررسی شود. سناریو ۱ (کاهشی) شرایط بارش شدید اولیه را مدل‌سازی می‌کند، که می‌تواند منجر به اشباع سریع خاک و افزایش رواناب شود. سناریو ۳ (ترکیبی) الگویی متعادل با پیک‌های متوسط را ارائه می‌دهد، که برای ارزیابی پایداری سیستم‌های ژئوسل در شرایط متغیر واقعی مفید است. این سناریوها بر پایه داده‌های IDF شهرهای منتخب (با دوره‌های بازگشت ۵ و ۱۰ ساله) و روش (Tasalloti et al. (2020) انتخاب شده‌اند تا اثرات اقلیمی متنوع (خشک، مدیترانه‌ای و مرطوب) را پوشش دهند. هر سناریو سه بار تکرار شده تا اعتبار آماری افزایش یابد، و نتایج نشان می‌دهد که سناریوهای کاهشی (مانند سناریو ۲) اغلب منجر به زمان شروع رواناب زودتر می‌شوند، در حالی که سناریوهای افزایشی (سناریو ۱) حجم تجمعی کمتری تولید می‌کنند. این رویکرد امکان تحلیل حساسیت پارامترهای رواناب به الگوهای بارش را فراهم می‌کند و می‌تواند در طراحی سیستم‌های زهکشی شهری کاربرد داشته باشد.

بر اساس جدول ۱ برای هر گروه آزمایش، ۶ حالت مختلف شدت بارش‌ها و شیب‌های ذکر شده برای تست در نظر گرفته شد. تمامی آزمایش‌ها، با سه بار تکرار انجام شده است. سپس از نتایج سه آزمایش، میانگین گرفته شد و تحلیل‌ها بر اساس اعداد حاصله از میانگین صورت گرفت. در بخش آماری نتایج تمامی آزمایش‌ها (با سه بار تکرار) لحاظ گردید. ژئوسل‌های مورد استفاده در آزمایش برای تقویت مدل‌ها، دارای ابعاد مشابه با مدل‌های میدانی می‌باشند. هنگام ساخت مدل‌های فیزیکی، خاک‌ها به درستی متراکم شدند، به طوری که تراکم و مقاومت شیب‌های مدل‌سازی تا حد امکان به حالت واقعی نزدیک شد.

جدول ۱ جزئیات کامل آزمایش‌های انجام‌شده را به صورت ساختاریافته ارائه می‌دهد. این جدول شامل ۲۴ مدل فیزیکی است که بر اساس شرایط خاک (شاهد بدون ژئوسل یا با لایه‌های ژئوسل)، نام مخفف مدل، تعداد لایه‌های ژئوسل، شیب سطح (٪ یا ٪۰/۵) و شماره سناریو شدت بارش طبقه‌بندی شده‌اند. مدل‌های شاهد (O1 تا O6) بدون ژئوسل هستند و به عنوان پایه مقایسه عمل می‌کنند. مدل‌های G1-1 تا G1-6 با یک لایه ژئوسل، G2-1 تا G2-6 با دو لایه، و G3-1 تا G3-6 با سه لایه ژئوسل طراحی شده‌اند. شیب‌های انتخابی (٪۰/۵ و ٪۰/۵) بر اساس مطالعات قبلی مانند Hou et al. (2022) و Li et al. (2020) تعیین شده‌اند تا اثرات شیب بر جریان رواناب را بررسی کنند. هر سناریو شدت بارش (۱ تا ۳) برای هر ترکیب شیب و لایه ژئوسل تکرار شده است، که این امر امکان تحلیل فاکتوریل را فراهم می‌کند. این جدول نشان‌دهنده تنوع سیستماتیک آزمایش‌هاست و تضمین می‌کند که تمامی ترکیبات ممکن پوشش داده شوند، از جمله ۶ حالت برای هر گروه تیمار. این ساختار اجازه می‌دهد تا اثرات متقابل عوامل (لایه ژئوسل، شیب و سناریو بارش) بر پارامترهای رواناب مانند حجم تجمعی، زمان شروع (TR)، ضریب رواناب (C)، زمان پایان (TER) و دبی پیک (PF) به طور دقیق ارزیابی شود. شکل ۱ هیستوگرام‌های شدت بارش را برای سه سناریو مختلف بارش متغیر نشان می‌دهد، که هر کدام الگویی منحصربه‌فرد از تغییرات شدت بارش در طول مدت ۹۰ دقیقه (شش بازه ۱۵ دقیقه‌ای) را ترسیم می‌کنند. تداوم بارش برای هر شدت بارش در تمامی سناریوها ۱۵ دقیقه در نظر گرفته شد. این موضوع بر اساس روش‌های Stone and Paige, (2003) و انتخاب شدت‌ها بر پایه منحنی‌های IDF شهرهای سمنان (اقلیم خشک)، تبریز (مدیترانه‌ای) و رشت (بسیار مرطوب) طبق طبقه‌بندی دومارتن (Dehghanipour et al. 2021a,b; Karami et al. 2023) انجام شده تا تنوع اقلیمی را پوشش دهد. این هیستوگرام‌ها امکان مقایسه مستقیم اثرات الگوهای بارش متغیر بر پارامترهای رواناب را فراهم می‌کنند و نشان‌دهنده این است که تغییرات شدت بارش می‌تواند بر زمان شروع رواناب و حجم تجمعی تأثیرگذار باشد.



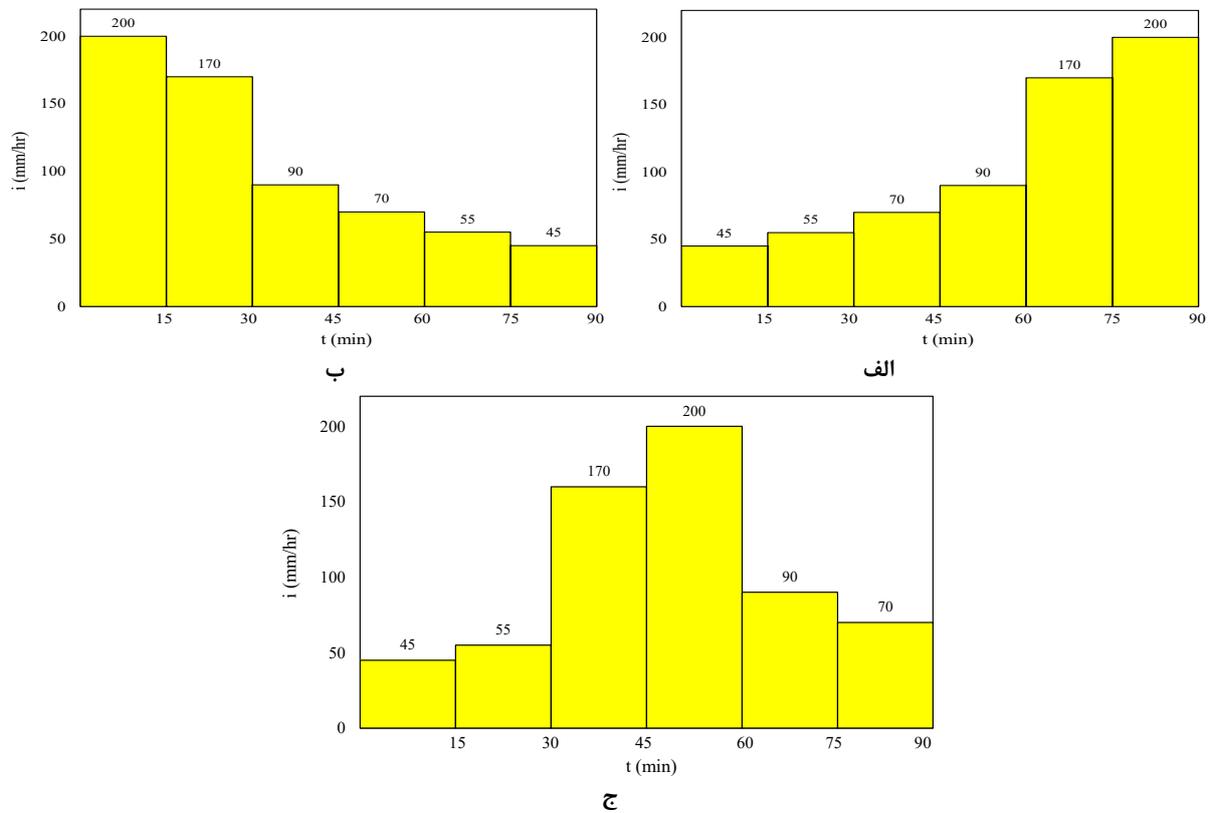
دستگاه شبیه‌ساز بارش

دستگاه شبیه‌ساز باران، دارای ۲ جت بارش می‌باشد. این دستگاه دارای تشت (حوضچه) می‌باشد که تیمارهای آزمایشگاه (در این پژوهش خاک شنی) قرار می‌گیرد (Ghazvinian and Karami 2023a). این حوضچه‌ها قابلیت تغییر شیب را از صفر تا ۱۵ درصد دارند. حوضچه‌ها خود در ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر بالاتر از سطح زمین و بر روی پایه‌های فلزی واقع شده‌اند. جنس حوضچه از ورق آهن گالوانیزه می‌باشد. ابعاد حوضچه‌ها ۱ * ۱ متر و دارای ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. در ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری از حوضچه‌ها لوله‌ای به منظور خروج رواناب تشکیل شده بر روی تیمار مورد مطالعه قرار گرفته است و در زیر این لوله‌ها

سطح‌های مدرج به منظور قرائت ارتفاع و حجم آب خروجی قرار داده شدند. جت‌های بارش در ارتفاع ۲/۵ متری از سطح حوضچه تیمارها قرار گرفته‌اند. این جت‌ها قابلیت تغییر ارتفاع، تغییر زاویه و تغییر در فاصله از هم را دارند. این دستگاه قابلیت تغییر شدت بارش از ۲۰ میلی‌متر بر ساعت تا ۲۲۰ میلی‌متر بر ساعت را دارا می‌باشد. دستگاه دارای پمپ و مخزن بوده و آب درون مخزن از طریق پمپاژ به جت‌ها وارد می‌شوند. شدت بارش با کمک روتامتر دستگاه و با شیرهای موجود تنظیم دبی تغییر می‌کردند. شکل ۲ شماتیک دستگاه شبیه‌ساز بارش و اجزای آن و شکل ۳ نمای کلی از دستگاه شبیه‌ساز بارش نشان داده شده است.

