نشریه علمی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

Vol. 19, No. 69, Summer 2025

سال نوزدهم- شماره ۶۹- تابستان ۱۴۰۴

Effect of Cereal–Forage Crop Rotation on Soil Erosion Control and Drought Resilience: A Case Study of Ardabil Province

Reza Talaei[1]* , Davoud Hassanpanah[2] , Bayramali Beyrami[3] , Hamid Mohammadi[4]

Received: 17-08-2025, Revised 30-08-2025, Accepted: 20-09-2025, Published 20-09-2025

https://doi.org/10.22034/19.69.3

Extended Abstract

Introduction

Rainfed lands in arid and semi-arid regions are highly vulnerable to soil erosion due to limited water resources, steep slopes, intense rainfall events, and shallow soils. Simultaneously, the decline in rangeland productivity and the growing demand for forage have highlighted the need for efficient and sustainable cropping systems. This study evaluated the effects of cereal–forage legume rotations, rainwater harvesting systems, and tillage methods on soil erosion control, productivity, and production sustainability over two cropping seasons at the Kandaragh Research Station in Ardabil Province, Iran. The experiment was conducted as a split-split plot design with three replications, including three factors: rainwater harvesting (two levels), tillage method (conventional and minimum tillage), and five crop species (rainfed wheat, *Medicago sativa* L., *Vicia villosa* roth., *Pisum sativum* L. and *Lathyrus sativus* L.). Results showed that all main factors and their interactions significantly ($p < 0.01$) reduced runoff and sediment. *Vicia villosa*, *Lathyrus sativus* and wheat were most effective in reducing sediment concentration across all rainfall events. Crop rotation in the second-year reduced sediment concentration by 2.54 g l^{-1} and increased dry forage yield of *Vicia villosa*, *Lathyrus sativus* by 15.5% and 13.4%, respectively. The highest forage yields were obtained under rainwater harvesting and conventional tillage. A positive correlation was observed between plant morphological traits and grain/forage yield, confirming the role of proper species selection in resource-use efficiency and soil protection. Overall, the integration of biological and mechanical practices offers an effective, climate-resilient strategy for improving the resilience and sustainability of rainfed agroecosystems in drylands.

Materials and Methods

The study was conducted in the Kandaragh watershed, located in the south of Ardabil Province, Iran, a semi-arid region with an average annual precipitation of 250 to 300 mm. The experiment was performed over two consecutive years using a split-split plot design with three replications. The main factors included rainwater harvesting (with and without harvesting), tillage type (minimum and conventional), and five crop species (rainfed wheat, *Medicago sativa* L., *Vicia villosa* roth, *Pisum sativum* L. and *Lathyrus sativus* L.). A two-year field experiment was conducted using a split-split plot design with three replications. The main factor was rainwater harvesting (with and without harvesting), the sub-factor was tillage type (minimum and conventional), and the secondary sub-factor was five crop species. A total of 60 plots were established each year, summing to 120 plots across two years. Soil was prepared according to the tillage treatments, and crops were grown under dryland conditions. Runoff and sediment samples were collected after significant rainfall events. Plant growth traits and crop yields were recorded in five growth stages. Data were analyzed using multifactorial ANOVA (analysis of variance), with means compared by Duncan's Multiple Range

1. Corresponding author and Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran, Tel. (Fax): +9821 44901214. Talaei1969@gmail.com

2. Professor, Horticulture Crops Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ardabil, Iran.

3. Researcher, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ardabil, Iran.

4. Researcher, Forests and Rangelands Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ardabil, Iran.

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

Test (DMRT) at five percent significance. Statistical analyses were performed using SPSS and R-Studio software.

Results and Discussion

The study results indicated a decrease in runoff volume across all treatments over five rainfall events, with vegetation cover development playing a significant role in reducing surface runoff and soil erosion. Minimum tillage combined with the absence of rainwater harvesting (RWH) structures resulted in the greatest runoff reduction. Leguminous crops such as *Lathyrus sativus* and *Vicia villosa* were highly effective reducing runoff (up to 87.89%) and sediment yield due to their dense canopy and robust root systems, while *Medicago sativa* showed the lowest efficiency. Statistical analyses confirmed that crop type, tillage practice, and presence of RWH structures significantly influenced runoff and sediment reduction ($p < 0.001$). The integration of minimum tillage, protective vegetation cover, and optimized RWH design proved an effective strategy for controlling runoff and erosion in rainfed agricultural systems of arid and semi-arid regions. Agronomic year, tillage type, presence of RWH, and crop species notably affected canopy cover percentage, especially during peak vegetative growth, with significant multifactor interactions highlighting the need for multidimensional management. Although upstream RWH structures increased incoming runoff in some plots, the best vegetation performance was observed in the combined treatment of minimum tillage, RWH, and leguminous crops, which enhanced soil moisture retention, reduced evaporation, and improved infiltration. Legumes exhibited rapid growth and dense coverage, effectively controlling runoff and erosion. Morphological and yield analyses demonstrated significant improvement in agronomic traits in the second year, with combined management practices exerting the greatest positive impact on crop performance and soil stability. Overall, this study shows that integrating soil management, water harvesting, and suitable crop selection offers a viable strategy to enhance vegetation cover, reduce erosion, improving resilience and increase both economic and environmental productivity in rainfed agroecosystems.

Conclusion

This study highlights the critical role of integrated management practices including the use of native leguminous species, minimum tillage, and rainwater harvesting (RWH) in enhancing water use efficiency and soil conservation in rainfed systems in arid and semi-arid regions. The interaction of factors such as crop species, tillage method, RWH systems, and cropping year significantly reduces surface runoff (by up to 88%) and soil erosion. At the same time, it improves vegetation cover and crop yield. Native legumes like *Lathyrus sativus* L. and *Vicia villosa* Roth exhibit dense root systems and extensive canopy cover, which stabilize soil and increase infiltration capacity, thereby mitigating runoff and sediment loss. A significant negative correlation between canopy cover and sediment production underscores the importance of vegetative cover in erosion control. Integrated approaches combining conservation tillage with rainwater harvesting optimize the performance of legumes and enhance both ecological and economic outcomes. Climatic variability and inter-annual differences further influence treatment efficacy, necessitating adaptive management and continuous monitoring. Economic assessments reveal that fast-growing, high-yielding legume species reduce the reliance on chemical fertilizers, increase farmer income, and promote system sustainability. Future research should focus on assessing the long-term impacts of integrated soil and water management, exploring root architecture and soil infiltration capacity, conducting economic and environmental evaluations, and utilizing modern technologies such as remote sensing and artificial intelligence. Overall, this research confirms that integrated management and selection of resilient native legumes are essential strategies for sustainable agriculture and effective soil erosion control in water-limited dryland environments.

Keywords: *Soil erosion control, Rainwater harvesting, Crop rotation, Cereals and legumes, Dry forage, Arid and semi-arid regions*

Article Type: Research Article

Acknowledgement

With utmost respect, I would like to express my sincere gratitude to the esteemed officials and colleagues of the Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center and the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute for their continuous support and for providing the necessary facilities to carry out this research project. I also wish to acknowledge the Ardabil Agricultural Jihad Organization for their valuable financial support. In addition, I would also like to warmly thank the honorable reviewers and distinguished editors of the journal, whose constructive and insightful comments greatly contributed to the improvement of this article.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

The data and results obtained from this research will be made available upon request through direct contact and correspondence with the authors of this article.

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

Authors' contribution

Reza Talaei: Proposed and developed the research project framework, conducted data collection and analysis, prepared the final report, and authored the research article. Davoud Hassanpanah: Assisted in planting stages, data collection and results analysis. Bayramali Beyrami: Prepared the field and measured runoff and sediment. Hamid Mohammadi: Prepared the field, took notes, and assisted in crop maintenance and harvesting stages.

Citation: Talaei R, Hassanpanah D, Beyrami B, Mohammadi H. Effect of Cereal–Forage Crop Rotation on Soil Erosion Control and Drought Resilience: A Case Study of Ardabil Province. jwmseir 2025; 19 (69): 38- 59

Iran-Watershed Management Science & Engineering, Year 2025, Vol 19, No 69, PP 38- 59

Publisher: Watershed Management Society of Iran

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

اثر کاربرد کشت متناوب غلات و گیاهان علوفه‌ای بر مهار فرسایش خاک و افزایش تاب‌آوری به خشکسالی: مطالعه موردی استان اردبیل

رضا طلائی[1*]، داود حسن پناه[2]، بایرامعلی بیرامی[3]، حمید محمدی[4]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۶، تاریخ داوری:۱۴۰۴/۰۶/۰۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹، تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۰۶/۲۹
https://doi.org/10.22034/19.69.3

چکیده

اراضی دیم مناطق خشک و نیمه‌خشک با محدودیت منابع آبی و آسیب‌پذیری بالا در برابر فرسایش خاک مواجه‌اند. کاهش ظرفیت مراتع و نیاز روزافزون به تأمین علوفه، لزوم بهره‌گیری از الگوهای کشت بهینه را دوچندان کرده است. این پژوهش با هدف ارزیابی نقش تناوب کشت غلات و لگوم‌های علوفه‌ای در مهار فرسایش و بهبود عملکرد، طی دو سال زراعی در پایگاه تحقیقات کشاورزی کندرق اردبیل اجرا شد. آزمایش به‌صورت طرح کرت‌های دوبار خرد شده با سه تکرار و عوامل شامل سطح آبگیر باران (دو سطح)، نوع خاک‌ورزی (شخم حداقل و معمولی) و نوع محصول (یونجه دیم، ماشک گل خوشه‌ای، نخود علوفه‌ای، خلر و گندم دیم) در ۶۰ کرت به مساحت هر کرت ۱۰ مترمربع (۱ متر× ۱۰ متر) انجام شد. در طول فصل رشد، صفات زراعی و شاخص‌های هیدرولوژیکی شامل حجم رواناب و غلظت رسوب اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که همه عوامل اصلی و اثرات متقابل آن‌ها در کاهش رواناب و غلظت رسوب معنادار بودند ($p<0.01$). بیشترین کارایی در مهار فرسایش مربوط به ماشک گل خوشه‌ای، خلر و گندم بود که در تمام دوره‌های بارندگی، غلظت رسوب کمتری نسبت به یونجه دیم و نخود علوفه‌ای داشتند. اجرای تناوب کشت در سال دوم موجب کاهش میانگین ۲/۵۴ گرم بر لیتر در غلظت رسوب نسبت به سال اول شد، در بخش عملکرد، ماشک گل خوشه‌ای و خلر در سال دوم به ترتیب ۱۵/۵ و ۱۳/۴ درصد افزایش تولید علوفه خشک نسبت به سال اول داشتند. حداکثر عملکرد علوفه خشک در تیمارهای دارای سطح آبگیر و شخم معمولی برای گندم، خلر و ماشک گل خوشه‌ای به ترتیب ۴۷۵۰، ۷۰۰۰ و ۷۱۰۰ کیلوگرم در هکتار ثبت شد. همبستگی مثبت بین صفات کمّی گیاهی و عملکرد دانه و علوفه، نقش انتخاب گونه‌های مناسب را در افزایش بهره‌وری و حفاظت خاک تأیید می‌کند. به‌طور کلی، ترکیب سطح آبگیر باران، خاک‌ورزی مناسب و انتخاب گونه‌های کارآمد، رویکردی مؤثر برای کاهش هدررفت خاک و افزایش تاب‌آوری دیمزارها در مناطق خشک و نیمه‌خشک است و باید در برنامه‌های توسعه کشاورزی مورد توجه و ترویج قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: کنترل فرسایش خاک، سطح آبگیر باران، تناوب کشت، غلات و لگوم‌ها، علوفه خشک و مناطق خشک و نیمه‌خشک

نوع مقاله: پژوهشی

استناد: طلائی رضا، حسن پناه داود، بیرامی بایرامعلی، محمدی حمید، اثر کاربرد کشت متناوب غلات و گیاهان علوفه‌ای بر مهار فرسایش خاک و افزایش تاب‌آوری به خشکسالی: مطالعه موردی استان اردبیل. علوم ومهندسی آبخیزداری ایران. ۱٤۰٤؛ ۱۹(٦۹): ۳۸علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱٤۰٤، دوره ۱۹، شماره ٦۹، صفحه ۳۸ تا۵۹

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱٤۰٤، دوره ۱۹، شماره ٦۹، صفحه ۳۸ تا ۵۹

ناشر: انجمن آبخیزداری ایران

۱- نویسنده مسئول و استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
talaei1969@yahoo.com و talaei1969@gmail.com
۲- استاد، بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران.
۳- محقق، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران.
٤- محقق، بخش تحقیقات جنگل ها ومراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران.

مقدمه

ایران به‌دلیل موقعیت جغرافیایی در ناحیه خشک و نیمه‌خشک، توپوگرافی متنوع و گستردگی اراضی دیم کم‌بازده، از مناطق مستعد فرسایش خاک و تولید رسوب در دنیا محسوب می‌شود [۱۶، ۱۷، ۳۴]. بررسی‌ها نشان داده است که اراضی جنگلی کمترین و دیمزارها بیشترین مقدار فرسایش را دارند؛ به‌طوری‌که نسبت فرسایش خاک در دیمزار به مراتع تا هفت برابر برآورد شده است [۱۰، ۲۳]. تنها حدود ۱۲ درصد از اراضی کشور زیر کشت قرار دارد و بیش از دوسوم آن دیم است که بخش زیادی از آن در معرض فرسایش شدید ناشی از مدیریت نادرست، بهره‌برداری از اراضی شیب‌دار، شخم‌های مکرر و کمبود پوشش گیاهی قرار دارد [۱۵،۲].

