

## تعیین نقش جنگل‌های بلوط در حفاظت از کیفیت آب بر پایه تابع تولید خدمات در حوضه زوجی تنگشول فارس

طوبی روستا<sup>۱</sup>، علی‌اکبر نظری سامانی<sup>۲</sup>، سید مهدی حشمت‌الواعظین<sup>۳\*</sup>، منصور زیبایی<sup>۴</sup>، پدرام عطارد<sup>۵</sup>، سید کاظم بردبار<sup>۶</sup>

۱. دانشجوی دکتری اقتصاد و مدیریت جنگل، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

۲. دانشیار گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

۳. استادیار گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

۴. استاد بخش اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، شیراز

۵. دانشیار گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

۶. استادیار پژوهشی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۲/۲۲)

### چکیده

آب‌های سطحی از مهم‌ترین منابع تأمین آب‌های آشامیدنی هستند که تحت تنش‌های محیطی و انسانی قرار دارند. تحقیقات زیادی اثر مثبت پوشش جنگلی را بر کیفیت آب نشان داده‌اند، ولی نبود اطلاعات کمی و اقتصادی در زمینه تأثیر جنگل بر کیفیت آب، موجب شده است تا این مسئله فقط به طور کیفی بیان شود. اطلاعات کمی و به‌ویژه تأثیر آن بر هزینه پالایش آب در ایران بسیار کم است و یا موجود نیست. به این منظور، در پژوهش حاضر زیرحوضه‌های جنگلی با درصدهای تاج پوشش مختلف در حوضه تنگشول کامفیروز فارس انتخاب و شاخص کیفیت (WQI) آب با استفاده از متغیرهای فیزیکی-شیمیایی رواناب‌های حاصل از بارندگی تعیین شد. همچنین، برای نخستین بار تابع تولید خدمات کیفیت آب در جنگل با در نظر گرفتن سایر ویژگی‌های جنگل به طور کمی برآورد شد. نتایج نشان داد شاخص کیفیت آب در درصدهای تاج پوشش بیشتر از طبقه ۲۰-۳۰، در مقیاس کیفی خوب قرار دارند، همچنین با افزایش هر یک درصد تاج پوشش جنگلی، شاخص کیفیت به میزان ۰/۸ درصد بهبود می‌یابد و افزایش هر یک درصد مساحت زیرحوضه جنگلی، سبب کاهش ۰/۱۴ درصدی کیفیت آب می‌شود. سازند آجاجاری نیز نسبت به آسماری اثر منفی و خاک شنی لومی نسبت به خاک لومی و رسی اثر مثبتی بر کیفیت آب در منطقه دارند. یافته‌های پژوهش افزایش تاج پوشش جنگلی برای حفاظت از کیفیت آب تا ۳۰ درصد، هزینه‌های تصفیه را به کمترین حد می‌رساند و آب‌های تأمین‌شده از این جنگل‌ها می‌تواند مستقیم به مصرف شرب انسانی برسد.

**کلیدواژگان:** پارامترهای فیزیکی-شیمیایی، جنگل‌های بلوط، درصد تاج پوشش، شاخص کیفیت آب.

## مقدمه

در دهه‌های اخیر استفاده نادرست از جنگل سبب کاهش سطح عملکرد و خدمات جنگل‌ها شده است. یکی از این خدمات حفظ و بهبود کیفیت آب است، به طوری که آب‌هایی که از اکوسیستم جنگلی تأمین می‌شوند، نسبت به سایر کاربری‌ها، بسیار زلال و شفاف‌ترند [۱] و حتی گاهی نیاز به هیچ‌گونه تصفیه‌ای برای آشامیدن انسان ندارند [۲]. در واقع، پوشش جنگلی با حضور خود و جلوگیری از جایگزینی آن با سایر کاربری‌های با آلودگی‌های زیاد و سطوح غیرقابل نفوذ مانند شهری و کشاورزی، سبب بهبود کیفیت آب می‌شود [۳]. بنابراین، تخریب چنین اکوسیستم‌هایی کاهش کمی و کیفی تولیدات و خدمات آن را به دنبال خواهد داشت، در نتیجه حفاظت از این جنگل‌ها و یا غنی‌سازی و احیای آنها برای حفظ و تداوم کیفیت آب، از جمله اقداماتی است که بقای اکوسیستم را تضمین می‌کند و نیز موجب کاهش بسیاری از هزینه‌ها می‌شود [۴].

مطالعات مختلفی اثر مثبت پوشش جنگلی را بر کیفیت آب و کاهش کدورت آن نشان می‌دهد. از جمله دیزی و همکارانش که اثر جنگل بر کمیت و کیفیت آب‌های خروجی از حوضه آبخیز جنگلی لیانچاو در جنوب شیلی را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد با کاهش سطح جنگل و تغییر گونه بومی به خارجی، کیفیت آب کاهش می‌یابد و کاهش کمیت آب آشامیدنی نیز به مقدار ۵۱۵۴ مترمکعب بر اثر کاهش یک درصد سطح پوشش جنگلی<sup>۱</sup> طبیعی است [۵]. بررسی اثر کاربری‌های مختلف نیز بر کیفیت آب نشان می‌دهد بین پوشش گیاهی جنگلی و کدورت آب [۶] پارامترهای نترات و آفت‌کش‌ها [۷] و دیگر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی [۸] رابطه منفی وجود دارد و کیفیت آب در جنگل بسیار بهتر از سایر کاربری‌هاست. در نتیجه، هزینه تصفیه آب بسیار کمتر است [۹]. به طور کمی نیز کاهش کدورت آب به مقدار ۱۸ درصد بر اثر افزایش یک درصد از پوشش جنگلی [۱۰] و کاهش ۲۰ درصدی هزینه‌های تصفیه بر اثر افزایش هر ۱۰ درصد از پوشش جنگلی نشان داده شده است [۱۱]. همچنین، تحقیقات نشان می‌دهد پوشش جنگلی می‌تواند ۳۰ درصد تغییر کیفیت فیزیکی و شیمیایی فصلی را توضیح دهد و

مساحت جنگل به طور مستقل می‌تواند پنج درصد از تغییرات کیفیت آب را توجیه کند [۱۲].

