

استفاده از شاخص‌های مورفومتریک برای شناسایی سرچشمه نمک‌زایی در پلایا (مطالعه موردی: پلایای ایزدخواست، استان فارس)

مریم انصاری - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.
ایرج جباری* - دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.
فرهنگ سرگردی - استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۱۱ تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۰۹/۱۴

چکیده

در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران علاوه بر شوری منابع آب زیرزمینی، بسیاری از رودخانه‌های جاری شور و لب‌شور هستند و زمانی که آب این رودخانه‌های شور وارد حوضه‌های بسته می‌شوند مشکلات مضاعفی را به وجود می‌آورند. به طوری که باعث افزایش شوری منابع آب می‌شوند و این عامل، آغازی جدی برای نمک‌زایی و نهایتاً تخریب منابع ارضی در این گونه مناطق در جهت کویری شدن است. بنابراین شناخت عوامل تأثیرگذار بر کیفیت منابع آبی این مناطق برای حفاظت در جهت کاهش آسیب‌پذیری این منابع، از اهمیت شایانی برخوردار است. در این تحقیق جهت بررسی عوارض ژئومورفولوژیکی در شناسایی سرچشمه‌های شوری منابع آب زیرزمینی در پلایای ایزدخواست، واقع در جنوب استان فارس و ارائه شاخصی مطمئن جهت مدل‌سازی مکانی از مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) استفاده شده است. نتایج نشان داد که از بین ۵ شاخص انتخاب شده (محیط، مساحت، ضریب گراویلیوس، تراکم زهکشی و بافت زهکشی)، شاخص بافت زهکشی نسبت به شاخص‌های دیگر کارایی بهتر و مناسب‌تری داشت به طوری که نتایج مدل GWR با زمین-ریخت‌های منطقه رابطه مستقیمی را نشان داد. همچنین در این مدل بیشترین میزان همبستگی مربوط به پارامتر سدیم، پتاسیم و هدایت الکتریکی با ضریب تعیین (R²) ۰/۹۳، ۰/۹۲ و ۰/۸۷ و کمترین مقدار با ضریب تعیین (R²) ۰/۶۴ مربوط به پارامتر سولفات می‌باشد. در اغلب پارامترهای کیفی بیشترین میزان همبستگی مربوط به غرب حوضه بر منابع آبی می‌باشد همچنین مقاومت کم و فرسایش رسوبات تبخیری نیز بر این موضوع دامن زده است. همچنین در این تحقیق سازندهای مخرب در مرکز، شمال، شمال-شرق و شمال‌غرب منطقه به صورت تپه‌ماهور و بدلدن رخنمون دارند. که نقشه بافت زهکشی اشکال بدلدنی را به صورت دامنه‌هایی که میزان بافت زهکشی بالایی دارند نشان می‌دهد. علاوه بر این با استفاده از شاخص بافت زهکشی به طور کامل مقاومت لیتولوژی‌های مختلف در زیرحوضه‌ها مشخص شد. که نتایج نشان می‌دهد در نبود نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس قابل قبول می‌توان جهت تشخیص نوع مقاومت سنگ‌ها از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس‌های موجود و حتی برای تعیین جنس لیتولوژی‌ها با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی بزرگ مقیاس تر با استخراج شبکه زهکشی به عنوان زمین‌ریخت از شاخص بافت زهکشی استفاده نمود.

واژگان کلیدی: شاخص‌های مورفومتریک، بافت زهکشی، GWR، پلایای ایزدخواست

مقدمه

در کشور ما شرایط اقلیمی به گونه‌ای است که در ۶۵ درصد آن متوسط بارندگی سالیانه کمتر از ۱۳۰ میلی‌متر است (جعفری و طولی، ۱۳۹۲: ۱۳۹). لذا از دیرباز با کمبود آب مواجه بوده است. به طوری که در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشورمان برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی به دلیل کمبود بارش موجب افت سطح، کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی و به دنبال آن، شور شدن ذخایر آب زیرزمینی و از بین رفتن تعادل بین آب شور و شیرین و پیشروی آب شور به سفره‌های زیرزمینی شیرین شده است. همچنین علاوه بر شوری منابع آب زیرزمینی، بسیاری از رودخانه‌های جاری در این مناطق شور و لب‌شور هستند (رنجبر و پیرسته انوشه، ۱۳۹۴: ۱۶۶) و زمانی که آب این رودخانه‌های شور وارد حوضه‌های بسته می‌شوند مشکلات مضاعفی را به وجود می‌آورند. به طوری که باعث افزایش شوری منابع آب می‌شوند و این عامل، آغازی جدی برای نمک‌زایی و نهایتاً تخریب منابع ارضی در این گونه مناطق در جهت کویری شدن است. بنابراین شناخت عوامل تأثیرگذار بر کیفیت منابع آبی این مناطق برای حفاظت در جهت کاهش آسیب‌پذیری این منابع، از اهمیت شایانی برخوردار است.