عوامل متعددی همچون خشکسالی‌های مکرر، چرای بی‌رویه، سوزاندن بقایا و مصرف ناکافی نهاده‌ها، موجب کاهش حاصلخیزی خاک و تشدید فرسایش در اراضی دیم شده‌اند [۱۹، ۴۲]. در استان اردبیل، تبدیل مراتع به دیمزار طی دهه‌های اخیر، کاهش شدید کیفیت خاک و افزایش هدررفت خاک در شیب‌های بالاتر را به‌دنبال داشته است [۴۲]. هم‌زمان، فشار بر مراتع به‌علت افزایش جمعیت و نیاز روزافزون به علوفه، منجر به کاهش ظرفیت تولیدی و تخریب پوشش گیاهی شده است [۱۴].

یکی از رویکردهای پیشنهادی، توسعه کشت گیاهان علوفه‌ای در تناوب با غلات، به‌ویژه گندم دیم، به‌منظور بهبود بهره‌وری، کاهش فرسایش و افزایش پایداری تولید است [۳۷]. لگوم‌هایی چون ماشک، خلر و نخود علوفه‌ای به‌دلیل توان تثبیت نیتروژن، افزایش ماده آلی، کنترل علف‌های هرز و تولید علوفه با ارزش غذایی بالا، نقش مهمی در ارتقاء کیفیت خاک و مهار فرسایش دارند [۵، ۲۸، ۳۲]. علاوه بر مزایای محیط زیستی، این تناوب‌ها می‌توانند نیاز بخشی از واحدهای دامی به علوفه را تأمین کنند و فشار بر مراتع را کاهش دهند [۵۸،۳۶].

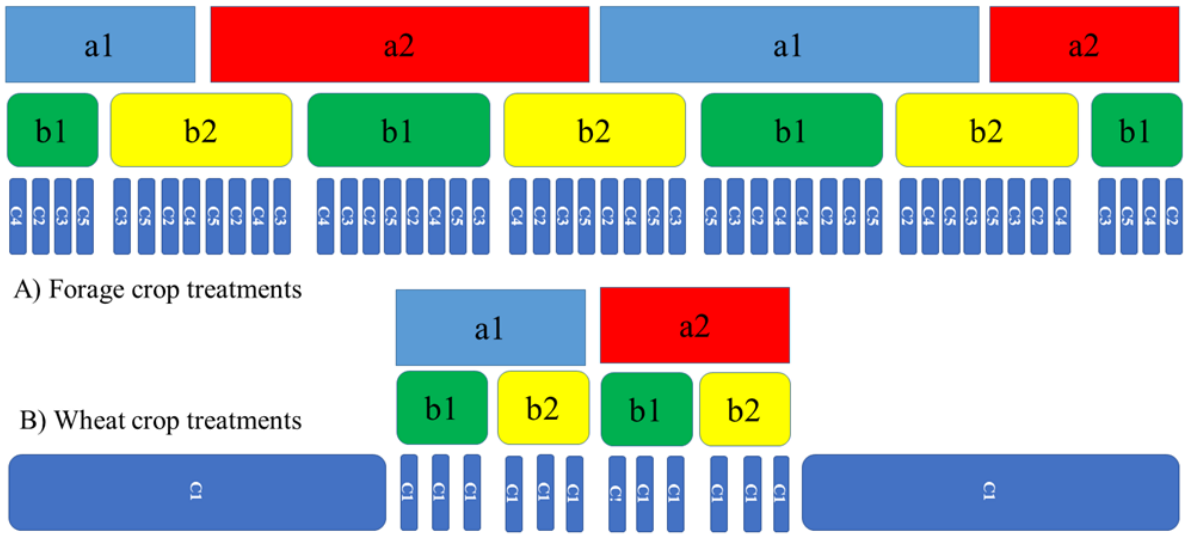
شرایط اقلیمی سرد و نیمه‌خشک، بارش‌های رگباری، شیب‌زیاد و خاک‌های کم‌عمق، آسیب‌پذیری اراضی دیم در استان اردبیل را در برابر فرسایش و خشکسالی افزایش داده است [۴۲]. نتایج مطالعات نشان داده‌اند که بخش زیادی از اراضی استان در کلاس خطر زیاد تا بسیار زیاد فرسایش قرار دارد [۹]. کشت متناوب غلات–لگوم، با بهبود ساختمان و نگهداری آب خاک، کاهش رواناب و افزایش عملکرد، می‌تواند به‌عنوان راهبردی سازگار با اقلیم و مؤثر در توسعه کشاورزی پایدار در این مناطق به‌کار گرفته شود [۲۴،۷، ۲۵، ۴۰، ۴۹].

در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی ناشی از برداشت بی‌رویه، استفاده از روش‌های سنتی و مدرن جمع‌آوری آب باران را به‌عنوان راهکاری مؤثر برای تأمین آب و بهبود وضعیت این مناطق ضروری کرده است [۴۷]. بر اساس شواهد علمی جدید، به‌کارگیری هم‌زمان سامانه‌های استحصال آب باران، خاک‌ورزی حفاظتی و کشت متناوب لگوم–غلات در اراضی دیم مناطق خشک و نیمه‌خشک، می‌تواند کارایی مصرف آب را تا ۳۰ درصد افزایش داده، رواناب سطحی را بیش از ۵۰ درصد کاهش دهد و بهبود چشمگیری در خصوصیات فیزیکی و بیولوژیکی خاک ایجاد کند [۳۳، ۵۱]. تغییر اقلیم و خشکسالی امنیت غذایی را تهدید می‌کنند؛ لگوم‌ها با تثبیت نیتروژن، بهبود خاک و افزایش کارایی مصرف آب، پایداری سیستم‌های زراعی را ارتقا داده و تناوب آن‌ها با غلات اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی مثبت دارد [۸، ۵۲]. در ایران، یافته‌های به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که کاشت ارقام بومی مانند ماشک و نخود علوفه‌ای در مزارع با سطوح آبگیر باران، موجب کاهش ۴۵ تا ۶۰ درصدی رواناب و رسوب و افزایش نفوذپذیری خاک تا ۴۸ درصد شده است [۴۵]. همچنین، پژوهش‌های میدانی در استان چهارمحال و بختیاری نشان داده است که ترکیب سطوح آبگیر و خاک‌ورزی حداقل، عملکرد گندم و حبوبات دیم را بین ۲۵ تا ۴۵ درصد افزایش داده است [۴۶]. نتایج پژوهش‌های انجام‌شده با استفاده از مدل‌سازی مکانی–هیدرولوژیکی نیز تأیید کرده است که استحصال هدفمند آب باران در مناطق خشک می‌تواند موجب افزایش تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و پایداری در تولید محصولات شود [۳۸، ۴۶]. این شواهد حاکی از آن است که راهبردهای مدیریت ترکیبی، ظرفیت بالایی برای ارتقاء پایداری تولید و حفاظت از منابع طبیعی در اراضی دیم کشور دارند.

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثرات مدیریتی تناوب لگوم–غلات و استفاده از روش‌هایی نظیر احداث سطوح آبگیر باران و کشت بدون شخم، بر کاهش هدررفت خاک، افزایش بهره‌وری و حفاظت از منابع آب و خاک در دیمزارهای شیب‌دار استان اردبیل انجام شده است.

با توجه به کاهش بارندگی‌ها، افزایش خشکسالی‌های متوالی و افت بهره‌وری خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک در سال‌های گذشته، ضرورت یافتن راهکارهای علمی و پایدار برای مدیریت دیمزارها بیش از پیش احساس می‌شود. اهمیت این پژوهش در آن است که با هدف کاهش فرسایش خاک، بهبود تأمین علوفه و ارتقای بهره‌وری آب طراحی شده و نتایج به دست آمده می‌تواند پاسخی مؤثر به چالش‌های محیط‌زیستی و اقتصادی کشاورزی منطقه باشد. نوآوری اصلی تحقیق در تلفیق سه مؤلفه کلیدی یعنی به‌کارگیری گونه‌های لگومی سازگار و پرمحصول در تناوب با غلات، استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران و اعمال روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی است؛ رویکردی که به‌صورت یکپارچه کمتر مورد بررسی میدانی قرار گرفته است. بکارگیری این ترکیب علاوه بر افزایش تاب‌آوری نظام‌های زراعی در برابر تنش‌های اقلیمی، می‌تواند منجر به کاهش فشار بر مراتع طبیعی و توسعه الگوهای کشاورزی پایدار در مقیاس منطقه‌ای و ملی شود.

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]



شکل ۱- طرح کرت‌های دوبار خرد شده با عوامل:-۱ سال اول (y۱) ودوم (y۲)؛ ۲- بدون سطح آبگیر باران (a۱) و با سطح آبگیرباران ((a۲؛ ۳- شخم در ۲سطح با حداقل شخم(b۱) و با شخم معمولی(b۲) و ٤- محصولات زراعی در ۵ سطح: گندم (c۱)، ماشک گل خوشه‌ای (c۲)، خلر(c۳)، نخود علوفه‌ای (c٤) و یونجه دیم (c۵). (A تیمارهای مربوط به چهار گونه گیاه علوفه‌ای است و (B تیمارهای گیاه غلات (گندم) را نشان می‌دهد.

Fig 1. Split-split plot design with the following factors: 1- Year: first year (Y1) and second year (Y2); 2- Rainwater harvesting level: two levels, without harvesting (a1) and with harvesting (a2); 3- Tillage: two levels, minimum tillage (b1) and conventional tillage (b2) and 4-Crop type: five levels, wheat (c1), Vicia villosa Roth (c2), Lathyrus sativus L. (c3), Pisum sativum L. (c4), and Medicago sativa L. (c5). (A) represents treatments related to the four forage species, and (B) represents treatments of the cereal crop (wheat).

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه

پژوهش در حوزه آبخیز کندرق، زیرحوضه‌ای از حوضه قزل‌اوزن، حدود ۱۰ کیلومتری شمال‌شرق هشتجین، جنوب استان اردبیل انجام شد. این استان با مساحتی برابر با ۱۷۹۵۳ کیلومترمربع و توپوگرافی غالباً کوهستانی (۸۹ درصد) در اقلیم نیمه‌خشک قرار دارد.

کاربری اراضی در این حوضه شامل جنگل‌کاری، مرتع‌داری، کشاورزی دیم و آبی و مناطق صنعتی و شهری است. پایگاه تحقیقاتی کندرق در زمینه‌های مختلف پژوهشی در منابع طبیعی و کشاورزی فعال است. این پایگاه به‌ویژه در زمینه کشت گیاهان دارویی در اراضی شیب‌دار، آزمایشات زراعی در شرایط دیم و احیای اراضی تخریب‌شده فعالیت می‌کند.

مزرعه آزمایشی در موقعیت جغرافیایی ٤۸ درجه، ۲۳ دقیقه و ۲۵ ثانیه شرقی و ۳۷ درجه، ۲٦ دقیقه و ٤٦ ثانیه شمالی با شیب عمومی ۱۲ تا ۱٤ درصد قرار دارد. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه‌خشک با شاخص خشکی بین ۱۰ تا ۲۰ است. متوسط بارش سالانه منطقه ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر و دمای روزانه بین منفی ۲۰ درجه سانتی‌گراد در زمستان تا ۲۹ درجه سانتی‌گراد در تابستان متغیر است [٤٤].

روش پژوهش

طرح آزمایش و اجرا

آزمایش در دو سال متوالی (سال‌های زراعی ۱٤۰۱-۱٤۰۲ و۱٤۰۲-۱٤۰۳) به صورت بلوک‌های کامل تصادفی با طراحی کرت‌های دوبار خرده شده[1] و سه تکرار انجام شد. عامل اصلی شامل برداشت آب باران با دو سطح (با و بدون سطح آبگیر باران)، عامل فرعی اول نوع شخم (حداقل و متعارف) و عامل فرعی دوم پنج محصول زراعی بود. در مجموع ٦۰ قطعه آزمایشی در هر سال و ۱۲۰ قطعه طی دو سال کشت شد. رواناب و رسوب تولیدی از هر قطعه جمع‌آوری و برای تحلیل نگهداری شدند. در طول سال زراعی یادداشت برداری از صفات گیاهی در پنج دوره رشد انجام گرفت.

اندازه کرت‌ها به ابعاد ۱ متر در ۱۰ متر (معادل ۱۰ متر مربع) تعیین و انتخاب شدند. در این پژوهش، تمامی کرت‌های آزمایشی دارای ابعاد یکسان هستند. در طراحی کرت‌های دوبار خرد شده، ابتدا عامل اصلی یعنی برداشت آب باران (با و بدون سطح آبگیر باران) به صورت تصادفی در کرت‌های اصلی استقرار یافت. سپس در هر کرت اصلی، عامل فرعی اول یعنی روش شخم (حداقل شخم و شخم متعارف) به‌صورت تصادفی در کرت‌های فرعی جانمایی شد. در نهایت، عامل فرعی دوم شامل پنج محصول زراعی (چهار گونه علوفه‌ای و گندم) در قالب زیرکرت‌ها و با آرایش تصادفی قرار داده شدند. بدین ترتیب، تمامی تیمارها در سطوح مساوی و با ابعاد یکنواخت کشت شدند. شکل ۱ نحوه آرایش کرت‌ها و تخصیص تیمارها را در قالب طرح کرت‌های دوبار خرد شده نشان می‌دهد.

