



A Review of Bioengineering of Rill and Gully Erosion Based on the Suitable Plant Species Selection

Mohsen Hosseinalizadeh¹ | Ali Radkani² | Ghadir gholi Kochaknejad³ | Farkhondeh Aghajan Liafu⁴ | Hassan Yeganeh⁵

1. Corresponding Author, Department of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: mhalizadeh@gau.ac.ir
2. Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: radkaniali@gmail.com
3. Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: kochaknejad@gmail.com
4. Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: farkhondeaghajan@gmail.com
5. Department of Rangeland Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: yeganeh@gau.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type: Review Article

Article history:

Received: Oct. 18, 2025

Revised: Feb. 2, 2025

Accepted: Jan. 10, 2026

Published online: March. 2026

Keywords:

Bioengineering,
Biological Restoration,
Land Degradation,
Soil Erosion.

Soil, as one of the most vital components of natural resources, plays a critical role in human life. Among various land degradation processes, soil erosion is considered the most significant threat and is recognized as a dynamic mechanism that must be addressed with a broader and more forward-thinking perspective. Any intervention lacking technical and environmentally sustainable principles may result in irreversible or costly consequences. This study aims to provide a model for selecting appropriate plant species to reduce and biologically manage rill and gully erosion in line with sustainable development and the protection of soil and water resources. Following a comprehensive review of erosion sources in multiple studies, the impact of specific plant species—based on canopy characteristics, stems, roots, adaptability, and reproduction—on rill and gully erosion was evaluated. The plant species recommended in the reviewed studies were preferably perennial, with rigid stems, dense upper canopy cover, and deep root systems. These species should tolerate both dry and moist soil conditions and have the capacity to regenerate even after being buried by sediments. In addition to highlighting the high potential and widespread applicability of plant species in controlling gully erosion and the need for greater attention to bioengineering in gully rehabilitation, this study also suggests several suitable species, including Reed (*Phragmites australis*), Vetiver (*Vetiveria zizanioides*), Bermuda grass (*Cynodon dactylon*), Tamarix ramosissima Ledeb, *Lycium depressum* Stocks and *Prosopis koelziana* Burkil. These species may serve as effective models for management and implementation decisions in restoration and bio-management of erosion at the national level.

(Tamarix ramosissima Ledeb) کهور دره‌ای، (Prosopis koelziana Burkil) دیوخر، (Lycium depressum Stocks)

Cite this article: Hosseinalizadeh, M., Radkani, A., Kochaknejad, Gh. Gh., Aghajan Liafu, F. & Yeganeh, H. (2026). A Review of Bioengineering of Rill and Gully Erosion Based on the Suitable Plant Species Selection, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (1), 249-281. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404090.670034>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404090.670034>





EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Soil erosion is widely recognized as one of the most critical environmental issues threatening the sustainability of agricultural systems and natural landscapes. Among different erosion types, gully and rill erosion represent advanced and severe forms that lead to significant soil degradation, loss of arable land, sedimentation in downstream ecosystems, and damage to infrastructure. These types of erosion are particularly destructive in arid and semi-arid regions, where soil cohesion is low and rainfall is sporadic but intense. In this context, vegetation-based approaches have emerged as promising alternatives to conventional mechanical control methods. This review aims to conceptually synthesize existing knowledge on biological management of gully and rill erosion, with a special focus on identifying plant traits and species that can effectively mitigate these forms of erosion under diverse ecological and environmental conditions.

Method

This research employed a structured literature review method to evaluate and consolidate findings from peer-reviewed scientific articles, technical reports, and field-based studies both within Iran and internationally. The search focused on studies that explored the underlying processes of gully and rill erosion, plant-soil interactions, and the ecological roles of plant morphological traits in erosion control. Studies were selected from academic databases such as Scopus, ScienceDirect, and Google Scholar. Key selection criteria included relevance to semi-arid environments, explicit mention of plant characteristics, and quantitative or qualitative assessment of erosion mitigation. The reviewed literature was analyzed to identify consistent patterns and practical insights that could inform future vegetation-based erosion management.

Results

The findings reveal that certain plant traits are strongly associated with enhanced erosion control. These include deep and fibrous root systems that improve soil cohesion, strong and flexible stems that dissipate runoff energy, and dense canopy cover that reduces the impact of raindrops and surface flow velocity. Species such as *Medicago sativa*, *Artemisia* spp., *Stipa* spp., *Agropyron elongatum*, and *Festuca arundinacea* were identified as particularly effective in stabilizing slopes and gully edges. Furthermore, the reviewed studies emphasize the importance of selecting native or regionally adapted species that can survive local climatic stresses such as drought and nutrient-poor soils. In many cases, plant-based approaches demonstrated cost-effectiveness, ecological resilience, and long-term sustainability compared to structural methods like check dams and terracing.

Conclusions

Vegetative solutions for erosion control represent a viable and sustainable alternative to mechanical interventions. Strategic use of suitable plant species can significantly reduce soil detachment, increase infiltration, stabilize landforms, and contribute to biodiversity. To maximize success, plant selection must be tailored to site-specific conditions, and integrated with broader watershed management and land-use planning efforts. The review concludes that biological approaches should be prioritized and supported by national soil conservation policies, local capacity-building programs, and community involvement for effective implementation.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization, literature search, and drafting of the manuscript. The corresponding author led the coordination, integration of content, and final editing process.

Data Availability Statement

This article is a literature review. No original datasets were generated or analyzed. All referenced studies and data sources are publicly available and cited in the reference list.

Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to the Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources for providing access to academic databases and supporting this research endeavor. Special thanks are extended to field practitioners and researchers whose insights have enriched this review.

Ethical considerations

This review article did not involve any human participants or animal experiments. All sources were properly acknowledged, and ethical guidelines for citation and academic integrity were fully observed throughout the research and writing process.

مروری بر مدیریت زیستی فرسایش شیباری و آبکندی با تاکید بر انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب

۱. محسن حسینعلی زاده^۱ | علی رادکانی^۲ | قادیرقلی کوچک‌نژاد^۳ | فرخنده آقاجان لیاو^۴ | حسن یگانه^۵
۱. نویسنده مسئول، گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: mhalizadeh@gau.ac.ir
۲. گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: radkaniali@gmail.com
۳. گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: kochaknejad@gmail.com
۴. گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: farkhondeaghajan@gmail.com
۵. دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: yeganeh@gau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

خاک به‌عنوان یکی از مهمترین ارکان منابع طبیعی، نقش بسیار عمده‌ای در زندگی انسان دارد. در میان فرآیندهای مختلف تخریب سرزمین، فرسایش خاک بزرگترین تهدید به حساب آمده و به‌عنوان سازوکاری پویا به‌شمار آمده که بایستی با تغییر دیدگاه و فراتر از گذشته به کاهش و مدیریت به‌هنگام آن پرداخته شود. چرا که هرگونه اقدامی بدون توجه به اصول فنی و پایدار محیط زیستی، تأثیرات جبران‌ناپذیر و یا پرهزینه‌ای را رقم می‌زند. پژوهش حاضر به ارائه الگو برای انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب به‌منظور کاهش و مدیریت زیستی فرسایش شیباری و آبکندی خاک در راستای توسعه پایدار و حفاظت از آب و خاک می‌پردازد. بعد از مرور منابع فرسایش در پژوهش‌های متعدد، تأثیر برخی از گونه‌های گیاهی از لحاظ ویژگی‌های تاج پوشش، ساقه، ریشه و شرایط سازگاری و تکثیر در فرسایش شیباری و آبکندی مورد بررسی قرار گرفت. گیاهان پیشنهادی در پژوهش‌های مروری عموماً چندساله و با ساقه‌های سخت بودند که جوامع گیاهی با پوشش متراکم فوقانی و ریشه متراکم و عمیق را دارا بوده، تحمل شرایط خشک و مرطوب خاک را داشته و در صورت مدفون شدن توسط رسوبات، توان رشد و نموی مجدد را داشته باشند. در این پژوهش علاوه بر پتانسیل و گستردگی بالای گونه‌های گیاهی در کنترل فرسایش آبکندی و نیازمندی توجه بیشتر به مهندسی زیستی در احیا و کنترل آبکندها، برخی گونه‌های مناسب مانند نی (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud)، وتیور (*Chrysopogon zizanioides* L.)، پنجه‌مرغی (*Cynodon dactylon* (L.) Pers)، گز پرشاخه (*Tamarix ramosissima* Ledeb)، کهور دره‌ای (*Prosopis koelziana* Burkil)، دیوخار (*Lycium depressum* Stocks) پیشنهاد شده است که می‌تواند الگوی مناسبی برای اتخاذ تصمیمات مدیریتی و اجرایی پروژه‌های مرتبط با احیای پوشش گیاهی و مدیریت زیستی فرسایش در سطح ملی باشد.

نوع مقاله: مقاله مروری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۳

تاریخ انتشار: فروردین ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

احیای زیستی،

تخریب سرزمین،

فرسایش خاک،

مهندسی زیستی

استناد: حسینعلی زاده، محسن؛ رادکانی، علی؛ کوچک‌نژاد، قادیرقلی؛ آقاجان، فرخنده؛ و یگانه، حسن. (۱۴۰۵). مروری بر مدیریت زیستی فرسایش شیباری و آبکندی با تاکید بر انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۱)، ۲۴۹-۲۸۱.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404090.670034>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404090.670034>

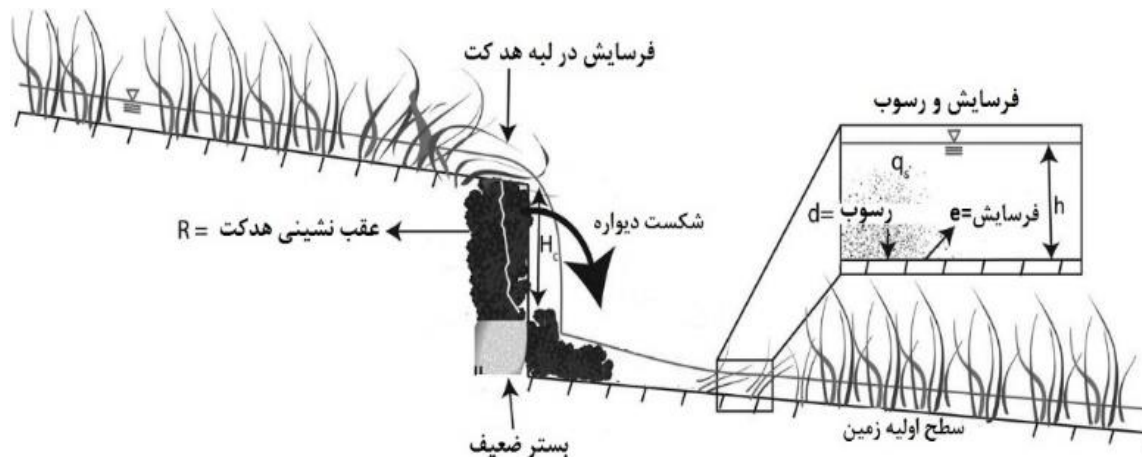
مقدمه

فرسایش خاک مهم‌ترین عامل تخریب سرزمین در سطح جهان شناخته شده است (Duan et al., 2020) که بوم‌سازگان‌ها، سلامت خاک‌های کشاورزی و امنیت زیستگاه حیات وحش را تهدید می‌کند (Kang et al., 2021). فرسایش شدید خاک در ایران، با هدررفت سالانه حدود ۲/۷ میلیارد تن خاک حاصلخیز و سرعتی معادل سه برابر بیشتر از اروپا و آسیا، تهدیدی جدی برای توسعه اقتصادی، اجتماعی و امنیت غذایی کشور محسوب می‌شود (چوبین و همکاران، ۱۴۰۳). در بررسی عوامل مؤثر در فرسایش خاک اساساً نمی‌توان عامل یا عوامل معینی را به عنوان عامل اصلی فرسایش خاک در یک منطقه معرفی نمود، بلکه فرسایش در یک منطقه را بایستی معلول تأثیر متقابل مجموعه عوامل و عناصر مؤثر در ایجاد فرسایش قلمداد کرد (Panagos et al., 2015; Mekuria et al., 2024). بنابراین فرایند فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز، دارای عملکردی پویا است که تحت تأثیر عوامل تأثیرگذار و تأثیرپذیر متعددی است (Cao et al., 2009). فرسایش آبی، به ویژه رخساره‌های فرسایش شیاری و آبکندی آن، نقش مهمی در تخریب سرزمین و خاک ایفا می‌کند (Bennett & Wells, 2019). در این میان، فرسایش آبکندی به مراتب شدیدتر بوده (Nosko et al., 2019) و می‌تواند به تغییرات گسترده‌ای در چشم‌انداز زمین منجر شود (Choubin et al., 2018). با افزایش شدت بارندگی، فرسایش سطحی به فرسایش شیاری تبدیل می‌شود. ادغام این شیارها و بزرگ‌شدن آن‌ها به مرور زمان باعث تشکیل آبکندها می‌شود (Nosko et al., 2019). فرسایش شیاری اگرچه در سطح وسیع‌تری گسترش می‌یابد، اما تغییرات ریخت‌شناختی نسبتاً تدریجی‌تری را در پی دارد. در مقابل، فرسایش آبکندی، با وجود محدود بودن به بخش‌های خاصی از زمین، قادر است حجم قابل توجهی از خاک را جابجا کند (Zhao et al., 2016). تغییرات پوشش گیاهی به طور قابل توجهی فرسایش خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌عنوان مثال تبدیل زمین‌های کشاورزی به زمین‌های بایر، باعث افزایش فرسایش خاک و توسعه جنگل‌ها، باعث کاهش فرسایش خاک می‌شود (Guo et al., 2024; Li et al., 2014; Saravanan et al., 2021). یکی از راه‌های مناسب و موثر برای کاهش فرسایش، افزایش پوشش گیاهی است. به‌نحوی که احیای پوشش گیاهی برای مهار فرسایش خاک، روشی کارآمد و کم‌هزینه در بسیاری از مناطق به‌شمار می‌آید. تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است، اما روش‌های موجود معمولاً بر ارزیابی کیفی اندام‌های هوایی گیاهان متمرکزند و نقش اندام‌های زیرزمینی، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. لذا هدف نوشتار حاضر نیز، ارائه الگویی مناسب با در نظر گرفتن اندام‌های هوایی و زیرزمینی برای انتخاب گونه‌های گیاهی مربوطه به منظور کاهش و کنترل فرسایش شیاری و آبکندی می‌باشد تا گامی کوچک در راستای اتخاذ تصمیمات مدیریتی و اجرایی در سطح کشور به منظور توسعه پایدار و حفاظت آب و خاک با تأکید بر مهندسی زیستی در راستای احترام به طبیعت برداشته شود.

مکانیسم فرسایش آبکندی

فرسایش آبکندی، چشم‌گیرترین نوع فرسایش به عنوان یکی از مشکلات عمده محیط‌زیستی شناخته شده است (Abdulfatai et al., 2014; Choubin et al., 2025). با توجه به نقش قابل توجه فرسایش آبکندی در تولید رسوب و تخریب خاک، بررسی و مطالعه این نوع فرسایش آبی از اهمیت بالایی برخوردار است (واعظی و بخشی راد، ۱۳۹۹). آبکندها با افزایش سرعت زهکشی، فرآیند تخلیه آب و خشک شدن زمین را تشدید کرده و یکی از معمول‌ترین و حادترین شکل‌های فرسایش خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌آیند (داودی راد و محمدی، ۱۴۰۱). تأثیر نظام‌های کشت و آبیاری نامناسب، چرای بی‌رویه، افزایش شهرنشینی، جاده‌سازی و تغییر کاربری زمین بر فرسایش آبکندی بیشتر از تأثیرات تغییرات آب‌وهوایی است. بسیاری از روش‌های حفاظتی از جمله افزایش پوشش گیاهی، خاک‌ورزی، قرق و تراس‌بندی باعث کنترل فرسایش آبکندی می‌شود (Dabney & Gumiere, 2020). اما این روش‌ها به‌ندرت توسط کشاورزان در بلندمدت در یک مقیاس بزرگ استفاده می‌شود (Valentin et al., 2005). شواهد حاکی از آن است که در عرصه‌های مستعد گسترش آبکندی، تخریب پوشش گیاهی مراتع، تغییر کاربری زمین به زراعت دیم و به‌کارگیری روش‌های نامناسب کشاورزی از قبیل خاک‌ورزی در امتداد شیب، به وفور مشاهده می‌شود (واعظی و بخشی راد، ۱۳۹۹). آبکندها، کانال‌های برش خطی با دست کم ۰/۳ متر عرض و ۰/۳ متر عمق هستند که اصولاً به وسیله رواناب متمرکز در پایین‌دست زمین‌های کشاورزی تشکیل می‌شوند. این نوع فرسایش عموماً از سمت پیشانی (سر) به سمت بالادست پیشروی کرده (شکل ۱) و باعث تولید رسوب بسیار زیادی در پایین‌دست می‌شود (Rengers & Tucker, 2014). این نوع فرسایش از دیدگاه‌های مختلف طبقه‌بندی می‌شود. به‌عنوان مثال از دیدگاه تغییرات زمانی، دو نوع آبکندی، اعم از موقت و دائمی وجود دارد. اصطلاح فرسایش آبکندی موقتی اولین بار در سال 1980 برای پر کردن شکاف بین فرسایش شیاری و فرسایش آبکندی دائمی (کلاسیک) مطرح شد. بر اساس (Nachtergaele et al., 2001) آبکندهای موقتی، کانال‌های کوچک فرسایش‌یافته توسط جریان‌های متمرکز هستند که به‌سادگی با کشت و زرع رایج پر می‌شوند و فقط در همان مکان با وقایع رواناب

سطحی دوباره شکل می‌گیرند. آبکندهای موقتی پس از حذف (در صورتی که کنترل نشوند) تمایل به بازسازی در نقاط مشابه عرصه دارند. تنش برشی آب جاری و تنش برشی بحرانی خاک، دو عامل مهم تأثیرگذار بر روی فرسایش آبکندهی به‌شمار می‌آیند (Blanco & Lal, 2008).



شکل ۱. مدل مفهومی توسعه و پیشروی فرسایش آبکندهی (Rengers & Tucker, 2014)

در پدیده فرسایش، تنش برشی بحرانی خاک تابعی از بافت خاک، جرم مخصوص، میزان رس، نسبت پراکندگی، خاک‌ورزی، ریشه گیاه، پوشش بقایای گیاهی و شیب خاک به حساب می‌آید (Blanco & Lal, 2008). فرسایش آبکندهی به دلیل هم‌جواری با شبکه آبراهه و نقش کلیدی در تولید رسوب، از مهم‌ترین انواع فرسایش محسوب شده و در اقلیم‌های متعدد (بارندگی ۱۰۰ الی ۱۲۰۰ میلی‌متر)، توپوگرافی متنوع (شیب ۲ الی ۲۷ درصد) و مناطق مختلف کشاورزی- خاکشناسی^۱ ایران قابل‌رؤیت است (Hosseinalizadeh et al., 2019). شیوه‌های مهندسی زیستی امکان بهبود مناطق آبکندهی را فراهم می‌کنند و همچنین از آنجایی که باعث کاهش رواناب و افزایش نفوذ می‌شود، می‌توانند به‌عنوان تله رسوب‌گیر عمل کنند (Rey et al., 2005). انسان‌ها با فعالیت‌های نامناسبی مانند تسطیح زمین، کشاورزی صنعتی و یا عدم مراقبت از تراس‌های کشاورزی باعث افزایش خطر تشکیل و توسعه آبکنده می‌شوند (Hooke, 2006). (Díaz et al., 2019) با بررسی روش‌های موجود در WOCAT^۲ نشان دادند که اجرای ترکیبی سازه‌های مکانیکی و پوشش گیاهی، به‌ویژه در سطح حوزه آبخیز، در بلندمدت هم از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است و هم خدمات بوم‌سازگان را بهبود می‌بخشد. با این وجود، به دلیل هزینه‌های اولیه و موانع اجرایی، حمایت مستمر نهادهای دولتی از کشاورزان برای پیاده‌سازی و نگهداری این روش‌ها، امری ضروری است (Díaz et al., 2019).

(Lou et al., 2023) در پژوهشی در فلات‌های لسی چین، اثر پوشش گیاهی بر فرسایش سر آبکنده را بررسی کردند. در این آزمایش، گیاهان *Bothriochloa ischaemum* (BI)، *Agropyron cristatum* (AC) و *Medicago sativa* (MS) (دارای ساقه‌های درهم تنیده) و *Artemisia gmelinii* (AG) (دارای ساقه‌های ایستاده) کاشته شدند. نتایج نشان داد که پوشش گیاهی، فرسایش سر آبکنده را بین ۳۱ تا ۸۱ درصد کاهش می‌دهد و *Medicago sativa* بیشترین کارایی را در این زمینه دارد (Lou et al., 2023).