روش‌های مختلفی برای ارزیابی کیفیت آب وجود دارد. به طور مثال، می‌توان پارامترهای مختلف اندازه‌گیری‌شده آب را بر اساس مصارف مختلف با نمودارهای موجود شولر، ویلکوکس و ... مقایسه کرد. مقادیر کمی پارامترهای مختلف مانند pH، EC، سختی و سایر پارامترها را با مقادیر استاندارد و مجاز مربوط به آن سنجید [۱۳] و درجه کیفیت هر پارامتر را به طور جداگانه نشان داد. با این حال، مشکل اصلی این رویکرد ناتوانی آن در ارائه تصویری جامع از شرایط کیفی آب است که تصمیم‌گیری و ارائه راهکارهای مناسب برای مصرف مطمئن منابع آب را دشوار می‌کند [۱۴]. به همین منظور، شاخص کیفیت آب WQI<sup>۲</sup> توسط براون و همکارانش [۱۵] ابداع شد و توسط بکمان و همکارانش [۱۶] توسعه یافت. این شاخص برای ارزیابی کیفیت آب آشامیدنی به کار گرفته می‌شود و بر پایه مقادیر پارامترهای مختلف فیزیکی، شیمیایی و زیستی در یک نمونه آب بنا شده است. شاخص WQI در مطالعات کانتز در آمریکا [۱۷]، عبدالحمید و همکارانش در عراق [۱۸]، سنر و همکارانش در ترکیه [۱۹] و نیز وو و همکارانش در چین [۲۰] استفاده شده است. در ایران نیز در تحقیق یوسفی و همکارانش [۲۱] شاخص WQI برای بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی استان البرز استفاده شده است.

اما در بحث مدل‌سازی خدمت کیفیت آب جنگل در منابع داخلی مطالعه‌ای انجام نشده است و نتایج تعداد محدود مطالعات خارج از کشور نیز به دلیل تفاوت نوع جنگل و شرایط رشد آنها، قابل استفاده در ایران نیست. به این منظور، نیاز به داشتن تابع تولید زیستی فیزیکی خدمت کیفیت آب در ایران احساس می‌شود که بتوان با کمک آن تغییرات نهایی کیفیت آب را بر اثر تغییر در وضعیت جنگل از جمله درصد تاج پوشش جنگلی به دست آورد. برای رسیدن به این هدف، جنگل‌های طبیعی بلوط حوضه تنگ‌شول در کامفیروز فارس انتخاب شد که منبع تأمین آب رودخانه‌های شول و تغذیه رود کر است. آب‌های خروجی از این جنگل‌ها بعد از پیوستن به رود کر در پشت سد درودزن تجمع می‌یابد. سد یادشده منبع تأمین آب شرب شهر شیراز و مرودشت و بخشی از مناطق اطراف

مرتفع و پرشیب محسوب می‌شود. طبق مطالعه انجام‌شده نسبت سازندهای زمین‌شناسی واقع در این دو زیرحوضه (شاهد و نمونه) مشابه در نظر گرفته شده و شامل سازند رازک در قسمت شمال، سازند آغاچاری در قسمت میانی و رسوبات کوه‌رفتی (واریزه‌های شن و ریگ و ماسه و مارن) در قسمت جنوبی حوضه‌ها هستند. همچنین، گونه‌های مرتعی شناسایی شده در حوضه‌های زوجی بر اساس این مطالعه، شامل گون و گوشبر با وضعیت فقیرند. در بین گونه‌های جنگلی نیز گونه بلوط با وضعیت نیمه‌انبوه تا تنک در این حوضه‌ها مشاهده می‌شود [۲۲].

#### محاسبه شاخص کیفیت آب (WQI)

در بررسی حاضر برای بیان درجه کیفیت آب، از ابزار مدیریتی WQI پیشنهاد شده توسط براون و همکارانش [۱۵] استفاده شده است. پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده در پژوهش حاضر پارامترهایی هستند که برای مصارف شرب انسانی بسیار ضروری است. این پارامترها شامل کلسیم (Ca)، سولفات (SO<sub>4</sub>)، نترات (NO<sub>3</sub>)، کلر (Cl)، اسیدیته (pH)، سختی کل (TH)، سدیم (Na)، منیزیم (Mg)، هدایت الکتریکی (EC)، کدورت و کل مواد جامد محلول (TDS) می‌شوند.

به طور کلی، شاخص‌های کیفیت آب در دو مرحله محاسبه می‌شوند. در مرحله اول داده‌های خام مربوط به پارامترهای مختلف کیفی آب که از نظر واحدهای اندازه‌گیری نیز با یکدیگر متفاوت هستند، با استفاده از توابع مختلف به زیرشاخص‌های بدون بعد تبدیل می‌شوند. در مرحله دوم زیرشاخص‌های محاسبه شده با استفاده از توابع تجمیع، ترکیب و در نهایت شاخص کیفیت آب محاسبه می‌شوند [۲۳].

به این منظور، ابتدا با استفاده از رابطه ۱ فاکتور وزنی هر پارامتر تعیین می‌شود که برای این کار از استانداردهای توصیه شده توسط سازمان سلامت جهانی [۲۴] و آب آشامیدنی در ایران استفاده شده است [۲۵].

در رابطه ۱  $W_f$  فاکتور وزنی و  $W_i$  وزن اولیه  $S_i$  استاندارد مربوط به هر پارامتر و  $K$  ثابت معادله است [۲۶].

$$W_f = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

$$W_i = K / S_i$$

است. از این رو، اثر این جنگل‌ها در بهبود کیفیت آب آشامیدنی تحقیق شد. در واقع، هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر تغییر درصد تاج پوشش جنگل و تأثیر سایر ویژگی‌های زیرحوضه جنگلی (مساحت زیرحوضه، زمین‌شناسی، مدیریت و خاک) بر کیفیت آب با استفاده از شاخص کیفیت آب و ایجاد مدل تولید خدمت حفظ و بهبود کیفیت آب توسط جنگل‌های بلوط زاگرس است که بتوان به ابزاری کمی برای مدیریت بهتر و صحیح‌تر عرصه‌های جنگلی در این مناطق دست یافت و از روند افزایشی تخریب این اکوسیستم‌های حیاتی کاست.

#### مواد و روش‌ها

##### منطقه مطالعه شده

در مطالعه حاضر منطقه مطالعاتی حوضه‌های آبخیز زوجی تنگ‌شول است. از نظر تقسیمات کشوری در شمال غربی استان فارس، محدوده شهرستان مرودشت و از نظر موقعیت جغرافیایی در گستره ۶۰۹۲۲۲ تا ۶۱۰۱۲۷ متر طول شرقی و ۳۳۴۹۳۱۰ تا ۳۳۵۱۱۳۳ متر عرض شمالی منطقه ۳۹ سامانه UTM معادل ۵۲°۸' تا ۵۲°۹' طول شرقی و ۳۰°۱۶' تا ۳۰°۱۷' عرض شمالی قرار دارند (شکل ۱). حوضه‌های شاهد و نمونه تنگ‌شول فارس از جمله حوضه‌های معرف زوجی هستند که در سطح کشور با هدف ارزیابی آثار طرح‌های آبخیزداری و سایر عوامل مؤثر بر رواناب و رسوب و همچنین انجام تحقیقات مرتبط تعریف و راه‌اندازی شده‌اند.

