

## مدل سازی آلودگی نیترات از منابع غیر نقطه‌ای و اولویت بندی زیرحوضه‌های بحرانی برای مدیریت محیط زیستی حوضه آبخیز تجن

فاطمه رجائی<sup>۱</sup>، عباس اسماعیلی ساری<sup>۲\*</sup>، عبدالرسول سلمان ماهینی<sup>۳</sup>، مجید دلاور<sup>۴</sup> و علی رضا مساح بوانی<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس، نور

۲. استاد، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس، نور

۳. دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

۴. استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۵. دانشیار، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۳/۲۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۰۶/۲۷)

### چکیده

آلودگی‌های غیر نقطه‌ای اهمیت ویژه‌ای در تعیین کیفیت آب و سهم مهمی در تغذیه‌گرایی آب‌های شیرین دارند. از دلایل اساسی این موضوع، وجود مواد مغذی به‌ویژه نیتروژن و فسفر در غلظت‌های زیاد آب است. عامل تغییر کاربری اراضی به‌طور ویژه‌ای بر کیفیت آب مؤثر است. بنابراین، درک ارتباط بین کاربری اراضی و آلاینده نیترات یک اولویت به‌منظور ارزیابی بار آلودگی نیترات و پیش‌بینی تأثیر آن بر کیفیت آب‌های سطحی است. در این مطالعه از ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) برای شبیه‌سازی نیترات طی سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۱۳ در حوضه آبخیز تجن استفاده شده است. نتایج مدل نشان داد بار سالانه نیترات طی سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۱۳ از ۳۱۰۷۰ کیلوگرم تا ۸۹۳۵۰ کیلوگرم در خروجی حوضه متغیر است. براساس نتایج به‌دست آمده، سهم آلاینده نیترات تولیدشده توسط مرتع (۵/۷ درصد) و جنگل (۲۹ درصد)، بسیار کمتر از نیترات تولیدشده توسط کاربری کشاورزی (۶۴ درصد) است. همچنین در میان کشت‌های مختلف کاربری کشاورزی، به ترتیب شالیزارها و باغ‌ها به‌عنوان منابع اصلی آلودگی نیترات در فصول بهار و تابستان شناسایی شدند. در ادامه، زیرحوضه‌های بحرانی به‌منظور اولویت بندی مناطق برای مدیریت کیفیت آب منطقه شناسایی شدند. نتایج به‌دست آمده از این مطالعه می‌تواند راهنمای مفیدی به‌منظور حفاظت از اکوسیستم حوضه آبخیز تجن در برابر تخریب بیشتر و نیز ترویج توسعه پایدار در این منطقه باشد.

**کلیدواژه‌گان:** حوضه آبخیز تجن، کاربری اراضی، مدل SWAT، مناطق بحرانی، نیترات.

## مقدمه

سال‌های ۱۹۸۴، ۱۹۹۵، ۲۰۰۳ و ۲۰۱۱ را از تصاویر ماهواره‌ای به دست آوردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مناطق مسکونی و کشاورزی سبب افزایش آلودگی شده‌اند. در مطالعه دیگر برا و بورا [۱۲] در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ مدل SWAT را با مدل‌های دیگر در مقیاس حوضه آبخیز مقایسه کردند. آنها با مقایسه ۱۱ مدل هیدرولوژیکی از جمله DWMS<sup>۲</sup>، HSPF<sup>۳</sup> و سایر مدل‌هایی که شبیه‌سازی دبی جریان، رسوب و روندیابی مواد شیمیایی در حوضه داشتند، مدل SWAT را از مناسب‌ترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی درازمدت حوضه‌های کشاورزی معرفی کردند. همچنین نشان دادند مدل SWAT و HSPF در پیش‌بینی سالانه حجم جریان و آلودگی بسیار موفق عمل کردند، ولی در پیش‌بینی جریان‌های سیلابی و رویدادهای روزانه این مدل‌ها ضعف دارند، در مقابل، مدل DWSM پیش‌بینی دقیق‌تری در فواصل زمانی کوچک ارائه می‌دهد. براساس ارزیابی‌های صورت گرفته در مطالعه نیرولا و همکارانش [۲۱] در حالت کلی عملکرد مدل SWAT بهتر از GWLF<sup>۴</sup> است. این مطالعه نشان داد اگرچه مدل ساده GWLF در پیش‌بینی جریان، کیفیت آب و شناسایی CSAs<sup>۵</sup> مفید است، تمام CSAs را در منطقه نمی‌تواند به درستی شناسایی کند.

از سوی دیگر، هوا و همکارانش [۱۴] از روش‌های آماری رج‌بندی مستقیم<sup>۶</sup> برای ارزیابی ارتباط بین کاربری اراضی، الگوی سیمای سرزمین و آلودگی‌های غیرنقطه‌ای استفاده کردند. در این تحقیق برای شبیه‌سازی آلودگی غیرنقطه‌ای از مدل SWAT<sup>۷</sup> استفاده شد. نتایج این تحقیق، وجود ارتباط بین کاربری اراضی و سیمای سرزمین با آلودگی‌های غیرنقطه‌ای را نشان داد و زمین‌های دیم<sup>۸</sup> و شالیزارها مهم‌ترین منبع آلودگی منابع غیرنقطه‌ای شناخته شدند و نیز بیشترین رهایی مواد مغذی مختص به شالیزارها بود. از طرف دیگر، زو و همکارانش [۲۵] پاسخ هیدرولوژیکی به تغییرات کاربری اراضی در دلتای رودخانه یانگ تز را با استفاده از مدل SWAT بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد شهری شدن تأثیر اندکی بر آبدهی سالانه و به‌عکس تأثیرات

رسوبات و مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر ترکیبات اصلی آلودگی‌های غیرنقطه‌ای هستند. آلودگی‌های غیرنقطه‌ای برخلاف منبع آلودگی نقطه‌ای، معمولاً از منابع وسیعی می‌آیند به طوری که در بسیاری از کشورها انواع فعالیت‌های کشاورزی و دامداری به‌عنوان کانون‌های غیرنقطه‌ای آلودگی در نظر گرفته شده‌اند [۱۶ و ۲۳]. نیتروژن یکی از ترکیبات مهم در ایجاد تغذیه‌گرایی<sup>۱</sup> است و معمولاً به راحتی حل و به آب‌های سطحی و جریان آب زیرزمینی منتقل می‌شود.

