

Effect of Slope Angle on Water Harvesting Using Kajaveh Method

MOHAMMAD REZA HAMI KOUCHEBAGHI¹, TEYMOUR SOHRABI^{1*}, AREZOO NAZI GHAMESHLOU¹

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(Received: July. 22, 2020- Revised: Sep. 14, 2020- Accepted: Sep. 19, 2020)

ABSTRACT

In areas where annual rainfall is less than the crop water requirement, providing water for plant is necessary to grow properly without stress. One of the methods that have least damaging to the environment is rainwater harvesting techniques. The Kajaveh system is a local rainwater harvesting system that can be used in very low-slope areas and can be used in a mechanistic manner for annual crops. In order to investigate the operation of the rainwater harvesting system, computer simulations were performed. Estimating rain infiltration on sloping surfaces is the main part of this simulation. In this research, a semi conceptual- experimental method was used to estimate the infiltration of rainfall on sloping surfaces and find a structure with suitable geometric dimensions to rainwater harvesting. The results of the simulation that was prepared using this method were compared with the experimental data and after calibrating the simulation, it was used to study structures with different wall slopes. The results indicate that there is an optimal slope in which the maximum ability of the Kajaveh system to water concentrate occurs. For the soil whit Sand-Loam type, Aggregate structure, precipitation intensity of 11.49 cm per hour, rainfall duration of 10 minutes and in the conditions of structure formation in this research, a square base structure with 50 cm length and cavity depth of 10 cm (wall slope of about 22 degrees) showed the highest efficiency in water concentrating.

Keywords: Infiltration, Kajaveh, Rain, Slope, Simulation.

تأثیر زاویه شیب بر استحصال آب با روش کجاوه

محمد رضا حامی کوچه باغی^۱، تیمور سهرابی^{۱*}، آرزو نازی قمشلو^۱

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۶/۲۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۶/۲۹)

چکیده

در مناطقی که بارندگی سالانه آن‌ها کمتر از نیاز آبی گیاهان است الزام به فراهم نمودن آب برای گیاه به منظور رشد مناسب و بدون تنش وجود دارد. یکی از روش‌هایی که کمترین صدمه را به محیط زیست وارد می‌آورد استفاده از تکنیک‌های استحصال آب باران است. شبیه‌سازی یک سیستم استحصال آب تا به حال مورد غفلت قرار گرفته است و این کار جزو معدود کارها در این زمینه است. سیستم کجاوه یک سیستم استحصال آب باران در محل است که قابل استفاده در مناطق با شیب بسیار کم بوده و به صورت مکانیزه برای کشت‌های سالانه قابل اجرا است. به منظور بررسی کارکرد سیستم استحصال آب باران، شبیه‌سازی کامپیوتری انجام گرفت. اصلی‌ترین بخش این شبیه‌سازی، تخمین نفوذ باران در سطوح شیب‌دار است. در این تحقیق یک روش مفهومی - تجربی برای تخمین نفوذ باران در سطوح شیب‌دار و یافتن ساختاری با ابعاد هندسی مناسب جهت استحصال آب باران استفاده گردیده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تهیه شده با استفاده از این روش، با داده‌های آزمایش مقایسه گردید و پس از کالیبره نمودن شبیه‌سازی، از آن برای بررسی ساختارهایی با شیب مختلف دیواره، استفاده شد. نتایج بیانگر وجود یک شیب بهینه است که در آن حداکثر توان سیستم کجاوه برای متمرکز نمودن آب اتفاق می‌افتد. برای خاک با باف شن - لم، ساختمان خاک‌دانه‌ای، شدت بارش ۱۱/۴۹ سانتی‌متر در ساعت، مدت بارندگی به طول ۱۰ دقیقه و در شرایط ایجاد ساختار در این تحقیق، ساختاری با قاعده مربع بطول ۵۰ سانتی‌متر و عمق حفره ۱۰ سانتی‌متر (شیب دیواره در حدود ۲۲ درجه)، بیشترین کارایی در متمرکز نمودن آب را از خود نشان داد.

واژه‌های کلیدی: نفوذ، کجاوه، باران، شیب، شبیه‌سازی.

مقدمه

منظور از استحصال آب باران، محروم کردن بخشی از زمین از سهم باران خود و اضافه کردن آن سهم به بخش دیگر است. اجزای اصلی سیستم استحصال آب باران شامل جمع‌کننده، محل ذخیره و منطقه هدف است. جمع‌کننده قسمتی از زمین است که بخشی از سهم یا کل سهم خود از آب باران را به یک منطقه هدف می‌بخشد. محل ذخیره جایی است که آب در آن جمع‌آوری می‌شود و تا زمان استفاده در آن نگهداری می‌شود. منطقه هدف جایی است که آب در آن مورد استفاده قرار می‌گیرد (Oweis et al., 2001). داده‌های بارندگی روزانه ناحیه مورد مطالعه، تلفات رواناب، حجم آب اولیه، ظرفیت ذخیره‌سازی، تقاضای روزانه آب و پارامترهای اقتصادی، بعنوان ورودی مورد نیاز است (Jing et al., 2017). طبقه‌بندی روش‌های استحصال آب باران بر اساس نوع استفاده، روش ذخیره یا اندازه جمع‌کننده‌ها صورت می‌گیرد. یک روش تقسیم‌بندی به صورت سیستم‌های جمع‌کننده بزرگ^۱ و

جمع‌کننده‌های کوچک^۲ می‌باشد. در سیستم‌های جمع‌کننده بزرگ، جمع‌آوری آب از سطح وسیعی صورت می‌گیرد. حوزه‌های جمع‌کننده معمولاً زمین‌های طبیعی و کوهپایه‌ها هستند و بخش جمع‌کننده خارج از مرزها قرار دارد و کشاورزان کنترلی بر آن ندارند. انواع مختلفی از سیستم‌های جمع‌کننده بزرگ وجود دارد نظیر مخازن کوچک مزرعه، کشت در بستر مسیل، خاکریزهای بزرگ، مخازن آب و غیره (Oweis et al., 1999; 2001) اما در جمع‌کننده‌های کوچک، رواناب سطحی از یک حوزه کوچک و در مسافت‌های کوتاه جمع‌آوری می‌شود و آب به یک منطقه کشت - شده در مجاورت محل جمع‌آوری منتقل و استفاده می‌شود. این سیستم خود زیر شاخه‌هایی دارد نظیر سیستم داخل مزرعه که دارای طراحی ساده و کم هزینه است و براحتی قابلیت تکرار دارد و انطباق‌پذیر است. در این نوع سیستم، هر سه بخش جمع‌کننده، محل ذخیره و هدف در داخل مزرعه قرار دارد. اگرچه این موضوع موجب ایجاد مزیت از نظر نگهداری و مدیریت است، ولی باعث از دست رفتن بخشی از زمین مولد می‌گردد. چنین سیستم‌هایی

Chen and Young (2006) در روی سطوح شیب‌دار تغییر کند. از طریق مدل اصلاح‌شده گرین-آمپ تحقیقاتی انجام دادند و بیان کردند که نفوذ در زمان کوتاه توسط نیروی کاپیلاری کنترل می‌شود که مستقل از زاویه شیب در خاک‌های همگن و یکنواخت است. برای زمان‌های طولانی، گرانش مکانیزم کنترل‌کننده نفوذ می‌باشد و جریان عمود بر سطح شیب‌دار با عامل $\cos \gamma$ کاهش می‌یابد. این اثر با افزایش طول شیب حذف می‌شود و اثر خالص شیب اساساً از بین می‌رود. در این زمینه، Essig *et al.* (2009) اظهار نمودند که $\cos \gamma$ برای توصیف تغییرات میزان نفوذ و جریان عمقی کافی نیست و نتایج مدل‌ها با افزایش شیب از نتایج تجربی متفاوت است. آن‌ها بیان نمودند برای انواع شیب‌ها و خاک‌ها، باید هدایت هیدرولیکی اشباع موثر K_s به کار برده شود و تصحیح ساده $\cos \gamma$ برای سطوح شیب‌دار کافی نیست.