دسترسی به حوضه‌های شاهد و نمونه از جاده شیراز-مرودشت، مرودشت-کامفیروز از مسیر هولبال بیضا-تنگ‌خور-خرم‌مکان-شول‌بزی به طول تقریبی ۱۲۰ کیلومتر و همچنین جاده شیراز-سپیدان و از مسیر برشنه-شش‌پیر-شول‌بزی به طول تقریبی ۱۱۰ کیلومتر امکان‌پذیر است. حوضه‌های شاهد و نمونه زیرحوضه‌هایی کوچک از حوضه آبخیز تنگ‌شول و در حالت کلی حوضه آبخیز بالادست سد درودزن هستند. آبراهه اصلی هر دو حوضه به رود کر می‌پیوندد و در نهایت به سد درودزن می‌ریزد. حوضه شاهد با مساحت ۵۷/۷ هکتار، ارتفاع متوسط ۲۱۵۵/۶ متر از سطح دریای آزاد و شیب ۴۱/۲ درصد، حوضه‌ای کوچک، مرتفع و پرشیب محسوب می‌شود. حوضه نمونه نیز با مساحت ۴۹/۹ هکتار، ارتفاع متوسط ۲۱۲۱/۳ متر از سطح دریای آزاد و شیب ۴۰/۱ درصد، همچون حوضه شاهد حوضه‌ای کوچک،

در مرحله آخر محاسبه شاخص کیفیت بر اساس روابط ۴ و ۵ بیان می‌شود:

$$WQI = \left( \sum Q_i \times W_f \right) / \sum W_f \quad (W_f = 1) \quad (4)$$

$$WQI = \sum_{i=1}^n Q_i * W_f \quad (5)$$

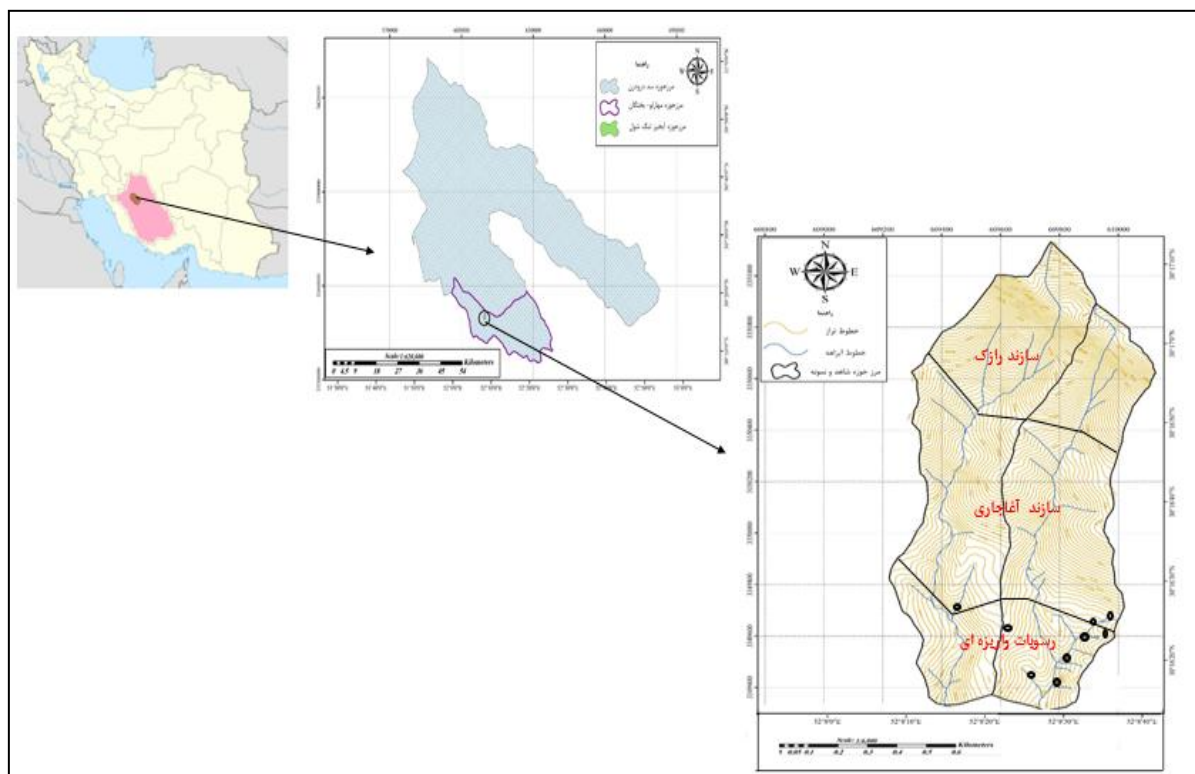
در نهایت، برای بیان کیفی درجه کیفیت آب از جدول ۱ استفاده می‌شود.

سپس، یک مقیاس سنجش کیفیت با استفاده از رابطه ۲ برای همه پارامترها محاسبه می‌شود. در رابطه ۲  $Q_i$  زیرشاخص برای هر پارامتر،  $V_{act}$  مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه،  $V_{st}$  نیز مقدار استاندارد هر پارامتر است.

$$Q_i = (V_{act} / V_{st}) * 100 \quad (2)$$

مقیاس پارامتر اسیدیته (pH) از رابطه ۳ تعیین می‌شود.

$$Q_i = (V_{act} - 7 / V_{st} - 7) * 100 \quad (3)$$



شکل ۱. منطقه مطالعه شده

جدول ۱. طبقه‌بندی (مقیاس) کیفی شاخص کیفیت آب [۲۷]

مقیاس شاخص کیفیت آب	۲۵-۰	۵۰-۲۶	۷۵-۵۱	۱۰۰-۷۶	>۱۰۰
طبقه کیفیت آب	عالی	خوب	ضعیف	بسیار ضعیف	غیر قابل شرب

فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل شد. این پارامترها در آزمایشگاه اندازه‌گیری و سپس از نتایج به‌دست‌آمده شاخص کیفیت آب تعیین شد.

**آنالیز رگرسیون چندگانه (MRA (Multiple Regression Analysis)**  
آنالیز رگرسیون چندگانه درجه اهمیت بین هریک از متغیرها را مشخص می‌کند و نشان می‌دهد که مدل چقدر

### جمع‌آوری داده

در تحقیق حاضر برای بررسی اثر جنگل بر کیفیت آب، زیرحوضه‌هایی با درصد‌های تاج پوشش جنگلی متفاوت در حوضه‌های زوجی قرق و آزاد در منطقه تنگ‌شول انتخاب شد و نمونه‌های رواناب جاری شده بعد از هر بارندگی از مهر ۱۳۹۴ تا اردیبهشت ۱۳۹۵ از هر زیرحوضه برداشت شد و در مجموع ۵۴ نمونه آب برای بررسی ویژگی‌های

سنگ)، زمان جریان آب در حوضه، طول مسیر طی شده (مساحت زیرحوضه) [۲۹]، بارش، فرسایش خاک و هوازگی، درصد پوشش گیاهی [۳۰] و عوامل مدیریتی [۳۱] اشاره کرد.