جدول (۱): جزئیات آزمایش

شماره سناریو شدت بارش	شیب (%)	تعداد لایه‌های ژئوسل	نام مخفف مدل	شرایط خاک
۱	۰	-	O1	شاهد (بدون ژئوسل) ۱
۱	۵	-	O2	شاهد (بدون ژئوسل) ۲
۲	۰	-	O3	شاهد (بدون ژئوسل) ۳
۲	۵	-	O4	شاهد (بدون ژئوسل) ۴
۳	۰	-	O5	شاهد (بدون ژئوسل) ۵
۳	۵	-	O6	شاهد (بدون ژئوسل) ۶
۱	۰	۱	G1-1	یک لایه ژئوسل ۱
۱	۵	۱	G1-2	یک لایه ژئوسل ۲
۲	۰	۱	G1-3	یک لایه ژئوسل ۳
۲	۵	۱	G1-4	یک لایه ژئوسل ۴
۳	۰	۱	G1-5	یک لایه ژئوسل ۵
۳	۵	۱	G1-6	یک لایه ژئوسل ۶
۱	۰	۲	G2-1	دو لایه ژئوسل ۱
۱	۵	۲	G2-2	دو لایه ژئوسل ۲
۲	۰	۲	G2-3	دو لایه ژئوسل ۳
۲	۵	۲	G2-4	دو لایه ژئوسل ۴
۳	۰	۲	G2-5	دو لایه ژئوسل ۵
۳	۵	۲	G2-6	دو لایه ژئوسل ۶
۱	۰	۳	G3-1	سه لایه ژئوسل ۱
۱	۵	۳	G3-2	سه لایه ژئوسل ۲
۲	۰	۳	G3-3	سه لایه ژئوسل ۳
۲	۵	۳	G3-4	سه لایه ژئوسل ۴
۳	۰	۳	G3-5	سه لایه ژئوسل ۵
۳	۵	۳	G3-6	سه لایه ژئوسل ۶



شکل (۱): هسیتوگرام شدت بارش‌های مختلف در طول مدت بارندگی، الف: سناریو ۱، ب: سناریو ۲ و ج: سناریو ۳



شکل (۲): جزئیات دستگاه شبیه‌ساز بارش



شکل (۳): دستگاه شبیه‌ساز بارش

(2019) در نظر گرفته شد. بر روی خاک لوم شنی یک لایه ژئوتکستایل قرار داده شد. سپس ۱۵ سانتی‌متر شن قرار گرفت. در جدول ۳ جزئیات خاک شنی بیان شده است. در شکل ۴ شماتیک لایه‌بندی را نشان داده شده است. لایه-های ژئوسل در لایه‌های خاک شنی قرار گرفتند. بعد از هر تست تمامی خاک‌های مورد استفاده در هر تست از حوضچه خارج می‌شدند و برای آزمایش بعدی خاک کاملاً خشک مورد استفاده قرار می‌گرفتند.

ساختار مدل

در حوضچه‌های تعبیه شده در دستگاه شبیه‌ساز بارش، در کف آن ورق‌های ژئوتکستال در نظر گرفته شد. ۱۵ سانتی‌متر خاک لومی شنی در کف حوضچه قرار داده شد. جزئیات خاک لوم شنی در جدول ۲ بیان شده است. شرایط خاک لوم شنی براساس تحقیق Dehghani et al.

جدول (۲): درصد ذرات تشکیل دهنده خاک

بافت خاک	درصد رس	درصد سیلت	درصد شن
لوم شنی	۴	۱۹	۷۷

جدول (۳): دانه بندی خاک شن

۴ میلی‌متر ≤	۶-۴ میلی‌متر ≤	۹-۶ میلی‌متر ≤	۱۲-۹ میلی‌متر ≤	۱۵-۱۲ میلی‌متر ≤	۱۵ میلی‌متر ≤
۱٪/۱	۱۵٪/۲	۲۱٪/۱	۳۵٪/۲	۲۷٪/۴	۱۰۰٪



شکل (۴): لایه‌بندی کلی مدل

ژئوسل

ژئوسل ساختاری شبکه‌ای است که به طور وسیع در صنعت ساخت و ساز استفاده می‌شود (Ghazvinian and Karami 2024). این ساختار نیرویی که به صورت عمود به سطح خاک وارد می‌شود را به صورت جانبی در سطح خاک توزیع می‌کند (Ghazvinian and Karami 2023c). بنابراین مانع نشست خاک و یا فرسایش خاک می‌شود (Monrose and Tota-Maharaj 2018). ژئوسل‌های با اندازه معمولی مورد استفاده در این آزمایش از پلی اتیلن با چگالی بالا ساخته شده اند. طول و عرض آن به اندازه طول و عرض حوضچه یعنی ۱ متر در ۱ متر در نظر گرفته شد. ابعاد ارتفاع، طول، عرض و قطر سوراخ‌های روی بدنه ژئوسل به ترتیب ۵، ۱۰۰، ۱۰۰ و ۱ سانتی‌متر می‌باشد (Ferguson 2005). در شکل ۵ تیمار بدون ژئوسل و ژئوسل در لایه‌های مختلف استفاده شده را نشان می‌دهد. در شکل ۵-الف و ۵-ب به ترتیب شن بدون ژئوسل و شن با یک لایه ژئوسل که کاملاً پر شده از شن را نشان می‌دهد. در اشکال ۵-ج و ۵-د به ترتیب ژئوسل در دولایه و سه

لایه قبل از پر شدن کامل آن‌ها از شن را نشان می‌دهد که در نهایت و هنگام انجام آزمایش این لایه‌ها از شن پر شدند.

آنالیز آماری

به منظور تحلیل آماری، پس از ثبت نتایج اندازه‌گیری داده‌های مربوط به پوشش‌ها، مقادیر دبی پیک (PF)، زمان شروع رواناب (TR)، ضریب رواناب (C)، زمان پایان رواناب (TER) حاصل شده با استفاده از نرم افزار SPSS21 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در این پژوهش از روش فاکتوریل ۳*۳ برای تحلیل داده استفاده شده است (Karami and Ghazvinian 2022). همچنین با کمک روش Duncan برای تقسیم بندی داده‌های مستقل برای هر یک از داده‌های وابسته انجام شد (Ghazvinian et al. 2024). در رابطه ۱ نحوه محاسبه درصد کاهش حجم رواناب نیز بیان شده است. RRV درصد کاهش حجم رواناب، V_o حجم رواناب در تیمار شاهد و V_G حجم رواناب در تیمارهای همراه با ژئوسل می‌باشد (Liu et al., 2020).

$$RRV = \frac{V_o - V_G}{V_o} \times 100 \quad (1)$$



ب

الف





د

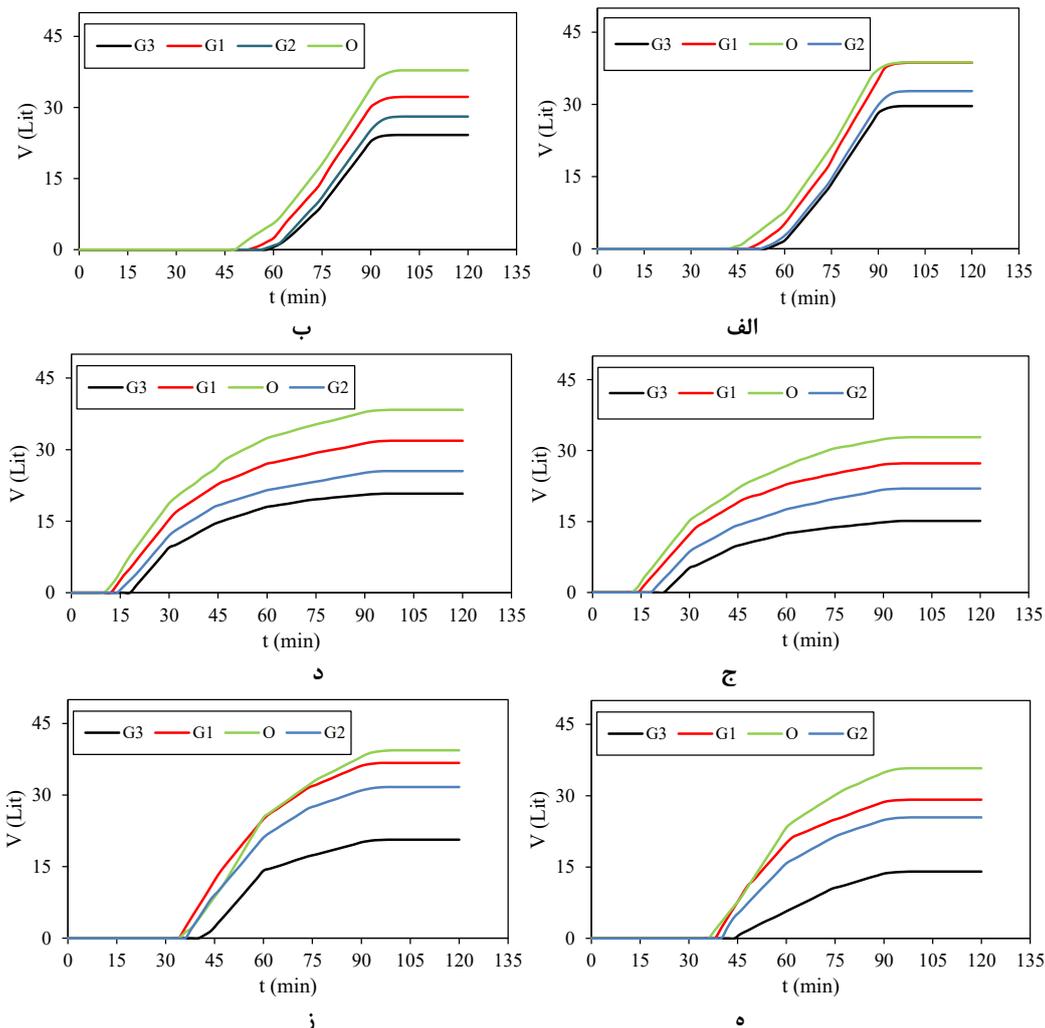
شکل (۵): شن و ژئوسل مورد استفاده در آزمایش، الف: شن بدون ژئوسل، ب: یک لایه ژئوسل، ج: دو لایه ژئوسل و د: سه لایه ژئوسل نمودار با گذشت زمان تندتر می‌شود. زیرا در سناریو ۱ شدت بارش از ۴۵ میلی‌متر بر ساعت به ۲۰۰ میلی‌متر بر ساعت افزایش می‌یابد که باعث افزایش حجم رواناب در طول مدت بارندگی می‌گردد. در سناریو ۲، برای تمامی تیمارها، تغییرات نمودار حجم تجمع می‌یابد. در آغاز رواناب، با گذشت زمان از شیب تند به شیب کند تقلیل می‌یابد. علت این موضوع این است که در سناریو ۲ شدت بارش از ۲۰۰ میلی‌متر بر ساعت (بیشترین شدت بارش مورد مطالعه) به ۴۵ میلی‌متر بر ساعت (کمترین شدت بارش مورد مطالعه) در طول مدت بارندگی تغییر می‌کند. تغییرات نمودار حجم تجمع می‌یابد. در شروع رواناب در سناریو ۳ با گذشت زمان شیب نمودار کم می‌شود. تفاوت سناریو ۳ با سناریو ۲ در زمان شروع رواناب در دو سناریو شدت بارش می‌باشد. علت این تفاوت این است که سناریو ۲ با شدت بارش ۲۰۰ میلی‌متر بر ساعت آغاز می‌گردد و با گذشت زمان (هر ۱۵ دقیقه) شدت بارش کم می‌شود تا به شدت بارش کمترین (۴۵ میلی‌متر بر ساعت) برسد. اما در سناریو ۳ آغاز بارندگی با شدت بارش ۴۵ میلی‌متر بر ثانیه است که بعد از ۱۵ دقیقه به شدت بارش ۵۵ میلی‌متر بر ثانیه می‌رسد. با توجه به اینکه سناریو ۳ با کمترین شدت بارش در این تحقیق آغاز می‌شود، زمان شروع رواناب برای تمامی تیمارها نسبت به سناریو ۲ دیرتر می‌باشد. همچنین تمامی نمودارها ابتدا بر روی محور زمان (محور افقی) مماس بوده که نشان دهنده حجم رواناب صفر می‌باشد. بعد پایان بارندگی شیب نمودار حجم تجمع کم شده و در نهایت صفر (موازی محور زمان) می‌شود و تا انتهای آزمایش ($t=120 \text{ min}$) به همین شکل باقی می‌ماند