(Zeng et al., 2024) در مطالعه‌ای به بررسی اثر جوامع گیاهی مختلف بر مقاومت سیستم‌های آبکندهی در برابر فرسایش خاک در فلات لسی پرداخته و جوامع گیاهی غالب (علفزار، بوته‌زار و جنگل) را انتخاب کرده و آزمایش فرسایش هیدرولیکی خاک را بررسی کردند. نتایج نشان داد جوامع علفی و بوته‌ای، ظرفیت جداسدگی و فرسایش‌پذیری خاک را در مقایسه با جنگل به طور معنی‌داری کاهش می‌دهند (به ترتیب تا ۱۵٪ و ۳۷٪ برابر کاهش در ظرفیت جداسدگی و ۲۹٫۸٪ تا ۸۵٫۶٪ کاهش در فرسایش‌پذیری شیاری). چسبندگی خاک، پایداری خاکدانه‌ها و تراکم ریشه به‌عنوان عوامل کلیدی در کاهش فرسایش شناسایی شدند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که انتخاب

^۱ Agro-pedologic

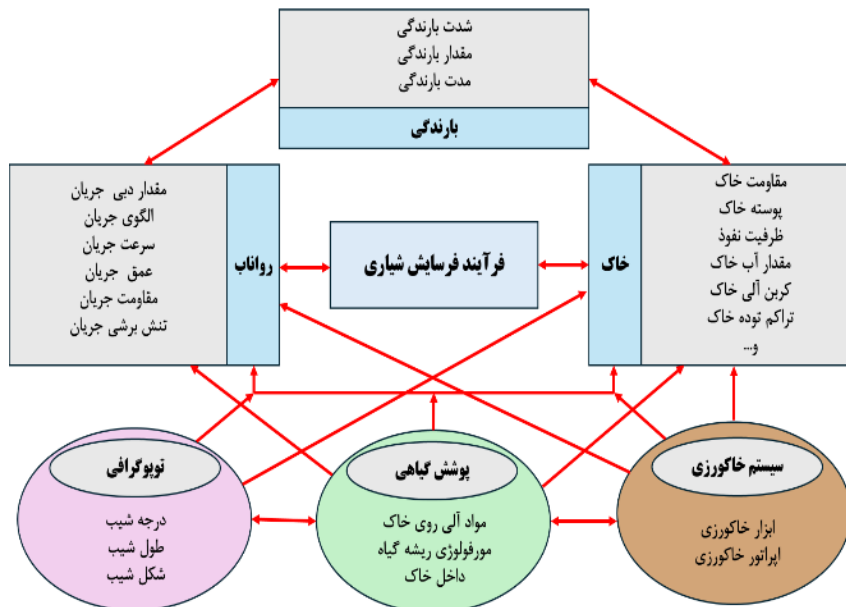
^۲ World Overview of Conservation Approaches and Technologies

نوع پوشش گیاهی می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مؤثر در مدیریت و حفاظت خاک مورد توجه قرار گیرد (Zeng et al., 2024). (Lou et al., 2025) در بررسی تأثیر پوشش گیاهی بر رواناب و انواع فرسایش در فلات لسی نشان دادند، پوشش گیاهی نقش مهمی در کنترل فرسایش آبکندی ایفا می‌کند. پوشش گیاهی با کاهش سرعت رواناب در نواحی مختلف آبکند (بالادست، دیواره‌ها و بستر)، سرعت جریان و در نتیجه تنش برشی را تعدیل می‌کند. همچنین، باعث افزایش ضریب اصطکاک و زبری مانینگ در بالادست آبکند شده، ولی تأثیر آن بر بستر آبکند، کمتر است. مهمتر از همه، پوشش گیاهی به‌طور قابل توجهی طول عقب‌نشینی سر آبکند را کاهش داده و میزان فرسایش خاک را ۹۵-۳۱ درصد کاهش می‌دهد. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که پوشش گیاهی مستقیماً بر خصوصیات خاک، پارامترهای هیدرودینامیکی و شکل‌گیری سر آبکند اثر گذاشته و نرخ فرسایش خاک و عقب‌نشینی آبکند را کنترل می‌کند (Lou et al., 2025).

(Gemechu., 2025) در مطالعه‌ی مروری در مورد وضعیت فرسایش آبکندی در اتیوپی نشان دادند که این پدیده به سرعت در حال گسترش بوده و عامل تلفات حجم زیادی از خاک است که کشاورزی و اقتصاد منطقه را با چالش مواجه کرده است. در این بررسی که با جستجو در منابع علمی معتبر صورت گرفت، مشخص شده که عواملی چون گسترش کشاورزی، افزایش جمعیت، کاربری نامناسب زمین و چرای بیش از حد، در تشدید فرسایش آبکندی نقش دارند، اما تأثیر پوشش گیاهی به‌عنوان یک عامل کلیدی و تعیین‌کننده برجسته شده است؛ به‌طوری‌که کاهش پوشش گیاهی و تغییر کاربری زمین، مقاومت خاک را در برابر فرسایش کاهش داده و به ایجاد و گسترش آبکندها منجر می‌شود. در مقابل، راهکارهایی مانند احیای پوشش گیاهی و انحراف جریان آب از سر آبکند، به‌عنوان روش‌های مؤثر برای کنترل و کاهش این نوع فرسایش معرفی شده‌اند، که نشان‌دهنده نقش حیاتی گیاهان در تثبیت خاک و جلوگیری از فرسایش آبکندی است (Gemechu, 2025).

مکانیسم فرسایش شیاری

فرسایش شیاری که در نتیجه تمرکز رواناب در روی دامنه به وجود می‌آید، یکی از انواع فرسایش‌های آبی است. این نوع فرسایش، به‌عنوان مرحله آغازین فرسایش‌های متمرکز در مراتع محسوب می‌شود (حسینی و همکاران ۱۳۹۱). فرسایش شیاری علاوه بر هدر رفت خاک، بر کاهش حاصلخیزی خاک تأثیرگذار بوده، همچنین موجب رسوبگذاری در مخازن سدها و کاهش کیفیت آب می‌شود. در مناطقی که فرسایش شیاری اتفاق افتاده است، شدت فرسایش در واحد سطح، سه برابر می‌شود (واعظی و ورقائی، ۱۴۰۲). این فرسایش که یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب خاک محسوب می‌شود، تحت تأثیر عواملی چون خواص فیزیکوشیمیایی خاک، شیب زمین، پوشش گیاهی و شدت بارندگی قرار داشته (De Baets et al., 2009)؛ همچنین، ناشی از جریان سطحی، با تخریب خاک و آلودگی محیط زیست مرتبط بوده و به‌عنوان عامل مهمی در هدررفت خاک در سطح جهانی شناخته می‌شود (Chao et al., 2016; He et al., 2023; Li et al., 2008; Ou et al., 2021; Qian et al., 2024; Tian et al., 2022). علائم فرسایش شیاری عمدتاً در تپه‌ها و زمین‌های شیبدار ظاهر می‌شود و به‌صورت مجموعه‌ای از کانال‌هایی به عمق ۰/۸ تا ۱۰ سانتی‌متر است که موازی با جهت شیب دامنه حرکت می‌کنند. البته ممکن است در برخی نقاط همگرا شوند. رواناب ایجاد شده پس از متمرکز شدن، این کانال‌ها را تشکیل می‌دهد و سپس به پایین‌دست دامنه جاری می‌شود. فرسایش شیاری تابعی از فرسایش‌پذیری خاک، ظرفیت حمل رواناب و برش هیدرولیکی جریان آب است (Blanco & Lal, 2008). شیارها معمولاً به شکل کانال‌های باریک و کم‌عمق با شیب تند تعریف می‌شوند که عرض و عمق آن‌ها بین ۲ تا ۲۰ سانتی‌متر است (دودکانلوی میلان، ۱۴۰۴). بسیاری از عوامل، از جمله بارندگی، رواناب، خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و سیستم خاک‌ورزی، تأثیرات زیادی بر توسعه فرسایش شیاری دارد. نتایج برخی از تحقیقات نشان می‌دهد که فرسایش شیاری به‌طور مستقیم با اقدامات ترکیبی رواناب و خاک مدیریت می‌شود. عوامل دیگر ممکن است از طریق افزایش یا کاهش اثرات عوامل مستقیم، تأثیر غیرمستقیمی بر فرسایش شیاری داشته باشند (Li et al., 2011; Wirtz et al., 2012). روابط علی- معلولی فرسایش شیاری در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲. روابط علی- معلولی فرسایش شیاری (Sun et al., 2013)

(De Baets et al., 2009) یک روش‌شناسی برای انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب برای کنترل فرسایش شیاری و آب‌کندی در اسپانیا ارائه دادند. آن‌ها ۲۵ گونه گیاهی مناسب منطقه مدیترانه‌ای را بر اساس تجزیه و تحلیل چند معیاره با استفاده از پنج شاخص شامل چسبندگی ریشه، سختی گیاه، تراکم ساقه، پتانسیل کاهش فرسایش در طول جریان متمرکز و پتانسیل انسداد رسوبات و بقایای آلی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که *Stipa tenacissima* می‌تواند در تراس‌ها به کار رود، زیرا با خشکسالی سازگار است و حفاظت خوبی در برابر فرسایش ناشی از جریان متمرکز (عامل ایجاد آب‌کندی) و حرکات توده‌ای کم‌عمق ارائه می‌دهد. *Lygeum spartum* نیز می‌تواند برای بهبود پوشش گیاهی مناطق با جریان متمرکز یا جلوگیری از ورود رسوبات به کانال‌ها در خروجی آب‌کند استفاده شود. همچنین، *Stipa tenacissima* و *Salsola genistoide* برای تثبیت دامنه‌های پر شیب رو به جنوب مناسب هستند (De Baets et al., 2009).

(Afenzar et al., 2025) در مراکش، نشان دادند که یک بارندگی شدید ۳۲ ساعته با شدت ۷ میلی‌متر بر ساعت، منجر به اتلاف میانگین ۹/۶۴ تن در هکتار خاک از طریق فرسایش شیاری شد. این یافته‌ها حاکی از نقش تعیین‌کننده نوع خاک در شدت فرسایش و لزوم تحقیقات بیشتر در زمینه مدیریت آن با در نظر گرفتن محدودیت تعمیم‌پذیری نتایج به شرایط اقلیمی متفاوت و عدم لحاظ شدن عواملی مانند تراکم خاک و فعالیت‌های انسانی است؛ با این حال، اهمیت پوشش گیاهی در کاهش فرسایش شیاری از طریق افزایش نفوذپذیری خاک، کاهش سرعت جریان سطحی و تثبیت خاک غیرقابل انکار بوده و می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد کلیدی در مدیریت این معضل عمل کند (Afenzar et al., 2025; De Baets et al., 2009).

طلایی و همکاران، (۱۴۰۰) در پژوهشی کمی در منطقه‌ی شمال استان اردبیل، توانایی گیاهان بومی در کنترل فرسایش شیاری و آب‌کندی را مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق پنج ساله، شاخص‌های تراکم ساقه، مقاومت ریشه در برابر فرسایش سطحی ناشی از جریان‌های متمرکز، توانایی ایجاد مانع در برابر رسوبات معلق، شاخص سفتی گیاه و چسبندگی ریشه برای ۲۱ گونه گیاهی بومی محاسبه شد. نتایج نشان داد که گونه‌هایی مانند *Stipa arabica*، *Festuca ovina* و *Melica altissima* به دلیل سازگاری با شرایط خشکی و مقاومت در برابر جریان‌های فرسایشی متمرکز، برای کنترل فرسایش شیاری و آب‌کندی در این منطقه بسیار مناسب هستند.

(Wang et al., 2025) در بررسی تأثیر احیای پوشش گیاهی بر فرسایش شیاری در فلات لس‌چین نشان دادند که پوشش گیاهی، به‌ویژه گیاهان علفی با ریشه‌های قوی و عمیق، نقش حیاتی در کاهش فرسایش شیاری دارد. این گیاهان با کاهش سرعت و انرژی جریان آب از طریق موانع فیزیکی (برگ و ساقه) و همچنین افزایش استحکام خاک توسط شبکه‌های ریشه‌ای در هم تنیده، از جدا شدن ذرات خاک جلوگیری می‌کنند. همچنین تراکم کاشت گیاهان و نوع ریشه، تأثیر مستقیمی بر میزان کاهش فرسایش دارد، به‌طوری‌که ریشه‌های عمیق‌تر و پوشش گیاهی مترکم‌تر، مقاومت خاک را در برابر فرسایش شیاری به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند (Wang et al., 2025). (Santoso et al., 2025) مطالعه‌ای با هدف بررسی تأثیر تراکم شیارها، شیب زمین و شدت بارندگی بر فرسایش خاک در غیاب

پوشش گیاهی انجام دادند. آزمایش‌ها در شرایط مختلف شیب (۰، ۳۰ و ۶۰ درجه)، شدت باران (۱۰، ۳۰ و ۵۰ کیلوپاسکال) و تراکم شیار (۰، ۱، ۲ و ۳ متر بر متر مربع) صورت گرفت. نتایج نشان داد که وجود شیارها باعث افزایش ۱/۰۵ تا ۲/۱۳ برابری فرسایش خاک نسبت به زمین‌های بدون شیار می‌شود. این یافته بر اهمیت در نظر گرفتن فرسایش شیاری در مطالعات فرسایش خاک و لزوم یافتن راهکارهایی برای کاهش آن تأکید دارد (Santoso et al., 2025).

حفاظت و احیای بیولوژیکی

در برنامه‌ریزی حفاظت و احیای حوزه آبخیز، طرح‌های ویژه‌ای برای حفاظت و احیای اراضی مختلف حوزه‌های آبخیز مورد نیاز است که نیازهای واقعی به شرایط حوزه آبخیز بستگی دارد. به عبارتی این برنامه‌ریزی باید به نحوی انجام شود که با نیازها و شرایط منطقه تطابق کامل داشته باشد. یکی از مهم‌ترین روش‌های حفاظت و احیای حوزه‌های آبخیز، روش‌های زیستی است (حسینی توسل و یوسفی خانقاه، ۱۳۸۶). بیشتر پروژه‌های زیستی بر احیای سریع پوشش گیاهی توجه دارند و هدف اصلی این پروژه‌ها ایجاد یک بوم‌سازگان خود محافظ و مقاوم در برابر آشفته‌گی‌ها می‌باشد (Clewel et al., 2004). از آنجایی که آبخیزها در برگیرنده اشکال مختلفی از بوم‌سازگان‌ها از جمله جنگل‌ها، مراتع، زراعت و غیره هستند، پسندیده است که از دیدگاه‌های مختلفی مورد بررسی قرار گیرند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷). این بررسی می‌تواند از لحاظ احیای زیستی و تأثیر ویژگی‌های گونه گیاهی در کاهش و کنترل فرسایش به‌عنوان آشفته‌گی در سطح حوزه‌های آبخیز باشد. روش‌های مهندسی زیستی از طریق کاهش رواناب و افزایش نفوذ، امکان بازیابی مناطق فرسایشی را فراهم کرده و آبکندهای مدیریت شده می‌توانند به‌عنوان تله رسوب‌گیر عمل کنند (Rey et al., 2005). همبستگی و ارتباط تنگاتنگ بین پوشش گیاهی و خاک به گونه‌ای است که تغییر در وضعیت هر کدام، تأثیر شدیدی بر دیگر کارکردهای بوم‌سازگان به دنبال دارد. بنابراین، با مطالعه ارتباط بین خاک و گیاه، می‌توان به ویژگی‌های هر یک دست یافت و برای مدیریت صحیح و منطبق بر اصول زیستی، از این منابع استفاده کرد (Eisenhauer et al., 2018; Van Der Putten et al., 2009; Wardle et al., 2004). پوشش گیاهی مبنایی برای روش‌های زراعی یا زیستی مقابله با فرسایش بوده و نقش مؤثری در کنترل فرسایش دارد (Abdalla et al., 2020). مدیریت زیستی و احیای پوشش گیاهی به کاهش وزن مخصوص خاک و افزایش خلل و فرج خاک، پایداری خاکدانه، کربن آلی و نیتروژن کل منجر شده که در نهایت بهبود کیفیت خاک را به دنبال دارد (Guo et al., 2021; Jiang et al., 2020). این مهم نیز به افزایش حاصلخیزی و تنوع گیاهی منجر می‌شود (Michaletz et al., 2014; Xu et al., 2021) که متعاقباً بطور چشمگیری فرسایش‌پذیری خاک را کاهش می‌دهد (Guo et al., 2020). انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب به فرایندهای مورد نظر بستگی دارد. در روش‌های قدیمی مدیریت زیستی آبکند، تمرکز بر آبراهه‌های چمنی یا موانع گیاهی با تأکید بر زیست‌توده قابل مشاهده (سطحی) و استهلاک انرژی جریان، استوار بوده و تأثیر زیست‌توده زیرسطحی به‌ندرت مورد توجه قرار گرفته است. به‌عنوان مثال ۶۰ تا ۹۰٪ زیست‌توده گندمیان بصورت زیرسطحی است (Reicosky & Forcella, 1998). برخی از خصوصیات ظاهری و مکانیکی تأثیرگذار گیاهان بر فرسایش‌پذیری خاک به نقل از (Morgan & Rickson, 1995) شامل: خصوصیات ساختاری گیاهان مانند اندازه و شکل ریشه‌ها و ساقه‌های گیاهان، توزیع مکانی ساقه‌ها و ریشه‌های گیاه و الگوی مکانی گیاهان در امتداد آبکند و یا مکان‌های حساس به فرسایش، رفتار گیاهان در جریان‌های متمرکز و یا تنش‌های برشی خاک بصورت مقاومت کششی ریشه گیاهان و انعطاف‌پذیری ساقه‌ها و کل پیکره گیاهان می‌باشد.

پارسادوست و همکاران، (۱۴۰۲) با بررسی ویژگی‌های پوشش گیاهی در شکل‌های مختلف فرسایش (سطحی، شیاری و آبراهه‌ای)، در خاک‌های مارنی کاشان نشان دادند که اراضی مارنی دارای پوشش گیاهی، فرسایش‌پذیری کمتری نسبت به مناطق عاری از پوشش گیاهی دارند. تجزیه و تحلیل واریانس، تفاوت‌های معنی‌داری در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و پوشش گیاهی بین انواع فرسایش نشان داد، به طوری که مناطق با فرسایش آبراهه‌ای از نظر شاخص‌های خاک و پوشش گیاهی وضعیت بهتری داشتند. همبستگی مثبت بین درصد تاج پوشش گیاهان و درصد ماسه و همبستگی منفی با مقدار CaCO_3 مشاهده شد. گونه‌های *Ephedra strobilacea*، *Anabasis setifera* و *Artemisia sieberi* به ترتیب در فرسایش‌های سطحی، شیاری و آبراهه‌ای به‌عنوان سازگارترین گونه‌ها برای حفاظت خاک شناسایی شدند.

(Lees et al., 2021) در تحقیقی با بهره‌گیری از روشی نوآورانه مبتنی بر رتبه‌بندی صفات گیاهی، به بررسی پتانسیل گونه‌های مختلف چمن و مخلوط آن‌ها در کنترل فرسایش خاک در آبراهه‌ها پرداختند. نتایج این پژوهش که در شرایط شبیه‌سازی شده تابستان و پاییز انگلستان انجام شد، نشان می‌دهد که مخلوطی از گونه‌های چمن *Lolium perenne* و *Festuca rubra* و برخی از گونه‌های هیبریدی *Festulolium*، به‌ویژه در شرایط آب و هوایی پاییز، بیشترین پتانسیل را برای کاهش فرسایش خاک دارند. این یافته‌ها اهمیت

انتخاب گونه‌های مناسب چمن بر اساس صفات خاص آن‌ها را در مدیریت فرسایش خاک برجسته کرده و روش رتبه‌بندی مبتنی بر صفات را به‌عنوان ابزاری کارآمد برای غربالگری گونه‌های چمن مناسب معرفی می‌کند، که می‌تواند در انتخاب گونه‌های مقاوم و موثر در برابر فرسایش، نقش بسزایی ایفا کند.

شهبازی و همکاران، (۱۳۸۷) تأثیر پرچین‌های گیاهی بر کاهش فرسایش آب‌کندی در اهواز را بررسی کردند. در این مطالعه از سه گیاه پوتار^۱، نریشت^۲ و چایر^۳ استفاده شد و نتایج نشان داد که هر سه گیاه باعث کاهش فرسایش آب‌کندی و کاهش رسوب معلق شده‌اند. با این حال، گیاه پوتار بهترین عملکرد را در این زمینه داشته است.