1. Split-Split Plot

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

الف) a)

ب) b)

شکل ۲- عملیات صحرایی: الف) آماده‌سازی زمین و اجرای شخم معمولی و شخم حداقل همراه با تفکیک بخش‌های بالادست کرت‌ها برای سطح آبگیر باران؛ ب) ایجاد پشته در حاشیه کرت‌ها و انجام عملیات کاشت.

Fig 2. Field operations: (a) Land preparation and implementation of conventional tillage and minimum tillage with separation of the upper sections of the plots for rainwater harvesting (RWH) structures; (b) Construction of bunds along the plot margins and crop planting operations

مدیریت محصول و آماده‌سازی خاک

آماده‌سازی زمین بر اساس شخم حداقل با استفاده از شیارکن‌های مخصوص کاشت بذر و کود انجام شد و پس از کاشت خاک به‌طور بیشتری مختل نشد. عملیات کنترل علف‌های هرز و سایر اقدامات زراعی به موقع انجام گرفت. سطح آبگیرها با حذف بقایا عمده، متراکم‌سازی سطح با غلتک‌های دستی و ایجاد مرزهای خاکی مشخص شد. سطح آبگیرهای باران عاری از پوشش گیاهی متراکم بود تا شرایط طبیعی رواناب شبیه‌سازی شود [۱۲] (شکل ۲).

توصیف محصولات

گیاهان لگومی انتخاب‌شده به دلیل سازگاری با شرایط دیم و پتانسیل مهار فرسایش مورد استفاده قرار گرفتند. ماشک گل خوشه‌ای [1]رشد قوی در شرایط خشک و مرطوب دارد [۱]. خلر[2] مقاوم به خشکی و دارای ارزش علوفه‌ای بالا است [٤٨]. نخود علوفه‌ای [3]رشد زیاد و خصوصیت خوش‌خوراکی دارد [٥٥]. یونجه دیم[4] مقاومت خوبی نسبت به سرما و خشکی از خود نشان می‌دهد [۲۱]. رقم گندم صدرا به دلیل سازگاری منطقه‌ای و عملکرد مناسب انتخاب شد [٤١].

یادداشت برداری

نمونه‌های رواناب و رسوب بلافاصله پس از هر رویداد بارندگی مهم از خروجی هر قطعه جمع‌آوری شد. داده‌های فصل رشد در پنج بازه زمانی تقریباً یک‌ونیم ماهه تحلیل شد: آبان تا نیمه اول آذر، نیمه دوم آذر تا آخر دی، بهمن تا نیمه اول اسفند، نیمه دوم اسفند تا آخر فروردین و اول اردیبهشت تا نیمه اول خرداد.

بر اساس داده‌های بارانسنجی در محدوده پایگاه تحقیقاتی، در سال اول به‌ترتیب در دوره‌های ذکر شده، به ترتیب ۲٦، ۱۲، ۹٦، ۸۵ و ۷۰ میلی‌متر بارندگی ثبت شد که مجموع آن به ۲۸۹ میلی‌متر رسید. در سال دوم نیز میزان بارش در همین دوره‌ها به‌ترتیب ۵۰، ۲٦، ۳۵، ۹۲ و ۷۹ میلی‌متر بود که در مجموع ۲۸۲ میلی‌متر را تشکیل داد. در سال اول بارش‌ها در دوره‌های زمستانی و اوایل بهار (دوره سوم و چهارم) متمرکز بوده و بیشترین بارندگی در بهمن تا نیمه اول اسفند با ۹٦ میلی‌متر رخ داده است، در حالی‌که در سال دوم سهم بارش‌های اولیه (۵۰ میلی‌متر در دوره اول و ۲٦ میلی‌متر در دوره دوم) نسبت به سال اول افزایش یافته اما بارش دوره سوم با ۳۵ میلی‌متر نسبت به سال قبل کاهش چشمگیری داشته است. این تغییر الگوی توزیع بارش، علی‌رغم نزدیکی مجموع بارندگی دو سال، تأثیر بسزایی بر رواناب سطحی، نفوذپذیری خاک و تأمین رطوبت گیاهان در مقاطع حساس رشد داشته است.

حجم‌ها با استفاده از ظروف درجه‌بندی شده اندازه‌گیری و نمونه‌های آب در بطری‌های برچسب‌دار جهت اندازه‌گیری غلظت رسوب نگهداری شدند. رواناب بر اساس حجم (لیتر)، عمق (میلی‌متر) و درصد نسبت به بارش محاسبه شد. رسوب بر اساس وزن (گرم) و غلظت (گرم بر لیتر) سنجیده شد. پارامترهای پوشش گیاهی شامل ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)، درصد پوشش تاج گیاه، عملکرد علوفه خشک و بیوماس گندم (گرم بر مترمربع) ثبت شد. صفات زراعی مانند طول غلاف (سانتی‌متر)، تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف، تعداد دانه در بوته، وزن دانه در بوته (گرم) و عملکرد دانه (گرم بر مترمربع) نیز اندازه‌گیری شد (شکل ۳). مساحت تاج پوشش گیاهی در کرت‌ها در واحدهای

1. Vicia villosa Roth
2. Lathyrus sativus L.
3. Pisum sativum L.
4. Medicago sativa L.

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

الف) a)

ب) b)

ج) c)

د) d)

شکل ۳- الف) نمایی از کرت‌های آزمایش در دو ردیف غلات (گندم) و محصولات علوفه‌ای؛ ب)، ج) و د) اندازه گیری و یادداشت برداری

Fig 3. a) A view of the experimental plots in two rows of cereals (wheat) and forage crops; b), c) and d) Measurement and data recording

نمونه یک مترمربعی و در سه تکرار بصورت مستقیم اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری تراکم و تاج پوشش گیاهی در کرت‌های آزمایشی بزرگ‌تر (۱۰ مترمربع) نیازمند روشی است که هم نماینده کل کرت باشد و هم هزینه و زمان برداشت را کاهش دهد. استفاده از واحدهای نمونه‌برداری کوچک‌تر (یک مترمربعی) به‌صورت تصادفی در داخل هر کرت، روشی استاندارد برای دستیابی به برآورد دقیق پوشش گیاهی محسوب می‌شود. تکرار سه‌باره نمونه‌برداری در هر کرت باعث افزایش دقت آماری، کاهش خطای نمونه‌برداری و فراهم‌کردن امکان تعمیم نتایج به کل کرت می‌شود. این روش علاوه بر رعایت اصول کارایی و صرفه‌جویی، امکان مقایسه تیمارها را بر اساس داده‌های همگن و استاندارد فراهم می‌کند. به همین دلیل در این پژوهش نمونه‌برداری با واحدهای نمونه‌برداری کوچک در کرت‌های بزرگ‌تر به عنوان یک رویکرد پذیرفته‌شده و علمی برای افزایش اعتبار و دقت داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت [۲۶ و ۵۳]. دراین روش قطر گیاهان اندازه‌گیری شد و محاسبه مساحت با استفاده از فرمول بیضی انجام گرفت.

برآورد کارایی کاهش رواناب

حجم رواناب جمع‌آوری شده به کل بارش در هر بازه زمانی و کل فصل تقسیم شد تا درصد کاهش رواناب در تیمارهای مختلف تعیین شود. کارایی کاهش رواناب[1] برای هر یک از پنج دوره بارندگی با رابطه ۱ محاسبه شد:

$$REE_j(\%)=100-\left(\frac{\sum_{i=1}^{n_j} Runoff_{p_{ij}} \times 100}{\sum_{i=1}^{n_j} Rain_{p_{ij}}}\right) \quad (1)$$

که در آن:

REE_j: درصد کارایی کاهش رواناب در دوره jام

$Runoff_{p_{ij}}$: حجم رواناب در iامین رویداد بارندگی در دوره jام

$Rain_{p_{ij}}$: حجم بارش در همان رویداد

n_j تعداد رویدادهای بارندگی/رشد در دوره jام

$j=1\ldots5$ دوره‌های پنجگانه فصل رشد

تحلیل آماری

آزمایش در دو فصل زراعی متوالی تحت شرایط دیم و در اقلیم نیمه‌خشک برای ارزیابی تأثیر سامانه‌های برداشت آب باران، نوع شخم و گونه‌های علوفه‌ای بر رواناب، رسوب و عملکرد محصول انجام شد. طرح آزمایشی به صورت فاکتوریل با طرح کرت‌های دوبار خرد شده و سه تکرار انجام گرفت (شکل ۱)، که چهار عامل اصلی شامل موارد زیر است:

- سال (Y): دو سال متوالی (Y_1 و Y_2) به عنوان عامل ثابت اقلیمی
- برداشت آب باران (A): دو سطح بدون (a_1) و با سامانه آبگیر باران (a_2) در عوامل اصلی

1. Runoff Reduction Efficiency, REE

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

• نوع شخم (B): دو سطح شخم حداقل (b_1) و شخم متعارف(b_2) در عوامل فرعی
• نوع محصول (C): پنج گونه علوفه‌ای و غلات

در این پژوهش دو مزرعه انتخاب شد؛ یکی برای کاشت گونه‌های علوفه‌ای (با ٤٨ کرت مورد اندازه‌گیری) و دیگری برای کشت گندم که به‌منظور اجرای تناوب در سال دوم، در سال اول به‌طور کامل گندم‌کاری شده ولی اندازه‌گیری‌ها تنها در ١٢ کرت انجام گرفت تا در سال دوم جایگزینی متقابل محصولات (علوفه به‌جای گندم و گندم به‌جای علوفه) امکان‌پذیر شود. داده‌ها با استفاده از تحلیل واریانس چندعاملی [1]برای بررسی اثرات اصلی و تعاملات عوامل آزمایشی تجزیه و تحلیل شدند [٣٥]. سال به عنوان عامل ثابت در مدل وارد شد و ساختار سلسله‌مراتبی تیمارها لحاظ شد. فرضیات تحلیل واریانس شامل نرمال بودن باقیمانده‌ها و همگنی واریانس‌ها بررسی شد. نتایج آزمون شاپیرو–ویلک [2] و نمودارهای تشخیصی، نرمال بودن باقیمانده‌ها را تأیید کرد و آزمون لون [3] نیز همگنی واریانس‌ها را نشان داد. بنابراین، داده‌ها برای انجام آنالیز واریانس مناسب بودند. مقدار آماره F [4]در تحلیل واریانس نشان‌دهنده نسبت میانگین مربعات بین گروه‌ها [5] به میانگین مربعات درون گروه‌ها [6]است. این نسبت برای بررسی این که آیا تفاوت مشاهده شده بین میانگین گروه‌ها بیش از آن است که ناشی از تغییرات تصادفی درون گروه‌ها باشد یا خیر، مورد استفاده قرار می‌گیرد. به بیان دیگر، مقدار آماره F به‌عنوان معیاری برای آزمون فرض صفر مبنی بر برابری میانگین‌ها در گروه‌های مختلف به کار گرفته می‌شود؛ هرچه مقدار F بزرگ‌تر باشد، شواهد بیشتری دال بر وجود تفاوت معنادار آماری بین گروه‌ها ارائه می‌شود. میانگین‌های تیمارها با آزمون دانکن در سطح معنی‌داری پنج درصد مقایسه شدند. کلیه تحلیل‌ها با نرم‌افزارهای SPSS نسخه ٢٧ و R-Studio نسخه ٤.٢.١ انجام گرفت. از ابزار هوش مصنوعی ChatGPT در استخراج برخی مطالب از متن گزارش نهایی پژوهشی، ویرایش و اصلاح بخش‌هایی از متن مقاله و ترجمه متون و تهیه کدهای اجرایی در آنالیز واریانس و مقایسه میانگین در محیط R و R-Studio استفاده شده است.