دومین دیدگاه نگرش تجربی است که تحقیقات زیادی با این دید صورت گرفته است. در میان مطالعات اولیه در مورد نفوذ در سطوح شیب‌دار، Poesen (1984) افزایش نفوذ با افزایش شیب را در خاک‌های مستعد به تشکیل پوسته سطحی مشاهده کرده است. نتایج نشان داد که رابطه مثبت بین شیب و میزان نفوذ به‌ویژه در خاک‌هایی با رطوبت در حد ظرفیت زراعی یا بیشتر وجود دارد. این نتایج مشابه نتایج Assouline and Ben-Hur (2006) است که رابطه مثبت بین شیب و میزان نفوذ را نشان می‌دهد و متناسب با خاک‌های دارای رطوبت در حد ظرفیت زراعی و بیشتر است. نتایج Janeau *et al.* (2003) بیانگر افزایش میزان نفوذ نهایی پایدار با افزایش زاویه شیب است. Ribolzi *et al.* (2011) نیز به نتیجه مشابه رسیدند. Chen and Young (2006) دیدگاه گرین-آمپ را برای استفاده در سطوح شیب‌دار برای بارش‌ها و شیب‌های مختلف به کار بستند. آن‌ها افزایش میزان نفوذ با افزایش زاویه شیب را مشاهده کردند که برای شیب‌های کوچکتر از ۱۰ درجه ناچیز بود. در مطالعه دیگری که توسط Abdallah *et al.* (2016) انجام شد، تأثیر شیب و میزان بارش‌های مختلف بر روی نفوذ غیراشباع در خاک لومی بررسی شد. آن‌ها اظهار داشتند که میزان نفوذ با افزایش شدت بارش کاهش می‌یابد ولی تغییر زاویه شیب، تأثیری بر روی نفوذ نداشته است. تحقیقات Cerdà and García-Fayos (1997) نیز به نتیجه مشابهی رسیده است. آن‌ها بیان داشتند که شیب تأثیری در میزان نفوذ ندارد. Luk *et al.* (1993) بیان کردند که برای بارش‌های کوتاه‌مدت، میزان نفوذ با افزایش زاویه شیب افزایش می‌یابد اما

تنها در مناطق خشک که کشاورزی دارای ریسک بالایی است مورد استفاده قرار می‌گیرد. انواع مختلفی از سیستم‌های داخل مزرعه وجود نظیر شیپار کنترلی، نوارهای نیم دایره‌ای و دوزنقه‌ای، چاله‌های کوچک، حوضچه کوچک رواناب، نوارهای روان آب، سیستم داخل ردیفی و... (Oweis *et al.*, 2015; Mu *et al.*, 1999).

سیستم کجاوه حفره‌هایی است به‌صورت هرم‌های معکوس با قاعده مربع که در کنار هم قرار گرفته و ساختاری برای جمع‌آوری آب باران و متمرکز نمودن آن در یک نقطه ایجاد می‌کند. این ساختار در حیطة سیستم‌های استحصال آب با جمع‌کننده کوچک قرار دارد و آب را در پروفیل خاک و در منطقه رشد ریشه ذخیره می‌کند.

اولین گام در طراحی یک سیستم استحصال آب، یافتن میزان نفوذ آب در زمین و در نتیجه میزان روان‌آب ایجادشده در بخش جمع‌کننده است. فعالیت‌های تحقیقاتی زیادی برای توسعه مدل‌های نفوذ در خاک‌های همگن و با رطوبت اولیه ثابت در سطح افقی پیشنهاد شده است. به‌عنوان نمونه برای بارش‌های منفرد و زمانی که حالت ماندآب سطحی^۱ بلافاصله ایجاد می‌شود، حالت‌های گسترده‌ای از معادلات فیلپ (Chow *et al.*, 1988)، معادلات گرین آمپ (Mein and Larson, 1973) و مدل اسمیت و پارلانگ (Parlange *et al.*, 1982) مورد استفاده قرار گرفته است. اکثر مدل‌های فوق و همچنین بسیاری از مقالات علمی دیگر سطح خاک را به‌صورت افقی در نظر می‌گیرند. این در حالی است که در بیشتر شرایط عملیاتی، نفوذ در سطوح با شیب قابل توجهی رخ می‌دهد و در مدل‌های نفوذ معرفی‌شده، نقش شیب در نفوذ به‌خوبی مشخص نشده است (Morbidelli *et al.*, 2019). در واقع نتایج حاصل از برخی نظریه‌ها و تحقیقات تجربی منجر به نتیجه‌گیری نسبتاً متضاد می‌شود و درک بهتر و مدلسازی نفوذ در سطوح شیب‌دار مورد نیاز است. در این زمینه می‌توان روش‌های بررسی این فرآیند را در قالب سه دیدگاه عمومی مورد بررسی قرار داد.

اولین دیدگاه نگرش تحلیلی است که در آن حرکت آب در خاک همگن توسط معادلات پیوستگی و داریسی کنترل می‌شود. (Young, 1964).

از جمله اولین تلاش‌ها برای در نظر گرفتن شیب سطح در نفوذ، توسط Philip (1991) صورت گرفته است. وی تأثیر مکش ماتریکس را در سطوح افقی و شیب‌دار ثابت در نظر گرفت و تأثیر گرانش و نفوذ را با فاکتور $\cos \gamma$ نشان دادند که در آن γ زاویه شیب است و بیان کردند که انتظار می‌رود میزان نفوذ به‌صورت

آورند. ساده‌ترین مفهوم از پدیده نفوذ در هر سطحی توسط Fujimura and Ando (2001) به صورت رابطه (۱) ارائه شده است،
 (رابطه ۱)
$$\varphi[\theta(t);t] = I(t) - r(t) - Q[\theta(t);t]$$
 که بیان می‌کند میزان نفوذ $\varphi(\theta(t);t)$ وابسته به زمان t و رطوبت نسبی خاک $\theta(t)$ ، برابر است با مقدار بارش $I(t)$ که سهم مربوط به تلفات توسط شاخ و برگ و بادبردگی و تبخیر $r(t)$ و سهم رواناب $Q(\theta(t);t)$ از آن کم شده است. پیش‌تر رابطه‌ای مشابه به صورت رابطه (۲) توسط Morin and Benyamini (1977) پیشنهاد شده بود.

$$I_t = (I_i - I_f)e^{-\gamma p t} + I_f \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن I_t میزان نفوذ لحظه‌ای، I_i میزان نفوذ اولیه و I_f میزان نفوذ نهایی (میلی‌متر بر ساعت)، γ ضریب خاک مرتبط با تراکم خاک، p شدت بارش و t زمان (بر حسب ساعت) از شروع بارش است. همانگونه که دیده می‌شود، تأثیر مستقیم زاویه شیب بر روی نفوذ به‌وضوح در این روابط وجود ندارد.