(Liu et al., 2019) در بررسی مدیریت فرسایش آب‌کندی در چین دریافتند که فن‌های مهندسی زیستی مانند حصیرهای زنده پیوسته، بوته‌زارها و مراتع مشجر در کنترل فرسایش آب‌کندی مؤثر هستند. این فن‌ها یک سیستم مدیریت آب با برنامه‌ریزی مناسب ایجاد می‌کنند که برای جلوگیری از فرسایش بیش از حد در زمین‌های بایر شیب‌دار، ضروری است. با این حال، به دلیل غیر سودآور بودن این فن‌ها در کوتاه‌مدت، تنها کشاورزان آگاه به محیط زیست از آن‌ها حمایت می‌کنند. برنامه‌ریزی مدیریت فرسایش آب‌کندی در آینده باید به گونه‌ای باشد که منافع اقتصادی کشاورزان محلی را نیز تامین کند (Liu et al., 2019). همچنین (Borrelli et al., 2020) اشاره می‌کنند که روش‌های مدیریت زیستی به‌راحتی با تغییرات اقلیمی سازگار نیستند و این نکته باید در تصمیمات و اجرای پروژه‌های مدیریت زیستی آب‌کندها در نظر گرفته شود (Borrelli et al., 2020). به نقل از (Ghidey & Alberts, 1997) فرسایش شیاری با افزایش طول و حجم ریشه مرده گیاه کاهش می‌یابد. از طرف دیگر ریشه‌های زنده با مصرف آب و افزایش چسبندگی خاک به کاهش فشار آب منافذ منجر می‌شود. به‌عبارتی، ریشه‌ها محدوده فعال زیستی و شیمیایی را در پروفیل خاک مهیا می‌کنند. به نقل از (Mamo & Bubbenzer, 2001)، فرسایش‌پذیری شیاری با افزایش تراکم طول ریشه در دو کشت آزمایشگاهی و میدانی برای سویا و ارزن دارای ارتباط نمایی کاهشی است. در مدیریت زیستی فرسایش پاشمانی و بین شیاری، زیست توده سطحی مدنظر است، در صورتی که در جریان‌های متمرکز مانند آب‌کندی و شیاری، زیست‌توده زیرسطحی (ریشه) نقش اصلی را عهده‌دار است (De Baets et al., 2006). در مراحل اولیه رشد گیاه، نیز نقش ریشه پررنگ‌تر از اندام‌های هوایی است و ریشه گندمیان در مقایسه با خاک‌های بدون ریشه، به پایداری خاک‌دانه کمک می‌کند که این مهم با افزایش تراکم ریشه، تشدید می‌شود. در فصل رویش و با گذر زمان، موضوع تغییر کرده و نقش اندام‌های هوایی نسبت به اندام‌های زیرزمینی در پایداری خاک‌دانه افزایش می‌یابد (Gyssels & Poesen, 2003). فرسایش‌پذیری خاک با گذر زمان از احیای پوشش گیاهی، کاهش می‌یابد که این فرایند بسیار زمان‌بر است (Guo et al., 2018).

لذا از بین مشخصات محیطی، خاک یکی از مهم‌ترین عواملی است که در پراکنش و تراکم پوشش گیاهی مناطق نقش عمده‌ای دارد (Jafari et al., 2004) و پوشش گیاهی به نوبه خود، مبنایی برای روش‌های کشاورزی و یا زیستی مقابله با فرسایش بوده و نقش مؤثری در کنترل فرسایش دارد (Abdalla et al., 2020).

اعتراف و همکاران، (۱۳۹۳) به بررسی تأثیر نوع پوشش گیاهی بر رواناب و رسوب و مواد غذایی خاک زمین‌های شیب‌دار مراوه‌تپه در استان گلستان پرداختند. آن‌ها نقش یونجه دائمی^۴، آگروپایرون^۵، زیره سبز^۶ و جو^۷ و مخلوط یونجه و آگروپایرون را در سه تکرار، در قالب بلوک‌های کامل تصادفی و کرت‌ها مقایسه نمودند و اذعان داشتند که کشت زیره به دلیل افزایش میزان رواناب و کاهش در حاصلخیزی خاک، در مدیریت زیستی آب‌کندهای اراضی شیب‌دار مراوه‌تپه، مناسب نیست.

(Guerra et al., 2007) با استفاده از روش‌های مهندسی زیستی، مناطق تخریب شده در آب‌کندهای Sacavem در برزیل را بازسازی کردند. ارزیابی اولیه نشان داد که این رویکرد به‌عنوان یک فن کارآمد، موثر و با دوام، پتانسیل بالایی دارد و مزایای محیط زیستی و مالی را برای مردم محلی فراهم می‌کند. زمین‌پارچه‌های گیاهی ساخته شده از حصیر نخل Buriti بر روی سطح خاک قرار گرفتند تا سرعت رواناب را کاهش دهند، رسوبات را به دام بیندازند و از دانه‌های علف کاشته شده در برابر فرسایش محافظت کنند. این روش مهندسی زیستی خاک در آب‌کندهای Sacavem به نتایج مثبتی منجر شده است (Guerra et al., 2007).

^۱ *Aeluropus littoralis*

^۲ *Carex stenophylla*

^۳ *Agropyron cristatum*

^۴ *Medicago sativa*

^۵ *Agropyron elongatum*

^۶ *Cuminum cyminum*

^۷ *Hordeum vulgare*

(Ageel et al., 2025) بر اساس نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی نشان دادند که پوشش گیاهی متراکم تر ($G/d = 1.09$) به طور قابل توجهی در کاهش فرسایش مؤثر است. علاوه بر این، معرفی یک الگوی جدید با استفاده از نوارهای گیاهی و فاصله‌های متناوب، توانسته است نرخ فرسایش را در مقایسه با الگوهای منظم، به میزان قابل توجهی کاهش دهد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از بافرهای زیستی با طراحی مناسب الگوهای پوشش گیاهی، می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر و سازگار با محیط زیست در کاهش فرسایش خاک و تثبیت دامنه‌ها در مناطق تپه‌ای به کار گرفته شود (Aqeel et al., 2025). کارایی بافرها توسط جبله و همکاران (۱۳۹۷) در دامنه‌های لسی مشرف به شهرک عرفان (شهرستان گرگان) در کاهش فرسایش، رسوب و رواناب نیز اثبات شده است. به نحوی که میزان فرسایش، رسوب و رواناب به ترتیب ۹/۲۷ و ۱۷/۲ تن در سال و ۷/۸ میلی‌متر در سال کاهش یافته است.

(Wang et al., 2025) در بررسی چگونگی تأثیر ویژگی گیاهان علفی مانند *Bothriochloa ischcemum* (BI) و *Artemisia vestita* (AG) بر فرسایش خاک، با کاشت این گیاهان در تراکم‌های مختلف، نشان دادند که پوشش گیاهی به طور قابل توجهی از فرسایش خاک می‌کاهد. به طوری که میزان خاک شسته شده در اراضی این گیاهان، ۶۸ تا ۹۵ درصد کمتر از خاک لخت بوده است. هرچه تراکم گیاهان بیشتر باشد، این خاصیت حفاظتی بیشتر می‌شود و گونه BI در این زمینه از AG مؤثرتر بوده‌اند. همچنین این مطالعه نشان داد که عوامل مهمی مانند تاج پوشش گیاهی، مساحت طوقه ریشه و میزان مواد آلی خاک، همگی در کاهش فرسایش نقش دارند و با افزایش این عوامل، فرسایش خاک کمتر می‌شود (Wang et al., 2025).

ویژگی‌های گیاهی مؤثر در کنترل فرسایش

ساختار تاج پوشش گیاه

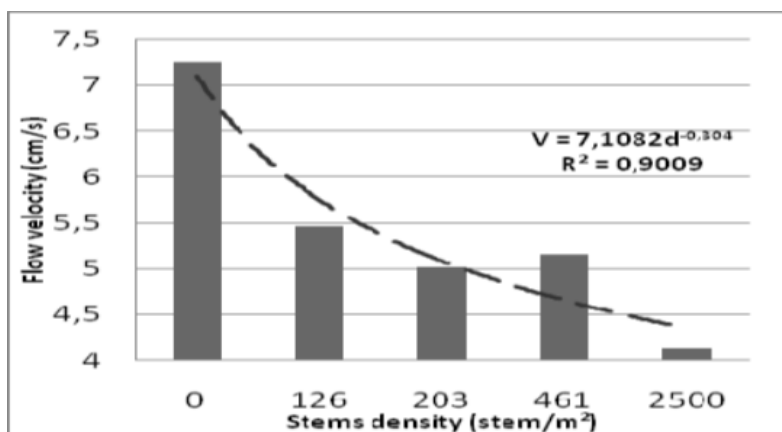
فرسایش خاک با پوشش گیاهی رابطه معکوس دارد که تأثیر عمده پوشش گیاهی مربوط به خاصیت حفاظتی آن در برابر برخورد قطرات باران است. برخورد قطره باران با شاخ و برگ گیاهان (تاج پوشش)، سرعت سقوط را به شدت کاهش می‌دهد و انرژی جنبشی قطرات باران را به مراتب کاهش می‌دهد و هر چه تراکم پوشش گیاهی بیشتر باشد، تعداد قطراتی که سرعت آنها کاهش یابد، بیشتر می‌شود و از توان فرسایش باران بیشتر کاسته می‌شود (مرادیان و همکاران، ۱۳۹۱). پوشش گیاهی به عنوان یک عامل کلیدی در تعیین کمیت و کیفیت فرسایش خاک و نیز پاسخ‌های هیدرولوژیکی سطحی زمین می‌باشد (Nunes et al., 2010). جوامع گیاهی به واسطه ربایش قطرات باران توسط تاج پوشش، موجب کاهش انرژی جنبشی آن‌ها و به واسطه کربن آلی موجود در خاک، باعث ایجاد خاکدانه‌های چسبنده می‌شود. به این ترتیب موجب حفاظت خاک می‌شوند (فیروزی و همکاران، ۱۳۹۵). مطالعات متعددی نشان داده است که در میان عوامل اصلی رخداد فرسایش خاک، پوشش زمین از اهمیت بیشتری نسبت به سایر عوامل برخوردار است (García-Ruiz, 2010). مناسب‌ترین راهبردهای کلان برای پیشگیری از رخداد فرسایش شیاری و آب‌کندی، جلوگیری از تمرکز رواناب‌های سطحی است. به طوری که این مهم می‌تواند با اصلاح کاربری زمین، مدیریت پوشش گیاهی از طریق ایجاد تعادل بین ظرفیت تولید گیاهی با برداشت آن، تمهیدات اصولی و فنی لازم در ایجاد شبکه راه‌های دسترسی به منطقه و جلوگیری از قطع بی‌رویه گیاهان اتفاق بیافتد (ثروتی و همکاران، ۱۳۸۷). نتایج تحقیقی در غرب استان مازندران نشان داد که مقدار فرسایش آبی سالانه با شیب، جهت شیب و درصد تاج پوشش گیاهی ارتباط آماری معنی‌داری دارد. به طوری که فرسایش بدست آمده رابطه مستقیم با شدت شیب و رابطه معکوس با درصد تاج پوشش گیاهی را نشان داد (شاه‌کرم و بایرام‌زاده، ۱۳۹۲). مطابق بررسی‌هایی، تغییر ضرایب تاج پوشش گیاهی (ضریب V در مدل هیدروفیزیکی و ضریب C در معادله RUSLE) باعث تغییرات قابل ملاحظه‌ای در میزان فرسایش شده است و این امر تاییدی بر تأثیر مثبت تاج پوشش گیاهی بر میزان فرسایش آبی می‌باشد (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۲). به طور کلی، موفقیت استفاده از پوشش گیاهی در حوزه‌های آبخیز، با توجه به اهداف هر طرح به شرایط حوزه، نوع گیاه، تنوع و آرایش گیاهی، روش کاشت و تثبیت زیستی و از همه مهم‌تر به مدیریت نگهداری پوشش گیاهی بستگی دارد (دریکوندی و همکاران، ۱۳۸۸). در مورد تأثیرات پوشش گیاهی بر کنترل فرسایش آب‌کندی، ساختار و درصد تاج پوشش گیاهی بر مقادیر حجم رواناب، ضریب رواناب، بار رسوب و غلظت رسوب اثر کاهشی دارد. اما بر مؤلفه آستانه شروع رواناب اثر افزایشی داشته است تا رواناب در زمان بیشتری بعد از رگبار ایجاد شود.

نتایج تحقیقات پوشش گیاهی نشان می‌دهند که درصد پوشش‌های مختلف گیاهی (حداقل، متوسط و حداکثر)، بر مؤلفه‌های رواناب و رسوب تأثیر معنی‌داری داشته و پوشش گیاهی حداکثر، بیشترین سهم را در کاهش رواناب و رسوب دارا می‌باشد (Esmali et al., 2015). تحقیقات نشان می‌دهند که بین درصد تاج پوشش گیاهی و فرسایش خاک و غلظت رسوب رابطه معنی‌دار منفی وجود دارد، به طوری که با افزایش درصد تاج پوشش، نرخ فرسایش و غلظت رسوب کاهش پیدا می‌کند (Shinohara et al., 2016). باید اشاره کرد که

با توجه به اثرات مثبت پوشش گیاهی، توجه ویژه به انواع پوشش گیاهی برای کاهش رواناب و فرسایش خاک، لزومی است. (Zhang et al., 2025) در بررسی نقش تاج پوشش گیاهی (گونه گندمی) در مکانیسم فرسایش خاک نشان دادند که تاج پوشش گیاهی، به ویژه گونه *Ophiopogon japonicus*، نقشی حیاتی در کاهش فرسایش خاک ایفا می‌کند؛ به طوری که هرچه تراکم و تاج پوشش گیاهان بیشتر باشد، میزان خاک شسته شده توسط باران به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این تحقیق با بررسی تأثیر عوامل مختلف، تأیید کرده است که شدت بارش و شیب زمین، هر دو بر فرسایش مؤثرند و بیشترین تأثیر به شدت بارش اختصاص داده شده است. این مطالعه به اهمیت پوشش گیاهی به عنوان یک عامل محافظتی در برابر فرسایش تأکید کرده است (Zhang et al., 2025)

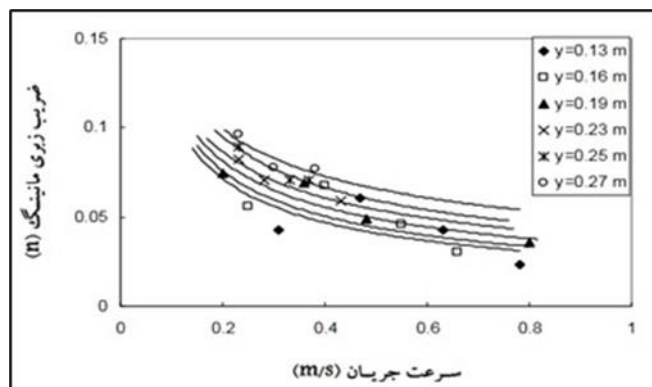
ساختار ساقه‌ای گیاه:

وجود پوشش گیاهی در هر منطقه‌ای باعث کاهش سرعت جریان‌های سطحی و فرسایش می‌شود. پوشش گیاهی همچنین نقش مهمی در کنترل فرسایش آبکندی و شیاری دارد، به طوری که گونه‌های علفی و بوته‌ای (Zeng et al., 2024) و درختان بومی (Parhizkar, 2024; Parhizkar et al., 2024) با بهبود خواص خاک و سیستم ریشه‌ای گسترده، مقاومت خاک را افزایش می‌دهند. با این حال، بارندگی شدید و پوشش گیاهی متراکم نیز می‌توانند الگوهای فرسایش را تحت تأثیر قرار دهند (Xu et al., 2024). بنابراین انتخاب گونه‌های مناسب برای هر محیط ضروری است. اندام‌های بیرونی گیاهان موجب افزایش زبری و کاهش سرعت جریان آب و در نتیجه کاهش انرژی تنش برشی آن می‌شود. از عوامل مهمی که مقاومت هیدرولیکی گیاهان با آن بیان می‌شود، ضریب زبری است. ضریب زبری گیاه، تابعی از شرایط جریان نظیر: سرعت، عمق و شعاع هیدرولیکی و همچنین تابعی از نوع و پوشش گیاهی است؛ همچنین گیاهان به دلیل زبری بالا، گزینه مناسبی برای کاهش سرعت جریان و جلوگیری از فرسایش خاک به شمار می‌رود (مسجدی و همکاران، ۱۳۸۸). تحقیقات نشان می‌دهند که الگوهای مختلف قرارگیری ساقه‌های استوانه‌ای، تأثیر مهمی بر دبی جریان و متعاقباً کاهش فرسایش دارد (Shen & Li, 1973). تحقیقات حاکی از آن است که با افزایش تراکم ساقه، ضریب زبری افزایش می‌یابد که کاهش سرعت جریان را به دنبال دارد (Kervroëdan et al., 2020) به نقل از (Lou et al., 2023) گیاهان با ساقه‌های در هم تنیده نسبت به گیاهان ساقه‌دار منشعب، افزایش ضریب زبری و کاهش رواناب را به دنبال دارد. شکل (۳) رابطه‌ی نمایی منفی بین تراکم ساقه‌ای و سرعت جریان را نشان می‌دهد. به طوری که با افزایش تراکم ساقه‌ای، سرعت جریان فرساینده روند کاهشی را نشان می‌دهد (Madi et al., 2013).



شکل ۳. رابطه بین تراکم ساقه‌ای و سرعت جریان در جهت کاهش فرسایش خاک (اقتباس از (Madi et al., 2015)

روند تغییرات سرعت جریان در مقابل ضریب زبری نشان می‌دهد که با افزایش تراکم ساقه‌ای درخت گز، ضریب زبری افزایش می‌یابد. بدیهی است که با افزایش ضریب زبری، سرعت جریان به صورت نمایی کاهش یافته (شکل ۴) و در نهایت فرسایش خاک کاهش می‌یابد (مسجدی و همکاران، ۱۳۸۸).



شکل ۴. رابطه بین ضریب زبری مایننگ و سرعت جریان (اقتباس از مسجدی و همکاران (۱۳۸۸))

ساختار ریشه‌ای گیاه

پتانسیل کاهش فرسایش ریشه‌های گیاه نتیجه اندرکنش‌های پیچیده درون ماتریکس (مخلوط) خاک - ریشه است که منجر به تغییر خصوصیات مکانیکی و هیدرولوژی خاک می‌شود (Eviner & Chapin III, 2003; Gregory, 2006). در مطالعات متعددی از قبیل (Baets et al., 2018; Zegeye et al., 2012; Burylo et al., 2007) اشاره شده است که کارایی ریشه‌ها در کاهش نرخ فرسایش ناشی از جریان‌های متمرکز توسط خصوصیات متعدد خاک و ریشه از قبیل تراکم ریشه (طول)، معماری ریشه، بافت خاک، رطوبت خاک و وزن مخصوص خاک خشک کنترل می‌شود. ریشه گیاهان بر برخی از خصوصیات خاک از قبیل زبری خاک، نرخ نفوذپذیری، پایداری خاکدانه، رطوبت خاک، مقدار مواد آلی و چسبندگی خاک تأثیرگذار بوده که در نهایت به کنترل فرسایش‌پذیری خاک منجر می‌شود. به محض رشد ریشه در بستر خاک، اندرکنش‌های بیوفیزیکی و بیوشیمیایی با خاک شروع شده که در نهایت به تغییرات خصوصیات مکانیکی و هیدرولوژیکی منجر می‌شود (Angers & Caron, 1998; Dahanayake et al., 2024; Eviner & Chapin III, 2003; Simon & Collison, 2002; Whalley et al., 2005) وجود ریشه بر خصوصیات مکانیکی خاک به دو روش تأثیرگذار است که عبارتند از:

۱) افزایش پایداری خاکدانه (Amézqueta, 1999; Bronick & Lal, 2005)

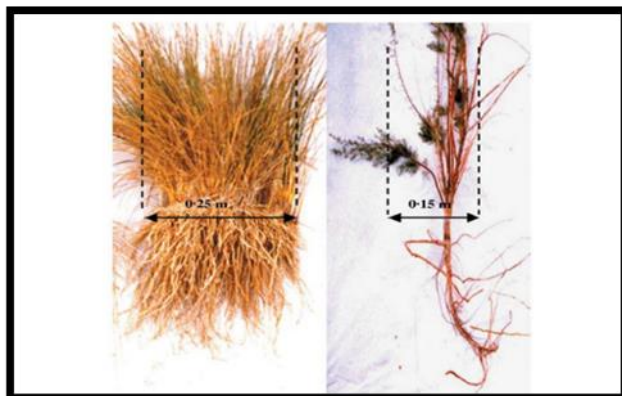
۲) به صورت مکانیکی که منجر به تنیده شدن ریشه در ماتریکس خاک شده و به عنوان چارچوب و اسکلتی برای تشکیل خاکدانه به شمار می‌آید (Reubens et al., 2007).

