پژوهش و فناوری محیط‌زیست، ۱۴۰۴،(۱۸)۱۰، ۱۰۹-۱۲۲

پژوهش و فناوری محیط زیست

وبگاه نشریه: www.journal.eri.acecr.ir

پژوهشکده محیط زیست

شاپا الکترونیکی: ۳۰۶۰-۲۶۷۶

# ارزیابی اقدامات حفاظتی آبخیزداری در کاهش فرسایش و رسوب‌گذاری حوضه آلنزه با استفاده از مدل MPSIAC

مکرم روان‌بخش[1]✉، مائده قربان‌پور دلیوند[2]، آرمان انارکی[3]

*۱- عضو هیئت علمی گروه پژوهشی محیط‌زیست طبیعی، پژوهشکده محیط‌زیست جهاد دانشگاهی*

*۲- دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی مرتع، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، مازندران*

*۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی مرتع، دانشگاه تهران*

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
پژوهشی

**تاریخ دریافت:**
۱۴۰۴/۰۶/۰۴

**تاریخ پذیرش:**
۱۴۰۴/۱۰/۰۷

**دسترسی آنلاین:**
۱۴۰۴/۱۲/۰۵

**کلید واژه‌ها:**
اقدامات بیولوژیکی و مکانیکی،
تالاب انزلی،
تولید رسوب،
حوضه آبخیز

**چکیده**

فرسایش و رسوب‌گذاری از چالش‌های اصلی مدیریت منابع آب و خاک هستند که تأثیرات مخربی بر اکوسیستم‌ها دارند. توسعه جوامع انسانی و افزایش فعالیت‌های بشر موجب تخریب و تغییر کاربری اراضی و درنتیجه افزایش میزان فرسایش و رسوب شده است. ارزیابی تأثیر اقدامات احیایی آبخیزداری را بر کاهش فرسایش خاک و تولید رسوب به‌منظور ارزیابی اثرات آن‌ها و تصمیم‌گیری صحیح در اجرای بهینه این طرح‌ها ضروری است. هدف تحقیق حاضر، ارزیابی اقدامات حفاظتی آبخیزداری اجرا شده و تأثیر آن‌ها بر میزان فرسایش و رسوب حوضه آبخیز آلنزه طی سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ و مقایسه آن با شرایط قبل از اجرای این طرح‌ها به کمک مدل تجربی امپسیاک (MPSIAC) بود. نتایج نشان داد که اقدامات حفاظتی و احیایی انجام‌شده سبب شده است که میزان ضریب رسوب‌دهی از ۱۱۴ به ۱۰۱ (کاهش ۱۱/۴٪) و مقدار رسوب ویژه در واحد سطح برای کل حوضه از حدود ۳۰۰۹ مترمکعب در سال به ۱۵۸۷ مترمکعب در سال (۴۷٪) به ترتیب قبل و بعد از اجرای اقدامات احیایی کاهش یابد. نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب اقدامات بیولوژیکی و مکانیکی در مدیریت حوضه آلنزه می‌تواند به‌طور مؤثری فرآیند رسوب‌گذاری را کاهش دهد و به‌عنوان الگویی برای مدیریت تلفیقی آبخیزهای مشابه مطرح شود. با این وجود، تداوم اثربخشی این اقدامات منوط به اجرای نظام‌مند برنامه مدیریت جامع است که شامل تخصیص هدفمند بودجه به پروژه‌های مکانیکی نیمه‌تمام، توسعه طرح‌های بیولوژیکی نظیر بذرپاشی و قرق مراتع، ارتقای آگاهی و مشارکت جوامع محلی، مدیریت فشار دام و استقرار سامانه‌های پایش مستمر فرسایش و رسوب می‌باشد.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mokarramravanbakhsh@gmail.com

Journal of Environmental Research and Technology, 10(18)2025. 109-122

Journal of Environmental Research and Technology

journal homepage: www.journal.eri.acecr.ir

Environmental Research institute

Online ISSN: 2676-3060

# Evaluation of Watershed Management Conservation Operations in Reducing Erosion and Sedimentation in the Alanza Watershed Using the MPSIAC Model

**Mokaram Ravanbakhsh[1]✉, Maede Ghorbanpour Delivand[2], Arman Anaraki[3]**

1- Faculty Member, Natural Environment Research Department, Environmental Research Institute, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR)
2- Ph.D. in Rangeland Science and Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran
3- M.Sc. in Rangeland Science and Engineering, University of Tehran

**Article Info**

**Article type:**
Research Article

**Article history:**
**Received:**
2025/08/26
**Accepted:**
2025/12/28
**Available online:**
2026/02/24

**Keywords:**
Anzali wetland, Biological and Mechanical operations, Sediment Yield, Watershed Basin

**Abstract**

Erosion and sedimentation pose major challenges to water and soil resource management, exerting detrimental impacts on ecosystems. Human societal development and increased anthropogenic activities have caused land degradation and altered land use patterns, consequently intensifying erosion and sedimentation. Assessing the impact of watershed rehabilitation operations on reducing soil erosion and sediment yield is essential to evaluate their effectiveness and inform optimal implementation strategies. This study evaluated implemented watershed conservation operations and their effects on erosion and sedimentation rates in the Alanza watershed from 2016 to 2023, comparing post-implementation conditions with pre-project baselines using the empirical MPSIAC model. Results indicate that conservation and rehabilitation operations reduced the sediment delivery ratio from 114 to 101 (11.4% decrease) and lowered the specific sediment yield per unit area across the watershed from 3009 $m^3$/year to 1587 $m^3$/year (47% reduction) before and after implementation, respectively. Overall, findings demonstrate that integrated biological and mechanical measures in the Alanza watershed can serve as an optimal strategy for sedimentation mitigation. However, sustaining these outcomes requires full and precise execution of the regional management plan, including: optimal budget allocation for unimplemented mechanical operations in designated areas, expansion of biological interventions (e.g., reseeding and rangeland exclosure), stakeholder education and local community engagement, reduced livestock grazing pressure, and continuous monitoring of erosion-sedimentation dynamics.