Morbidegli et al. (2015; 2016) طی آزمایش‌هایی که بر روی نفوذ در سطوح شیب‌دار انجام دادند یک مدل مفهومی ارائه نمودند. آن‌ها به‌طور خاص شواهدی از وجود یک هدایت هیدرولیکی اشباع موثر وابسته به زاویه شیب $K_{se}(\gamma)$ ارائه دادند که می‌تواند رواناب سطحی و جریان عمقی در حالت پایا را برای هر مقدار زاویه شیب γ به‌دست دهد. آنها اظهار داشتند که زبری سطح خاک تعیین‌کننده میزان نفوذ در خاک است و بیان کردند که برای هر مقدار بارش با شدت بیش از $K_{se}(\gamma)$ رواناب تولید می‌گردد. آن‌ها همچنین اظهار داشتند که حداکثر رطوبت خاک برای شیب‌های مختلف متفاوت است و افزایش میزان بارش باعث اشباع شدن خاک نمی‌شود. این مقدار رطوبت را با θ_{se} نشان دادند که تنها برای زاویه شیب $\gamma = 1^\circ$ به حد اشباع θ_s رسید. مقدار عددی θ_{se} از $\gamma = 1^\circ$ تا $\gamma = 10^\circ$ کاهشی بود. همچنین از آزمایش‌های آنها مشخص شد که تأثیر شیب بر روی نفوذ با افزایش شیب کم‌رنگ‌تر می‌شود و می‌توان انتظار داشت پس از یک شیب مشخص، افزایش زاویه تأثیر چشمگیری بر نفوذ نگذارد.

در ادامه Morbidelli et al. (2019) یک مدل مفهومی جدید از نفوذ در سطوح شیب‌دار ارائه نمودند. در مدل مفهومی پیشنهادی آن‌ها نفوذ با ذرات خاک و در نتیجه با هدایت هیدرولیکی اشباع K_s در ارتباط است. آنها بعنوان یک نتیجه و پیرو تحقیقات قبلی خود، هدایت هیدرولیکی اشباع موثر K_{se} را به صورت $K_{se} = K_s \times P(v \leq v_l)$ به‌دست آوردند که در آن

$$P(v \leq v_l) = 1 - e^{-\lambda v_l} \quad (\text{رابطه ۳})$$

برای بارش‌های طولانی‌مدت، حالت معکوس رخ داده و میزان نفوذ با افزایش شیب کاهش می‌یابد. Fox et al. (1997) مطالعاتی را برای بررسی پدیده نفوذ در مناطقی با پوسته‌های سطحی و شیاردار انجام دادند و طی آزمایشات خود دریافتند که، میزان نفوذپذیری با افزایش زاویه شیب تا ۱۱/۵ درجه کاهش می‌یابد و پس از آن با افزایش بیشتر شیب، میزان نفوذپذیری ثابت باقی می‌ماند. Khan et al. (2016) دریافتند که میزان نفوذ با افزایش شیب کاهش می‌یابد و با افزایش شدت بارش افزایش می‌یابد. Fredlund (1997) طی مطالعات خود اظهار داشت نفوذ در سطوح شیب‌دار حتی به ۱۰ درصد نفوذ در سطوح صاف می‌رسد. Chaplot and Le Bissonais (2000) در آزمایشات میدانی خود اظهار داشتند با افزایش شیب، میزان نفوذ کاهش می‌یابد. پیشتر Sharma et al. (1983) آزمایشی تحت بارش‌های طبیعی انجام دادند و دریافتند که میزان نفوذ با افزایش شیب کاهش می‌یابد که علت آن را کاهش زمان تماس آب با خاک بیان کردند. Nassif and Wilson (1975) با بررسی تأثیر شیب بر روی رواناب و نفوذ اظهار داشتند "به‌نظر می‌رسد که یک شیب بحرانی وجود دارد که بیشتر از آن رواناب و نفوذ مستقل از شیب می‌گردد و همچنین برای خاک‌های با نفوذپذیری بالا افزایش شیب باعث کاهش نفوذ می‌گردد و برای خاک‌هایی با نفوذپذیری کم، شیب تأثیر کمی بر روی نفوذ دارد و یا حتی بی‌تأثیر است". Essig et al. (2009) و Morbidelli et al. (2015; 2016) با انجام آزمایش‌هایی، کاهش نفوذ با افزایش شیب را در هر سه نوع خاک و در تمامی شدت بارش‌های مختلف بررسی کردند. آن‌ها مشاهده نمودند که این کاهش بسیار بیشتر از مقداری بوده است که توسط Philip (1991) بیان گردیده است. Mu et al. (2015) اظهار داشتند که شیب نزول منحنی نفوذ رابطه مستقیمی با افزایش شدت بارش دارد و ضریب رواناب را بر حسب لگاریتم سینوس زاویه شیب به‌دست آوردند.

سومین و آخرین دیدگاه نگرش مفهومی است. این واقعیت که تحقیقات اخیر در مورد نفوذ در سطوح شیب‌دار دارای نتایج متناقضی است، این موضوع نشان می‌دهد که ممکن است درک ما از این پدیده ناقص باشد. راه‌حل‌های تحلیلی تخمینی از میزان نفوذ یا نفوذ تجمعی را برحسب زمان ارائه می‌دهند و معمولاً با ساده سازی‌های زیادی همراه هستند. از طرفی راه‌حل‌های تجربی مختص یک منطقه خاص بوده و برای مناطق دیگر، حتی مشابه از نظر شرایط محیطی، کاربردی نیست و قدرت آن‌ها به‌عنوان ابزار پیش‌بینی محدود است. در این میان مدل‌های مفهومی سعی می‌کنند تا پیچیدگی‌های یک روند رضایت‌بخش از نمایش واقعیت فیزیکی را کاهش دهند و فرمول‌های ساده و کاربردی به‌دست

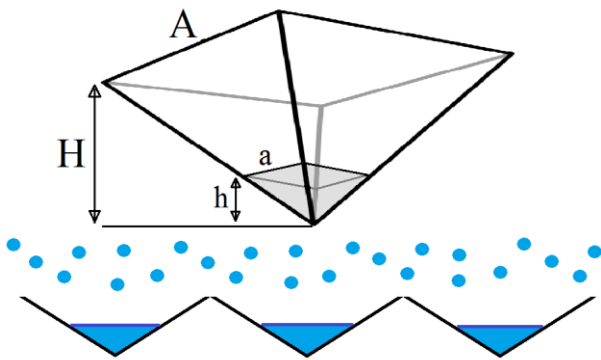
$$S_{in} = A^2 \quad (\text{رابطه ۵})$$

حجم آب ورودی در هر حفره را می‌توان با استفاده از رابطه (۶) محاسبه کرد.

$$V_T = S_{in} \times I \times T_i \quad (\text{رابطه ۶})$$

در طول مدت بارش، مقداری از حجم آب در خاک نفوذ می‌کند V_i و اگر شدت بارش بیشتر از میزان نفوذ آب در خاک باشد مقدار اضافی بارش نسبت به نفوذ به صورت روان آب در جهت شیب حرکت کرده و در مرکز حفره جمع می‌شود. این حجم با V_v نشان داده شده و برابر است با

$$V_v = V_T - V_i \quad (\text{رابطه ۷})$$



شکل ۱- طرح شماتیک حفره‌ها به صورت هرم معکوس

تا زمانی که بارندگی ادامه دارد نفوذ آب از طریق همه وجه‌های ساختار صورت می‌گیرد ولی پس از اتمام بارندگی، نفوذ آب تنها در بخش مرکزی حفره که هنوز آب ناشی از رواناب در آن قرار دارد رخ می‌دهد. بدین ترتیب زمان تماس آب با خاک در نقاط مختلف متفاوت است و در نتیجه میزان آب نفوذ یافته نیز در نقاط مختلف متفاوت خواهد بود. آزمایش‌های اولیه حاکی از موثر بودن چنین ساختارهایی در ایجاد تمرکز مورد نظر از آب در محل مفروض بوده است.