نتایج

روند تغییرات حجم و کاهش رواناب در تیمارها

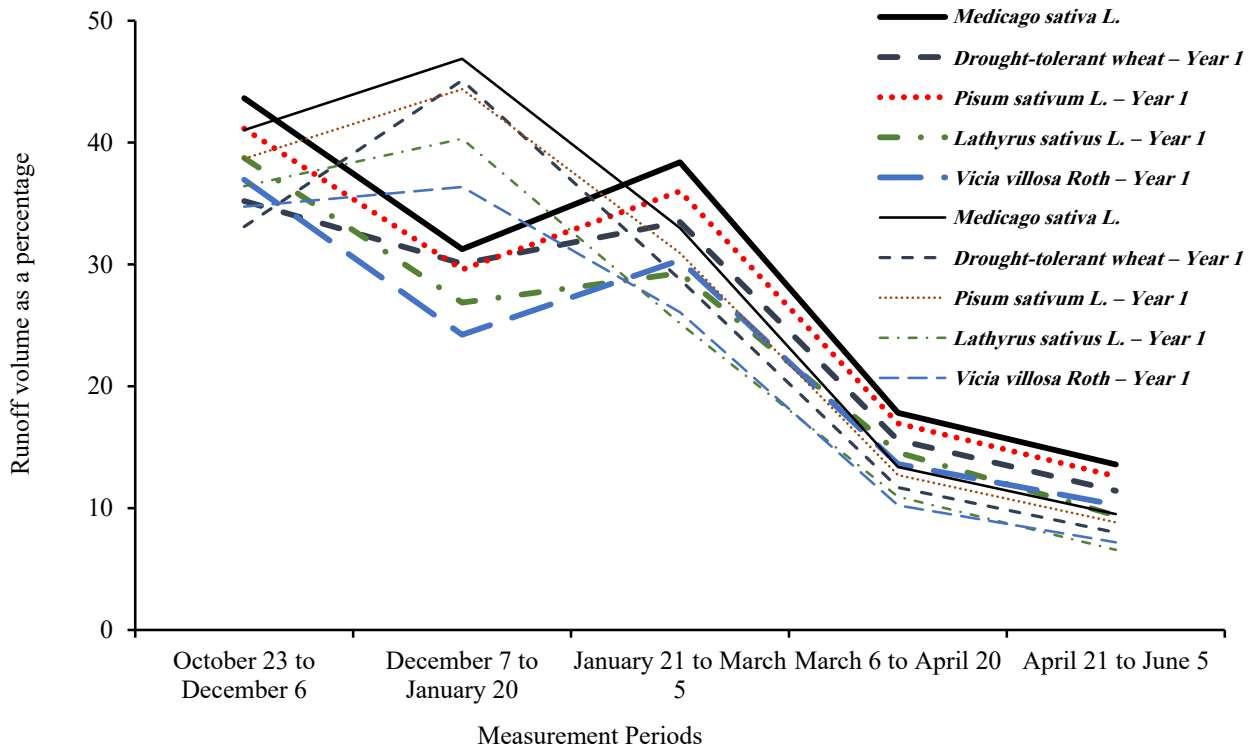
تغییرات حجم رواناب طی پنج دوره بارندگی بیانگر روند نزولی در همه تیمارها و برای تمام محصولات است (شکل ٤). در پایان فصل رشد، حجم رواناب به کمترین میزان خود رسید که بیانگر نقش مؤثر توسعه پوشش گیاهی در کاهش رواناب سطحی است. این روند در هر دو سال به‌صورت مشابه مشاهده شد. نتایج مقایسه داده‌های مربوط به محصولات مورد آزمایش در دو سال متوالی با کشت متناوب نشان می‌دهد که به‌علت بارش نسبتاً بالای دوره دوم از نیمه آذر تا آخر دی در سال دوم، درصد رواناب تولیدی نیز افزایش قابل‌توجهی یافته است. اما در سایر دوره‌ها به علت رشد نسبتاً بهتر گیاهان نسبت به سال اول حجم رواناب تولیدی کاهش معنی‌دار داشته است. نتایج پایش دو ساله پنج دوره بارندگی نشان داد که حجم رواناب تولیدی به‌صورت معنی‌داری تحت تأثیر سه متغیر مدیریتی شامل سطح آبگیر باران، نوع عملیات خاک‌ورزی و نوع محصول زراعی قرار گرفته است ($p < 0.001$). تغییرات رواناب در همه دوره‌ها دارای روندی کاهشی بوده و در دو سال نیز الگوی مشابهی مشاهده شد. در اغلب مراحل، حداقل شخم و حذف سطح آبگیر باران موجب کاهش قابل‌توجه حجم رواناب شد، درحالی‌که وجود سطح آبگیر باران (به‌ویژه با شخم معمولی) بیشترین میزان رواناب را تولید کرد.

در مراحل ابتدایی (آبان–آذر)، گندم به‌دلیل استقرار سریع و تراکم ریشه‌ای مناسب منجر به بیشترین کاهش رواناب شد اما از مراحل میانی به بعد، محصولات لگوم‌دار به‌ویژه ماشک گل خوشه‌ای و خلر، با ایجاد پوشش انبوه و داشتن ساختار ریشه‌ای قوی‌تر، به‌طور بارزی کارآمدتر بودند. به‌طور کلی، کمترین حجم رواناب (٣/٤٩ لیتر بر مترمربع) در تیمار خلر با حداقل شخم و بدون سطح آبگیر ثبت شد، درحالی که بیشترین حجم (٩/٨٢ لیتر بر مترمربع) مربوط به یونجه دیم با شخم معمولی و سطح آبگیر بود. مقایسه میانگین درصد کاهش رواناب (جدول ١) نیز نشان داد که محصولات خلر و ماشک گل‌خوشه‌ای در شرایط حداقل شخم و عدم وجود آبگیر، به ترتیب با ٨٧/٨٩ درصد و ٨٦/٦٩ درصد، بیشترین درصد کاهش رواناب را ایجاد کردند. در مقابل، یونجه دیم در کلیه مراحل در گروه آماری پایین‌تر (b یا c) قرار گرفت و کمترین بازدهی را در کاهش رواناب نشان داد. نکته قابل توجه آن است که در رخدادهای بارانی شدید، اگرچه اثر حفاظتی پوشش گیاهی کاهش یافت، اما حتی در این شرایط نیز محصولات لگوم‌دار عملکرد به‌مراتب بهتری نشان دادند. در مقیاس فصلی، میانگین کاهش رواناب در تیمار ماشک گل‌خوشه‌ای (٨٠/٤٦ درصد) و خلر (٧٩/٦٤ درصد) به‌طور معنی‌داری بالاتر از سایر گیاهان بود ($p < 0.001$) (جدول ٢).

نتایج نشان می‌دهد که تلفیق حداقل شخم با کاشت محصولات لگوم‌دار (خصوصاً ماشک و خلر) و طراحی بهینه سطح آبگیر، کاراترین سناریوی مدیریتی برای کاهش رواناب و مهار فرسایش سطحی در سامانه‌های کشاورزی دیم مناطق خشک و نیمه‌خشک منطقه است.

1. ANOVA
2. Shapiro–Wilk Test
3. Levene's Test
4. F-statistic
5. Mean Square Between Groups
6. Mean Square Within Groups

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]



شکل ٤- مقایسه درصد حجم رواناب تولید شده در دو سال و در دوره های مشابه در محصولات مورد آزمایش

Fig 4. Runoff percentage trends of selected forage species across five growth periods in two consecutive years

جدول ۱- مقایسه میانگین کاهش درصد رواناب در تیمارهای منتخب (براساس آزمون دانکن)

Table 1. Comparison of mean runoff reduction (%) in selected treatments (based on Duncan's test)

Runoff Reduction % درصد کاهش رواناب	Rainwater Harvesting, RWH سطح آبگیر	Tillage Type نوع خاک‌ورزی	Crop Type نوع محصول	Treatment تیمار
87.89	Without RWH بدون سطح آبگیر باران	Minimum Tillage حداقل شخم	Lathyrus sativus L. خلر	a1b1c3
86.69	Without RWH بدون سطح آبگیر باران	Minimum Tillage حداقل شخم	Vicia villosa Roth. ماشک گل خوشه‌ای	a1b1c2
83.26	Without RWH بدون سطح آبگیر باران	Minimum Tillage حداقل شخم	Wheat گندم	a1b1c1
65.99	Without RWH بدون سطح آبگیر باران	Conventional Tillage شخم معمولی	Medicago sativa L. یونجه دیم	a1b2c5
74.85–65.99 Minimum–Maximum (کمترین- بیشترین)	With RWH با سطح آبگیر باران	Conventional Tillage شخم معمولی	Medicago sativa L. یونجه دیم	a2b2c5

جدول ۲- خلاصه نتایج تحلیل واریانس و مقایسه میانگین رواناب کل در تیمارهای آزمایشی

Table 2. Summary of ANOVA results and comparison of total runoff means in experimental treatments

Significance level سطح معنی‌داری	Highest mean runoff (L m^{-2}) بیشترین میانگین رواناب (لیتر بر مترمربع)	Lowest mean runoff (L m^{-2}) کمترین میانگین رواناب(لیتر بر مترمربع)	Factor عامل
***	Medicago sativa L. یونجه دیم 70.33	Vicia villosa Roth. ماشک گل خوشه‌ای 55.73	Crop Type (نوع محصول)
***	With RWH با سطح آبگیر باران	Without RWH بدون سطح آبگیر باران	Rainwater Harvesting, RWH سطح آبگیر
***	Conventional Tillage شخم معمولی	Minimum Tillage حداقل شخم	Tillage Type نوع خاک‌ورزی

توضیح نمادها:

***= بسیار معنی‌دار ($p< 0.001$)، **= معنی‌دار $0.01> p$)، *= معنی‌دار،($p< 0.05$) نزدیک به معنی‌داری($0.1> p>0.05$) و ns = معنی‌دار نیست($p> 0.05$)

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

تغییر نرخ هدررفت خاک در تیمارها

بررسی تغییرات غلظت رسوب تولیدی (گرم در لیتر) در محصولات زراعی تحت شرایط مختلف بارندگی در دو سال متوالی نشان داد که الگوی کلی تغییرات رسوب در سال دوم مشابه سال اول بوده، اما شدت هدررفت خاک در برخی تیمارها تغییر یافته است. به طور مشخص، در تیمارهای یونجه دیم و نخود علوفه‌ای مقدار رسوب نسبت به سال اول افزایش یافت، در حالی‌که ماشک گل‌خوشه‌ای و خلر به دلیل افزایش تراکم پوشش گیاهی و قرار گرفتن در چرخه تناوب زراعی، کاهش معنی‌داری در میزان غلظت رسوب از خود نشان دادند. کاهش رسوب در فصل زمستان و بهار سال دوم به طور معنی‌داری ($p<0.05$) در مقایسه با سال اول مشاهده شد و بیانگر اثر ترکیبی بهبود رشد گیاه، افزایش شاخص پوشش خاک و تغییر الگوی توزیع بارش‌ها بود. نتایج آزمون t نیز نشان داد که در ابتدای فصل زراعی (پاییز) به دلیل کاهش پوشش گیاهی و افزایش رواناب، مقدار رسوب بالاتر بوده ولی با گذر از دوره دوم رشد و توسعه تاج پوشش، میزان غلظت رسوب به طور معنی‌داری کاهش یافت (میانگین کاهش کل دوره برابر با ۲/٥٤ گرم در لیتر بود) (جدول ۳). از سوی دیگر، تجزیه و تحلیل واریانس چهارعاملی نشان داد که تمامی عوامل اصلی شامل سال، سطح آبگیر باران، نوع خاک‌ورزی و نوع محصول اثر بسیار معنی‌داری بر میزان غلظت رسوب تولیدی در تمام دوره‌های بارندگی و در کل فصل زراعی دارند ($p<0.001$). افزون بر این، اکثر اثرات متقاطع دوگانه، سه‌گانه و حتی چهارگانه نیز معنادار بودند که دلالت بر تأثیر هم‌زمان عوامل مدیریتی بر فرایند هدررفت خاک دارد (جدول ٤).

مقایسه میانگین به روش دانکن نشان داد که نخود علوفه‌ای و یونجه دیم در تمام دوره‌ها بالاترین میزان غلظت رسوب را تولید کرده و در گروه a قرار گرفتند، در حالی‌که ماشک گل‌خوشه‌ای و خلر با کمترین هدررفت خاک در گروه c دسته‌بندی شدند و دارای نقش حفاظتی مؤثری در کاهش هدررفت خاک بودند. گندم در تمامی دوره‌ها در گروه میانی (b) قرار گرفت.

این نتایج اهمیت انتخاب محصول با ظرفیت حفاظتی بالا (به‌ویژه ماشک گل‌خوشه‌ای و خلر)، همراه با کاربرد مناسب خاک‌ورزی و وجود سطح آبگیر باران را در توسعه نظام‌های پایدار کشت تأیید می‌کند. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد که نوع محصول مؤثرترین عامل در کاهش هدررفت خاک در شرایط بارندگی بوده و اثر آن با سطح آبگیر باران و نوع خاک‌ورزی تشدید می‌شود. بنابراین، استفاده هم‌زمان از گیاهان حفاظتی، خاک‌ورزی کاهش‌یافته و سازوکار جمع‌آوری رواناب یکی از کارآمدترین راهکارها برای کاهش هدررفت خاک و مدیریت پایدار مزارع در مناطق خشک و نیمه‌خشک است.

