Research Paper

Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil Resources Conservation (WSRCJ)

Web site:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

Email:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 14
No. 1 (53)

Received:
2023-11-29

Accepted:
2024-04-08

Pages: 29-42

Determining the Optimal Amount of Zeolite in Order to Control Runoff and Sedimentation of Burnt Soil under Laboratory Conditions

Leila Gholami [1*], Ataollah Kavian [2] and Nabiyeh Karimi [3]

1) Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
2) Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
3) Ph. D., Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
*Corresponding author email: l.gholami@sanru.ac.ir

Abstract:

Background and Aim: Changes in soil moisture and aggregates stability both in the short term and in the long term after fire are important because of their important role in plant growth and nutrition and soil erosion. On the other hand, the conditioners usage in soil and water conservation is necessary for the sustainable usage of water and soil resources. The soil and water conservation requires the determining the optimal amount of soil conditioners in order to prevent water pollution with the application of chemical fertilizers. Nevertheless, determining the optimal amount of various soil conditioners less has been noted with the quantification aim of their effect on the runoff and soil loss components. The present study was conducted in order to determination of the optimal amount of zeolite in fire soil under laboratory conditions.

Method: In the current research, zeolite additive with amounts of 250, 500 and 750 g m^{-2} was used in the collected soil from the rangeland. The preliminary results on the soil showed that the soil texture, organic matter, organic carbon and pH, EC were clay, 0.47 percent, 0.27 percent, 7.86, respectively. After preparing the soil and placing inside plots (with scale of 0.5 m^2), fire treatment applied to the soil surface. For this purpose, the remains of air-dried rangeland species with amounts about 250 g m^{-2} were poured and then fire was applied. The plots were placed under rainfall simulator system for a rainfall intensity of 50 mm h^{-1}. Then, the runoff and sediment samples were collected in control and conserved plots with zeolite in three replicates. The total volume of the runoff sample and its sediment concentration were take constant for 24 h and the excess water volume of the samples was drained and finally the samples were placed in an oven at a temperature of 105˚c for 24 h.

Results: The statistical results indicated the zeolite conditioner with rates of 250, 50, and 750 g m^{-2} on the surface of fire soil had the significant effect on the increasing the time to runoff (in confidence level of 99 percent) and decreasing the runoff volume (in confidence level of 99 percent), soil loss (in confidence level of 99 percent) and sediment concentration (in confidence level of 99 percent). Also, the results showed that the conservation percentage of time to runoff in zeolite treatment with rates of 250, 500 and 750 g s^{-2} was 1.61, 17.30 and 20.04 percent, respectively. The changes percent of the runoff volume in the fire soil with the zeolite application with different amounts was 8.00, 10.66 and 22.66 percent, respectively. The results of soil loss indicated that the conservation percent of zeolite conditioner in fire soil after the zeolite application with the used amounts was 14.24, 32.03 and 38.33 percent, respectively. Finally, the changes percent of zeolite conditioner in the fire soil on sediment concentration were 21.13, 24.90 and 21.41 percent, respectively.

Conclusion: The fire phenomenon in the control treatment caused the decreasing the soil porosity and the creation of the hydrophobic layer, which also decreased the infiltration amount of soil and also caused to drying of the soil, especially in the surface layer, and significantly increased the runoff and sediment transportation. The subgrouping results of the different zeolite treatments on the time to runoff showed that zeolite with the amount of 750 g m^{-2} was placed in the third subgroup, which it was selected as the optimal amount to increasing the time to runoff and reducing the runoff volume in the post-fire soil conditions. Also, the investigation of the conservation effect and grouping the different zeolite amounts showed that the zeolite with the amount of 250 and 500 g m^{-2} were the better for sediment concentration and soil loss, respectively, its same effect with other amounts and also its discussion of the economic efficiency. Therefore, they are suggested as optimal and practical values for changes study of sediment concentration and soil loss components.

Keywords: Runoff and Sediment Variables, Optimal Amount of Zeolite, Soil Amendments, Soil and Water Conservation

مقاله پژوهشی

شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

پست الکترونیک:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

سال چهاردهم
شماره ۱ (۵۳)

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۹/۰۸

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۱/۲۰

صفحات: ۴۲-۲۹

تعیین مقدار بهینه زئولیت به‌منظور مهار رواناب و رسوب خاک آتش‌سوزی شده تحت شرایط آزمایشگاهی

لیلا غلامی[1*]، عطاله کاویان[2] و نبیه کریمی[3]

۱) دانشیارگروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ،ساری، ایران.
۲) استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.
۳) دانش‌آموخته دکتری، گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.
* ایمیل نویسنده مسئول: l.gholami@sanru.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: تغییرات رطوبت خاک و پایداری خاکدانه‌ها چه در کوتاه‌مدت و چه در بلندمدت پس از آتش‌سوزی به دلیل نقش مهمی که در رشد و تغذیه گیاه و فرسایش خاک دارند از اهمیت بالایی برخوردار است. در همین راستا استفاده از افزودنی‌ها در حفاظت خاک و آب به‌منظور استفاده پایدار از منابع آب و خاک ضروری است. حفاظت خاک و آب نیازمند تعیین مقدار بهینه افزودنی‌های خاک می‌باشد تا از آلودگی‌های آب با کاربرد کودهای شیمیایی جلوگیری گردد. با این وجود، تعیین مقدار بهینه افزودنی‌های مختلف خاک با هدف کمّی‌سازی اثر آن‌ها بر مؤلفه‌های رواناب و هدررفت اجزای خاک کم‌تر توجه شده است. پژوهش حاضر به‌منظور تعیین مقدار بهینه زئولیت در خاک تحت تاثیر آتش‌سوزی در شرایط آزمایشگاهی انجام شد.

روش پژوهش: در پژوهش حاضر از افزودنی زئولیت با مقادیر ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ گرم بر مترمربع در خاک برداشت شده از کاربری مرتع استفاده شد. نتایج اولیه روی خاک نشان داد که بافت خاک، ماده آلی، کربن آلی و pH به‌ترتیب رسی، ۰/۴۷ درصد، ۰/۲۷ درصد و ۷/۸۶ بود. بعد از آماده‌سازی خاک و قرارگیری آن در داخل کرت‌ها (با مقیاس ۰/۵ مترمربع)، تیمار آتش‌سوزی روی خاک اِعمال شد. برای این منظور مقادیر حدود ۲۵۰ گرم بقایای گونه‌های مرتعی هوا خشک در هر مترمربع ریخته شد و سپس آتش‌سوزی اِعمال شد. کرت‌ها تحت سامانه شبیه‌ساز باران برای شدت بارش ۵۰ میلی‌متر بر ساعت قرار گرفت. سپس نمونه‌های رواناب و رسوب در کرت‌های شاهد و حفاظت شده با زئولیت در سه تکرار جمع‌آوری شدند. حجم کل نمونه رواناب و غلظت رسوب آن به مدت ۲۴ ساعت در حالت ثابت نگه داری شد و حجم آب اضافی نمونه‌ها تخلیه و در نهایت نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج آماری دلالت بر اثر معنی‌دار افزودنی زئولیت با مقادیر ۲۵۰، ۵۰ و ۷۵۰ گرم بر مترمربع در سطح خاک آتش‌سوزی روی افزایش زمان شروع رواناب (در سطح اعتماد ۹۵ درصد) و کاهش حجم رواناب (در سطح اعتماد ۹۹ درصد)، هدررفت خاک (در سطح اعتماد ۹۹ درصد) و غلظت رسوب (در سطح اعتماد ۹۹ درصد) داشت. هم‌چنین نتایج نشان داد که درصد حفاظت زمان شروع رواناب در تیمار زئولیت با مقادیر ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ گرم بر مترمربع به‌ترتیب ۱/۶۱، ۱۷/۳۰ و ۲۰/۰۴ درصد بوده است. درصد تغییرات حجم رواناب در خاک آتش‌سوزی شده با کاربرد افزدنی زئولیت با مقادیر مختلف به‌ترتیب ۸/۰۰، ۱۰/۶۶ و ۲۲/۶۶ درصد بود. نتایج هدررفت خاک حاکی از آن است که درصد حفاظت افزودنی زئولیت در خاک آتش‌سوزی شده پس از کاربرد زئولیت با مقادیر استفاده شده به‌ترتیب ۱۴/۲۴، ۳۲/۰۳ و ۳۸/۳۳ درصد بود. در نهایت درصد تغییرات افزودنی زئولیت در خاک آتش‌سوزی شده روی غلظت رسوب نیز به‌ترتیب ۲۱/۱۳، ۲۴/۹۰ و ۲۱/۴۱ درصد بود.