سیستم کجاوه مشابه یک هرم معکوس است که داخل خاک ساخته می‌شود. اگر طول و عرض ساختار ثابت باشد با افزایش عمق شیب دیواره‌ها، افزایش می‌یابد. افزایش شیب دو اثر متضاد در نفوذ آب خواهد داشت. الف) با افزایش شیب سطحی که نفوذ در آن رخ می‌دهد افزایش می‌یابد. هر وجه هرم به شکل یک مثلث است که مساحت آن به صورت رابطه (۸) است

$$S_T = \frac{A}{2} \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)^2 + H^2} \quad (\text{رابطه ۸})$$

و زاویه شیب هر وجه برابر است با

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{H}{A}\right) \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در آن $\lambda > 0$ پارامتر توزیع احتمال، v سرعت ذره (متغیر تصادفی مستقل) و v_l مقدار خاصی از v است که نشان‌دهنده حداکثر سرعتی است که اجازه می‌دهد نفوذ ذرات در منافذ موجود انجام گیرد. ذرات با سرعت کمتر از v_l ممکن است وارد یک منفذ خاص شوند. آنها در کار خود با مقایسه داده‌های آزمایش‌ها با روش مفهومی پیشنهادی، مقادیری برای λ به دست آوردند که به صورت رابطه (۴) می‌باشد.

$$\lambda = 0.9861e^{-0.139 \times \text{slope}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این معادله شیب برحسب درجه بیان می‌شود. عواملی مانند زبری سطح که ممکن است بسیار تأثیرگذار باشد در روابط فوق به صورت مستقیم در نظر گرفته نشده است. رابطه (۴) برای سطوح شیب‌دار صاف و بدون پوشش به دست آمد. در این روابط $v_l = K_s \left(\frac{mm}{h}\right)$ در نظر گرفته شده است (Morbidelli et al., 2019).

سیستم کجاوه یک سیستم جمع‌آوری آب است که برای مناطق کم‌شیب معرفی و فرمول بندی می‌شود که در حیطه سیستم‌ها با جمع‌کننده کوچک قرار دارد. این سیستم از بررسی روش‌های مختلف استحصال آب باران و ادغام و اصلاح آنها به دست آمده است و قابلیت احداث به صورت مکانیزه در سطح وسیع وجود دارد. هدف اصلی از این تحقیق بررسی تأثیر شیب بر روی کارایی سیستم استحصال آب با روش کجاوه با توجه به شکل ویژه آن است. در این راستا با معرفی اجمالی روش کجاوه در استحصال آب، سعی در بررسی اثر شیب در کارایی سیستم کجاوه شده است. بدین منظور از کارهای Morbidelli et al. (2019) برای تخمین نفوذ در سطوح شیب‌دار استفاده شد.

مواد و روش‌ها

برای فهم بهتر مطلب، آزمایشی به منظور بیان مسئله و بررسی اولیه ساختار کجاوه صورت گرفت و نتایج به دست آمده از آزمایش برای کالیبره کردن شبیه‌سازی استفاده شد. در ادامه ابتدا به معرفی سیستم کجاوه می‌پردازیم و سپس با بیان مشخصات آزمایش انجام شده، شرحی مختصر از شبیه‌سازی انجام شده بیان می‌گردد. در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های به دست آمده از آزمایش مقایسه خواهد شد.

سیستم کجاوه: سیستم کجاوه از چهار مثلث متساوی-الاساقین تشکیل شده است که در کنار هم یک هرم با قاعده مربع می‌سازند (شکل ۱). سطح جمع‌کننده آب باران S_{in} برابر است با مساحت مربعی با ضلع A که برابر با طول قاعده هرم مفروض است.

با افزایش عمق، H افزایش یافته و در نتیجه S نیز افزایش خواهد یافت. افزایش سطوح نفوذکننده باعث افزایش میزان نفوذ و در نتیجه کاهش رواناب خواهد شد. (ب) با افزایش شیب میزان نفوذ طبق روابط بیان شده کاهش خواهد یافت. در نتیجه دو اثر متضاد بر روی نفوذ تاثیرگذار خواهد بود و از نظر ریاضی زمانی که دو اثر متضاد بر روی یک پارامتر تاثیرگذار باشد، یک نقطه بیشینه یا کمینه وجود خواهد داشت. این بدان معنا است که یک شیب بخصوص و متناسب با جنس خاک وجود خواهد داشت که در آن عرض خیس شده کمینه باشد.

میزان آب نفوذ یافته در سطحی با مساحت S_T ، $I = S_T \cdot i_a$ است که در آن i_a میزان متوسط نفوذ است. برای یافتن میزان بیشینه یا کمینه نفوذ باید از I نسبت به زاویه شیب (γ) مشتق گرفت و برابر صفر قرار داد.

$$\frac{\partial I}{\partial \gamma} = 0 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

S_T و i_a هر دو وابسته به شیب هستند و خواهد شد.

$$\frac{\partial S_T}{\partial \gamma} \cdot i_a + S_T \cdot \frac{\partial i_a}{\partial \gamma} = 0 \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

مطلب زمانی پیچیده می‌گردد که نفوذ وابسته به زمان است و باید i_a که میانگین مکانی نفوذ است در زمان مناسب تعیین گردد. تعیین زمان مناسب برای یافتن i_a وابسته به طول مدت بارندگی است که خارج از بحث این مقاله است. فرض اولیه این است که شدت بارش بیش از میزان نفوذ لحظه‌ای بوده و همواره لایه نازکی از آب بر روی سطح خاک وجود خواهد داشت که اگر این فرض صادق نباشد بایستی تأثیر شدت بارش نیز در روابط مورد بررسی قرار گیرد.

در سیستم کجاوه میزان آب نفوذ یافته در هر وجه هرم از رابطه (۱۲) قابل محاسبه است.

$$I = S_S \cdot i_S + (S_T - S_S) \cdot i_{Se} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

که در آن S_T مساحت کل وجه هرم، S_S مساحت بخشی از وجه هرم که با آب راکد در تماس است (با استفاده از رابطه ۱۰ و جایگزاری A با a و H با h)، $i_S = SCS(K_S)$ میزان نفوذ نقطه‌ای در بخشی که با آب راکد در تماس است و $i_{Se} = SCS(K_{Se})$ میزان نفوذ نقطه‌ای در بخش شیب‌دار است و بسته به زمان تعیین خواهد شد. از آنجایی که سیستم کجاوه یک سیستم بسته است و آب جریان یافته در انتهای آن جمع می‌شود، نسبت‌های S_S و $S_{Se} = (S_T - S_S)$ ، بر حسب زمان تغییر خواهد یافت و تعیین دقیق این مقدار از طریق محاسبه گام‌به‌گام نفوذ- رواناب و اعمال یک الگوریتم بهینه‌سازی برای یافتن شیب

بهینه برای ایجاد حالت بهینه مورد نظر امکان پذیر است.