ج

نتایج و بحث

در این پژوهش به بررسی عملکرد سنگدانه شنی متخلخل بدون ژئوسل پلاستیکی (O) و با یک (G1)، دو (G2) و سه (G3) لایه ژئوسل‌های پلاستیکی در میزان دبی حداکثر رواناب، زمان شروع رواناب، ضریب رواناب، زمان پایان رواناب در بعد آزمایشگاهی در سه سناریوی شدت بارش‌های متغیر و شیب‌های صفر و ۵ درصد با کمک دستگاه شبیه‌ساز باران پرداخته شد. این پارامترها در تحقیقات (Liu et al. (2020) اندازه‌گیری شدند. شکل ۶ نمودار تجمع حجم رواناب ایجاد شده از زمان شروع بارش تا پایان یافتن رواناب از حوضچه را برای تیمارهای شن بدون ژئوسل (شاهد)، شن با یک لایه ژئوسل، شن با دو لایه ژئوسل و شن با سه لایه ژئوسل را نشان می‌دهد.

در شکل ۶ به مقایسه حجم تجمع رواناب در حالت‌های مختلف آزمایش از نظر سناریوهای شدت بارش و شیب‌ها برای تیمارهای O، G1، G2 و G3 پرداخته شده است. براساس این شکل در تمامی حالات، G3 نسبت بقیه گروه‌های آزمایش توانست در کاهش رواناب و حجم تجمع عملکرد بهتری داشته باشد. در رتبه‌های بعدی گروه G2، G1 و O قرار می‌گیرند. تنها در سناریو ۱ با شیب ۵ درصد (شکل ۶-ب)، مقدار نهایی حجم تجمع رواناب در تیمارهای G1 و O یکی و منطبق شد. در یک سناریوی شدت بارش معین، زمانی که شیب از صفر درصد به ۵ درصد تغییر می‌کند، حجم تجمع رواناب در تمامی گروه‌های O، G1، G2 و G3 در انتهای آزمایش، افزایش می‌یابد. نمودار حجم تجمع در تمامی تیمارها در سناریو شماره ۱ با سناریوهای ۲ و ۳ متفاوت است. به عبارتی دیگر، در سناریو ۱، شیب



شکل (۶): نمودار تجمعی حجم رواناب در تیمارهای O، G1، G2 و G3 (الف) سناریو ۱، شیب صفر درصد، (ب) سناریو ۱، شیب پنج درصد،

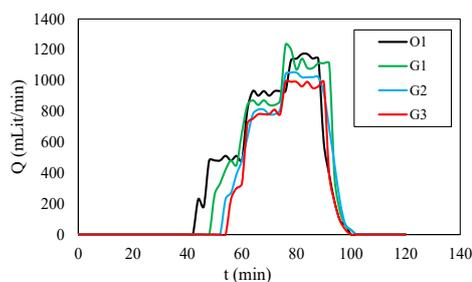
(ج) سناریو ۲، شیب صفر درصد، (د) سناریو ۲، شیب پنج درصد، (ه) سناریو ۳، شیب صفر درصد و (ز) سناریو ۳، شیب پنج درصد

شیب صفر و ۵ درصد، روند تغییرات دبی نسبت به گذشت زمان، برای تمامی تیمارها، روند افزایشی دارد و با تغییر در شدت بارش (افزایش شدت بارش) دبی افزایش پیدا کرده و بصورت پلکانی روند صعودی به خود می‌گیرد. در سناریو ۲ این موضوع برعکس سناریو ۱ می‌باشد. یعنی دبی با بیشترین مقدار خود در همان زمان‌های ابتدایی شروع رواناب گزارش می‌شود و با سپری شدن زمان بارندگی بصورت پلکانی مقدار دبی کاهش می‌یابد. علت این امر بخاطر کم شدن شدت بارش در زمان‌های معین در طول بارندگی می‌باشد. در سناریو ۳، با توجه به اینکه شدت بارش در ۱۵ دقیقه اول، دوم و سوم، چهارم، پنجم و ششم به ترتیب ۴۵ mm/hr، ۵۵ mm/hr، ۲۰۰ mm/hr،

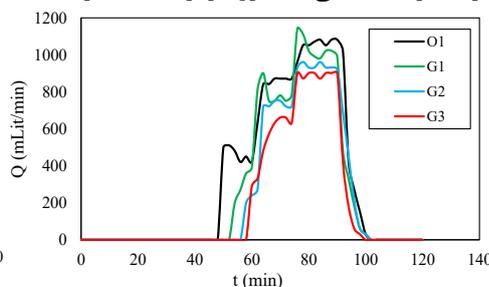
شکل ۷ نمودار تغییرات دبی در برابر زمان از شروع بارش تا پایان یافتن رواناب از حوضچه (Bigurra-Alzati et al. 2020) را برای تیمارهای O، G1، G2 و G3 را نشان می‌دهد. مقایسه نمودار تغییرات دبی در برابر زمان در حالت‌های مختلف آزمایش از نظر سناریوهای شدت بارش و شیب برای تیمارهای O، G1، G2 و G3 در شکل ۷ به آن پرداخته شده است. براساس این شکل بطور کلی تیمارهای O و G3 به ترتیب بیشترین و کمترین دبی را تجربه کردند. در شکل‌های ۷-الف، ۷-ب هر دو در دقیقه ۷۶ تیمار G1 و شکل ۷-ه به ترتیب در دقیقه ۴۲، ۷۶ تیمار G2 بیشترین دبی را داشتند. در زمان‌های دیگر در تمامی تست‌ها، تیمار O بیشترین دبی را تجربه کرد. در سناریو ۱، برای هر دو



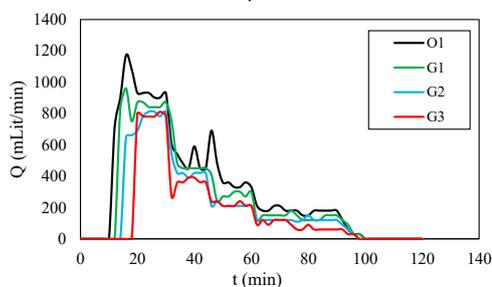
رخ داده است. نتایج حاصل از این بخش و همچنین نمودارهای بدست آمده با تحقیق (Vafa (2018) مطابقت دارد. روند تغییرات دبی در برابر زمان که در شکل ۷ نمایش داده شده است در تحقیق (Ahn et al. (2021) دیده می-شود.



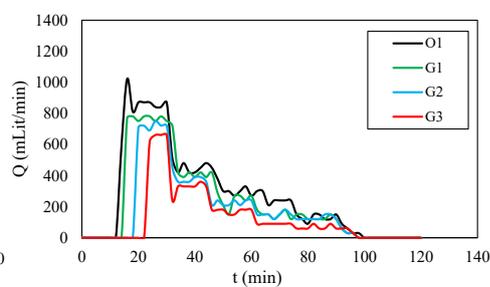
ب



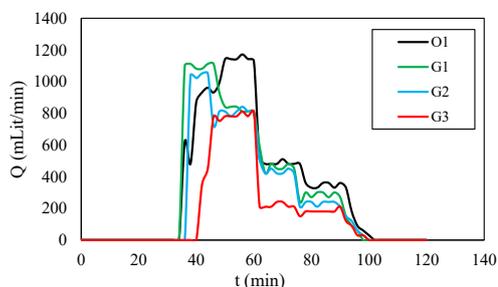
الف



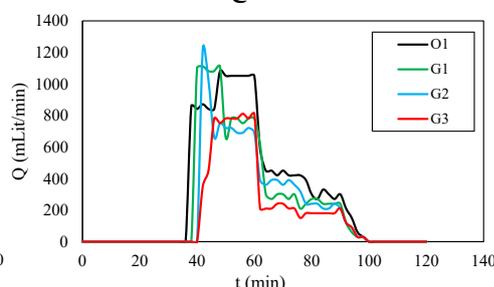
د



ج



ز



ه

شکل (۷): نمودار هیدروگراف در تیمارهای O, G1, G2, و G3 (الف) سناریو ۱، شیب صفر درصد، (ب) سناریو ۱، شیب پنج درصد، (ج) سناریو ۲، شیب صفر درصد، (د) سناریو ۲، شیب پنج درصد، (ه) سناریو ۳، شیب صفر درصد و (ز) سناریو ۳، شیب پنج درصد

و با گذشت زمان به کمترین میزان بارندگی می‌رسد که این امر باعث می‌شود که ظرفیت نفوذ آب در خاک ریستر نسبت به سناریوهای دیگر کامل شود و رواناب زودتر رخ دهد. همچنین با افزایش شیب از صفر درصد به ۵ درصد در یک سناریو مشخص برای یک تیمار، رواناب سریعتر ایجاد می-شود. در کل با افزایش لایه‌های ژئوسل، رواناب دیرتر رخ می‌دهد. به طور مثال در سناریو ۱ و شیب ۵ درصد، زمان شروع رواناب برای مدل‌های G1, G2, G3 و O به ترتیب ۴۴، ۵۰، ۵۴ و ۵۶ دقیقه می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد اجرای لایه‌های بیشتر ژئوسل می‌تواند در زمان شروع رواناب

شروع رواناب تا پایان بارندگی در شدت بارش ۲۰۰ mm/hr، ۱۷۰ mm/hr، ۹۰ mm/hr و ۷۰ mm/hr می‌باشد، از زمان ابتدا دبی روندی صعودی دارد و سپس با کاهش شدت بارش بصورت پلکانی، دبی کاهش می‌یابد. همچنین زمان شروع رواناب در تیمار مشاهداتی (O) زودتر از بقیه تیمارها

در جدول ۴، زمان شروع رواناب (TR)، زمان پایان رواناب (TER)، ضریب رواناب (C) و دبی پیک (PF) برای تمامی تست‌های انجام شده در آزمایشگاه نشان داده شده است. براساس این جدول، زمان شروع رواناب برای تمامی تیمارهای آزمایش در سناریو شماره ۱ دیرتر از شماره ۲ و ۳ اتفاق می‌افتد. علت این موضوع این است که در سناریو ۱ شدت بارش از کمترین به بیشترین شدت بارش مورد مطالعه تغییر می‌کند و ایجاد رواناب دیرتر رخ می‌دهد. در سناریو ۲ رواناب در تمامی تیمارهای مورد بررسی، زودتر رخ می‌دهد. زیرا بارندگی از شدت بارش بیشترین آغاز شده

می‌باشد و مقدار آن ۰/۱ می‌باشد. به طور کلی در یک شیب و در یک سناریو شدت بارش معین، افزایش لایه‌های ژئوسل منجر به کاهش ضریب رواناب می‌گردد. این نتیجه در تحقیق Hou et al. (2022) حاصل شده است. دبی پیک هم مانند ضریب رواناب، می‌تواند با افزایش لایه‌های ژئوسل، کاهش پیدا کند (Hunt et al. 2002).

