19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴

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

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

بررسی فرسایش خاک در سازندهای مارنی و نقش گونه‌های مرتعی در حفاظت از این سازندها

مسلم زرینی بهادر[1*]

۱- کارشناس تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. *moslem.zarini@ymail.com

چکیده

سازندهای مارنی به‌دلیل ویژگی‌های ژئومورفولوژیک و زمین‌شناختی (ترکیب رسی-کربناتی، طبقات خاک با نفوذپذیری و بافت متغیر) از حساسیت بالایی نسبت به فرسایش آبی و بادی برخوردارند. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های تجربی و مدل‌سازی متعددی بر ارزیابی پارامترهای فرسایش‌پذیری (از جمله ضریب K در RUSLE)، نقش پوشش گیاهی، تأثیر تغییرات اقلیمی، و کاربرد روش‌های نوین سنجش از دور و یادگیری ماشین متمرکز شده‌اند. این مقاله مروری، دانش روز درباره مکانیسم‌های فرسایش در مارن‌ها، روش‌های اندازه‌گیری و مدل‌سازی، و راهبردهای کاهش فرسایش را جمع‌بندی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که: مقادیر K در سطوح مارنی معمولاً بالا و تغییرپذیر است و نقش بافت و ساختار لایه‌ای تعیین‌کننده است، مطالعات میدانی در ایران نشان می‌دهند مارن‌ها منبع قابل‌توجه رسوب و حساس به فرونشست سطحی هستند، روش‌های نوین شامل نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) و مدل‌های یادگیری ماشین دقت برآورد فرسایش‌پذیری را بهبود داده‌اند و برای اولویت‌بندی مناطق حفاظت، کارایی بالا دارند. نتایج مطالعات اخیر نشان می‌دهد که بیش از ۵۰ درصد رسوبات خروجی برخی حوضه‌های آبخیز ایران از نواحی مارنی سرچشمه می‌گیرد. ازاین‌رو، به‌کارگیری رویکردهای تلفیقی شامل تثبیت بیولوژیک خاک، اقدامات آبخیزداری، مدیریت کاربری اراضی و استفاده از فناوری‌های نوین سنجش‌ازدور می‌تواند موجب کاهش نرخ تخریب خاک و بهبود پایداری اکوسیستم‌های مارنی گردد. تراکم پوشش گیاهی در سازندهای مارنی به دلیل وجود املاح محلول، درصد بالای گچ و آهک و اثر مویینگی شدید، بسیار محدود است. شواهد نشان می‌دهد که ترکیبی از گونه‌های بومی با سازگاری اکولوژیک، فناوری‌های مهندسی زیستی (bioengineering) و مدیریت چرای هوشمند، می‌تواند فرسایش سطحی و تولید رسوب را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. در پایان، پیشنهادهایی مدیریتی برای کاهش خطر فرسایش سازندهای مارنی ارائه شده است.

واژگان کلیدی: رسوب، آهک، پوشش گیاهی، فرسایش آبی

مقدمه

سازندهای مارنی (Marl Formations) که مخلوطی از رس، کربنات کلسیم، گچ و نمک را در بر می‌گیرند، در بسیاری از مناطق نیمه‌خشک و کوهستانی جهان گسترده‌اند. این سنگ‌آورده‌ها به‌دلیل لایه‌بندی ظریف، حساسیت هیدرومکانیکی، و تغییرات سریع خواص خاکی (مانند تغییرات در درصد رس و کربنات) معمولاً فرسایش‌پذیر شناخته می‌شوند. فرسایش در این سازندها نه تنها باعث از بین رفتن خاک زراعی می‌شود، بلکه پیامدهایی چون رسوب‌گذاری سریع در مخازن و سدها، شکل‌گیری چرخه‌های ناپایدار شیب و افزایش خطر سیلاب‌های ناگهانی را به‌دنبال دارد (باقریان کلات و همکاران، ۱۳۹۹). بررسی‌های اخیر، ضمن تأیید این حساسیت، روی اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر ضریب فرسایش‌پذیری خاک (K) و به‌کارگیری روش‌های مکانی مدل‌سازی برای نقشه‌برداری مناطق مخاطره‌پذیر تمرکز داشته‌اند (Sadeghi et al., 2020). از سوی دیگر، پوشش گیاهی مرتعی و مدیریت صحیح آن به‌عنوان یکی از راهکارهای طبیعی و پایدار برای کاهش فرسایش و افزایش پایداری شیب‌ها موردنظر هستند (Onyango et al., 2022).