گیاه در محلی که بیشترین نفوذ آب وجود دارد یعنی مرکز حفره کاشته می‌شود. حجم آب جمع شده در مرکز حفره به شدت بارش، زمان بارش، شیب دیواره‌های جمع‌کننده آب، جنس خاک و میزان فشردگی سطح خاک بستگی دارد. با توجه به حجم آب جمع شده، ارتفاعی از آب در مرکز حفره قرار خواهد داشت (h) که با عمق حفره متناسب است و از طریق ارتباط حجم آب جمع شده با مشخصات حفره‌ها تعیین می‌شود. با استفاده از تشابه مثلثی در وجوه دو هرم مفروض، $h = a \times \frac{H}{A}$ است. در نتیجه

$$a = \left(3 \times \frac{A}{H} \times V_v \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

در این معادله، A طول قاعده هرم اصلی، H عمق هرم اصلی، a طول قاعده هرمی که در انتهای بارندگی آب در آن جمع می‌شود و h ارتفاع از آب جمع شده در مرکز حفره در انتهای بارندگی است. با گذشت زمان نفوذ آب از سطوحی که با آب جمع شده در تماس هستند ادامه خواهد داشت و به مرور زمان حجم آب باقی مانده کم شده و در نهایت به صفر می‌رسد. با کاهش حجم آب به علت نفوذ از سطح در تماس با آب، عمق آب نیز کاهش یافته و در نهایت به صفر می‌رسد. از سوی دیگر می‌توان از این ساختار برای کاهش رواناب سطحی به منظور کاهش فرسایش خاک و افزایش یکنواختی توزیع در سیستم‌های آبیاری بارانی استفاده کرد. همچنین با کاهش رواناب سطحی و تمرکز آب در یک منطقه می‌توان تغذیه آبهای زیرزمینی را نیز مدنظر قرار داد. بیشترین طرح‌های سیستم‌های استحصال آب باران در مناطق شیب‌دار و کوهپایه‌ای شکل گرفته‌اند و از شیب زمین برای ایجاد رواناب و تمرکز آن در مکان مورد نظر استفاده کرده‌اند. در این مقاله سیستم کجاوه برای مناطق کم‌شیب معرفی شده و فرمول‌بندی می‌گردد. برای این منظور نیاز به درک تأثیر شیب که مهم‌ترین کمیت متغیر می‌باشد، بر روی میزان آب متمرکز در منطقه هدف است. بنابراین اقدام به طراحی آزمایش با یک کمیت متغیر شده و از نتایج آنها برای فهم تأثیر این کمیت استفاده می‌شود.

انجام آزمایش

آزمایش در منطقه شمال غرب ایران و در بخش مرکزی شهر تبریز انجام گرفت. مشخصات آزمایش انجام شده از جمله ابعاد قاعده هرم، شیب (عمق هرم)، مشخصات خاک، شدت بارش و طول مدت بارش در جدول (۱) آمده است. بارش استفاده شده در این آزمایش باران مصنوعی با نرخ ثابت است که با استفاده از آبپاش ثابت ایجاد شد، در

نتیجه ویژگی‌های طبیعی و اقلیم منطقه بر روی آزمایش تأثیرگذار نبود.

جدول ۱- مشخصات آزمایش

ابعاد ساختار (cm×cm)	عمق حفره (cm)	شدت بارش ($\frac{cm}{hr}$)	طول زمان بارش (min)	طول زمان نفوذ کامل آب (min)	بافت ساختمان خاک
۵۰×۵۰	۲۰	۱۱/۴۹	۱۰	۶۰	شن- لوم خاک‌دانه‌ای

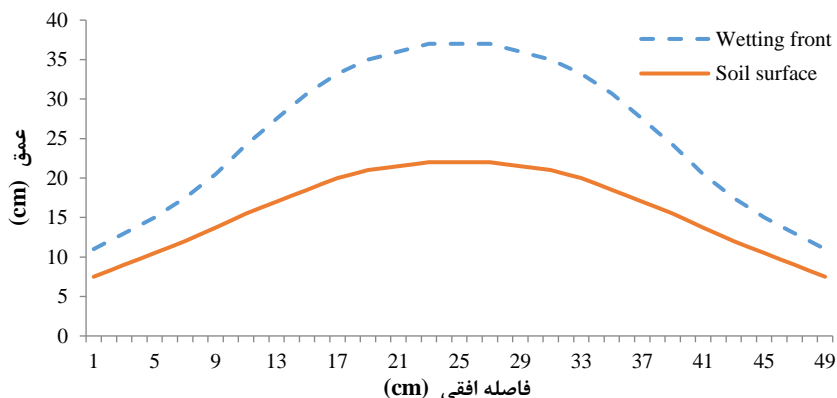
پنج ساعت برای نفوذ نهایی و بازتوزیع آب در خاک فرصت داده شد. با حفر ترانشه اقدام به ثبت داده‌های مربوط به ابعاد هرم بعد از مراحل بارش و عمق جبهه خیس‌شده خاک در همان محل، اندازه‌گیری اولیه گردید (شکل ۳). در این شکل نمودار به‌صورت خط‌چین، جبهه نفوذ آب در خاک و نمودار با خط پیوسته سطح خاک پس از بارندگی را نشان می‌دهد. نمودار سطح خاک قبل از بارش به شکل هرم کامل بود که پس از اتمام بارش و به‌علت فرسایش خاک، به‌صورت شکل جدید تبدیل شده است (جهت رو به پایین مثبت می‌باشد). برای بررسی نفوذ آزمایش خاصی انجام نگرفت و از زمان لازم برای ناپدید شدن آب از سطح خاک (طول زمان نفوذ کامل آب)، برای تخمین رابطه نفوذ استفاده شد.

آزمایش شامل ساختارهایی متشکل از ۱۵ هرم بود و داده- برداری برای چندین حفره انجام شد. در نهایت برای حذف خطاهای احتمالی، میانگین نتایج به دست آمده از آزمایش، برای کالیبره کردن شبیه‌سازی استفاده شد. برای ایجاد ساختارها ابتدا اندازه‌گیری و میخکوبی سطح زمین انجام گرفت، سپس حالت اولیه هرم در خاک خشک ایجاد گردید. در نهایت تحکیم در سطح خاک و مرتب کردن نهایی شکل و ابعاد هرم‌ها انجام شد (شکل ۲).

اندازه‌گیری ابعاد هرم‌ها در وسط هرم انجام شد که ابعاد هرم قبل از آزمایش را مشخص کرد. زمان شروع آبیاری، اتمام آبیاری و نفوذ کامل آب (ناپدید شدن آب در سطح خاک) ثبت شد. مدت



شکل ۲- انجام آزمایش و حفر ترانشه برای داده‌برداری



شکل ۳- ابعاد هرم و عمق جبهه خیس‌شده خاک بعد از بارش

شبیه‌سازی

به‌منظور انجام شبیه‌سازی فرآیند استحصال آب باران، برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار متلب صورت گرفت و در گام‌های زمانی مختلف مشخصات نفوذ در هر نقطه به‌دست آمد. برای انجام شبیه‌سازی برخی ساده‌سازی‌هایی انجام شد از جمله اینکه: الف) ساختار ایجادشده هر می به‌صورت کاملاً دقیق از نظر هندسی بوده و تخریب و فرسایشی در اثر بارش ایجاد نشده است. ب) گرانث و در نتیجه عمق آب جمع‌شده در انتهای حفره‌ها تأثیری در نفوذ نداشته و آب به‌صورت عمود بر سطح نفوذ می‌نماید. البته برخی از این فرضیات دور از ذهن نیست. چرا که تأثیر عمق آب بر نفوذ در خاک خشک در مقایسه با مکش مویینگی خاک ناچیز است (حدود یک درصد به‌ازای هر سانتی‌متر عمق آب) (Fox et al., 1997).