بنابراین، در زیرحوضه‌های بررسی شده، شاخص کیفیت آب به عنوان متغیر وابسته و درصد تاج پوشش جنگلی، نفوذپذیری خاک، مساحت زیرحوضه‌ها، شدت بارش، متغیر مجازی سازند زمین‌شناسی، متغیر مجازی مدیریت (قرق و آزاد) و مجازی نوع خاک به عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شدند.

همه برداشته‌های اندازه‌گیری شده در اکسل به عنوان بانک اطلاعاتی ذخیره و سپس نرم‌افزار Shazam برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی انتخاب شد. پس از بررسی داده‌ها و توجه به شکل تابع در مطالعات انجام شده [۵، ۶ و ۱۰] روش رگرسیون چندگانه و شکل تابعی لگاریتمی (تابع تولید کاب-داگلاس) برای ایجاد تابع تولید اکولوژیکی خدمت کیفیت آب استفاده شد. روند نمای پژوهش حاضر به صورت شکل ۲ نشان داده شده است.

به عنوان یک ابزار تخمین خوب عمل می‌کند [۲۸]. معادله‌ای که ارتباط رگرسیون چندگانه را توضیح می‌دهد طبق رابطه ۶ است:

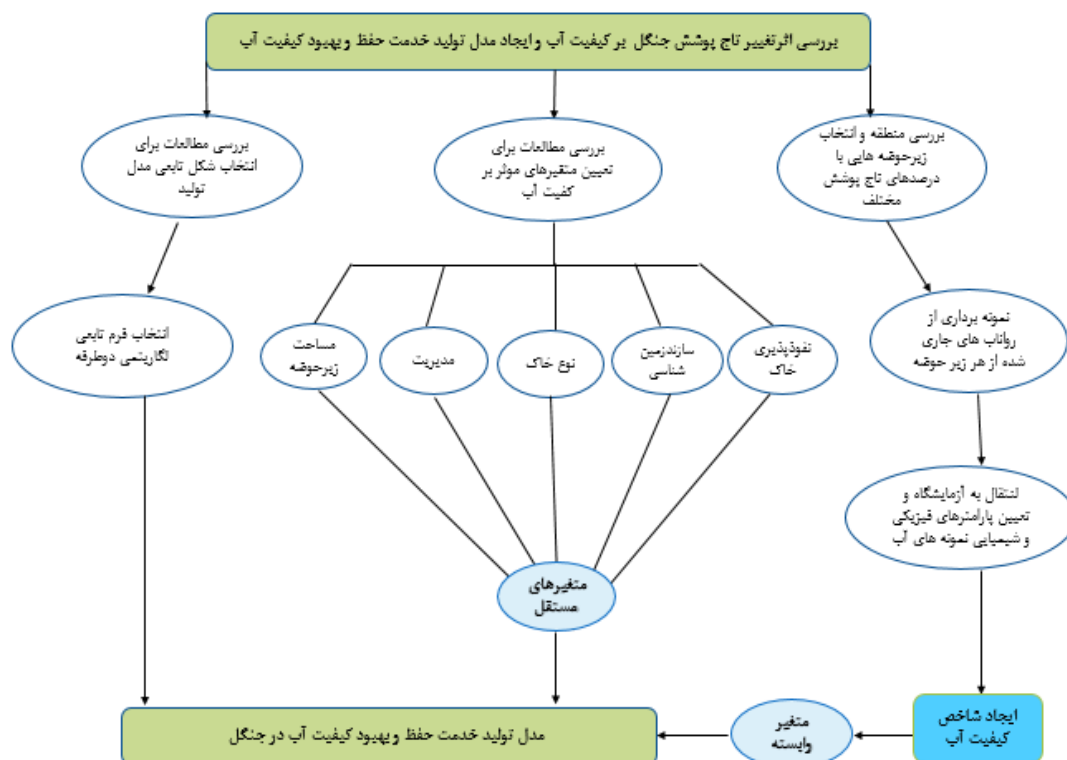
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + u \quad (6)$$

در رابطه ۶ Y متغیر وابسته و Xk ها متغیرهای مستقل (فاکتورهای مؤثر) است. رابطه ۶ با جداسازی هر متغیر مستقل از بقیه اجازه می‌دهد هر یک از این متغیرها ضرایب خود را داشته باشند که در حقیقت توضیح‌دهنده ارتباط آنها با متغیر وابسته است. این نوع آنالیز رگرسیون، ضرایبی را برای هر متغیر مستقل می‌یابد و آنها خطی را تشکیل می‌دهند که کمترین مجموع مربعی خطا را دارند.

برای تعیین ارتباط درصد تاج پوشش جنگل با هر یک از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب آنالیز همبستگی بین درصد تاج پوشش جنگل و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب انجام شد.

#### مدل‌سازی کیفیت آب

برای ایجاد مدل تولید خدمت کیفیت آب در جنگل نیز عوامل مختلف مؤثر بر کیفیت آب در مطالعات انجام‌شده مشخص شد که از جمله می‌توان به لیتولوژی (جنس



شکل ۲. روند نمای پژوهش حاضر

## یافته‌ها

توصیف آماری مربوط به مقادیر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب در جدول ۲ ارائه شده است.

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران دامنه مجاز pH برای نمونه‌های آب در دامنه ۶/۵ تا ۸/۵ توصیف کرده است [۲۵] که از نظر نمونه‌های آب منطقه در محدوده مجاز قرار دارند و از نظر pH مطلوب ارزیابی می‌شوند. همچنین، پارامترهای کلسیم، منیزیم، سدیم، کلر و سولفات نیز با توجه به حد مطلوب آنها در محدوده مطلوب هستند، اما ویژگی کدورت، سختی کل و نیترات در محدوده مجاز قرار دارند که مطلوب آشامیدن انسان نیست.

برای بررسی رابطه بین درصد تاج پوشش‌های مختلف و پارامترهای فیزیکی- شیمیایی آب، رابطه همبستگی بین این پارامترها و درصد تاج پوشش جنگلی به دست آمد که نتیجه بررسی در جدول ۳ نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۳ بیشترین همبستگی بین درصد تاج پوشش و پارامترهای نیترات، کلسیم و کدورت است.