از طرف دیگر ریشه‌ها در منتهی‌الیه خود، موسیلاژ ترشح می‌کنند که از طریق خصوصیات این ترشحات چسبنده، تشکیل خاکدانه‌های پایدار در آب را افزایش می‌دهند (Jastrow et al., 1998; Jones et al., 2009; McCully, 1999). علاوه بر این، پایداری خاکدانه بصورت غیرمستقیم توسط فعالیت میکروارگانیسم‌هایی که از این مواد آلی تغذیه می‌کنند، تأثیر پذیرفته و در نهایت پلی‌ساکاریدهایی تولید می‌شوند که تولید خاکدانه‌های خاک را افزایش می‌دهند (Gregory, 2006). جدای از مطالب ذکر شده می‌توان اشاره کرد که ترشحات ریشه به عنوان یک منبع پایدار مواد آلی محسوب شده که ساختمان خاک را بهبود می‌بخشند (Bronick & Lal, 2005; Fattet et al., 1998; Jastrow et al., 2011). به عبارتی، پایداری خاکدانه با فرسایش‌پذیری خاک رابطه معکوسی دارد (Knapen et al., 2007; Wang et al., 2011). ریشه‌های گیاهان نقش حیاتی در حفاظت خاک ایفا می‌کنند، زیرا با تغییر ماتریکس خاک، خواص آن را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند (Simon & Collison, 2002). افزایش مقاومت کششی توسط ریشه و مقاومت پیکره خاک در برابر فشار، مکمل یکدیگر در حفاظت خاک هستند (Pollen & Simon, 2005). ریشه‌ها، مقاومت برشی خاک را افزایش می‌دهند و پایداری خاکدانه و مقاومت برشی با یکدیگر رابطه مستقیم دارند (Fattet et al., 2011). قارچ میکوریزا مرتبط با ریشه‌های نازک نیز در تشکیل خاکدانه‌های پایدار و بهبود مقاومت برشی خاک مؤثر است (Fattet et al., 2011; Jastrow et al., 1998; Leifheit et al., 2014). علاوه بر خصوصیات مکانیکی، رشد ریشه بر خصوصیات هیدرولوژیکی خاک نیز تأثیر می‌گذارد (Simon & Collison, 2002)، انتقال آب و مواد غذایی را تسهیل می‌کند (Gregory, 2006) و با نفوذپذیری خاک ارتباط مستقیم دارد (Fattet et al., 2011; Li et al., 1992). افزایش مقدار ریشه، آب خاک را کاهش داده و منجر به پایداری خاکدانه می‌شود (Osman & Barakbah, 2006). از طرف دیگر، سیستم ریشه نقش مهمی در حفاظت آب و خاک دارد؛ به نحوی که ریشه‌های فیبری انتقال آب را کاهش می‌دهند، در حالی که ریشه‌های ضخیم، انتقال آب به اعماق بیشتر خاک را تسهیل می‌کنند (Archer et al., 2002). تأثیر ریشه بر مسلح کردن خاک در برابر فرسایش به نوع گیاه و خصوصیات مورفولوژی ریشه بستگی دارد (Baets et al., 2008). معماری ریشه، شامل ژئومتری و توپولوژی ریشه (Godin, 2000; Gregory, 2006)

(Lynch, 1995; Smit & Rethman, 2000)، برای کنترل فرسایش مهم است. برای مثال، کنترل فرسایش شیاری و آبکندی نیازمند تلفیقی از گونه‌های گیاهی با ریشه‌های نازک و عمیق است. ریشه‌ها با نفوذ در خاک، مقاومت برشی آن را افزایش می‌دهند (Morgan & Rickson, 1995). رشد ریشه در دماهای پایین کاهش می‌یابد و عمق ریشه در مناطق خشک عمیق‌تر است (Schenk & Jackson, 2005). ریشه به‌عنوان حدواسط بین خاک و گیاه، در جذب و انتقال انرژی و تأثیرگذاری بر خصوصیات خاک نقش دارد (Wang et al., 2022; Yang et al., 2018) و بر غلظت یون‌های محلول خاک تأثیر می‌گذارد (Amézketa, 1999). ریشه‌ها می‌توانند وزن مخصوص خاک را کاهش یا افزایش دهند و تخلخل و هدایت هیدرولیکی را تحت تأثیر قرار دهند (Cavaliere et al., 2009; Glinski & Lipic, 1990). به‌عنوان مثال: گندمیان می‌توانند مقاومت برشی خاک را تا سه برابر افزایش دهند (Waldron & Dakessian, 1982). پایداری کشتی ریشه‌ها و فشردگی خاک، ترکیبی از مسلح شدن خاک و افزایش چسبندگی را به‌دنبال دارد (Gray & Sotir, 1996). اگرچه اثرات پوشش گیاهی در کاهش فرسایش اغلب به زیست‌توده بالای زمین نسبت داده می‌شود، اما ریشه نقش مهم‌تری در کنترل فرسایش خاک دارد، به‌ویژه زمانی که زیست‌توده سطحی از بین می‌رود (Zegeye et al., 2018). کاهش فرسایش آبی با افزایش پوشش گیاهی رابطه‌ی نمایی دارد (Gyssels et al., 2005). ریشه‌ها بر خواص خاک مانند زبری خاکدانه، رطوبت، چسبندگی و محتوای مواد آلی تأثیرگذار بوده (Zegeye et al., 2018) و به مثابه دیوار مسلح در خاک عمل می‌کند (Afshar et al., 2019). گیاهان دارای ریشه‌های مویین با اتصال ذرات خاک، فرسایش را کاهش می‌دهند (Afshar et al., 2019). پوشش گیاهی متراکم با ریشه‌های بلند و چند ساله به‌عنوان یک عامل کاهش‌دهنده سرعت فرسایش عمل کرده (مرادیان و همکاران، ۱۳۹۱) و گونه‌های گیاهی با سیستم ریشه گسترده، خاک سطحی را از فرسایش محافظت می‌کنند (دلبری و همکاران، ۱۳۹۵). تأثیر ریشه در افزایش مقاومت برشی خاک به نوع گیاه، توزیع ریشه‌ها، قطر ریشه و شرایط خاک بستگی دارد. ریشه‌ها می‌توانند تا ۶۰ درصد مقاومت برشی خاک را افزایش دهند (Shinohara et al., 2016). تراکم ریشه به‌طور مستقیم و غیرمستقیم باعث کاهش فرسایش خاک می‌شود (Shinohara et al., 2016). در مقایسه درختان با گندمیان، مدت زمان بیشتری برای رسیدن به مقاومت برشی ریشه درخت نیاز است (Waldron & Dakessian, 1982). در مطالعه انجام شده، متوسط چسبندگی ریشه در عمق ۲۰ سانتی‌متری سطحی خاک برای ریشه گندمیان با ریشه افشان (مانند گیاه سازو) در مقایسه با خاک سطحی مسلح شده با سیستم‌های ریشه راست (مانند نی، گیاهان بوته‌ای و علوفه‌ای و درختان) خیلی بیشتر است (شکل ۵).

(Auerswald et al., 2025) در بررسی نقش گیاه *Silphium perfoliatum* در کنترل فرسایش خاک به خوبی نشان دادند که این گیاه چندساله چگونه می‌تواند به حفظ خاک و آب کمک کند. دلیل اصلی این خاصیت، پوشش پیوسته خاک توسط این گیاه و سیستم ریشه‌های گسترده آن است. نتایج نشان داد که پس از حدود ۱۰ سال از کشت این گیاه، توانسته فرسایش ناشی از باران‌های شدید را به‌طور چشمگیری کاهش دهد؛ به‌طوری‌که میزان فرسایش خاک در این مزارع، کمتر از یک چهارم مقدار آن در کشاورزی سنتی و حتی یک هشتم مقدار آن در مزارع ذرت است. این کاهش قابل توجه فرسایش عمدتاً به دلیل انسجام خاک و توسعه ریشه‌های عمیق و متراکم در لایه سطحی این گیاه است (Auerswald et al., 2025).

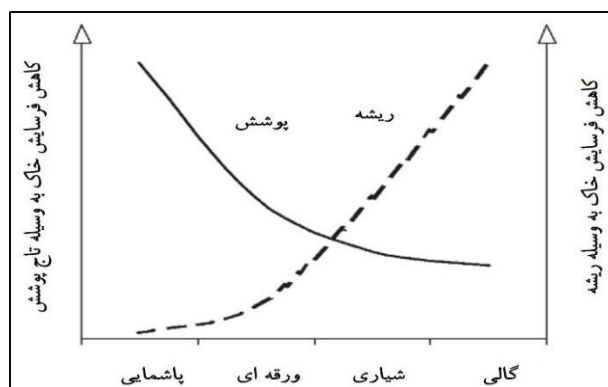
(Parhizkar et al., 2025) به بررسی اثرات ریشه‌های افشان چهار گونه گیاهی علفی بر سرعت جریان آب و ظرفیت جداسازی فرسایش شیاری با هدف ارزیابی تأثیر ریشه‌های افشان چهار گونه گیاهی علفی شامل *Hypericum androsaemum*، *Urtica dioica L.*، *Epipactis latifolia All* و *Danae racemosa (L.) Moench* بر کاهش فرسایش شیاری، که شکلی غالب در دامنه‌های طولانی و شیب‌دار است، اشاره داشتند. یافته‌ها نشان داد که این گونه‌ها به‌طور مؤثری سرعت جریان آب را کاهش داده و خواص فیزیکی خاک مانند دانه‌بندی را بهبود می‌بخشند، اما اثرگذاری آن‌ها بر ظرفیت جداسازی ذرات خاک در شیارها (Dc) متغیر بود؛ به‌طوری‌که تنها گونه *Danae racemosa (L.) Moench* کاهش معنی‌داری در Dc نشان داد، در حالی که *Epipactis latifolia All* نیز کاهش قابل‌توجهی نسبت به سایر گونه‌ها داشت. نتایج کلی حاکی از آن است که سیستم ریشه‌ای گیاهان علفی در فرسایش شیاری نقش مهمی ایفا می‌کند، اما کنترل این پدیده به عوامل مورفولوژیکی ریشه محدود نشده و تحت تأثیر پارامترهای هیدرودینامیکی جریان آب نیز قرار دارد (Parhizkar et al., 2025).



شکل ۵. تصویری از ریشه افشان (در سمت چپ) و ریشه راست (در سمت راست) (Baets et al., 2007)

نتایج و بحث:

در مطالعه حاضر با تأکید بر تأثیر پوشش گیاهی در کاهش و کنترل فرسایش شیاری و آبکندی خاک، نتایج مرور پژوهش‌ها بیانگر پتانسیل بالای گونه‌های گیاهی در کنترل فرسایش و نیازمند توجه بیشتر به مهندسی زیستی در احیا و کنترل فرسایش است. لذا با توجه به اهمیت سازوکار پویای فرسایش پیشنهاد می‌شود الگوهای برنامه‌ریزی، اتخاذ تصمیمات مدیریتی و اجرای پروژه‌های سودمند در ارتباط با گسترش پوشش گیاهی مورد توجه قرار گیرد تا قدمی هر چند کوچک در راستای اتخاذ تصمیمات مدیریتی و اجرایی در سطح کشور به‌منظور حفاظت آب و خاک و بوم‌سازگان سالم برداشته شود. یکی از مهم‌ترین موارد مورد توجه در استفاده از گونه‌های گیاهی برای کنترل انواع فرسایش، آگاهی عمیق از ویژگی‌های خاص هر گیاه اعم از تاج‌پوشش و ریشه می‌باشد. یعنی هر گیاه با توجه به ویژگی‌های خاص اندام‌های خود از جمله ریشه، ساقه یا برگ، واکنش‌های متفاوتی را نسبت به کنترل انواع فرسایش از خود نشان می‌دهد. مطالعات (De Baets et al., 2007) بین ۲۶ گونه گیاهی نشان داد که هر گونه گیاهی بسته به ویژگی‌های اندام‌های خود عملکرد خاصی را نسبت به کنترل فرسایش به همراه دارد. به‌عنوان مثال دو گونه *Plantago albicans - Limonium supinum* با تراکم ساقه بالا باعث کاهش سرعت جریان شده، به‌طوری‌که این ویژگی برای کنترل فرسایش پاشمانی مناسب می‌باشد و گونه *Phragmites australis* با قدرت بالای ریشه خود، باعث چسبندگی بهتر خاک شده و برای کنترل فرسایش شیاری و آبکندی مناسب می‌باشند. نتایج تحقیقات دیگر نیز نشان داده است که تاج پوشش گیاهان در کاهش فرسایش پاشمانی و ورقه‌ای مؤثر می‌باشد (شکل ۶)، در حالی که ریشه گیاهان در کاهش فرسایش آبکندی و شیاری مؤثرتر است (Vannoppen et al., 2015). البته لازم به ذکر است که ترکیبی از خصوصیات ریشه و تاج‌پوشش گیاهان باعث کاهش بهتر فرسایش می‌شود (Gyssels et al., 2005).



شکل ۶. کاهش فرسایش خاک به وسیله تاج پوشش و ریشه (اقتباس از Vannoppen et al., 2015)

تحقیقات نشان می‌دهند که کاهش میزان فرسایش آبی با افزایش پوشش گیاهی، به‌صورت نمایی است که ناشی از افزایش توده ریشه به‌صورت نمایی نیز می‌باشد. البته باید اشاره کرد که همه ریشه‌ها، مقاومت خاک به فرسایش را افزایش نمی‌دهند (Li et al., 2011). همچنین روند کاهشی فرسایش توسط ریشه‌های جانبی و افشان بیشتر از ریشه‌های راست گزارش شده است. این مسئله را می‌توان به سطح بیشتری از خاک سطحی که توسط ریشه‌های ریز اشغال می‌شود، نسبت داد (De Baets et al., 2011). به همین دلیل، ریشه گندمیان

در کاهش نرخ جدا شدن ذرات خاک بسیار مؤثر هستند (De Baets et al., 2006). به‌طور کلی، گیاهان موردنظر برای کنترل فرسایش شیاری و آب‌کندی، بهتر است چندساله و با ساقه‌های سخت باشند که در طول سال ثابت باقی بمانند و تحمل هر دو شرایط خشک و مرطوب خاک را داشته و در صورت وجود چند سانتی‌متر رسوب، رشد و نمای مجدد داشته باشند. همچنین بتواند از گره‌های بنیادی، رشد مجدد خود را آغاز کنند و یا دارای ریشه و ریزوم باشند. گندمیانی نظیر *Panicum virgatum* و *Cynodon dactylon* ویژگی‌های مورد نظر فوق را دارند.

تحقیقات نشان دادند که کشت دو نوع گندم باعث کاهش فرسایش شیاری و آب‌کندی به میزان ۵۰ درصد می‌شود. این تأثیر در مراحل اولیه جوانه‌زنی گندم به‌دلیل تراکم بیشتر ریشه‌ها، چشمگیرتر است (Gyssels et al., 2002).

در تحقیقی در اروپا تأثیر پنج شاخص گیاهی بر روی فرسایش اندازه‌گیری شدند. این پنج شاخص شامل SOP (متر بر متر) پتانسیل تله‌اندازی رسوب، SD (مترمربع بر مترمربع) تراکم ساقه، MEI (نیوتن) شاخص سفتی، RSD (بدون بعد) یا پتانسیل کاهش فرسایش توسط ریشه‌های گیاه در طی فرسایش آبی جریان متمرکز در خاک سطحی (تا ۰/۱ متر) و Cr (کیلو پاسکال) انسجام ریشه در عمق ۰/۳ الی ۰/۴ متر عمق خاک می‌باشد. نتایج حاصله بیانگر این واقعیت بودند که هر گیاه در یک شاخص خاصی دارای امتیاز بالایی می‌باشد. به‌طوری‌که این امتیاز بالا بیانگر کنترل نوع خاصی از فرسایش توسط گیاه مربوطه می‌باشد. به‌عنوان مثال *Plantago albicans* و *Limonium supinum* دارای بیشترین تراکم ساقه‌ای بوده و با این ویژگی می‌توان اظهار داشت این دو گیاه برای کنترل فرسایش پاشمانی و سطحی مناسب می‌باشد. گونه *Anthyllis cytisoides* که دارای امتیاز بالایی در ویژگی‌های ریشه (RSD و Cr) می‌باشد یقیناً برای کنترل فرسایش شیاری و آب‌کندی در یک منطقه گزینه پیشنهادی مناسبی خواهد بود. در مجموع با دقت به کاربرد بودن جدول (۱) و درک تأثیر هر گیاه در یک فرسایش خاص، تهیه چنین جداولی در مناطق کنترلی انواع فرسایش با استفاده از پوشش گیاهی ضروری می‌باشد.

معرفی گونه‌های مناسب کنترل فرسایش شیاری و آب‌کندی

طبق اظهارات (Reubens et al., 2007)، گونه‌های چوبی با سیستم ریشه مرکزی بزرگ و استوار که دارای ریشه‌های عمودی مستحکم بوده (با ریشه‌های کوچک متعدد و منشعب از سیستم مرکزی ریشه) و به عمق خاک نفوذ می‌کنند، در پایداری دامنه‌های با عمق کم خاک، مناسب هستند. از طرف دیگر (Simon & Collison, 2002) اشاره کرده‌اند که به‌طور کلی برای گونه‌های چوبی و گندمی، نسبت سطح ریشه نسبت به مقاومت ریشه در افزایش مقاومت برشی از اهمیت بیشتری برخوردار است. همچنین حجم و مقدار ریشه‌های نازک به‌عنوان عامل مهمی در مسلح کردن خاک سطحی به‌شمار می‌آید (Cammeraat et al., 2005).

چایر یا پنجه‌مرغی (سگ‌واش):

گیاه "پنجه‌مرغی" از گندمیان ریزوم‌دار و استولن‌دار^۱ محسوب می‌شود که به‌طور وسیع در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری جهان رشد می‌کند. این گیاه در زمره گیاهان چهار کربنه‌ای (C4) محسوب می‌شود و به‌عنوان علف هرز مهاجم با قدرت رقابت زیاد در مقابله با سایر گیاهان طبقه‌بندی می‌شود. پنجه‌مرغی، گیاهی علفی، چندساله، منشعب، خزنده^۲، سریع‌الرشد و سیمی شکل است که منجر به حفاظت خاک می‌شود (شکل ۷). پنجه‌مرغی دارای ریشه‌های افشان است که در شرایط خشکی تا عمق ۲ متری خاک نفوذ می‌کند (Shi et al., 2012; Xu et al., 2023). *Cynocystis dactylon* به‌عنوان یک گیاه پیشگام رایج، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد ریشه‌ای خود، به‌طور قابل‌توجهی پایداری خاکدانه‌ها را افزایش می‌دهد (Wang et al., 2024). این گونه علفی، همراه با سایر جوامع گیاهی، می‌تواند ظرفیت جداشدگی خاک و فرسایش‌پذیری شیاری را در سیستم‌های آب‌کندی در مقایسه با مناطق جنگلی کاهش دهد (Zeng et al., 2024). ویژگی‌های مورفولوژیکی و مکانیکی ریشه‌های این گونه گیاهی با ارتفاع، همبستگی مثبت دارد. به‌طوری‌که در ارتفاعات بالاتر، طول، قطر، سطح و حجم ریشه، افزایش می‌یابد (Zeng et al., 2024). این ویژگی‌ها به بهبود پایداری شیب در مناطق حاشیه‌ای کمک می‌کنند. علاوه بر این، در مهندسی زیستی، *C. dactylon* بر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه سد سه‌دره تأثیر گذار بوده و به‌طور بالقوه به ترمیم بوم‌سازگان مناطق تخریب‌شده حاشیه‌ای منجر شده‌اند (Naz et al., 2024).