مارن‌ها به دلیل بافت ریزدانه و ترکیب شیمیایی خاص خود، در برابر فرسایش حساس هستند و در بسیاری از مناطق نیمه‌خشک و خشک ایران (به‌ویژه زاگرس، البرز و بخش‌هایی از فلات مرکزی) گستردگی قابل‌توجهی دارند. مارن‌ها که ترکیبی از رس و کربنات کلسیم هستند، در تماس با آب متورم و پس از خشک شدن منقبض می‌شوند، پدیده‌ای که موجب ترک‌خوردگی، لغزش و افزایش فرسایش سطحی و آبکندی می‌شود. این ویژگی‌ها، به‌ویژه در مناطق فاقد پوشش گیاهی، منجر به نرخ بالای رسوب‌زایی و کاهش حاصل‌خیزی خاک در پایین‌دست می‌گردد. با توجه به اینکه حدود ۱۵ درصد از مساحت کشور ایران تحت پوشش مارن‌ها قرار دارد، شناخت رفتار فرسایشی و ارائه راهکارهای حفاظتی برای این سازندها اهمیت فراوانی در مدیریت منابع خاک و آب دارد (Vaezi et al., 2017).

وجود واحدهای مارنی بر الگوی پوشش گیاهی، تولید رسوب و مشکلات مهندسی (از قبیل ناپایداری شیب‌ها) تأثیر مستقیم دارد و به همین دلیل شناسایی وسعت آن‌ها برای برنامه‌ریزی منابع طبیعی و مهندسی ضروری است (حشمتی و همکاران، ۱۴۰۳).

میزان و وسعت مارن‌ها در ایران

مارن‌ها در بسیاری از حوضه‌های زمین‌شناسی ایران رخنمون گسترده‌ای دارند و نقش مهمی در فرسایش بادی و آبی، کشاورزی و پایداری پوشش گیاهی بازی می‌کنند. با وجود مطالعات استانی متعدد که وسعت‌های محلی مارن را گزارش کرده‌اند، برآورد یک عدد کلیِ ملی هنوز چالش‌زا است زیرا تقسیم‌بندی و طبقه‌بندی سازندی بین مطالعات متفاوت است و نقشه‌برداری واحدهای مارنی در مقیاس کشوری یکپارچه و همگرا نیست.

ویژگی‌های فیزیکی و ژئوشیمیایی مارن‌ها

مارن‌ها عموماً از دوره‌های ترشیری منشأ گرفته و ترکیبی از ۳۰ تا ۷۰ درصدکربنات کلسیم و ۳۰ تا ۵۰ درصد کانی‌های رسی (مانند اسمکتیت و ایلیت) دارند. از دیدگاه مهندسی خاک، این سازندها دارای چسبندگی پایین، زاویه اصطکاک داخلی کم، و نفوذپذیری محدود هستند که این خصوصیات باعث افزایش رواناب سطحی و کاهش نفوذ آب می‌شود. رفتار فیزیکی مارن‌ها تحت تأثیر تغییرات رطوبت به‌شدت ناپایدار است؛ به‌طوری که در زمان بارندگی، انبساط حجمی و کاهش مقاومت برشی موجب لغزش دامنه‌ها می‌گردد. در ایران، این نوع لغزش‌ها در مناطق مارنی کرمان، فارس و لرستان به‌وفور گزارش شده است (Hosseinalizadeh et al., 2019).

فرآیندهای فرسایشی در مناطق مارنی

فرسایش در سازندهای مارنی معمولاً به‌صورت سه فرآیند اصلی بروز می‌کند:

۱. **فرسایش سطحی (Sheet erosion):** ناشی از بارش‌های شدید و نبود پوشش گیاهی کافی.

۲. **فرسایش شیاری و آبکندی (Rill & Gully erosion):** بر اثر تمرکز جریان رواناب و ناپایداری بافت خاک.

۳. **حرکات توده‌ای (Mass movements):** مانند لغزش و ریزش دامنه‌های مارنی اشباع از آب.

پایش‌های زمینی و داده‌های سنجش‌ازدور در حوضه‌های مارنی استان‌های لرستان و خراسان نشان داده‌اند که این مناطق بالاترین شاخص فرسایش ویژه (Specific sediment yield) را در کشور دارا هستند (Vaezi et al., 2017).

مبانی مفهومی: چرا مارن‌ها فرسایش‌پذیرند؟

چند ویژگی زمین‌شناختی و خاک‌شناختی سبب افزایش حساسیت فرسایش در مارن‌ها می‌شود:

ترکیب کانی‌شناختی و بافت نامتجانس: نسبت‌های متغیر رس/کربنات، وجود فازهای کلسیتی و رسی که در مواجهه با آب رفتار متفاوت و ناپایدار دارند.

