9th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

بررسی اثر متقابل شیب زمین و شدت باران بر نفوذ آب در خاک

یاسین صالحی[1*]- علی رضا واعظی[2]

۱- دانشجوی دکتری فیزیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان(yasin90salehi@gmail.com)
۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

چکیده

نفوذ آب در خاک، یکی از فرآیندهای کلیدی در چرخه هیدرولوژیکی و مدیریت پایدار منابع طبیعی است. این فرآیند نقش مهمی در کاهش رواناب سطحی، کنترل فرسایش خاک و افزایش بهره‌وری کشاورزی ایفا می‌کند. این پژوهش با هدف بررسی اثر چهار شیب (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) و شش شدت بارندگی (۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ میلی‌متر بر ساعت) بر شدت نفوذ نهایی و شدت نفوذ متوسط آب باران با استفاده از شبیه‌ساز باران در استان زنجان انجام شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات شیب زمین، شدت باران و تعامل آن‌ها بر شدت نفوذ نهایی و متوسط در سطح ۱و ۵ درصد معنی‌دار بودند. بیشترین شدت نفوذ متوسط (۳/۸ سانتی‌متر بر ساعت) و نهایی (۳/۲۱ سانتی‌متر بر ساعت) در شیب ۵ درصد با شدت بارندگی‌های ۱۵۰ و ۶۰ میلی‌متر و کمترین مقادیر هر دو شاخص نیز در شیب ۲۰ درصد و شدت بارندگی ۴۰ میلی‌متر بر ساعت به ترتیب برابر با ۱/۷۱ و ۰/۷۳ سانتی‌متر بر ساعت به دست آمد. به صورت کلی نتایج پژوهش نشان داد که در شیب‌های کم، افزایش شدت باران موجب افزایش نفوذ می‌شود، اما در شیب‌های زیاد، رواناب سطحی افزایش یافته و فرصت نفوذ کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: شبیه‌ساز باران، رواناب سطحی، فرسایش خاک، نفوذ نهایی

مقدمه

نفوذ آب در خاک یکی از فرآیندهای کلیدی در چرخه هیدرولوژیکی است که نقش مهمی در تغذیه سفره‌های زیرزمینی، رشد گیاهان، و کنترل رواناب سطحی دارد. این فرآیند تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله بافت خاک، ساختار خاک، پوشش گیاهی، و شدت بارندگی قرار دارد. در شرایط اقلیمی متغیر، شناخت رفتار نفوذ آب در خاک‌های مختلف اهمیت ویژه‌ای در مدیریت منابع آب و خاک دارد. بافت خاک به‌عنوان یکی از ویژگی‌های فیزیکی اصلی، تعیین‌کننده سرعت و حجم نفوذ آب است. شدت بارندگی نیز می‌تواند باعث تغییر در الگوی نفوذ و افزایش یا کاهش رواناب سطحی شود. مطالعات متعددی در زمینه نفوذ آب در خاک تحت شرایط بارندگی و بافت‌های مختلف انجام شده است. khan و همکاران (2016) در مطالعه‌ای به منظور بررسی اثر شیب زمین و شدت باران بر نفوذپذیری یک خاک لومی در حوضه سیچوان، جنوب غربی کشور چین بارش‌های با شدت ۳۳ و ۱۲۰ میلی‌متر در ساعت را در محدوده شیب ۵ تا ۲۵ را با استفاده از شبیه‌ساز باران اعمال کردند و گزارش کردند با افزایش شدت باران سرعت نفوذ نیز افزایش می‌یابد و اثر شدت بارندگی در میزان نفوذ با تغییر زاویه شیب تغییر می‌کند و در شیب‌های تند، شدت باران بیش‌از ۵۰ درصد تغییرات نفوذپذیری خاک را تعیین می‌کند. مطالعه‌ای توسط رمایی و همکاران (۱۳۹۷) در دیم‌زارهای منطقه کلاله استان گلستان نیز تأیید