با ایده‌گیری اولیه از مطالعات Morbidelli et al. (2019) برای شبیه‌سازی سیستم کجاوه فرض گردید که می‌توان کاهش نفوذ به‌علت افزایش شیب را با تغییر در پارامترهای مشخصه خاک تخمین زد و از آنجایی که هدف تنها یافتن میزان نفوذ از سطح خاک است و بازتوزیع رطوبت مورد بررسی قرار نخواهد گرفت چنین فرضی مشکل‌ساز نخواهد بود. روش کار به این ترتیب است که $K_s(\gamma)$ که هدایت هیدرولیکی اشباع در شیب γ است، از طریق رابطه (۱۴) به‌دست می‌آید.

$$K_s(\gamma) = K_s \times P(v \leq v_l) \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

کمیت‌های این معادله قبلاً معرفی شده‌اند. با توجه به رابطه (۱۴) با افزایش شیب، مقدار $K_s(\gamma)$ کاهش می‌یابد. برای هر شیب با زاویه γ یک سطح افقی معادل در نظر گرفته شده است که هدایت هیدرولیکی اشباع موثر آن با $K_s(\gamma)$ برابر است به عبارتی $K_{se} = K_s(\gamma)$. حال با استفاده از هدایت هیدرولیکی اشباع موثر (K_{se}) می‌توان شماره منحنی نفوذ برای معادله $SCS(K_{se})$ را به‌دست آورد و برای تخمین نفوذ در سطوح شیب-دار از آن استفاده کرد. در واقع برای تخمین نفوذ در سطوح شیب-دار از $SCS(K_{se})$ استفاده می‌گردد و برای نفوذ از آب راکد، $SCS(K_s)$ (برای بافت خاک مورد نظر) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

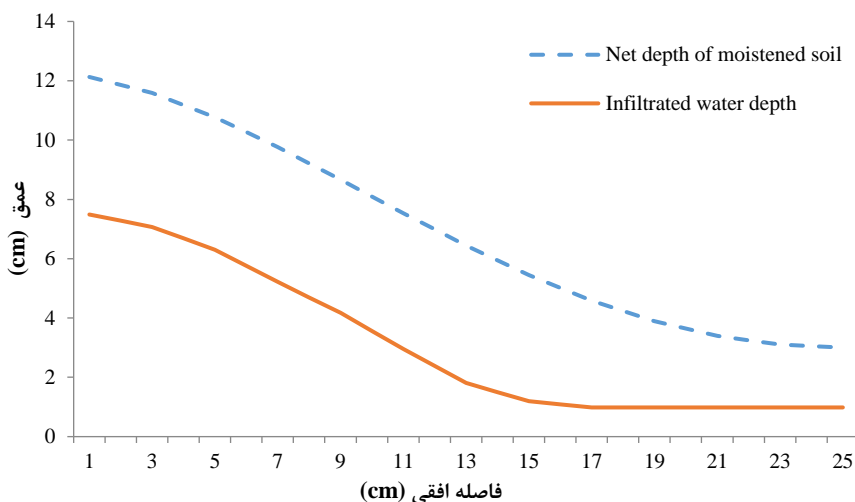
پس از تکمیل برنامه و با اجرای آن از روی زمان لازم برای ناپدید شدن آب در سطح خاک و همچنین جنس خاک اقدام به تعیین شماره منحنی نفوذ مورد استفاده در روابط $SCS(K_s)$ و $SCS(K_{se})$ که برای شبیه‌سازی به کار گرفته شده است کردیم. با توجه به نتایج، شماره منحنی نفوذ برای $SCS(K_s)$ ، ۲ و برای $SCS(K_{se})$ برابر ۰/۴ به‌دست آمد.

نتایج و بحث

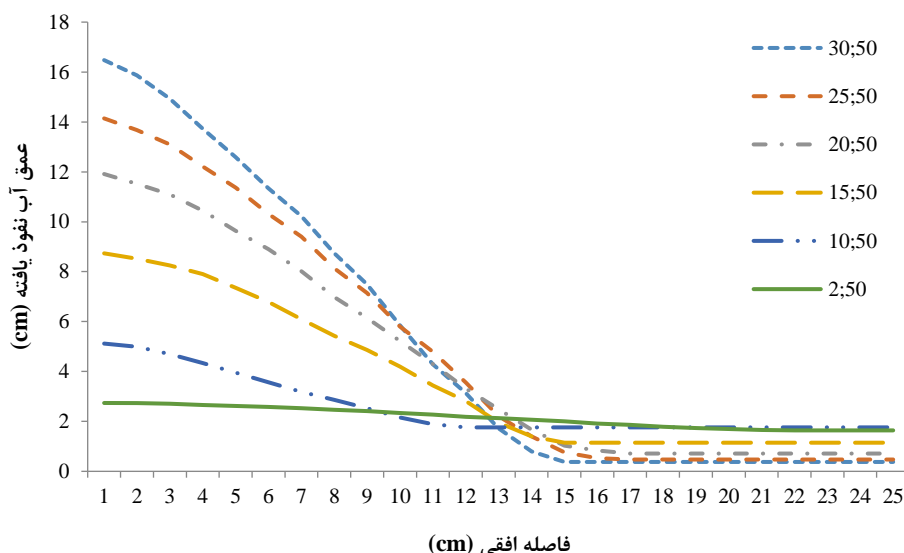
پس از انجام آزمایش، شبیه‌سازی با وارد نمودن مشخصات آزمایش (موجود در جدول ۱)، نظیر شدت بارش، طول زمان بارش، ابعاد و شیب ساختار کجاوه به‌عنوان ورودی، انجام شد. نتایج در شکل (۴) نشان‌داده شده است. در این شکل عمق خالص خیس‌شده خاک که از طریق آزمایش و در راستای عمود بر شیب (تفاضل عمق جبهه رطوبتی از عمق سطح خاک) به‌دست آمده است (منحنی خط‌چین) و عمق آب نفوذیافته عمود بر شیب که از طریق شبیه‌سازی به‌دست آمده است (منحنی با خط پیوسته) دیده می‌شود (توجه به این نقطه لازم است که نمودار برای نصف ساختار کجاوه رسم شده است). هرچند منحنی با خط پیوسته مربوط به عمق آب نفوذیافته در خاک است (نتایج شبیه‌سازی) و نمودار خط‌چین معرف عمق خاک خیس‌شده است و کمیت یکسانی را نشان نمی‌دهند، با این حال، روند یکسان برای نفوذ آب در خاک دیده می‌شود و این بیانگر تناسب شبیه‌سازی با آزمایش است. برای تبدیل نمودار آب نفوذیافته (نمودار خط‌چین) به نمودار عمق خاک خیس‌شده، نیاز به حل معادله ریچاردز و یافتن توزیع رطوبت در پروفیل خاک است که این خود مستلزم بحث مفصل و مجزا است و در این تحقیق مطرح نشده است.