عوامل متعددی مانند کاربری اراضی، سیمای سرزمین، شیب، بارش، خاک، زمین‌شناسی و عوامل انسانی می‌توانند رواناب، فرسایش خاک و انتقال مواد مغذی را تغییر دهند. استفاده از سرزمین عامل اولیه‌ای است که سبب تغییر کیفیت آب می‌شود. تغییر کاربری‌ها سبب تغییر در میزان فیلتراسیون خاک، تبخیر و تعرق، دبی آب‌های زیرزمینی و کیفیت آب‌های پذیرنده می‌شود [۱۷ و ۲۴].

مطالعات زیادی در خصوص تأثیر کاربری اراضی بر آلودگی‌های منابع غیرنقطه‌ای و رواناب سطحی در جهان صورت گرفته است. کلینتون و وس [۱۳] در امریکا تأثیرات وجود یک منطقه جنگلی بر کیفیت آب رودخانه را بررسی کردند. این رود از مناطق شهری سرچشمه می‌گرفت و سپس از منطقه‌ای جنگلی عبور می‌کرد. برای نیل به این هدف سه ایستگاه نمونه‌برداری در امتداد رودخانه واقع در منطقه شهری، بخشی از همان رودخانه در منطقه جنگلی و نیز انشعابی از آن انتخاب شد که از مناطق جنگلی بکر و دست‌نخورده می‌گذشت. سپس در این ایستگاه‌ها فاکتورهای نترات، فسفات، کلراید، کلسیم، منیزیم و غیره اندازه‌گیری شد. نتایج بیانگر بیشترین غلظت آلودگی در مناطق شهری بود و کیفیت آب در منطقه جنگلی بهتر از سایر مناطق نشان داده شد. همچنین سومورا و همکارانش [۲۳] تأثیر کاربری اراضی بر حوضه رودخانه هیل را بررسی کردند. زمین‌های کشاورزی به دلیل استفاده از کودها، بیشترین سهم را در آلودگی نترات داشتند و کاربری جنگل کمترین بار آلودگی را نشان داد. همچنین کیکن و همکارانش [۱۶] تأثیرات کاربری اراضی بر کیفیت آب در حوضه رودخانه مانیام در زیمبابوه را بررسی کردند. آنها اطلاعات کاربری اراضی

2. Dynamic Watershed Simulation Model  
3. Hydrologic Simulation Program Fortran  
4. Generalized Watershed Loading Function  
5. Critical Source Areas  
6. Constrained Ordination  
7. Soil and Water Assessment Tool  
8. Dry Cultivated Land

1. Eutrophication

منطقه مطالعه شده ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، هدف از تحقیق حاضر، شبیه‌سازی تغییرات طولانی مدت بار نیترات در حوضه رودخانه تجن با استفاده از مدل SWAT، تعیین مناطق بحرانی بر مبنای تولید مواد مغذی، درک ارتباط تأثیر کاربری‌ها بر سطح نیترات رودخانه تجن و نیز ارزیابی سهم آلودگی نیترات ورودی از حوضه آبخیز تجن به دریای خزر در منطقه مطالعه شده است. همچنین به منظور ارزیابی روش‌شناسی، حوضه رودخانه تجن به علت داشتن تغییرات نسبتاً شدید کاربری اراضی طی دهه‌های اخیر و نیز استفاده وسیع از کودهای نیترا ته و فسفات در زمین‌های کشاورزی و به ویژه شالیزارها [۲ و ۱] انتخاب شد که به دریای خزر وارد می‌شود.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعه شده

منطقه مطالعه شده در این تحقیق حوضه آبخیز تجن با وسعت تقریبی ۴ هزار کیلومترمربع است که توسط کوه‌های البرز در جنوب و دریای خزر در شمال احاطه و در استان مازندران واقع شده است [شکل ۱]. از لحاظ جغرافیایی منطقه مطالعه شده بین طول جغرافیایی  $57^{\circ} 04' 53''$  -  $26^{\circ} 18' 53''$  و عرض جغرافیایی  $36^{\circ} 09' 17''$  -  $29^{\circ} 29' 36''$  واقع شده است. میانگین سالانه دما حدود ۱۵ درجه سلسیوس [۱۷] با آب و هوای گرم و مرطوب و ارتفاع متوسط بارش ۸۲۲ میلی‌متر در سال است. توپوگرافی محلی از ارتفاع ۲۶- متر تا ۳۶۷۰ متر متغیر است.