^۱ *Cynodon dactylon* (L.) Pers

^۲stoloniferous

^۳creeping



شکل ۷. گیاه چایر - نهشته‌های لسی استان گلستان (○ یافته‌های تحقیق - شمال شرق استان گلستان)

جدول ۱. مقادیر و امتیازات اندازه‌گیری شده برای پنج شاخص گیاهی سطح زمین و زیرزمین، برای ارزیابی تناسب گیاهان در کنترل فرسایش (De Baets et al., 2009)

نوع گونه	نوع پوشش گیاهی	SD (m2 m-2)	SD score	SOP (m1 m-1)	SOP score	MEI (N)	MEI score	RSD (-)	RSD score	Cr (kPa)	Cr score
<i>Limonium supinum</i>	بوته	۰/۰۴۰۱	۴	۰/۱۸۴۰	۴	۰/۲۵	۰	۰/۳۷	۱	۰	۰
<i>Plantago albicans</i>	بوته	۰/۱۲۶۱	۴	۰/۳۵۳۸	۴	n.a.	n.a.	۱×۱۰۸۵	۴	۰	۰
<i>Brachypodium retusum</i>	علفی	۰/۰۰۰۶	۰	۰/۱۴۰۸	۳	۰/۰۵	۰	۸×۱۰۸۵	۴	۰	۰
<i>Stipa tenacissima</i>	علفی	۰/۰۰۰۸	۰	۰/۰۴۹۸	۰	۰/۳۲	۱	۰/۰۳	۳	۲/۵۳	۲
<i>Lygeum spartum</i>	علفی	۰/۰۰۱۹	۱	۰/۰۶۱۲	۱	۰/۴۱	۱	۲/۴۱×۱۰۸۷	۴	۰	۰
<i>Avenula bromoides</i>	علفی	۰/۰۰۲۱	۲	۰/۰۹۸۱	۲	۰/۴۵	۱	۰/۳×۱۰۹۱۲	۴	۰	۰
<i>Piptatherum miliaceum</i>	علفی	۰/۰۰۲۸	۲	۰/۰۷۳۶	۱	۲/۰۹	۲	۰/۰۱	۳	۰	۰
<i>Helictotrichon filifolium</i>	علفی	۰/۰۰۵۵	۳	۰/۲۱۶۱	۴	۳/۶۲	۲	۱/۶۱×۱۰۸۶	۴	۰	۰
<i>Phragmites australis</i>	علفی	۰/۰۰۵۱	۳	۰/۲۱۰۱	۴	۵/۵۴	۲	۰/۶۰	۰	۳۵/۱۸	۴
<i>Juncus acutus</i>	علفی	۰/۰۰۷۰	۴	۰/۱۴۷۸	۳	۱/۷۷	۲	۲/۷۲×۱۰۸۸	۴	۵/۲۱	۳
<i>Fumana thymifolia</i>	درختچه	۰/۰۰۰۷	۰	۰/۰۳۲۶	۰	۰/۶۴	۱	۰/۲۵	۱	۰	۰
<i>Teucrium capitatum</i>	درختچه	۰/۰۰۰۹	۰	۰/۰۴۵۶	۰	۰/۶۲	۱	۰/۳۲	۱	۰	۰
<i>Thymelaea hirsuta</i>	درختچه	۰/۰۰۱۱	۱	۰/۰۳۵۰	۰	۱۷/۰۴	۳	۰/۵۰	۰	۸۱،۲	۲
<i>Artemisia barrelieri</i>	درختچه	۰/۰۰۱۴	۱	۰/۰۴۱۳	۰	۲/۷۰	۲	۰/۰۷	۳	۰	۰
<i>Dittrichia viscosa</i>	درختچه	۰/۰۰۱۴	۱	۰/۰۴۹۹	۰	۳/۵۸	۲	۰/۱۹	۲	۴/۳۱	۲
<i>Retama sphaerocarpa</i>	درختچه	۰/۰۰۱۸	۱	۰/۰۷۰۵	۱	۲۷/۵۱	۴	۰/۰۳	۳	۳۸/۵۶	۴
<i>Atriplex halimus</i>	درختچه	۰/۰۰۱۸	۱	۰/۰۴۵۱	۰	۵۴/۱۶	۴	۰/۱۸	۲	۹/۶۲	۳
<i>Salsola genistoides</i>	درختچه	۰/۰۰۱۹	۱	۰/۰۵۱۴	۱	۴۲/۱۷	۴	۰/۰۳	۳	۱۰/۲۷	۴
<i>Anthyllis cytisoides</i>	درختچه	۰/۰۰۲۱	۲	۰/۰۶۵۲	۱	۸/۵۶	۲	۲/۲۹×۱۰۸۳	۴	۱۶/۲۲	۴
<i>Thymus zygis</i>	درختچه	۰/۰۰۲۳	۲	۰/۰۶۸۴	۱	۱۱/۹۶	۳	۰/۳۲	۱	۰	۰
<i>Dorycnium pentaphyllum</i>	درختچه	۰/۰۰۲۶	۲	۰/۰۶۶۹	۱	۲۲/۲۷	۳	۰/۱۱	۲	۳/۴۶	۲
<i>Ononis tridentata</i>	درختچه	۰/۰۰۲۹	۲	۰/۰۵۷۷	۱	۹۷/۵۴	۴	۰/۴۵	۱	۴/۰۳	۲
<i>Nerium oleander</i>	درختچه	۰/۰۰۴۲	۳	۰/۰۷۸۷	۲	۲۵/۱۷۲	۴	۰/۱۹	۲	۰/۲۳	۱
<i>Rosmarinus officinalis</i>	درختچه	۰/۰۰۴۵	۳	۰/۱۱۷۹	۳	۱۵۹/۸۰	۴	۰/۱۵	۲	۰/۱۷	۱
<i>Tamarix canariensis</i>	درخت	۰/۰۰۱	۱	۰/۰۵۵۴	۱	۴۸/۴۸	۴	۰/۰۱	۳	۳۶/۷۴	۴

این گیاه ریزومدار، گونه‌ای با ساقه‌های در حال رشد افقی می‌باشد که در امتداد سطح زمین، رشد و حرکت می‌کنند و در فواصل زمانی ریشه داده و به‌عنوان یک پوشش محافظ در برابر انواع فرسایش بسیار مفید می‌باشند. پر کردن داخل و اطراف آب‌کنند از یک گیاه ریزومدار، شانس موفقیت زیادی را ایجاد می‌کند و بهترین کار ایجاد پوشش گیاهی بعد از فصل مرطوب می‌باشد. یعنی زمانی که خطر بارندگی شدید، کمتر شده و درجه حرارت هوا برای رشد چمن کافی است (Snow et al., 2018). در پژوهشی در هنگ‌کنگ مشخص

شده که مقادیر تراکم توده ریشه *Cynodon Dactylon* و *Zoysia Matrella* بیشتر از *Paspalum notatum* است. به طوری که این دو گونه حساسیت خاک به فرسایش را به طور مؤثرتری کاهش می دهد و برای مهندسی زیستی خاک در مناطق مختلف هنگ کنگ مناسب می باشد (Zhu et al., 2015).

ساقه زیرزمینی یا "ریزوم" پنجه مرگی در شرایط خاک های مرطوب به تولید نوساقه های ماشوره ای^۱ به عنوان پنجه های جدید^۲ با طول بیش از ۲۵ سانتی متر منجر می شود که متعاقباً به دستک تبدیل می شوند. این دستک ها در سطوحی با تراکم کم به حالت خوابیده^۳ بر روی زمین قرار می گیرند. ریزومها معمولاً در عمق ۱۰ سانتی متری خاک رشد می کنند اما می توانند تا عمق ۳۵ سانتی متری نیز نفوذ یابند. حدوداً ۶۰ درصد ریزومها و ریشه های پنجه مرگی معادل ۶۰۰ گرم در مترمربع در عمق کمتر از یک متر، ۳۰ درصد در عمق ۲-۱ متر و ۱۰ درصد در عمق ۳-۲ متر خاک گسترش می یابند و برای کنترل سر آبکند و انواع فرسایش آبی بسیار مناسب می باشد (پورکاظم، ۱۳۹۹).

بیشتر سر آبکندها در طبیعت شامل یک دلتای معکوسی از آبکندهای کوچک همگرا می باشند. برای یک مجموعه چند شاخه ای از سر آبکندها می توان یک حصار نیمه دایره ای با یک خاکریز ایجاد کرد که درست در اطراف سر آبکندها قرار گیرد و آب را به طرفین هدایت کند. هنگامی که باران می بارد، این خاکریز مانع رسیدن رواناب به سر آبکندها می شود. با شروع فصل بارندگی، دسته های علفی مانند علف وتیور و *Pennisetum* و بخش هایی از گیاهان خزنده مانند *Cynodon dactylon* باید در خاک مرطوب منطقه سر آبکندها مستقر شوند. این علفها به سرعت رشد کرده و گسترش می یابند تا از فرسایش ناحیه سر آبکند، جلوگیری نمایند (Coppock et al., 2015).

گزارش هایی در مورد زنده ماندن این گیاه در دمای حدود ۱۰- درجه سانتی گراد دلالت دارد. پنجه مرگی در کلیه خاک های با زهکشی نسبتاً خوب شامل خاک های اسیدی یا قلیایی مشروط به تامین رطوبت و مواد غذایی کافی، رشد خواهد داشت و به خشکی مقاوم است. ضمناً برای مدت های طولانی شرایط غرقاب را تحمل می کند (روبینز و همکاران، ۱۹۷۰). بذور گیاه در دمای بالاتر از ۲۰ سانتی گراد جوانه می زند و در دو هفته بعد از شروع جوانه زنی، گیاهچه ها روی خاک نمایان می شوند و بعد از ۲۵ تا ۳۰ روز پنجه زنی صورت می گیرد و در شرایط عادی حدود ۴ ماه طول می کشد تا چرخه حیات گیاه تکمیل گردد. در خاک های شنی، ریزوم های این گیاه ممکن است در اعماق پایین تر از ۲۵ سانتی متر نیز مشاهده شوند، اما معمولاً حدود ۶۰ درصد از ریزوم های گونه در عمق کمتر از ۱۵ سانتی متر تمرکز دارد (لابرادا و همکاران، ۱۹۹۴). مرغ، معمولاً در خاک های عمیق ظاهر می شود که در آن تأثیر خشکسالی های تابستانی می تواند با توسعه یک نظام ریشه عمیق که به سطح آب می رسد، خنثی شود. حضور گیاه پنجه مرگی به وضوح محدود به مناطق مرتعی است که چرای دام، لایه های گیاهی را تنک نگه می دارد و اجازه نفوذ نور را می دهد. این گونه به طور گسترده از سطح دریا تا ارتفاع حدود ۲۱۶۰ متری پراکندگی دارد. در حال حاضر پراکنش آن در تمام دنیا در نواحی معتدل و نیمه گرمسیری گسترش یافته است. در مناطق معتدل، در راستای سواحل دریاها، در نواحی گرمسیری، معمولاً در مناطقی با بارندگی ۶۷۰ تا ۱۷۵۰ میلی متر و در مناطق خشک در حاشیه رودخانه ها و زمین های آبی رویش دارد (Singh et al., 2007).

وتیور:

وتیورگراس (*Chrysopogon zizanioides* L.) از خانواده *Poaceae*، گیاهی گرمسیری است که به طور طبیعی در بسیاری از مناطق جهان می روید و دارای دامنه رویش وسیعی است و برای اصلاح و احیای اراضی تخریب یافته، استفاده می شود. این گیاه، ارتفاعی معادل ۵۰ الی ۱۵۰ سانتی متر و ریشه ای به عمق ۳ الی ۴ متر دارد. وتیورگراس، در خاک های فقیر با فرسایش پذیری بالا، بسیار مؤثر است. ضمناً برای حفاظت خاک و آب، کنترل فرسایش کنار رودخانه ای، کنترل فرسایش ساحلی، کنترل فرسایش آبی و بادی و سایر موارد مربوطه استفاده می شود (احمدی بنی و همکاران، ۱۳۹۴). وتیور^۴ گیاهی چند ساله، متراکم و بلند با ساقه های سفت و چوبی است که بومی آسیای جنوبی محسوب می شود (Grimshaw, 1994). این گیاه به صورت ردیفی، موانعی متراکم با ارتفاع حدود ۱/۵ متر و با سیستم ریشه ای با عمق بیش از یک متر ایجاد می کند. به دلیل طبیعت غیر مهاجم آن و مقاومت بالا به خشکسالی، آبرفتگی و عدم چرای بیش از حد، این

^۱culm

^۲tiller

^۳prostrate

^۴Vetiveria zizanioides

گیاه یک گونه بسیار ایده‌آل برای کنترل رواناب و فرسایش خاک در محدوده وسیعی از بوم‌سازگان‌ها به‌شمار می‌آید. گیاه وتیور تنها گونه‌ای است که برای کنترل فرسایش در زمین‌های شیب‌دار ۳۰ تا ۶۰ درصد مناسب است (Blanco & Lal, 2008).

(Rostedt, ۲۰۰۴) در تحقیقی با عنوان استفاده از وتیور برای کنترل فرسایش آب‌کندی در ایالت کوئینزلند استرالیا اشاره کرده‌است تا حدود زیادی از گسترش آب‌کندها می‌توان جلوگیری نمود. (Carl i n et al., ۲۰۰۳) در بررسی تأثیر کشت گیاه وتیور در کشور استرالیا به این نتیجه رسیدند که با کشت وتیور در اراضی اسیدی حاشیه آبراهه‌ها، می‌توان علاوه بر کاهش میزان فرسایش کناری رودخانه و به دام انداختن رسوبات حاصل از جریان رواناب دامنه‌های طرفین آبراهه، از ورود مواد اسیدی حاصل از آبشویی خاک‌های اسیدی، به داخل جریان آبراهه جلوگیری کرد.

این گیاه دارای دامنه بردباری وسیع در برابر اسیدیته خاک از ۳/۳ تا ۵/۱۲ در شرایط اصلاح نکردن خاک می‌باشد و آستانه تحمل آن به شوری معال ۲۱ دسی زیمنس برمتر گزارش شده است (نورایی و فیضی، ۱۳۹۴). سیستم ریشه عمیق این گیاه باعث می‌شود که این گیاه، خشکسالی شدید را تحمل کند. بنابراین وتیورگراس می‌تواند در مناطق خشک (با بارندگی کمتر از ۲۰۰ میلیمتر در سال) استقرار یابد و پس از آن خشکی بالا را تحمل نماید (Chen et al., 2004).



شکل ۸. کشت ردیفی گیاه وتیور در مناطق مختلف فرسایشی

نی:

نی (*Phragmites australis*) گیاهی از خانواده گندمیان، چند ساله و مرتفع، با ساقه‌های زیرزمینی رونده، با ساقه‌های ماشواره‌ای ضخیم، به ارتفاع تا ۳ متر، بدون کرک و صاف می‌باشد و در سراسر نواحی معتدله جهان گسترده است. در ایران نیز اغلب در نقاط مرطوب کنار جویبارها، چمنزارهای پر آب، حاشیه دریاچه‌های دارای آب کم و بیش شور تا شیرین و در استان‌های مختلف یافت می‌شود (شکل ۹). این گیاه معمولاً در اراضی با خاک شنی و مرطوب بیشتر پیدا می‌شود. در آبراهه‌ها، در مجاورت درختان تبریزی و بید نیز می‌روید. در زمین‌های خشک هم قابلیت رویش را داشته و خشکی را تحمل می‌کند، ولی ریشه آن برای طولانی‌مدت تحمل رطوبت را نداشته و آب و هوای معتدل را دوست دارد. حسینعلی‌زاده و همکاران، (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای در زمین‌های لسی استان گلستان اشاره کردند با توجه به این که بیشتر فرسایش‌های تونلی و آب‌کندی در منطقه مورد مطالعه در دامنه‌های مقعر ایجاد شده‌اند و در نتیجه رواناب ایجاد شده فرصت تمرکز بیشتری در حفره فرسایش‌های تونلی (که عموماً منجر به آب‌کنند می‌شوند) داشته است. این مهم باعث می‌شود محیط مناسبی برای رشد گیاهان و درختان فراهم شود. در نتیجه بیش از ۳۲ درصد فرسایش‌های تونلی بررسی شده دارای پوششی از نیزارها و گونه‌های درختی سیاه تلو و انار وحشی بودند. این نتیجه به نوبه خود فرصت مناسبی جهت تثبیت فرسایش تونلی در نهشته‌های لسی به‌وسیله پوشش گیاهی از جمله توسعه نیزارها محسوب شده تا از گسترش و پیشروی بیشتر این نوع فرسایش پیشگیری کرده و با مدیریت آب و خاک به تنوع چشم‌انداز منطقه و هم‌چنین افزایش تنوع زیستی افزود.

در مجموع، گیاه نی با توجه به سرعت رویش و ریشه قوی می‌تواند گونه‌ای بسیار مناسب برای کنترل فرسایش آب‌کندی و آبراهه‌ای باشد. لازم به یادآوری است که با توجه به پژوهش‌های بسیار کم در مورد تأثیر گیاه نی بر کنترل فرسایش آب‌کندی در ایران و جهان، توصیه می‌شود نسبت به این مهم تلاش بیشتری در تحقیقات و مطالعات انجام شود.



شکل ۹. رویش و توسعه گیاه نی در کف آبکندهای لسی استان گلستان (یافته‌های تحقیق - شمال استان گلستان)

گز:

درختچه گز در برخی مناطق گرمسیری می‌تواند عمری بالغ بر هزار سال داشته باشد و از جمله درختچه‌هایی است که در مناطق بیابانی و شور رشد می‌کند. محل رویش این گیاه بیشتر در بستر آبراهه‌ها و رودخانه‌های شور و قلیایی، مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد که این خود می‌تواند پتانسیلی بر خاصیت کنترل فرسایشی آن در مسیر آبراهه‌ها و رودخانه‌ها باشد (شکل ۱۰). از دیدگاه گیاه‌شناسی، گز، درخت یا درختچه‌ای است که دارای برگ‌های کوچک سوزنی شکل و پولک مانند می‌باشد که این خاصیت نیز با افزایش ضریب زبری جریان باعث کاهش سرعت جریان و متعاقباً کاهش فرسایش می‌گردد (مسجدی و همکاران، ۱۳۸۸).



شکل ۱۰. گیاه گز در آبکندهای لسی استان گلستان (یافته‌های تحقیق - شمال شرق استان گلستان)

این گیاه از گونه‌های مختلفی برخوردار است که برخی از گونه‌های آن مثل گز شاهی (*Tamarix aphylla*) در مناطق مختلفی مشاهده می‌شوند. این گیاه، مقاومت بالایی در مقابل تغییرات دمایی از خود نشان داده و رشد مناسب آن در خاک‌های حساس به فرسایش، به‌وفور دیده می‌شود. محققان مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (۱۳۹۹) در پژوهشی تحت عنوان معرفی گونه‌های گیاهی مناسب برای احیای پوشش طبیعی در مهار فرسایش شیاری و آبکندی در شمال استان اردبیل اشاره داشتند که تعدادی از گونه‌های گیاهان بومی منطقه به‌دلیل داشتن اندام‌های هوایی و زیرزمینی می‌توانند در کنترل فرسایش شیاری و آبکندی در منطقه بسیار مؤثر باشند. لذا بر اساس مطالعات انجام شده، مشخص شد گونه‌ی گز پر شاخه (*Tamarix ramosissima*) را می‌توان برای کنترل فرسایش شیاری و آبکندی نام برد.

Tamarix canariensis در مدیریت زیستی حرکات توده‌ای مجاور رودخانه‌ها کاربرد داشته و در مقابل خم شدن در جریان‌های متمرکز، مقاومت بالایی دارد. این گونه به همراه *Juncus acutus* به‌عنوان گونه‌های مناسب در بستر آبراهه‌های موقتی محسوب می‌شوند. *Tamarix canariensis* در کمتر از ۵ سال می‌تواند به خوبی مستقر شده، پتانسیل تحمل سیلاب‌های شدید را داشته و در خاک‌های با بافت سنگین، بسیار مناسب هستند، در صورتی که *Juncus acutus* در مدیریت و کاهش فرسایش ناشی از رواناب‌های متمرکز، مفید بوده و در به دام انداختن رسوب دارای پتانسیل بالایی هستند. هر دو نوع گونه گیاهی جهت رشد و بقا به محیط‌های مرطوب نیاز دارند. ضمناً

این گونه‌ها در کاهش فرسایش در بستر آبراهه‌های موقتی بسیار مهم به‌شمار می‌آیند. این گونه گیاهی دارای ریشه‌های قوی و عمیق بوده و نسبت سطح ریشه به سطح عمودی اندام‌های هوایی حدود ۰/۸ است. این گونه گیاهی در ترکیب با *Retama sphaerocarpa* و *Juncus acutus* در مدیریت زیستی فرسایش‌های شیاری و آب‌بندی مناسب بوده و محیط مرطوبی را برای جوانه زنی بذور نیاز دارند.

سازو:

Juncus acutus در محیط‌های مرطوب مانند بسترهای آب‌بند موقت به‌منظور جلوگیری از عمیق شدن کانال، مورد کشت قرار می‌گیرد (Baets et al., 2007). این گونه گیاهی در راهبردهای مدیریت زیستی کنترل فرسایش به‌عنوان گونه مناسبی پیشنهاد شده و بیشترین مقاومت برشی خاک را در افق‌های سطحی خاک به خود اختصاص می‌دهد (304 kPa). نتایج پژوهش نشان داد، در حالی که گندمیان و *Juncus* تا حدی منجر به افزایش مقاومت برشی خاک در عمق ۱۰ سانتی‌متری می‌شوند، گونه‌هایی نظیر *Atriplex halimus* و *Anthyllis cytisoides*، *Retama sphaerocarpa*، *Salsola genistoides* اعماق بیشتر (تا نیم‌متری سطح زمین) می‌شوند. تراکم ریشه برای *Juncus acutus* (reed) و *Lygeum* (grass) حدود ۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شده است که برای مدیریت زیستی فرسایش‌های متمرکز در کانال‌ها و آبراهه‌ها توصیه می‌شوند. پراکنش طبیعی این گیاه در ایران در مناطق ساحلی دریای خزر و خلیج فارس، استان‌های خوزستان، بوشهر، گیلان، مازندران، گلستان، زیستگاه طبیعی تالاب‌ها، سواحل شور، مناطق مرطوب، محدوده ارتفاع از سطح دریا تا ۱۵۰۰ متر دیده می‌شود.