برای روشن‌تر شدن تأثیر شیب بر کارکرد سیستم کجاوه، نفوذ نقطه‌ای در نسبت طول به عمق ساختار برابر با ۵۰:۲، ۵۰:۱۰، ۵۰:۱۵، ۵۰:۲۰، ۵۰:۲۵ و ۵۰:۳۰ تعیین گردید (جدول ۲) که در شکل (۵) دیده می‌شود. به‌منظور انجام مقایسه بین شیب‌های مختلف، میزان نفوذ آب در واحد طول افقی و نه واحد طول روی شیب نمایش داده شده است تا معیار مقیاس یکسان باشد. همانگونه که مطرح گردید، انتظار می‌رود یک شیب بهینه وجود داشته باشد که در آن تمرکز آب به بیشترین مقدار خود برسد. یا به‌عبارت دیگر عرض خیس‌شده (a) کمینه گردد. در شکل (۵) دیده می‌شود که این حالت کمینه در شیب ۵۰:۱۰ برای شرایط مطابق با جنس خاک و شدت بارش مشخص شده در جدول (۱) رخ داده است. همانگونه که دیده می‌شود برای نسبت طول به عمق ساختار ۵۰:۲ عرض خیس‌شده خاک (a) ۴۰ سانتی‌متر است. همچنین برای نسبت طول به عمق بزرگتر از ۵۰:۱۰ این مقدار تقریباً برابر ۳۰ سانتی‌متر از طریق شبیه‌سازی به‌دست آمده است ولی عرض خیس‌شده برای نسبت طول به عمق ۵۰:۱۰ برابر ۲۴ سانتی‌متر می‌باشد. این بدان معنا است که ساختاری با قاعده مربعی به ضلع ۵۰ سانتی‌متر، عمق ۱۰ سانتی‌متر در خاک شن-لوم و برای بارندگی با شدت ۱۱/۴۹ سانتی‌متر بر ساعت و به‌مدت ۱۰ دقیقه، در بین ساختارهای مورد بررسی، بیشترین کارایی از

نظر متمرکز نمودن آب را خواهد داشت.



شکل ۴- عمق خالص خاک خیس شده عمود بر شیب (نمودار مربع) و عمق آب نفوذ یافته عمود بر شیب (نمودار دایره) حاصل از شبیه سازی



شکل ۵- نفوذ نقطه ای برای عمق های مختلف ساختار کجاوه

کمتر از مقدار نفوذ در نسبت ۵۰:۱۰ است که علت آن هم بهینه بودن نسبت طول به عمق ساختار برابر با ۵۰:۱۰ است. در تمامی موارد نسبت طول به عمق ساختارها، با افزایش شیب، بیشترین مقدار آب نفوذ یافته که مربوط به گودترین نقطه ساختار است، افزایشی است که هدف از طراحی سیستم کجاوه، وابسته به شکل هرمی ساختار و مطابق با انتظارات است.

موضوعی که در شکل (۵) جلب توجه می نماید تقریباً یکسان بودن عرض خیس شده برای ساختارهایی با نسبت طول به عمق ساختار برابر با ۵۰:۱۵، ۵۰:۲۰، ۵۰:۲۵ و ۵۰:۳۰ است. البته با افزایش شیب، عرض خیس شده کاهش یافته است ولی این مقدار ناچیز است به طوری که در ساختارهایی با نسبت طول

همانگونه که در شکل (۵) دیده می شود، با افزایش شیب، میزان آب نفوذ یافته در سطح شیب دار کاهش یافته است (بخش افقی در سمت راست نمودارها). همچنین میزان کاهش نفوذ باران در سطح شیب دار با افزایش شیب دیواره حالت میرا دارد که علت فرم نمایی رابطه (۳) است (که بعنوان ضریب در رابطه (۱۴) به کار گرفته شده است) و انتظار می رود با رسیدن به یک شیب مشخص که متناسب با جنس خاک، طول مدت بارندگی و شدت بارش است، تأثیر شیب بر نفوذ باران در سطح شیب دار از بین برود. این مطلب تایید کننده توضیحات مربوط به رابطه (۱۴) است. تنها مورد قابل ذکر در این زمینه مربوط به نسبت طول به عمق ساختار برابر با ۵۰:۲ است که در آن مقدار نفوذ باران در سطح شیب دار

روند مشابهی با نتایج حاصل از آزمایش‌ها از خود نشان داد. در ادامه، تأثیر شیب بر کارایی ساختار کجاوه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده وجود یک شیب مشخص وابسته به ابعاد هندسی ساختار کجاوه، جنس خاک، شدت و طول مدت بارندگی است که در آن بیشترین مقدار تمرکز آب در پای ریشه گیاه به دست می‌آید. در این تحقیق از چندین شیب ثابت برای شبیه‌سازی استفاده شد و ساختاری با نسبت طول به عمق ساختار برابر با ۵۰:۱۰ به‌عنوان حالت بهینه به دست آمد. این نتیجه مختص شرایط مطابق با جنس خاک و شدت بارش مشخص شده در جدول (۱) رخ داده است و قابل تعمیم به شرایط مشابه نیست و برای حالت‌هایی با مشخصات متفاوت نیاز به تکرار شبیه‌سازی است. از آنجایی که خاک در مزرعه معمولاً همگن در نظر گرفته می‌شود، از روی شدت بارش و طول مدت بارندگی اقدام به تعیین شیب بهینه برای ساختاری با ابعاد مشخص، می‌گردد. شدت بارش و طول زمان بارندگی، هر دو کمیت‌های منحصر به فرد برای هر رخداد بارندگی است و لزوماً قابل تکرار نخواهد بود. بنابراین نیاز به تحلیل آماری این دو کمیت است و از محتمل‌ترین مقدار به دست آمده برای شدت و طول مدت بارندگی به عنوان ورودی شبیه‌سازی استفاده می‌گردد. برای تحلیل آماری شدت و طول مدت بارندگی، نرم‌افزارهایی وجود دارد که تحلیل آماری بر روی داده‌های هواشناسی انجام می‌دهد و از نتایج آنها با احتمالات وقوع مختلف می‌توان برای شبیه‌سازی بهره برد. در صورت نیاز به یافتن حالت بهینه با دقت بیشتر، اعمال یک روش بهینه‌سازی الزامی است. اگر هدف از شبیه‌سازی بهینه کردن سایر کمیت‌ها مانند کاهش نفوذ در دیواره‌ها باشد، نیاز به تغییر روند بهینه‌سازی است. در نهایت مفهوم شبیه‌سازی سیستم‌های استحصال آب باران، یک کار جدید و مورد نیاز برای مناطق خشک و کم آب نظیر ایران است و در راستای انجام این کار نیاز به درک برخی مفاهیم نظیر نحوه کارکرد سیستم استحصال آب باران و نفوذ آب باران در سطح شیب‌دار وجود دارد که هنوز به صورت کامل مشخص نشده است و نیاز به کارهای بیشتر در این زمینه حس می‌شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