#### داده‌های استفاده شده در مدل SWAT

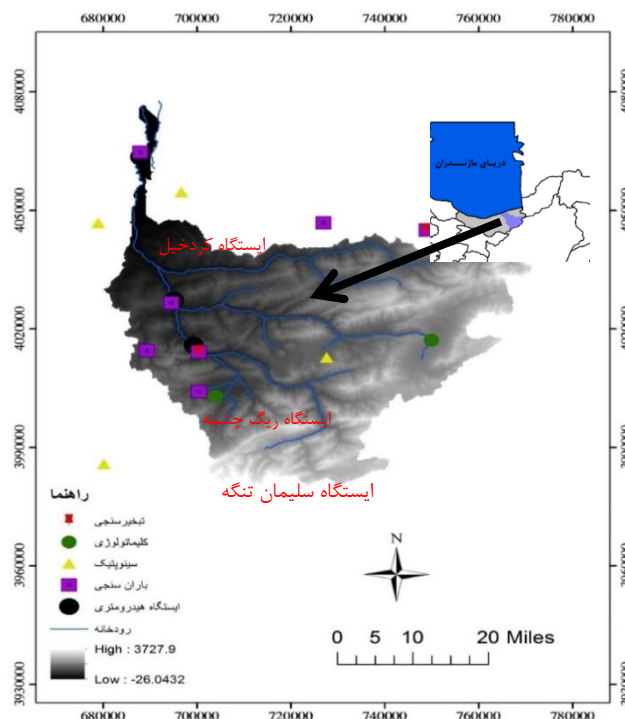
##### - لایه‌های رقومی استفاده شده

نقشه‌های اصلی مورد نیاز به منظور پیکربندی حوضه آبخیز تجن در مدل SWAT شامل نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و مدل رقومی ارتفاعی است. برای لایه رقومی کاربری اراضی، نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۰ با استفاده از تفسیر تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و استفاده از اطلاعات میدانی [۴] در سطح حوضه آبخیز اصلاح و استفاده شد. نقشه خاک تهیه شده توسط سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی ملل متحد (FAO) استفاده شد.

شایان توجهی بر دبی پیک، حجم سیل و رواناب سطحی به خصوص در حومه شهر داشته است. به طوری که رواناب سطحی افزایش و جریان پایه کاهش یافت و مدل افزایش پیک جریان و حجم سیلاب را شبیه‌سازی کرد.

در ایران مطالعات محدودی در زمینه شبیه‌سازی تأثیرات تغییر کاربری اراضی بر کیفیت آب صورت گرفته است. به طوری که نعمتی و همکارانش [۵] ارتباط میان مقادیر نیترات و فسفات رودخانه زاینده رود با کاربری‌های موجود در این حوضه را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد میانگین سالانه میزان نیترات با کاربری‌های کشاورزی و شهری، همبستگی مثبت و با کاربری‌های زمین‌های بایر و جنگل، همبستگی منفی دارد؛ اما میزان فسفات با هیچ‌یک از کاربری‌های اراضی همبستگی معناداری نشان نداده است. در مطالعه‌ای دیگر محمودی و همکارانش [۳] تغییرات کاربری اراضی و ارزیابی اهمیت آن در کیفیت فیزیکی و شیمیایی رودخانه کرخه را بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد توسعه اراضی شهری و زراعت آبی در زیرحوضه‌های کرخه، کاهش بارندگی و دبی رودخانه کرخه مهم‌ترین عوامل کاهش درجه اسیدیته، افزایش شوری و بالا رفتن میزان آنیون‌ها و کاتیون‌های رودخانه کرخه محسوب می‌شوند.

مطالعات یاد شده به تأثیر کاربری‌های مختلف بر میزان آلودگی توجه کرده‌اند. همچنین مطالعات یاد شده نشان می‌دهند مدل SWAT از جمله مدل‌هایی است که توانایی شبیه‌سازی متغیرهای هیدرولوژیکی و کیفی در مقیاس حوضه‌ای را دارد. از طرف دیگر، پایش‌های سنتی نمی‌تواند اطلاعات لازم برای مدیریت محیط زیستی یک حوضه آبخیز را در اختیار مدیران قرار دهد [۹]؛ و مطالعات میدانی به صرف زمان و هزینه زیادی نیاز دارند. از این رو، استفاده از مدل‌هایی برای توصیف و تعیین کمیت انتقال مواد مغذی از کاربری کشاورزی به محیط‌های آبی و شناسایی مناطق اولویت‌دار برای حفاظت محیط زیست ضروری است. بنابراین، در این مطالعه سعی شده است با رویکردی مبتنی بر شبیه‌سازی جامع، به تأثیرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز، شناسایی مناطق بحرانی و بهبود کیفیت آب در حوضه آبخیز توجه شود. این مسئله به ویژه در مناطق شمالی ایران به دلیل استفاده فراوان از کودهای شیمیایی و ورود مواد مغذی به اکوسیستم‌های آبی برای ارائه راهکار برای برنامه‌ریزی‌های آتی



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز تجن در کشور

فایل‌های ورودی، کار اولیه برای اجرای مدل شروع شد. شبکه آبراهه، مرز حوضه و زیرحوضه‌ها براساس نقشه راقومی ارتفاعی تهیه شد. برای معرفی نقشه خاک نیاز است تا اطلاعات توصیفی هر واحد به بانک داده مدل معرفی شود. نقشه کاربری اراضی نیز که در هشت کلاس مختلف تهیه شده بود براساس راهنمای مدل، کد مختص به هر کاربری مشخص شد. از تلفیق نقشه‌های یادشده با تعریف آستانه درصد مساحت برای هریک از نقشه‌ها، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی حوضه ایجاد شد. سپس در بخش ورود داده‌های اقلیمی با توجه به اینکه مدل SWAT در مقیاس زمانی روزانه شبیه‌سازی انجام می‌دهد، داده‌های روزانه ایستگاه‌ها به مدل معرفی شد. همچنین در ادامه داده‌های مدیریت کشاورزی نیز برای هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی استفاده شد.