لایه‌بندی و گسستگی: لایه‌های با نفوذپذیری متفاوت جریان‌های سطحی و زیرسطحی را تحت تأثیر قرار می‌دهند و نقاط تمرکز فرسایش را ایجاد می‌کنند.

واکنش هیدرولیکی: برخی مارن‌ها با آب ترکیب شده و خواص مقاومتی خود را کاهش می‌دهند (نرم‌شدن یا «slaking»)، که فرسایش سطحی و ایجاد گل‌ولای را تسهیل می‌کند (مکی و همکاران، ۱۳۹۵)، همچنین مطالعات میدانی صادقی و همکاران (۲۰۲۰) نشان داده‌اند که پاسخ هیدرولوژیک مارن‌ها بسیار متفاوت و حساس است.

روش‌های اندازه‌گیری و مدل‌سازی فرسایش در مارن‌ها

بخش بزرگی از مطالعات منطقه‌ای بر پایه نقشه‌های زمین‌شناسی (مقیاس‌های مختلف)، تصاویر ماهواره‌ای(Landsat, SPOT) ، داده‌های میدانی و تحلیل در سامانه‌های اطلاعات مکانی (GIS) انجام شده است. برخی پژوهش‌ها برای برآورد درصد سطح استان‌های مشخص از پردازش رقومی تصاویر و طبقه‌بندی لندست/سپات استفاده کرده‌اند؛ برای مثال مطالعات کرمانشاه و زنجان از SPOT و نقشه‌های استانی بهره برده‌اند تا وسعت واحدهای مارنی را تعیین کنند (حشمتی و همکاران، ۱۳۹۹).

پژوهش‌های جدید از ترکیب روش‌های میدانی، آزمایشگاهی و مدل‌سازی مکانی استفاده کرده‌اند:

۱- اندازه‌گیری میدانی K و آزمایشگاه مقاومتی: اندازه‌گیری مستقیم خروجی آب و رسوب از پارسل‌های کوچک (plot experiments) و محاسبه ضرایب K نمونه‌های مارنی (Sadeghi et al., 2020).

۲- مدل‌سازی RUSLE/G2 و شاخص‌های مکان‌محور: برآورد پارامترهای R (رواناب)، K (فرسایش‌پذیری)، LS (شیب و طول) و C (پوشش) و ترکیب آن‌ها در GIS برای تولید نقشه‌های ریسک (مطالعات متعددی در سال‌های اخیر از این رویکرد استفاده کرده‌اند (Mohammadi et al., 2021).

۳- روش‌های نوین DSM و یادگیری ماشین: استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور، DEM با رزولوشن بالا، و مدل‌های RF / XGBoost برای پیش‌بینی K و حساسیت فرسایش که دقت پیش‌بینی را افزایش می‌دهند (Li et al., 2024).

۴- ارزیابی رسوب‌گذاری سازندهای مارنی در حوضه‌ها: مطالعات رسوبی–ژئومورفولوژیک و پایش رسوب (sediment yield) در حوضه‌هایی که پوشش مارنی غالب دارند، نشانگر نقش قابل‌توجه مارن‌ها در تولید رسوب است (Rostami et al., 2019).

توزیع کلی و مناطق عمده رخنمون مارن در ایران

زاگرس: یکی از اصلی‌ترین پهنه‌های مارنی در غرب و جنوب‌غربی ایران است؛ سازندهایی مانند Pabdeh و واحدهای نئوژن-پالئوزوئیک در این کمربند، مارن‌های وسیعی را تشکیل می‌دهند (Sadooni & Alsharhan, 2019).

البرز و فلات مرکزی: در نواحی البرز و بخش‌هایی از فلات مرکزی نشانگان مارنی در لایه‌های رسوبی نئوژن و کواترنری مشاهده می‌شود که بر رفتار زمین‌شناختی و کشاورزی محلی اثر می‌گذارد (Bahrouji & Peyrowan, 2020).

نواحی مرکزی (مثل سازند قم و بخش‌هایی از اطراف تهران(قم): مارن‌های تبخیری و غیرتبخیری در برخی واحدها قابل توجه‌اند و در مطالعات محلی به‌عنوان منابع رسوب و تأثیرگذار بر فرسایش شناخته شده‌اند (Bahrouji & Peyrowan, 2020).

نمونه‌های کمّی استانی (مطالعات موردی و ارقامی که در مطالعات محلی گزارش شده‌اند)

در یک بررسی استانی در زنجان گزارش شده که حدود $۴۴۳۸\ km^2$ از سطح استان (حدود ٪۲۰ از مساحت استان) تحت‌پوشش اراضی مارنی قرار دارند(عبدی نژاد و همکاران، ۱۴۰۰).