تاخیر ایجاد کند. به طور کلی نتایج مربوط به زمان شروع رواناب در تحقیق (Chen et al. 2021) مشاهده می‌شود. زمان پایان رواناب برای تمامی تیمارها بین ۹۶ تا ۱۰۰ دقیقه متغیر است. ضریب رواناب برای تیمار شاهد، سناریو ۳ و شیب ۵ درصد در بین تمامی تست‌ها بیشتر بوده و مقدار آن ۰/۲۸۱ بدست آمد. همچنین ضریب رواناب برای تیمار G3، سناریو ۳، شیب صفر درصد کمترین مقدار خود

جدول (۴): نتایج پارامترهای بارش و رواناب شبیه‌سازی شده

نام مخفف مدل	سناریو شدت بارش	شیب (%)	زمان شروع رواناب (دقیقه)	زمان پایان رواناب (دقیقه)	ضریب رواناب	دبی اوج (میلی‌لیتر بر دقیقه)
O1	۱	۰	۵۰	۱۰۰	۰/۲۷۰	۱۰۸۱/۸
	۱	۵	۴۴	۹۸	۰/۲۷۶	۱۱۷۱/۹
	۲	۰	۱۴	۹۸	۰/۲۳۴	۱۰۲۱/۷
G1	۲	۵	۱۲	۹۸	۰/۲۷۴	۱۱۷۱/۹
	۳	۰	۳۸	۹۸	۰/۲۵۵	۱۰۸۱/۸
	۳	۵	۳۶	۱۰۰	۰/۲۸۱	۱۱۷۱/۹
G2	۱	۰	۵۴	۱۰۰	۰/۲۳۰	۱۱۴۱/۹
	۱	۵	۵۰	۱۰۰	۰/۲۷۶	۱۲۳۲
	۲	۰	۱۶	۹۶	۰/۱۹۵	۷۸۱/۳
G3	۲	۵	۱۴	۹۸	۰/۲۲۷	۹۶۱/۶
	۳	۰	۴۰	۹۸	۰/۲۰۸	۱۱۱۱/۸
	۳	۵	۳۶	۹۶	۰/۲۶۲	۱۱۱۱/۸
G3	۱	۰	۵۸	۱۰۰	۰/۲۰۰	۹۶۱/۶
	۲	۵	۲۰	۹۶	۰/۱۵۷	۷۵۱/۲
	۲	۵	۱۶	۹۶	۰/۱۸۲	۸۱۱/۳
G3	۳	۰	۴۲	۹۸	۰/۱۸۱	۱۲۲۱/۳
	۳	۵	۳۸	۹۸	۰/۲۲۶	۱۰۵۱/۷
	۱	۰	۶۰	۹۸	۰/۱۷۳	۹۰۱/۵
G3	۱	۵	۵۶	۹۸	۰/۲۱۱	۹۹۱/۶
	۲	۰	۲۴	۹۶	۰/۱۰۸	۶۶۱/۱
	۲	۵	۲۰	۹۶	۰/۱۴۸	۸۱۱/۳
G3	۳	۰	۴۶	۹۸	۰/۱۰۰	۴۷۰/۱
	۳	۵	۴۲	۹۸	۰/۱۴۷	۸۱۱/۳

ژئوسل بر زمان شروع رواناب در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار است ($p < 0.05$). بر اساس آزمون چنددامنه‌ای Duncan، تیمارهای G2 و G3 در یک گروه آماری مجزا از تیمارهای O و G1 قرار گرفتند. این امر بیانگر آن است که افزایش تعداد لایه‌ها تا دو یا سه لایه، افزایش معنی‌دار TR ایجاد

در جداول ۵ الی ۸ نتایج تحلیل فاکتوریال پارامترهای TR، TER، C و PF براساس متغیرهای مستقل سناریوهای شدت بارش، شیب و تیمارهای O، G1، G2 و G3 بیان شده است. سپس به روش Duncan دسته‌بندی‌ها صورت گرفت. آزمون ANOVA نشان داد که اثر تعداد لایه‌های



Duncan نشان داد که هرچه تعداد لایه‌ها افزایش یافته، مقدار C به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است. تیمار G3 در پایین‌ترین گروه آماری قرار گرفت و با تیمار O اختلاف معنی‌دار داشت. همچنین اثر متقابل شیب و تعداد لایه نیز معنادار بود؛ به این معنا که در شیب بالاتر، کاهش C ناشی از ژئوسل شدیدتر است. براساس جدول ۸، نتایج ANOVA نشان داد تعداد لایه‌های ژئوسل و شدت بارش هر دو اثر معناداری بر دبی پیک دارند ($p < 0.01$). آزمون Duncan نشان داد تیمار G3 کمترین مقدار PF را داشته و به‌طور معنی‌دار با تیمار O متفاوت است. همچنین تفاوت G1 و G2 نسبت به O نیز معنادار بود، هرچند شدت این تفاوت کمتر از G3 بود. اثر شیب نیز به‌طور معناداری PF را افزایش داد، اما در حضور سه لایه ژئوسل اثر شیب تا حدی تعدیل شد.

کرده و موجب تأخیر در شروع رواناب شده است. همچنین اثر شیب نیز معنادار گزارش شد، به‌طوری‌که در شیب ۵٪ زمان شروع رواناب به‌طور محسوسی کوتاه‌تر بود. اثر متقابل شیب و تعداد لایه نیز معنادار بود که نشان می‌دهد کارایی ژئوسل در شیب‌های بالاتر بیشتر خود را نشان می‌دهد. براساس جدول ۶، نتایج آماری نشان داد که اختلاف میانگین TER بین تیمارها در سطح اطمینان ۹۹٪ معنادار است ($p < 0.01$). آزمون Duncan نشان داد تیمار G3 بیشترین تأثیر را در افزایش زمان پایان رواناب دارد و در یک گروه آماری مستقل قرار گرفت. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که افزایش تعداد لایه ژئوسل مدت‌زمان تخلیه رواناب را به‌طور چشمگیری طولانی‌تر کرده است. از سوی دیگر، اثر شدت بارش نیز معنادار بوده و بارش‌های شدیدتر موجب کاهش TER شدند، ولی همچنان تفاوت میان تیمارهای ژئوسل و شاهد حفظ شد. در جدول ۷، تحلیل واریانس نشان داد که تعداد لایه ژئوسل اثر بسیار معناداری بر ضریب رواناب دارد ($p < 0.01$). میانگین مقایسه‌ای

جدول (۵): نتایج تحلیل متغیرهای مستقل بر روی TR

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
s	۲۱۹/۸۰۱	۱	۲۱۹/۸۰۱	۷۰۶۵/۰۱۸	۰/۰۰۰
TIMAR	۸۶۵/۵۳۴	۳	۲۸۸/۵۱۱	۹۲۷۳/۵۷۷	۰/۰۰۰
i	۱۵۹۰۹/۷۱۷	۲	۷۹۵۴/۸۵۸	۲۵۵۶۹۱/۸۸۰	۰/۰۰۰
s * TIMAR	۵/۵۳۴	۳	۱/۸۴۵	۵۹/۲۹۲	۰/۰۰۰
s * i	۳/۰۵۰	۲	۱/۵۲۵	۴۹/۰۲۲	۰/۰۰۰
TIMAR * i	۸۷/۰۱۹	۶	۱۴/۵۰۳	۴۶۶/۱۷۱	۰/۰۰۰
s * TIMAR * i	۵/۰۱۹	۶	۰/۸۳۶	۲۶/۸۸	۰/۰۰۰
Error	۱/۴۹۳	۴۸	۰/۰۳۱		
Total	۱۱۳۴۷۲/۳۰۰	۷۲			
Corrected Total	۱۷۰۹۷/۱۶۶	۷۱			

جدول (۶): نتایج تحلیل متغیرهای مستقل بر روی TER

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
S	.۰۰۱	۱	.۰۰۱	.۰۴۸	.۸۲۸
TIMAR	۱۶/۰۰۳	۳	۵/۳۳۴	۴۴۷/۱۲۰	.۰۰۰
i	۷۴/۴۹۶	۲	۳۷/۲۴۸	۳۱۲۲/۰۴۷	.۰۰۰
S * TIMAR	.۰۰۳	۳	.۰۰۱	.۰۷۷	.۹۷۲
S * i	۲/۸۰۵	۲	۱/۴۰۲	۱۱۷/۵۳۷	.۰۰۰
TIMAR * i	۲۸/۹۰۹	۶	۴/۸۱۸	۴۰۳/۸۵۲	.۰۰۰
S * TIMAR * i	۲۰/۶۰۵	۶	۳/۴۳۴	۲۸۷/۸۵۰	.۰۰۰
Error	.۰۵۷۳	۴۸	.۰۱۲		
Total	۶۹۱۷۴۸/۶۰۷	۷۲			
Corrected Total	۱۴۳/۳۹۴	۷۱			

جدول (۷): نتایج تحلیل متغیرهای مستقل بر روی C

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
S	.۰۰۲۴	۱	.۰۰۲۴	۳۸۶۵۴/۸۱۸	.۰۰۰
TIMAR	.۰۱۳۸	۳	.۰۰۴۶	۷۵۲۵۱/۴۵۵	.۰۰۰
i	.۰۰۲۳	۲	.۰۰۱۱	۱۸۶۷۱/۳۴۱	.۰۰۰
S * TIMAR	.۰۰۰۱	۳	.۰۰۰	۴۹۳/۸۷۹	.۰۰۰
S * i	.۰۰۰	۲	.۰۰۰	۳۰۳/۵۶۸	.۰۰۰
TIMAR * i	.۰۰۰۸	۶	.۰۰۰۱	۲۲۰۰/۹۷۷	.۰۰۰
S * TIMAR * i	.۰۰۰۱	۶	.۰۰۰	۲۷۸/۱۷۴	.۰۰۰
Error	۲/۹۳۳E-۵	۴۸	۶/۱۱۱E-۷		
Total	۳/۳۹۲	۷۲			
Corrected Total	.۰۱۹۵	۷۱			