#### واسنجی و اعتبارسنجی در مدل SWAT CUP

واسنجی مدل در سه ایستگاه هیدرومتری سلیمان‌تنگه، ریگ‌چشمه و کردخیل در نرم‌افزار SWAT-CUP الگوریتم SUFI2 صورت پذیرفت. بدین‌منظور بسته به داده‌های موجود هر ایستگاه تعدادی از سال‌ها به‌عنوان سال‌های واسنجی و تعدادی دیگر برای اعتبارسنجی مدل SWAT-CUP در نظر گرفته شدند (جدول ۲). آنالیز حساسیت مدل برای انتخاب

#### داده‌های اقلیمی و هیدرومتری

برای معرفی شرایط اقلیمی حوضه به مدلی نیاز است که با معرفی ایستگاه‌های حوضه متغیرهای بارندگی، دمای کمینه و دمای بیشینه در مقیاس روزانه به مدل معرفی شود. اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی و سنیوتیک از سازمان هواشناسی کشور و باران‌سنجی و تبخیرسنجی از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران اخذ شد. داده‌های مختص به پارامترهای نیترا و دبی سه ایستگاه هیدرومتری کردخیل، ریگ‌چشمه و سلیمان‌تنگه از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران گردآوری شد. همچنین ارزیابی صحت داده‌های کیفیت آب با شش شاخص یادشده در انجمن بهداشت عمومی امریکا بررسی شد [۸].

#### اطلاعات مدیریتی

اطلاعات مدیریتی مختص به دامداری سنتی و کشاورزی در قسمت مدیریت مدل اعمال شد. ورودی‌های کلیدی مختص به مدیریت محصولات کشاورزی در مدل شامل کاشت، شخم، برداشت، چرا، کود شیمیایی و کود حیوانی از سازمان جهاد کشاورزی و بازدید میدانی به‌دست آمد.

#### آماده‌سازی مدل SWAT

پس از جمع‌آوری اطلاعات و مشخصات حوضه و تهیه

### نتایج و بحث

#### واسنجی و اعتبارسنجی در مدل SWAT CUP

حوضه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی، به ۲۶ زیرحوضه تقسیم شد. همچنین با توجه به لایه‌های کاربری اراضی، خاک و شیب حوضه به ۴۰۷ واحد پاسخ هیدرولوژیکی تبدیل شد. نتیجه آنالیز حساسیت، معرفی تعدادی پارامتر حساس برای واسنجی مدل است. تعداد ۱۴ پارامتر مشخص شدند که تأثیر بیشتری روی دبی و کیفیت آب داشتند. مقدار این پارامترها در جدول ۱ ارائه شده است.

نتایج آماری به دست آمده از واسنجی و اعتبارسنجی مدل به صورت ماهانه با استفاده از آماره‌های ارزیابی ضریب تبیین و نش- ساتکلیف در جدول‌های ۲ و ۳ خلاصه شده است.

طبق گزارش موربایی و همکارانش [۱۸] نتایج آماره‌های ارزیابی ضریب تبیین و نش- ساتکلیف به دست آمده از واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای هر سه ایستگاه بررسی شده، مورد تأیید است. این شرایط نشان‌دهنده توانایی زیاد مدل در شبیه‌سازی رواناب و نیترات در حوضه آبخیز تجن است. توانایی مدل در شبیه‌سازی رواناب و نیترات در حوضه‌های با ابعاد مختلف در مطالعات اخوان و همکارانش [۱۰]، جمشیدی و همکارانش [۱۵] و عباسپور و همکارانش [۷]، نیز اثبات شده است.

پارامترهای حساس در واسنجی نیز با استفاده از روش One-At-A Time انجام شد. به منظور واسنجی مدل، در این مطالعه از ۱۴ پارامتر اصلی مؤثر بر رواناب و نیترات بعد از حساسیت‌سنجی انتخاب شد. بعد از شناسایی پارامترهای مؤثر بر دبی اقدام به واسنجی دبی و سپس نیترات شد. الگوریتم بهینه‌سازی در روش SUFI2 به صورتی است که در گام نخست تابع هدف تعریف می‌شود. گام بعد اختصاص محدوده‌های مجاز برای هر پارامتر است. در تعیین حدود اولیه بهتر است که حدود تا حد امکان بزرگ و در عین حال معنادار باشند. سپس با در نظر گرفتن حدود اولیه، نمونه‌برداری به روش لاتین هاپرکیوب به تعداد نسبتاً زیاد انجام می‌گیرد و در هر بار نمونه‌گیری از حدود پارامترها مقادیر انتخاب شده به مدل معرفی و اجرا می‌شود و مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود. این مرحله تا جایی ادامه می‌یابد که نتایج شبیه‌سازی و مشاهداتی برای دبی براساس معیارهای ارزیابی استفاده شده اختلاف ناچیزی داشته باشد. پس از انجام این مرحله، پارامترهای مختص به دبی و غلظت نیترات تا واسنجی دقیق غلظت در سه ایستگاه بررسی شده تغییر می‌یابد. برای ارزیابی نکویی برازش مدل از دو تابع هدف ضریب تبیین<sup>۱</sup> ( $R^2$ ) و نش- ساتکلیف (NS)<sup>۲</sup> استفاده شد [۶ و ۷].

جدول ۱. پارامترهای منتخب برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل به همراه حدود اولیه<sup>۱</sup>

شماره	پارامتر	تعریف پارامتر	محدوده اولیه	مقدار بهترین شبیه‌سازی
۱	SOL_CBN	میزان کربن آلی	۰/۰۵-۱۰	۰/۴۴
۲	HLIFE_NGW	نیمه عمر نیتروژن در آب‌های زیرزمینی	۵۰-۰	۱۵/۸
۳	SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس خاک	۰-۱	۰/۲۶
۴	USLE_P	عامل اقدامات حفاظتی در USLE	۰-۱	۰/۲۴
۵	CN2	عدد منحنی رواناب	۳۵-۹۸	۷۵
۶	CANMX	بیشترین ذخیره تاج پوشش	۰-۱۰۰	۷
۷	BIOMIX	کارایی اختلاط بیولوژیکی	۰-۱	۰/۲۹
۸	EPCO	فاکتور جبران جذب گیاه	۰-۱	۰/۶۳
۹	ESCO	ضریب جبران تبخیر از خاک	۰-۱	۰/۷
۱۰	GW_REVAP	ضریب برگشت آب‌های زیرزمینی	۰/۰۲-۰/۲	۰/۰۵
۱۱	GW_DELAY	زمان تأخیر آب زیرزمینی (روز)	۰-۵۰۰	۱۷۰
۱۲	GWQMN	عمق آستانه آب در آبخوان عمیق (میلی‌متر)	۰-۵۰۰۰	۲۹۰
۱۳	SMTMP	دمای پایه ذوب برف (سلسیوس)	-۲۰-۲۰	۰
۱۴	ANION_EXCL	درصد تخلخل خاک	۱-۰/۰۱	۰/۵۵