گیس پیرزن (دوخ):

گیس پیرزن / دوخ (*Stipa*) این گیاه در تمام شیب‌ها حتی در دامنه‌های شیب‌دار خیلی تند، امکان رویش داشته و بعد از آتش‌سوزی و چرا، می‌تواند به عنوان یک تقویت‌کننده خاک عمل کند. این گیاه مقاوم به خشکی، با توجه به ویژگی برگ‌هایش قابلیت تحمل درجه حرارت بالا را دارد و تلفات خاک را در اثر فرسایش بین شیاری و قطرات باران در مقایسه با خاک لخت، بسیار کاهش می‌دهد. *Stipa tenacissima* از جمله گونه‌های گیاهی مناسب برای فرسایش شیاری و آب‌بندی است. این گیاه را می‌توان برای پوشش مجدد تراس‌های متروکه استفاده کرد. زیرا این گونه با خشکسالی سازگار است و محافظت خوبی از فرسایش جریان‌های متمرکز و حرکات توده‌ای کم عمق ارائه می‌دهد. همچنین برای تثبیت دامنه‌های شیب‌دار رو به جنوب، کاربرد دارد (Baets et al., 2008). از دیدگاه کلی، *Stipa* علاوه بر پوشش سطحی خوب و تراکم بالای ریشه، برای کنترل فرسایش بسیار مناسب به‌نظر می‌رسد. این گیاه در مقایسه با *Lygeum* برای مناطق خشک و رژیم بارندگی نامتعادل از تناسب بالاتری در حفاظت آب و خاک برخوردار است (PUGNAIRE & HAASE, 1996). بر طبق نظرات (Garcia-Fuentes et al., 2001) ریشه‌های *Lygeum* در حفاظت خاک در دامنه‌های شیب‌دار، بسیار کارا هستند. از دیدگاه بررسی رشد گونه‌ها در اراضی بایر *Rosmarinus officinalis* و *Dorycnium pentaphyllum* در کنترل فرسایش‌های شیاری و آب‌بندی از تناسب قابل قبولی برخوردار هستند. علاوه بر این که گونه *Rosmarinus officinalis* پتانسیل به دام‌اندازی رسوبات و کاه و کلش را دارد، در کنترل فرسایش پاشمانی (Hidalgo et al., 1997) و بین شیاری (Bochet et al., 2006) بسیار موثر بوده و دوره بلوغ این گیاه برای کارایی مناسب حدود ۳ الی ۵ سال است. هرچند به‌علت پایین بودن تراکم ریشه در کاهش فرسایش‌های آب‌بندی نسبت به فرسایش‌های بین شیاری و پاشمانی از تناسب پایین‌تری برخوردار است (Bochet et al., 2006). بنابراین براساس نوع فرسایش و نسبت اندام‌های هوایی به زیرزمینی گیاهان، کارایی آن‌ها متفاوت است. از این رویکرد طبق (De Baets et al., 2009) ترکیب گیاهانی با پوشش متراکم فوقانی و ریشه متراکم و عمیق در کنترل فرسایش‌های متعدد (خطی و غیر خطی) در یک مکان، مناسب است. در مناطق خشک و نیمه خشک به اذعان (Gökbulak, 2003) سامانه ریشه‌ای عمیق و متراکم بویژه در مرحله اولیه رویش، به‌عنوان یک خصوصیت بارز در تعیین گیاه برای کنترل فرسایش کاربرد دارد.

در مدیریت زیستی دیواره‌های آب‌بند و دامنه‌های شیب‌دار و همچنین مدیریت حرکات توده‌ای کم عمق، ترکیبی از گونه‌های علفی که منجر به مسلح کردن خاک سطحی شده و همچنین گونه‌های گیاهی با ریشه‌های عمیق که مسلح کردن خاک‌های عمیق را عهده‌دار هستند، مانند *Salsola genistoides* و یا *Anthyllis cytisoides* توصیه می‌شود. در مدیریت زیستی دیواره‌های رودخانه‌ها *Retama sphaerocarpa* نیز به‌عنوان گونه‌ای مناسب پیشنهاد شده است.

کهور دره‌ای:

کهور، درختچه‌ای مقاوم به شرایط نامطلوب بوده، گرم‌پسند و نورپسند است. این گونه در خاک‌های سنگین در زمین‌های زراعی رها شده، اطراف روستاها و آب‌بندهای غرب لوت از رشد قابل توجهی برخوردار بوده، دارای ریشه عمیق بوده و از سفره زیرزمینی استفاده

می‌نماید. گونه *Prosopis koelziana* با داشتن خار، برگ‌های کوچک، خزان و یا کاهش سطح برگ در فصل خشک سال و وابستگی به سفره‌های آب زیرزمینی در برخی از رویشگاه‌ها دارای تراکم بالنسبه بالایی است و همچنین احتمال بهره‌گیری از رطوبت موجود در هوا در مناطق ساحلی با توجه به منابع موردبررسی (امتحانی، ۱۳۸۶؛ پیمانی‌فرد، ۱۳۶۸) می‌توان آن را نیز جزء گونه‌های بیابانی به حساب آورد.

پوسته شاخه‌های این گیاه، دارای خارهای مسطح، برگ‌های مرکب دو شانهای زوج، برگ‌چه‌های مستطیلی مایل به طول ۱۰ تا ۱۶ میلی‌متر و به رنگ خاکستری می‌باشد و به تعداد ۷ تا ۱۲ جفت روی هر شانه دیده می‌شود. دارای گل‌آذین‌های خوشه‌ای با ۵ گلبرگ و ۱۰ پرچم است. میوه نیام و در خوشه‌های بلند به‌صورت آویزان، باریک، موج‌دار و غالباً به رنگ سبز مایل به ارغوانی است (امتحانی، ۱۳۸۶). چوب این گونه مصارف سوختی دارد و برای احداث بادشکن نیز استفاده می‌شود. در ضمن برگ‌های این درخت از نظر پروتئین غنی بوده و میوه‌های آن نیز ارزش غذایی زیادی دارد و می‌توان از این گیاه، برای توسعه و احیای مراتع مشجر استفاده نمود.



شکل ۱۱- استقرار گیاه کهور درختچه‌ای در داخل آب‌کنند (یافته‌های تحقیق)

دیوخار:

دیوخار (*Lycium depressum Stocks*) گونه‌ای درختچه‌ای با شاخه‌های بلند، خاردار، برگ‌های کشیده و نیزه‌ای، به طول ۸ - ۵ سانتی‌متر و عرض ۵۰ - ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. قاعده برگ‌ها در این گونه باریک و دارای دم‌برگ، جام گل قیفی، به رنگ ارغوانی یا بنفش به طول ۱۲ - ۸ میلی‌متر، دارای ۵ لبه کوتاه استوانه‌ای یا تخم‌مرغی با حاشیه مژدار، پرچم‌ها مساوی و بلندتر از جام گل و میوه به شکل حبه کوچک به قطر ۵ میلی‌متر، ارتفاع ۲/۵-۱/۵ متر و قطر تاج‌پوشش به‌طور متوسط ۱/۵ متر است (حسینعلی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳). این گونه در اوایل بهار شروع به رشد کرده و رشد اندام‌های روئیده در بهار و پاییز انجام می‌شود. برگ‌های آن در اواخر فروردین ظاهر شده و در اواسط تیر به منظور کاهش سطح تعرق، بخشی از آن می‌ریزد و مجدداً در اواخر شهریور به تعداد برگ‌ها افزوده می‌شود و تا آبان بر روی آن باقی می‌ماند. این گونه در اواسط اردیبهشت به گل می‌نشیند و گل‌ها تا اواخر خرداد دوام داشته و در تیر، به میوه تبدیل می‌شوند. میوه تا مرداد روی گیاه دیده می‌شود و سپس می‌ریزد. این گیاه از آذر به خواب زمستانه رفته و در صورت وجود رطوبت کافی، برگ‌ها بزرگتر، ماندگاری آن‌ها روی گیاه بیشتر و در سرتاسر تابستان، گل و میوه همزمان روی درختچه حضور دارند. دیوخار گونه‌ای مقاوم به شوری است و در خاک‌های شور و غیر شور، عمیق تا نیمه‌عمیق و خاک‌های با بافت سنگین تا سبک و همچنین خاک‌های واریزه‌ای و بستر رودخانه‌ها و آبراهه‌های فصلی به صورت طبیعی رشد می‌کنند (شکل ۱۲). این گونه در خاک‌های شنی و رسی لومی با اسیدیته ۷/۷-۷/۳ و هدایت الکتریکی ۱۸/۲-۲۶/۹ میلی‌موس رشد کرده و میزان ۴۸٪ آهک در عمق‌های سطحی و زیرین را به خوبی تحمل می‌کند. گونه دیوخار از طریق بذر، قلمه و همچنین پاجوش تکثیر می‌یابد و در برنامه‌های بیابان‌زدایی، تثبیت ماسه‌های روان و ایجاد فضای سبز مناطق مرکزی ایران به‌منظور جلوگیری از کاهش رطوبت و حفاظت خاک استفاده می‌شود. از طرفی این گونه به علت هرس‌پذیری و داشتن خار برای پرچین و حصار بسیار مناسب بوده و در صورت استفاده از دیوخار در ایجاد فضای سبز و احداث پرچین، دور آبیاری ۱۶ روزه برای آن توصیه می‌گردد (حسینعلی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳).



شکل ۱۲- استقرار گیاه دیوچار در شمال استان گلستان (یافته‌های تحقیق -شمال استان گلستان)

نتیجه‌گیری:

پژوهش حاضر با هدف ارائه الگویی جهت انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب به منظور مدیریت زیستی فرسایش شیاری و آب‌کندی انجام شد که نتایج عبارتند از: (۱). اهمیت و ضرورت مدیریت زیستی فرسایش شیاری و آب‌کندی به‌عنوان فرآیندهای پویا و تخریب‌کننده سرزمین، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی، سلامت بوم‌سازگان و پایداری منابع آب و خاک محسوب می‌شوند. شیوه‌های مکانیکی (ساخت سدهای اصلاحی- چکدم‌ها) اگرچه مؤثر هستند، اما اغلب پرهزینه، کوتاه‌مدت و فاقد انطباق‌پذیری با شرایط محیطی هستند. در مقابل، رویکردهای زیستی با تکیه بر پوشش گیاهی: کم‌هزینه، پایدار، بوم‌محور و سازگار با طبیعت بوده و همزمان، خدمات بوم‌شناختی چون تنوع زیستی، بهبود ساختمان خاک و نفوذپذیری را ارتقا می‌دهند. (۲). ویژگی‌های کلیدی گیاهان مؤثر در کنترل فرسایش شیاری و آب‌کندی: انتخاب گونه‌های گیاهی باید مبتنی بر ویژگی‌های مورفولوژیکی هوشمندانه باشد، نه صرفاً ظاهر سطحی. مهم‌ترین ویژگی‌های مطلوب عبارتند از: (الف). ریشه‌های عمیق، مترکم و فیبری که انسجام خاک را افزایش می‌دهند و در برابر جریان‌های متمرکز مقاومت نشان می‌دهند. (ب). ساقه‌های سخت و مقاوم که انرژی جریان رواناب را جذب کرده و سرعت آن را کاهش می‌دهند. (ج). تاج‌پوشش مترکم برای کاهش ضربه قطرات باران و کاهش جداشدگی ذرات خاک. (د). قابلیت تحمل تنش‌های محیطی (خشکی، رطوبت، شوری، مدفون شدن با رسوب). (ر). توانایی تکثیر رویشی از طریق ریزوم یا گره‌های زیرزمینی برای خودترمیمی. تأکید مقاله بر اولویت ریشه‌های زیرزمینی (نه تنها بیومس سطحی) در کنترل فرسایش‌های متمرکز (آب‌کندی و شیاری) است؛ درحالی‌که بسیاری از روش‌های سنتی تنها بر تاج‌پوشش تمرکز دارند. ترکیب گونه‌های چوبی (با ریشه‌های عمیق) و علفی (با ریشه‌های سطحی مترکم) برای تثبیت همزمان لایه‌های سطحی و عمیق خاک پیشنهاد شده است. همچنین بررسی برخی از شاخص‌های کمی مانند تراکم ساقه، پتانسیل تله‌اندازی رسوب، شاخص سفتی و انسجام ریشه برای انتخاب گونه بر اساس نوع فرسایش و شرایط محلی مورد تأکید است. تجربه‌های میدانی سایر مطالعات به‌عنوان بستری برای تعمیم‌پذیری نتایج و انتخاب گونه‌های بومی، مدنظر قرار گیرد. همچنین بر این نکته تأکید می‌کند که مدیریت زیستی نباید به‌صورت کلیشه‌ای و یک‌شکل اجرا شود، بلکه باید با در نظر گرفتن ویژگی‌های بوم‌سازگان محلی، نوع فرسایش، خصوصیات خاک و آب‌وهوا، گونه‌های گیاهی بهینه انتخاب شوند. علاوه بر این، تلفیق دانش علمی و تجربه‌های میدانی، همراه با حمایت‌های سیاستی و مشارکت جوامع محلی، برای موفقیت پروژه‌های احیای زیستی ضروری است. این نتیجه‌گیری نشان می‌دهد که مدیریت زیستی فرسایش تنها یک راهکار فنی نیست، بلکه یک راهبرد پایدار برای حفاظت از منابع طبیعی در چارچوب توسعه پایدار کشور محسوب می‌شود. در نهایت، گونه‌های گیاهی پیشنهادی با تأکید بر سازگاری اقلیمی و بوم‌شناختی شرایط ایران به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک برای مدیریت زیستی فرسایش‌های آب‌کندی و شیاری به همراه خصوصیات بارز آن‌ها به شرح جدول شماره ۲ معرفی می‌شوند.

جدول ۲. گونه‌های گیاهی مناسب مدیریت زیستی فرسایش‌های آب‌کندی و شیاری

گونه	خصوصیات منحصربه‌فرد
وتیور	ریشه‌های عمیق (>۳ متر)، تحمل خشکی و آب‌گرفتگی، غیرتهاجمی و مناسب شیب‌های تند (۶۰-۳۰٪)
پنجه‌مرغی	ریزوم‌دار، خزنده، تحمل شرایط سخت، توانایی احیای سریع حتی پس از مدفون شدن
نی	رشد سریع در شرایط مرطوب، ریشه قوی، مؤثر در تثبیت بستر آب‌کندها (با تأکید بر وجود شواهد میدانی در لس‌های گلستان)
گز	مقاوم در برابر شوری و خشکی، شاخه‌های با زبری بالا، مناسب حاشیه رودخانه‌ها و آبراهه‌ها
دیورخار	بومی، مقاوم به شوری، قابلیت استفاده در پرچین یا پوشش حفاظتی، مناسب مناطق مرکزی و ساحلی
کهور دره‌ای	ریشه عمیق، وابسته به سفره آب زیرزمینی، مناسب احیای اراضی تخریب‌شده در بیابان‌ها و احیای آب‌کندها
گیس پیرزن	سازگار با خشکسالی، مناسب احیای فرسایش شیاری و آب‌کندی و دامنه‌های شیب‌دار

منابع

- احمدی بنی، معصومه؛ نیک‌نهاد قماخر، حمید؛ مارامایی، مشهدقلی؛ عظیمی، مژگان‌السادات (۱۳۹۴). اثر گونه و تیورگراس (*Chrysopogon zizanioides*) در برخی از خصوصیات خاک (مطالعه موردی: ایستگاه کچیک، مراوه‌تپه، استان گلستان)، مرتع. ۲۶۸-۲۸۰: (۳) ۹. <https://www.sid.ir/paper/136312/fa>
- اعتراف، حسین؛ درّی، محمدعلی؛ و نیک‌کامی؛ داود (۱۳۹۳). تأثیر نوع پوشش گیاهی بر رواناب و رسوب و مواد غذایی خاک اراضی شیب‌دار مراوه‌تپه. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۶(۳)، ۲۲۴-۲۳۱. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2014.101627>
- امتحانی، محمدحسن. (۱۳۸۶). ویژگی‌های کهور درختچه ای و کاربرد آن در تثبیت ماسه‌های روان مناطق گرمسیری جنوب ایران. مجله جنگل و مرتع، ۷۴: ۸۱-۸۵. <https://www.magiran.com/paper/showpdf/74c947ef-f45a-4062-8f19-3733f8026048?p=441749&m=1226>
- پارسادوست، فرزاد؛ جابرالانصار، زهرا؛ و برهانی، مسعود (۱۴۰۲). بررسی ویژگی‌های پوشش گیاهی گونه‌های گیاهی سازگار با حفاظت خاک مارن‌های شهرستان کاشان. مدیریت بیابان، ۱۱(۲)، ۶۱-۷۶. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24763985.1402.11.2.5.8>
- پورکاظم، اسماعیل (۱۳۹۹). مشخصات و کنترل علف هرز پنجه مرغی، مقالات کشاورزی اندیشه سبز پاریسی. <https://allahsoso.blogfa.com/post/1038/-%D9%85%D8%B4%D8%AE%D8%B5%D8%A7%D8%AA-%D9%88-%DA%A9%D9%86%D8%AA%D8%B1%D9%84-%D8%B9%D9%84%D9%81-%D9%87%D8%B1%D8%B2-%D9%BE%D9%86%D8%AC%D9%87-%D9%85%D8%B1%D8%BA%DB%8C-%D8%9B-Cynodon-dactylon-introduction-control>
- پیمانی فرد، بهروز (۱۳۸۶). مطالعاتی پیرامون مناطق خشک بیابانی در مجموعه مقالات تحقیقات منابع طبیعی، انتشارات موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع، شماره ۵۵، صفحه ۶۷-۵۶.
- ثروتی، محمدرضا؛ حسین زاده، محمدمهدی؛ خضری، سعید؛ و منصوری، عادل (۱۳۸۷). پهنه‌بندی حرکات توده ای در مسیر سندج-دهگلان با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۱۷(۶۸)، ۳۲-۲۵. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.25883860.1387.17.68.5.3>
- جبله، علی؛ نجفی نژاد، علی؛ حسینعلی زاده، محسن؛ محمدیان بهبهانی، علی؛ و گلکاریان، علی. (۱۳۹۷). بررسی نقش مناطق حائل گیاهی در کاهش میزان فرسایش و تولید رسوب با استفاده از مدل WEPP. مطالعه موردی: یک دامنه لسی زراعی در شهرک عرفان گرگان. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۹(۵)، ۱۰۷۱-۱۰۸۲. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.241248.667753>
- چوبین، بهرام؛ رحمتی، امید؛ سلیمانپور، سید مسعود؛ شادفر، صمد؛ و نجفی ایگدیر، احمد (۱۴۰۳). مدلسازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در مناطق فاقد آمار، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵ (۱۱)، ۲۷۱۳-۲۱۸۹. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.381049.669782>
- حسینعلی‌زاده، محسن؛ علی‌نژاد، محمد؛ زارعی، حمید؛ و جلالی‌فرد، علیرضا (۱۳۹۸). فرسایش تونلی، تهدید یا فرصت. مدیریت اراضی، ۷(۲): ۱۶۵-۱۷۷. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23456205.1398.7.2.5.0>
- حسینعلی‌زاده، محسن؛ یگانه، حسن؛ خرمن‌دار، خدیجه؛ سعادت‌فر، امیر. (۱۴۰۳). بررسی گیاه پالایی خاک‌های آلوده اراضی محدوده کارخانه ید استان گلستان به فلزات سنگین با استفاده از گونه دیوچار (*Stocks Lycium depressum*)، نشریه مهندسی اکوسیستم بیابان، ۱۳(۲): ۲۴-۱. <https://doi.org/10.22052/deej.2024.255242.1068>
- حسینی توسل، مرتضی؛ و یوسفی خانقاه، شهرام (۱۳۸۶). ارائه روشی برای مدیریت و احیای حوزه‌های آبخیز با استفاده از برنامه‌های مناسب بیولوژیکی (مطالعه موردی حوزه آبخیز گرکباغی). چهارمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری/ایران مدیریت حوزه های آبخیز، کرج. <https://civilica.com/doc/44889>
- حسینی، سیده مطهره؛ مساعدی، ابوالفضل؛ ناصری، کمال الدین؛ و گلکاریان، علی (۱۳۹۱). شناسایی مهم‌ترین عوامل موثر بر فرسایش شیاری در واحدهای تپه ماهوری جنوب غرب شهرستان مشهد. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱(۲)، ۷۱-۸۳. <https://www.sid.ir/paper/472588/fa>
- داودی راد، علی‌اکبر؛ و محمدی، مجید (۱۴۰۱). بررسی دقت نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش آب‌کندی با استفاده از روش‌های SVM و

MARS در حوزه آبخیز شازند. *مجله علوم ومهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۶(۵۹)، ۱۲-۲۲. <http://jwmsei.ir/article-1-1040-fa.html>

دریکوندی، خسرو؛ فتحی مقدم، منوچهر؛ بینا، محمود؛ و مسجدی، علیرضا (۱۳۸۸). بررسی اثر نسبت استغراق و سرعت جریان روی ضریب زبری در سواحل رودخانه‌ها و دشت‌های سیلابی با پوشش گیاهی در حالت غیر مستغرق. *همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران (مدیریت پایدار بلایای طبیعی)*. <https://www.sid.ir/paper/817109/fa>

دلبری، مهدی؛ و امیراحمدی، ابوالقاسم (۱۳۹۵). تأثیر شبکه‌ی ریشه‌ای و آسمانه‌ی گیاهی گونه‌ی سبذ بر فرسایش بادی در منطقه‌ی سبزواری. *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۶ (۲): ۴۶-۵۸. <https://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-293-fa.html>

دودکانلو میلان، احد؛ آقایی، سمانه؛ و اسدی، حسین (۱۴۰۴). مقیاس‌پذیری فرسایش شیاری در یک خاک لومی شنی در شرایط شبیه‌سازی مزرعه‌ای. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۶(۱)، ۹۱-۱۰۴. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.382458.669795>