* Corresponding author E-mail address: mokarramravanbakhsh@gmail.com

## مقدمه

یکی از رایج‌ترین اشکال تخریب خاک که تأثیرات منفی بر محیط‌زیست و زندگی بشر دارد، فرسایش خاک است. اگرچه فرسایش خاک همواره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تهدیدها برای پایداری اکوسیستم‌ها و بهره‌وری سرزمین شناخته می‌شود، شواهد علمی اخیر نشان می‌دهند که این پدیده می‌تواند در شرایط خاص، نقش دوگانه‌ای ایفا کند. مرور نظام‌مند Teku و همکاران (۲۰۲۵) نشان داده است که جابجایی و ته‌نشست رسوبات در پایین‌دست می‌تواند موجب غنی‌سازی موضعی خاک از نظر مواد مغذی و بهبود ظرفیت نگه‌داری آب شود. همچنین، یافته‌های Bayata (۲۰۲۴) حاکی از آن است که فرسایش با شدت متوسط، در صورت همراهی با اقدامات مدیریتی حفاظتی، می‌تواند به توزیع مجدد عناصر غذایی در لایه‌های زیرین و بهبود ساختار فیزیکی خاک کمک کند. بر این اساس، نگرش تک‌بعدی به فرسایش به‌عنوان صرفاً یک فرآیند تخریبی نیازمند بازنگری است؛ چراکه در رویکردهای نوین مدیریت جامع سرزمین و آبخیزداری، درک پویایی‌های مثبت و منفی این فرآیند می‌تواند به طراحی راهبردهای بازسازی و ارتقای تاب‌آوری اکوسیستم‌ها منجر شود. معمولاً شدت این پدیده با بهره‌گیری از مدل‌های گوناگون مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (بابایی اولم و عابدینی، ۱۴۰۳). فرسایش خاک یکی از جدی‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی است که سالانه منجر به از دست رفتن ۲۴ میلیارد تن خاک در جهان می‌شود (Borrelli و همکاران، ۲۰۱۷). فرسایش خاک یکی از چالش‌های محیط‌زیستی است که به‌عنوان تهدیدی برای منابع‌طبیعی، کشاورزی و اکوسیستم محسوب‌می‌شود (صفاری و همکاران، ۱۳۹۷). در ایران سابقه حفاظت خاک به سال ۱۳۴۰ باز می‌گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد متأسفانه باوجود چند دهه تحقیق و اقدامات اجرایی و هزینه‌های سنگین ناشی از اجرای این طرح‌ها، هنوز هم تخریب این منابع ادامه دارد (باقریان کلات ۱۴۰۰). این طرح‌ها و تلاش‌های انجام شده در مجموع کم‌اثر به نظر می‌رسند. به‌عنوان مثال، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که در بسیاری از مناطق، اقدامات حفاظتی به‌دلیل عدم هماهنگی میان نهادهای دولتی و محلی و همچنین کمبود منابع مالی و انسانی، نتوانسته‌اند به‌طور مؤثر از تخریب منابع‌طبیعی جلوگیری کنند (Smith و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، تغییرات اقلیمی و فشارهای ناشی از توسعه شهری و صنعتی نیز به تشدید این بحران کمک کرده‌اند؛ بنابراین، نیاز به بازنگری در استراتژی‌های مدیریتی و اجرای طرح‌های جامع‌تر و پایدارتر برای حفاظت از این منابع بیش از پیش احساس می‌شود. (Guo و همکاران، ۲۰۱۸). اثرات فرسایش و انتقال مواد رسوبی شامل پر شدن زودرس تالاب‌ها و مدفون شدن حاشیه رودخانه‌ها، پر شدن مخازن سدها و بندها، از بین رفتن اراضی حاصل‌خیز کشاورزی و پر شدن کانال‌های آب‌رسانی، است. مطالعات نشان داده‌اند که شیوه‌های حفاظت از حوضه آبخیز می‌تواند به‌طور مؤثر بارهای رسوب در جریان را کاهش دهد (روان‌بخش و همکاران، ۱۴۰۳). مدل امپسیاک (MPSIAC)[1] به‌دلیل در نظر گرفتن نه متغیر کلیدی و قابلیت کمی‌سازی رسوب، به‌عنوان ابزار مناسبی برای ارزیابی و پیش‌بینی میزان رسوب است (Casabella-González و همکاران، ۲۰۲۳). مطالعات اخیر نشان می‌دهند که این مدل در مناطق مرطوب با دقت ۸۵-۹۰٪ قادر به پیش‌بینی رسوب است و ادغام آن با سیستم اطلاعات جغرافیایی امکان تحلیل فضایی دقیق‌تری را فراهم می‌کند (Eisazadeh و همکاران، ۲۰۱۲: Noori و همکاران، ۲۰۱۸). در مقایسه با سایر مدل‌های تجربی، مدل امپسیاک یکی از مدل‌هایی است که بیش‌ترین عوامل مؤثر در فرسایش خاک را در نظر می‌گیرد. عوامل نه‌گانه مؤثر در این مدل تجربی با توجه به‌شدت و ضعف تأثیرشان عددی را به خود اختصاص داده که با در نظر گرفتن مجموع این اعداد، رسوب‌دهی حوضه آبخیز برآورد می‌شود (Casabella-Gonzalez و همکاران، ۲۰۲۳).

در زمینه پژوهش حاضر، مطالعات زیادی در سراسر دنیا انجام شده‌است؛ مؤذنی نقندر و همکاران (۱۴۰۱) اثر اجرای پروژه‌های آبخیزداری بر رواناب و فرسایش خاک حوضه نخاب بشرویه را بررسی کردند. بدین‌منظور و برای تعیین میزان تغییرات فرسایش و رسوب حوضه از مدل امپسیاک در دو حالت قبل و بعد از اجرای پروژه‌ها استفاده شد. نتایج شامل کاهش فرسایش ویژه از ۱۰/۱۸ به ۹/۸ تن در هکتار در سال و کاهش رسوب‌دهی ویژه از ۳/۱۶ به ۲/۹ تن در هکتار در سال بود. Fonseca و همکاران (۲۰۲۳) در بررسی اثرات فرسایش در محل و خارج از محل اقدامات احیایی در یک حوضه آبخیز گرمسیری، میزان ریزش خاک و عملکرد رسوب مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که میانگین ریزش خاک از ۱۱/۶ به ۵/۸ میلی گرم در هکتار در یک

[1] Modified Pacific Southwest Inter-Agency Committee

سال کاهش یافت. Zeng و همکاران (۲۰۲۳) میزان فرسایش خاک و رسوب در یک حوضه آبخیز در چین را ارزیابی کردند و کاهش قابل توجهی ناشی از ساخت چکدم و ترمیم پوشش گیاهی را نشان دادند که از طریق فناوری پهپاد و پایش هیدرولوژیکی تعیین شد. Adeogun و همکاران (۲۰۲۲) پژوهشی با استفاده از مدل سوات (SWAT) برای مدیریت مؤثر حوضه آبخیز برای اثربخشی استراتژی‌های مدیریت آبخیز انتخابی بر کاهش رسوب در بالادست سد شیرورو، نیجریه استفاده کردند. یافته‌ها نشان داد که اجرای احیای جنگل، نوارهای فیلتر رویشی و چکدم سنگی در حوضه به‌ترتیب ۲۷ درصد، ۳۹ درصد و ۱۵ درصد تولید رسوب را کاهش داد. Cho و همکاران، ۲۰۱۹، در پژوهشی تحت عنوان مدل شبیه‌سازی تصمیم‌گیری مشترک در مورد کاهش منبع رسوب در یک حوضه آبخیز تحت مدیریت شدید در جنوب مینه‌سوتا عنوان کردند که در حالی که اقدامات احیایی می‌تواند به‌طور قابل توجهی میزان رسوب را کاهش دهد، چالش‌ها در دستیابی به نتایج پایدار طولانی‌مدت، به‌ویژه در مناطقی با تخریب زمین و تغییرات آب و هوایی ادامه دارد.

بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که ارتباط هیدرولوژیکی میان حوضه‌های بالادست و تالاب‌ها، عاملی کلیدی در تعیین پایداری عملکرد بوم‌شناختی آن‌ها است. ورود رسوبات ناشی از کاربری‌های اراضی بالادست، به‌ویژه در مناطق کوهستانی و اراضی کشاورزی، می‌تواند از مهم‌ترین تهدیدات زیست‌محیطی برای تالاب‌ها محسوب شود. مطالعه Rashedi و همکاران (۲۰۲۵) با بهره‌گیری از مدل‌های تلفیقی تغییر اقلیم و کاربری زمین نشان داد که میزان رسوب‌گذاری در حوضه‌های بالادست تالاب انزلی تا سال ۲۰۷۰ ممکن است تا ۶۶ درصد افزایش یابد. چنین روندی می‌تواند کاهش چشمگیر عمق و ظرفیت ذخیره آب تالاب را به‌دنبال داشته و فرآیندهای پرشدگی و خشکیدگی را تسریع نماید. یافته‌های پژوهش Mahdian و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که تمرکز بالای رسوبات و فلزات سنگین در ورودی زیرحوضه‌های تالاب انزلی، بیانگر وجود پیوند هیدرولوژیکی و جریان فعال تبادل مواد میان این زیرحوضه‌ها و بدنه اصلی تالاب است. نتایج مدل امپسیاک نیز حاکی از آن است که حدود ۸۰ درصد از بار رسوبی ورودی به تالاب انزلی از زیرحوضه‌های بالادست تأمین می‌شود که عمدتاً شامل نواحی مرتعی و اراضی کشاورزی با شدت بهره‌برداری بالا است (Vavdareh Khalili و همکاران، ۲۰۲۲).

تالاب انزلی به‌عنوان یک اکوسیستم ارزشمند، با چالش‌های جدی مانند کاهش عمق و افزایش بار رسوبی مواجه است. کاهش عمق و بار رسوبی از طریق ورود سالانه حدود ۱/۵ تا ۲ میلیون تن، نشان‌دهنده فشارهای شدید انسانی و محیطی بر این تالاب است. برای حفظ این اکوسیستم، اجرای برنامه‌های مدیریتی جامع شامل کنترل فرسایش خاک، احیای جنگل‌ها، و بهبود شیوه‌های کشاورزی در حوضه آبخیز ضروری است (Mahdian و همکاران، ۲۰۲۳). رسوبات که به تالاب انزلی وارد می‌شوند، در مناطق کوهستانی و مسیر اصلی رودخانه تولید شده و سپس از طریق این رودخانه‌ها به تالاب وارد می‌شوند. کاهش منبع رسوب در این مناطق، مؤثرترین روش کاهش ورود رسوبات به تالاب انزلی است. بررسی آورد رسوب رودخانه‌های محدوده سیاه کشیم و سرخانکل نشان داد که رودخانه‌های خالکائی و مرغک از زیر حوضه ماسال، بیشترین بار رسوبی به تالاب را حمل می‌کنند (مدیریت اکولوژیک تالاب انزلی، ۱۳۹۸). زیر حوضه آلنزه یکی از سرشاخه‌های فرسایش یافته حوضه آبخیز مرغک و خال کانی به‌عنوان یکی از مناطق و نواحی حساس به فرسایش و تولید رسوب در حوضه آبریز تالاب شناسایی شده‌است (مهندسین مشاور سازه آب شفق، ۱۳۹۵). حوضه آلنزه ماسال از زیر واحدهای هیدرولوژیک حوضه مرغک ماسال است. مساحت آن ۴۵۲۲/۰۹ هکتار است و در حدود ۱۹/۵ درصد از حوضه مرغک ماسال را در بر می‌گیرد. عوامل تخریب حوضه دامداری آزاد و سنتی، قطع درختان جنگل‌های حوضه، تبدیل اراضی به اراضی زراعی و باغات، احداث راه‌های جنگلی و کوهستانی است (روان‌بخش و همکاران، ۱۴۰۳).