جدول (۸): نتایج تحلیل متغیرهای مستقل بر روی PF

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
S	۹۳۰۸۸/۹۳۳	۱	۹۳۰۸۸/۹۳۳	۸/۲۷۵	.۰۰۶
TIMAR	۱۱۰۰۸۷۲/۶۰۸	۳	۳۶۶۹۵۷/۵۳۶	۳۲/۶۱۸	.۰۰۰
i	۶۹۶۵۸۴/۲۶۶	۲	۳۴۸۲۹۲/۱۳۳	۳۰/۹۵۹	.۰۰۰
S * TIMAR	۱۳۱۱۳۵/۴۱۴	۳	۴۳۷۱۱/۸۰۵	۳/۸۸۵	.۰۱۴
S * i	۳۰۷۲/۶۰۰	۲	۱۵۳۶/۳۰۰	.۰/۱۳۷	.۸۷۳
TIMAR * i	۷۳۸۱۵۷/۶۱۶	۶	۱۲۳۰۲۶/۲۶۹	۱۰/۹۳۶	.۰۰۰
S * TIMAR * i	۱۴۵۹۵۱/۱۰۴	۶	۲۴۳۲۵/۱۸۴	۲/۱۶۲	.۰۶۳
Error	۵۴۰۰۰/۱۸۰۷	۴۸	۱۱۲۵۰/۰۳۸		
Total	۷۰۹۴۱۸۹۲/۷۱۰	۷۲			
Corrected Total	۳۴۴۸۸۶۴/۳۴۹	۷۱			

۴ پارامتر وابسته TR، TER، C و PF استفاده شد. نتایج آن در هر ۴ مورد بررسی تفاوت معنی داری بین دو سطح شیب در خروجی‌ها ایجاد نمی‌شود ($P \geq 0.05$). تحلیل آماری نشان داد که تیمارهای ژئوسل اثر بسیار معناداری بر حجم تجمعی رواناب دارند ($p < 0.001$). نتایج آزمون Duncan حاکی از آن است که تیمار G3 به‌طور معنی داری حجم رواناب را نسبت به همه تیمارهای دیگر کاهش داده و در گروه آماری جداگانه قرار گرفته است. همچنین تیمار G2 نیز کاهش معناداری نسبت به O داشت، اما اختلاف G2 و G1 در برخی سناریوها غیرمعنادار گزارش شد. شدت بارش اثر افزایشی بر حجم تجمعی رواناب داشت، ولی در همه شرایط، استفاده از ژئوسل توانست این افزایش را به‌طور معنادار تعدیل کند.

در جدول ۹ تقسیم‌بندی پارامترهای سناریوهای شدت بارش و تیمارهای آزمایش برای داده‌های وابسته TR، TER، C و PF براساس روش Duncan انجام شد. برای متغیر وابسته TR برای ۳ سناریو i و ۴ تیمار هر یک در گروه متفاوتی قرار گرفتند. به عبارتی دیگر تغییرات سناریو شدت بارش و نمونه‌تست‌ها (تیمارها) می‌تواند در پارامتر TR تغییرات ایجاد کند. این موضوع برای متغیرهای وابسته C هم صادق است. برای متغیر وابسته TER برای ۳ سناریو i هر یک در گروه متفاوتی قرار گرفتند. اما برای در تقسیم بندی تیمارها، G1 و G2 در یک دسته قرار گرفتند. این موضوع برای متغیرهای وابسته PF هم صادق است. لازم به‌ذکر است برای پارامتر مستقل S، با توجه به اینکه در دو سطح صفر و ۵ درصد در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفته شده است، از روش t-student نیز برای

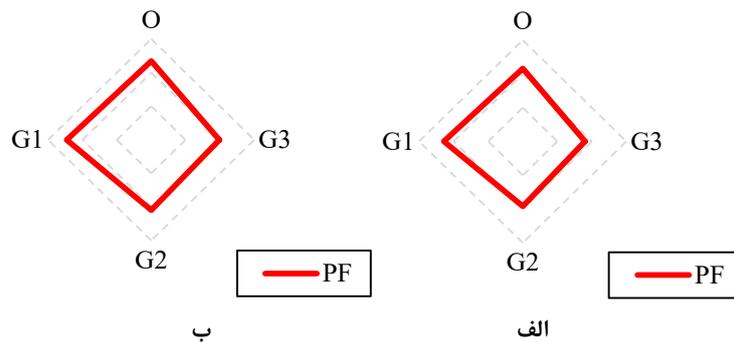
جدول (۹): تیپ بندی پارامترهای TR، TER، C و PF براساس متغیرهای مستقل سناریو شدت بارش و تیمارها با روش Duncan

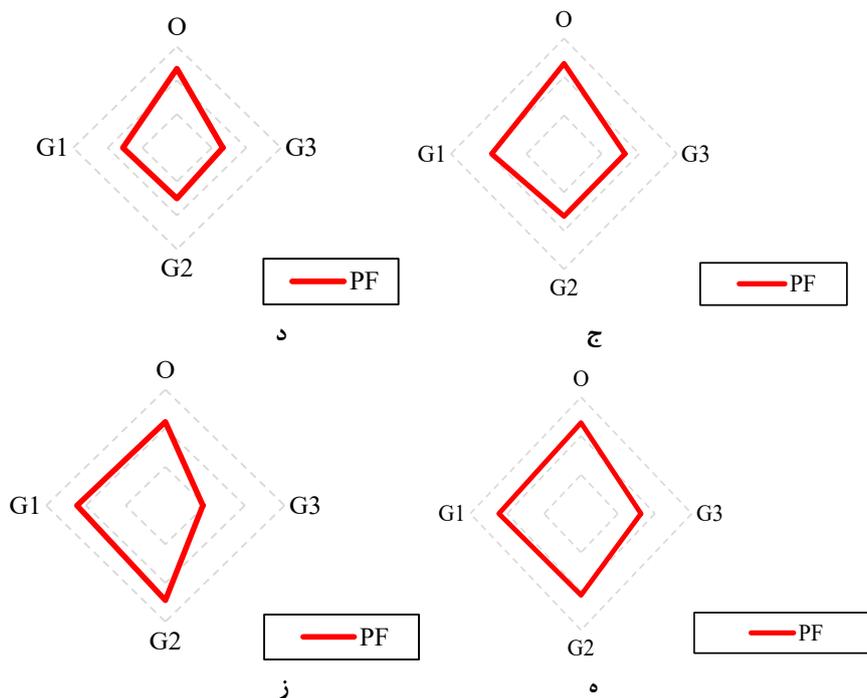
		Subset					
			N	1	2	3	4
TR	i	۲/۰۰	۲۴	۱۷/۰۰۴۲			
		۳/۰۰	۲۴		۳۹/۷۵۴۲		
		۱/۰۰	۲۴			۵۳/۰۰۰۰	
		Sig.		۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	
	Timar	G3	۱۸	۳۲/۰۰۵۶			
		G2	۱۸		۳۵/۰۰۰۰		
		G1	۱۸			۳۸/۰۰۰۰	
		O	۱۸				۴۱/۳۳۸۹
		Sig.		۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
TER	i	۲/۰۰	۲۴	۹۶/۷۶۲۵			
		۳/۰۰	۲۴		۹۸/۰۰۸۳		
		۱/۰۰	۲۴			۹۹/۲۵۴۱	
		Sig.		۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	
	Timar	G3	۱۸	۹۷/۳۳۸۸			
		G2	۱۸		۹۸/۰۱۱۱		
		G1	۱۸		۹۸/۰۱۱۱		
		O	۱۸			۹۸/۶۷۲۲	
		Sig.		۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	
C	i	۲/۰۰	۲۴	۰/۱۹۰۷۱			
		۳/۰۰	۲۴		۰/۲۰۷۵۰		
		۱/۰۰	۲۴			۰/۲۳۳۹۶	
		Sig.		۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	
	Timar	G3	۱۸	۰/۱۴۷۶۷			
		G2	۱۸		۰/۱۹۶۸۳		

	G1	۱۸			۰/۱۹۶۸۳	
	O	۱۸				۰/۲۶۵۵۶
	Sig.		۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
PF	i	۲/۰۰	۲۴	۸۳۳/۹۰۴۲		
		۳/۰۰	۲۴		۱۰۰۳/۹۳۳۳	
		۱/۰۰	۲۴			۱۰۶۶/۷۵۰۰
	Sig.		۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	
Timar	G3	۱۸	۷۴۴/۴۳۳۳			
	G2	۱۸		۹۷۴/۸۰۰۰		
	G1	۱۸		۱۰۰۶/۷۳۸۹		
	O	۱۸			۱۱۱۶/۸۱۱۱	
	Sig.		۱/۰۰۰	۰/۳۷۱	۱/۰۰۰	

نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در اکثر حالات اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه برای تیمار O بیشترین دبی پیک و برای تیمار G3 کمترین دبی پیک گزارش می‌شود. در برخی از موارد، مقدار دبی پیک در G1 از O بیشتر می‌شود (شکل ۸- الف، ب و ۸- ه). اما این موضوع برای تیمارهای G2 و G3 وجود ندارد و در تیمارهای G3 در تمامی حالات کمترین دبی پیک را شاهد هستیم. بعد از تیمار G3، تیمار G2 کمترین دبی پیک در تمامی ۶ حالت آزمایش مشاهده می‌شود.

رادار چارت یا نمودار راداری یا نمودار عنکبوتی یا نمودار ستاره‌ای، نموداری است که با نمایش یک یا چند، چندضلعی وضعیت متغیرهای مختلف مورد نیاز را ترسیم می‌کند. با مشاهده نمودار راداری، میزان نزدیکی و شباهت متغیرهای هم جنس قابل درک خواهد بود. در شکل‌های ۸ الی ۱۰ نمودار عنکبوتی داده‌های دبی پیک، ضریب رواناب و زمان شروع و پایان رواناب برای پوشش‌های O، G1، G2 و G3 ترسیم شده و برای همه حالت‌ها از آزمایش با هم مقایسه شده‌اند. در شکل ۸، نمودار عنکبوتی دبی پیک برای پوشش‌های O، G1، G2 و G3 برای ترکیب‌های مختلف و براساس نتایج جدول ۴، شدت بارش‌ها و شیب‌های مختلف