در مطالعه‌ای در ناحیه سبزوار و داورزن گزارش شده که سازندهای مارنی حدود $۱۹۹۹km^2$ از اراضی این شهرستان‌ها را تشکیل می‌دهند (باقریان کلات و همکاران، ۱۳۹۹).

مطالعات منطقه‌ای در کرمانشاه نیز پراکنش مارن‌ها را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و GIS نقشه‌برداری کرده‌اند و نشان می‌دهند مارن‌ها سهم قابل‌توجهی از پوشش زمین‌شناسی برخی بخش‌ها دارند (حشمتی و همکاران، ۱۳۹۹).

این نمونه‌ها نشان‌دهنده وسعت محلی و استانی مارن‌ها هستند؛ هیچ منبع یکپارچه و به‌روزِ منتشرشده‌ای که یک برآورد عددی دقیق و ملیِ «کل وسعت مارن‌ها در ایران» را ارائه کند در دسترس نیست؛ بنابراین جمع‌بندی ملی نیازمند همگرایی نقشه‌برداری و طبقه‌بندی استانی است.

مرور شواهد تجربی

- **مطالعات آزمایشی و پارسل(plot)**

صادقی و همکاران (۲۰۲۰) با طراحی آزمایشات پارسلی بر روی مارن‌های حساس، نشان دادند که پاسخ هیدرولوژیک و میزان خروجی رسوب در مواجهه با بارش‌های با شدت متوسط تا بالا، بسیار بالا بوده و اعمال پوشش بیولوژیک (بیوسایکلینگ، تثبیت‌کننده‌های زیستی) می‌تواند تا حدودی رواناب و رسوب را کاهش دهد.

- **مطالعات حوضه‌ای و رسوب‌سنجی**

مطالعه بررسی قابلیت فرسایش و تولید رسوب در سازندهای Kashkan و Grupi (منطقه مرک؛ مطالعات محلی) نشان داد که این سازندها سهم عمده‌ای در تولید رسوب دارند و آستانه فرسایش در شیب‌های متوسط به‌سرعت گذرانده می‌شود، به‌طوری‌که عملیات حفاظتی ناگهانی و مداوم لازم است (Rostami et al., 2019).

- **مدل‌سازی K و نقش بافت، هیدرولیک و ماده آلی**

مطالعات جهانی اخیر (مثلاً Gupta, ۲۰۲۴) نشان داده‌اند که ترکیب خواص هیدرولیکی، درصد رس و اندازه ذرات، و همچنین محتوای ماده آلی، تعیین‌کننده اصلی ضریب K است و نقشه‌برداری دقیق K در مقیاس منطقه‌ای به داده‌های هیدرولوژیک و خواص خاک نیاز دارد (Gupta et al., 2024).

- **یادگیری ماشین و داده‌های مکانی**

مطالعات سال‌های اخیر نشان می‌دهند مدل‌های یادگیری ماشین (RF، XGBoost) که پارامترهای توپوگرافی، اقلیمی و خاکی را در اختیار دارند، قابلیت پیش‌بینی مناطق پرخطر فرسایش را نسبت به روش‌های کلاسیک افزایش می‌دهند و امکان اولویت‌بندی حفاظتی در حوضه‌های مارنی را فراهم می‌کنند (Li et al., 2024).

بحث تحلیلی: تبیین الگوها و عوامل کلیدی

ترکیب شواهد نشان می‌دهد که در سازندهای مارنی عامل بافت و ساختار لایه‌ای بیشترین تأثیر را بر حساسیت به فرسایش دارد. مارن‌های با درصد رس بیشتر و محتوای کربنات متغیر در برابر لغزش و شل‌شدن ناشی از مرطوب‌شدن آسیب‌پذیرترند (Sadeghi et al., 2020).

همچنین پوشش گیاهی و مدیریت اراضی نقش بسیار تعیین‌کننده‌ای دارند؛ برداشت بی‌رویه پوشش گیاهی یا چرای مازاد، حساسیت را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. مطالعات نشان داده‌اند اقدامات حفاظتی بیولوژیک و مکانیکی هر دو مؤثرند، اما تلفیق آن‌ها بیشترین کارایی را دارد (Sadeghi et al., 2020).

و تغییرات اقلیمی و بارش‌های متناوب شدید فرسایش را تشدید می‌کند؛ سناریوهای اقلیمی پیش‌بینی‌شده افزایش فراوانی بارش‌های شدید را نشان می‌دهند که پتانسیل تولید رسوب از مارن‌ها را افزایش می‌دهد (Hateffard et al., 2021).