نقش پوشش گیاهی در کاهش رواناب و هدررفت خاک

همه عوامل اصلی مورد بررسی شامل سال زراعی، نوع خاک‌ورزی و سطح آبگیر باران، و نوع محصول اثرات معنادار و قوی بر درصد تاج پوشش گیاهی در تمامی دوره‌های رشد نشان داده‌اند. به‌ویژه در دوره چهارم که هم‌زمان با اوج فاز رویشی محصولات است، شدت اثر همه عوامل به بیشینه خود رسیده است. مقدار آماره F برای اثر سال در این دوره ۱۳٦۸، برای نوع محصول حدود ۱۲٦۱٥، برای نوع خاک‌ورزی۱٤٤۱۰ و برای سطح آبگیر باران ۸۳۱۱بوده است که همگی با سطح اطمینان بسیار بالا ($p< 0.001$) معنادار هستند (جدول ٥). این یافته‌ها بیانگر آن‌اند که در فاز رشد بحرانی، شرایط مدیریتی و اقلیمی تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر گسترش پوشش گیاهی دارند. علاوه‌بر اثرات اصلی، اغلب تعاملات دو عاملی، سه‌عاملی و حتی چهارعاملی نیز در اکثر دوره‌ها معنی‌دار بوده‌اند. به‌عنوان مثال، تعامل «سال × سطح آبگیر باران» در چهار دوره از پنج دوره معنادار است، که نشان می‌دهد اثر بخشی سامانه آبگیر باران بستگی زیادی به شرایط اقلیمی سال دارد. همچنین، تعامل «نوع خاک‌ورزی × نوع محصول» در تمامی دوره‌ها بسیار معنادار بوده و تأکید می‌کند که

جدول ۳- نتایج آزمون t مقایسه میانگین غلظت رسوب (گرم در لیتر) در دو سال متوالی برای دوره‌های رشد

Table 3. t-test results for comparing mean sediment (g/L) between two consecutive years across growth periods

Period (دوره/مرحله بارندگی)	Time interval بازه زمانی	Mean difference (g/ L^{-1}) (گرم در لیتر) میانگین تفاضل	t آماره t	df درجه آزادی	Significance level سطح معنی‌داری
First اول	October 23 to December 6 اول آبان–نیمه آذر	–5.10	–1.314	59	0.194
Second دوم	December 7 to January 20 نیمه آذر–پایان دی	–2.82	–4.87	59	0.000
Third سوم	January 21 to March 5 اول بهمن–نیمه اسفند	–2.54	13.12	59	0.000
Fourth چهارم	March 6 to April 19 نیمه اسفند–پایان فروردین	–1.48	13.30	59	0.000
Fifth پنجم	April 20 to June 5 اول اردیبهشت–نیمه خرداد	–1.36	18.07	59	0.000

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

جدول ٤- نتایج تجزیه واریانس چهارعاملی برای کل فصل زراعی

Table 4. Four-factor ANOVA results for the entire growing season

Source of variation منبع تغییرات	MS (Mean Square) میانگین مربعات	F-statistic آمارهF	Significance level سطح معنی‌داری
Year سال	4,390,603	16229.93	<0.001
Rainwater Harvesting, RWH سطح آبگیر	206,039	761.63	<0.001
Tillage Type نوع خاک‌ورزی	335,911	1241.70	<0.001
Crop Type نوع محصول	1,493,146	5519.44	<0.001
Year × Crop Type سال × نوع محصول	395,163	1460.73	<0.001
Tillage Type × Crop Type نوع عملیات خاک‌ورزی × نوع محصول	5,892	21.78	<0.001
Rainwater Harvesting × Tillage Type × Crop Type سطح آبگیر باران × نوع خاک‌ورزی × نوع محصول	36,223	133.90	<0.001
Year × Rainwater Harvesting × Tillage Type × Crop Type سال × سطح آبگیر باران × نوع خاک‌ورزی × نوع محصول	11,029	40.77	<0.001

- Year (سال)، Rainwater Harvesting (سطح آبگیر باران)، Tillage Type (نوع خاک‌ورزی) و Crop Type (نوع محصول)

واکنش گیاه به خاک‌ورزی به نوع گونه زراعی نیز وابسته است. نتایج مربوط به اثرات سه‌عاملی و چهارعاملی، نشان داد که «سال × سطح آبگیر × نوع خاک‌ورزی» و «سال × سطح آبگیر × نوع خاک‌ورزی × نوع محصول» در بیشتر دوره‌ها معنادار بوده‌اند، که اهمیت اتخاذ یک رویکرد مدیریتی چندبُعدی را در بهینه‌سازی پوشش گیاهی برجسته می‌سازد. در واقع، پاسخ تاج پوشش به تغییرات مدیریتی وابسته به ترکیب عوامل مختلف در سال‌های متفاوت است و نمی‌توان تنها با تمرکز بر یک عامل، عملکرد را تضمین کرد.

برای ارزیابی جامع‌تر عملکرد تیمارهای مدیریتی، میانگین درصد تاج پوشش گیاهی در طول پنج دوره اندازه‌گیری، محاسبه و در جدول ٦ ارائه شد. نتایج این جدول نشان داد که ترکیب عوامل مدیریتی تأثیر بسیار معنی‌داری بر گسترش پوشش گیاهی در طول فصل رشد دارد. بالاترین میزان پوشش گیاهی٤ / ٨١درصد در تیمار ترکیبی «حداقل شخم + سطح آبگیر باران + لگوم‌ها» مشاهده شد که به عنوان تیمار مرجع و بهینه معرفی می‌شود. این تیمار با حفظ رطوبت خاک، کاهش تبخیر، بهبود نفوذپذیری و بهره‌گیری از رشد رویشی گسترده لگوم‌ها، توانست شرایط مطلوبی برای توسعه پوشش گیاهی فراهم آورد. کاهش هر یک از مؤلفه‌های مدیریتی، به‌ویژه حذف سامانه آبگیر باران یا جایگزینی لگوم با غلات، به افت معنادار در درصد پوشش منجر شد. به عنوان مثال، در تیمار «حداقل شخم + بدون آبگیر + لگوم‌ها» میانگین پوشش به ٦٨/٢ درصد کاهش یافت ($p<0.01$) و در تیمار "حداقل شخم + سطح آبگیر باران+ غلات» نیز پوشش به ٦٤/٦ درصد رسید ($p<0.001$). این نتایج نشان می‌دهند که اثر تقویتی سطح آبگیر باران و مزایای بیولوژیکی لگوم‌ها نقش اساسی در پایداری و تراکم پوشش دارند. کمترین میزان پوشش گیاهی٣ / ٤٤درصد مربوط به تیمار «شخم معمولی + بدون آبگیر + غلات» بود که اختلاف آماری معناداری با تمامی تیمارهای دیگر داشت ($p<0.001$). این تیمار نه تنها از نظر فیزیکی موجب تخریب ساختار خاک و افزایش تبخیر شده، بلکه به‌دلیل استفاده از گونه‌های با پوشش‌دهی محدودتر (غلات) در شرایط تنش، توسعه پوشش گیاهی را با محدودیت مواجه کرده است. به‌طور کلی، یافته‌ها مؤید آن است که هم‌افزایی بین مدیریت خاک (شخم حداقل)، مدیریت آب (سطح آبگیر باران) و انتخاب نوع محصول (لگوم‌ها) می‌تواند شرایط پایدار و مساعدی برای استقرار و توسعه تاج پوشش گیاهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم آورد.

بررسی میانگین درصد تاج‌پوشش پنج گونه زراعی در پنج مرحله بارندگی نشان داد که خلر و ماشک گل خوشه‌ای در تمامی مراحل رشد، بیشترین پوشش گیاهی را ایجاد کردند و در گروه آماری aقرار گرفتند، که بیانگر رشد سریع و توان بالای این گونه‌ها در تولید توده هوایی و مهار رواناب و فرسایش سطحی است. گندم با قرارگیری در گروه b عملکرد میانه‌ای داشته و علی‌رغم افزایش تدریجی پوشش طی دوره‌های رشد، نسبت به خلر و ماشک کمتر مؤثر بوده است. نخود علوفه‌ای و یونجه دیم در گروه‌های پایین‌تر قرار گرفتند و پوشش کمتری ایجاد کردند، که نشان‌دهنده رشد کند و تراکم کم آن‌ها است. روند صعودی درصد تاج‌پوشش در همه

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

جدول ۵- تحلیل واریانس اثر اصلی و متقابل عوامل مختلف در درصد تاج پوشش گیاهی

Table 5. Analysis of variance (ANOVA) for the main and interaction effects of different factors on vegetation canopy cover percentage

Main and interaction effects تاثیر اصلی و متقابل	Period I دوره اول	Period II دوره دوم	Period III دوره سوم	Period IV دوره چهارم	Period V دوره پنجم
Year سال	272.07 ***	133.94 ***	283.48 ***	1368.00 ***	207.48 ***
Rainwater Harvesting, RWH سطح آبگیر	785.58 ***	153.11 ***	6212.84 ***	8311.68 ***	2039.90 ***
Tillage Type نوع خاک‌ورزی	314.22 ***	838.48 ***	5928.05 ***	14410.53 ***	5328.54 ***
Crop Type نوع محصول	672.59 ***	1091.43 ***	5377.34 ***	12615.86 ***	6209.15 ***
Year × Rainwater Harvesting, RWH سال × سطح آبگیر	22.86 ***	3.31 (ns)	8.82 **	10.53 **	10.07 **
Year × Tillage Type سال × نوع خاک‌ورزی	6.46 *	0.45 (ns)	43.90 ***	88.53 ***	0.06 (ns)
Rainwater Harvesting × Tillage Type سطح آبگیر باران × نوع خاک‌ورزی	45.59 ***	47.09 ***	68.91 ***	94.74 ***	371.98 ***
Year × Crop Type سال × نوع محصول	43.66 ***	51.66 ***	39.17 ***	204.78 ***	74.15 **
Rainwater Harvesting × Crop Type سطح آبگیر باران × نوع محصول	89.66 ***	135.47 ***	272.99 ***	164.65 ***	23.96 **
Tillage Type × Crop Type نوع عملیات خاک‌ورزی × نوع محصول	52.89 ***	60.82 ***	233.53 ***	630.20 ***	353.32 **
Year × Rainwater Harvesting × Tillage Type سال × سطح آبگیر باران × نوع خاک‌ورزی	81.66 ***	0.11 (ns)	24.50 ***	76.74 ***	2.92 (.)
Year × Rainwater Harvesting × Crop Type سال × سطح آبگیر باران × نوع محصول	4.04 **	30.94 ***	67.54 ***	44.41 ***	4.43 **
Year × Tillage Type × Crop Type سال × نوع خاک‌ورزی × نوع محصول	13.29 ***	14.40 ***	36.85 ***	37.54 ***	40.71 ***
Rainwater Harvesting × Tillage Type × Crop Type سطح آبگیر باران × نوع خاک‌ورزی × نوع محصول	99.48 ***	27.15 ***	330.85 ***	32.04 ***	10.01 **
Year × Rainwater Harvesting × Tillage Type × Crop Type سال × سطح آبگیر باران × نوع خاک‌ورزی × نوع محصول	32.99 ***	23.14 ***	43.90 ***	17.59 ***	7.01 **

محصولات نشان‌دهنده افزایش طبیعی تراکم و ارتفاع گیاهان در طول فصل زراعی است، اما نرخ رشد پوشش در خلر و ماشک سریع‌تر بوده است. علاوه بر اثر گونه‌ها، تعامل سه‌گانه سطح آبگیر باران، نوع خاک‌ورزی و گونه زراعی در دو سال مطالعه، تأثیر قابل توجهی بر پوشش گیاهی و مهار رواناب داشت؛ به‌طوری‌که بیشترین پوشش و کاهش هدررفت خاک در ترکیب خاک‌ورزی حداقل، وجود سطح آبگیر باران و کاشت خلر یا ماشک مشاهده شد. این نتایج تأکید می‌کند که گونه‌های با پوشش سریع و بالا، به ویژه در شرایط مدیریتی مناسب، نقش مؤثرتری در کاهش شدت باران، کنترل رواناب و کاهش هدررفت خاک سطحی دارند و برای برنامه‌های مدیریت حفاظتی خاک و طراحی نظام‌های کشاورزی حفاظتی، انتخاب این گونه‌ها ارزش راهبردی دارد (جدول ٦). براین اساس ترکیب مدیریت آب (سطح آبگیر باران)، نوع خاک‌ورزی و انتخاب گونه مناسب می‌تواند به طور مؤثری درصد تاج پوشش گیاهی را افزایش داده و از هدررفت خاک جلوگیری کند. به ویژه لگوم‌ها مانند خلر و ماشک گل خوشه‌ای در شرایط بهینه پوشش سریع و مؤثری ایجاد کرده و نقش کلیدی در پایداری اکولوژیکی نظام‌های زراعی نیمه‌خشک ایفا می‌کنند.

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

جدول ٦- خلاصه مقایسه میانگین تاج‌پوشش پنج محصول زراعی در پنج مرحله بارندگی

Table 6. Summary of mean canopy cover comparison of five crops across five rainfall stages

Product محصول	Mean canopy cover (%) درصد تاج پوشش گیاهی				
	Period I دوره اول	Period II دوره دوم	Period III دوره سوم	Period IV دوره چهارم	Period V دوره پنجم
Lathyrus sativus L. خلر	13.48 / a	23.75 / a	30.63 / a	40.67 / a	55.21 / a
Vicia villosa Roth ماشک گل‌خوشه‌ای	11.80 / a	22.25 / a	29.88 / a	39.79 / a	50.29 / a
Wheat گندم	5.81 / b	14.21 / b	18.75 / b	23.54 / b	27.92 / b
Pisum sativum L. نخود علوفه‌ای	4.54 / b	8.75 / c	14.54 / c	17.08 / c	20.13 / c
Medicago sativa L. یونجه دیم	4.35 / b	8.04 / c	10.81 / c	12.67 / c	15.08 / c

Explanation of groups: Products with the *same letter* within a column are not significantly different at the five percent significance level (Duncan test, α = .(۰،۰۵

توضیح گروه‌ها: محصولات دارای حروف مشابه در یک ستون تفاوت معنی‌داری از نظر آماری در سطح پنج درصد ندارند (دانکن، $\alpha = 0.05$).