جدول ۲. نتایج آماره‌های واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای مقادیر رواناب ماهانه در ایستگاه‌ها

ایستگاه	ایستگاه سلیمان تنگه	ایستگاه ریگ چشمه	ایستگاه کردخیل	آمار
	دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۴-۲۰۱۱)	دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۴-۲۰۱۱)	دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۴-۲۰۱۱)	
	دوره واسنجی (۲۰۱۰-۲۰۰۶)	دوره واسنجی (۲۰۱۴-۲۰۰۱)	دوره واسنجی (۲۰۱۰-۲۰۰۵)	
R <sup>2</sup>	۰/۶۷	۰/۷۸	۰/۵۸	۰/۷۷
NS	۰/۵۸	۰/۷۵	۰/۵	۰/۴۷

جدول ۳. نتایج آماره‌های واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای مقادیر نیترات ماهانه در ایستگاه‌ها

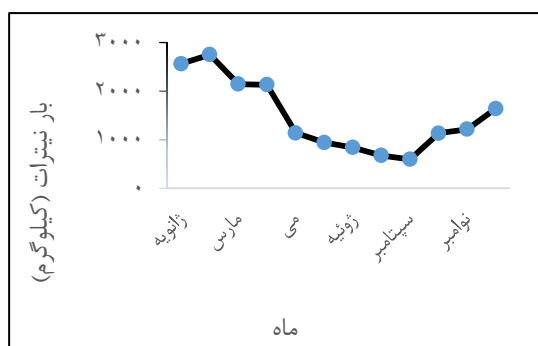
ایستگاه	ایستگاه سلیمان تنگه	ایستگاه ریگ چشمه	ایستگاه کردخیل	آمار
	دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۳-۲۰۰۹)	دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۴-۲۰۱۳)	دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۴-۲۰۱۳)	
	دوره واسنجی (۲۰۱۳-۲۰۰۹)	دوره واسنجی (۲۰۱۳-۲۰۰۹)	دوره واسنجی (۲۰۱۳-۲۰۰۹)	
R <sup>2</sup>	۰/۵۱	۰/۶۷	۰/۸۲	۰/۷۷
NS	۰/۵۵	۰/۶۶	۰/۶۱	۰/۴۹

داشتند که این می‌تواند به دلیل افزایش رواناب خروجی از حوضه در این سال‌ها باشد.

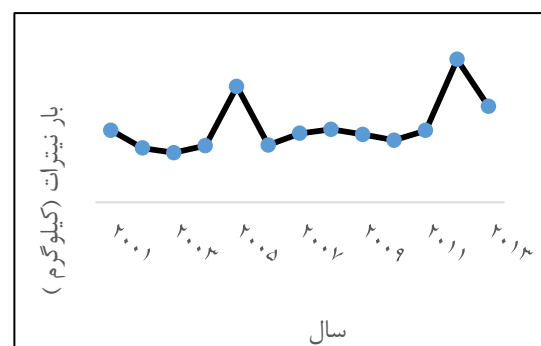
همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است الگوی زمانی نیترات نیز بیانگر آن است که میانگین بار سالانه نیترات کل ورودی به دریای خزر از حوضه آبخیز تجن در ماه‌های زمستان بیشتر است. بار نیترات در سه ماه زمستان ۴۹ درصد از کل بار سالانه نیترات را به خودش اختصاص داده است. بیشترین سطح نیترات در دوره مطالعه شده در

بررسی روند تغییرات مکانی و زمانی آلودگی نیترات در حوضه آبخیز تجن

سری زمانی شبیه‌سازی شده غلظت نیترات در شکل ۲ نمایش داده شده است. نتایج مدل واسنجی شده نشان داد بار سالانه نیترات از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳ از حدود ۳۱۰۷۰ کیلوگرم تا ۸۹۳۵۰ کیلوگرم در خروجی حوضه متفاوت است. سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۱۲ بیشترین بار نیترات را



شکل ۳. میانگین بار نیترات خروجی از حوضه آبخیز تجن طی ماه‌های سال

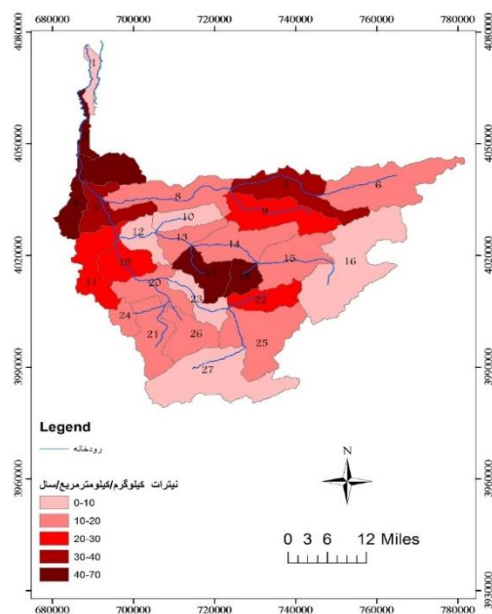


شکل ۲. بار نیترات خروجی از حوضه آبخیز تجن طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳

ارتباط آلودگی نیترات با انواع کاربری اراضی فعالیت‌های استفاده از زمین بر کیفیت آب با تغییر در رسوب، ترکیبات شیمیایی و هیدرولوژی حوضه تأثیر می‌گذارند و نیز برخی کاربری‌ها ممکن است به حفظ کیفیت آب از طریق فرایندهای تغییرات بیوژئوشیمیایی کمک کنند [۵]. با محاسبه مقادیر متوسط ماهانه بار نیترات در دوره شبیه‌سازی شده به تفکیک هر کاربری و سپس برآورد سهم هر کاربری نسبت به کاربری‌های دیگر، الگوی تغییرات ماهانه نیترات در هر کاربری به‌دست آمد (شکل ۵). نتایج نشان داد زمین‌های جنگلی ۵۳ درصد از مساحت منطقه را شامل می‌شوند و ۲۹ درصد از بار نیترات حوضه سهم این کاربری است. کاربری جنگل نسبت به مساحت خود بار آلودگی کمتری نسبت به دیگر کاربری‌ها ایجاد می‌کند که از دلایل این امر می‌توان به پوشش گیاهی با تاج‌پوشش مناسب و فعالیت‌های انسانی کمتر در این مناطق اشاره کرد. همچنین مناطق جنگلی، با ریشه‌های گسترده و عمیق خود، خاک‌هایی با سرعت نفوذپذیری زیاد دارند. این نفوذپذیری می‌تواند سرعت رواناب را کاهش دهد و کاهش سرعت رواناب عاملی برای بهبود کیفیت آب است به‌طوری که نیترات فرصت بیشتری برای ته‌نشینی و جذب دارد [۲۰]. از طرف دیگر، مراتع ۲۳ درصد از کل مساحت حوضه و تنها ۵/۷ درصد از بار نیترات حوضه را سهمی هستند و زمین‌های کشاورزی که تنها ۲۰ درصد از منطقه مطالعه شده را شامل می‌شوند، اما بیش از ۶۴ درصد بار نیترات از این کاربری ناشی شده است. بار بیشتر آلودگی نیترات در این کاربری نسبت به دیگر کاربری‌ها با توجه به مصرف کودهای شیمیایی و حیوانی در کاربری کشاورزی طبیعی به نظر می‌رسد. در تأیید این مسئله، بسیاری از مطالعات گزارش داده‌اند که کاربری شهری و کشاورزی اهمیت بسزایی در کاهش کیفیت آب در سیستم‌های آبی مجاور؛ تغییر شرایط سطح خاک، افزایش سطح غیرقابل نفوذ و تولید آلودگی دارند [۲۵ و ۱۶]. گندمزارهای دیم ۱۳ درصد بار نیترات را سبب می‌شوند در حالی که حدود ۵۵ درصد از مساحت زمین‌های کشاورزی به این محصول اختصاص داده شده است. با توجه به اینکه بیشتر کشت گندم در منطقه دیم است، انتقال نیترات به شروع فصل بارش موکول می‌شود و با افزایش جریان‌ات سطحی در ماه اکتبر، دسامبر و

ماه فوریه (به‌طور متوسط ۲۷۲۰ کیلوگرم) و کمترین در ماه سپتامبر (به‌طور متوسط ۴۷۰ کیلوگرم) است. این نتایج با مطالعه قبلی لی و همکارانش [۱۷] مطابقت دارد. به‌طوری که از ماه می تا سپتامبر، سطح نیترات روند زمانی معکوسی با رشد گیاهی دارد، بار نیترات با افزایش پوشش گیاهی کاهش و سپس از شهریور با برداشت محصول افزایش می‌یابد [۱۷]. این نشان می‌دهد مواد مغذی غیرنقطه‌ای مانند رواناب کشاورزی در بار آلودگی نیترات سهم مهمی دارند. همچنین بر اثر کاهش میزان بارش در فصل تابستان، انتقال بار آلودگی به رودخانه کاهش یافته است. کاهش نیتروژن‌زدایی و کاهش مصرف توسط گیاهان و میکروب‌ها به‌دلیل تجمع برف و دمای پایین آب نیز می‌تواند سبب سطح نیترات بیشتر در زمستان باشد [۱۹].

به‌منظور ارزیابی تغییرات مکانی بار آلودگی در سطح حوضه آبخیز پس از شبیه‌سازی حوضه برای دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴، بار نیترات در واحد سطح برای دوره مد نظر در هر زیرحوضه محاسبه شد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود زیرحوضه‌های ۳، ۴، ۵، ۱۷ و ۱۸ بیشترین بار آلودگی در واحد سطح را داشتند. این امر می‌تواند ناشی از وسعت بیشتر زمین‌های کشاورزی و نیز وجود مراکز جمعیتی در این زیرحوضه‌ها باشد. همچنین در این زیرحوضه‌ها آلودگی نیترات خروجی از استخرهای پرورش ماهی سردآبی و گرم‌آبی سبب آلودگی بیشتر منابع آب شده است.



شکل ۴. بار نیترات خروجی از زیرحوضه‌های حوضه آبخیز تجن

مناطق جمعیتی ۱/۳ درصد از حوضه را شامل می‌شوند، اما ۶ درصد از بار آلودگی نیترات را تولید می‌کنند. بار خروجی از مراکز جمعیتی تقریباً در همه ماه‌ها به جز فصل خشک سال جریان دارد و با شروع بارش این مقدار افزایش می‌یابد. نتایج ما با یافته‌های قبلی بکر [۱۱]، چن و تانگ [۲۴] لی و همکارانش [۱۷] همخوانی دارد. همچنین مطالعه طالبی و همکارانش [۲] در بررسی تأثیر تغییر پوشش کاربری سرزمین بر وضعیت هیدرولوژیکی در حوضه آبخیز نکا نشان داد افزایش وسعت زمین‌های کشاورزی و کاهش مناطق جنگلی و مرتعی تأثیر مثبتی در افزایش دبی جریان داشته است.