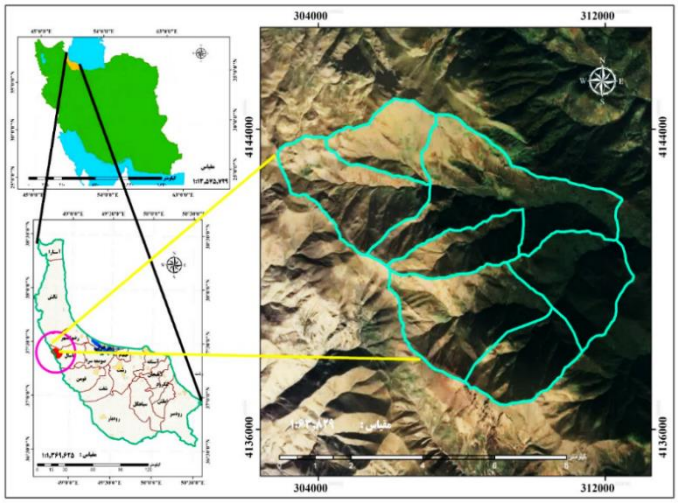
پژوهش حاضر با هدف بررسی و تحلیل کمی رسوب در حوضه آلنزه پیش و پس از اجرای اقدامات احیایی و ارزیابی تأثیر اقدامات احیایی آبخیزداری بیولوژیکی و سازه‌ای بر کاهش فرسایش و رسوب با بهره‌گیری از مدل امپسیاک انجام شده است. در این مطالعه، مدل مذکور در منطقه‌ای مرطوب با ویژگی‌های خاص (یکی از مناطق و نواحی حساس به فرسایش و تولید رسوب در حوضه آبریز تالاب انزلی) به کار رفته تا تغییرات ناشی از اقدامات احیایی طی بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ به‌صورت دو دوره (قبل و بعد از اجرای اقدامات احیایی آبخیزداری) مورد تحلیل قرار گیرد. علاوه بر ارزیابی درون‌حوضه‌ای، این تحقیق با تمرکز بر

ارتباط هیدرولوژیکی و رسوبی حوضه آلنزه با تالاب انزلی، دیدگاهی اکوسیستم‌محور ارائه داده و نقش این حوضه را به‌عنوان یکی از منابع اصلی رسوب تالاب شناسایی کرده است؛ رویکردی که در مطالعات Mahdian و همکاران (۲۰۲۳) و Khalili Vavdareh و همکاران (۲۰۲۲) تنها در مقیاس کل حوضه بررسی شده بود. بدین‌ترتیب، این پژوهش با ایجاد چارچوبی میان‌رشته‌ای میان مدل‌سازی، ارزیابی عملکرد احیایی و تحلیل ارتباط حوضه و تالاب، گامی نو در مدیریت جامع و آینده‌نگر حوضه‌های تالابی به‌شمار می‌آید.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آلنزه با مساحت ۴۵۲۲/۰۹ هکتار یکی از زیرحوضه‌های تالاب انزلی، در دامنه‌های شمالی البرز و در غرب استان گیلان واقع شده‌است (شکل ۱). این منطقه از سرشاخه‌های رودخانه حوضه مرغک شاندرمن، از توابع شهرستان ماسال و به تالاب بین المللی انزلی منتهی می‌شود. منطقه مورد مطالعه از مناطق کوهستانی با تراکم شدید پستی و بلندی، پوشش توأم جنگلی و مرتعی در طول جغرافیایی "۵۴ '۴۷ °۴۸ تا "۰۶ '۵۲ °۴۸ شرقی و در عرض جغرافیایی "۰۸ '۲۲ °۳۷ تا "۱۹ '۲۵ °۳۷ واقع شده‌است. حوضه دارای هفت زیر حوضه به‌ترتیب W1، W2، W3، W4، W5، Wint1 و Wint2 است. این زیرحوضه‌ها از دو بخش جنگل و مرتع تشکیل شده و محدوده جنگلی با مساحت ۲۰۷۰/۵۵ هکتار و بخش مرتعی با مساحتی برابر ۲۴۴۹/۵۵ هکتار است. جنگل‌های حوضه دانه‌زاد ناهم‌سال آمیخته و با گونه‌های غالب نمدار، ون، ممرز و راش به‌ترتیب با اسامی *Tilia begonifolia*، *Fraxinus excelsior*، *Carpinus betulus* و *Fagus orientalis* است. مراتع آلنزه جزء چمنزارهای شبه آلپی محسوب می‌شوند و تیپ غالب مرتع شامل پهن برگان خوش خوراک و گراس‌های پا کوتاه *Trifolium repense* و *Poa trivialis* است. حوضه آلنزه یکی از سرشاخه‌های فرسایش یافته حوضه آبخیز مرغک و خال کانی به‌عنوان یکی از مناطق و نواحی حساس به فرسایش و تولید رسوب در حوضه آبریز تالاب انزلی شناسایی شده‌است (مهندسین مشاور سازه آب شفق، ۱۳۹۵). حوضه آلنزه از دو بخش جنگل و مرتع تشکیل شده‌است. بیشترین قسمت تخریب حوضه آلنزه مربوط به کاربری مرتع است که در بالادست حوضه قرار دارد. بخش‌های مرتعی حوضه آلنزه که عمدتاً شامل زیرحوضه‌های W2،W1 Wint1،Wint2 است، در اثر چرای بی‌رویه دام و شیب زیاد به‌شدت فرسایش یافته‌است (مهندسان مشاور طرح و سازه شفارود، ۱۳۹۸). مرتفع‌ترین نقطه آبخیز ۲۵۰۰ متر و پایین‌ترین نقطه آن دارای ارتفاعی حدود ۱۰۶۷ متر از سطح دریاست. حدود ۶۰ درصد مساحت، در طبقه شیب ۶۰ - ۳۰ درصد واقع شده است. میانگین سالانه بارندگی در حوضه مطالعاتی از ۶۸۹/۰۶ میلی‌متر و میانگین سالانه




**شکل (۱) موقعیت حوضه آلنزه و زیرحوضه‌های آن (پژوهشکده محیط‌زیست جهاد دانشگاهی، ۱۴۰۳)**

درجه حرارت ۶/۶ درجه سانتی‌گراد است. حوضه دارای اقلیم مرطوب تا خیلی مرطوب سرد است. تشکیلات ساخت از نظر دیرین‌شناسی به دوران اول پالئوزوئیک تحتانی و فوقانی و از لحاظ سنگ‌شناسی متعلق به دوره‌های پرمین و کاربوینفر مربوط است. خاک‌های حوضه از نظر تحول و تکامل جز خاک‌های تحول نیافته و کم تحول‌یافته (آنتی سول و اینسپتی‌سول) محسوب می‌شوند. بیش از نیمی از مساحت حوضه تحت‌تأثیر فرآیندهای فرسایش سطحی است که مهم‌ترین علل گسترش آن کاهش تراکم پوشش علفی مراتع و تخریب و بهره‌برداری بیش از حد از بخش جنگلی است. پس از فرسایش سطحی، فرسایش آبراهه‌ای از اشکال فرسایشی عمده در حوضه آلنزه است (مهندسین مشاور شفق آب سازه، ۱۳۹۵؛ مشاورین طرح و سازه شفارود، ۱۳۹۸، پژوهشکده محیط‌زیست جهاد دانشگاهی، ۱۴۰۳).