اثر ترکیبات مدیریتی بر صفات مورفولوژیک و عملکردی

بررسی نتایج حاصل از مقایسه زوجی میانگین صفات نشان داد که تقریباً تمامی صفات مورفولوژیک و عملکردی شامل طول غلاف، تعداد غلاف و دانه، وزن دانه در غلاف و عملکرد دانه در واحد سطح در سال دوم افزایش معنی‌داری نسبت به سال اول داشته‌اند ($p<0.01$) (جدول ۷). این امر مؤید آن است که شرایط زراعی سال دوم، از جمله وضعیت رطوبتی و مدیریت مزرعه، اثر قابل‌توجهی در بهبود رشد و عملکرد محصولات داشته و در کنار آن، اثرات تجمعی تناوب زراعی نیز موجب ارتقاء وضعیت فیزیولوژیک گیاهان شده است. همچنین، نتایج تحلیل واریانس حاکی از آن است که دو عامل نوع محصول و نوع خاک‌ورزی در کلیه صفات مورد بررسی تأثیر بسیار معنی‌دار ($p<0.001$) داشته و اثر سطح آبگیر باران، به ویژه در صفات مرتبط با عملکرد دانه، به صورت معنی‌دار ظاهر شده است (جدول ۸). علاوه‌بر این، تعامل سه‌عاملی «سطح آبگیر باران× نوع محصول × نوع خاک‌ورزی» نیز برای اکثر صفات معنی‌دار بود که نشان می‌دهد واکنش محصولات به شرایط مدیریتی بسیار وابسته به ترکیب تیمارها است. در مجموع، بهترین نتایج عملکرد مربوط به ترکیب «سطح آبگیر باران× شخم حداقلی» بوده و در این میان، گونه‌های خلر و ماشک گل‌خوشه‌ای بالاترین پاسخ مثبت به مداخلات مدیریتی را نشان دادند؛ در حالی‌که نخود علوفه‌ای کمترین سازگاری را با شرایط تنش‌زا از خود نشان داد. با توجه به نتایج مقایسه میانگین به روش دانکن (جدول ۷) و تحلیل عملکرد علوفه و توان مهار فرسایش (جدول ۹)، مشخص شد که نوع محصول نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد کمّی و کیفی صفات زراعی دارد؛ به‌گونه‌ای که ماشک گل‌خوشه‌ای در تمامی صفات مورد بررسی در گروه آماری a قرار گرفت و به‌عنوان برترین محصول از نظر صفات مورفولوژیک و عملکردی شناخته شد.

جدول ۷– مقایسه میانگین ویژگی‌ها و صفات زراعی محصولات در دو سال متوالی و پنج محصول مختلف

Table 7. Comparison of mean crop traits over two consecutive years and among five different crops

ویژگی محصول (Trait)	مقدار میانگین تغییرات (Mean Difference)	انحراف معیار (Std Dev)	مقدار t (t-value)	درجه آزادی (df)	سطح معنی‌داری (Significance level)	یونجه دیم (*Medicago sativa* L.)	نخود علوفه‌ای (*Pisum sativum* L.)	خلر (*Lathyrus sativus* L.)	ماشک گل‌خوشه‌ای (*Vicia villosa* Roth)	گندم (Wheat)
Pod length (cm) **طول غلاف (سانتی‌متر)**	–0.66	1.43	–3.18	47	0.003	d	c	b	a	b
Number of pods per plant **تعداد غلاف در بوته**	–0.66	1.03	–4.44	47	0.000	d	c	b	a	b
Number of seeds per pod **تعداد دانه در غلاف**	–0.90	1.48	–4.23	47	0.000	d	c	b	a	b
Number of seeds per plant **تعداد دانه در بوته**	–3.89	3.99	–6.74	47	0.000	d	c	b	a	b

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

ادامه جدول ۷– مقایسه میانگین ویژگی‌ها و صفات زراعی محصولات در دو سال متوالی و پنج محصول مختلف

Table 7. Comparison of mean crop traits over two consecutive years and among five different crops

گندم (Wheat)	ماشک گل‌خوشه‌ای (*Vicia villosa* Roth)	خلر (*Lathyrus sativus* L.)	نخود علوفه‌ای (*Pisum sativum* L.)	یونجه دیم (*Medicago sativa* L.)	سطح معنی‌داری (Significance level)	درجه آزادی (df)	مقدار t (t-value)	انحراف معیار Std (Dev)	مقدار میانگین تغییرات Mean (Difference)	ویژگی محصول (Trait)
b	a	b	c	d	0.000	47	–6.57	0.19	–0.18	Seed weight per pod (g) وزن دانه در غلاف (گرم)
b	a	a	c	d	0.000	47	–6.78	29.99	–29.38	Seed yield (g/m^{-2}) وزن دانه (گرم در مترمربع)
-	-	-	-	-	0.065	59	–1.88	47.21	–11.46	Dry forage yield (g/m^{-2}) عملکرد علوفه خشک (گرم در مترمربع)
-	-	-	-	-	0.000	59	–4.04	5.09	–2.65	Plant height (cm) ارتفاع گیاهان(سانتی‌متر)

جدول ۸ – نتایج خلاصه آنالیز واریانس برای صفات زراعی

Table 8. Summary results of ANOVA for agronomic traits

Trait ویژگی محصول	Year سال	Rainwater Harvesting, RWH سطح آبگیر	Tillage Type نوع خاک‌ورزی	Crop Type نوع محصول	Major significant interactions مهم‌ترین تعاملات معنی‌دار
Dry forage yield ($g\ m^{-2}$) عملکرد علوفه خشک (گرم در مترمربع)	NS	** (0.0016)	*** (<0.001)	*** (<0.001)	Rainwater Harvesting × Tillage Type, Rainwater Harvesting × Crop Type
Pod length (cm) طول غلاف (سانتی‌متر)	*** (<0.001)	*** (<0.001)	*** (<0.001)	*** (<0.001)	Rainwater Harvesting × Tillage Type, Rainwater Harvesting × Crop Type, Tillage Type × Crop Type, Year × Crop Type, Rainwater Harvesting × Tillage Type × Crop Type
Number of pods per plant تعداد غلاف در بوته	. (0.07)	* (0.02)	** (0.0017)	*** (<0.001)	Year × Crop Type, Rainwater Harvesting × Crop Type, Tillage Type × Crop Type
Number of seeds per pod تعداد دانه در غلاف	** (0.0029)	** (0.0016)	*** (<0.001)	*** (<0.001)	Rainwater Harvesting × Tillage Type, Year × Crop Type, Rainwater Harvesting × Crop Type, Tillage Type × Crop Type, Rainwater Harvesting × Tillage Type × Crop Type
Number of seeds per plant تعداد دانه در بوته	* (0.036)	*** (<0.001)	*** (<0.001)	*** (<0.001)	Rainwater Harvesting × Tillage Type, Year × Crop Type, Rainwater Harvesting × Crop Type, Tillage Type × Crop Type, Rainwater Harvesting × Tillage Type × Crop Type

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

ادامه جدول ۸ – Table 8.

Trait ویژگی محصول	Year سال	Rainwater Harvesting, RWH سطح آبگیر	Tillage Type نوع خاک‌ورزی	Crop Type نوع محصول	Major significant interactions مهم‌ترین تعاملات معنی‌دار
Seed weight per pod (g) وزن دانه در غلاف (گرم)	* (0.025)	NS (0.77)	*** (<0.001)	*** (<0.001)	Rainwater Harvesting × Tillage Type, Year × Crop Type, Rainwater Harvesting × Crop Type, Tillage Type × Crop Type, Rainwater Harvesting × Tillage Type × Crop Type
Seed yield (g m^{-2}) عملکرد دانه (گرم در مترمربع)	* (0.019)	*** (<0.001)	*** (<0.001)	*** (<0.001)	Rainwater Harvesting × Tillage Type, Year × Crop Type, Rainwater Harvesting × Crop Type, Tillage Type × Crop Type, Rainwater Harvesting × Tillage Type × Crop Type

جدول ۹- عملکرد علوفه خشک و توان مهار فرسایش در تیمارهای مختلف

Table 9. Dry Forage Yield and Erosion Control Capacity in Different Treatments

Erosion Control Rank رتبه توان مهار فرسایش	Dry Forage Yield Year 2 (kg/ha) وزن علوفه خشک در سال دوم (کیلوگرم بر هکتار)	Dry Forage Yield Year 1 (kg/ha) وزن علوفه خشک در سال اول (کیلوگرم بر هکتار)	Rainwater Harvesting, RWH سطح آبگیر	Tillage Type نوع خاک‌ورزی	Crop Type نوع محصول	Treatment Code نمایه تیمار
2	1685.5	1590.0	Without RWH بدون سطح آبگیر	Minimum Tillage حداقل شخم	Wheat گندم	a1b1c1
1	3909.3	3383.3	Without RWH بدون سطح آبگیر	Minimum Tillage حداقل شخم	*Vicia villosa* roth ماشک گل خوشه‌ای	a1b1c2
1	3786.1	3473.3	Without RWH بدون سطح آبگیر	Minimum Tillage حداقل شخم	*Lathyrus sativus* L. خلر	a1b1c3
4	1593.7	1633.3	Without RWH بدون سطح آبگیر	Minimum Tillage حداقل شخم	L. *Pisum sativum* نخود علوفه‌ای	a1b1c4
4	1574.0	1493.3	Without RWH بدون سطح آبگیر	Minimum Tillage حداقل شخم	*Medicago sativa* L. یونجه دیم	a1b1c5
4	2762.2	2933.3	Without RWH بدون سطح آبگیر	Conventional Tillage شخم معمولی	Wheat گندم	a1b2c1
1	3949.2	4416.6	Without RWH بدون سطح آبگیر	Conventional Tillage شخم معمولی	*Vicia villosa* roth ماشک گل خوشه‌ای	a1b2c2
1	3644.5	3210.0	Without RWH بدون سطح آبگیر	Conventional Tillage شخم معمولی	*Lathyrus sativus* L. خلر	a1b2c3

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

ادامه جدول ۹ Table 9 (continued)

Erosion Control Rank رتبه توان مهار فرسایش	Dry Forage Yield Year 2 (kg/ha) وزن علوفه خشک در سال دوم (کیلوگرم بر هکتار)	Dry Forage Yield Year 1 (kg/ha) وزن علوفه خشک در سال اول (کیلوگرم بر هکتار)	Rainwater Harvesting, RWH سطح آبگیر	Tillage Type نوع خاک‌ورزی	Crop Type نوع محصول	Treatment Code نمایه تیمار
6	1657.8	1620.0	Without RWH بدون سطح آبگیر	Conventional Tillage شخم معمولی	L. *Pisum sativum* نخود علوفه‌ای	a1b2c4
5	1729.0	1593.3	Without RWH بدون سطح آبگیر	Conventional Tillage شخم معمولی	*Medicago sativa* L. یونجه دیم	a1b2c5
3	2915.3	2650.0	With RWH با سطح آبگیر	Minimum Tillage حداقل شخم	Wheat گندم	a2b1c1
1	4960.1	4593.3	With RWH با سطح آبگیر	Minimum Tillage حداقل شخم	*Vicia villosa* roth ماشک گل خوشه‌ای	a2b1c2
1	4415.3	4066.6	With RWH با سطح آبگیر	Minimum Tillage حداقل شخم	*Lathyrus sativus* L. خلر	a2b1c3
5	1580.3	1746.6	With RWH با سطح آبگیر	Minimum Tillage حداقل شخم	L. *Pisum sativum* نخود علوفه‌ای	a2b1c4
6	1080.2	983.3	With RWH با سطح آبگیر	Minimum Tillage حداقل شخم	*Medicago sativa* L. یونجه دیم	a2b1c5
3	4699.5	4750.0	With RWH با سطح آبگیر	Conventional Tillage شخم معمولی	Wheat گندم	a2b2c1
2	7277.5	7100.0	With RWH با سطح آبگیر	Conventional Tillage شخم معمولی	*Vicia villosa* roth ماشک گل خوشه‌ای	a2b2c2
2	7511.6	7006.6	With RWH با سطح آبگیر	Conventional Tillage شخم معمولی	*Lathyrus sativus* L. خلر	a2b2c3
7	2913.5	3220.0	With RWH با سطح آبگیر	Conventional Tillage شخم معمولی	L. *Pisum sativum* نخود علوفه‌ای	a2b2c4
8	2386.6	2276.6	With RWH با سطح آبگیر	Conventional Tillage شخم معمولی	*Medicago sativa* L. یونجه دیم	a2b2c5

خلر نیز در بسیاری از صفات، بویژه عملکرد دانه، در گروه آماری a طبقه‌بندی شده و اختلاف معنی‌داری با ماشک نداشت که این امر نشان‌دهنده پتانسیل بالای این محصول در شرایط اقلیم دیم و در قالب الگوهای مدیریتی مؤثر است. در مقابل، نخود علوفه‌ای و به‌ویژه یونجه دیم در رتبه‌های آماری پایین‌تر قرار گرفته و به‌عنوان ضعیف‌ترین محصولات از نظر عملکرد و پایداری معرفی شدند.

بر اساس نتایج به دست آمده، بالاترین مقادیر علوفه خشک مربوط به تیمارهای دارای سطح آبگیر باران همراه با شخم معمولی (به‌ویژه برای ماشک گل خوشه‌ای و خلر) بوده است؛ به‌طوری‌که عملکرد ماشک در تیمار a2b2c2 و خلر در a2b2c3 به بیش از ۷/۲ و ۷/۵ تن

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

در هکتار رسید. علاوه بر افزایش عملکرد، همین تیمارها پایین‌ترین مقدار هدررفت خاک و در نتیجه بالاترین توان مهار فرسایش را نیز به خود اختصاص دادند و در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفتند. این نتایج بیانگر آن است که استفاده تلفیقی از لگوم‌های سازگار (مانند ماشک و خلر) و اعمال مدیریت مناسب آب و خاک (سطح آبگیر باران و شخم متعارف) ضمن ارتقاء عملکرد، تأثیر مثبت قابل‌توجهی بر پایداری خاک و کاهش فرسایش سطحی دارند.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تعامل پیچیده عوامل مدیریتی شامل سطح آبگیر باران، نوع خاک‌ورزی، نوع محصول زراعی و سال زراعی، نقش کلیدی در کاهش رواناب سطحی، مهار فرسایش خاک، بهبود پوشش گیاهی و افزایش عملکرد محصولات زراعی دارد.