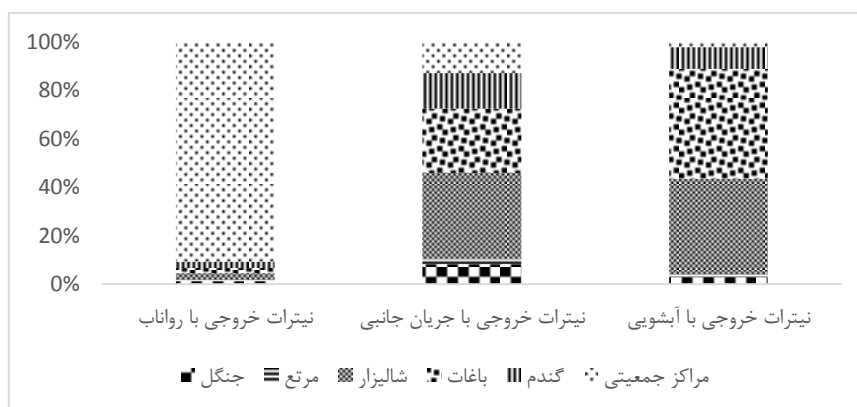
در ادامه و به منظور بررسی چگونگی انتقال نیترات در حوضه، درصد تأثیر هریک از مؤلفه‌های مؤثر در چگونگی انتقال آنها در هر کاربری اراضی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، بیشترین درصد انتقال نیترات در کاربری باغ‌های مختص به آبشویی است. در محصول گندم بیشترین درصد انتقال مختص به جریان رواناب است که می‌تواند به دلیل کشت دیم این محصول باشد و بارش فرصت کمتری برای آبشویی خواهد داشت؛ اما در کاربری جنگل و مرتع نیترات خروجی با مؤلفه‌های مختلف اختلاف معناداری ندارد. در مراکز جمعیتی نیز بیشترین سهم انتقال نیتروژن توسط رواناب است.

سپتامبر، افزایش شایان توجهی در میزان نیترات خروجی در این کاربری صورت می‌گیرد. شالیزارها ۲۵ درصد از مساحت منطقه کشاورزی و ۲۵/۵ درصد از آلودگی نیترات را سبب می‌شوند. به نوعی بار آلودگی نیترات مختص به شالیزارها یکی از منابع مهم آلاینده است. کشت متفاوت محصول برنج نسبت به دیگر کشت‌ها، استفاده از مقدار کود فراوان و دوره طولانی کشت غرقابی، سبب ازدست رفتن آسان مواد مغذی محلول شده است. ملاحظه می‌شود خروجی نیترات از مزارع کشت برنج در فصل‌های بهار در ماه‌های می و ژوئن به بیشترین مقدار خود می‌رسد. با توجه به مراحل کشت و کوددهی در این فصل، افزایش انتقال نیترات از شالیزارها منطقی به نظر می‌رسد. از طرف دیگر، ازدست دادن مواد مغذی با سرریز شدن آب از شالیزارها به هنگام بارش باران و نیز در زمان زهکشی رخ می‌دهد [۲۵]. حدود ۲۰ درصد از مساحت زمین‌های کشاورزی را باغ‌ها دربرمی‌گیرند در حالی که ۲۵/۵ درصد تولید نیترات را سهمیم‌اند. کشت باغ‌ها نیز مانند کشت برنج سهم زیادی در خروجی نیترات دارند. باغ‌ها در فصل تابستان بیشترین بار نیترات را دارند. این افزایش می‌تواند به این دلیل باشد که در ماه‌های گرم سال میزان آبیاری نیز به بیشترین مقدار خود می‌رسد که سبب انتقال حجم زیادی از نیترات می‌شود.



شکل ۵. الگوی زمانی بار نیترات خروجی از کاربری‌ها





شکل ۶. درصد مؤلفه‌های مختص به تلفات نیتروژن

### نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر کاربری‌های مختلف بر بار نیترات و نیز شناسایی زیرحوضه‌های اولویت‌دار در سطح حوضه آبخیز صورت پذیرفت. به‌منظور نیل به این هدف و با در نظر گرفتن نقش شناسایی زیرحوضه‌های بحرانی در کاهش هزینه‌های اجرایی در منطقه، ابتدا شبیه‌سازی جامع این حوضه با استفاده از مدل SWAT انجام شد. نتایج نشان داد توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی بار آلودگی حوضه آبخیز تجن رضایت‌بخش است. همچنین نتایج نشان داد سهم آلاینده نیترات تولیدشده توسط مرتع (۵/۷ درصد) و جنگل (۲۹ درصد) بسیار کمتر از نیترات تولیدشده توسط کاربری کشاورزی (۶۴ درصد) است. اراضی شالیزارها و باغ‌ها به‌عنوان منابع اصلی آلودگی نیترات به‌ویژه در فصول بهار و تابستان هستند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد سهم شایان توجه انتقال نیترات توسط آب‌شویی و جریان‌ات جانبی است که باید در انتخاب راهکارهای مدیریت به آن توجه شود. نتایج این مطالعه می‌تواند راهنمای مفیدی به‌منظور حفاظت از اکوسیستم حوضه آبخیز تجن برای جلوگیری از تخریب بیشتر و ترویج توسعه پایدار در این منطقه باشد.