مزایای روش‌های نوین: استفاده از DSM و ML امکان شناسایی ریزمناطق پرخطر و کاهش هزینه‌های پایش را فراهم می‌سازد و برای برنامه‌ریزی حفاظتی در مقیاس حوضه‌ای توصیه می‌شود (Perović et al., 2025)

اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی

فرسایش در سازندهای مارنی نه‌تنها باعث کاهش عمق خاک و از دست رفتن ظرفیت زراعی می‌شود، بلکه پیامدهای زیر را نیز در پی دارد:

- پر شدن سریع مخازن سدها (نظیر سد کرج و لار) با رسوبات ریزمارنی؛
- کاهش کیفیت آب و افزایش کدورت منابع سطحی؛
- فرسایش شدید در اراضی پایین‌دست و تهدید امنیت غذایی؛
- افزایش هزینه‌های لایروبی، تعمیر زیرساخت‌ها و کاهش عمر مفید سدها (زارع پور و همکاران، ۱۳۹۴).

راهبردها و توصیه‌های مدیریتی (برای مناطق مارنی)

با توجه به شواهد مروری، راهکارهای کاهش فرسایش در سازندهای مارنی باید چندجانبه باشند:

۱. حفظ و بازسازی پوشش گیاهی طبیعی از مهم‌ترین اقدامات کوتاه‌مدت و میان‌مدت است (کاشت گونه‌های بومی با ریشه‌دارهای مقاوم، پوشش‌زنی بین‌بندها).

۲. تثبیت مکانیکی شیب‌ها (سنگ‌چینی، پله‌بندی/تراسینگ) در نقاط پرخطر و خطوط جاری‌شدن آب.

۳. استفاده از تثبیت‌کننده‌های زیستی و بیوفیلم‌ها (باکتری‌ها، جلبک‌های سیتوباکتریایی) برای افزایش ثبات سطحی خاک (Sadeghi et al., 2020).

۴. نقشه‌برداری مبتنی بر DSM/ML جهت اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری حفاظتی در حوضه‌ها و کاهش هزینه‌ها (Perović et al., 2025)

۵. پایش رسوب و مدیریت سدها: برنامه‌ریزی برای کاهش رسوب‌گذاری در مخازن و بازبینی دوره‌ای مدیریت رسوب (Rostami et al., 2019).

۶. سیاست‌گذاری یکپارچه: ادغام مدیریت اراضی، چارچوب‌های حفاظت از منابع آب و سامانه‌های هشدار سیل برای پیشگیری از رخدادهای ناگهانی.

مکانیزم‌های حفاظتی پوشش گیاهی در سطوح مارنی

پوشش گیاهی مرتعی بر چند مسیر اصلی موجب تثبیت و کاهش فرسایش می‌شود:

۱. **اقدامات بیولوژیک:** کاشت گونه‌های مقاوم مرتعی نظیر *Atriplex canescens* و *Agropyron desertorum* جهت تثبیت خاک.
۲. **تثبیت مکانیکی خاک**: سیستم ریشه‌ای گیاهان خاک را در لایه‌های سطحی جمع و متراکم نگه می‌دارد، ضریب نفوذ آب سطحی را کاهش و مقاومت برشی سطح خاک را افزایش می‌دهد (Dorairaj et al.,2021).
۳. **کاهش انرژی برخورد قطرات باران:** تاج گیاهان انرژی ضربه قطرات باران را می‌گیرد و از شکستن خاک سطحی جلوگیری می‌کند (Dunkerley, 2020).
۴. **بهبود ساختمان خاک و افزایش ماده آلی:** تجمع مواد آلی ناشی از بقایای گیاهی و توده ریشه‌ای می‌تواند نفوذپذیری و ظرفیت نگهداری آب را بهبود دهد و ضریب فرسایش‌پذیری (K) را کاهش دهد (Gupta et al., 2024).
۵. **ایجاد موانع هیدرولیکی و کاهش طول جریان:** پوشش گیاهی و موانع زنده (living fascines, brushwood) مسیر و سرعت رواناب را تغییر داده و رسوب‌گذاری را تسهیل می‌کنند (Li et al., 2024).

این مکانیزم‌ها هنگامی که با روش‌های مهندسی زیستی (bioengineering) مانند ترانشه‌بندی با پوشش گیاهی، حصارگذاری با شاخ و برگ، و استفاده از فیلترهای زیستی ترکیب شوند، بیشترین اثر حفاظتی را نشان می‌دهند (برخورداری و همکاران، ۱۴۰۰).