کرد که با افزایش شدت بارندگی شدت متوسط نفوذ کاهش و ضریب متوسط رواناب افزایش می‌یابد. نتایج این پژوهش نشان داد که در شدت‌های بارندگی بالاتر از ۷۰ میلی‌متر در ساعت، کاهش نفوذ و افزایش رواناب به‌طور معنی‌داری رخ می‌دهد، که اهمیت مدیریت پوشش سطحی و جلوگیری از تبدیل مراتع به دیم‌زارها را برجسته می‌سازد. در پژوهشی توسط هائو و همکاران (۲۰۱۹)، مشخص شد که افزایش شدت بارندگی در خاک‌های سبک موجب افزایش نفوذ اولیه می‌شود، اما در خاک‌های سنگین‌تر، رواناب سطحی سریع‌تر شکل می‌گیرد و نفوذ محدود می‌شود. سایمیلانه و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای اثر هم زمان شدت باران و شیب زمین بر شدت نفوذ را بررسی کرند. نتایج نشان دادند اثر افزایشی بارندگی بر نفوذ در شیب‌های کم پایدار است، اما در شیب‌های زیاد این اثر کاهش‌یافته و به دلیل افزایش رواناب سطحی کاهش نفوذ دیده می‌شود آن‌ها بررسی اثر متقابل این دو عامل را برای دقت بالاتر در پیش‌بینی نفوذ و رواناب ضروری دانستند.

مواد و روش‌ها

آزمایش در محدوده شهر زنجان انجام شد. برای انجام این پژوهش به منظور بررسی شدت نفوذ نهایی و شدت نفوذ متوسط آب در خاک پنج شدت باران شبیه‌سازی شده (۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ میلی‌متر بر ساعت) بر چهار شیب زمین (۵، ۱۰، ۱۵، و ۲۰ درصد) در دو تکرار اعمال شد. منطقه موردمطالعه داری متوسط بارندگی سالانه در دوره آماری ۱۰ساله حدود ۲۷۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۱ درجه سانتی‌گراد است. این منطقه بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن دارای اقلیم سرد و خشک است. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک بر اساس اطلاعات نقشه رژیم رطوبتی و حرارتی کشور به ترتیب زریک[1] و مزیک[2] است.

برای انجام این پژوهش یک دستگاه شبیه‌ساز باران با توان ایجاد شدت‌های مختلف باران طراحی و ساخته شد. ابعاد باران‌ساز ۵۰ سانتی‌متر در ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۱ متر است. در طراحی باران‌ساز، اندازه قطرات باران به طور متوسط از ۱/۲ تا ۲/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد (Rousseau, 2006). رواناب و رسوب در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه از آغاز رواناب تا رسیدن به جریان پایدار در ظرف‌های مدرج مجزا جمع‌آوری و حجم و جرم مخلوط رواناب و رسوب (با استفاده از ترازوی دقیق دیجیتالی) اندازه‌گیری شد. مدت آزمایش با توجه به زمان رسیدن به حالت پایدار در همه آزمایش‌ها به مدت ۶۰ دقیقه بود. ارتفاع رواناب هر فلوم برحسب سانتی‌متر از تقسیم حجم رواناب (سانتی‌متر مکعب) بر مساحت فلوم (سانتی‌متر مربع) به دست آمد و برحسب میلی‌متر گزارش گردید. حال با داشتن رواناب و تقسیم آن بر مساحت کرت آزمایشی، مقدار باران و با فرض ناچیز بودن مقدار نگهداشت سطحی، میزان نفوذ آب در خاک با استفاده از معادله تعادل آب به دست آمد (اسکاجز، ۱۹۸۰). بر اساس این رابطه:

$$P=F+\Delta S+R \quad (۱)$$

$$F=P-\Delta S-RO \quad (۲)$$

[1] Xeric
[2] Mesic

که در آن P (سانتی‌متر) بارش، F نفوذ آب در خاک (سانتی‌متر)، ΔS تغییرات نگهداشت آب در سطح (سانتی‌متر) و RO ارتفاع رواناب سطحی (سانتی‌متر) است.

اثرات جداگانه و متقابل شیب زمین و شدت باران با استفاده از روش ANOVA مورد بررسی قرار گرفت برای انجام مقایسه‌های میانگین آزمون دانکن استفاده شد. به این منظور آماره مجموع مربعات داده‌ها، درجه آزادی، میانگین مربعات خطا و سطح معنی‌داری برای کلیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS تعیین شد و برای ترسیم نمودارها از نرم‌افزار Microsoft Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس اثر شیب زمین، شدت باران را بر شدت نفوذ نهایی و شدت نفوذ متوسط نشان می‌دهد. مطابق این جدول اثرات مستقل شیب زمین و برهمکنش شیب زمین و شدت باران بر تغییرات دو فاکتور شدت نفوذ نهایی و شدت نفوذ متوسط در سطح یک درصد معنی‌دار بودند همچنین اثر عامل شدت باران بر شدت نفوذ نهایی در سطح پنج درصد و بر شدت نفوذ متوسط در سطح یک درصد معنی‌دار بود.