## روش پژوهش

در این روش پژوهشی، برآورد کمی و کیفی تولید رسوب از طریق امتیازدهی به نُه عامل کلیدی مؤثر بر رسوب‌زایی صورت می‌پذیرد. عوامل مذکور عبارتند از: زمین‌شناسی سطحی، ویژگی‌های خاک، شرایط اقلیمی، میزان رواناب، مشخصات توپوگرافی، پوشش زمین، کاربری اراضی، وضعیت کنونی فرسایش، همچنین فرسایش و انتقال رسوب رودخانه‌ای (رفاهی، ۱۳۹۴). داده‌های پایه مورد نیاز پژوهش از طریق تحلیل نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، ارزیابی منابع و پتانسیل اراضی، عکس‌های هوایی و سایر منابع آماری موجود استخراج شد. اطلاعات ضروری برای مدل MPSIAC شامل آمار ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی مناطق همجوار حوضه، میانگین ارتفاعی حوضه، رواناب سالانه و دبی اوج ویژه بود. جهت تهیه این داده‌ها از مطالعات آبخیزداری پیش از اجرای عملیات و نیز گزارش جامع آبخیزداری حوضه آلنزه پس از اجرای اقدامات، همراه با اعمال محاسبات مدل MPSIAC استفاده شد (کریمی و طالبی، ۱۴۰۱). در مرحله بعدی، پس از تعیین نُه عامل مدل MPSIAC و محاسبه مجموع امتیازات آن‌ها، کلاس فرسایش و رسوب‌زایی حوضه با استناد به جدول استاندارد طبقه‌بندی رسوب‌دهی تعیین شد. این فرآیند منجر به برآورد میزان فرسایش خاک و تولید رسوب حوضه آلنزه در دو بازه زمانی قبل و پس از اجرای پروژه‌های آبخیزداری شد. در نهایت، نقشه درجه رسوب‌دهی (R) تهیه و با به‌کارگیری معادله مربوطه(Qs)، نقشه رسوب ویژه حوضه آبخیز مورد مطالعه ترسیم شد (نورانی و محسن‌زاده، ۱۳۹۶).

معادله ۱: $Q_S = 38.77 \cdot e^{.035\,R}$

Qs= میزان تولید رسوب برحسب متر مکعب بر کیلومترمربع در سال و R درجه (شدت) رسوب‌دهی با مجموع نمرات عوامل نه‌گانه. رابطه فوق با درجه همبستگی r=۰/۹۹۶۴ از نظر آزمون آماری در سطح یک درصد معنی‌دار است. پس از محاسبه میزان رسوب، عدد حاصل در این مدل را براساس جدول (۱) شدت و کلاس رسوب‌دهی تعیین شد:

**جدول (۱) میزان تولید رسوب سالانه و کلاس رسوب ویژه خاک در روش MPSIAC**

| کلاس رسوب‌دهی | شدت رسوب‌دهی | تولید رسوب سالانه | | نمرات نشان‌دهنده |
|---|---|---|---|---|
| | | مترمکعب در کیلومترمربع | ایکرفوت در مایل مربع | شدت رسوب‌دهی (R) |
| V | خیلی زیاد | >۱۴۲۹ | >۱/۴۲ | >۱۰۰ |
| IV | زیاد | ۲۷۶-۶۵۰ | /۵۸-۱/۴۲ | ۷۵-۱۰۰ |
| III | متوسط | ۱۱۲-۲۷۶ | /۲۴-/۵۸ | ۵۰-۷۵ |
| II | کم | ۴۵-۱۱۲ | /۱-/۲۴ | ۲۵-۵۰ |
| I | خیلی کم یا جزئی | <۴۵ | <۰/۱ | ۰-۲۵ |

در جدول (۳) مشخصات انوع اقدام احیایی آبخیزداری انجام شده در حوضه آلنزه ارائه شده است:

**جدول (۳) عملیات اجرایی آبخیزداری حوضه آلنزه**

| نوع اقدام احیایی | نوع سازه | محل احداث سازه | تعداد | حجم کل سازه | حجم کل رسوب ذخیره‌شده |
|---|---|---|---|---|---|
| مکانیکی، بیومکانیکی و بیولوژیک | سنگ ملاتی | Wint 2 | ۴ | ۳۲۰ | ۳۲۰ |
| | گابیون و دیواره گابیونی | W1، Wint 2 | ۳۰ | ۳۳۵۱ | ۱۰۲۱ |
| | خشکه‌چین | W1 | ۵ | ۴۱ | ۲۱ |
| | چپری دو قلو | W1 | ۳۳ | ۱۰۲ | ۱۰۰ |
| | بانکت‌بندی همراه با بذرپاشی و قرق | مرز بین W1 و Wint 2- به مساحت ۲/۵ هکتار با بذر Agropyron cristatum | | | |

## یافته‌های پژوهش

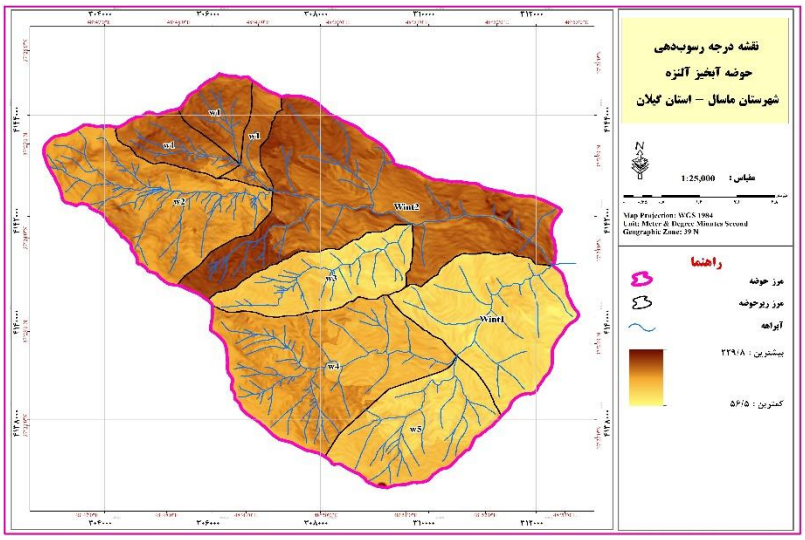
جدول (۳) میزان شدت رسوب‌دهی و رسوب ویژه قبل و بعد از اجرای اقدامات احیایی آبخیزداری نشان‌می‌دهد. مطابق جدول زیر، میزان شدت رسوب‌دهی در منطقه مورد مطالعه به‌طور قابل توجهی تحت‌تأثیر متغیرهای مختلف قرار دارد و متغیرهای پستی و بلندی و نوع هیدرولوژی نقش بیشتری در افزایش شدت رسوب‌دهی ایفا کرده‌اند.

**جدول (۳) میزان شدت رسوب‌دهی و رسوب ویژه قبل و بعد از اجرا اقدامات احیایی آبخیزداری در حوضه آبخیز آلنزه**

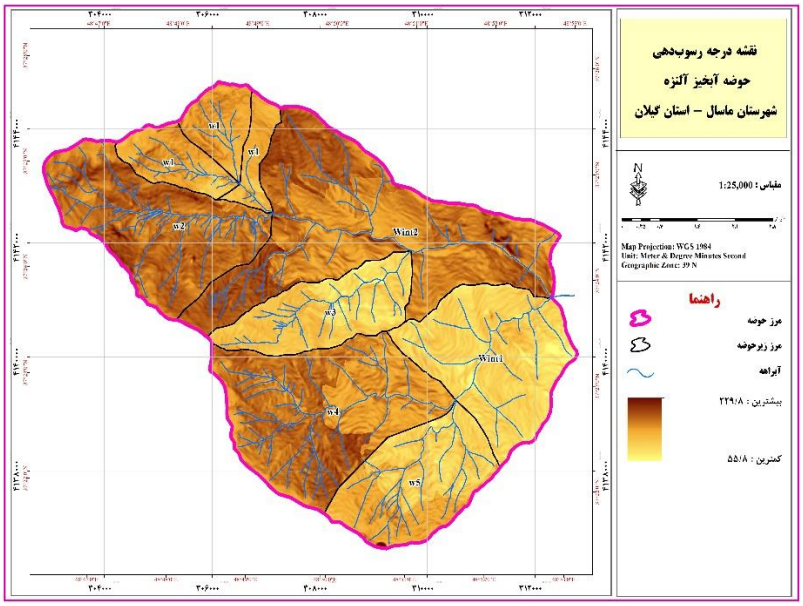
| میانگین / متغیر | زمین‌شناسی | خاک | آب‌وهوا | هیدرولوژی | پستی و بلندی | پوشش زمین | استفاده از زمین | وضعیت فعلی فرسایش | فرسایش رودخانه‌ای | شدت رسوب‌دهی | رسوب ویژه (m3/km2/Y) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| حوضه آبخیز- قبل از اجرای اقدامات احیایی | ۴ | ۶/۴ | ۱ | ۴۷/۷ | ۱۹/۳ | ۶/۷ | ۱۰/۳ | ۱۴/۲ | ۴/۷ | ۱۱۴/۶، خیلی زیاد | ۳۰۰۹ |
| حوضه آبخیز- بعد از اجرای اقدامات احیایی | ۴ | ۶/۴ | ۱ | ۳۸/۵ | ۱۹/۳ | ۵/۶ | ۸/۷ | ۱۳/۹ | ۴/۳ | ۱۰۱/۹، خیلی زیاد | ۱۵۸۷ |