برای انتخاب گونه‌های مرتعی مناسب جهت تثبیت مارن‌ها، باید معیارهای زیر مدنظر قرار گیرند:
ریشه‌زایی عمیق و ساختار انشعابی بالا (برای تثبیت مکانیکی)، سازگاری با شرایط شوری/قلیائیت و خشکی (زیست‌محیطی مارن‌ها)، تولید سریع پوشش سطحی و مقاوم در برابر چرای کنترل‌شده، توانایی افزایش ماده آلی و بهبود ساختمان خاک.
گونه‌های مرتعی مؤثر بر کاهش فرسایش در سازندهای مارنی شامل .Festuca spp (سیستم ریشه‌ای متراکم و مقاومت به چرای سبک)، .Artemisia spp ، Alyssum/Atriplex (در مناطق نیمه‌خشک و شورپسند، برای تثبیت شیب‌ها مفیدند) و وتیور (در بسیاری از پروژه‌های مهندسی حفاظتی جهانی برای تثبیت شیب‌ها و کنترل فرسایش استفاده شده است که ریشه عمیق و تحمل به شرایط سخت از مزایای آن است) می‌باشند.

راهکارهای کنترل و مدیریت فرسایش در مارن‌ها

۱. **اقدامات بیولوژیک :**کاشت گونه‌های مقاوم مرتعی نظیر *Atriplex canescens* و *Agropyron desertorum* جهت تثبیت خاک.
۲. **اقدامات مکانیکی :**احداث بندهای سنگی‌ملاتی، گابیونی و خاکی در مسیر جریان‌های سطحی.
۳. **مدیریت پوشش گیاهی :**تنظیم ظرفیت چرا و احیای مراتع تخریب‌شده.
۴. **به‌کارگیری مواد اصلاح‌کننده خاک :**مانند مالچ زیستی و مواد آلی برای افزایش پایداری خاک.
۵. **پایش و مدل‌سازی :**استفاده از فناوری سنجش‌ازدور و مدل‌های RUSLE و USPED جهت پیش‌بینی شدت فرسایش و اولویت‌بندی مناطق بحرانی(Hosseinalizadeh et al., 2019).

گونه‌های گیاهی مناسب برای تثبیت مارن‌ها

بر اساس مطالعات میدانی انجام‌شده در حوضه‌های مارنی کشور، گونه‌های زیر از کارایی بالایی در تثبیت خاک برخوردارند:

گونه گیاهی	ویژگی‌های کلیدی	منطقه بومی کاربرد
Atriplex canescens	مقاوم به خشکی، نمک و خاک‌های قلیایی	خراسان، کرمان
Haloxylon persicum	ریشه عمیق، مقاوم به باد و کم‌آبی	سیستان و خوزستان
Agropyron desertorum	توان تثبیت بالا در شیب‌های زیاد	فارس و یزد
Salsola orientalis	مقاوم به شوری و گرما	خراسان جنوبی
Artemisia sieberi	افزایش پایداری خاک و کاهش تبخیر	مناطق مرکزی ایران

پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که کاشت گونه *Atriplex canescens* می‌تواند حجم رواناب و رسوب را به‌ترتیب تا ۴۵ و ۶۰ درصد کاهش دهد (باقریان کلات و همکاران، ۱۳۹۹).