شاه کرم، بابک؛ و بایرام زاده، ویلما (۱۳۹۲). کارآیی ریشه‌های از خاک بیرون زده گونه لور جهت برآورد میزان فرسایش خاک: مطالعه موردی در دره حسن آباد چالوس، دومین همایش ملی حفاظت و برنامه ریزی محیط زیست، همدان، دوره ۵، شماره ۳، صفحه ۳۸-۲۹. <https://civilica.com/doc/232294/>

شهبازی، علی؛ و یزدی پور، عبدالرحمن (۱۳۸۷). بررسی امکان کنترل فرسایش خندقی به وسیله پرچین‌های گیاهی در منطقه سلامات اهواز. *تهران، ایران: مراکز جهاد دانشگاهی*. <https://www.sid.ir/paper/787357/fa>

طلایی، رضا؛ رستمی کیا، یونس؛ عظیمی مطعم، فرزانه؛ جعفری اردکانی، علی؛ و پیروان، حمیدرضا (۱۴۰۱). روشی برای انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب در مهار فرسایش شیاری و آبکندی در جنوب استان اردبیل. *دانش آب و خاک*، ۳۲(۴)، ۱۱۷-۱۳۳. <https://doi.org/10.22034/ws.2021.41467.2373>

فیروزی، امینه؛ اکبری، حسن؛ لطفعلیان، مجید؛ و مقدمی راد، مصطفی (۱۳۹۵). بررسی تأثیر پوشش گیاهی بر فرسایش خاک، چهارمین همایش ملی انجمن‌های علمی دانشجویی رشته‌های کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست، کرج. پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران. <https://civilica.com/doc/518526>

محمدی، شاهین؛ کریم‌زاده، حمیدرضا؛ علیرزاده، میثم (۱۳۹۷). برآورد مکانی فرسایش خاک کشور ایران با استفاده از مدل RUSLE. *اکوهیدرولوژی*، ۵(۲)، ۵۵۱-۵۶۹. <https://doi.org/10.22059/ije.2018.239777.706>

مرادیان، مریم؛ غریب زاده، امین؛ فلاحی، محمدرضا؛ و جوزی، مهدی (۱۳۹۱). نقش پوشش گیاهی در کاهش فرسایش خاک از دیدگاه ژئومورفولوژی، *اولین همایش ملی بیابان (علوم، فنون و توسعه پایدار)*، تهران. <https://civilica.com/doc/160504>

مقصودی، مهران؛ گورابی، ابوالقاسم؛ و دارابی شاهماری، سحر (۱۳۹۲). بررسی تأثیر عامل پوشش گیاهی بر فرسایش آبی مطالعه موردی: حوزه آبخیز رزین. *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۳ (۴): ۴۳-۵۷. <http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-49-fa.html>

نورایی، زهرا؛ و فیضی، زهرا (۱۳۹۴). استفاده از وتیور گراس برای حفاظت آب و خاک، سومین همایش ملی انجمن‌های علمی دانشجویی رشته‌های کشاورزی و منابع طبیعی، کرج. <https://civilica.com/doc/457563/>

واعظی، علی رضا؛ و ورقائی، لیلا (۱۴۰۲). بررسی تأثیر طول نوارهای کشت بر فرسایش شیاری و دانه‌بندی ذرات فرسایشی در کشت‌زار دیم. *تحقیقات کاربردی خاک* ۱۱(۲)، ۷۰-۵۹. <https://doi.org/10.30466/asr.2023.121365>

واعظی، علی‌رضا؛ و بخشی راد، اولدوز (۱۳۹۹). بررسی ویژگی‌های مورفومتری آبکندها و عوامل مؤثر بر گسترش آن‌ها در کاربری زراعت دیم در جنوب استان آذربایجان شرقی. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۱(۶)، ۱۳۷۳-۱۳۸۴. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.277316.668141>

REFERENCESS

- Abdalla, K., Mutema, M., & Hill, T. (2020). Soil and organic carbon losses from varying land uses: a global meta-analysis. *Geographical Research*, 58(2), 167-185. <https://doi.org/10.1111/1745-5871.12389>
- Abdulfatai, I. A., Okunlola, A. I., Akande, W. G., Momoh, L. O., & Ibrahim, K. O. (2014). Review of gully erosion in Nigeria: causes, impacts and possible solutions. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 3(2),

- 125-129. <https://doi.org/10.12691/jgg-2-3-8>
- Ahmadi Bani, M., Niknahad ghermakher, H., Marmaee, M., Azimi, M, A. (2016). Effects of planting Vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) on some soil physico-chemical characteristics (A case study: Kechik station, Maraveh tapeh, Northen Iran), *Journal of Rangeland* (3)9: 268-280. (in Persian). <http://rangelandsrm.ir/article-1-260-fa.html>
- Afenzar, M., Achiban, H., & Abahrour, M. (2025). Quantitative analysis of rill erosion and contributing factors in the Oued Aghrouz catchment, Morocco. *Environmental & Socio-economic Studies*, 13(2), 1-12. <https://doi.org/10.2478/environ-2025-0007>
- Afshar, R. K., Nilahyane, A., Chen, C., He, H., Stevens, W .B., & Iversen, W. M. (2019). Impact of conservation tillage and nitrogen on sugarbeet yield and quality. *Soil and Tillage Research*, 191, 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.017>
- Amézketa, E. (1999). Soil aggregate stability: a review. *Journal of sustainable agriculture*, 14(2-3), 83-151. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08
- Angers, D. A., & Caron, J. (1998). Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry*, 42(1), 55-72. <https://doi.org/10.1023/A:10059440253۴۳>
- Aqeel, M., Murtaza, N., Ahmed, W., Pasha, G. A., Ghumman, A. R., Ahmed, A., Riaz, K., & Zhao, X. (2025). Soil erosion on steep hills with varying vegetation patterns. *Physics of Fluids*, 37(1). <https://doi.org/10.1063/5.0245155>
- Archer, N., Quinton, J & ,Hess, T. (2002). Below-ground relationships of soil texture, roots and hydraulic conductivity in two-phase mosaic vegetation in South-east Spain. *Journal of Arid Environments*, 52(4), 535-553. <https://doi.org/10.1006/jare.2002.1011>
- Auerswald, K., Oberneder, A., Wiesmeier, M., Ebertseder, F., & Fritz, M. (2025). Erosion impact of cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) stands established with and without nurse crop. *Soil Use and Management*, 41(1), e70047. <https://doi.org/10.1111/sum.70047>
- Baets, S. D., Poesen, J., Knapen, A., & Galindo, P. (2007). Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 32(9), 1323-134 .<https://doi.org/10.1002/esp.1470>
- Baets, S. D., Torri, D., Poesen, J., Salvador, M., & Meersmans, J. (2008). Modelling increased soil cohesion due to roots with EUROSEM. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 33(13), 1948-1963. <https://doi.org/10.1002/esp.1647>
- Bennett, S. J., & Wells, R. R. (2019). Gully erosion processes, disciplinary fragmentation, and technological innovation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(1), 46-53. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.4522>
- Blanco, H., & Lal, R. (2008). *Principles of soil conservation and management* (Vol. 167169). Springer New York. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>
- Bochet, E., Poesen, J., & Rubio, J. L. (2006). Runoff and soil loss under individual plants of a semi-arid Mediterranean shrubland: influence of plant morphology and rainfall intensity. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 31(5), 536-549. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.1351>
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J. E., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., & Ballabio, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (۲۰۱۵-۲۰۲۰). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(36), 21994-22001. <https://doi.org/10.1073/pnas.200140311>
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.۰۰۵>
- Burylo, M., Rey, F., Mathys, N., & Dutoit, T. (2012). Plant root traits affecting the resistance of soils to concentrated flow erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(14), 1463-1470. <https://doi.org/10.1002/esp.3248>
- Cammeraat, E., van Beek, R., & Kooijman, A. (2005). Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain. *Plant and Soil*, 278(1), 135-147. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-5893-1>
- Cao, L., Zhang, K., & Zhang, W. (2009). Detachment of road surface soil by flowing water. *Catena*, 76(2), 155-162. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.10.005>
- Carlin, G., Truong, P., Cook, F., Thomas, E., Mischke, L., & Mischke, K. (2003). Vetiver Grass Hedges for Control of Runoff and Drain Stabilisation, Pimpama Queensland .*Technical Report. CSIRO Land and Water*(46). <https://doi.org/10.4225/08/585c14e93454a>
- Cavaliere, K. M. V., da Silva, A. P., Tormena, C. A., Leão, T. P., Dexter, A. R., & Håkansson, I. (2009). Long-

- term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. *Soil and Tillage Research*, 103(1), 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.014>
- Chao, Y., Liu, W., Chen, Y., Chen, W., Zhao, L., Ding, Q., Wang, S., Tang, Y.-T., Zhang, T., & Qiu, R.-L. (2016). Structure, variation, and co-occurrence of soil microbial communities in abandoned sites of a rare earth elements mine. *Environmental Science & Technology*, 50(21), 11481-11490. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02284>
- Chen, Y., Shen, Z., & Li, X. (2004). The use of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. *Applied Geochemistry*, 19(10), 1553-1565. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.02.003>
- Choubin, B., Rahmati, O., Soleimanpour, S .M., Shadfar, S., & Najafi Eigdir, A. (2025). Modeling soil loss due to gully erosion in the data-scarce regions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(11), 2173-2189. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.381049.669782>
- Choubin, B., Rahmati, O ., Tahmasebipour, N., Feizizadeh, B., & Pourghasemi, H. R. (2018). Application of fuzzy analytical network process model for analyzing the gully erosion susceptibility. In *Natural hazards gis-based spatial modeling using data mining techniques* (pp. 105-125) .Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73383-8_5
- Clewell, A., Aronson, J., & Winterhalder, K. (2004). The SER international primer on ecological restoration. https://cdn.ymaws.com/www.ser.org/resource/resmgr/custompages/publications/ser_publications/ser_primer.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Coppock, D. L., Norton, B. E., Tadele, D., Doyo, J., Eba, B., & Teshome, D. (2015). Sieve structures to control gully erosion on the borana plateau. https://digitalcommons.usu.edu/envs_facpub/1436/
- Dabney, S. M & , Gumiere, S. J. (2020). Erosion by Water: Vegetative Control. In *Managing Soils and Terrestrial Systems* (pp. 395-406). CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780429346255-48/erosion-water-vegetative-control-seth-dabney-silvio-gumiere>
- Dahanayake, A., Webb, J., Greet, J., & Brookes, J. (2024). How do plants reduce erosion? An Eco Evidence assessment. *Plant Ecology*, 225(6), 593-604. <https://doi.org/10.1007/s11258-024-01414-9>
- Davodirad, A., & Mohammady, M. (2022). Accuracy Assessment of Gully Erosion Susceptibility Map Using SVM and MARS Methods in Shazand Watershed. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 16(59), 12-22. (in Persian). <http://jwmsei.ir/article-1-1040-fa.html>
- De Baets, S., Poesen, J., Gyssels, G., & Knapen, A. (2005). Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology*, 76(1-2), 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.10.002>
- De Baets, S., Poesen, J., Knapen, A., Barberá, G. G., & Navarro, J. (2007). Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff. *Plant and Soil*, 294(1), 169-183 .
- De Baets, S., Poesen, J., Meersmans, J., & Serlet, L. (2011). Cover crops and their erosion-reducing effects during concentrated flow erosion. *Catena*, 85(3), 237-244. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.009>
- De Baets, S., Poesen, J., Reubens, B., Muys, B., De Baerdemaeker, J., & Meersmans, J. (2009). Methodological framework to select plant species for controlling rill and gully erosion: application to a Mediterranean ecosystem. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(10), 1374-1392. <https://doi.org/10.1002/esp.1826>
- Delbari, S. M., Amirahmadi, A. (2016). Effects of the Root Network and Canopy of *Stipagrostis pennata* on wind erosion in Sabzevar . *E.E.R.* 2016; 6 (2) :46-58. (in Persian). <https://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-293-fa.html>
- Díaz, M. A. R., Pereira, E. D., & de Vente, J. (2019). Ecosystem services provision by gully control: A review. *Cuadernos de investigación geográfica: Geographical Research Letters*, 45(1), 333-366. <https://doi.org/10.18172/cig.3552>
- Dirikvandi, K., Fathi-Moghadam, M., Bina, M., & Masjedi, A. (2009). Investigation of the effect of submergence ratio and flow velocity on roughness coefficient in riverbanks and floodplain fields with vegetative cover under non-submerged conditions. In *Proceedings of the National Conference on Watershed Science and Engineering of Iran (Sustainable Management of Natural Disasters)*. (in Persian). <https://www.sid.ir/paper/817109/fa>
- DoodkanluoMilan, A., Aghaei, S., Asadi, H. (2025) Rill erosion scaling in a sandy loam soil under field simulation, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (1),91-104. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.382458.669795>

- Duan, X., Bai, Z., Rong, L., Li, Y., Ding, J., Tao, Y., Li, J., Li, J., & Wang, W. (2020). Investigation method for regional soil erosion based on the Chinese Soil Loss Equation and high-resolution spatial data: Case study on the mountainous Yunnan Province, China. *Catena*, 184, 104237. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104237>
- Eisenhauer, N., Hines, J., Isbell, F., Van Der Plas, F., Hobbie, S. E., Kazanski, C. E., Lehmann, A., Liu, M., Lochner, A., & Rillig, M. C. (2018). Plant diversity maintains multiple soil functions in future environments. *Elife*, 7, e41228. <https://doi.org/10.7554/eLife.41228>
- Emtehani, M. H. (2007). Characteristics of shrub-type kahoor and its application in stabilizing moving sands in tropical regions of southern Iran. *Journal of Forest and Range*, 74, 81–85. (in Persian). <https://www.magiran.com/paper/showpdf/74c947ef-f45a-4062-8f19-3733f8026048?p=441749&m=1226>
- Esmali, A., Kavian, A., Jafarian, Z., & Kavianpoor, A. H. (2015). Effect of vegetation covers on decreasing runoff and soil loss using rainfall simulation in Nesho Rangeland, Mazandaran Province. *Geography and Environmental Planning*, 26(2), 179-190. https://gep.ui.ac.ir/article_18734_en.html
- Eteraf, H., Dorri, M. and Nikkami, D. (2014). The effect of plants on runoff, sediment yield and soil fertility on sloppy lands of Maraveh-Tapeh. *Watershed Engineering and Management*, 6(3), 224-231. (in Persian). <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2014.101627>
- Eviner, V. T., & Chapin III, F. S. (2003). Functional matrix: a conceptual framework for predicting multiple plant effects on ecosystem processes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34(1), 455-485. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132342>
- Fattet, M., Fu, Y., Ghestem, M., Ma, W., Foulonneau, M., Nespoulos, J., Le Bissonnais, Y., & Stokes, A. (2011). Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength. *Catena*, 87(1), 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.05.006>
- Firoozi, A., Akbari, H., Lotfalian, M., & Moghaddami Rad, M. (2016). The effect of vegetation on soil erosion. In Proceedings of the 4th National Conference of Student Scientific Associations in Agriculture, Natural Resources and Environment (Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran). (in Persian). <https://civilica.com/doc/518526>
- Garcia-Fuentes, A., Salazar, C., Torres, J., Cano, E., & Valle, F. (2001). Review of communities of *Lygeum spartum* L. in the south-eastern Iberian Peninsula (western Mediterranean). *Journal of Arid Environments*, 48(3), 323-339. <https://doi.org/10.1006/jare.2000.0756>
- García-Ruiz, J. M. (2010). The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. *Catena*, 81(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.001>
- Gemechu, L. H. (2025). The Status of Gully Erosion, Driving Factors and Management Options in Ethiopia: A Review. *Journal of Experimental Agriculture International*, 47(3), 319-326. <https://doi.org/10.9734/jeai/2025/v47i33338>
- Ghidey, F., & Alberts, E. (1997). Plant root effects on soil erodibility, splash detachment, soil strength, and aggregate stability. *Transactions of the ASAE*, 40(1), 129-135. <https://doi.org/10.13031/2013.21257>
- Glinski, D., & Lipic, J. (1990). Soil physical conditions and plant roots CRC. Press. Inc. Florida USA. <https://doi.org/10.1201/9781351076708>
- Godin, C. (2000). Representing and encoding plant architecture: a review. *Annals of forest science*, 57(5), 413-438. <https://doi.org/10.1051/forest:2000132>
- Gökbulak, F. (2000). Comparison of growth performance of *Lolium perenne* L., *Dactylis glomerata* L. and *Agropyron elongatum* (Host.) P. Beauv. for erosion control in Turkey. *Journal of Environmental Biology*, 24(1), 45-53. <https://europemc.org/article/med/12974411>
- Gray, D. H., & Sotir, R. B. (1996). Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control. John Wiley & Sons .
- Gregory, P. J. (2006). Roots, rhizosphere and soil: the route to a better understanding of soil science? *European Journal of Soil Science*, 57(1), 2-12. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00778.x>
- Grimshaw, R. (1994). Vetiver grass—its use for slope and structure stabilisation under tropical and semi tropical conditions, *Vegetation and Slopes Stabilisation. Protection and Ecology (ed. by Barker, DH), Thomas Telford House, London*, 25-34. <https://doi.org/10.1680/vasspae.20313.0003>
- Guerra, A., Bezerra, J., Fullen, M., Mendonça, J., Sathler, R., Lima, F., & Guerra, T. (2007). Urban gullies in Sao Luis city, Maranhao state, Brazil. *Progress in Gully Erosion Research, Casali J, Giménez R (eds). Universidad Pública de Navarra: Pamplona*, 58-59 .
- Guo, M., Chen, Z., Wang, W., Wang, T., Shi, Q., Kang, H., Zhao, M., & Feng, L. (2021). Spatiotemporal changes in flow hydraulic characteristics and soil loss during gully headcut erosion under controlled

- conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(8), 4473-4494. <https://doi.org/10.5194/hess-25-4473-2021>
- Guo, M., Wang, W., Kang, H., & Yang, B. (2018). Changes in soil properties and erodibility of gully heads induced by vegetation restoration on the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Land*, 10, 712-725. <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0121-z>
- Guo, M., Wang, W., Wang, T., Wang, W., & Kang, H. (2020). Impacts of different vegetation restoration options on gully head soil resistance and soil erosion in loess tablelands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(4), 1038-1050. <https://doi.org/10.1002/esp.4798>
- Guo, Z., Yan, Z., He, R., Yang, H., Ci, H., & Wang, R. (2014). Impacts of Land Use Conversion on Soil Erosion in the Urban Agglomeration on the Northern Slopes of the Tianshan Mountains. *Land*, 13(4), 550. <https://doi.org/10.3390/land13040550>
- Gyssels, G., & Poesen, J. (2003). The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 28(4), 371-384. <https://doi.org/10.1002/esp.447>
- Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., & Li, Y. (2010). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 29(2), 189-217. <https://doi.org/10.1191/0309133305pp443ra>
- Gyssels, G., Poesen, J., Nachtergaele, J., & Govers, G. (2002). The impact of sowing density of small grains on rill and ephemeral gully erosion in concentrated flow zones. *Soil and Tillage Research*, 64(3-4), 189-201. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00263-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00263-X)
- He, T., Yang, Y., Peng, T., Wang, Y., Zhang, G., Chen, X., Liu, Y., & Liu, B. (2023). The role of straw mulching in shaping rills and stabilizing rill network under simulated extreme rainfall. *Soil and Tillage Research*, 229, 105656. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105656>
- Hidalgo, J. G., Raventos, J., & Echevarria, M. (1997). Comparison of sediment ratio curves for plants with different architectures. *Catena*, 29(3-4), 333-340. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(96\)00067-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(96)00067-7)
- Hooke, J. (2006). Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region. *Geomorphology*, 79(3-4), 311-335. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.036>
- Hosseinalizadeh, M., Alinejad, M., Mohammadian Behbahani, A., Khormali, F., Kariminejad, N., & Pourghasemi, H. R. (2019). A review on the gully erosion and land degradation in Iran. *Gully erosion studies from India and surrounding regions*, 393-403. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23243-6_26
- Hosseinalizadeh, M., Alinejad, M., Zarei, H. and Jalalifard, A. (2019). Piping Erosion, a Threat or an Opportunity?. *Land Management Journal*, 7(2), 165-177. (in Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23456205.1398.7.2.5.0>
- Hosseinalizadeh, M., Yeganeh, H., Khermandar, K. and Saadatfar, A. (2025). Investigating Phytoremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals of Lycium Depressum L Plant: A Case Study of Iodine Factory of Golestan Province. *Desert Ecosystem Engineering*, 13(43), 1-24. (in Persian). <https://doi.org/10.22052/deej.2024.255242.1068>
- Hosseini, S. M., Mosadehi, A., Nāsari, K. D., & Golkarian, A. (2012). Identification of the most important factors influencing gully erosion in the hilly units of southwestern Mashhad County. *Geography and Environmental Hazards*, 1(2), 71-83. (in Persian). <https://www.sid.ir/paper/472588/fa>
- Hosseini-Tavasol, M., and Yousefi-Khanqah, Sh. (2007). A method for watershed management and restoration using appropriate biological programs (Case study: Gorkbaghi watershed). In Proceedings of the 4th National Conference on Watershed Management Science and Engineering of Iran: Watershed Management (Karaj, Iran). (in Persian). <https://civilica.com/doc/44889>
- Jafari, M., Chahouki, M. Z., Tavili, A., Azarnivand, H., & Amiri, G. Z. (2004). Effective environmental factors in the distribution of vegetation types in Poshtkouh rangelands of Yazd Province (Iran). *Journal of Arid Environments*, 56(4), 627-641. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(03\)00077-6](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00077-6)
- Jastrow, J., Miller, R., & Lussenhop, J. (1998). Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(7), 905-916. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00207-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00207-1)
- Jiang, Y., Shi, H., Wen, Z., Guo, M., Zhao, J., Cao, X., Fan, Y., & Zheng, C. (2020). The dynamic process of slope rill erosion analyzed with a digital close range photogrammetry observation system under laboratory conditions. *Geomorphology*, 350, 106893. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106893>
- Jones, D. L., Nguyen, C., & Finlay, R. D. (1991). Carbon flow in the rhizosphere: carbon trading at the soil-root interface. In: Springer.
- Kang, S.-W., Cheong, Y. H., Yun, J.-J., Park, J.-H., Park, J.-H., Seo, D.-C., & Cho, J.-S. (2021). Effect of