مطابق جدول(۲)، میزان شدت رسوب دهی حوضه از ۱۱۴/۶ در وضعیت قبل به ۱۰۱/۹ در وضعیت بعد از اجرای اقدامات احیایی کاهش یافته است. بررسی امتیازات عوامل نه‌گانه نشان می‌دهد امتیازات عوامل رواناب، پوشش زمین، کاربری اراضی و وضعیت کنونی فرسایش کاهش یافته‌اند. میزان رسوب ویژه حوضه نیز از ۳۰۰۹ به ۱۵۸۷ مترمکعب در سال کاهش داشته و (کاهش تقریباً ۵۰ درصدی) و طبقه شدت رسوب‌دهی حوضه در طبقه خیلی زیاد قرار دارد.

شکل (۲)، نقشه درجه رسوب‌دهی حوضه، قبل از اجرای اقدامات احیایی آبخیزداری ارائه شده است. مطابق نقشه مذکور مناطق با درجه رسوب‌دهی بالا (مناطق با رنگ‌های تیره‌تر (قهوه‌ای تا قهوه‌ای تیره))، به‌ویژه در نواحی با شیب‌های تند و پوشش گیاهی ضعیف، شناسایی‌شده‌اند. این مناطق به وضوح نشان‌دهنده نقاط بحرانی حوضه هستند که مستعد فرسایش شدید خاک هستند. فرسایش منجر به از دست رفتن لایه حاصلخیز خاک شده است. این مناطق به‌دلیل فرسایش خاک و عدم توانایی در جذب آب، و منبع اصلی تولید رسوب و کاهش کیفیت آب هستند. شکل (۳)، نقشه درجه رسوب‌دهی پس از اجرای اقدامات احیایی آبخیزداری نمایش داده شده است. مقایسه این نقشه با نقشه قبل نشان‌دهنده کاهش در مناطق با درجه رسوب‌دهی بالا است. رنگ‌های تیره‌تر که در نقشه (۲) غالب بودند، در این نقشه به وضوح کاهش یافته‌اند. این تغییر رنگ به‌سمت رنگ‌های روشن‌تر نشان‌دهنده کاهش میزان فرسایش و رسوب‌دهی در این مناطق است. این امر مؤید تأثیر نسبی تثبیت خاک و کاهش رسوبات به‌دلیل اجرای اقدامات احیایی آبخیزداری در این مناطق است.



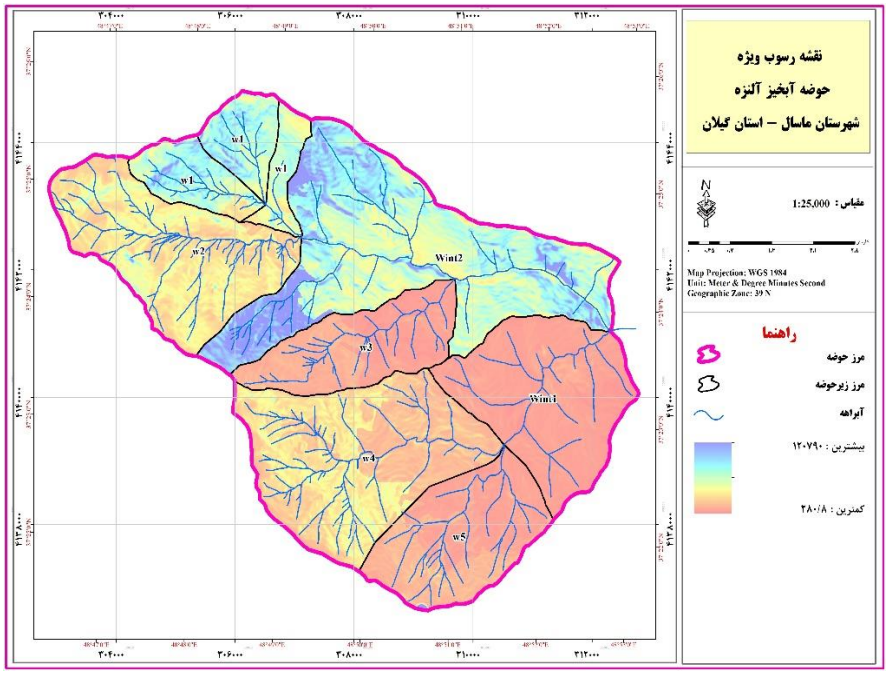

**شکل(۲) نقشه درجه رسوب‌دهی مدل MPSIAC قبل از اجرا اقدامات احیایی آبخیزداری**



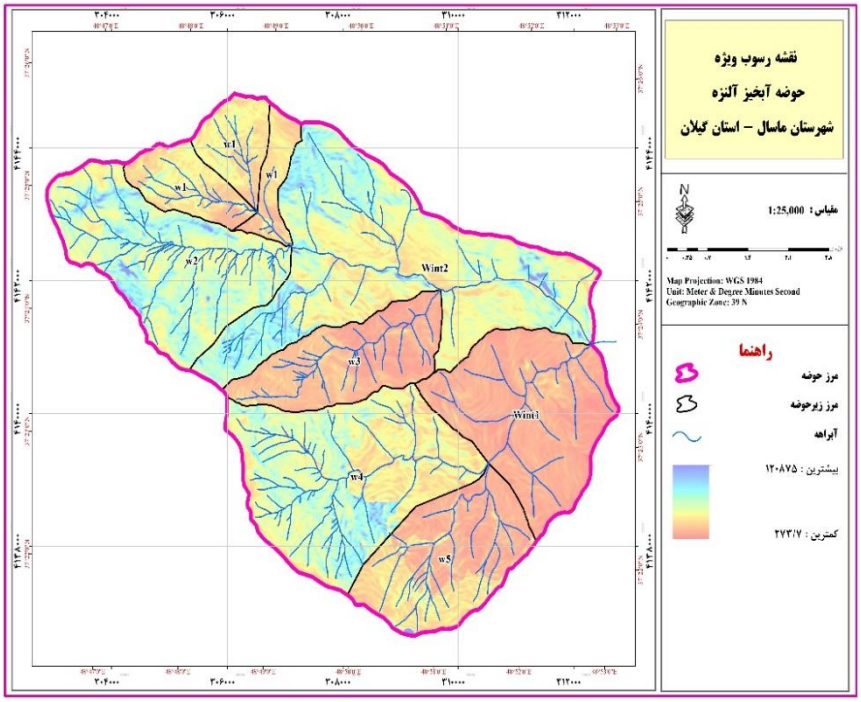

**شکل(۳) نقشه درجه رسوب‌دهی مدل MPSIAC بعد از اجرا اقدامات احیایی آبخیزداری**

شکل (۴)، نقشه مقادیر رسوب ویژه در زیرحوضه‌های حوضه آبخیز آلنزه قبل از اجرای اقدامات احیایی آبخیزداری و شکل (۵)، نقشه مقادیر رسوب ویژه پس از اجرای اقدامات احیایی آبخیزداری را نشان‌می‌دهد. در این نقشه‌ها رنگ‌های قرمز و نارنجی نشان‌دهنده مناطق با فرسایش‌پذیری بسیار بالا تا بالا هستند. این نواحی پتانسیل زیادی برای تولید رسوب دارند. همچنین رنگ‌های آبی و فیروزه‌ای نشان‌دهنده مناطق با فرسایش‌پذیری پایین تا بسیار پایین هستند. این مناطق پتانسیل کمتری برای تولید رسوب دارند و در نهایت رنگ‌های زرد و سبز بیانگر فرسایش‌پذیری متوسط هستند. شکل (۴) نشان‌می‌دهد که حوضه قبل از اقدامات آبخیزداری دارای وضعیت بحرانی است. بخش‌های عمده‌ای از حوضه (مخصوصاً در قسمت‌های مرکزی و جنوب‌غربی) دارای رنگ قرمز و نارنجی هستند که نشان‌دهنده پتانسیل بالای فرسایش و تولید رسوب است. این مناطق (مناطق با فرسایش‌پذیری بالا) غالباً شامل زمین‌های با شیب زیاد، خاک‌های حساس به فرسایش و یا مناطق با پوشش گیاهی کم هستند. شبکه آبراهه‌ها که نشان‌دهنده شبکه زهکشی هستند، از مناطق با فرسایش‌پذیری بالا عبور می‌کنند که می‌تواند منجر به حمل و نقل بیشتر رسوب در آن‌ها شود. نقشه (۵) وضعیت فرسایش‌پذیری حوضه را پس از اجرای اقدامات آبخیزداری نشان‌می‌دهد.