نتیجه‌گیری

سازندهای مارنی به‌دلیل ترکیب ژئوشیمیایی و خصوصیات فیزیکی خاص، از شکننده‌ترین واحدهای زمین‌شناسی در ایران هستند و سهم قابل‌توجهی در تولید رسوب حوضه‌های آبخیز کشور دارند. فرسایش در این مناطق تأثیرات عمیقی بر کیفیت خاک، منابع آب و امنیت غذایی دارد. اتخاذ رویکرد جامع و چندبعدی شامل تثبیت بیولوژیک، سازه‌های آبخیزداری، و استفاده از فناوری‌های نوین پایش، می‌تواند به کاهش محسوس نرخ تخریب خاک در این نواحی منجر شود. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که برآوردهای دقیق ضریب فرسایش‌پذیری (K) و نقشه‌برداری ریسک مبتنی بر داده‌های فضایی و مدل‌های یادگیری ماشین ابزارهای قدرتمندی برای مدیریت حفاظتی در این سازندها فراهم آورده‌اند. اقداماتی نظیر بازسازی پوشش گیاهی، تثبیت مکانیکی و به‌کارگیری روش‌های نوین تثبیت سطحی می‌توانند به‌طور مؤثری فرسایش و تولید رسوب را کاهش دهند. با توجه به چشم‌انداز تغییرات اقلیمی، لازم است برنامه‌ریزان و مدیران منابع آب و خاک در ایران و دیگر نواحی دارای سازند مارنی، این یافته‌ها را در سیاست‌ها و طرح‌های عملیاتی خود لحاظ نمایند. همچنین انجام یک مطالعه میدانی واحد (plot-scale) در یک سازند مارنی با نمونه‌برداری فراگیر (خواص هیدرولیکی، بافت، ماده آلی) و ترکیب آن با مدل‌سازی DSM+ML برای تولید نقشه K اختصاصی منطقه به عنوان یک طرح پژوهشی اجرایی پیشنهاد می‌گردد و توصیه می‌شود نقشه DEM با رزولوشن بالا تهیه شود و پایش بارش‌های شدید انجام و رکوردهای رسوب‌سنجی برای اعتبارسنجی مدل‌ها انجام گیرد و توسعه برنامه‌های آموزشی و مشارکتی با جوامع محلی برای حفاظت پوشش گیاهی و کاهش چرای مازاد نیز در دستور کار قرار گیرد. پوشش گیاهی مرتعی نقش بنیادینی در حفاظت سازندهای مارنی ایفا می‌کند. انتخاب گونه‌های مناسب (بومی و سازگار)، ترکیب مهندسی زیستی با راهکارهای مکانیکی، و مدیریت چرای مبتنی بر شواهد می‌تواند به‌طور مؤثری فرسایش سطحی و تولید رسوب را کاهش دهد. اجرای سیاست‌های حمایتی، برنامه‌ریزی مبتنی بر داده‌های مکانی و مشارکت جوامع محلی، ضامن موفقیت برنامه‌های تثبیت پوشش گیاهی در سازندهای مارنی خواهد بود. مطالعات مختلف از طبقه‌بندی‌های متفاوت (سازندگرایی، نوع مارن، مارن تبخیری/غیرتبخیری، مارن-کربناتی و...) استفاده کرده‌اند که مقایسه مستقیم نتایج را دشوار می‌سازد و مقیاس نقشه‌برداری (مثلاً ۱:۲۵۰۰۰ در برابر ۱:۱۰۰۰۰۰ یا نقشه‌های استانی) و روش‌های پردازش تصاویر (دستی در برابر خودکار) می‌تواند تفاوت‌های چشمگیری در برآورد مساحت ایجاد کند.

فهرست منابع

باقریان کلات، علی. فیله‌کش، اسماعیل. و مجیدی، علیرضا . (۱۳۹۹). بررسی ویژگی‌های خاک‌شناسی و پوشش گیاهی سازندهای مارنی، مطالعه موردی: مارن‌های منطقه سبزوار .مهندسی و مدیریت آبخیز. ۱۲(۴). ۹۲۹-۹۴۰.

برخورداری، جلال. پیروان، حمید رضا. شادفر، صمد. میرجلیلی، علی. بمان و هاتفی، میثم. (۱۴۰۰). بررسی نقش گونه‌های مرتعی در حفاظت سازندهای مارنی از فرسایش در شهرستان اردکان – استان یزد. ترویج و توسعه آبخیزداری. ۹(۳۳). ۴۵-۳۹.

حشمتی، مسیب. قیطوری، محمد. پیروان، حمیدرضا و چامه، غلامرضا. (۱۴۰۳). فرسایش پذیری و گونه های گیاهی مهم کنترل آن بر روی سازندهای مارنی در استان کرمانشاه.*فصلنامه پیشرفت و توسعه استان کرمانشاه* (3)*3*.

حشمتی، مسیب. پیروان، حمیدرضا. قیطوری، محمد. احمدی ملاوردی، مجید. و رادپور، علی. (۱۳۹۹). پراکنش سازندهای مارنی، کاربری اراضی و فرسایش غالب آن‌ها در استان کرمانشاه. جغرافیا و پایداری محیط. ۱۰(۴). 72-53 .

زارع پور، محسن. ولی، عباسعلی. و موسوی، حجت.۱۳۹۴. بررسی عوامل موثربر فرسایش آبی و تاثیر آن دراراضی مارنی،چهارمین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی.

عبدی نژاد، پرویز. فیض نیا، سادات. و پیروان، حمیدرضا. (۱۴۰۰). طبقه‌بندی مارن‌های استان زنجان براساس خصوصیات فیزیکوشیمیایی و تحلیل خوشه‌ای. *پژوهشهای دانش زمین*.18-1 ,(4)*12* .

مکی، سیمین. رضائی، پیمان. پیروان، حمیدرضا. بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش آبی در رسوبات مارنی سازندهای میشان و آغاجاری در باختر بندرعباس. (۱۳۹۵). پژوهش های فرسایش محیطی. ۶ (۱) :۵۱-۳۰.

Bahrouji, F., & Peyrowan, H. R. (2020). An accurate and practical analysis for Neogene-marls in Central regions of Iran. *Indian Journal of Science and Technology*, *13*(43), 4417-4433.

Dorairaj, D., & Osman, N. (2021). Present practices and emerging opportunities in bioengineering for slope stabilization in Malaysia: An overview. *PeerJ*, *9*, e10477.