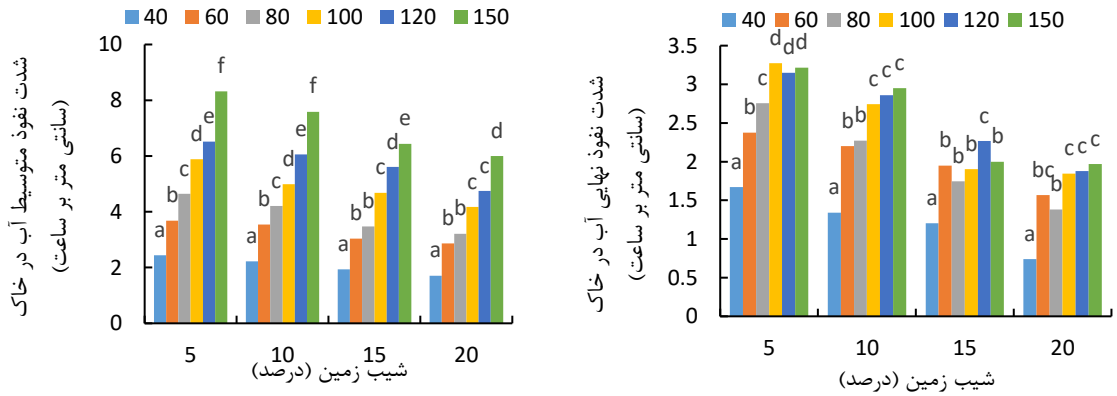
جدول ۱- تجزیه واریانس تغییرات شدت نفوذ متوسط و شدت نفوذ نهایی تحت تأثیر شیب سطح و شدت باران

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		شدت نفوذ نهایی	شدت نفوذ متوسط
شدت باران	۵	۱/۱۶۱*	۶/۱۷۱**
شیب زمین	۳	۸/۷۱۷**	۱۲۵/۹۱۲**
شیب زمین × شدت باران	۱۵	۲/۹۶۳**	۶/۹۴۱**
خطای فاکتور فرعی	۱	۰/۲۹۸	۰/۳۷۶
کل	۲۴		

تغییرات شدت نفوذ نهایی و شدت نفوذ متوسط آب در خاک تحت تأثیر شدت باران در شیب‌های مختلف

بررسی تغییرات شدت نفوذ متوسط آب در خاک در سطوح مختلف شدت بارندگی نشان می‌دهد که با افزایش شیب زمین، سطح معناداری تغییرات شدت‌های نفوذ نهایی و نفوذ متوسط در شدت‌های مختلف باران کاهش‌یافته است (شکل ۱) بیشترین شدت نفوذ متوسط مربوط به شیب ۵ درصد و شدت بارندگی ۱۵۰ میلی‌متر بر ساعت با مقدار ۸/۳ سانتی‌متر بر ساعت بود؛ در حالی‌که کمترین مقدار مربوط به شیب ۲۰ درصد و شدت بارندگی ۴۰ میلی‌متر بر ساعت با مقدار ۱/۷۱ سانتی‌متر بر ساعت بود همچنین بیشترین مقدار شدت نفوذ نهایی نیز برابر با ۳/۲۱ سانتی‌متر بر ساعت در شیب ۵ درصد و شدت بارندگی ۶۰ میلی‌متر بر ساعت بود؛ در حالی‌که کمترین مقدار آن با ۰/۷۳ سانتی‌متر بر ساعت در شیب ۲۰ درصد و شدت بارندگی ۴۰ میلی‌متر بر ساعت به دست آمد. به‌طور مشخص، در شیب‌های ۵ و ۱۰درصد، شدت نفوذ متوسط با افزایش شدت بارندگی به‌صورت معناداری روندی افزایشی داشته است؛ که این امر می‌تواند به دلیل اشباع