مقایسه این نقشه با نقشه قبل، کاهش چشمگیر مناطق با فرسایش‌پذیری بالا (سطح مناطق قرمز و نارنجی) را نشان‌می‌دهد. در مقابل، مناطق با رنگ‌های آبی و سبز (فرسایش‌پذیری پایین و متوسط) گسترش‌یافته‌اند. به‌عنوان مثال، در بخش‌های شمال شرقی و مرکزی حوضه، رنگ آبی و سبز بیشتر دیده‌می‌شود که نشان‌دهنده موفقیت نسبی اقدامات آبخیزداری در کاهش پتانسیل فرسایش در این مناطق است.




**شکل(۴) رسوب ویژه در زیرحوضه‌های حوضه آبخیز آلنزه (متر مکعب در کیلومترمربع در سال) قبل از اجرای اقدامات احیایی آبخیزداری**




**شکل(۵) رسوب ویژه در زیرحوضه‌های حوضه آبخیز آلنزه (متر مکعب در کیلومترمربع در سال) بعد از اجرا اقدامات احیایی آبخیزداری**

## بحث و نتیجه‌گیری

در حال حاضر میلیاردها تن گل و لای ناشی از رسوبات حاصل از شست و شوی خاک حوضه‌های آبخیز رودخانه‌های منتهی به تالاب، در تالاب انزلی وجود دارد. تا چند دهه قبل عمق تالاب انزلی ۸ تا ۱۱ متر بود اما درحال‌حاضر، ته‌نشین شدن رسوبات عمق آن را سه متر رسانده است که مهم‌ترین عامل آن تخریب حوضه‌های بالادست است. بنابراین، اجرای سازه‌های مکانیکی و بیولوژیکی به‌منظور کنترل سیلاب در مناطق مستعد فرسایش و بحرانی حوضه آبخیز تالاب انزلی به‌منظور حفظ حیات این اکوسیستم نادر و ارزشمند حیاتی است (سبقت و همکاران، ۱۳۹۸). علی‌رغم انجام تلاش‌هایی برای کنترل فرسایش خاک و کاهش بار رسوبی از حوضه فوقانی تالاب انزلی هنوز در مناطق بسیاری به‌دلیل کمبود بودجه اقدامات احیایی آبخیزداری انجام نشده است. به‌منظور کاهش بار رسوبی و کنترل سیلاب در این حوضه، پروژه‌های سدسازی به‌عنوان راه حل بالقوه پیشنهاد شده‌است. ساخت سدها در مکان‌های استراتژیک می‌تواند به تنظیم جریان آب و کاهش میزان رسوب ورودی به تالاب کمک کند با کاهش سرعت آب، ذرات رسوب می‌توانند ته نشین شوند و به آب تمیز تر اجازه عبور دهند علاوه بر این، ساخت سدهای چک یا حوضچه‌های نگهدارنده به دام انداختن رسوب و جلوگیری از رسیدن آن به تالاب کمک می‌کند (روان‌بخش و همکاران، ۱۴۰۳).

اجرای موفقیت‌آمیز طرح مدیریت یکپارچه نقش مهمی در کنترل بار رسوب در تالاب انزلی خواهد داشت. این طرح با شناسایی و رسیدگی به منابع اصلی رسوب‌گذاری، اجرای اقدامات حفاظتی خاک و آب و پایش منظم میزان رسوب‌گذاری، به کاهش فرسایش و رسوب‌گذاری در تالاب و در نهایت بهبود کیفیت آب و حفظ اکوسیستم ظریف تالاب انزلی کمک می‌کند (Ganjali و Ghasemi، ۲۰۱۶).

مدل‌سازی به‌روش امپسیاک نشان داد که اقدامات احیایی انجام شده سبب شده‌است که میزان ضریب رسوب‌دهی قبل از اقدامات مکانیکی و بیولوژیکی از ۱۱۴ (با شدت فرسایش خیلی زیاد) به ۱۰۱ (با شدت فرسایش خیلی زیاد) (کاهش ۱۱/۴٪) و مقدار رسوب ویژه در واحد سطح کل حوضه از حدود ۳۰۰۹ مترمکعب در سال به ۱۵۸۷ مترمکعب در سال (۴۷٪) کاهش یابد.

مطابق جدول(۲)، میزان شدت رسوب دهی حوضه در وضعیت بعد از اجرای اقدامات احیایی کاهش یافته‌است. این کاهش، بازتاب تغییرات مثبت و مطلوب در عوامل نه گانه است. بررسی دقیق‌تر امتیازات عوامل نه‌گانه نشان‌می‌دهد که اصلاح کاربری اراضی، افزایش نسبی پوشش گیاهی و احداث سازه‌های کنترل رواناب و رسوب منجر به کاهش امتیازات عوامل رواناب، پوشش زمین، کاربری اراضی و وضعیت کنونی فرسایش شده‌اند. در متغیر هیدرولوژی، میانگین از ۴۷/۷ به ۳۸/۵ واحد کاهش یافته‌است که بیانگر کاهش رواناب سطحی و توان حمل رسوب ناشی از افزایش نفوذپذیری خاک پس از اجرای اقدامات مکانیکی مانند بند گابیونی و ایجاد بانکت‌بندی است؛ نتیجه‌ای مشابه یافته‌هایFonseca و همکاران (۲۰۲۳) در برزیل که نشان دادند اقدامات حفاظتی تلفیقی، جریان‌های سطحی را تا ۲۴ درصد کاهش می‌دهد و پایداری ساختاری خاک را بهبود می‌بخشد. شاخص پوشش زمین از ۶/۷ به ۵/۶ کاهش یافت، این امر نشان‌دهنده افزایش تراکم پوشش جنگلی و مرتعی است که با مطالعات Zeng و همکاران (۲۰۲۳) همخوانی دارد؛ آنان گزارش کردند که احیای پوشش گیاهی در مناطق شیب‌دار موجب کاهش رسوب تا ۴۰ درصد شد. فرسایش رودخانه‌ای نیز از ۴/۷ به ۳/۴ کاهش یافت که ارتباط مستقیم با اجرای بندهای سنگ و ملات، چکدم‌های گابیونی و کنترل آبراهه دارد؛ مشابه یافته‌های Mohamadi و همکاران (۲۰۲۲) که نشان دادند این اقدامات در حوضه‌های کوهستانی موجب کاهش انتقال رسوب در بستر رودخانه تا ۴۵ درصد می‌شود. همچنین، مطالعه Alebachew و همکاران (۲۰۲۵) در شناسایی نقاط مهم فرسایش و تأثیر اقدامات کاهش‌دهنده رسوب در حوضه جیگل و نیل آبی در اتیوپی، از طریق مدل سوات و شبیه‌سازی ضریب رسوب‌دهی قبل و بعد از انجام اقدامات احیایی نشان داد که اقدامات آبخیزداری اثر به سزایی بر کنترل رسوب دارد.