بر اساس نظریهٔ درور^۱ (۱۹۸۸) مهم‌ترین عوامل محیطی در تغییر کیفیت آب‌های زیرزمینی، نوع و جنس سنگ، ارتفاع از سطح دریا، آب و هوا، پوشش گیاهی و زمان است. از میان عوامل ذکر شده عامل نوع و جنس سنگ‌ها در تغییر کیفیت آب‌های زیرزمینی اهمیت بیشتری را دارا می‌باشد (جهید، ۱۳۷۳: ۱). در واقع در بسیاری از نقاط، در مسیر عبور روان‌آب‌ها و رودخانه‌ها، رسوبات تبخیری محتوی گچ و نمک وجود دارند که باعث می‌شوند روان‌آب‌هایی که بر روی آن‌ها از نقاط بالادست جریان دارند کیفیت نامناسبی پیدا کنند.

از سویی دیگر بر اثر دخالت فرآیندها و عوامل متفاوت بر روی لیتولوژی‌های مختلف، زمین‌ریخت‌های خاصی در سطح زمین پدید می‌آیند که این فرم‌ها پس از شناسایی، برای نشان دادن مناطق حساس چشم انداز، مفید هستند و می‌توانند بیشتر مورد بررسی قرار گیرند. مزیت استفاده از فرم‌های زمینی برای تشخیص حساسیت این است که فرم‌های زمین را می‌توان بدون انجام جزئیات دقیق به راحتی مشاهده کرد. در واقع ویژگی‌های زمین‌شناسی و الگوهای گذشته از هوازدگی باعث می‌شود برخی از زمین‌ریخت‌ها از نظر هیدرولوژیکی حساس‌تر و نسبت به بقیه، حساس‌تر به شوری باشند. زمین‌ریخت‌ها به صورت الگوهایی در مناطق رخ می‌دهند و به راحتی در یک منطقه قابل مقایسه هستند که ویژگی‌های آن‌ها برای تعیین نوع استراتژی‌های مدیریتی در هر منطقه نیز موثر می‌باشند (راهنمای مدیریت شوری^۲، ۲۰۱۹: ۳۹). در حقیقت شکل زمین ممکن است سرنخی از شرایط آب سطح و زیر سطح زمین باشد و یکپارچه سازی داده‌های هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی، نیاز منطقه را برای بررسی مفصل با روش پیچیده به حداقل می‌رساند (ناگارال^۳، ۲۰۱۷: ۱).

پیشینه تحقیق

در این زمینه برخی از صاحب‌نظران، از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی خاصی مانند شیب، ارتفاعات و طاق‌دیس‌ها (شجری و رئیس، ۲۰۰۶؛ اندرسون و نیبرگ^۴، ۲۰۰۹؛ لکامته^۵ و همکاران، ۲۰۰۹؛ لوری‌نیا و اصغری‌مقدم، ۱۳۸۷؛ اسدیان و خلفی، ۱۳۸۹؛ زنگنه‌اسدی و همکاران، ۱۳۹۱؛ بهرامی و همکاران، ۱۳۹۲) برای شناسایی سریع مخازن آب زیرزمینی استفاده کرده‌اند. برخی از آن‌ها نیز شاخص‌هایی مانند پوشش خاک یا سنگ بستر (یانگ^۶ و همکاران، ۲۰۰۵؛ وارانکا^۷ و همکاران،

1. Drever

2. Salinity management handbook

3. Nagarale

4. Andersson and Nyberg

5. Lecomte

6. Young

7. Varanka

۲۰۱۵) یا همه موارد ذکر شده را در یک محیط چند متغیره مورد بررسی قرار دادند (اسلیوا و ویلیامز^۱، ۲۰۰۱؛ وارانکا و لیوتو^۲، ۲۰۱۲) اما برخی از آن‌ها با استفاده از زمین‌ریخت‌های خاصی مانند دشت‌های سیلابی و مخروط افکنه‌ها (چوپرا و شرما^۳، ۱۹۹۳؛ فردوسیپان و همکاران، ۲۰۰۲؛ الوا^۴، ۲۰۰۶؛ هالدر^۵ و همکاران، ۲۰۱۱؛ ورما و مخرجی^۶، ۲۰۱۶) به شناسایی کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی پرداخته‌اند.