تدریجی لایه‌های سطحی خاک و ایجاد شرایطی مناسب برای نفوذ بیشتر آب باشد با این حال، در شیب‌های تندتر (مانند ۱۵ و ۲۰ درصد)، تأثیر شیب بر جریان سطحی و کاهش فرصت نفوذ قابل مشاهده است. این شرایط باعث می‌شود آب باران کم‌ترین ماندابی در سطح خاک داشته باشد و فرصت کمتری برای نفوذ در اختیار داشته باشد؛ در نتیجه، تفاوت‌های معنادار بین شدت‌های نفوذ متوسط تحت تأثیر افزایش شدت باران کاهش یابد. در مورد شدت نفوذ نهایی نیز، روندی مشابهی مشاهده شد در ابتدا، در همه شیب‌ها با افزایش شدت باران تا ۶۰ میلی‌متر در ساعت در تمام شیب‌ها، شدت نفوذ نهایی افزایش یافته است که می‌تواند به دلیل شکستن سطح خاک و افزایش هدایت هیدرولیکی آن توسط ذرات ریز خاک (رس و سیلت) باشد (Morbidelli eta 2018). به صورت کلی در شیب‌های پایین، افزایش شدت باران سبب افزایش نفوذ شده است، اما با افزایش شیب از اثر مثبت شدت باران بر شدت نفوذ کاسته شده است. در واقع شیب زمین به‌عنوان یک عامل محدود کننده عمل کرده و منجر به کاهش شدت نفوذ نهایی می‌شود. این امر می‌تواند به دلیل ایجاد فرسایش سطحی، بسته شدن منافذ خاک و افزایش سریع جریان سطحی باشد که نفوذ را کاهش دهد (صالحی و واعظی ۱۴۰۴). نتایج این تحقیق با مطالعات گذشته نیز هم راستا بوده و نتایج آن قابل‌تأیید است Hau و همکاران (2019) تأکید کردند که شدت بارش با افزایش شدت نفوذ تا زمانی که خاک به اشباع نزدیک شود ارتباط مستقیم دارد؛ پس از آن شدت نفوذ کاهش می‌یابد. آن‌ها در بررسی مدل‌های پیشرفته مانند مدل گرین_امپت اصلاح شده نیز ، این روند را به صورت کمی شرح داده‌اند و نقش افزایش فشار مویینگی در منافذ خاک را برجسته کرده‌اند. Li و همکاران (2020) بیان کردند که با افزایش شیب، زمان ماندن آب بر سطح کاهش یافته و نفوذ افت می‌کند؛ همچنین افزایش سرعت رواناب باعث فرسایش و کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود. یافته‌های آن‌ها نشان داد که در شیب‌های کمتر از ۱۰٪، نفوذ آب بیشتر و رواناب کمتر است و این تأثیر در شیب‌های بالاتر به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. Fox و همکاران (1997) نیز در شرایط فرسایش بین‌شیاری گزارش کردند که فرسایش ناشی از شیب‌های تند منجر به انسداد منافذ سطحی و تغییر ساختار خاک می‌گردد که به طور قابل توجهی نفوذ نهایی را کاهش می‌دهد. آن‌ها معتقد بودند کاهش عمق رواناب و فشار مویینه (به‌دلیل سرعت بالا جریان و زمان تماس کوتاه، فرصت تشکیل و اعمال نیروی مکش خاک کمتر می‌شود.) در شیب‌های بالا، نقش کلیدی در افت نفوذ دارد.



شکل ۱ - تغییرات شدت نفوذ نهایی (الف) و شدت نفوذ متوسط (ب) تحت تأثیر شدت باران در شیب‌های مختلف