کاهش تقریباً ۵۰ درصدی میزان رسوب ویژه حوضه از ۳۰۰۹ به ۱۵۸۷ مترمکعب در سال(۴۷٪)، نشان‌دهنده کارایی مناسب اقدامات احیایی آبخیزداری در کنترل فرسایش خاک در سطح حوضه است. این کاهش قابل توجه با یافته‌های مطالعات Casabella-González و همکاران (۲۰۲۳) مطابقت دارد که مدل امپسیاک را ابزار مناسب برای شناسایی تأثیرات مکانی اقدامات مدیریتی دانسته‌اند. لیکن، با وجود کاهش میزان رسوب ویژه، طبقه شدت رسوب‌دهی حوضه همچنان در طبقه خیلی

زیاد باقی مانده‌است. این وضعیت نشانگرآنست که وضعیت فرسایش و رسوب‌زایی حوضه آلنزه، به اندازه‌ای است که با وجود کاهش ۴۷ درصدی رسوب ویژه، حوضه همچنان در رده‌ه بحرانی قرار دارد. Daneshfaraz و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی بر روی حوضه آبخیز عیدغمش استان آذربایجان شرقی، به ارزیابی شدت فرسایش با بهره‌گیری از مدل امپسیاک و سامانه اطلاعات جغرافیایی پرداختند. بر اساس نتایج این مطالعه، میزان رسوب ویژه حوضه برابر با ۴۷۵ تن در کیلومتر مربع در سال برآورد شد که بیانگر تأثیر چشمگیر عوامل شیب و وضعیت پوشش گیاهی بر فرآیند تولید رسوب است. یافته‌های این تحقیق با نتایج مطالعات انجام‌شده در حوضه آلنزه هم‌خوانی دارد و بر اهمیت تمرکز اقدامات مدیریتی هدفمند در مناطق بحرانی برای کاهش محسوس میزان رسوب و ارتقای کلاس رسوبی برخی زیرحوضه‌ها تأکید می‌کند.

نتایج پژوهش حاضر نشان‌می‌دهد که اجرای تلفیقی اقدامات مکانیکی و بیولوژیکی در حوضه آبخیز آلنزه تأثیر چشمگیری بر کاهش فرسایش و رسوب داشته است، به‌گونه‌ای که ضریب رسوب‌دهی ۱۱/۴ درصد و رسوب ویژه حدود ۴۷ درصد کاهش یافته‌است. این یافته‌ها بیانگر کارایی بالای مداخلات جامع آبخیزداری در کاهش فرآیندهای فرسایشی و کنترل رسوب در حوضه‌های پرشیب و حساس است. با این حال، چالش‌هایی نظیر اجرای ناقص طرح‌ها، محدودیت منابع مالی، فشار چرای دام و مشارکت محدود جوامع محلی، تداوم و پایداری نتایج به‌دست‌آمده را تهدید می‌کند. تجربه نشان‌می‌دهد که در بسیاری از حوضه‌های کشور، اثرات اولیه اقدامات آبخیزداری به‌دلیل فرسودگی سازه‌ها، نبود برنامه‌های نگهداری منظم و تغییرات اقلیمی به‌تدریج کاهش می‌یابد. بنابراین، صرف اجرای طرح‌های مقطعی نمی‌تواند پایداری بوم‌شناختی و اقتصادی حوضه را تضمین کند. بر این اساس، استمرار اثربخشی اقدامات نیازمند مدیریت جامع و آینده‌نگرانه آبخیز است که در آن نگهداری سازه‌ها، تقویت پوشش گیاهی، کنترل چرا و افزایش مشارکت جوامع محلی جایگاهی محوری دارند. ترکیب بهینه سازه‌های مکانیکی مانند بندهای گابیونی و خشکه‌چین با اقدامات بیولوژیکی نظیر بانکت‌بندی، قرق مراتع و کشت گونه‌های بومی مقاوم نظیر *Trifolium repens* و *Poa trivialis* می‌تواند به‌عنوان رویکردی مؤثر در مدیریت پایدار خاک و آب مورد توجه قرار گیرد.

به‌منظور ارزیابی کمی و مکانی اثربخشی راهبردهای مدیریتی مختلف، تدوین و تحلیل سناریوهای مدیریتی مبتنی بر مدل امپسیاک در این پژوهش انجام شد. نتایج مدل‌سازی چهار سناریوی اصلی به شرح زیر است:

- سناریوی تداوم وضعیت موجود: در صورت ادامه روند فعلی بدون نگهداری مؤثر، پیش‌بینی می‌شود تا سال ۱۴۱۰ میزان رسوب ویژه به‌تدریج افزایش یابد؛ مشابه یافته‌های Guo و همکاران (۲۰۱۸) که نشان دادند نبود نگهداری منجر به بازگشت رسوب به سطوح اولیه می‌شود.
- سناریوی تمرکز بر اقدامات مکانیکی: با تکمیل سازه‌های سنگی و گابیونی در مناطق بحرانی، می‌توان میزان رسوب را تا حدود ۵۰ درصد کاهش داد (Zeng و همکاران، ۲۰۲۳).
- سناریوی تأکید بر اقدامات بیولوژیکی و مشارکت محلی: اجرای قرق، بانکت‌بندی و توانمندسازی جوامع محلی می‌تواند پوشش گیاهی را بهبود داده و فرسایش را به‌شکل محسوسی کاهش دهد (روان‌بخش و همکاران، ۱۴۰۳؛ Fonseca و همکاران، ۲۰۲۳).
- سناریوی مدیریت تلفیقی و پایدار (بهینه): ترکیب هم‌زمان اقدامات سازه‌ای و بیولوژیکی همراه با مدیریت مشارکتی و پایش مستمر مبتنی بر فناوری‌های نوین همچون سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، بهترین عملکرد را در کاهش پایدار رسوب و تثبیت اکوسیستم حوضه نشان داد (Alavinia وMotaghian ، ۲۰۲۳؛ Reta Roba و همکاران، ۲۰۲۵)

بر اساس نتایج مدل‌سازی و شواهد میدانی، سناریوی چهارم به‌عنوان گزینه بهینه معرفی می‌شود، زیرا علاوه بر کاهش چشمگیر رسوب ویژه، امکان تحقق مدیریت تطبیقی و پایداری بلندمدت منابع خاک و آب را فراهم می‌سازد. برای تحقق این سناریو، راهکارهای کلیدی زیر پیشنهاد می‌شود:

- تشکیل صندوق پایدار نگهداری و نوسازی سازه‌های مکانیکی با تخصیص بودجه هدفمند ( Choو همکاران، ۲۰۱۹).
- گسترش اقدامات بیولوژیکی در مناطق بحرانی و شیب‌دار به‌منظور کاهش رسوب تا ۴۰ درصد (Zeng و همکاران، ۲۰۲۳)
- تقویت مشارکت جوامع محلی از طریق کمیته‌های آبخیزداری و نظارت مردمی بر چرای دام (Smith و همکاران، ۲۰۲۱)

- پایش مستمر و مدل‌سازی پویا با استفاده از داده‌های سنجش از دور برای ارزیابی دقیق تغییرات مکانی و زمانی (Mohamadi و همکاران، ۲۰۲۲؛ Boali و همکاران، ۲۰۲۵)
- ارزیابی اقتصادی– محیط زیستی اقدامات پیشنهادی با رویکرد هزینه– فایده برای افزایش کارایی و توجیه‌پذیری پروژه‌ها (Daneshfaraz و همکاران، ۲۰۱۷).

یافته‌های این پژوهش تأیید می‌کند که اجرای مدیریت تلفیقی و مشارکتی آبخیز، در تلفیق با فناوری‌های نوین پایش و مدل‌سازی پویا، می‌تواند زمینه‌ساز تحقق پایداری چندبعدی (اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی) در حوضه آلنزه باشد. تعمیم این رویکرد به سایر زیرحوضه‌های منطقه، چارچوبی مبتنی بر شواهد برای بهبود مدیریت جامع منابع‌طبیعی و حفاظت مؤثر از اکوسیستم‌های تالابی کشور فراهم می‌سازد.

## منابع


آژانس همکاری‌های بین المللی ژاپن (جایکا) (۱۳۹۸). پروژه مدیریت اکولوژیک تالاب انزلی- فاز دوم (طرح میان مدت حفاظت از تالاب انزلی از سال ۲۰۲۰-۲۰۳۰.

بابایی اولم، طیبه؛ عابدینی، موسی (۱۴۰۳). تجزیه و تحلیل خطر فرسایش خاک و ارتباط آن با عوامل محیطی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز ویرمونی، استان گیلان). *جغرافیا و روابط انسانی*.۷(۳)، ۴۹۷-۵۱۷. 10.22034/gahr.2024.472081.2225

پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی (۱۴۰۳). ارزیابی اثربخشی عملیات آبخیزداری در اراضی مرتعی حوضه تالاب انزلی بر میزان فرسایش و تولید رسوب (محدوده مورد مطالعه: اراضی مرتعی بالادست رودخانه مرغک).۲۶۸ صفحه.