علامت منفی نیز نشان می‌دهد با افزایش تاج پوشش جنگل، مقدار نیترات، کلسیم و کدورت آب کاهش می‌یابد. جدول ۴ پارامترهای فیزیکی- شیمیایی استفاده‌شده برای ایجاد شاخص کیفیت آب و مقدار عددی شاخص کیفیت آب را در یک نمونه آب که از زیرحوضه با ۵۰ درصد تاج پوشش نمونه‌برداری شده است، نشان می‌دهد.

طبق جدول ۴ عدد شاخص کیفیت آب در تاج پوشش جنگلی ۵۰ درصد، ۳۹/۳۰۸ است که کیفیت خوب آب در این طبقه از پوشش جنگلی را نشان می‌دهد.

بر اساس طبقه‌بندی موجود برای شاخص کیفیت آب، شاخص‌های کیفی به‌دست‌آمده در طبقات مختلف تاج پوشش جنگل، طبقه‌بندی کیفی شده‌اند. جدول ۵ نتایج شاخص کیفیت در هر طبقه تاج پوشش جنگلی و طبقه‌بندی کیفی و کمی آن را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۵ طبقه تاج پوشش جنگلی بیش از ۳۰ درصد در مقیاس کیفی خوب قرار گرفته‌اند و در طبقات کمتر از ۳۰ درصد، آب در مقیاس کیفی ضعیف و بسیار ضعیف برای مصارف شرب انسان قرار می‌گیرد.

نتایج آنالیز آماری متغیرهای مؤثر و استفاده‌شده بر کیفیت آب در مدل‌سازی تابع تولید خدمت حفظ و بهبود کیفیت آب به صورت جدول ۶ نشان داده شده است.

متغیر وابسته WQI (شاخص کیفیت آب) با حداقل ۲۸/۹۸ و حداکثر ۹۵/۳۱ و متغیرهای مستقل مساحت زیرحوضه با حداقل ۵۱۱ مترمربع و حداکثر حدود پنج هکتار در محاسبات مدل‌سازی وارد شد. نفوذپذیری نیز یکی دیگر از متغیرهای مؤثر است که کمترین مقدار آن در خاک منطقه ۴/۶۳ و بیشترین مقدار آن ۹/۸ میلی‌متر بر ساعت است. همچنین، برای در نظر گرفتن اثر شدت بارش بر کیفیت آب، شدت‌های بارش موجود با حداقل ۱/۲ و حداکثر ۳/۹۱ در نظر گرفته شده و در نهایت همه این پارامترها در درصدهای تاج پوشش جنگلی از صفر تا ۵۰ درصد در محاسبات مدل‌سازی وارد شده‌اند.

نتایج تخمین ضرایب رگرسیون معادله برآورد تابع تولید خدمت حفظ و بهبود کیفیت آب و اجزای تابع، به صورت جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۲. توصیف آماری متغیرهای فیزیکی و شیمیایی آب در منطقه تنگ‌شول کامفیروز (واحد پارامترها به جز pH و EC، میلی‌گرم بر لیتر است) (N=54)

متغیر	حداقل	حداکثر	میانگین	واریانس
هدایت الکتریکی (میکروموس بر سانتی‌متر)	۲۹/۰۶	۴۸۱/۲۵	۱۷۰/۰۴۶	۶۰۶۷/۲۰۷
کل مواد محلول	۱۸/۶۰	۳۰۸	۱۰۸/۸۲	۲۴۸۵/۱۲۸
pH	۶/۹۸	۸/۳۰	۷/۶۴۷	۰/۰۶۳
کلسیم	۲۸	۹۱/۲۰	۵۱/۱۵	۳۳۱/۰۷۵
منیزیم	۰/۴۰	۱۷/۳۰	۵/۷۹	۹/۴۵۴
سدیم	۱/۱۰	۱۴/۷۲	۴/۰۴۳	۴/۵۴۰
کلر	۲	۱۲/۰۷	۵/۸۵	۳/۱۷۷
سولفات	۲۹/۰۶	۱۵۴/۰۸	۷۶/۷۵	۵۹۶/۸۲۷
سختی کل	۲۰/۸۴	۴۹۱/۸۹	۱۵۱/۴۴	۹۹۲۳/۵۲۸
نیترات	۶	۱۶/۲۰	۱۰/۸۸	۶/۴۴۱
کدورت	۰/۵۰	۲/۵۰	۱/۲۷	۰/۱۶۸

جدول ۳. همبستگی بین درصد تاج پوشش جنگلی و پارامترهای فیزیکی-شیمیایی آب (واحد به جز pH، میلی‌گرم بر لیتر است)

Na	Mg	Ca	pH	TDS	EC ( $\mu\text{m/cm}$ )	
۰/۰۰۲	-۰/۰۱۲	-۰/۵۸	-۰/۲۲	-۰/۱۹	-۰/۱۹	همبستگی پیرسون
۰/۹۸	۰/۹۳	۰/۰۰۰	۰/۱۰	۰/۱۶	۰/۱۶	سطح معناداری
	Turbidity	NO3	TH	SO4	Cl	
	-۰/۷۲	-۰/۸۸	۰/۳۳	-۰/۲۰	-۰/۲۲	همبستگی پیرسون
	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۱	۰/۱۴	۰/۱۰	سطح معناداری

جدول ۴. پارامترهای فیزیکی و شیمیایی و شاخص کیفیت آب (واحد پارامترها به جز pH و EC، میلی‌گرم بر لیتر است)

پارامتر	مقدار اندازه‌گیری شده $V_{act}$	مقدار استاندارد $V_{St}$	وزن اولیه $W_i$	فاکتور وزنی $W_f$	زیرشاخص $Q_i$	مقدار زیرشاخص وزن دار ( $wf*Q_i$ )
هدایت الکتریکی (میکروموس بر سانتی‌متر)	۱۹۵/۳۱	۴۰۰	۰/۰۰۲۵	۰/۰۱۵۵	۴۸/۸۲۸	۰/۷۵۷
کل مواد جامد	۱۲۵	۱۵۰۰	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۴۱	۸/۳۳۳	۰/۰۳۴۵
اسیدیته	۷/۵	۹	۰/۱۱۱۱	۰/۶۹۰۳	۲۵	۱۷/۲۵۹
کلسیم	۲۹	۳۰۰	۰/۰۰۳۳	۰/۰۲۰۷	۹/۶۶۶	۰/۲۰۰۲
منیزیم	۸/۷۶	۳۰	۰/۰۳۳۳	۰/۲۰۷۱	۲۹/۲۰	۶/۰۴۷۶
سدیم	۳/۷	۲۰۰	۰/۰۰۵۰	۱/۰۳۱۰	۱/۸۵	۰/۰۵۷۴
کلر	۴/۵	۴۰۰	۰/۰۰۲۵	۰/۰۱۵۵	۱/۱۲۵	۰/۰۱۷۴
سولفات	۶۴/۳۲	۴۰۰	۰/۰۰۲۵	۰/۰۱۵۵	۱۶/۰۸	۰/۲۴۹۷
سختی کل	۱۸۹	۵۰۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۱۲۴	۳۷/۸	۰/۴۶۹۷
نیترات	۷/۲	۵۰	۰/۰۲۰۰	۰/۱۲۴۲	۱۴/۴	۱/۷۸۹۴
کدورت	۰/۵	۵	۰/۲۰۰۰	۱/۲۴۲۶	۱۰	۱۲/۴۲۶
مجموع			۰/۱۶۰۹			۳۹/۳۰۸