Dunkerley, D. (2020). A review of the effects of throughfall and stemflow on soil properties and soil erosion. *Precipitation partitioning by vegetation: A global synthesis*, 183-214.

Gupta, S., Borrelli, P., Panagos, P., & Alewell, C. (2024). An advanced global soil erodibility (K) assessment including the effects of saturated hydraulic conductivity. *Science of the Total Environment*, *908*, 168249.

Hateffard, F., Mohammed, S., Alsafadi, K., Enaruvbe, G. O., Heidari, A., Abdo, H. G., & Rodrigo-Comino, J. (2021). CMIP5 climate projections and RUSLE-based soil erosion assessment in the central part of Iran. *Scientific reports*, *11*(1), 7273.

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.

Li, H., Jin, J., Dong, F., Zhang, J., Li, L., & Zhang, Y. (2024). Gully Erosion Susceptibility Prediction Using High-Resolution Data: Evaluation, Comparison, and Improvement of Multiple Machine Learning Models. *Remote Sensing*, *16*(24), 4742.

Mohammadi, S., Balouei, F., Haji, K., Khaledi Darvishan, A., & Karydas, C. G. (2021). Country-scale spatio-temporal monitoring of soil erosion in Iran using the G2 model. International Journal of Digital Earth, 14(8), 1019-1039.

Onyango, V., Masumbuko, B., Somda, J., Nianogo, A., & Davies, J. (2022). *Sustainable land management in rangeland and grasslands*. Food & Agriculture Org..

Perović, V., Čakmak, D., Pavlović, D., Matić, M., Kostić, O., Mitrović, M., & Pavlović, P. (2025). From prediction to ecological insight: exploring soil erodibility through integrated spatial modelling. *Landscape Ecology*, *40*(8), 164.

Rostami, F., Feiznia, S., Aleali, M., Hashmati, M., & Yousefi Yegane, B. (2019). Erodibility and sedimentation potential of marly formations at watershed scale. *Glob J Environ Sci Manage*, *5*(3), 383-98.

Sadeghi, S. H., Satri, M. S., Kheirfam, H., & Darki, B. Z. (2020). Runoff and soil loss from small plots of erosion-prone marl soil inoculated with bacteria and cyanobacteria under real conditions. *European Journal of Soil Biology*, *101*, 103214.

Sadooni, F. N., & Alsharhan, A. S. (2019). Regional stratigraphy, facies distribution, and hydrocarbons potential of the Oligocene strata across the Arabian Plate and Western Iran. *Carbonates and Evaporites*, *34*(4), 1757-1770.

Vaezi, A. R., Abbasi, M., Bussi, G., & Keesstra, S. (2017). Modeling sediment yield in semi-arid pasture micro-catchments, NW Iran. *Land Degradation & Development*, *28*(4), 1274-1286.

Studying soil erosion in marl formations and the role of rangeland species in protecting these formations

Moslem zarini bahador
Agricultural and Natural Resources Research and Training Center of Tehran Province, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran.

Abstract
Marly formations, due to their geomorphological and geological characteristics—such as clay–carbonate composition, variable soil texture and permeability, and stratified structure—exhibit a high susceptibility to both water and wind erosion. In recent years, numerous experimental and modeling studies have focused on evaluating erosivity and erodibility parameters (particularly the *K* factor in the RUSLE model), the role of vegetation cover, the influence of climate change, and the application of advanced remote sensing and machine learning techniques.
This review synthesizes the current knowledge on erosion mechanisms in marls, measurement and modeling approaches, and effective strategies for erosion mitigation. Findings indicate that *K* values in marly surfaces are typically high and variable, primarily controlled by soil texture and stratified structure. Field studies in Iran demonstrate that marls represent a major source of sediment yield and are highly susceptible to surface subsidence. The integration of modern methods such as Digital Soil Mapping (DSM) and machine learning models has significantly improved the accuracy of erodibility estimation and facilitated the prioritization of high-risk areas for soil conservation.
Recent research further reveals that more than 50% of the sediment yield in some Iranian watersheds originates from marly terrains. Therefore, the adoption of integrated approaches—combining biological soil stabilization, watershed management measures, land-use regulation, and the application of advanced remote sensing technologies—can substantially reduce soil degradation rates and enhance the resilience of marl-dominated ecosystems.
Vegetation density in marly formations is generally limited due to high concentrations of soluble salts, elevated gypsum and lime content, and intense capillary effects. Evidence suggests that a combination of native plant species with strong ecological adaptability, bioengineering techniques, and adaptive grazing management can markedly decrease surface erosion and sediment production. Finally, the paper provides practical management recommendations to mitigate the erosion risks associated with marly formations.

Keywords: Sediment, Lime, Vegetation, Water Erosion