نتایج: پدیده آتش‌سوزی در تیمار شاهد موجب کاهش تخلخل خاک و ایجاد لایه آبگریزی شده که مقدار نفوذپذیری خاک نیز کاهش یافته و همچنین منجر به خشک شدن خاک به ویژه در لایه سطحی شده و به طور قابل توجهی رواناب و انتقال رسوب را افزایش می دهد. نتایج زیرگروه‌بندی تیمارهای مختلف زئولیت روی زمان شروع رواناب نشان داد که زئولیت با مقدار ۷۵۰ گرم بر مترمربع در زیرگروه سوم قرار گرفت که به‌عنوان مقدار بهینه برای افزایش زمان شروع و کاهش حجم رواناب در شرایط پس از آتش‌سوزی خاک انتخاب شد. هم‌چنین، بررسی اثر حفاظتی و گروه‌بندی مقادیر مختلف زئولیت نشان داد که زئولیت با مقادیر ۲۵۰ و ۵۰۰ گرم بر مترمربع به‌ترتیب روی غلظت رسوب و هدررفت خاک به دلیل اثر یکسان آن با سایر مقادیر و نیز بحث صرفه اقتصادی آن بهتر بودند. بنابراین برای بررسی تغییرات مولفه‌های غلظت رسوب و هدررفت خاک به‌عنوان مقدار بهینه و کاربردی پیشنهاد می‌گردند.

کلیدواژه‌ها: اصلاح‌کننده‌های خاک، حفاظت خاک و آب، مقدار بهینه زئولیت، مولفه‌های رواناب و رسوب

مقدمه

خاک یکی از با ارزش‌ترین منابع طبیعی است که در سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی و طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد و نقش مهمی در چرخه مواد مغذی، ترسیب کربن و حمایت از رشد گیاه ایفا می‌کند (Alcañiz et al., 2018; Silvério et al., 2019). پوشش گیاهی به دلیل افزایش ضریب زبری و نفوذپذیری خاک و کاهش انرژی جنبشی قطرات باران، به عنوان فاکتور کلیدی در کنترل رواناب و حفاظت خاک شناخته شده است. تاج پوشش گیاهی مهم‌ترین متغیر گیاهی برای فرسایش پاشمانی و بین شیاری و شیاری می‌باشد درحالی‌که برای فرسایش آبکندی فصلی و موقت، ریشه گیاهان نیز به اندازه تاج پوشش گیاهی دارای اهمیت است (Gyssels et al., 2005). آتش یکی از رخدادهای مهم و رایج در کلیه بوم‌سازگان‌های جنگلی و مرتعی است که منجر به تخریب پوشش گیاهی شده و تأثیرات بسیار پیچیده‌ای روی خصوصیات خاک دارد. آتش‌سوزی‌ها با ایجاد ترکیبات آلی باعث خاصیت آب‌گریزی در خاک شده که منجر به کاهش نفوذپذیری آب و تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌گردد. امروزه در خشکی‌ها پس از فعالیت‌های انسان، آتش‌سوزی فراگیرترین عامل تخریب بوم‌سازگان‌های طبیعی به شمار می‌رود آتش‌سوزی بر بسیاری از اجزای بوم سازگان‌های جنگلی، از جمله پوشش گیاهی، حیوانات، خاک، هوا، آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارد (DeBano et al., 2000; Lucas-borja, 2021; González-Romero, et al., 2015). بنابراین آتش‌سوزی نه تنها باعث کاهش پوشش گیاهی، لخت شدن سطح خاک و آسیب‌پذیری در برابر برخورد قطرات باران می‌شود بلکه اثرات مخربی بر چرخه هیدرولوژی و هدررفت خاک دارد. از بین رفتن کامل پوشش گیاهی در اثر آتش‌سوزی ممکن است منجر به تخریب غیر قابل برگشت خاک در مناطق نیمه‌خشک شود. اثرات آتش‌سوزی می‌تواند تا چندین سال ادامه داشته باشد و بزرگی آن بر اساس شدت آتش‌سوزی تعیین می‌شود. آتش-سوزی به طور کامل پوشش گیاهی را از بین می‌برد و ویژگی-های خاک را برای مدت طولانی تغییر می‌دهد در حالی که آتش با شدت کم لایه‌های علفی و بوته‌ای را می‌سوزاند (Bento-Goncalves et al., 2012). آتش بر بسیاری از خواص فیزیکی (خاکدانه، آب‌گریزی، چگالی حجمی، pH، توزیع اندازه ذرات، رژیم رنگ و دما) و ویژگی‌های شیمیایی (کمیت و کیفیت مواد آلی، دسترسی به مواد غذایی و ظرفیت تبادل) و زیست‌شناسی خاک تأثیر می‌گذارد. هم‌چنین آتش باعث افزایش آبگریزی خاک می‌شود و با کاهش نفوذپذیری، اثرات مهمی بر وضعیت هیدرولوژیکی و هدررفت خاک دارد (Agbeshieet al., 2022; Lucas-Borja et al., 2023). اثر آتش سوزی بر فرسایش خاک به شدت آتش‌سوزی و ویژگی‌های بارندگی منطقه بستگی دارد. بنابراین بررسی رواناب سطحی پس از آتش‌سوزی‌های برای پیش‌بینی واکنش بوم سازگان به فرسایش و رواناب، پیش‌بینی خطرات و اجرای اقدامات موثر کاهش فرسایش در پس از آتش‌سوزی کلیدی است (Robichaud et al., 2010; Robichaud et al., 2016). امروزه روش‌های مدیریت پس از آتش‌سوزی از جمله جنگل‌کاری، بذرپاشی، مالچ پاشی، موانع فرسایش یا آماده‌سازی خاک (Pereira et al., 2018;) برای محدود کردن اثرات خطرناک آتش‌سوزی مورد استفاده قرار گرفته است (Lucas-borja, 2021). برخی از محققان نیز اثرات هیدرولوژیکی پس از آتش سوزی را در محیط‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند (Lucas-borja, 2021; Fernández et al., 2016). در مناطقی که به شدت سوخته‌اند نیز روش‌های تثبیت خاک اغلب برای کاهش خطرات رواناب و فرسایش پس از آتش سوزی توصیه می‌شود (Napper et al., 2006; Vega et al., 2014). در همین راستا در جهان، روش‌های کنترل فرسایش خاک با استفاده از افزودنی‌های خاک که انرژی فرسایشی رواناب را کاهش و نفوذپریری را افزایش می‌دهند به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Fox et al., 2006; Myronidis et al., 2010; Loures et al., 2012; Gholami et al., 2016a; 2016b; Kavian et al., 2018; Gholami et al., 2019; Gholami et al., 2022).

استفاده از زئولیت‌ها به طور جدی توسط محققان به عنوان یکی از گزینه‌های مختلف برای استفاده از مواد افزودنی در حفاظت از منابع آب و خاک مطرح شده‌است (Robichaud et al., 2010؛ محبتی و همکاران ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱). زئولیت یک کانی رسوبی طبیعی است که در درجه اول از سیلیکات آلومینیوم تشکیل شده‌است (Pan et al., 1991). این ماده معدنی یک شبکه کریستال سه‌بعدی است که دارای کاتیون‌های مرزی است و قادر به مرطوب کردن و مرطوب سازی بدون تغییر ساختار کریستالی است (Ramesh and Damodar, 2011). زئولیت نقش قابل‌توجهی در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند هدایت هیدرولیکی، نفوذ، تهویه و بهبود ترسیب کربن در خاک ایفا می‌کند. زئولیت به دلیل ویژگی‌های بسیار متخلخل و ظرفیت مکش بالای آن، به نفوذ آب و حفظ آن در خاک کمک کرده که این امر به اصلاح خاک‌های خشک و توزیع آب در آن‌ها کمک می‌کند (Szerment et al., 2014; Ghazavi et al., 2015). هم-چنین زئولیت می‌تواند تا زمان نیاز گیاه آب را در منطقه ریشه گیاه نگه‌داری کند، این امر منجر به استفاده کمتر و کارآمدتر از انواع کودها می‌شود (Gameze et al., 2007; Khodaei and Asila., 2012). از سویی دیگر استفاده از کرت‌های آزمایشی فرسایش خاک به دلیل درک فرآیند حاکم،

انجام مطالعات مقایسه‌ای و ارزیابی کارآیی مدل‌های برآورد فرسایش خاک حائز اهمیت فراوان است (Kimhi et al., 2003). همچنین ارزیابی عکس‌العمل فرآیند فرسایش خاک در برابر گزینه‌های مختلف مدیریتی با استفاده از کرت‌های آزمایشی امکان‌پذیر می‌باشد (Adams., 1966). اندازه‌گیری مولفه‌های رواناب در کرت‌های آزمایشگاهی و صحرایی با استفاده از بارندگی‌های طبیعی و یا شبیه‌ساز باران قابل انجام است. اما بایستی بیان نمود که استفاده از شبیه‌ساز باران برای اندازه‌گیری فرسایش دارای دو مزیت اصلی، توانایی کنترل شدت و مدت بارندگی و تکرارپذیر بودن بارندگی می‌باشد که به افزایش دقت داده‌ها و نیز امکان ارزیابی‌های مقایسه‌ای تیمارهای مختلف منجر خواهد شد. یکی از روش‌های بررسی فرسایش و تولید رواناب، انتقال خاک به آزمایشگاه‌های شبیه-ساز باران و انجام مطالعات روی خاک آماده‌سازی شده در کرت‌های آزمایشگاهی است (Gholami et al., 2019). برخی از پژوهش‌ها تنها بر اثر آتش‌سوزی بر برخی از اجزای بوم سازگان (به‌عنوان مثال، پوشش گیاهی، ویژگی‌های خاک، رواناب و فرسایش خاک) تمرکز کرده اند، اما پژوهش حاضر به تعیین مقدار بهینه زئولیت بر تغییرات مولفه‌های رواناب و رسوب در شرایط پس از آتش‌سوزی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

برای انجام این آزمایش از یک خاک سطحی با عمق ۲۰-۰ سانتی‌متر (Kukal and Sarkar., 2010) که از اراضی مرتعی جمع‌آوری شده بود و به آزمایشگاه منتقل شد، استفاده گردید. نتایج اولیه روی خاک اراضی مورد نظر نشان داد با بافت خاک، ماده آلی، کربن آلی، pH و وزن مخصوص ظاهری به‌ترتیب رسی، ۰/۴۷ درصد، ۰/۲۷ درصد، ۷/۸۶ و ۲/۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود.