جدول ۵. نتایج طبقه‌بندی شاخص کیفیت آب در طبقات مختلف درصد تاج پوشش جنگلی در منطقه تنگ‌شول کامفیروز

طبقه تاج پوشش جنگل (درصد)	عدد شاخص کیفیت آب	مقیاس کیفی شاخص کیفیت آب
۰	۷۸/۲۶	بسیار ضعیف
۱۰-۰	۷۴/۵۵	ضعیف
۲۰-۱۰	۶۳/۴۵	ضعیف
۳۰-۲۰	۵۵/۴۱	ضعیف
۴۰-۳۰	۵۰/۹۶	خوب
۵۰-۴۰	۵۰/۴۰	خوب
۵۰ <	۳۸/۵۹	خوب

جدول ۶. توصیف آماری متغیرهای استفاده‌شده در مدل کیفیت آب در حوضه‌های زوجی تنگ‌شول ( $N=54$ )

متغیر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
WQI	۲۸/۹۸	۹۵/۳۱	۶۰/۸	۱۵/۱۴
Area مساحت زیرحوضه (هکتار)	۵۱۱	۴۶۶۶۰	۸۵۳۸/۳۳	۱۳۶۱۴/۲
Permeability نفوذپذیری خاک (میلی‌متر در ساعت)	۴/۶۳	۹/۸	۷/۰۱	۱/۷۹
Intensity شدت بارش (میلی‌متر در ساعت)	۱/۲	۳/۹۱	۲/۹	۰/۹۷
FCC تاج پوشش جنگلی (درصد)	۰	۵۰	۲۱/۱۶	۱۷/۴۴

جدول ۷. متغیرهای ضرایب مؤثر و معنادار در مدل کیفیت آب در منطقه تنگشول کامفیروز

متغیر	ضریب بر آورده شده	t-ratio	P-value
لگاریتم مساحت زیرحوضه (Ln Area)	۰/۱۴	۴/۹	۰/۰۰۰
لگاریتم شدت بارش (Ln intensity)	۰/۶۸	۱/۵۱	۰/۱۳
لگاریتم نفوذپذیری خاک (Ln permeability)	۰/۲۳	۱/۴۴	۰/۱۴
لگاریتم درصد تاج پوشش جنگل (Ln GCC)	-۰/۱۰۸	-۶/۵	۰/۰۰۰
متغیر مجازی مدیریت D1	-۰/۸۹	-۰/۹۹	۰/۳۲
متغیر مجازی سازند زمین‌شناسی D2	۰/۱۸	۳/۲	۰/۰۰۱
متغیر مجازی خاک شنی لومی D3	-۰/۲۷	-۳/۶	۰/۰۰۰
متغیر مجازی خاک رسی لومی D4	-۰/۴۲	-۰/۸۳	۰/۴
مقدار ثابت (Constant)	۲/۶	۴/۹۸	۰/۰۰۰
R <sup>2</sup>		۰/۶۹	

با توجه به جدول ۷ از بین همه متغیرهای وارد شده به مدل، متغیرهای مساحت زیرحوضه، درصد تاج پوشش جنگل و متغیر مجازی خاک شنی لومی با توجه به آماره t بیشتر از دو و سطح معناداری (P-value) در سطح یک درصد معنادار است و متغیر مجازی سازند زمین‌شناسی با توجه به مقدار t که ۳/۲ است در سطح پنج درصد معنادار و سایر متغیرهای نفوذپذیری، مدیریت و خاک لومی رسی به دلیل کم بودن مقدار t (کمتر از دو) و معنادار نبودن ضریب آنها با توجه به P-value، در مدل سازی وارد نشده‌اند.

در نهایت، مدل تولید جنگل در زمینه خدمت حفظ و بهبود کیفیت آب به صورت رابطه ۷ ارائه می‌شود.

$$\text{LnWQI} = 2/6 + 0/14 \text{LnAea} - 0/1 \text{LnGCC} + 0/18 \text{D2} - 0/27 \text{D3} \quad (7)$$

باید توجه داشت که بر اساس طبقه‌بندی مقیاس کیفیت آب، با کاهش عدد شاخص، وضعیت کیفی آب بهبود می‌یابد و به‌عکس. در رابطه ۷ نیز ضریب منفی نشان‌دهنده بهبود و ضریب مثبت نشان‌دهنده تخریب وضعیت کیفیت آب است. به طور مثال، ضریب منفی درصد تاج پوشش جنگل (GCC) نشان می‌دهد با افزایش درصد تاج پوشش، عدد شاخص کیفیت آب کاهش می‌یابد و وضعیت کیفیت آب بهتر می‌شود.

### بحث و نتیجه‌گیری

یکی از خدمات پوشش گیاهی و جنگل‌ها، حفظ و بهبود کیفیت آب است، یعنی آب‌هایی که از اکوسیستم جنگلی

تأمین می‌شود، نسبت به سایر کاربری‌ها، بسیار زلال و شفاف‌تر است و حتی گاهی نیاز به هیچ‌گونه تصفیه‌ای برای آشامیدن انسان ندارد. در دهه‌های اخیر استفاده‌های نادرست از جنگل سبب کاهش سطح، عملکرد و خدمات جنگل‌ها شده است. بنابراین، تلاش در کمی کردن آثار این اکوسیستم‌ها به عنوان نقطه ناشناخته باقی مانده است. در مطالعه حاضر به بررسی شاخص کیفیت آب در جنگل‌های طبیعی بلوط تنگشول در کامفیروز فارس و محاسبه این شاخص بر اساس مهم‌ترین پارامترهای فیزیکی-شیمیایی آب پرداخته شده است. نتایج ایجاد شاخص کیفیت آب نشان می‌دهد درصدهای تاج پوشش مختلف کیفیت‌های مختلفی از آب را ارائه می‌دهند و با افزایش درصد تاج پوشش جنگلی، کیفیت آب افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده می‌شود که درصدهای تاج پوشش از ۱۰ تا ۳۰ درصد در طبقه ضعیف از نظر شاخص کیفی آب برای شرب انسان قرار می‌گیرد، اما طبقه ۳۰-۴۰ درصد و بیشتر از آن کیفیت خوبی دارد و می‌توان با افزایش درصد تاج پوشش جنگلی به حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد در این منطقه، به کیفیتی از آب دست یافت که نیاز به هیچ‌گونه تصفیه ندارد و می‌تواند مستقیم برای مصارف شرب انسانی استفاده شود. شایان توجه است که در زیرحوضه‌های بدون پوشش جنگلی طبقه کیفی آب بسیار ضعیف است و رواناب جاری شده از این مناطق را نمی‌توان بدون تصفیه برای مصارف شرب انسانی استفاده کرد.