رفاهی، حسین (۱۳۹۴). فرسایش آبی و حفاظت. چاپ هفتم، تهران، *انتشارات دانشگاه تهران*. ۶۷۱ صفحه.

روان‌بخش، مکرم؛ قربان‌پور دلیوند، مائده؛ اسدی، کیوان؛ رحمانی‌راد، محمدرضا (۱۴۰۳). اجرای رویکردهای مدیریت جامع آبخیزداری و کنترل رسوبات در حفاظت از تالاب انزلی. *پژوهش و فناوری محیط زیست*، ۹(۱۵)، ۱۰۱-۱۱۳. 10.61186/jert.45998.9.15.113

روستایی، شهرام؛ میراسدالله، حجازی؛ شیرزادی، هدیه (۱۴۰۴). برآورد میزان فرسایش ورسوب حوضه آبریز زیمکان در استان کرمانشاه با تاکید بر متغیرهای تاثیرگذار. جغرافیا و مخاطرات محیطی.۱۴(۱)،۲۲۶-۲۱۰. 10.22067/geoeh.2023.79388.1293

سبقتی، مرحمت؛ مسلکی، حمید؛ پرنده فاروجی، رضا؛ قادری، بابک؛کاکه ممی، آزاد (۱۳۹۸). ارائه راه حل مناسب جهت حفاظت از تالاب بندرانزلی با محوریت آبخیزداری نوین. *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۳(۴۷)، ۷۵-۸۵.

صفاری، امیر؛ نوری، علی؛ کرمی، جلال (۱۳۹۷). بررسی تاثیر تغییرات پوشش و کاربری زمین در قابلیت فرسایش خاک–مطالعه موردی حوضه قره‌سو گرگانرود. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۵ (۱)، ۹۶-۸۳.

مهندسین مشاور شفق آب (۱۳۹۵). مطالعات اجرایی آبخیزداری حوضه آبخیزمرغک و خالکایی(آلنزه) شهرستان ماسال.

مهندسین مشاور طرح و سازه شفارود (۱۳۹۸). مطالعات بازنگری با هدف جانمایی و طراحی پروژه آبخیزداری در حوضه آبخیز آلنزه شهرستان ماسال.

مؤذنی نقندر، سعیدرضا؛ علیخانی، فائزه؛ حاتمی یزد، ابوذر(۱۴۰۱). بررسی اثر اجرای پروژه های آبخیزداری بر رواناب و فرسایش خاک (مطالعه موردی: حوضه نخاب بشرویه). *نشریه علمی-پژوهشی مرتع و آبخیزداری*. ۷۵(۲)، ۲۹۹-۳۱۷. https://doi.org/10.22059/jrwm.2022.335726.1632

نورانی، وحید؛ محسن‌زاده، صالح (۱۳۹۶). برآورد بار رسوب ماهانه‌ی ایستگاه‌های حوضه‌ی آجی‌چای با استفاده از مدل MPSIAC و ریزمقیاس نمایی آبشاری. *هیدروژئومورفولوژی*، ۴(۱۱)، ۸۳-۱۰۳.

Adeogun, A. G., Ganiyu, H. O., Okunade, A. B., Amoo, O. T. (2022). modelling the impacts of selected watershed management strategies on sediment reduction upstream of shiroro dam, nigeria. Journal of Engineering Studies and Research, 28(4), 7-17.

Alavinia, S.H., Motaghian, M. (2024). Comparative assessment of FSM and MPSIAC models in quantifying soil sedimentation rates in the semi-humid and alpine regions of northern Iran. Environmental Monitoring and Assessment, 196(9), p.792.

Alebachew, E.D., Wolka, K., Molla, M.B., Emiru, N.C., Dengiz, O., Agbor, D.T. (2025). SWAT-based soil erosion and sediment yield modeling in the upper Gilgel Abay catchment, Blue Nile Basin, Ethiopia. Scientific Reports, 15(1), p.28821.

Bayata, A. (2024). Soil Degradation: Contributing Factors and Extensive Impacts on Agricultural Practices and Ecological Systems-Systematic Review. Journal of Agriculture and Environmental Sciences, 13, pp.16-34.

Boali, A., Hosseinalizadeh, M., Kariminejad, N., Asgari, H.R., Mohamadian Behbahani, A., Naimi, B., Shafaie, V., Movahedi Rad, M. (2025). Evaluation of early warning signals for soil erosion using remote sensing indices in northeastern Iran. Scientific Reports, 15(1), p.9742.

Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion, Nature communications, 8(1), 1-13.

Casabella-González, M. J., Borselli, L., García-Meza, J. V. (2023). Improved MPSIAC model for soil erosion rate assessment in semiarid zones. Journal of Arid Environments, 212, 104946.

Cho, S. J., Wilcock, P. R., Belmont, P., Gran, K. B., Hobbs, B. F. (2019). Simulation model for collaborative decision making on sediment source reduction in an intensively managed watershed. Water Resources Research, 55(2), 1544-1564.

Daneshfaraz, R., Rahmati, M., Akbari Moghanjiq, P. (2017). Soil erosion and sediment mapping in Aidoghmoush watershed appling MPSIAC model and GIS and RS technologies. Environmental Resources Research, 5(1), 35-49.

Eisazadeh, L., Sokouti, R., Homaee, M., Pazira, E. (2012). Comparison of empirical models to estimate soil erosion and sediment yield in micro catchments. Eurasian journal of soil science, 1, 28-33

Fonseca, M. R. S., Chaves, H. M., & Uagoda, R. E. (2023). On-and off-site erosion impacts of restoration measures in a tropical karst watershed. Earth Surface Processes and Landforms, 48(9), 1701-1711.

Ganjali, S., Ghasemi, A. (2016). Heavy metal contamination in the sediments of Anzali international wetland, northern Iran based on type regional development. Iranian Journal of Toxicology, *10*(5), 1-6.

Guo, S., Zhu, Z., Lyu, L. (2018). Effects of climate change and human activities on soil erosion in the Xihe River Basin, China. Water, 10(8), 1085.

JICA. (2012). The Study on Integrated Management of the Anzali Wetland in the Islamic Republic of Iran-Final Report.

Khalili Vavdareh, S., Shahnazari, A., Sarraf, A. (2022). Investigating Anzali wetland sediment estimation using the MPSIAC model. Frontiers in Earth Science, 10, p.736125.

Mahdian, M., Hosseinzadeh, M., Siadatmousavi, S. M., Chalipa, Z., Delavar, M., Guo, M., Noori, R. (2023). Modelling impacts of climate change and anthropogenic activities on inflows and sediment loads of wetlands: Case study of the Anzali wetland. Scientific Reports, 13(1), 5399.

Mohamadi, P., Ahmadi, A., Feizizadeh, B., Jafarzadeh, A. A., Rahmati, M. (2022). Utilizing the conventional, object-oriented and pixel-based techniques to estimate erosion and sediment yield by MPSIAC model. Dryland Soil Research (DLSR), 1(1), 113-124.

Noori, H., Karami, H., Farzin, S., Siadatmousavi, S., Mojaradi, B., Kisi, O. (2018). Investigation of RS and GIS techniques on MPSIAC model to estimate soil erosion. Natural Hazards, 91, 221-238.

Rashedi, S., Hisseini, S.A., Nazif, S., Cheshmeh, B.G. (2025). Modeling the effects of climate change and land use on flow rate and sedimentation by SWAT model in Anzali Wetland in the north of Iran. Theoretical and Applied Climatology, 156(1), p.69.

Reta Roba, Z., Moisa, M.B., Purohit, S., Tsegay Deribew, K., Obsi Gemeda, D. (2025). Assessment of soil erosion and sediment yield in response to land use and land cover changes using geospatial techniques in Dumuga Watershed, Ethiopia. All Earth, 37(1), pp.1-18.

Smith, K. E., Terrano, J. F., Khan, N. S., Smith, C. G., Pitchford, J. L. (2021). Lateral shoreline erosion and shore-proximal sediment deposition on a coastal marsh from seasonal, storm, and decadal measurements. Geomorphology, 389, 107829.

Teku, D., Derbib, T. (2025). Uncovering the drivers, impacts, and urgent solutions to soil erosion in the Ethiopian Highlands: a global perspective on local challenges. *F*rontiers in Environmental Science, 12, p.1521611.

Zeng, Y., Meng, X., Wang, B., Li, M., Chen, D., Ran, L., Shi, Z. (2023). Effects of soil and water conservation measures on sediment delivery processes in a hilly and gully watershed. Journal of Hydrology, 616, 128804.