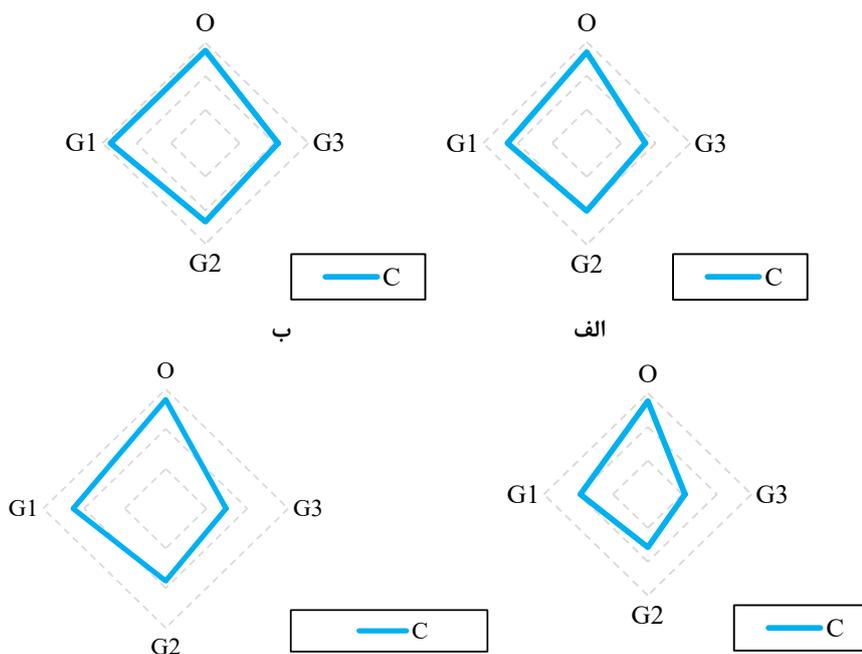


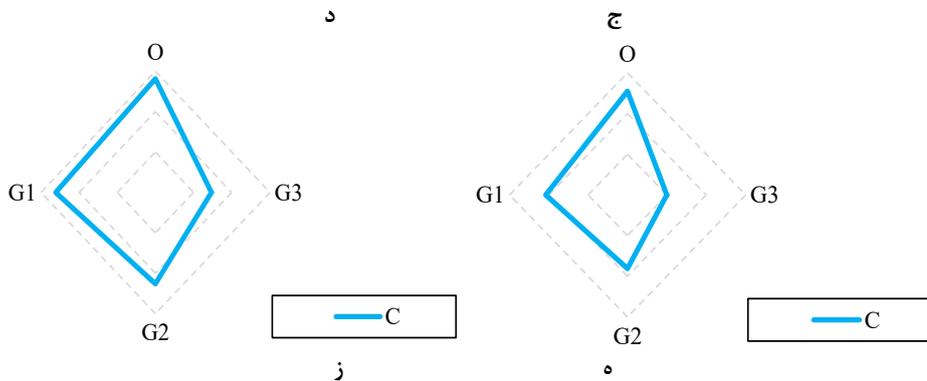


شکل (۸): نمودار راداری مقایسه دبی بیک برای تیمارهای مختلف آزمایش، الف: سناریو ۱ و شیب صفر درصد، ب: سناریو ۱ و شیب ۵٪، ج: سناریو ۲ و شیب صفر درصد، د: سناریو ۲ و شیب ۵٪، ه: سناریو ۳ و شیب صفر درصد و ز: سناریو ۳ و شیب ۵٪

به ۵ درصد تغییر می‌کند، ضریب رواناب در تمامی تیمارهای O، G1، G2 و G3 افزایش می‌یابد. در حالت کلی می‌توان نتایج حاصل از ضریب رواناب در این تحقیق را با نتایج تحقیقات (Mullaney and Hunt et al. (2002 و Lucke, (2014 نزدیک دانست.

در شکل ۹ نمودار راداری ضریب رواناب برای پوشش‌های O، G1، G2 و G3 برای سناریوهای شدت بارش‌ها و شیب‌های مختلف بر حسب درصد نشان داده شده است. برای یک سناریو شدت بارش و شیب مشخص، مقدار C برای تیمار O بیشترین و برای تیمار G3 کمترین می‌باشد. در یک شدت بارش مشخص، زمانی که شیب از صفر درصد

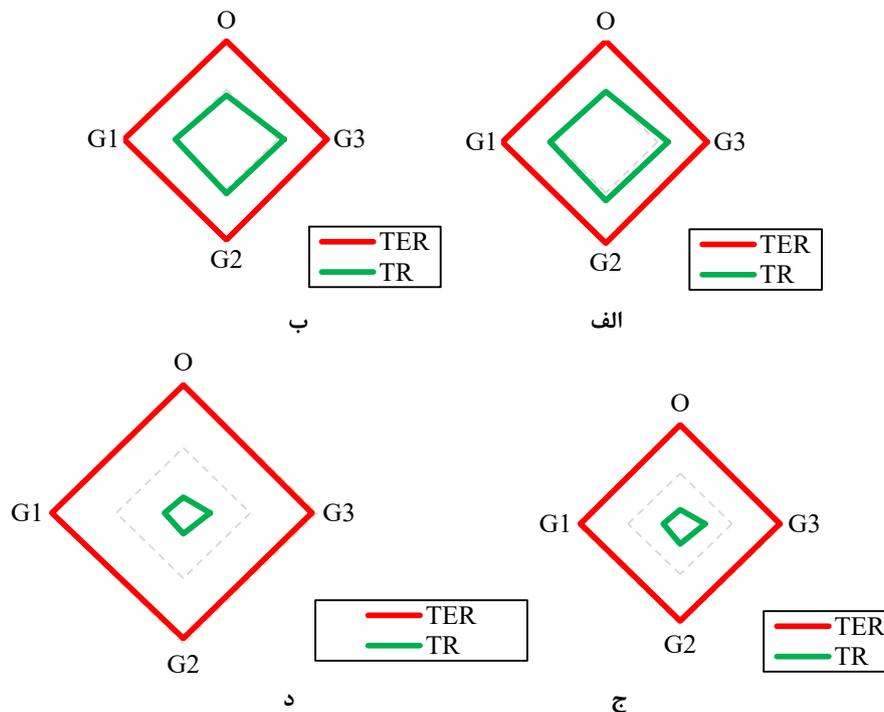


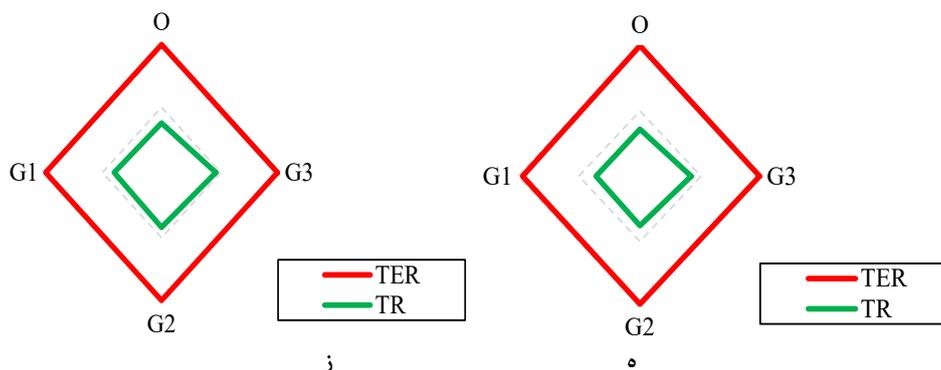


شکل (۹): نمودار راداری مقایسه ضریب رواناب برای تیمارهای مختلف آزمایش، الف: سناریو ۱ و شیب صفر درصد، ب: سناریو ۱ و شیب ۵٪، ج: سناریو ۲ و شیب صفر درصد، د: سناریو ۲ و شیب ۵٪، ه: سناریو ۳ و شیب صفر درصد و ز: سناریو ۳ و شیب ۵٪

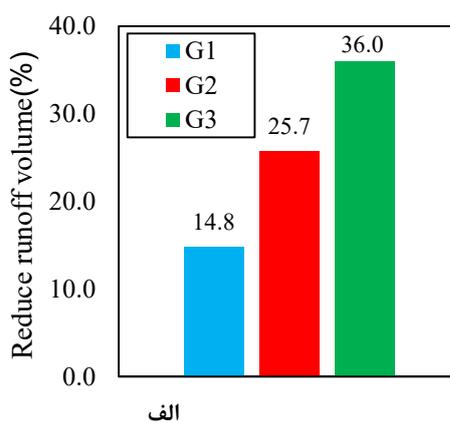
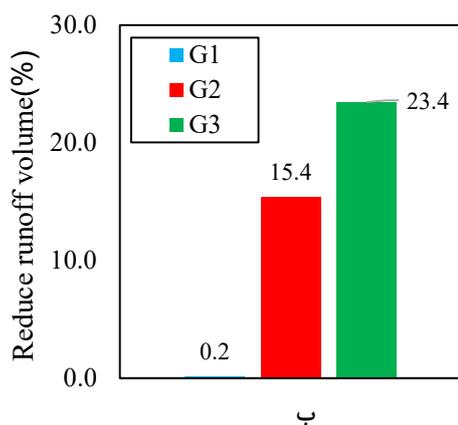
لایه‌های بیشتری از ژئوسل است، زودتر اتفاق می‌افتد. این موضوع جامعیت کامل نداشته و مواردی وجود که زمانی که لایه ژئوسل در خاک افزایش می‌یابد، زمان پایان رواناب تغییر نکرده و حتی در برخی موارد بیشتر هم شده است. همچنین در یک شیب ثابت، با تغییر الگو شدت بارش، تاثیر مشخصی در روند زمان اتمام رواناب دیده نمی‌شود. همچنین این موضوع در حالت برعکس، یعنی در شدت بارش ثابت و شیب متغیر صادق است. این موضوع در پژوهش Chen et al. (2021) مشاهده می‌شود.

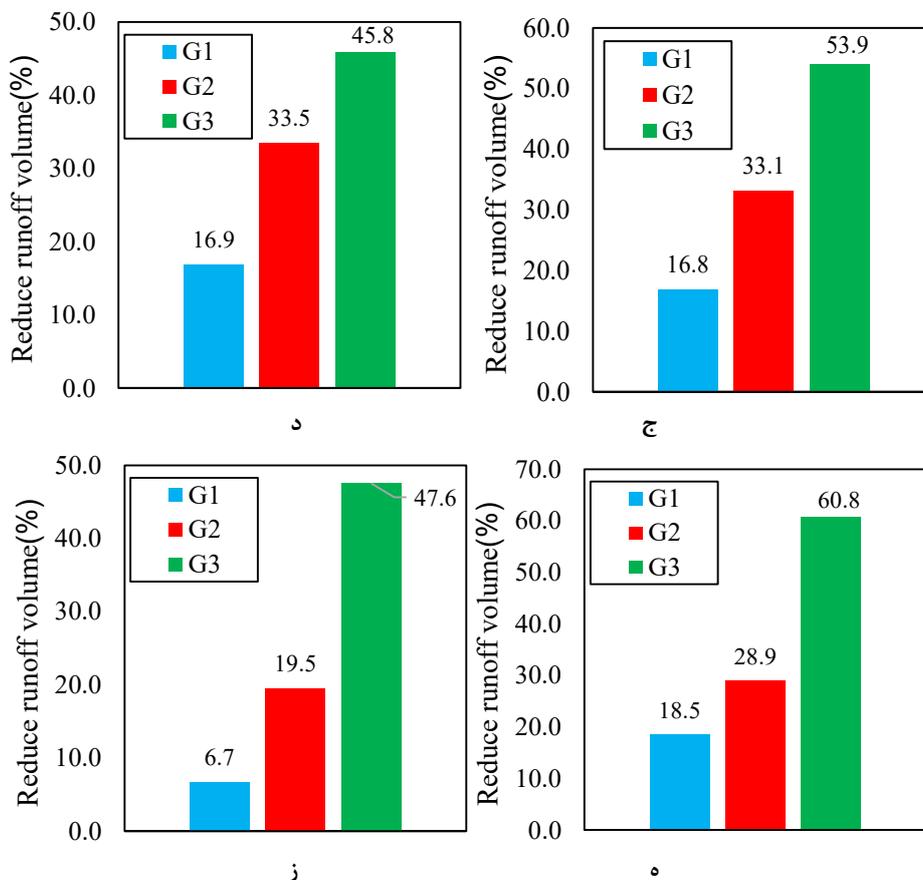
نمودار عنکبوتی زمان شروع رواناب (TR) و زمان پایان رواناب (TER) برای تیمارهای مختلف و در شرایط متفاوت آزمایش در شکل ۱۰ نشان داده شده است. زمان شروع رواناب برای یک آزمایش، برای تمامی حالات در تیمار مشاهداتی (O) زودتر از تیمارهای G1، G2 و G3 رخ می‌دهد. در یک حالت سناریو ۳ و شیب ۵ درصد، زمان شروع رواناب در G1 و O یکسان می‌باشد. در شیب ثابت، با افزایش زمان پایان رواناب از ۶ دقیقه بعد از پایان بارش تا ۱۰ دقیقه بعد از اتمام بارش گزارش می‌شود. در برخی از حالت‌ها زمان پایان رواناب در تیماری که دارای پوشش