- biochar application on nitrogen use efficiency for sustainable and productive agriculture under different field crops. *Journal of Plant Nutrition*, 44(19), 2849-2862. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1921200>
- Kervroëdan, L., Armand, R., Saunier, M., & Faucon, M.-P. (2020). Functional diversity effects of vegetation on runoff to design herbaceous hedges for sediment retention. *Diversity*, 12(4), 131 .
- Knapen, A., Poesen, J., Govers, G., Gyssels, G., & Nachtergaele, J. (2007). Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 75-109, (1-2)80 . <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.08.001>
- Leifheit, E. F., Veresoglou, S. D., Lehmann, A., Morris, E. K., & Rillig, M. C. (2014). Multiple factors influence the role of arbuscular mycorrhizal fungi in soil aggregation—a meta-analysis. *Plant and Soil*, 374(1), 523-537. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1899-2>
- Li, C., Frolking, S., & Frolking, T. A. (1992). A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 2. Model applications. *Journal of Geophysical Research :Atmospheres*, 97(D9), 9777-9783. <https://doi.org/10.1029/92JD00510>
- Li, J., Okin, G. S., Alvarez, L., & Epstein, H. (2008). Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities. *Biogeochemistry*, 88, 73-88 <https://doi.org/10.1007/S10533-008-9195-6>
- Li, L., Wang, Y., & Liu, C. (2014). Effects of land use changes on soil erosion in a fast developing area. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11, 1549-1562. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0341-x>
- Li, Z., Liu, W.-Z., Zhang, X.-C., & Zheng, F.-L. (2011). Assessing the site-specific impacts of climate change on hydrology, soil erosion and crop yields in the Loess Plateau of China. *Climatic Change*, 105(1), 223-242. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9875-9>
- Liu, X., Li, H., Zhang, S., Cruse, R. M., & Zhang, X. (2019). Gully erosion control practices in Northeast China: A review. *Sustainability*, 11(18), 5065. <https://doi.org/10.3390/su11185065>
- Lou, Y., Wang, W., Guo, M., Guo, W., Kang, H., Feng, L., Zhu, Y., & Yang, H. (2023). Vegetation affects gully headcut erosion processes by regulating runoff hydrodynamics in the Loess tableland region. *Journal of Hydrology*, 616, 128769. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128769>
- Lou, Y., Zhu, Y., Wei, J., Wang, W., Guo, M., Kang, H., Feng, L., & Yang, H. (2025). Effects of vegetation on runoff hydrodynamics and erosion morphologies in headcut erosion processes in the loess tableland region. *Water Resources Research*, 61(2), e2024WR038274. <https://doi.org/10.1029/2024WR038274>
- Lynch, J. (1995). Root architecture and plant productivity. *Plant physiology*, 109(1), 7. <https://doi.org/10.1104/pp.109.1.7>
- Madi, H., Mouzai, L., & Bouhadeif, M. (2013). Plants cover effects on overland flow and on soil erosion under simulated rainfall intensity. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology.
- Maghsoudi M, Goorabi A, Darabi shahmari S.(2014). The Study of Effect of Vegetation Cover Factor on the Water Erosion Case Study: Razin Basin. E.E.R. 3 (4) :43-57. (in Persian). <http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-49-fa.html>
- Mamo, M., & Bubenzer, G. (2001). Detachment rate, soil erodibility, and soil strength as influenced by living plant roots part I: Laboratory study. *Transactions of the ASAE*, 44(5), 1167. <https://doi.org/10.13031/2013.6445>
- McCully, M. E. (1999). Roots in soil: unearthing the complexities of roots and their rhizospheres. *Annual review of plant biology*, 50(1), 695-718. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.695>
- Mekuria, W., Phimister, E., Yakob, G., Tegegne, D., Moges, A., Tesfaye, Y., Melaku, D., Gerber, C., Hallett, P. D., & Smith, J. U. (2024). Gully rehabilitation in southern Ethiopia—value and impacts for farmers. *Soil*, 10(2), 637-654. <https://doi.org/10.5194/soil-10-637-2024>
- Michaletz, S. T., Cheng, D., Kerkhoff, A. J., & Enquist, B. J. (2014). Convergence of terrestrial plant production across global climate gradients. *Nature*, 512(7512), 39-43. <https://doi.org/10.1038/nature13470>
- Mohammadi, S., Karimzadeh, H. R., and Alizadeh, M. (2018). Spatial estimation of soil erosion in Iran using RUSLE model. *Ecohydrology*. 5(2), 551–569. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/ije.2018.239777.706>
- Moradian, M., Gharibzadeh, A., Falahi, M. R., & Jouzi, M. (2012). The role of vegetation cover in reducing soil erosion from a geomorphological perspective. In Proceedings of the 1st National Desert Conference (Science, Technology and Sustainable Development) (Tehran, Iran). (in Persian). <https://civilica.com/doc/160504>
- Morgan, R. P., & Rickson, R. J. (1995). *Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach:*

- A Bioengineering Approach*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.4324/9780203362136>
- Nachtergaele, J., Poesen, J., Steegen, A., Takken, I., Beuselinck, L., Vandekerckhove, L., & Govers, G. (2001). The value of a physically based model versus an empirical approach in the prediction of ephemeral gully erosion for loess-derived soils. *Geomorphology*, 40(3-4), 237-252. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00046-0](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00046-0)
- Naz, F., Arif, M., Xue, T., & Li, C. (2024). Artificially remediated plants impact soil physiochemical properties along the riparian zones of the three gorges dam in China. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7, 1301086. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1301086>
- Noraei, Z., & Feizi, Z., (2015). Use of Vetiver Grass for Soil and Water Conservation, 3rd National Conference of Scientific Student Associations of Agriculture and Natural Resources Fields, Karaj. (in Persian). <https://civilica.com/doc/457563/>
- Nosko, R., Maliariková, M., Brziak, A., & Kubán, M. (2019). Formation of gully erosion in the Myjava region. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 27(3), 63-72. <https://doi.org/10.2478/sjce-2019-0023>
- Nunes, A., Coelho, C. d .O. A., De Almeida, A., & Figueiredo, A. (2010). Soil erosion and hydrological response to land abandonment in a central inland area of Portugal. *Land Degradation & Development*, 21(3), 260-273. <https://doi.org/10.1002/ldr.973>
- Osman, N., & Barakbah, S. (2019). Parameters to predict slope stability—soil water and root profiles. *Ecological engineering*, 28(1), 90-95. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.04.004>
- Ou, Y., Rousseau, A. N., Yan, B., Wang, L., & Zhang, Y. (2021). Grass barriers for mitigating diffuse pollution within a source water area—A case study of Northeast China. *Agricultural Water Management*, 243, 106461. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106461>
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., & Alewell, C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental science & policy*, 54, 438-447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
- Parhizkar, M. (2024). Prediction of soil detachment rate by overland flow using root length characteristic: Nonlinear model development. *Rhizosphere*, 30, 100911. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100911>
- Parhizkar, M., Lucas-Borja, M. E., Denisi, P., Tanaka, N., & Zema, D. A. (2024). Comparing the effects of hydromulching and application of biodegradable plastics on surface runoff and soil erosion in deforested and burned lands. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 72(4), 422-435. <https://doi.org/10.2478/johh-2024-0028>
- Parhizkar, M., Lucas-Borja, M. E., Filianoti, P. G. F., & Zema, D. A. (2025). Effects of Fibrous Roots of Four Herbaceous Species on Water Flow Velocity and Rill Detachment Capacity. *Ecohydrology*, 18(2), e70016. <https://doi.org/10.1002/eco.70016>
- Parsadoust, F., Jaberlansar, Z. and Borhani, M. (2023). Investigating the Vegetation Characteristics of Plant Species That Are Compatible with Protecting Marl Soil in Kashan. *Desert Management*, 11(2), 61-76. (in Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24763985.1402.11.2.5.8>
- Peymanifard, B., (2007). Studies on Arid and Desert Regions, in Proceedings of Natural Resources Research, Research Institute of Forests and Rangelands Publications, No. 55, pp. 56-67. (in Persian).
- Pollen, N., & Simon, A. (2005). Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research*, 41(7). <https://doi.org/10.1029/2004WR003801>
- Pourkazem, E. (2020). Characteristics and control of the weed *Cynodon dactylon* (Bermuda grass). *Green Thought Persian Agriculture Articles*. (in Persian). <https://allahsoso.blogfa.com/post/1038/-%D9%85%D8%B4%D8%AE%D8%B5%D8%A7%D8%AA-%D9%88-%DA%A9%D9%86%D8%AA%D8%B1%D9%84-%D8%B9%D9%84%D9%81-%D9%87%D8%B1%D8%B2-%D9%BE%D9%86%D8%AC%D9%87-%D9%85%D8%B1%D8%BA%DB%8C-%D8%9B-Cynodon-dactylon-introduction-control->
- PUGNAIRE, F. I., & HAASE, P. (1996). Comparative physiology and growth of two perennial tussock grass species in a semi-arid environment. *Annals of Botany*, 77(1), 81-86. <https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0010>
- Qian, X., Zhao, L., Fang, Q., Fan, C., Zi, R., & Fang, F. (2024). Rill formation and evolution caused by upslope inflow and sediment deposition on freshly tilled loose surfaces. *Soil and Tillage Research*, 235, 105868. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105868>
- Reicosky, D., & Forcella, F. (1998). Cover crop and soil quality interactions in agroecosystems. *Journal of Soil and Water Conservation*. ۲۲۴-۲۲۹, (۳)۵۳, <https://doi.org/10.1080/00224561.1998.12457223>
- Rengers, F. K., & Tucker, G. (2014). Analysis and modeling of gully headcut dynamics, North American high

- plains. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(5), 983-1003. <https://doi.org/10.1002/2013JF002962>
- Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G., & Muys, B. (2007). The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees*, 21(4), 385-402. <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0132-4>
- Rey, F., Isselin-Nondedeu, F., & Bédécarrats, A. (2005). Vegetation dynamics on sediment deposits upstream of bioengineering works in mountainous marly gullies in a Mediterranean climate (Southern Alps, France). *Plant and Soil*, 278(1), 149-158. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-8422-3>
- Rostedt, M. (2004). Using vetiver for gully erosion control. *Beauesert Landcare Group Inc., Beauesert, Queensland, Australia*, 81-85. <https://www.thaiscience.info/journals/Article/AUJT/10290537.pdf>
- Santoso, A. A., Rizalighadi, M., & Fauzi, A. (2025). Kajian Besaran Erosi dengan Pengaruh Panjang Alur Terhadap Estimasi Erosi dengan Metode USLE. *Journal of The Civil Engineering Student*, 7(1), 24-29. <https://doi.org/10.24815/journalces.v7i1.3095>
- Saravanan, S., Jennifer, J. J., Singh, L., Thiyagarajan, S., & Sankaralingam, S. (2021). Impact of land-use change on soil erosion in the Coonoor Watershed, Nilgiris Mountain Range, Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(5), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06817-w>
- Schenk, H. J., & Jackson, R. B. (2005). Mapping the global distribution of deep roots in relation to climate and soil characteristics. *Geoderma*, 126(1-2), 129-140. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.11.011>
- Servati, M. R., Hosseinzadeh, M. M., Khezri, S. and Mansouri, A. (2008). The Zoning of Mass Movements in the Sanandaj-Dehgolan Road Using Analytical Hierarchy Process (AHP). *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 17(68), 25-32. (in Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.25883860.1387.17.68.5.3>
- Shāh Karam, B., & Bāyrāmzādeh, V. (2013). Efficiency of exposed-roots of Lour species for estimating soil erosion rate: A case study in Hasanābād Valley, Chālūs. In *Proceedings of the 2nd National Conference on Environmental Protection and Planning, Hamedan*. Volume 5, Issue 3, Pages 29-38 (in Persian). <https://civilica.com/doc/232294/>
- Shahbazi, A., & Yazdipour, A. R. (2009). Investigation of the feasibility of controlling gully erosion by vegetative hedgerows in the Salamat area, Ahvaz (Research report). Tehran, Iran: Jihad University Centers. (in Persian). <https://www.sid.ir/paper/787357/fa>
- Shen, H. W., & Li, R.-M. (1973). Rainfall effect on sheet flow over smooth surface. *Journal of the Hydraulics Division*, 99(5), 771-792. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0003646>
- Shi, H., Wang, Y., Cheng, Z., Ye, T., & Chan, Z. (2012). Analysis of natural variation in bermudagrass (*Cynodon dactylon*) reveals physiological responses underlying drought tolerance. *PLoS One*, 7(12), e53422. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0053422>
- Shinohara, H., Mori, A., Yasue, N., Sumida, K., & Matsubayashi, Y. (2016). Identification of three LRR-RKs involved in perception of root meristem growth factor in Arabidopsis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(14), 3897-3902. <https://doi.org/10.1073/pnas.1522639113>
- Simon, A., & Collison, A. J. (2002). Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(5), 527-546. <https://doi.org/10.1002/esp.325>
- Smit, G., & Rethman, N. (2000). The influence of tree thinning on the soil water in a semi-arid savanna of southern Africa. *Journal of Arid Environments*, 44(1), 41-59. <https://doi.org/10.1006/jare.1999.0576>
- Snow, N., Peterson, P. M., Romaschenko, K., & Simon, B. K. (2018). Monograph of Diplachne (Poaceae, Chloridoideae, Cynodonteae). *PhytoKeys*(93), 1. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.93.21079>
- Sun, L., Fang, H., Qi, D., Li, J., & Cai, Q. (2013). A review on rill erosion process and its influencing factors. *Chinese geographical science*, 23, 389-402. <https://doi.org/10.1007/s-111769-013-0612y>
- Talaei, R., Rostamikia, Y., Azimi Motem, F., Jafari Ardakani, A., & Peyrowan, H. (2022). A Method for Selecting Suitable Plant Species to Control of Rill and Gully Erosion in South of Ardabil Province. *Water and Soil Science*, 32(4), 117-133. (in Persian). <https://doi.org/10.22034/ws.2021.41467.2373>
- Tian, P., Gong, Y., Hao, F., Chen, L., Yang, Y., Guo, W., Wu, H., & Zhang, W. (2022). Comparing erosion and rill development processes by simulated upslope inflow in two red soils from subtropical China. *Catena*, 213, 106139. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106139>
- Vaezi, A. R. and Bakhshi Rad, O. (2020). Study of Morphometric Characteristics of Gullies and Factors Affecting Gully Development in Dryland Farming Area in South of East-Azərbayjan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(6), 1373-1384. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.277316.668141>

- Vaezi, A. R., & Varghaei, L. (2023). Investigating the effect of cultivated furrow length on rill erosion and eroded grain size in a rainfed field. *Applied Soil Research*, 11(2), 59-70. (in Persian). <https://doi.org/10.30466/asr.2023.121365>
- Valentin, C., Poesen, J., & Li, Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63(2-3), 132-153. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>
- Van Der Putten, W. H., Bardgett, R., de Ruiter, P. C., Hol, W., Meyer, K. M., Bezemer, T. M., Bradford, M., Christensen, S., Eppinga, M., & Fukami, T. (2009). Empirical and theoretical challenges in aboveground–belowground ecology. *Oecologia*, 161(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1351-8>
- Vannoppen, W., Vanmaercke, M., De Baets, S., & Poesen, J. (2015). A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates. *Earth-Science Reviews*, 150, 666-678. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.08.011>
- Waldron, L., & Dakessian, S. (1987). Effect of grass, legume, and tree roots on soil shearing resistance. *Soil Science Society of America Journal*, 46(5), 894-899. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050002x>
- Wang, H., Zhang, G.-h., & Wang, J. (2022). Plant community near-surface characteristics as drivers of soil erodibility variation along a slope gradient in a typical semiarid region of China. *Catena*, 212, 106108. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106108>
- Wang, J. F., Yang, Y. F., Wang, B., & Liu, G. B. (2025). Distinguishing the effects of vegetation characteristics on soil erosion process on the loess plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 50(2), e70011. <https://doi.org/10.1002/esp.70011>
- Wang JunGuang, W. J., Li ZhaoXia, L. Z., Cai ChongFa, C. C., Yang Wei, Y. W., Ma RenMing, M. R., & Zhang GuoBiao, Z. G. (2011). Quantitative relationships of detachment rate of red soil in concentrated flow with soil aggregate characteristics and soil shear strength. <https://doi.org/10.5555/20123112718>
- Wang, Y., Yao, Y., Han, B., Liu, B., Wang, X., Ma, L., Chen, X., & Li, Z. (2024). Augmenting the stability of soil aggregate carbon with nutrient management in worldwide croplands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 370, 109052. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109052>
- Wardle, D. A., Bardgett, R. D., Klironomos, J. N., Setälä, H., Van Der Putten, W. H., & Wall, D. H. (2004). Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *science*, 304(5677), 1629-1633. <https://doi.org/10.1126/science.1094875>
- Whalley, W. R., Riseley, B., Leeds-Harrison, P. B., Bird, N. R., Leech, P. K., & Adderley, W. P. (2005). Structural differences between bulk and rhizosphere soil. *European Journal of Soil Science*, 56(3), 353-360. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00670.x>
- Wirtz, S., Seeger, M., & Ries, J. (2012). Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena*, 91, 21-34. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.12.002>
- Xu, Q., Chen, W., Zhao, K., Zhou, X., Du, P., Guo, C., Ju, Y., & Pu, C. (2021). Effects of land-use management on soil erosion: A case study in a typical watershed of the hilly and gully region on the Loess Plateau of China. *Catena*, 206, 105551. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105551>
- Xu, Y., Guo, Y., Huang, Z., Liu, D., Huang, Q., & Tang, H. (2023). Study on *Cynodon dactylon* root system affecting dry–wet cracking behavior and shear strength characteristics of expansive soil. *Scientific Reports*, 13(1), 13052. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39770-7>
- Xu, Y., Luo, L., Guo, W., Jin, Z., Tian, P., & Wang, W. (2024). Revegetation changes main erosion type on the gully–slope on the Chinese Loess Plateau under extreme rainfall: reducing gully erosion and promoting shallow landslides. *Water Resources Research*, 60, e2023WR036307. <https://doi.org/10.1029/2023WR036307>
- Yang, Y., Liu, B.-R., & An, S.-S. (2018). Ecological stoichiometry in leaves, roots, litters and soil among different plant communities in a desertified region of Northern China. *Catena*, 166, 328-337. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.018>
- Zegeye, A. D., Langendoen, E. J., Tilahun, S. A., Mekuria, W., Poesen, J., & Steenhuis, T. S. (2018). Root reinforcement to soils provided by common Ethiopian highland plants for gully erosion control. *Ecohydrology*, 11(6), e1940. <https://doi.org/10.1002/eco.1940>
- Zeng, R., Zhang, G., Su, X., & Wang, C. (2024). Soil erosion resistance of gully system under different plant communities on the Loess Plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(6), e2023WR036888. <https://doi.org/10.1002/esp.5795>
- Zhang, M., Zhang, K., Cen, Y., Wang, P., & Xia, J. (2025). Effects of grass cover on the overland soil erosion mechanism under simulated rainfall. *Water Resources Research*, 61(2), e2023WR036888. <https://doi.org/10.1029/2023WR036888>

- Zhao, J., Vanmaercke, M., Chen, L., & Govers, G. (2016). Vegetation cover and topography rather than human disturbance control gully density and sediment production on the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, 274, 92-105. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.022>
- Zhu, H., Fu, B., Wang, S., Zhu, L., Zhang, L., Jiao, L., & Wang, C. (2015). Reducing soil erosion by improving community functional diversity in semi-arid grasslands. *Journal of Applied Ecology*, 52(4), 1063-1072 . <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12442>