- تعیین سطوح زئولیت و آتش‌سوزی

به‌منظور مهار رواناب و فرسایش خاک یک نوع افزودنی خاک که می‌تواند با عنوان زئولیت با مقادیر صفر (شاهد)، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ گرم بر مترمربع در سطح کرت‌ها انتخاب شد. زئولیت مورد استفاده از شرکت توسعه معادن سمنان خریداری شد که ویژگی‌های آن در جدول ۳-۱ ارائه شده است. از آنجایی‌که انتخاب خاک در گام اول به عنوان تعیین‌کننده‌ترین عامل بوده و نحوه توصیف و تعیین سطوح تیمارهای زئولیت با مقادیر ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ گرم بر مترمربع تا حد زیادی وابسته به آن می‌باشد.

مقدار ۲۵۰ گرم بقایای گونه‌های مرتعی هوا خشک در هر مترمربع با توجه به پوشش‌گیاهی در مراتع موجود در منطقه ریخته شده و سپس آتش‌سوزی اِعمال شد. دلیل استفاده از بقایای گیاهان مرتعی منطقه مادری خاک امکان تعمیم و استفاده از نتایج برای منطقه مادری خاک است. گونه‌های غالب منطقه مورد نظر *Artemisia sp.*، *Astragalus spp.*، *Dactylis glomerata*، *Bromus dantonia*، *Phlomis persica*، *Medicago sativa*، *Vicia narbonesis* و *Petrophagia saxifrage* بودند.

- آماده سازی کرت‌های آزمایشی

برای آماده‌سازی خاک از روش Kukal and Sarkar (2010) با توجه به انجام موفقیت‌آمیز آزمایش‌های قبلی (Khaledi Darvishan et al., 2014; Gholami et al., 2019) استفاده شد و در مرحله بعد خاک در معرض هوا، هواخشک شد. درنهایت به‌منظور حذف سنگ و سنگ‌ریزه و بقایای گیاهی موجود در خاک، خاک هوا خشک شده از الک چهار میلی‌متری عبور داده شد (Gholami et al., 2016a; Khaledi Darvishan et al., 2014). برای انجام آزمایش‌ها از کرت‌هایی با طول و عرض به‌ترتیب ۰/۵ و ۰/۲۵متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. سپس به‌منظور ایجاد شرایط مشابه موجود در طبیعت و زهکشی بهتر (Defersha et al., 2011; Gholami et al., 2016a) ده سانتی‌متر اول کرت‌ها با استفاده از پوکه معدنی در اندازه‌های مختلف پر شد (Defersha et al., 2011). پس از استقرار خاک در کرت‌ها به‌منظور دستیابی به جرم مخصوص ظاهری خاک منطقه برداشت شده با خاک در شرایط طبیعی از غلطک استفاده شد.

- شدت بارش مورد استفاده

به‌منظور انجام آزمایش‌ها در شرایط آزمایشگاهی از دستگاه شبیه‌ساز باران برای شبیه‌سازی باران استفاده شد. بنابراین شدت بارندگی در منطقه با استفاده از منحنی های IDF ایستگاه سینوپتیک ساری به‌دست آمد، برای انجام آزمایش‌ها در پژوهش حاضر از بارانی با شدت ۵۰ میلی‌متر بر ساعت برای مدت زمان ۱۰ دقیقه استفاده شد (Gholami et al., 2019).

جدول ۱: ویژگی‌های شیمیایی زئولیت (درصد) مورد استفاده جهت انجام پژوهش حاضر

SiO_2	SrO	SO_3	Na_2O	MgO	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	TiO_2	NaCl	L.O.I
۶۳/۱	۰/۱	۰/۴	۲/۷	۰/۶	۰/۵	۱/۸	۹/۵	۰/۳	۱/۳	۸/۳

شکل ۱: نمایی از کرت‌های آتش‌سوزی شده (الف)، استفاده از تیمار زئولیت روی سطح خاک (ب)

دستگاه شبیه‌ساز باران داراب قابلیت برنامه‌نویسی و اجرای چندین برنامه بارش باران با خصوصیات مختلف و به صورت خودکار و متوالی طراحی گردیده است که با استفاده از یک صفحه کلید سرعت نوسان نازل‌ها، زاویه، زمان مکث نازل‌ها در طرفین قابل تنظیم می‌باشد. جهت شبیه‌سازی باران از دو نازل ویجت ۸۰۱۰۰ با قطر روزنه ۴/۵ میلی‌متر و قابلیت جابه‌جایی روی ریلی با طول دو متر استفاده گردید (Kavian et al., 2018; Kavian et al., 2019).

- اندازه‌گیری متغیرهای مورد نیاز و تجزیه و تحلیل‌های آماری

در پژوهش حاضر از آنجایی که امکان تکرار بارش‌های طبیعی با شدت و مدت مورد نظر در مدت زمان پیش‌بینی شده وجود نداشت بنابراین آزمایش‌ها با استفاده از شبیه‌ساز باران انجام شد. بعد از آماده‌سازی خاک و قرارگیری آن در داخل کرت‌ها، تیمار آتش‌سوزی روی خاک اِعمال شد. برای این منظور مقادیر حدود ۲۵۰ گرم بقایای گونه‌های مرتعی هوا خشک در هر مترمربع ریخته شد و سپس آتش‌سوزی اِعمال شد. دلیل استفاده از بقایای گیاهان مرتعی منطقه مادری خاک امکان تعمیم و استفاده از نتایج برای منطقه مادری خاک است. پس از استقرار خاک در کرت‌ها نمونه‌های رواناب و رسوب با استفاده از شبیه‌ساز باران در کرت شاهد (بدون زئولیت و با آتش سوزی) در سه تکرار جمع‌آوری شدند. سپس نمونه‌های رواناب و رسوب در کرت‌های حفاظت شده با زئولیت در مهار رواناب و فرسایش در سه تکرار جمع‌آوری شدند. سپس حجم کل نمونه رواناب و رسوب آن به مدت ۲۴ ساعت در حالت ثابت نگه داری شد. حجم آب اضافی نمونه ها تخلیه و در نهایت نمونه تغلیظ شده رسوب به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی-گراد قرار گرفته و بعد از خشک شدن توزین شدند در نهایت مقدار رسوب و فرسایش خاک از کرت اندازه‌گیری شد (Gholami et al., 2016a and 2019). در پایان مقادیر زمان شروع رواناب، حجم رواناب، هدررفت خاک و غلظت رسوب در تیمار حفاظتی (با آتش سوزی و زئولیت) و تیمار شاهد (بدون زئولیت و با آتش سوزی) با استفاده از نرم افزار spss و آزمون تجزیه واریانس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