یادشده در تطابق با یافته‌های نوری و ملکیان [۳۰] نیز هم‌راستاست، به طوری که سازند یادشده ماهیت تناوب مارن و ماسه‌سنگ دورهٔ نئوژن دارد و به دلیل حضور املاح و ریزدانه‌بودن موجب تخریب کیفیت منابع آب سطحی می‌شود. نوع خاک با بافت شنی لومی نیز در منطقه کیفیت آب را بهتر نشان داده است، زیرا با افزایش محتوای شن خاک از ذرات دارای املاح (رس‌ها) کاسته شده، فاز تبدالی خاک کمتر می‌شود و در نتیجه املاح موجود در خاک‌های شنی کمتر از رسی بوده و کیفیت آب بهتر است. اثر عوامل مؤثر بر کیفیت آب در مدل‌سازی نشان داد با افزایش یک درصد تاج پوشش جنگلی در حوضه‌های زوجی تنگ‌شول، کیفیت آب به میزان ۰/۸ درصد بهبود پیدا می‌کند و این امر تأثیر مثبت پوشش جنگلی را در حفظ و بهبود کیفیت آب به صورت کمی بیان می‌کند. همان‌طور که گفته شد، در جنگل به دلیل وجود لایهٔ لاشبرگی و سیستم ریشه‌ای درختان، آلودگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب، فیلتر شده و با جلوگیری از ورود رسوبات و املاح موجود در رسوبات به داخل آب، سبب تصفیه آب جاری می‌شود.

نتایج همچنین کاهش ۰/۱۴ درصدی کیفیت آب را با افزایش هر یک درصد در مساحت زیرحوضهٔ جنگلی نشان داد، به این دلیل که در زیرحوضه‌های با مساحت بیشتر، جریان آب در زمان بیشتری در زیرحوضه حضور دارد و فرصت برای حل‌شدن مواد مختلف در بطن آب فراهم است و اجازه می‌دهد تا منابع آلاینده افزایش یافته و کیفیت آب کاهش یابد.

نتایج این مطالعه ابزاری کمی برای مدیریت پایدار عرصه‌های جنگلی زاگرس فراهم می‌کند. این عرصه‌ها منبع تأمین ۴۰ درصد از آب‌های سطحی کشور هستند و از جنبهٔ حفاظت آب و خاک اهمیت زیادی دارند. همچنین، با استفاده از نتایج آن می‌توان تغییرات کیفیت آب و تولید یکی از خدمات جنگلی را بر اثر تغییرات تاج پوشش جنگل ناشی از گزینه‌های مختلف مدیریتی احیا، قرق و یا رهاسازی منطقهٔ جنگلی پایش کرد. با استفاده از تحقیقات دیگر می‌توان اثر جنگل را بر پارامترهای بیولوژیک نیز بررسی کرد و همچنین تغییر هزینه‌های تصفیهٔ آب را بر اثر تغییر تاج پوشش جنگلی به دست آورد.

در فرایند مدل‌سازی بررسی هم‌خطی بین متغیرهای مستقل نشان‌دهندهٔ نبود هم‌خطی است. مهم‌ترین دلیل نبود هم‌خطی، ماهیت متغیرهای انتخاب‌شده در آغاز پژوهش است، به طوری که محققان سعی کردند بر پایهٔ مطالعات قبلی از متغیرهای محیطی دارای همبستگی داخلی کمتر استفاده کنند و این امر در چگونگی نتایج بروز کرده است. نتایج بررسی کیفیت آب در جنگل در مطالعهٔ حاضر با نتایج تحقیقات بروگنا و همکارانش [۱۲]، فریمان و همکارانش [۱۰]، ورزنیاک و همکارانش [۶] و اتحادی ابری [۸] هم‌راستا بوده و اثر مثبت و معناداری بر پوشش جنگلی و کیفیت آب به‌دست‌آمده دارد. درضمن، پوشش جنگلی در همهٔ این مطالعات سبب بهبود کیفیت آب شده است. با توجه به اینکه شاخص‌های کیفیت آب در قالب دو دستهٔ فیزیکی و شیمیایی بررسی شده‌اند، پوشش جنگل با کاهش سطح در معرض بارش و رواناب، میزان تولید رسوب و گل‌آلودگی را کاهش می‌دهد و از تخریب کیفیت آب از نظر پارامترهای فیزیکی جلوگیری می‌کند. در نتیجه، با توجه به تأثیر لاشبرگ که به عنوان فیلتر آب شناخته می‌شود و با جذب مواد معلق، بار محلول را نیز کاهش می‌دهد و همچنین کارکرد مواد آلی بیشتر خاک در تاج پوشش‌های مختلف جنگل به‌خصوص در طبقات بالاتر و تماس کمتر آب با خاک، ضمن جذب کاتیون‌های مختلف و جلوگیری از انحلال بیشتر املاح در آب از آلوده‌شدن آب‌ها جلوگیری می‌کنند [۳۲] و از این طریق تاج پوشش‌های بیشتر اثر بهتری بر بهبود کیفیت آب دارند. همچنین، سیستم ریشه‌ای درختان که شامل ترکیب ریشه و قارچ‌های درون‌میکوریز و برون‌میکوریز است، با جذب ازت [۳۳] سبب فیلتراسیون آب می‌شود و از این طریق پارامترهای شیمیایی آب نیز بهبود می‌یابد و کیفیت آب بهتر خواهد شد. با توجه به نتایج پژوهش حاضر نیز بیشترین تغییرات کیفیت آب در طبقات مختلف تاج پوشش، در یون‌های کلسیم، نیترات و کدورت آب بوده است که هر دو گروه از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب را شامل می‌شود.