### منابع

- [۱]. احمدی ممقانی، یوسفعلی؛ خراسانی، نعمت‌الله؛ رفیعی، غلام‌رضا، ۱۳۸۹، بررسی منابع آلاینده و کیفیت آب رودخانه تجن، مجله منابع طبیعی ایران، ۳۱۷ [۴]، شماره ۶۳-۳۲۷.
- [۲]. طالبی امیری، شیما؛ آذری دهکردی، فرود؛ صادقی، سید حمیدرضا؛ صوف‌باف، سیدرضا، ۱۳۸۸، تحلیل تخریب سیمای سرزمین حوضه آبخیز نکا با استفاده از سنجش‌های اکولوژی سیمای سرزمین، مجله علوم محیطی، شماره ۶ (۳)، ۱۳۳-۱۴۴.
- [۳]. محمودی، بیت‌الله؛ حمیدی‌فر، مینا؛ خراسانی، نعمت‌الله، ۱۳۸۶، بررسی تغییرات کاربری اراضی حوضه آبخیز کرخه و ارزیابی نقش آن در کیفیت فیزیکی و شیمیایی رودخانه کرخه، چهارمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران مدیریت حوضه‌های آبخیز.
- [۴]. میرزایی م، ریاحی بختیاری ع، سلمان‌ماهینی عر، غلامعلی فرد م. ۱۳۹۲. بررسی تغییرات پوشش اراضی استان مازندران با استفاده از سنجش‌های سیمای سرزمین بین سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۹ اکولوژی کاربردی، شماره ۲ (۴)، ۵۴-۳۷.
- [۵]. نعمتی محمد؛ ابراهیمی علی؛ میرغفاری ناصر؛ سفینیان علی، ۱۳۸۶، بررسی اثر کاربری اراضی بر میزان نیترات و فسفات آب رودخانه زاینده‌رود، چهارمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران مدیریت حوضه‌های آبخیز.
- [6]. Abbaspour K. C., Yang J., 2006. Calibration and uncertainty analysis for SWAT using SUFI2 with SWAT-SAI interface: a user manual, Swiss Federal Institute for Aquatic Science and Technology.

- [7]. Abbaspour, K. C., J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist, and R. Srinivasan., 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *J. Hydrol*, Vol 333 [2-4], pp. 413-430.
- [8]. American Public Health Association (APHA), 1992. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 18<sup>th</sup> ed. American Public Health Association, Washington, DC.
- [9]. Arheimer, B., Lidén, R., 2000. Nitrogen and phosphorus concentrations from agricultural catchments influence of spatial and temporal variables. *Journal of Hydrology*, Vol 227 [1-4], pp. 140-159.
- [10]. Akhavan, S., Abedi, J., Mousavi, S. F., Abbaspour, K., 2010. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar watershed, Iran. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, Vol 139, pp. 675-688.
- [11]. Bakr, N., Weindorf, D.C., Bahnassy, M.H., Marei, S.M., El Badawi, M.M., 2010]. Monitoring land cover changes in a newly reclaimed area of Egypt using multi temporal Landsat data, *Application geography*, Vol 30, pp. 592-605.
- [12]. Borah, D.K., Bera, M., Xia, R., (2004). Storm Event Flow and Sediment Simulations in Agricultural Watershed Using DWSM, *American Society of Agricultural Engineers* 47(5): 1539-1559.
- [13]. Clinton, B.D., Vose, J.M., 2005. Variation in Stream Quality in an Urban Headwater Stream in the Southern Appalachians.
- [14]. Hao, F., Zhang, X., Wang, X., Ouyang, W., 2012. Assessment the Relationship between Landscape Patterns and Nonpoint Source Pollution in the Danjiangkou Reservoir Basin in China, *Journal of the American Water Resources Association*, pp. 1-16.
- [15]. Jamshidi, M., Tajrishy, M., Maghrebi, M., 2010. Modeling of point and non-point source pollution of nitrate with SWAT in the Jajrood river watershed, Iran. *International Agricultural Engineering Journal*, Vol 19 (2), pp. 23-31.
- [16]. Kieken, H., Lebonvallet, S., Ledoux, E., Mary, B., Mignolet, C., Poux, X., Sauboua, E., 2013. Assessing the relationship between water quality parameters and changes in land use patterns in the Upper Manyame River, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol 52, pp. 130-146
- [17]. Lee, S. W., Wang, S. J., Lee, S., Hwang H. S., Sung H. C., 2009. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics, *Landscape. Urban Plan*, Vol 92, pp. 80-89.
- [18]. Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W., et al., 2007. Model evaluation guideline for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. *T. ASABE*, Vol 50 (3), pp. 885- 900.
- [19]. McCutchan, Jr., William M., Lewis, Jr. [2008]. Spatial and temporal patterns of denitrification in an effluent-dominated plains river James. *H. Verh. Internat. Verein. Limnol*, Vol 30[2], pp. 323-328.
- [20]. Neary, D.G., Ice, G.G., Jackson, C.R., 2009. Linkages between forest soils and water quality and quantity. *Forest Ecological Management*, Vol 258, pp. 2269-2281.
- [21]. Niraula, R., Kalin, L., Srivastava, P., Anderson, Ch., (2013). Identifying critical source areas of Nonpoint source pollution with SWAT and GWLF. *Ecological Modelling* 268 (2013) 123-133.
- [22]. Saiko, T. A. [1997]. Environmental problems of the Caspian Sea region and the conflict of national priorities. *MH Environmental and Political Issues in the Circum Caspian Region* 41-52 Glantz and IS Zonn (Eds) Kham'er Academic Publishers.
- [23]. Somura, H., Takeda, I., Arnold, J.G., Mori, Y., Jeong, J., Kannan, N., Hoffman, D., 2012. Impact of suspended sediment and nutrient loading from land uses against water quality in the Hii River basin, Japan. *Journal of Hydrology*, Vol 450-451 (5), pp. 25-35.
- [24]. Tong, S. T., Chen, W., 2002. Modeling the relationship between land use and surface water quality. *Journal of environmental management*, Vol 66[4], pp. 377-393.
- [25]. Zhu, A.X., Wang, P., Zhu, T., Chen, L., Cai, Q., Liu, H., 2013. Modeling runoff and soil erosion in the Three-Gorge Reservoir drainage area of China using limited plot data. *Journal of Hydrology*, Vol 492, pp. 163-175.