برای ارائه چنین شاخص‌هایی جهت شناسایی و بررسی منابع آب زیرزمینی، روش‌های گوناگونی دنبال می‌شود. یکی از این روش‌ها، روش توصیفی و تحلیلی می‌باشد که جوانی و جباری (۱۳۸۸) بر اساس آن توانستند بین اشکال و فرایندهای زمین ریخت شناسی دشت اهر و منابع آب زیرزمینی آن رابطه‌ای برقرار کنند. نتیجه مطالعه آن‌ها نشان داد که دشت سیلابی در امتداد رودخانه اهر چای از نظر آب زیرزمینی آن رابطه‌ای غنی می‌باشد. ولی در این راستا بسیاری از محققان تلاش کرده‌اند به صورت تحلیل‌های کمی به تولید شاخص بپردازند. استفاده از مدل‌سازی‌های کمی و ریاضی یکی از این فنون می‌باشد که محققانی مانند تاپا^۷ و همکاران (۲۰۰۸) و رجاونی^۸ و همکاران (۲۰۱۶) براساس آن توانستند مناطقی با پتانسیل متفاوت منابع آب زیرزمینی در دشت‌های سیرمور و نالگوندا در هند جهت مدیریت، شناسایی کنند. استفاده از شاخص‌های مورفومتری و خصوصیات فیزیکی حوضه آبریز نیز از فنونی است که توسط محققان در سطحی وسیع به کار برده شده است (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۲؛ نیری و زندی، ۲۰۱۸) بعنوان مثال آلمادا^۹ و همکاران (۲۰۱۹) از خصوصیات فیزیکی حوضه مانند نسبت دایره‌ای، طول آبراهه اصلی، تراکم زهکشی و بافت زهکشی در رابطه با شوری منابع آبی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که شیب حوضه و طول آبراهه از مهم‌ترین شاخص‌ها، جهت تعیین کیفیت آب در جنوب شرقی آمازونیا در برزیل می‌باشد. همچنین تحلیل‌های فضایی که بر اساس ترکیب لایه‌های مختلف انجام می‌گیرد شاید مناسب‌ترین روش برای نواحی باشد که در آن داده‌های کافی از مشاهدات میدانی وجود نداشته باشد تحقیق اسدیان و خلفی (۱۳۸۹) نمونه‌ای از این نوع تحلیل فضایی می‌باشد که با استفاده از لایه‌های مختلف اطلاعاتی از جمله عوامل ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی، توپوگرافی و نمونه‌های آب صورت گرفته است که در آن مشخص شد که مناطق کوهستانی ارتفاعات شمالی دشت، دشت‌های سیلابی، پادگانه‌های آبرفتی و مخروط‌افکنه‌ها جزء شاخص‌هایی هستند که براساس آن‌ها می‌توان کمیت و کیفیت منابع آب زیر زمینی دشت سهرین را مشخص نمود.

علاوه بر فنون ذکر شده بعضی از محققین تلاش کرده‌اند با تحلیل‌های کمی به روش‌های آماری به تولید شاخص بپردازند که به طور معمول داده‌های کمی خام را با استفاده از مدل‌های ریاضی، فرمول و تکنیک‌ها برای استخراج اطلاعات و تولید خروجی معنی‌دار پردازش می‌کند (زنگنه اسدی و همکاران، ۱۳۹۱؛ وارانکا و همکاران، ۲۰۱۵؛ کاماردین^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۹؛ ماینالی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۹). از بین روش‌های آماری، رگرسیون‌ها متداول‌ترین روش برای درک رابطه بین کیفیت آب و خصوصیات حوضه آبریز معرفی شده است (چانگ^{۱۲}، ۲۰۰۸؛ ژو^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۲؛ شی^{۱۴} و همکاران،