اثرات این عوامل نه تنها به‌صورت مستقل، بلکه در تعامل چندعاملی نیز قابل توجه بوده و تأکید می‌کند که مدیریت تلفیقی می‌تواند بیشترین بهره‌وری اکولوژیکی و اقتصادی را فراهم آورد. در حوزه مدیریت رواناب، استفاده از گیاهان لگوم‌دار مانند خلر و ماشک گل خوشه‌ای به ویژه در شرایط حداقل شخم و بدون سطح آبگیر، کاهش چشم‌گیر رواناب تا حدود ۸۸ درصد را ایجاد کرد. این کاهش ناشی از ساختار گسترده ریشه‌ای، تاج‌پوشش متراکم و ویژگی‌های فیزیولوژیکی این گونه‌ها است [۲۹، ۳۰، ۵۷، ۵۹]. در مقابل، یونجه دیم و نخود علوفه‌ای به دلیل تراکم کمتر پوشش گیاهی، بیشترین رواناب را تولید کردند.

تحلیل تولید رسوب نیز نشان داد که پوشش گیاهی متراکم و اجرای خاک‌ورزی حفاظتی همراه با سطح آبگیر باران، به شکل قابل‌توجهی رسوب تولیدی را کاهش می‌دهد. گیاهانی مانند ماشک و خلر در گروه‌های آماری پایین‌تر و نخود علوفه‌ای و یونجه دیم در گروه‌های بالاتر رسوب قرار گرفتند، که با نتایج مطالعات برندس و همکاران، مرینو-مارتین و همکاران، رامیرز و همکاران و واعظی و همکاران [۳، ۳۱، ۳۹، ٥٤] هم‌راستا است. علاوه بر این، یافته‌های بلانکو-کانکوئی و همکاران، سازمان خوار و بار جهانی و سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی پایدار [٤، ۱۳، ۵۰] نشان می‌دهد که گیاهان پوششی می‌توانند رسوب خاک را به میزان قابل توجهی کاهش داده و پایداری خاک را ارتقاء دهند.

در بررسی پوشش گیاهی، بیشترین تاج‌پوشش در دوره‌های میانی فصل رشد و در تیمارهای حداقل شخم با سطح آبگیر باران مشاهده شد. همبستگی منفی و معنی‌دار بین تاج‌پوشش و رسوب تولیدی=r) (**0.562- اهمیت تثبیت‌کننده پوشش گیاهی در کاهش رواناب و فرسایش خاک را تأیید می‌کند [۱۱، ٤۳]. خلر و ماشک گل خوشه‌ای علاوه بر کاهش رواناب و رسوب، بالاترین عملکرد اقتصادی و علوفه‌ای را نیز ارائه دادند، که با یافته‌های کلمنت و همکاران و گرگار و همکاران [٦، ۱۸] مطابقت دارد. ارتباط بالای پوشش گیاهی با کاهش رواناب و رسوب ($r > 0.90$) نیز مؤید کارایی پوشش گیاهی در مهار فرسایش است [۲۰]. با در نظر گرفتن مجموع نتایج و از منظر مدیریتی، ترکیب خاک‌ورزی حفاظتی و سطح آبگیر باران، عملکرد بهینه محصولات لگوم‌دار را تقویت کرد و توانست ضمن کاهش نسبی رواناب و فرسایش، بهره‌وری خاک و آب را افزایش دهد [۲۲، ۲۷]. سال زراعی و شرایط اقلیمی نیز نقش تعدیل‌کننده بر اثر تیمارها داشت، که ضرورت طراحی الگوهای مدیریتی پویا و پایش سالانه را برجسته می‌کند.

تحلیل اقتصادی انجام گرفته در سایر پژوهش‌ها نشان می‌دهد که انتخاب گونه‌های لگوم‌دار با پوشش سریع و عملکرد بالا، علاوه بر کاهش نیاز به کود شیمیایی و تثبیت نیتروژن، درآمد کشاورزان را افزایش داده و پایداری سامانه زراعی را تقویت می‌کند [٥٦، ٦۰]. به‌طور کلی، ترکیب بهینه مدیریت شامل سطح آبگیر باران، خاک‌ورزی حداقلی و انتخاب محصولات مناسب، به ویژه لگوم‌های پوششی، مؤثرترین راهکار برای کاهش نسبی رواناب، فرسایش خاک و افزایش بهره‌وری اقتصادی و محیط‌زیست در اراضی دیم، خشک و نیمه‌خشک است. در نهایت، یافته‌ها اهمیت مدیریت تلفیقی، طراحی پویا و انتخاب گونه‌های مقاوم بومی را برای دستیابی به کشاورزی پایدار و کاهش فرسایش خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأیید می‌کند. بنابراین برای مدیریت دیمزارها پیشنهاد می‌شود:

۱. **استفاده از گیاهان لگوم‌دار بومی:** گونه‌هایی مانند خلر و ماشک گل خوشه‌ای با رشد سریع و تاج‌پوشش گسترده، به‌ویژه در اراضی فاقد زیرساخت‌های مکانیکی، باید در برنامه کشت قرار گیرند تا رواناب و فرسایش خاک کاهش یابد و تثبیت بیولوژیک نیتروژن افزایش یابد.

۲. **اجرای خاک‌ورزی حفاظتی و شخم حداقل:** ترکیب خاک‌ورزی حداقلی با سطح آبگیر باران، نفوذپذیری خاک را افزایش داده و استقرار گیاهان را تسهیل می‌کند. این اقدام به بهبود پوشش گیاهی، کاهش نسبی رواناب و افزایش عملکرد زراعی کمک می‌کند.

۳. **طراحی و استقرار سطوح آبگیر باران:** احداث آبگیرهای کوچک در اراضی دیم، به‌ویژه در شیب‌های ملایم تا متوسط، می‌تواند ظرفیت ذخیره آب سطحی را افزایش داده و به کاهش فرسایش و بهبود شرایط رشد گیاه کمک کند.

٤. **مدیریت یکپارچه منابع آب و خاک:** تلفیق انتخاب گونه‌های مناسب، خاک‌ورزی حداقلی و طراحی سازه‌های آبگیر، به‌ویژه در مراحل حساس آغاز فصل زراعی، برای کاهش نسبی رواناب و حفاظت خاک ضروری است.

۵. **آموزش و حمایت کشاورزان:** ارائه آموزش‌های عملی، ارائه تسهیلات فنی و مالی، و تشویق به استفاده از گونه‌های پوششی و خاک‌ورزی حفاظتی برای افزایش پذیرش این روش‌ها در سطح مزرعه ضروری است.

برای پژوهش‌های آینده، پیشنهاد می‌شود اثرات بلندمدت

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

سامانه‌های آبگیر باران و خاک‌ورزی حفاظتی بر عملکرد گیاه، کیفیت خاک و ذخیره کربن بررسی شود و نقش پوشش گیاهی در حفظ رطوبت خاک و کاهش رواناب در دوره‌های خشکسالی مطالعه شود. همچنین، تحلیل اقتصادی و محیط‌زیستی گونه‌های لگوم‌دار، بررسی ساختار و عمق ریشه در نفوذپذیری خاک، پایش عملکرد با فناوری‌های سنجش از دور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، و طراحی مدل‌های پیش‌بینی واکنش محصولات به تغییرات اقلیمی از دیگر اولویت‌های پژوهشی است. ارزیابی تأثیر نظام‌های مدیریتی تلفیقی بر تنوع زیستی، تحلیل موانع اجتماعی-اقتصادی پذیرش فناوری‌های حفاظتی و توسعه الگوهای مدیریتی هوشمند با هوش مصنوعی نیز برای ارتقای کشاورزی پایدار ضروری است.

سپاسگزاری

با کمال احترام، بدین‌وسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را از مسئولین و همکاران گرامی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل و پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری بخاطر حمایت‌ها و فراهم آوردن شرایط اجرای پروژه تحقیقاتی و سازمان جهاد کشاورزی به‌واسطه حمایت‌های مالی ارزشمندشان ابراز می‌دارم.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطلب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی داده‌ها

داده‌ها و نتایج به دست آمده از این پژوهش از طریق تماس و مکاتبه با نویسندگان این مقاله در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

رضا طلائی: پیشنهاد و تدوین شناسنامه پروژه تحقیقاتی و اجرای آن، داده‌برداری و تحلیل داده‌ها و نتایج، تدوین گزارش نهایی و استخراج مقاله پژوهشی، داود حسن پناه: همکاری در مراحل کاشت و داده‌برداری و تحلیل نتایج، بایرامعلی بیرامی: آماده‌سازی زمین و اندازه‌گیری رواناب و رسوب و حمید محمدی: آماده‌سازی زمین، یادداشت‌برداری، همکاری در مراحل داشت و برداشت محصول

منابع مورد استفاده

1. Aasim, M., Sahin-Dermirbag, N., Khawar, K. M., Kendir, H., and Ozcan, S. 2011. Direct axillary shoot regeneration from the mature seed explant of the hairy vetch. Archives of Biological Sciences (Belgrade), 63(3), 757–762.

2. Ahmadi, K., Abadzadeh, F., Hatami, H., Abdoshah, A., and Kazemian, A. 2019. Agricultural statistical yearbook 2017–2018: Vol. 1. Field crops. Ministry of Agriculture Jihad, Planning and Economic Affairs, Information and Communication Technology Center. 95 pages. (in Persian).

3. Berendse, F., van Ruijven, J., Jongejans, E. and Keesstrea, S.D. 2015. Loss of plant species diversity reduces soil erosion resistance. Ecosystems, 18(5), 881–888. https://doi.org/10.1007/s10021-015-9869-6

4. Blanco-Canqui, H., Shaver, T., Lindquist, J., Shapiro, C., Elmore, R., Francis, C., and Hergert, G. 2015. Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. Agronomy Journal, 107(6), 2449–2474. https://doi.org/ 10.2134/agronj15.0086

5. Cho, B., and Daimon, H. 2008. Effect of hairy vetch incorporated as green manure on growth and N uptake of sorghum crop. Plant Production Science, 11(2), 211–216.

6. Clement, T., Bielders, C. L., and Degré, A. 2024. How much do conservation cropping practices mitigate runoff and soil erosion under Western European conditions: A focus on conservation tillage, tied ridging and winter cover crops. Soil Use and Management, 40(2), 145–158. https://doi.org/10.1111/sum.13047

7. Dayegamiye, A., Nyiraneza, J., Whalen, J.K., Grenier, M., and Drapea, A. 2012. Growing soybean prior to corn increased soil nitrogen supply and N fertilizer efficiency for corn in cold and humid conditions of Eastern Canada. Sustainable Agriculture Research, 1, 257–267

8. Dutta, A., Trivedi, A., Nath, C. P., Gupta, D. S., and Hazra, K. K. 2022. A comprehensive review on grain legumes as climate-smart crops: Challenges and prospects. Environmental Challenges, 10, 100548.

9. Esfandyari Darabad, F., Yansori, M., Adhami, M. and Mostafazadeh, R. 2024. Evaluation and zoning of soil erosion potential using geomorphometric indexes and Fuzzy approach in Khiavchai watershed, Meshginshahr. Journal of Arid Regions Geographic Studies, 15(56), 45-28. doi: 10.22034/ jargs. 2023. 385049.1013. (in Persian).

10.FAO/IAEA. 2017. Use of 137Cs for soil erosion assessment. Fulajtar, E., Mabit, L., Renschler, C.S., Lee Zhi Yi, A., Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 64 pages.

11. Feng, Y., Schmid, B., Loreau, M., Forrester, D. I., Fei, S., Zhu, J., Tang, Z., Zhu, J., and Fang, J. 2022. Multispecies forest plantations outyield monocultures across a broad range of conditions. Science, 376(6595), 865–868. https:// doi.org/ 10.1126/science. abm6360.

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

12. Food and Agriculture Organization (FAO). 2013. Rainwater harvesting: a lifeline for human well-being. FAO Land and Water Bulletin 10. 69 pages.

13. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2024. The state of food and agriculture 2024: Value-driven transformation of agrifood systems. FAO. https:// doi. org/ 10. 4060 /cd2616en.

14. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2019. Climate-smart agriculture and the Sustainable Development Goals: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 124 pages.

15. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2020. Rehabilitating degraded lands and soils prone to wind erosion in the Islamic Republic of Iran. FAO. https:// openknowledge.fao.org/items/2be7c6a2-6470-4630-ac77-62591532b6c4

16. Gelete, T. B., Pasala, P., Abay, N. G., Woldemariam, G. W., Yasin, K. H., Kebede, E., and Aliyi, I. 2024. Integrated machine learning and geospatial analysis enhanced gully erosion susceptibility modeling in the Erer watershed in Eastern Ethiopia. Frontiers in Environmental Science, 12, 1410741. https://doi.org/ 10.3389/fenvs.2024.1410741

17. Gholami, H., Jalali, M., Rezaei, M., Mohamadifar, A., Song, Y., Li, Y., Wang, Y., Niu, B., Omidvar, E., and Kaskaoutis, D. G. 2024. An explainable integrated machine learning model for mapping soil erosion by wind and water in a catchment with three desiccated lakes. Aeolian Research, 66, 100924. https://doi. org/10.1016/ j.aeolia. 2024.100924

18 . Gregar, J., Petrů, J., Kalibová, J., Ürge, V., Kincl, D., and Vopravil, J. 2024. Impact of intercrops on soil loss and surface runoff from sloping maize fields. Soil and Water Research, 19(3), 168–175. https://swr.agriculturejournals.cz/pdfs/swr/2024/03/04. pdf

19. Hailu, T. A., Devkota, P., Osoko, T. O., Singh, R. K., Zak, J. C., and van Gestel, N. 2024. No-Till and Crop Rotation Are Promising Practices to Enhance Soil Health in Cotton-Producing Semiarid Regions: Insights from Citizen Science. Soil Systems, 8(4), 108. https://doi.org/10.3390/soilsystems8040108

20. Huang, W., Jiang, L., Zhou, J., Kim, H.-S., Xiao, J., and Luo, Y. 2025. Reduced erosion augments soil carbon storage under cover crops. Global Change Biology, 31, e70133. https://doi.org/ 10.1111/ gcb.70133

21. Jabessa, T., and Bekele, K. 2021. Evaluation of alfalfa (Medicago sativa) cultivars at highland and midland of Guji Zone of Oromia. Biochemistry and Molecular Biology, 6(1), 1–6. https:// doi.org/ 10. 11648/j.bmb.20210601.11

22. Kassam, A., Friedrich, T., and Derpsch, R. 2019. Global spread of Conservation Agriculture. International Journal of Environmental Studies, 76(1), 29–51. https://doi.org/10. 1080/00207233. 2018. 1494927

23.Khajavi, E., ArabKhedri, M., Mahdian, M. H., and Shadfar, S. 2015. Investigation of water erosion and soil loss values using measured data from the Cs-137 method and experimental plots in Iran. Journal of Watershed Management Research, 6(11), 137–151. http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-499-en.html. (in Persian).

24. Kocira, A., Staniak, M., Tomaszewska, M., Kornas, R., Cymerman, J., Panasiewicz, K., and Lipińska, H. 2020. Legume Cover Crops as One of the Elements of Strategic Weed Management and Soil Quality Improvement. A Review. Agriculture, 10(9), 394. 1-41. https://doi.org/10.3390/ agriculture10090394 integrityres journals.org+3MDPI+3ProQuest+3

25. Koomson, E., Muoni, T., Marohn, C., Duncan, A., Öborn, I., and Cadisch, G. 2017. Measuring and modelling soil loss and runoff mitigation potential of legume led crop rotations under varying slope lengths in a small SW Kenyan catchment. CIFOR ICRAF (Center for International Forestry Research and World Agroforestry) gender.cgiar.orgCIFOR-ICRAF

26.Krebs, C. J. 2017. Estimating density: Quadrat counts. In Ecological methodology (4th draft ed., Chapter 4). University of British Columbia. Retrieved from https://www.zoology.ubc.ca /~krebs/downloads/krebs_chapter_04_2017.pdf

27.Lal, R. 2015. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. Sustainability, 7(5), 5875–5895. https://doi. org/10. 3390/su7055875

28. Lee, M. A. 2018. A global comparison of the nutritive values of forage plants grown in contrasting environments. Journal of Plant Research, 131(4), 641–654. https://doi.org/10.1007/s10265-018-1024-y

29.Li, C., Shi, W., and Huang, M. 2023. Effects of crop rotation and topography on soil erosion and nutrient loss under natural rainfall conditions on the Chinese Loess Plateau. Land, 12(2), 265. https://doi.org/10.3390/land12020265

30. Li, J., Yan, K., Duan, Q., Li, J., and Chen, Z. 2024. Effects of tillage practices on water storage and soil conservation in red soil slope farmland in Southern China. Scientific Reports, 14, 28781. https://doi.org/10.1038/s41598-024-78872-8

31. Merino-Martín, L., Nicolau, J. M., and Espigares, T. 2012. Hydrological heterogeneity in Mediterranean reclaimed slopes:

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

Eslami, R., Rezaee, R., Bahrami, N., Afshari, F., Roohparvar, R., Ata Hoseini, S. M., Yassaie, M., Roohparvar, R., Sarkari, S., Kheirgoo, M., Moradi, M., Tabatabai, N., Kia, S., and Dalvand, M. 2021. Sadra, a new winter bread wheat cultivar with high yield potential for cold and moderate cold dryland conditions of Iran. Research Achievements for Field and Horticulture Crops, 9(2), 129–138. https://doi.org/10.22092/rafhc.2021.116722.1108. (in Persian).

42. Rostami, F. and Moridi, A. 2025. Investigating the impact of climate change on drought intensity, duration, and recurrence period in the Ardabil study area. Water and Irrigation Management, 14(4), 877-895. doi: 10.22059/jwim.2024.379156.1173. (in Persian).

43. Roy, P. D., Dey, S., Bhogapurapu, N., and Chakraborty, S. 2025. Retrieval of Surface Soil Moisture at Field Scale Using Sentinel-1 SAR Data. Sensors, 25(10), 3065. https://doi.org/10. 3390/ s25103065

44. Safarian zengir, V., Salahi, B., Maleki Meresht, R. and Kianian, M. 2020. Analysis of Standardized Precipitation Drought Indices in the Cities of Ardebil Province. Journal of Urban Ecology Researches, 11(21), 121-136. doi: 10.30473/grup.2020.7476. (in Persian).

45.Saleh, A., Vaezi, B., Khazaei, M., Peyrowan, H. R., Siedi Mourdraz, A., and Salehi, H. 2022. Investigation of the effect of cultivating forage legumes adapted to rainfed conditions on runoff and sediment yield. Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. Final research report, 82 pages. (in Persian).

46.Saleh, I., Khazaei, M., Peyrovan, H. R. and Vaezi, B. 2023. Impact of Cultivating Some Legumes Compatible with Rainfed Conditions on Runoff and Sediment Reduction, and Soil Aggregate Stability. Watershed Management Research, 36(2), 53-70. doi: 10.22092/wmrj.2022.359407.1486. (in Persian).

47. Shahini, G. R. 2014. A review of rainwater harvesting for water supply in arid regions. In Proceedings of the second national conference on desert with the approach of managing arid and desert areas (November 11, 2014, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Iran) (pp. 1–7). (in Persian).

48. Solovieva, I., Miteva-Bölter, P., Knez, M., Bessai, A.-K., Barilli, E., Kasperczyk, N., Ranic, M., Gurinović, M., Luna Casado, P. J., Alba Morales, N., Sanchez, M., Tisseyre, C., Schäer, B., and Xoplaki, E. 2025. Exploring the potential and challenges of Lathyrus sativus (Grass Pea) in European agri-food value chains: A cross-country analysis. Sustainability, 17(8), 3283. https://doi.

Runoff and sediment yield at the patch and slope scales along a gradient of overland flow. Hydrology and Earth System Sciences, 16(4), 1305–1320. https://doi.org/10.5194/hess-16-1305-2012

32. Mesfin, S., Gebresamuel, G., Haile, M., and Zenebe, A. 2023. Potentials of legumes rotation on yield and nitrogen uptake of subsequent wheat crop in northern Ethiopia. Heliyon, 9(6), e16126. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16126PMC+1

33. Molla, A., Skoufogianni, E., Lolas, A., and Skordas, K. 2022. The impact of different cultivation practices on surface runoff, soil and nutrient losses in a rotational system of legume–cereal and sunflower. Plants, 11(24), 3513. https://doi.org/10. 3390/ plants 11243513

34. Momeni Damaneh, J., Safdari, A. A., Azarnejad, N., Ghorbani, M., Panahi, F., Afzali, S. F., and Loppi, S. 2025. Modeling soil erosion susceptibility using machine learning techniques: Rud-e-Faryab Basin, Iran. Land Degradation and Development. 1-14. Advance online publication. https://doi.org/10.1002/ldr.70077

35. Montgomery, D. C. 2017. Design and Analysis of Experiments (9th ed.). Wiley. 749 pages.

36.Muoni, T., Koomson, E., Watson, C. A., Bergkvist, G., Barnes, A. P., Duncan, A., and Öborn, I. 2018. Effect of legume-crop mixtures on runoff and soil loss in Africa. Aspects of Applied Biology, 138, 43–47.

37. Nave, R. L. G. 2025. Sustainable Forage Production in Crop–Livestock Systems. Agronomy, 15(3), 657. https:// doi.org/ 10.3390/ agronomy15030657

38. Noori, Z. and Zare Chahouki, M. A. 2018. Optimal Use of Rainwater Harvesting: A Strategy to Deal with Water Shortages in Arid and Semi-Arid Regions. Journal of Water and Sustainable Development, 5(1), 115-122. doi: 10.22067/jwsd.v5i1.62964. (in Persian).

39. Ramírez, P. B., Calderón, F., Singh, S., and Machado, S. 2025. Legume-based rotation enhance long-term soil carbon storage in eastern Oregon dryland wheat systems. Scientific Reports, 15(1), 13842. https://doi.org/10.1038/s41598-025-98916-x

40.Ray, S., Maitra, S., Sairam, M., Lalichetti, S., Divya, B., and Gitari, H. 2025. The nexus between intercropping systems, ecosystem services and sustainable agriculture: A review. Research on Crops, 26, Article 1166. https://doi.org/10.31830/2348-7542. 2025.ROC-1166

41. Roostaei, M., Zadhasan, E., Jafarzadeh, J., Hassanpour Hosni, M., Sadeghzadeh, B., Mahfoozi, S., Soleimani, K., Abedi Asl, G. R., Rohi, E., Ahmadi, H., Pashapour, H., Haghparast, R., Aghaee Sarbarzeh, M., Ahmadi, M. M., Rajabi, R., Babaei, T.,

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]

org/10. 3390/ su 17083283.

49.Stevović, Vladeta and Đurović, Dragan and Tomić, Dalibor. 2020. Forage legumes in agricultural production systems. ОДРЖИВИ РАЗВОЈ И УПРАВЉАЊЕ ПРИРОДНИМ РЕСУРСИМА РЕПУБЛИКЕ СРПСКЕ (Sustainable Development and Management of Natural Resources of the Republic of Srpska). 1. 10.7251/EORU2001313S.

50. Sustainable Agriculture Research and Education (SARE). 2024. Cover crops at work: Covering the soil to prevent erosion. Retrieved from SARE website

51. Tulu, D., Gadissa, S., Hundessa, F., and Kebede, E. 2023. Contribution of climate-smart forage and fodder production for sustainable livestock production and environment: Lessons and challenges from Ethiopia. Advances in Agriculture, 2023, Article 8067776, 11 pages. https://doi.org/10.1155/2023/8067776

52. Tzemi, D., J. Rämö, T. Palosuo, P. Peltonen-Sainio, H. Wejberg and H. Lehtonen. 2024. The introduction of legume-based crop rotations: an impact assessment on cereal cropping farms in Finland. International Journal of Agricultural Sustainability, 22(1): 1-17. https://doi.org/ 10.1080/ 14735903.2024.2335085

53.U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, and U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 1999. Sampling vegetation attributes. Technical Reference 1734-4. National Applied Resource Sciences Center. Retrieved from https://www.nrcs.usda .gov/sites/default/files/2022-09/stelprdb1044175.pdf

54. Vaezi, A. R., Bagheri, M., and Afsahi, K. 2018. Effects of tillage direction and plant density on soil and water loss in a rainfed land of a semi-arid region. Journal of Water and Soil Science, 22(3), 29–40. (in Persian).

55. Vinarao, G. B., Ghimire, K., and Harris, D. K. 2024. Pilot Evaluation of Field Pea Accessions Under Water Deficit Conditions. International Journal of Plant Biology, 15(4), 1162–1175. https:// doi. org/10.3390/ijpb15040080

56. Visscher, A. M., Wellstein, C., Vanek, S., Bricca, A., Meza, K., Huaraca, J., Ccanto, R., Olivera, E., Loayza, J., Vigil, L., Palomino, S., Scurrah, M., and Fonte, S. J. 2023. Drivers of growth and establishment of the invasive plant Rumex acetosella within Andean fallow systems. Agriculture, Ecosystems and Environment, 351, 1-10. 108446. https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108446

57. Wang, L., Dalabay, N., Lu, P., and Wu, F. 2017. Effects of tillage practices and slope on runoff and erosion of soil from the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall. Soil and Tillage Research, 166, 147–156. https://doi.org/10.1016/ j.still. 2016.09.007

58. Wang, S., Guo, S., Zhai, L., Hua, L., Khoshnevisan, B., Wang, H., and Liu, H. 2022. Comprehensive effects of integrated management on reducing nitrogen and phosphorus loss under legume–rice rotations. Journal of Cleaner Production, 361, 132031. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132031

59. Wei, S., Zhang, K., Liu, C., Cen, Y., and Xia, J. 2024. Effects of different vegetation components on soil erosion and response to rainfall intensity under simulated rainfall. Catena, 235, 107652. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107652

60. Zhao, Q., Wang, P., Smith, G. R., Hu, L., Liu, X., Tao, T., Ma, M., Averill, C., Freschet, G. T., Crowther, T. W., and Hu, S. 2024. Nitrogen redistribution and seasonal trait fluctuation facilitate plant N conservation and ecosystem N retention. Journal of Ecology, 112 (3), 501–513. https://doi.org/10.1111/1365-2745.14246

[DOI: https://doi.org/10.22034/19.69.3]