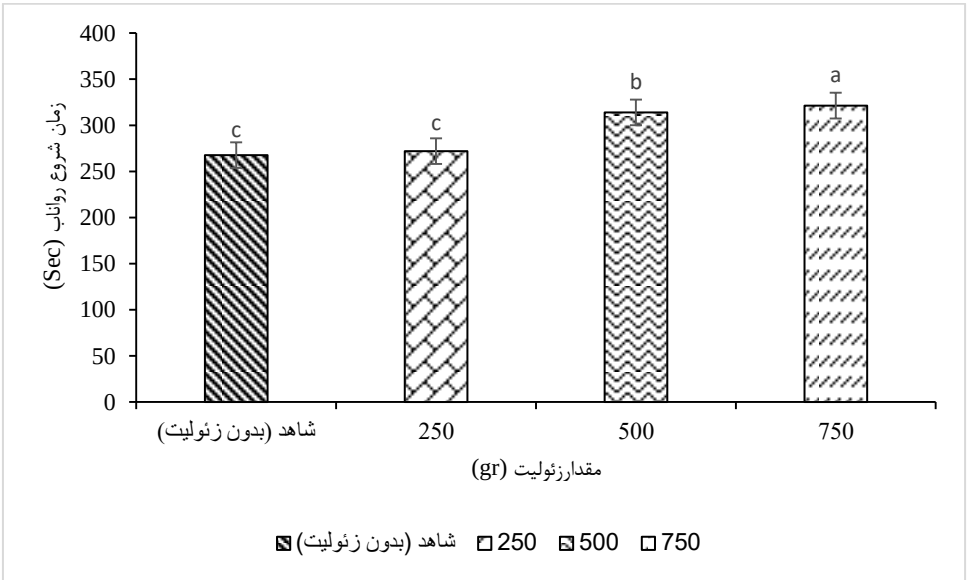
نتایج و بحث

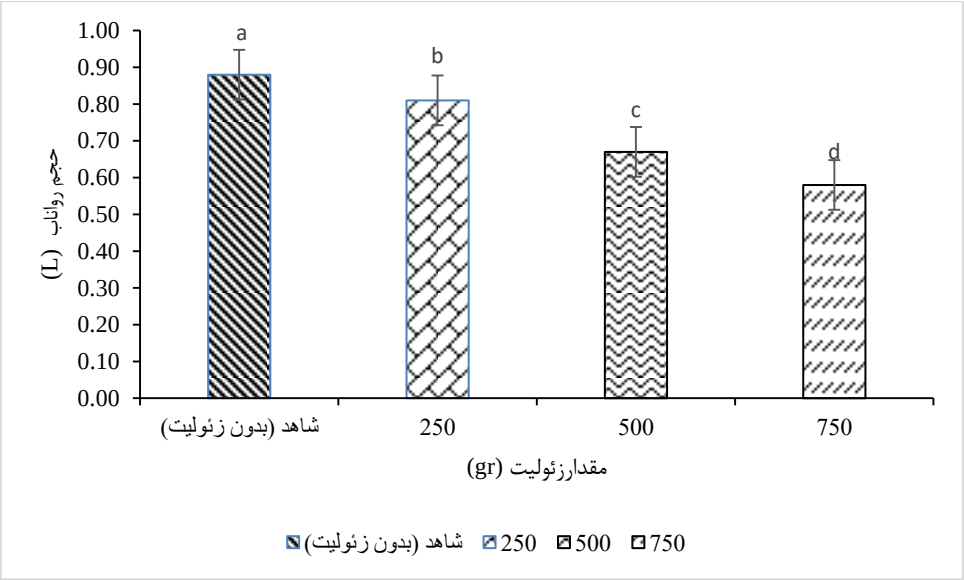
پژوهش حاضر به‌منظور بررسی مقادیر مختلف زئولیت در سطح آتش‌سوزی ۲۵۰ گرم بر متر مربع بر تغییرات رواناب و هدررفت خاک در شرایط آزمایشگاهی و در نهایت انتخاب مقدار بهینه آن در مقیاس کرت انجام شد. میانگین زمان شروع رواناب، حجم رواناب، هدررفت خاک و غلظت رسوب برای تیمار شاهد (آتش‌سوزی با زئولیت صفر) و تیمار زئولیت با مقادیر۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ گرم بر مترمربع در سه تکرار در جدول ۲ و شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. همچنین جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس اثر افزودنی زئولیت بعد از آتش‌سوزی بر مولفه‌های رواناب و رسوب را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مقادیر رواناب و رسوب در تیمارهای شاهد و تیمار حفاظتی زئولیت در سطح آتش‌سوزی

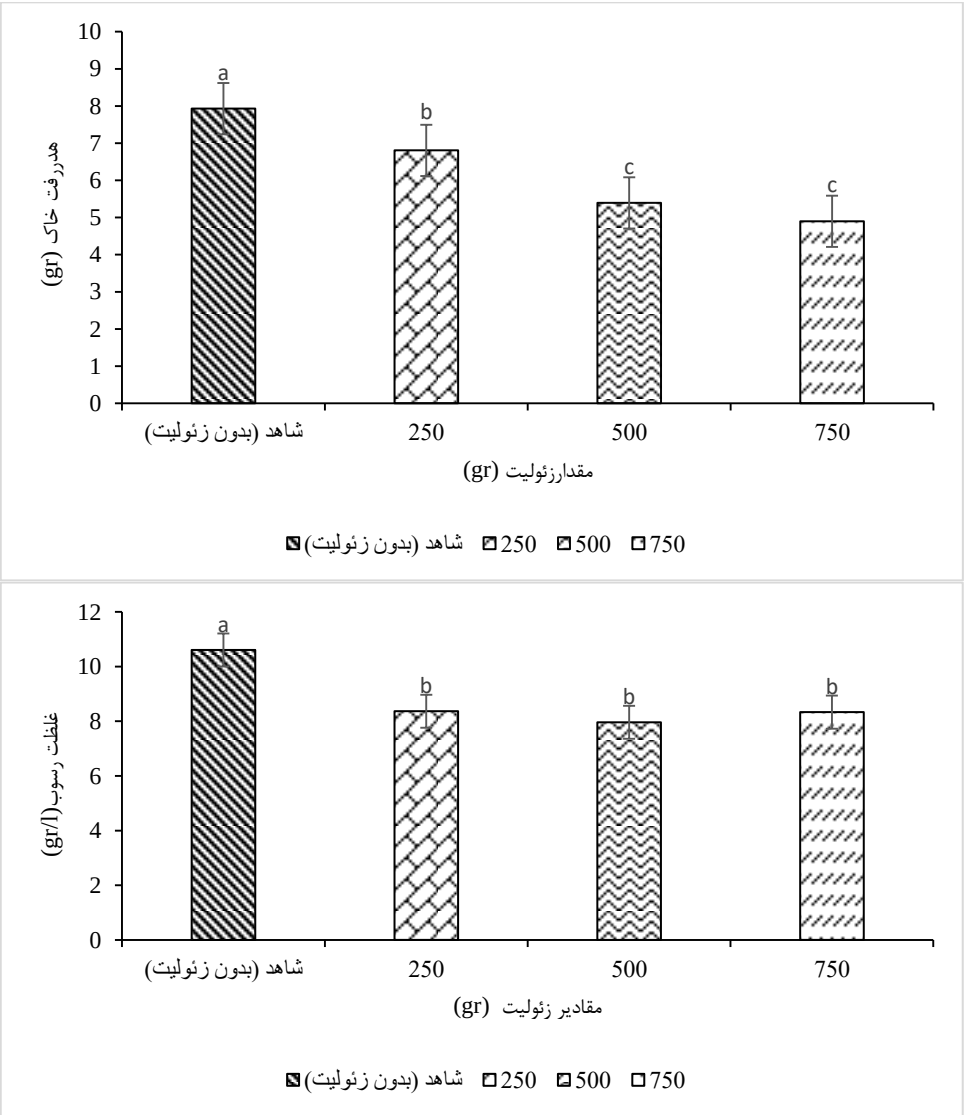
کرت	مولفه‌ها	زئولیت (گرم بر مترمربع)			
		صفر	۲۵۰	۵۰۰	۷۵۰
۱		۲۹۰	۲۸۵	۲۹۰	۲۹۳
۲	زمان شروع رواناب (ثانیه)	۳۰۲.	۳۲۵	۳۳۴	۳۴۸
۳		۲۱۱	۲۰۶	۳۱۸	۳۲۳
	میانگین	۲۶۷/۶۷	۲۷۲	۳۱۴	۳۲۱/۳۳

کرت	مولفه‌ها	زئولیت (گرم بر مترمربع)			
		صفر	۲۵۰	۵۰۰	۷۵۰
	انحراف معیار	۹۴/۴۴	۶۰/۵۶	۲۲/۲۷	۲۷/۵۴
	درصد تغییرات	-	۱/۶۱	۱۷/۳۰	۲۰/۰۴
۱		۰/۶۹	۰/۷۵	۰/۶۳	۰/۵۴
۲	حجم رواناب (لیتر)	۰/۹۸	۰/۶۹	۰/۵۷	۰/۴۴
۳		۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۸۱	۰/۷۶
	میانگین	۰/۸۸	۰/۸۱	۰/۶۷	۰/۵۸
	انحراف معیار	۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۱۶
	درصد تغییرات	-	۸/۰۰	۱۰/۶۶	۲۲/۶۶
۱		۷/۹۴	۶/۹۸	۵/۰۴	۴/۵۰
۲	هدررفت خاک (گرم)	۶/۰۲	۵/۰۲	۴/۱	۳/۴۱
۳		۹/۸۳	۸/۴۲	۷/۰۴	۶/۷۸
	میانگین	۷/۹۳	۶/۸۰	۵/۳۹	۴/۸۹
	انحراف معیار	۱/۹۰	۱/۷۰	۱/۵۰	۱/۷۱
	درصد تغییرات	-	۱۴/۲۴	۳۲/۰۳	۳۸/۳۳
۱		۱۱/۵۰	۹/۳۰	۸/۰۰	۸/۳۳
۲	غلظت رسوب (گرم بر لیتر)	۱۰/۳۷	۷/۲۷	۷/۱۹	۷/۷۵
۳		۹/۹۲	۸/۵۰	۸/۶۹	۸/۹۲
	میانگین	۱۰/۶۰	۸/۳۶	۷/۹۶	۸/۳۳
	انحراف معیار	۰/۸۱	۱/۰۲	۰/۷۴	۰/۵۸
	درصد تغییرات	-	۲۱/۱۳	۲۴/۹۰	۲۱/۴۱





شکل ۲. میانگین زمان شروع رواناب (بالا) و حجم رواناب (پایین) در تیمار شاهد و بعد از کاربرد زئولیت با مقادیر استفاده شده