به عمق ساختار برابر با ۵۰:۱۵، ۵۰:۲۰، ۵۰:۲۵ و ۵۰:۳۰ عرض خیس شده به ترتیب برابر است با ۲۸، ۲۷/۵ و ۲۷ سانتی‌متر. به نظر می‌رسد این اتفاق به علت استفاده از رابطه (۱۴) رخ داده باشد. رابطه (۱۴) یک معادله تجربی است و ما برای استفاده از این معادله کالیبراسیون خاصی انجام نداده و از داده‌های موجود در مقاله Morbidelli et al. (2019) استفاده نمودیم. از آنجایی که نفوذ باران در سطوح شیب‌دار یک مسئله باز است و تحلیل یا روابط قطعی در این زمینه وجود ندارد و این که شبیه‌سازی انجام شده صرفاً به منظور بررسی نحوه شبیه‌سازی یک سیستم استحصال آب باران انجام شده و در حال توسعه است، استفاده از این معادله قابل قبول به نظر می‌رسد. از طرفی همانگونه که بحث شد، اختلاف ناچیز در عرض خیس شده در ساختارهایی با نسبت طول به عمق ساختار برابر با ۵۰:۱۵، ۵۰:۲۰، ۵۰:۲۵ و ۵۰:۳۰ می‌تواند وابسته به این حقیقت باشد که تأثیر شیب بر روی نفوذ با افزایش شیب کمتر می‌شود و می‌توان انتظار داشت پس از یک شیب مشخص، افزایش زاویه تأثیر چشمگیری بر نفوذ نگذارد (Morbidelli et al., 2019). این مطلب با نتایج تحقیقات Fox et al. (1997) که بیان داشتند "میزان نفوذپذیری با افزایش زاویه شیب تا ۱۱/۵ درجه کاهش یافت و پس از آن با افزایش بیشتر شیب ثابت باقی ماند" نیز مطابقت می‌نماید. به هر حال بررسی نفوذ بدون بررسی توزیع مجدد رطوبت به‌ویژه در بارندگی‌های طولانی‌مدت، خود می‌تواند عامل ایجاد خطا گردد. در نهایت شکل هرمی ساختار کجاوه نیز می‌تواند مزید بر علت گردد. با وجود تمامی این مطالب، پیروی شبیه‌سازی انجام شده از انتظارات، بیانگر مناسب بودن رویه انجام شبیه‌سازی است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک سیستم استحصال آب باران با جمع‌کننده کوچکتر به نام سیستم کجاوه معرفی گردید و اقدام به شبیه‌سازی آن برای تخمین قدرت متمرکز نمودن آب و فراهم نمودن آب برای محصول مورد کشت صورت گرفت. در این راستا مفهوم نفوذ باران در سطوح شیب‌دار مطرح گردید و در نهایت از یک روش مفهومی - تجربی برای تخمین آن استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی

REFERENCES

- Abdallah, N. A., Ting Wua, L. and Mohammed Elamin, A.V. (2016). Rain infiltration into loess soil under different rain intensities and slope angles. *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)*, 8 (2), 179- 183.
- Assouline, S. and Ben-Hur, M. (2006). Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. *Catena*, 66 (3), 211- 220.
- Chaplot, V. and Le Bissonais, Y. (2000). Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth Surf. Process. Landforms*, 25, 145-153.
- Chen, L. and Young, M.H. (2006). Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces. *Water Resour*, 42 (7), W07420.
- Cerdà, A. and García-Fayos, P., (1997). The influence of slope angle on sediment, water and seed losses on badland landscapes. *Geomorphology*, 18, 77- 90.

- Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York.
- Essig, E.T., Corradini, C., Morbidelli, R. and Govindaraju, R.S. (2009). Infiltration and deep flow over sloping surfaces: comparison of numerical and experimental results. *J. Hydrol*, 374, 30–42.
- Fox, D.M., Bryan, R.B. and Price, A.G. (1997). The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. *Geoderma*, 80, 181–194.
- Fredlund, D.G. (1997). Unsaturated Soil Mechanics. China Building Industry Press, Beijing, China.
- Fujimura, K. and Ando, Y. (2001). Analysis of infiltration capacity in upper soil layer during unsteady rainfall using a rainfall simulator. *Urban Drainage Modeling*, 23, 83–88.
- Janeau, J.L., Bricquet, J.P., Planchon, O. and Valentin, C. (2003). Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand. *Europ. J. Soil Sc*, 54, 543–553.
- Jing, X., Zhang, Sh., Zhang, J., Wang, Y. and Wang, Y. (2017). Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China. *Resources, Conservation & Recycling*, 126, 74–85.
- Khan, M.N., Gong, Y., Hu, T., Lal, R., Zheng, J., Justine, M.F., Azhar, M., Che, M. and Zhang, H. (2016). Effect of slope, rainfall intensity and mulch on erosion and infiltration under simulated rain on purple soil of south-western Sichuan province, China. *Water*, 8 (11), 528–533.
- Luk, S. H., Cai, Q. and Wang, G. P. (1993). Effects of surface crusting and slope gradient on soil and water losses in the hilly loess region, north china. *Catena Suppl*, 24, 29–45.
- Mein, R.G. and Larson, C.L. (1973). Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resour*, 9, 384–394.
- Morbidelli, R., Saltalippi, C., Flammini, A., Cifrodelli, M., Corradini, C. and Govindaraju, R. S. (2015). Infiltration on sloping surfaces: laboratory experimental evidence and implications for infiltration modelling. *J. Hydrol*, 523, 79–85.
- Morbidelli, R., Saltalippi, C., Flammini, A., Cifrodelli, M., Picciafuoco, T., Corradini, C. and Govindaraju, R.S. (2016). Laboratory investigation on the role of slope on infiltration over grassy soils. *J. Hydrol*, 543, 542–547.
- Morbidelli, R., Corradini, C., Saltalippi, C., Flammini, A., Dari, J. and Govindaraju, R.S. (2019). A New Conceptual Model for Slope-Infiltration. *J. Water*, 11, 678–684.
- Morin, J. and Benyamini, Y. (1977). Rainfall infiltration into bare soils. *Water Resource*, 13, 813–817.
- Mu, W., Yu, F., Li, C., Xie, Y., Tian, J., Liu, J. and Zhao, N. (2015). Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and soil moisture content on different growing stages of spring maize. *Water*, 7, 2990–3008.
- Nassif, S.H. and Wilson, E.M. (1975). The influence of slope and rain intensity on runoff and infiltration. *Hydrol. Sci*, 20 (4), 539–553.
- Oweis, T., Hachum, A. and Kijne, J. (1999). Water harvesting and supplementary irrigation for improved water use efficiency in dry areas. SWIM Paper 7. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka. p: 41.
- Oweis, T., Prinz, D. and Hachuma. (2001). Water Harvesting: Indigenous Knowledge for the Future of the Drier Environments. International Centre for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA). Aleppo, Syria. p: 40.
- Parlange, J. Y., Lisle, I., Braddock, R.D. and Smith, R.E. (1982). The three-parameter infiltration equation. *Soil Sci*, 133 (6), 337–341.
- Philip, J. R. (1991). Hillslope infiltration: planar slopes. *Water Resour*, 27 (1), 109–117.
- Poesen, J. (1984). The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian overland flow volume. *Z. Geomorphol*, 49, 117–131.
- Ribolzi, O., Patin, J., Bresson, L., Latschack, K., Mouche, E., Sengtaheuanghoung, O., Silvera, N., Thiébaux, J.P. and Valentin, C. (2011). Impact of slope gradient on soil surface features and infiltration on steep slopes in northern Laos. *Geomorphology*, 127 (1–2), 53–63.
- Sharma, K., Singh, H. and Pareek, O. (1983). Rain water infiltration into a bar loamy sand. *Hydrol. Sci. J*, 28, 417–424.
- Youngs, E.G. (1964). An infiltration method measuring the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. *Soil Sci*, 97, 307–311.