از دیگر ویژگی‌های تأثیرگذار بر کیفیت آب، جنس سنگ و نوع سازند زمین‌شناسی است که در مطالعهٔ حاضر اثر آن معنادار شناخته شده و اثر متغیر سازند آجاجاری بر کاهش کیفیت رواناب‌ها نشان داده شده است. یافته‌های

## منابع

- [1]. MEA (Millennium Ecosystem Assessment (Program)). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*; Washington. Island. DC, USA, 2005.
- [2]. Melissa M K, Damian C A, Francisco J E. The Value of Forest Conservation for Water Quality Protection, *Forests* 2014; 5:862-884.
- [3]. Hong B, Limburg K E, Erickson J D, Gowdy J M, Nowosielski A A, Polimeni J M, & Stainbrook K M. Connecting the ecological-economic dots in human-dominated watersheds: Models to link socio-economic activities on the landscape to stream ecosystem health. *Landscape and Urban Planning*. 2009; 91(2): 78-87.
- [4]. Dudley N, Stolton S. *Running Pure: The importance of forest protected areas to drinking water Arguments for Protection: World Bank/WWF Alliance for Forest Conservation and Sustainable Use* 2003.
- [5]. Daisy N, Laura N, Carlos O. Forest and water: The Value of native temperature forest in supplying water for human consumption, *Ecological Economics*. 2006; 58: 606-612.
- [6]. Warziniack T, Sham CH, Morgan R, Feferholtz Y. Effect of forest cover on water treatment costs. *American Water Works Association. Rocky Mountain Research Station*. 2016.
- [7]. Fiquepron J, Garcia S, Stanger A. Land use impact on water quality: Valuing forest services in terms of the water supply sector. *Journal of Environmental Management*. 2013;126:113-121.
- [8]. Etehad Abari M. The effect of forest cover induced by harvesting scenarios on runoff quantity, quality and sediment yield in Kheirud Forest. A thesis submitted to the graduate studies office in partial fulfilment of the requirement for the doctor philosophy in forest engineering. University of Tehran. 2017. [Persian].
- [9]. Abildtrup J, Garcia S, Stanger A. The effect of forest land use on the cost of drinking water supply  
A spatial econometric analysis. Paper prepared for presentation at the EAAE 2011 Congress Change and Uncertainty Challenges for Agriculture, Food and Natural Resources. ETH Zurich, Switzerland 2011.
- [10]. Freeman D, Madsen R, Har K. Statistical analysis of drinking water treatment plant costs, course water quality, and land cover characteristics. 2008; Trust for Public Land
- [11]. Ernst C, Gullick R, Nixon, K. Protecting the source e conserving forests to protect water. *American Water Works Association* 2004; 30 (5): 3-7.
- [12]. Brogna D, Michez A, Jacobs S, Dufrière M, Vincke C, Dendonker N. Linking Forest Cover to Water Quality: A Multivariate Analysis of Large Monitoring Datasets. *Water*. 2017; 9:176-193.
- [13]. Ramesh S, Sukumaran N, Murugesan AG, Rajan MP. An innovative approach of drinking water quality index- A case study from Southern Tamil Nadu, India. *Ecological Indicators*. 2010; 10(4):857-68
- [14]. Cude CG. Oregon water quality index a tool for evaluating water quality management effectiveness1. *Journal of American Water Resource Association*. 2001; 37(1): 125-137.
- [15]. Beckman B, Bodis D, Lahermo P, Rapant S, Tarvainen T. Application of groundwater contamination index in Finland and Slovakia. *Environ Geol* 1998; 36: 55-64. Doi: 1007. S002540050320.
- [16]. Brown RM, McClelland N I, Deininger R A, Tozer R G. A water quality index: do we dare? *Water Seage Works*. 1970; 117: 339-343.
- [17]. Canter L W. "Environmental Impact Assessment," 2nd Edition, McGraw-Hill Inc. New York, USA, 1996.
- [18]. Abdul Hameed M. Alobaidy J, Bahram K. Maulood, Abass J. Evaluating Raw and Treated Water Quality of Tigris River within Baghdad by Index Analysis. *J. Water Resource and Protection*, 2010; 2: 629-635.
- [19]. Sener S, Sener E, Davras A. Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). *Science of The Total Environment*. 2017; 584-585: 131-144
- [20]. Wu Z, Wang X, Chen Y, Cai Y, Deng J. Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China. *Science of The Total Environment*. 2017; 612(1): 914-922.
- [21]. Yousefi H, Zahedi S, Niksokhan MH, Modifying the analysis made by water quality index using multi-criteria decision making methods. *Journal of African Earth Sciences*. 2017; 138(1): 309-318.
- [22]. Cosultant engineers of soil and water researchers. Revision of studies and analysis of statistics and information in the paired catchments in Tang-e Shool. [2015]. [Persian].

- [23]. Sheikhi Almanabad Z, Asadzadeh F, Pirkharati H. Application of the DWQI Index for Comprehensive Quality Assessment in Ardebil water table. *Ecohydrology*. 2017; 4(2): 421-436. [Persian].
- [24]. World Health Organization. Guidelines For Drinking Water Quality. Second addendum. Vol. 1, Recommendations. 3rd ed. ISBN 978 92 4 154760 4. 2008; World Health Organization.
- [25]. Institute of Standards and Industrial Research of Iran. Drinking water - Physical and chemical specifications. ISIRI, 1053. 2008; 5th Revision [Persian].
- [26]. Yogendra K, Pouttaiah E T. Determination of water quality Index and Suitability of an Urban Waterbody in Shimoga Town. Karantaka. The 12th World Lake Conference, 2008; 342-346.
- [27]. Chatterji C, Raziuddin M. Determination of water quality index (WQI) of a degraded river in Asanol Industrial area, Raniging, Burdwan, West Bengal. *Nature, Environmental and pollution Technology*. 2002; 1(2):181-189.
- [28]. Kohi Kamali M, Rajabi MA. Determining the Effect of Urban Green Space on Residential Utility Value. *Journal of GIS, RS application in programming*. 2010; 1(1): 23-31.
- [29]. Mahdavi, M. editor. *Applied Hydrology*, 2125. 7<sup>th</sup> Edition. Tehran. University of Tehran. 2011. p.427- 302. [Persian].
- [30]. Noori Z. Malekian A. The Effective Factors on Water Quality of Seimareh and Kashkan Rivers in Ilam and Lorestan Provinces. *Natural Environment. Iranian Natural Resources Journal*. 2015; 69(2): 549-564. [Persian].
- [31]. Zhenyao Sh. Lei Ch. Qian L. Ruimin L. Qian H. Impact of spatial rainfall variability on hydrology and nonpoint source pollution modeling. *Journal of Hydrology*. 2012: 427-437, 205-215.
- [32]. Ahmed L M. Helal A A. Naema A EL. Gamal R. Nahel O. Shaker N O. Helal A A. Influence of some organic ligands on the adsorption of lead by agricultural soil. *Arabian Journal of Chemistry* 2015. Article in Press.
- [33]. Allen M F. Swenson I W. Querejeta J L. Egerton-Warburton L M. Treseder KK. *ECOLOGY OF MYCORRHIZAE: A Conceptual Framework for Complex Interactions Among Plants and Fung*. *Annu. Rev. Phytopathol*. 2003. 41:271-303 .