شکل ۳. مقادیر میانگین هدررفت خاک (بالا) و غلظت رسوب (پایین) در تیمار شاهد و بعد از کاربرد کمپوست در مقادیر مختلف

جدول۳. نتایج تجزیه واریانس اثر مقادیر مختلف زئولیت بر مولفه‌های رواناب و رسوب در خاک آتش‌سوزی شده

متغیر مورد بررسی	مجموع مربعات نوع سوم	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F	سطح معنی‌داری
زمان شروع رواناب	۲۵۵۱/۵۸	۳	۸۵۰/۵۲	۰/۳۵۴	۰/۰۲۴
	۱۹۲۲۹/۳۳	۸	۲۴۰۳/۶۶		
	۲۱۷۸۰/۹۱	۱۱			
حجم رواناب	۱/۰۵۹	۳	۰/۳۵۳	۸/۹۵	۰/۰۰۶
	۰/۳۱۵	۸	۰/۰۳۹		
	۱/۳۷۴	۱۱			
هدررفت خاک	۵۴/۴۴	۳	۱۸/۱۴	۶/۱۹	۰/۰۱۸
	۲۳/۴۳	۸	۲/۹۲		
	۷۷/۸۷	۱۱			
غلظت رسوب	۰/۳۸۶	۳	۰/۱۲۹	۰/۱۴۳	۰/۰۰۴
	۷/۲۰	۸	۰/۹۰۱		
	۷/۵۹	۱۱			

- بررسی نتایج زمان شروع رواناب و حجم رواناب

نتایج زمان شروع رواناب از مقایسه تیمار آتش‌سوزی و زئولیت با تیمار شاهد نشان داد که زمان شروع رواناب پس از کاربرد زئولیت در خاک آتش‌سوزی شده، افزایش یافته است. نتایج جدول ۲ نشان داد که درصد حفاظت زمان شروع رواناب در تیمار زئولیت با مقادیر ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ گرم بر مترمربع به‌ترتیب ۱/۶۱، ۱۷/۳۰ و ۲۰/۰۴ درصد بوده است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش سطح زئولیت پس از آتش‌سوزی، زمان شروع رواناب افزایش یافته است. بنابراین می‌توان بیان نمود که پس از آتش سوزی، خاک آبگریز شده و در یک خاک آبگریز زمان شروع رواناب نیز سریع‌تر اتفاق می‌افتد. در این‌باره برخی محققان مانند لوکاس بورجا[1] و همکاران (۲۰۲۳) و بلچر[2] و همکاران (۲۰۱۳) بیان کردند که آتش‌سوزی منجر به آبگریزی خاک و کاهش نفوذپذیری آن می‌شود، که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد. همچنین در پژوهش حاضر پس از کاربرد زئولیت، به دلیل ویژگی جاذب رطوبت بودن زئولیت، تاثیر آبگریزی پس از آتش‌سوزی کاهش یافت. در این زمینه برانوال[3] (۲۰۰۷) اظهار داشت که کاربرد زئولیت نقش مثبتی در میزان نفوذ و حفظ آب در خاک دارد. هم‌چنین سیزرمنت[4] و همکاران (۲۰۱۴) و قلی زاده سرابی (۱۳۸۸) نیز بیان نمودند که زئولیت به نفوذ آب و حفظ آن در خاک کمک می‌کند و به دلیل خواص تخلخل و مکش بسیار زئولیت بیشتر آب در خاک را جذب می‌کند. بنابراین در پژوهش حاضر می‌توان این‌گونه بیان نمود که به دلیل افزایش نفوذ آب در خاک زمان شروع رواناب به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. نتایج جدول ۳ نیز نشان داد که تأثیر زئولیت در خاک آتش‌سوزی شده بر زمان شروع رواناب در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار بود.

نتایج شکل ۲ نیز نشان داد، تمام مقادیر زئولیت منجر به افزایش زمان شروع رواناب نسبت به تیمار شاهد (آتش‌سوزی بدون زئولیت) شده است اما در این میان تیمار زئولیت با مقدار ۷۵۰ گرم در سطح آتش‌سوزی ۲۵۰ گرم بر مترمربع بیشترین افزایش را در زمان شروع رواناب و در زیرگروه اول قرار گرفته است. این نتایج تاثیر مثبت و افزایشی زئولیت در زمان شروع رواناب را تایید کرد. دلیل این نتایج را می‌توان اینگونه بیان کرد که در سطح آتش‌سوزی شده رطوبت و ماده آلی خاک کاهش یافته که این امر خود منجر به آب‌گریزی و کاهش زمان شروع رواناب شده است. نوروزی و رمضان‌پور (۱۳۹۱) و اکبرزاده و همکاران (۱۳۹۶) نیز تایید کردند که با وجود سطح آتش‌سوزی میزان آب‌گریزی خاک افزایش می‌یابد. نتایج پیدوت[5] و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان داد که آتش‌سوزی موجب کاهش ظرفیت نگه‌داشت آب در خاک می‌شود. از سویی دیگر با افزایش مقدار زئولیت تا ۷۵۰ گرم بر مترمربع میزان زمان شروع رواناب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. این نتایج تایید کرد که زئولیت اثر مثبت و معنی‌داری بر افزایش زمان شروع رواناب داشته است. بهزادفر و همکاران (۲۰۱۷) نیز تایید کردند زمان شروع رواناب با افزایش مقدار زئولیت افزایش یافت.

نتایج جدول ۲ حاکی از آن است که درصد حفاظت حجم رواناب در خاک آتش‌سوزی شده با کاربرد افزدنی زئولیت با مقادیر ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ به‌ترتیب ۸/۰۰، ۱۰/۶۶ و ۲۲/۶۶ درصد بود. پریرا[6] و همکاران (۲۰۱۸) لوکاس-بورجا و همکاران. (۲۰۱۹ و ۲۰۲۳) اثر کاهش پوشش گیاهی ناشی از آتش سوزی بر افزایش میزان رواناب را تایید کردند. از سوی دیگر خوبین و ژاندین[7] (۲۰۰۱) و باتاچایا[8] (۱۹۹۸) اظهار داشتند که زئولیت می‌تواند میزان نفوذ در خاک را بین ۷ تا ۲۰ درصد افزایش دهد. بنابراین می‌توان گفت که کاربرد زئولیت در خاک آتش-

سوزی شده می تواند باعث افزایش سرعت نفوذ و در نتیجه کاهش حجم رواناب شود (Certini et al., 2005). نتایج جدول ۳ نشان داد که تأثیر زئولیت در خاک آتش‌سوزی شده بر حجم رواناب در سطح اعتماد ۹۹ درصد معنی‌دار بود. برخی از محققان از جمله سرتینی[9] و همکاران، (۲۰۰۵) و حیدری و همکاران (۲۰۱۴) بیان کردند که پس از وقوع آتش‌سوزی، سطح خاک در معرض تشکیل سله سطحی قرار می‌گیرد و آب‌گریزی خاک افزایش و به تبع آن رواناب نیز افزایش می‌یابد. از سویی دیگر قضاوی و همکاران (۲۰۱۵) و بهزاد فر و همکاران (۲۰۱۷) تاثیر مثبت زئولیت بر رواناب، زهکشی خاک با استفاده از شبیه‌ساز باران را تایید کردند. بنابراین در پژوهش حاضر در اثر افزودن زئولیت میزان نفوذپذیری خاک افزایش و آبگریزی کاهش یافته است، در نتیجه میزان حجم رواناب نیز کاهش یافته است.

نتایج شکل ۲ نشان داد، تمام مقادیر زئولیت منجر به کاهش حجم رواناب نسبت به تیمار شاهد (آتش‌سوزی بدون زئولیت) شده است اما در این میان تیمار زئولیت با مقدار ۷۵۰ گرم در خاک آتش‌سوزی شده بیشترین کاهش را در حجم رواناب داشته است. بنابراین نتایج پژوهش ما حاکی از آن است که زئولیت اثر مثبت و معنی‌داری بر کاهش حجم رواناب در سطوح مختلف آتش‌سوزی داشته است. سایر محققان پیرسون[10] و همکاران (۲۰۰۸)، اینبار[11] و همکاران (۲۰۱۴)، روبیچارد[12] و همکاران (۲۰۱۶) و نونس[13] و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که با افزایش مولفه‌های تاثیرگذار بر آتش‌سوز ی رواناب نیز افزایش یافته است از سویی دیگر برناردی[14] و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند زئولیت ظرفیت نگهداری آب را در خاک را افزایش داده و رطوبت خاک را برای مدت بیش‌تری حفظ و در اختیار خاک و گیاه قرار می‌دهد. بنابراین در پژوهش ما کاربرد زئولیت منجر به کنترل رطوبت خاک و کاهش حجم رواناب تیمارهای دارای آتش‌سوزی شده است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از مقادیر مختلف زئولیت در خاک آتش‌سوزی شده، می‌توان این‌گونه بیان نمود که زئولیت با مقدار۲۵۰ گرم بر مترمربع در مقایسه با تیمار شاهد توانست روی افزایش متغیر زمان شروع رواناب تاثیر مثبتی داشته باشد اما با توجه به شکل ۲ این افزایش زمان شروع رواناب نسبت به تیمار شاهد (آتش‌سوزی بدون زئولیت) کم بود لذا تیمار ۲۵۰ گرم زئولیت و تیمار شاهد در زیرگروه سوم قرار گرفتند و پس از آن تیمار زئولیت با مقادیر ۵۰۰ و ۷۵۰ گرم بر مترمربع به‌ترتیب در زیرگروه‌های دوم و اول قرار گرفتند. بنابراین تاثیر مقدار ۷۵۰ گرم بر مترمربع بر افزایش زمان شروع بیشتر از دو مقدار دیگر زئولیت بود. بنابراین برای متغیر زمان شروع رواناب مقدار ۷۵۰ گرم بر مترمربع زئولیت به‌عنوان مقدار بهینه برای متغیر زمان شروع رواناب پیشنهاد گردد. همچنین نتایج مربوط به حجم رواناب نیز نشان داد زئولیت با مقدار ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ گرم بر مترمربع در مقایسه با تیمار شاهد توانست روی کاهش متغیر حجم رواناب تاثیر مثبتی داشته باشد اما در این میان زئولیت با مقدار ۷۵۰ گرم بر مترمربع در زیر گروه چهارم قرار گرفت لذا می‌توان گفت زئولیت با مقدار۷۵۰ گرم بر مترمربع به‌عنوان مقدار بهینه برای متغیر حجم رواناب پیشنهاد می‌شود.