شکل (۱۰): نمودار عنکبوتی مقایسه زمان شروع و پایان رواناب برای تیمارهای مختلف آزمایش، الف: سناریو ۱ و شیب صفر درصد، ب: سناریو ۱ و شیب ۵٪، ج: سناریو ۲ و شیب ۵٪، د: سناریو ۲ و شیب صفر درصد، ه: سناریو ۳ و شیب صفر درصد و ز: سناریو ۳ و شیب ۵٪. نمودار درصد کاهش حجم رواناب در پوشش‌های G1، G2، و G3 برای حالت‌های مختلف آزمایش (۶ حالت مختلف) در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بر اساس این شکل در تمامی حالات سناریو‌های شدت بارش و شیب‌های مختلف، زمانی که سه لایه ژئوسل در خاک استفاده می‌شود نسبت به زمانی که دو و یک لایه ژئوسل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، درصد کاهش حجم رواناب بیشتر است. در رتبه بعدی وقتی دو لایه ژئوسل استفاده می‌شود نیز عملکرد بهتری در کاهش حجم رواناب نسبت به یک لایه ژئوسل دیده می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش لایه ژئوسل در خاک می‌تواند در کاهش حجم رواناب کمک شایانی کند. بیشترین و کمترین درصد کاهش حجم رواناب در تیمار G3 به ترتیب ۶۰/۸ و ۲۳ درصد بود. همچنین در تیمار





شکل (۱۱): نتایج کاهش حجم رواناب در تیمارهای دارای پوشش ژئوسل، الف: سناریو ۱ و شیب صفر درصد، ب: سناریو ۱ و شیب ۵٪، ج: سناریو ۲ و شیب صفر درصد، د: سناریو ۲ و شیب ۵٪، ه: سناریو ۳ و شیب صفر درصد، ز: سناریو ۳ و شیب ۵٪

پایه‌های منطقی برای تعمیم اولیه نتایج فراهم کرده و می‌تواند مبنایی برای مطالعات آینده باشد.

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، بررسی کمی تاثیر لایه‌های ژئوسل بر روی برخی از پارامترهای حوضه آبریز، مانند میزان کاهش حجم رواناب، زمان شروع و پایان رواناب، ضریب رواناب و دبی پیک در بعد آزمایشگاهی بود. در مجموع ۲۴ تست بر روی ۴ تیمار شن، شن با یک لایه ژئوسل، شن با دو لایه ژئوسل و شن با سه لایه ژئوسل در ۳ سناریو شدت بارش و دو حالت شیب انجام شد. افزایش لایه ژئوسل‌ها یکپارچگی سطح شیب را حفظ کردند و با افزایش لایه ژئوسل، زمان شروع رواناب را نیز به تاخیر می‌افتد. قرار دادن سه لایه ژئوسل نسبت به زمانی که نمونه بدون ژئوسل است می‌تواند تا ۱۴ دقیقه تاخیر در شروع رواناب را ایجاد کند.

هرچند این مطالعه نتایج ارزشمندی در مورد تأثیر لایه‌های ژئوسل بر پارامترهای رواناب ارائه می‌دهد، اما مقیاس آزمایشگاهی ذاتاً محدود است و نمی‌تواند تمام پیچیدگی‌های شرایط میدانی را بازسازی کند. در پژوهش حاضر، تنها از یک نوع مصالح (شن متخلخل با مشخصات دانه‌بندی خاص) و دو سطح شیب (۰٪ و ۵٪) استفاده شده است، که این امر تعمیم نتایج به شرایط متنوع‌تر را محدود می‌سازد. بنابراین، برای بررسی اثرات در اقلیم‌های دیگر، انواع مصالح متفاوت (مانند خاک‌های رسی یا ترکیبی)، و هندسه‌های گوناگون (مانند شیب‌های بالاتر یا ابعاد بزرگ‌تر)، نیاز به تحقیقات تکمیلی آزمایشگاهی و میدانی وجود دارد. با این حال، بهره‌گیری از سه سناریوی شدت بارش مبتنی بر اقلیم‌های متفاوت (خشک، مدیترانه‌ای و مرطوب)، همراه با دو سطح شیب و افزایش لایه‌های ژئوسل،



اختلاف معنی‌داری در پارامترهای زمان شروع و ضریب رواناب ایجاد کند. برای پارامترهای دبی پیک و زمان پایان رواناب در شرایطی که سطح خاک با یک لایه ژئوسل است، با زمانی که سطح خاک با دو لایه ژئوسل می‌باشد، تفاوت معنی‌داری مشاهده نمی‌گردد. همچنین در شیب صفر و ۵ درصد برای پارامتر دبی پیک و زمان پایان رواناب تفاوت معنی‌داری برای پوشش‌ها دیده نمی‌شود. در مجموع افزایش لایه ژئوسل در لایه‌های خاک می‌تواند در ایجاد کاهش آب گرفتگی و کاهش حجم رواناب موثر واقع شود. برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود در شرایط خاک مورد مطالعه در این پژوهش، میزان فرسایش خاک و وضعیت کیفی رواناب با و بدون لایه‌های ژئوسل مورد بررسی قرار بگیرد.

این موضوع می‌تواند در کنترل سیلاب موثر باشد. حجم تجمعی رواناب و درصد کاهش حجم رواناب در پوشش ژئوسل با سه لایه به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار را در تمامی حالات آزمایش داشت. با افزایش شیب میزان کاهش حجم رواناب در تمامی سناریوهای بارش بیشتر می‌شود. با قرار دادن سه لایه ژئوسل می‌توان به کاهش ۶۰ درصدی حجم رواناب رسید. این موضوع نشان می‌دهد که هر افزایش لایه ژئوسل در سطح خاک می‌تواند در زهکشی و افزایش نفوذ خاک کمک شایانی انجام دهد. تغییرات الگوی شدت بارش می‌تواند در نتایج پارامترهای زمان شروع و پایان رواناب، ضریب رواناب تاثیرگذار باشد. به عنوان نمونه اجرای سه لایه ژئوسل می‌تواند تا ۵۸ درصد ضریب رواناب را کاهش دهد. همچنین با انجام تحلیل آماری می‌توان دریافت که تغییر در سطح و تعداد لایه ژئوسل می‌تواند

منابع

- Abdelkebir, B., Maoui, A., Mokhtari, E., Engel, B., Chen, J., and Aboelnour, M. 2021. Evaluating Low-Impact Development practice performance to reduce runoff volume in an urban watershed in Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(9): 1–10.
- Ahiablame, L. M., Engel, B. A., and Chaubey, I. 2013. Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement. *Journal of environmental management*, 119: 151–161.
- Ahn, J., Nguyen, T. H., Yoo, I. K., and Oh, J. 2021. Investigation of Mechanical and Hydrologic Characteristics of Porous Asphalt Pavement with a Geocell Composite. *Materials*, 14(12): 3165.
- Akther, M., He, J., Chu, A., Huang, J., and Van Duin, B. 2018. A review of green roof applications for managing urban stormwater in different climatic zones. *Sustainability*, 10(8): 2864.
- Berndtsson, J. C., Emilsson, T., and Bengtsson, L. 2006. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. *Science of the Total Environment*, 355(1–3): 48–63.
- Bigurra-Alzati, C. A., Ortiz-Gómez, R., Vázquez-Rodríguez, G. A., López-León, L. D., and Lizárraga-Mendiola, L. 2020. Water Conservation and Green Infrastructure Adaptations to Reduce Water Scarcity for Residential Areas with Semi-Arid Climate: Mineral de la Reforma, Mexico. *Water*, 13(1): 45.
- Bonneau, J., Fletcher, T. D., Costelloe, J. F., and Burns, M. J. 2017. Stormwater infiltration and the 'urban karst'—A review. *Journal of hydrology*, 552: 141–150.
- Brunetti, G., Šimůnek, J., and Piro, P. 2016. A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement. *Journal of Hydrology*, 540: 1146–1161.
- Carson, T. B., Marasco, D. E., Culligan, P. J., and McGillis, W. R. 2013. Hydrological performance of extensive green roofs in New York City: observations and multi-year modeling of three full-scale systems. *Environmental Research Letters*, 8(2): 24036.
- Chen, W., Zheng, M., Gao, Q., Deng, C., Ma, Y., and Ji, G. 2021. Simulation of surface runoff control effect by permeable pavement. *Water Science and Technology*, 83(4): 948–960.
- Coffman, L. 2000. *Low-impact development design strategies, an integrated design approach*. Prince George's County, Maryland: Department of Environmental Resources, Programs and Planning Division.
- Conley, G., Beck, N., Riihimaki, C. A., and Tanner, M. 2020. Quantifying clogging patterns of infiltration systems to improve urban stormwater pollution reduction estimates. *Water research X*,