نتیجه‌گیری

یافته‌ها این پژوهش نشان داد که در شرایط شیب کم، افزایش شدت بارندگی موجب بهبود نفوذپذیری خاک می‌شود؛ اما با افزایش شیب، این رابطه تضعیف شده و در شیب‌های بالا، فرصت نفوذ به‌شدت کاهش می‌یابد. رواناب سطحی بیشتر شده و زمان تماس آب با خاک کاهش می‌یابد، که در نهایت منجر به کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود. این تغییرات به دلیل فرسایش سطحی و تغییر در ساختار خاک اتفاق می‌افتد، جایی که منافذ خاک مسدود شده و هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که نفوذ آب در خاک در سطوح مختلف شیب و بارندگی، الگوهای پیچیده‌ای دارد. شدت نفوذ نهایی و متوسط در این شرایط متفاوت است و نمی‌توان آن را به‌صورت جداگانه بررسی کرد. درک این تعاملات برای پیش‌بینی دقیق نفوذ آب در خاک و مدیریت منابع آب حیاتی است. به صورت کلی نتایج این پژوهش با تأیید یافته‌های قبلی، بر لزوم در نظر گرفتن توپوگرافی و شدت بارندگی در طراحی سیستم‌های کنترل رواناب و مدیریت پایدار آب تأکید می‌کند.

منابع

۱. علی‌رمایی، ر.، خالدی‌درویشان، ع. ا. و عرب‌خدری، م. (۱۳۹۷). اثر شدت بارندگی و شیب بر نفوذ و رواناب سطحی در دیم‌زارهای منطقه کلاله استان گلستان. نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۰(۴): ۷۱۴-۷۲۶.

۲. صالحی، ی.، واعظی، ع.ر. (۱۴۰۴). بررسی نقش شیب بر شدت فرسایش بین‌شیاری در برخی خاک‌های یک منطقه نیمه‌خشک استان زنجان .تحقیقات کاربردی خاک، ۱۳(۱): ۳۱-۴۶.

3. 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(1-2), 181-194.
4. Hou, J., Zhang, Y., Tong, Y., Guo, K., Qi, W. and Hinkelmann, R. (2019). Experimental study for effects of terrain features and rainfall intensity on infiltration rate of modelled permeable pavement. Journal of Environmental Management, 243, 177–186.
5. 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.
6. Li, J., Wang, W., Guo, M., Kang, H., Wang, Z., Huang, J., Bai, Y., et al. (2020). Effects of soil texture and gravel content on the infiltration and soil loss of spoil heaps under simulated rainfall. Journal of Soils and Sediments, 1-13.
7. Morbidelli, R., Corradini, C., Saltalippi, C., Flammini, A., Dari, J. and Govindaraju, R.S. (2018). Rainfall infiltration modeling: A review. Water, 10(12), 1873.
8. Rousseau, P., Jolivet, V. and Ghazanfarpour, D. (2006). Realistic real-time rain rendering. Computers and Graphics, 30, 507-518.
9. Simelane, M.P.Z., Soundy, P. and Maboko, M.M. (2024). Effects of rainfall intensity and slope on infiltration rate, soil losses, runoff and nitrogen leaching from different nitrogen sources with a rainfall simulator. Sustainability, 16(11), 4477.

Investigating the interaction between rainfall intensity and slope on infiltration

Yasin Salehi[1], Ali Reza Vaezi[2]
[1] Ph.D. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Univrsity of Zanjan, Zanjan, Iran

[2] Full Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Univrsity of Zanjan, Zanjan, Iran

abstract

Rain infiltration fundamental process in the hydrological cycle and plays a vital role in sustainable natural resource management. It significantly contributes to reducing surface runoff, controlling soil erosion, and enhancing agricultural productivity. This study aimed to investigate the effects of four slope gradients (5%, 10%, 15%, and 20%) and six rainfall intensities (40, 60, 80, 100, 120, and 150 mm/h) on both final and average infiltration rates using a rainfall simulator in Zanjan Province, Iran. Analysis of variance revealed that slope, rainfall intensity, and their interaction had statistically significant effects on infiltration rates at the 1% and 5% levels. The highest average infiltration rate (3.8 cm/h) and final infiltration rate (3.21 cm/h) were recorded at a 5% slope under rainfall intensities of 150 mm/h and 60 mm/h, respectively. In contrast, the lowest values for both parameters were observed at a 20% slope and 40 mm/h rainfall intensity, with rates of 1.71 cm/h and 0.73 cm/h, respectively. Overall, the results indicated that at lower slopes, increasing rainfall intensity promotes infiltration, whereas at steeper slopes, enhanced surface runoff reduces infiltration opportunities. These findings underscore the importance of slope–rainfall interactions in designing effective soil conservation and runoff management strategies.

Keywords: Rainfall simulator, Surface runoff, Soil erosion, Final infiltration