- بررسی نتایج هدررفت خاک و غلظت رسوب

نتایج هدررفت خاک حاکی از آن است که درصد حفاظت افزودنی زئولیت در خاک آتش‌سوزی شده پس از کاربرد زئولیت با مقادیر ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ گرم بر متر مربع به‌ترتیب ۱۴/۲۴، ۳۲/۰۳ و ۳۸/۳۳ درصد بود (جدول ۲). این نتایج نیز نشان داد که با افزایش مقدار زئولیت در خاک آتش‌سوزی، هدررفت خاک کاهش یافت. نتایج نشان داد در تیمار شاهد (آتش‌سوزی بدون زئولیت) کاهش تخلخل خاک و ایجاد لایه آبگریز پس از آتش سوزی منجر به کاهش میزان نفوذپذیری خاک می شود که منجر به خشک شدن خاک به ویژه در لایه سطحی شده و به طور قابل توجهی رواناب و انتقال رسوب را افزایش می دهد (Shakesby et al., 2000). همچنین آتش باعث افزایش تجمع مواد آبگریز در سطح خاک و کاهش نفوذ و افزایش رواناب و فرسایش خاک می شود. در این زمینه نورزوی (۱۳۹۰) بیان کرد که دو فرآیند مهم فرسایشی به‌دنبال آتش‌سوزی، هنگامی که خاک‌ها آب‌گریز هستند اتفاق می‌افتد که این دو فرایند شامل پاشمان و تشکیل شیار است. هم‌چنین کاهش تخلخل خاک و تشکیل لایه‌های دافع آب بر اثر آتش‌سوزی منجر به کاهش میزان نفوذ آب به خاک می‌شود که در زمین‌های مسطح، منجر به خشک شدن خاک، به‌ویژه در لایه سطحی می‌شود و در زمین‌های شیب‌دار به طور قابل توجهی می‌تواند باعث افزایش رواناب و حمل رسوب شود (Shakesby et al., 2000; Brath et al., 2006). برخی محققان از جمله گاردیو رز[15] و همکاران (۲۰۲۲) بیان کردند که آتش‌سوزی منجر به کاهش پایداری خاکدانه‌ها و نگه‌داشت آب می‌شود. از سویی دیگر بهزادفر و همکاران (۲۰۱۷) تاثیر مثبت زئولیت بر هدررفت خاک را تایید کردند. بنابراین می‌توان گفت در پژوهش حاضر زئولیت می‌تواند با تاثیر مثبت بر مولفه‌ها و خواص هیدرولیکی خاک (بهزادفر و همکاران، ۲۰۱۷) منجر به کاهش هدررفت خاک شده است.

نتایج آزمون تحلیل واریانس (جدول ۳) نشان داد که تأثیر زئولیت در خاک آتش‌سوزی شده پس از کاربرد زئولیت بر هدررفت خاک در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار بود. با توجه به این نتایج می‌توان گفت به دلیل اینکه میزان مواد آلی خاک همبستگی بالایی با میزان فرسایش‌پذیری خاک دارد

(Wischmeier, Smit., 1978). وجود ماده آلی بیشتر (در نواحی دارای پوشش گیاهی متراکم‌تر) با ایجاد پوششی آب‌گریز در اطراف خاکدانه‌ها موجب کاهش نفوذ آب به درون خاکدانه‌ها و افزایش مقاومت آن‌ها در برابر تنش‌های ناشی از خیس شدن و فروپاشی می‌گردد. بنابراین در پژوهش حاضر احتمالاً کاهش ماده آلی خاک در اثر آتش‌سوزی باعث افزایش میزان هدررفت خاک در تیمارهای آتش‌سوزی شده خاک شد. هم‌چنین برخی محققان از جمله بانکوآ[۱۶] و همکاران (۲۰۰۵) و محبتی و همکاران (۱۴۰۱) با بررسی اثر زئولیت بر پایداری خاکدانه‌ها دریافتند که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها نسبت به تیمار شاهد افزایش داشت چراکه زئولیت تأثیر قابل ملاحظه و معنی‌داری بر اتصال ذرات خاک درجهت افزایش اندازه خاکدانه‌ها داشت. بنابراین می‌توان گفت پس از اعمال تیمار زئولیت بر سطوح آتش‌سوزی به دلیل افزایش پایداری خاکدانه‌ها میزان هدررفت خاک نسبت به تیمار شاهد فاقد زئولیت کاهش یافته است. نتایج شکل ۳ نشان داد که در خاک آتش‌سوزی شده، زئولیت با مقدار ۷۵۰ کمترین هدررفت خاک را به خود اختصاص داد. زئولیت با مقدار ۵۰۰ و ۲۵۰ نیز اثر تقریباً مشابهی بر کاهش هدررفت خاک داشتند. بنابراین می‌توان گفت در میان تمام تیمارها، زئولیت با مقدار ۷۵۰ گرم بیشترین کاهش را در مقدار هدررفت خاک داشته است.

نتایج جدول ۲ بیانگر آن است که درصد حفاظت افزودنی زئولیت در خاک آتش‌سوزی شده برای غلظت رسوب به‌ترتیب ۲۱/۱۳، ۲۴/۹۰ و ۲۱/۴۱ درصد بود. نتایج غلظت رسوب حاصل از مقایسه تیمارهای آتش‌سوزی و زئولیت با تیمار شاهد نشان داد غلظت رسوب بعد از کاربرد زئولیت در تمامی تیمارها نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. با توجه به نتایج می‌توان گفت در تیمارهای آتش‌سوزی شده بدون کاربرد زئولیت دلیل افزایش غلظت رسوب به دلیل تخریب خاکدانه‌ها بوده است. ارتباط بین از هم پاشیدگی خاکدانه‌ها و پس از آن تشکیل شیار بعد از پدیده آتش‌سوزی توسط برخی پژوهشگران ثابت شده است (Loaiciga et al., 2001). غلامی‌گوره و همکاران نیز بیان کردند که پس از آتش‌سوزی در اراضی مرتع مقدار رواناب و رسوب خاک افزایش یافته است. بانکوآ و همکاران (۲۰۰۵) با بررسی اثر زئولیت بر پایداری خاکدانه‌ها دریافتند که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها نسبت به تیمار شاهد افزایش داشت چراکه زئولیت تأثیر قابل ملاحظه و معنی‌داری بر اتصال ذرات خاک در جهت افزایش اندازه خاکدانه‌ها داشت. نتایج آزمون تحلیل واریانس جدول ۳ نیز نشان داد که اثر زئولیت بر متغیر غلظت رسوب در سطح اعتماد ۹۹ درصد معنی‌دار بود. آتش‌سوزی می‌تواند ساختمان خاک را تغییر دهد و در نتیجه روی تخلخل و دیگر مشخصه‌های هیدرولوژیکی اثر گذارد. هم‌چنین تجمع مواد آب‌گریز را در سطح خاک را افزایش دهد و نفوذپذیری را کاهش و رواناب و رسوب را افزایش دهد. خوبین و ژاندین (۲۰۰۱) مشخص نموده اند که خاک دارای زئولیت می‌تواند نفوذ آب در خاک را بین هفت تا ۲۰ درصد افزایش دهد. بنابراین می‌توان گفت افزودنی زئولیت در سطوح آتش‌سوزی شده منجر به افزایش نفوذ آب به خاک و به‌دنبال آن کاهش رواناب و غلظت رسوب نسبت به تیمار شاهد آتش‌سوزی شده دارد. نتایج شکل ۳ نشان داد که شرایط آتش‌سوزی با مقدار ۲۵۰ زئولیت با مقدار ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ اثر تقریبا مشابهی بر کاهش غلظت رسوب داشتند. روبیچارد و همکاران (۲۰۱۶) نیز بیان کردند که در شدت آتش‌سوزی بالا غلظت رسوب افزایش و نفوذپذیری خاک کاهش یافته است. از سویی دیگر قضاوی و همکاران (۲۰۱۵) اثر مثبت و معنی‌دار زئولیت در سطح ۱۰ و ۲۰ درصد بر زهکشی و نفوذپذیری خاک تایید کردند. بنابراین می‌تون گفت کاربرد زئولیت در خاک آتش‌سوزی شده منجر به کاهش رواناب و رسوب و به تبع آن کاهش غلظت رسوب می‌شود.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از مقادیر مختلف زئولیت پس از شرایط آتش‌سوزی می‌توان گفت زئولیت با مقدار۲۵۰ گرم بر مترمربع منجر به کاهش هدررفت خاک در مقایسه با تیمار شاهد شده است و با توجه به شکل ۳ این کاهش در مقدار هدررفت خاک نسبت به تیمار شاهد (آتش‌سوزی بدون زئولیت) چشمگیر بود. لذا تیمار ۲۵۰ گرم زئولیت در زیرگروه دوم قرار گرفت. پس از آن تیمار زئولیت با مقادیر ۵۰۰ و ۷۵۰ گرم بر مترمربع نیز کاهش بسیار زیادی در مقدار هدررفت خاک نشان داد اما در این میان اختلاف بین تیمار ۵۰۰ و ۷۵۰ گرم بر مترمربع زئولیت بسیار جزئی بوده و لذا این دو تیمار به صورت مشترک در زیرگروه سوم قرار گرفتند و هردو تیمار را می‌توان به‌عنوان مقدار بهینه زئولیت در کاهش هدررفت خاک در سطوح آتش‌سوزی در نظر گرفت. اما از سویی دیگر با در نظر گرفتن صرفه اقتصادی می‌توان زئولیت با مقدار ۵۰۰ گرم بر مترمربع را به‌عنوان مقدار بهینه زئولیت از نظر اقتصادی در نظر گرفت. همچنین نتایج مربوط به غلظت رسوب نیز نشان داد تمامی مقادیر زئولیت در یک زیر گروه قرار گرفتند لذا تمامی مقادیر زئولیت برای مولفه غلظت رسوب به‌عنوان مقدار بهینه (بسته به هدف استفاده) پیشنهاد گردد.