- 7: 100049.
- Dehghani, H., Haji Agha Bozorgi, H., and Ghaemi, A. A. 2019. The Effect of Different Irrigation Regimes under Subsurface Drip Irrigation System on Soil Moisture Distribution in Pistachio Orchard. *Water and Soil*, 33(3): 391–404.
- Dehghanipour, M. H., Ghazvinian, H., and Dehghanipour, A. 2021a. Evaluation of the efficiency of artificial intelligence models for simulating evaporation in arid, semi-arid, and very-wet climates of Iran. *Iran-Water Resources Research*, 17(1): 318–327.
- Dehghanipour, M. H., Karami, H., Ghazvinian, H., Kalantari, Z., and Dehghanipour, A. H. 2021b. Two Comprehensive and Practical Methods for Simulating Pan Evaporation under Different Climatic Conditions in Iran. *Water*, 13(20): 2814.
- Deska, I., Mrowiec, M., Ociepa, E., and Lewandowska, A. 2020. Influence of the hydrogel amendment on the water retention capacity of extensive green roof models. *Journal of Ecological Engineering*, 21(1): 195-204.
- Dhakal, K. P., and Chevalier, L. R. 2015. Implementing low impact development in urban landscapes: A policy perspective. *World Environmental and Water Resources Congress*, 2015: 322–333.
- Dietz, M. E. 2007. Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. *Water, air, and soil pollution*, 186(1): 351–363.
- Drake, J. A. P., Bradford, A., and Marsalek, J. 2013. Review of environmental performance of permeable pavement systems: state of the knowledge. *Water Quality Research Journal of Canada*, 48(3): 203–222.
- Dreelin, E. A., Fowler, L., and Ronald Carroll, C. 2006. A test of porous pavement effectiveness on clay soils during natural storm events. *Water Research*, 40(4): 799–805.
- Fan, L., Wang, J., Liu, X., Luo, H., Zhang, K., Fu, X., Li, M., Li, X., Jiang, B., and Chen, J. 2020. Whether the carbon emission from green roofs can be effectively mitigated by recycling waste building material as green roof substrate during five-year operation? *Environmental Science and Pollution Research*, 27(32): 40893–40906.
- Ferguson, B. K. 2005. *Porous Pavements*. cRc press Boca Raton.
- Fisher-Jeffes, L. N., Armitage, N. P., Carden, K., Winter, K., and Okedi, J. 2017. Addressing water scarcity in South Africa through the use of LID. *International Low Impact Development Conference 2016: Mainstreaming Green Infrastructure*, American Society of Civil Engineers Reston, VA, 20–28.
- Ghazvinian, H., and Karami, H. 2023a. Effect of Rainfall Intensity and Slope at the Beginning of Sandy Loam Soil Runoff using Rain Simulator (Case Study: Semnan City). *JWSS-Isfahan University of Technology*, 26(4): 319–334.
- Ghazvinian, H., and Karami, H. 2023b. Laboratory study of the effect of vegetation and gravel on runoff parameters under variable rainfall intensities. *Water Science & Technology*, 88(9): 2423–2442.
- Ghazvinian, H., and Karami, H. 2023c. Laboratory comparison of vegetation and gravel on parameters affecting urban floods under different rainfall and runoff conditions. *Journal of Water and Climate Change*, 14(12): 4763–4781.
- Ghazvinian, H., and Karami, H. 2024. Evaluating the effect of geocell with vegetation and gravel on changes in the effective parameters of runoff using a rainfall simulator (case study: Iran). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 103585.
- Ghazvinian, H. R., Karami, H., and Dadrasajirlou, Y. 2024. Field Comparison Studies of the Rate of Evaporation Between Colorado Sunken Evaporation Pan and Class A Evaporation Pans in the Arid Areas (Case Study: Semnan City). *JWSS-Isfahan University of Technology*, 28(2): 45–65.
- Ghazvinian, H., and Karami, H. 2025a. Evaluating the impact of meteorological parameters on road accidents using spatial analysis: a case study of Semnan province, Iran. *Spatial Information Research*, 33(5): 1-16.
- Ghazvinian, H., and Karami, H. 2025b. The Application of Artificial Intelligence in Predicting the Effect of Gravel and Vegetation Cover on the Urban Runoff Volume Using Experimental Data. *Water Resources Management*, 1-26. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04246-y>

- Hager, J., Hu, G., Hewage, K., and Sadiq, R. 2019. Performance of low-impact development best management practices: a critical review. *Environmental Reviews*, 27(1): 17–42.
- Hou, G., Zheng, J., Cui, X., He, F., Zhang, Y., Wang, Y., Li, X., Fan, C., and Tan, B. 2022. Suitable coverage and slope guided by soil and water conservation can prevent non-point source pollution diffusion: A case study of grassland. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 241: 113804.
- Houle, J. J., Roseen, R. M., Ballesteros, T. P., Puls, T. A., and Sherrard Jr, J. 2013. Comparison of maintenance cost, labor demands, and system performance for LID and conventional stormwater management. *Journal of environmental engineering*, 139(7): 932–938.
- Hunt, B., Stevens, S., and Mayes, D. 2002. Permeable Pavement Use and Research at Two Sites in Eastern North Carolina. *Global Solutions for Urban Drainage*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 1–10.
- Jayasuriya, N., and Kadurupokune, N. 2010. Comparative performance of permeable and porous pavements. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Built Environments (ICSBE) 2010*.
- Karami, H., and Ghazvinian, H. 2022. A Practical and Economic Assessment Regarding the Effect of Various Physical Covers on Reducing Evaporation from Water Reservoirs in Arid and Semi-Arid Regions (Experimental Study). *Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN*, 53(6): 1297–1313.
- Karami, H., Ghazvinian, H., and Dadrasajirlou, Y. 2023. Application of statistical and geostatistical approaches in temporal and spatial estimations of rainfall. *Journal of Water and Climate Change*, 14(5): 1696–1722.
- Kim, J.-H., Kim, H. Y., and Demarie, F. 2017. Facilitators and barriers of applying low impact development practices in urban development. *Water Resources Management*, 31(12): 3795–3808.
- Li, F., Chen, J., Engel, B. A., Liu, Y., Wang, S., and Sun, H. 2020. Assessing the Effectiveness and Cost Efficiency of Green Infrastructure Practices on Surface Runoff Reduction at an Urban Watershed in China. *Water*, 13(1): 24.
- Li, F., Liu, Y., Engel, B. A., Chen, J., and Sun, H. 2019. Green infrastructure practices simulation of the impacts of land use on surface runoff: Case study in Ecorse River watershed, Michigan. *Journal of environmental management*, 233: 603–611.
- Liu, H., Kong, F., Yin, H., Middel, A., Zheng, X., Huang, J., Xu, H., Wang, D., and Wen, Z. 2021a. Impacts of green roofs on water, temperature, and air quality: A bibliometric review. *Building and Environment*, 196: 107794.
- Liu, T., Lawluy, Y., Shi, Y., and Yap, P.-S. 2021b. Low Impact Development (LID) Practices: A Review on Recent Developments, Challenges and Prospects. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(9): 344.
- Liu, W., Feng, Q., Chen, W., and Deo, R. C. 2020. Stormwater runoff and pollution retention performances of permeable pavements and the effects of structural factors. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(24): 30831–30843.
- Monrose, J., and Tota-Maharaj, K. 2018. Technological Review of Permeable Pavement Systems for Applications in Small Island Developing States. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 46(9): 1700168.
- Mullaney, J., and Lucke, T. 2014. Practical Review of Pervious Pavement Designs. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 42(2): 111–124.
- Newcomer, M. E., Gurdak, J. J., Sklar, L. S., and Nanus, L. 2014. Urban recharge beneath low impact development and effects of climate variability and change. *Water Resources Research*, Wiley Online Library, 50(2): 1716–1734.
- Papakos, T. H., Gould, M., and Brunner, J. 2010. Redeveloping Brownfields with LID Design. *Low Impact Development 2010*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 1684–1697.
- Parsons, A. J., and Stone, P. M. 2006. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion. *Catena*, 67(1): 68–78.
- Rodrigues, A. L. M., da Silva, D. D., and de Menezes Filho, F. C. M. 2021. Methodology for allocation of best management practices integrated with the urban landscape. *Water Resources Management*, 35(4): 1353–1371.



- Rosen, A. 2013. The use of geocells for slope protection under special conditions. in Proceedings of the International Symposium on Design and Practice of Geosynthetic-Reinforced Soil Structures, Bologna, Italy, October.
- Rowe, D. B. 2011. Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental pollution*, 159(8–9): 2100–2110.
- Saadat Foomani, M., and Malekmohammadi, B. 2020. Site selection of sustainable urban drainage systems using fuzzy logic and multi-criteria decision-making. *Water and Environment Journal*, 34(4): 584–599.
- Sato, T., and Kojima, K. 2018. Development of slope protection work using geocell and soil nailing. *Japanese Railway Engineering*, 4: 1–3.
- Shafique, M., and Kim, R. 2017. Retrofitting the low impact development practices into developed urban areas including barriers and potential solution. *Open Geosciences*, 9(1): 240–254.
- Shuster, W. D., Lye, D., De La Cruz, A., Rhea, L. K., O’Connell, K., and Kelty, A. 2013. Assessment of residential rain barrel water quality and use in Cincinnati, Ohio. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 49(4): 753–765.
- Song, G., He, S., Song, X., Duan, Z., Zhang, Y., Kong, D., and Huang, M. 2021a. The use of geocell as soil stabilization and soil erosion countermeasures. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1): 2155–2169.
- Song, X., Huang, M., He, S., Song, G., Shen, R., Huang, P., and Zhang, G. 2021b. Erosion Control Treatment Using Geocell and Wheat Straw for Slope Protection. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1): 5553221.
- Stone, J. J., and Paige, G. B. 2003. Variable rainfall intensity rainfall simulator experiments on semi-arid rangelands. *Proc. 1st Interagency Conf. on Research in the Watersheds*, Citeseer, 83–88.
- Sun, Y., Li, Q., Liu, L., Xu, C., and Liu, Z. 2014. Hydrological simulation approaches for BMPs and LID practices in highly urbanized area and development of hydrological performance indicator system. *Water Science and Engineering*, 7(2): 143–154.
- Tasalloti, A., Marshall, A. M., Heron, C. M., and Hashemi, M. A. 2020. Geocellular railway drainage systems: Physical and numerical modelling. *Transportation Geotechnics*, 22: 100299.
- Vafa, M. 2018. Impact of Storage Layer Properties on Infiltration Trench’s Retention. *Zanjan University*.
- Walsh, T. C., Pomeroy, C. A., and Burian, S. J. 2014. Hydrologic modeling analysis of a passive, residential rainwater harvesting program in an urbanized, semi-arid watershed. *Journal of Hydrology*, 508, 240–253.
- Wang, G., Liu, Y., and Wang, X. (2012). Experimental Investigation of Hydrodynamic Characteristics of Overland Flow with Geocell. *Journal of Hydrodynamics* 24(5): 737–743.
- Weiss, P. T., Kayhanian, M., Gulliver, J. S., and Khazanovich, L. 2019. Permeable pavement in northern North American urban areas: research review and knowledge gaps. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(2): 143–162.
- Wesseloo, J., Visser, A. T., and Rust, E. 2009. The stress–strain behaviour of multiple cell geocell packs. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(1): 31–38.
- Ziari, M., Karami, H., Ostadi, A., and Ghazvinian, H. 2025. Simulation and prediction of hydraulic jump characteristics over expanding rough beds using FLOW-3D and soft computing techniques. *Journal of Hydroinformatics*, 27(1): 88-106.