نتیجه گیری

دراین پژوهش تأثیر آتش‌سوزی (۲۵۰ گرم بر متر مربع) و زئولیت (۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ گرم بر مترمربع) بر تعیین مقدار بهینه زئولیت بر فرآیندهای رواناب و فرسایش خاک بعد از کاربرد شبیه‌ساز باران بررسی قرار گرفت. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که میزان فرسایش ناشی از باران و فرآیندهای مربوط به آن تحت تأثیر آتش‌سوزی و زئولیت دارای تغییرات

زیادی بود. بر طبق نتایج پژوهش حاضر با افزایش مقادیر زئولیت در خاک آتش‌سوزی شده، مقادیر حجم رواناب، غلظت رسوب و هدررفت خاک دارای تغییرات معنی‌داری داشتند. در بحث انتخاب بهینه مقدار زئولیت استفاده شده برای مولفه زمان شروع رواناب و حجم رواناب تاثیر مقدار ۷۵۰ گرم بر مترمربع بیشتر از دو مقدار دیگر زئولیت بود. در مورد متغیر هدررفت خاک تاثیر زئولیت با مقادیر ۵۰۰ و گرم بر مترمربع مشابه بودند و تاثیر مقدار مورد استفاده در مهار هدررفت خاک تغییرات زیادی را ایجاد نمی‌کند. لذا زئولیت با مقدار ۵۰۰ گرم بر مترمربع به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب گردید. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان بیان نمود که استفاده از زئولیت در شرایط پس از آتش‌سوزی در مقیاس کرت و حتی حوزه آبخیز، می‌تواند تأثیرات مثبتی بر متغیرهای خاک از جمله آبگریز، نفوذ، رواناب و هدررفت خاک داشته باشد. بنابراین پیشنهاد می شود مقادیر مختلف زئولیت در شرایط طبیعی حوزه های آبخیز تحت تاثیر آتش سوزی اعمال شود.

سپاسگزاری

در نهایت نویسندگان مقاله بر خود واجب دانسته تا از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در جهت فراهم نمودن امکانات پژوهشی در راستای انجام هزینه‌های طرح پژوهشی به شماره ۰۲-۱۳۹۹-۰۴ تشکر نمایند.

Reference:

Adams, J. E. (1966). Influence of mulches on runoff, erosion, and soil moisture depletion. *Soil Science Society of America Journal*, *30*(1), 110-114.

Agbeshie, A. A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., & Awuah, R. (2022). A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*, *33*(5), 1419-1441.

Agbeshie, A. A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., Awuah, R. (2022). A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research. 33(5)*, 1419-1441.

Aghaalikhani, M., Gholamhoseini, M., Dolatabadian, A., Khodaei-Joghan, A., & Sadat Asilan, K. (2012). Zeolite influences on nitrate leaching, nitrogen-use efficiency, yield and yield components of canola in sandy soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *58*(10), 1149-1169.

Akbarzadeh, Ghorbani, Shuja, Naderi Khorasgani, Mohammadi, Jahangard, & Taghizadeh Mehrjardi. (2017). The effect of fire on water repellency and the amount and factors of soil erosion in the forests of the southwestern shores of the Caspian Sea. *Iranian Forest Journal*, 9(1), 145-157. [in Persian]

Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., & Úbeda, X. (2018). Effects of prescribed fires on soil properties: A review. *Science of the Total Environment*, *613*, 944-957.

Belcher, C. M. (Ed.). (2013). *Fire phenomena and the Earth system: an interdisciplinary guide to fire science*. John Wiley & Sons.

Benkova, M., Filcheva, E., Raytchev, T., Sokolowska, Z., & Hajnos, M. (2005). Impact of different ameliorants on humus state in acid soil polluted with heavy metals. *Physicochemical managemnt of acid soils polluted wiyh eevy metals*, 93p.

Bento-Gonçalves, A., Vieira, A., Úbeda, X., & Martin, D. (2012). Fire and soils: Key concepts and recent advances. *Geoderma*, *191*, 3-13.

Bernardi, A., Olivera, P., Melo Monte, M., Polidoro, J.C., and Barros, F.S. (2010). Brazilian sedimentary zeolite uses in agriculture. *World Congress of Soil Science*, 120, 52-68.

Bhattacharyya, R., Fullen, M. A., Davies, K., & Booth, C. A. (2010). Use of palm-mat geotextiles for rainsplash erosion control. *Geomorphology*, *119*(1-2), 52-61.

Brannvall, E. (2007). Improvement of storm water runoff treatment system with natural mineral sorbent. *Geologija. Vilnius*, *59*, 72-76.

Brath, A., Montanari, A., & Moretti, G. (2006). Assessing the effect on flood frequency of land use change via hydrological simulation (with uncertainty). *Journal of hydrology*, *324*(1-4), 141-153.

Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, *143*, 1-10.

DeBano, L.F. (2000). The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of Hydroly*. *231*,195–206.

Defersha, M. B., Quraishi, S., & Melesse, A. (2011). The effect of slope steepness and antecedent moisture content on interrill erosion, runoff and sediment size distribution in the highlands of Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences*, *15*(7), 2367-2375.

Fernández, C., & Vega, J. A. (2016). Are erosion barriers and straw mulching effective for controlling soil erosion after a high severity wildfire in NW Spain?. *Ecological Engineering*, *87*, 132-138.

Fox, D., Berolo, W., Carrega, P., & Darboux, F. (2006). Mapping erosion risk and selecting sites for simple erosion control measures after a forest fire in Mediterranean France. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, *31*(5), 606-621.

Garrido-Ruiz, C., Sandoval, M., Stolpe, N., & Sanchez-Hernandez, J. C. (2022). Fire impacts on soil and post fire emergency stabilization treatments in Mediterranean-climate regions. *Chilean journal of agricultural research*, *82*(2), 335-347.

Ghazavi, R. (2015). The application effects of natural zeolite on soil runoff, soil drainage and some chemical soil properties in arid land area. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, *13*(1), 172.

Gholami Gohra, R., Sadeghi, S.H.R., Mirnia, S.Kh., & Suleiman Khani, Z. (2018). The effect of mild fire on infiltration, runoff and sedimentation of pasture in Kadir region. *Watershed science and engineering*, 5 (17), 23-31. [in Persian]

Gholami, L., Hasanzadeh, N., Darvishan, A. K., & Younesi, H. (2022). Individual and combined application of powder and soluble nanoclay and biochar on hydrological responses and soil loss at plot scale. *Arabian Journal of Geosciences*, *15*(1), 50-62.

Gholami, L., Karimi, N., & Kavian, A. (2019). Soil and water conservation using biochar and various soil moisture in laboratory conditions. *Catena*, *182*, 1-10.

Gholami, L., Khaledi Darvishan, A., & Kavian, A. (2016a). Wood chips as soil conservation in field conditions. *Arabian Journal of Geosciences*, *9*, 1-11.

Gholami, L., Sadeghi, S. H. R., & Homaee, M. (2016B). Different effects of sheep manure conditioner on runoff and soil loss components in eroded soil. *Catena*, *139*, 99-104.

González-Pelayo, O., Gimeno-García, E., Ferreira, C. S. S., Ferreira, A. J. D., Keizer, J. J., Andreu, V., & Rubio, J. L. (2015). Water repellency of air-dried and sieved samples from limestone soils in central Portugal collected before and after prescribed fire. *Plant and Soil*, *394*, 199-214.

Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., & Li, Y. (2005). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in physical geography*, *29*(2), 189-217.

Heidary, J., Ghorbani Dashtaki, S., Raiesi, F., & Tahmasebi, P. (2015). Effect of rangeland fire on soil physical properties and water infiltration parameters using principle component analysis. *Water and Soil*, *28*(5), 964-975.

Inbar, A., Lado, M., Sternberg, M., Tenau, H., & Ben-Hur, M. (2014). Forest fire effects on soil chemical and physicochemical properties, infiltration, runoff, and erosion in a semiarid Mediterranean region. *Geoderma*, *221*, 131-138.

Kavian, A., Gholami, L., Mohammadi, M., Spalevic, V., & Soraki, M. F. (2018). Impact of wheat residue on soil erosion processes. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *46*(2), 553-562.

Kavian, A., Mohammadi, M., Cerdà, A., Fallah, M., & Gholami, L. (2019). Calibration of the SARI portable rainfall simulator for field and laboratory experiments. *Hydrological Sciences Journal*, *64*(3), 350-360.

Khaledi Darvishan, A., Sadeghi, S. H., Homaee, M., & Arabkhedri, M. (2014). Measuring sheet erosion using synthetic color-contrast aggregates. *Hydrological Processes*, *28*(15), 4463-4471.

Kimhi, A. (2003). *Plot size and maize productivity in Zambia: the inverse relationship re-examined* .888, 1-27.

Kukal, S. S., & Sarkar, M. (2010). Splash erosion and infiltration in relation to mulching and polyvinyl alcohol application in semi-arid tropics. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *56*(6), 697-705.

Loáiciga, H. A., Pedreros, D., & Roberts, D. (2001). Wildfire-streamflow interactions in a chaparral watershed. *Advances in Environmental Research*, *5*(3), 295-305.

Loures, L., Dias, S., Ramos, T., Nunes, J., & Viegas, A. (2012). Severe forest fires: Assessment methods and reclamation techniques. *International Journal of Energy and Environment*, *6*(4), 424-432.

Lucas-Borja, M. E., Delgado-Baquerizo, M., Muñoz-Rojas, M., Plaza-Álvarez, P. A., Gómez-Sanchez, M. E., González-Romero, J., Peña-Molina, P.,Moya, D.,de las Heras, J. (2021). Changes in ecosystem properties after post-fire management strategies in wildfire-affected Mediterranean forests. *Journal of Applied Ecology*, *58*(4), 836-846.

Lucas-Borja, M. E., Plaza-Alvarez, P. A., Xu, X., Carra, B. G., & Zema, D. A. (2023). Exploring the factors influencing the hydrological response of soil after low and high-severity fires with post-fire mulching in Mediterranean forests. *International Soil and Water Conservation Research*, *11*(1), 169-182.

Mohabati, Nyusha, Gholami, Kavian, Atala, & Shokrian. (2021a). The effect of compost and zeolite in different periods of time on the amount of soil erosion. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 28(4), 207-224. [in Persian]

Mohabati, Nyusha, Gholami, Kavian, Atala, & Shokrian. (2021b). Changes in soil hydrophobicity using zeolite, compost and the combination of zeolite and compost. *Destruction and restoration of natural lands*, 2(3), 44-54. [in Persian]

Myronidis, D. I., Emmanouloudis, D. A., Mitsopoulos, I. A., & Riggos, E. E. (2010). Soil erosion potential after fire and rehabilitation treatments in Greece. *Environmental modeling & assessment*, *15*, 239-250.

Napper, C. (2006). Burned area emergency response treatments catalog. USDA Forest Service. National technology & development program. Watershed, Soil, *Air Manag*. 0625, 254-271.

Norway. (1390). The effect of fire on some physical, chemical and micromorphological characteristics of forest soils in Gilan province. *Master's Thesis in Soil Science, Faculty of Agriculture, Gilan University, Iran*. 122p [in Persian]

Nowrozi M. and Ramadanpour h. 1391 Effects of flood and fire on some soil characteristics of Lakan forest in Gilan province. Journal of Agricultural Sciences and Techniques and Natural Resources, *Water and Soil Sciences*, 16, 61-75. [in Persian]

Nunes, J. P., Bernard-Jannin, L., Rodríguez-Blanco, M. L., Boulet, A. K., Santos, J. M., & Keizer, J. J. (2020). Impacts of wildfire and post-fire land management on hydrological and sediment processes in a humid Mediterranean headwater catchment. *Hydrological Processes*, *34*(26), 5210-5228.

Pan, G., Tan, S., Yu, G., and Yin, S. (1991). Some agricultural properties of natural zeolite. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 7, 31-46.

Peduto, D., Iervolino, L., & Foresta, V. (2022). Experimental analysis of the fire-induced effects on the physical, mechanical, and hydraulic properties of sloping pyroclastic soils. *Geosciences*, *12*(5), 198.

Pereira, P., Francos, M., Brevik, E. C., Ubeda, X., & Bogunovic, I. (2018). Post-fire soil management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, *5*, 26-32.

Pierson, F. B., Robichaud, P. R., Moffet, C. A., Spaeth, K. E., Williams, C. J., Hardegree, S. P., & Clark, P. E. (2008). Soil water repellency and infiltration in coarse-textured soils of burned and unburned sagebrush ecosystems. *Catena*, *74*(2), 98-108.

Prats, S. A., Malvar, M. C., Martins, M. A. S., & Keizer, J. J. (2014). Post-fire soil erosion mitigation: a review of the last research and techniques developed in Portugal. *Cuadernos de investigación geográfica: Geographical Research Letters*, (40), 403-427.

Qolizadeh Sarabi, sh. (2008). Water infiltration in soil with different salinities of irrigation water in different soils. *Master thesis of Shiraz University*. 85P. [in Persian]

Ramesh, K., & Reddy, D. D. (2011). Zeolites and their potential uses in agriculture. *Advances in agronomy*, *113*, 219-241.

Robichaud, P. R., Ashmun, L. E. and Sims, B. D. (2010). Post-fire treatment effectiveness for hillslope stabilization. General Technical Report RMRS-GTR-240. Fort Collins, CO: Rocky Mountain Research Station, *Forest Service, US Department of Agriculture*, 62 p.

Robichaud, P. R., Wagenbrenner, J. W., Pierson, F. B., Spaeth, K. E., Ashmun, L. E., & Moffet, C. A. (2016). Infiltration and interrill erosion rates after a wildfire in western Montana, USA. *Catena*, *142*, 77-88.

Sadeghi, S. H. R., Gholami, L., Sharifi, E., Khaledi Darvishan, A., & Homaee, M. (2015). Scale effect on runoff and soil loss control using rice straw mulch under laboratory conditions. *Solid Earth*, *6*(1), 1-8.

Shakesby, R. A., Doerr, S. H., & Walsh, R. P. D. (2000). The erosional impact of soil hydrophobicity: current problems and future research directions. *Journal of hydrology*, *231*, 178-191.

Silvério, D. V., Brando, P. M., Bustamante, M. M., Putz, F. E., Marra, D. M., Levick, S. R., & Trumbore, S. E. (2019). Fire, fragmentation, and windstorms: A recipe for tropical forest degradation. *Journal of Ecology*, *107*(2), 656-667.

Szerement, J., Ambrożewicz-Nita, A., Kędziora, K., & Piasek, J. (2014). Use of zeolite in agriculture and environmental protection. A short review. *USD*, (781), 172-177.

Szerment, J., Ambrozewich-Nita, A., Kedziora, K., and Piasek, J. (2014). Use of zeolite in agriculture and environmental protection. A short review. *UDC*. *96*, 666-691.

Turan, N. G. (2008). The effects of natural zeolite on salinity level of poultry litter compost. *Bioresource technology*, *99*(7), 2097-2101.

Vega, J. A., Fernandez, C., Fonturbel, T., Gonzalez-Prieto, S., & Jimenez, E. (2014). Testing the effects of straw mulching and herb seeding on soil erosion after fire in a gorse shrubland. *Geoderma*, *223*, 79-87.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning* (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration. Wischmeier, W.H. and Smith D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture handbook No. 537, USDA, Washington, DC, USA. 58 p.

Xiubin, H. E., & Zhanbin, H. (2001). Zeolite application for enhancing water infiltration and retention in loess soil. *Resources, conservation and recycling*, *34*(1), 45-52.

یادداشت ها

[1] Lucas-Borja
[2] Belcher
[3] Branvall
[4] Szerment
[5] Peduto
[6] Pereira
[7] Khobin & Zhandin
[8] Bhattachaya
[9] Certini
[10] Pierson
[11] Inbar
[12] Robichaud
[13] Nunes
[14] Bernardi
[15] Garrido-Ruiz
[16] Benkova