1 . Sliva and Williams

2 . Luoto

3 . Chopra and Sharma

4 . Elewa

5 . Haldar

6 . Verma and Mukherjee

7 . Thapa

8 . Rajaveni

9 . Almada

10 . Kamarudin

11 . Mainali

12 . Chang

13 . Zhou

14 . Shi

۲۰۱۶؛ ماینالی و همکاران، ۲۰۱۹) اما از آنجایی که تعامل بین آبهای زیرزمینی و عوامل و توپوگرافی سطحی، مطالعات مکانی است و مکان یا عامل جغرافیایی می‌تواند با چند متغیر، یک پدیده را تحت تأثیر قرار دهد مدل جغرافیایی اهمیت بیشتری نسبت به مدل معمولی دارد (مولیادی^۱ و همکاران، ۲۰۲۰: ۲).

از سویی دیگر با توجه به این که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بخشی از شوری، از ویژگی‌های لیتولوژیک سرچشمه می‌گیرد (اوکونن و کلوو^۲، ۲۰۱۲: ۱۲۱؛ رحمتی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۹؛ تیموری و اسدی نلیوان، ۱۳۹۹: ۱۰۴) و در اکثر پژوهش‌هایی که انجام می‌گیرد این اطلاعات را معمولاً در مقیاس حوضه آبریز از نقشه‌های زمین شناسی استخراج می‌کنند در حالی که نقشه‌های زمین‌شناسی موجود به دلیل مقیاس کوچکی که دارند، اطلاعات مربوط به مرزهای سازندهای زمین شناسی را به اندازه کافی دقیق نشان نمی‌دهند و نمی‌توانند نقاط حساس به شوری را مشخص کنند چون هر سازند ممکن است از یک یا چند لایه رسوبی تشکیل شده باشند (خجسته، ۱۳۹۰: ۱۳) بنابراین استفاده از روش‌های بالا برای تعیین موقعیت مکانی تغییر کیفیت آب مخصوصاً در حوضه‌های بزرگ و فاقد داده کار بسیار دشواری خواهد بود. در حالی که اتفاقاً این شناخت در بیشتر نواحی کوهستانی مانند داخل چاله‌های بسته یا نیمه‌باز زاگرس نیمه خشک و کم آب برای تعیین سرچشمه‌های شوری آب‌ها فوق‌العاده ارزشمند است و عدم شناخت آن قطعاً برنامه‌ریزی‌های کاربردی و آمایش سرزمین را با مشکل همراه خواهد ساخت.

پس با توجه به این که ویژگی‌های لیتولوژیک در ارتباط با زمین‌ریخت‌هایی هستند که در سطح زمین تولید می‌شوند، شناسایی شاخص مطمئنی که بتواند ویژگی‌های زمین‌ریخت‌ها را به صورت کمی درآورد برای نشان دادن نقاط حساس به شوری و فرسایش می‌تواند مفید واقع شود (راهنمای مدیریت شوری، ۲۰۱۹: ۳۹-۴۲). به طوری که به راحتی بتوان بر اساس این شاخص، زمین‌ریخت‌ها را در یک منطقه شناسایی و محدوده تخریب کیفیت منابع آب را مشخص نمود. از این رو نیاز به تجزیه و تحلیل‌های دیگری احساس می‌شود که با وجود این مشکلات بتواند با نتایج قابل قبول‌تری، تغییرات فضایی شوری و سرچشمه‌های شوری این نواحی را مشخص سازد.

پس با توجه به موارد ذکر شده در مناطق با داده‌های کم، استفاده از مدلی که با تحلیل‌های رگرسیونی و با توجه به شاخص مورفومتریکی مطمئن، تغییرات فضایی پارامترهای کیفی آب را تعیین کند بسیار ارزشمند خواهد بود. به طوری که در سال‌های اخیر استفاده از تکنیکی نسبتاً ساده، اما قدرتمند و مؤثر برای بررسی روابط متغیرهای مکانی، به نام رگرسیون جغرافیایی وزنی^۳ (GWR) برای اهداف مختلف به خصوص بررسی کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی به کار گرفته شده است. به طور مثال در مطالعه‌ای که شرستا و لو (۲۰۱۷) جهت بررسی آب زیرزمینی آلوده به نیترات در دره مرکزی کالیفرنیا با مدل GWR انجام دادند متغیرهای بارش و ارتفاع را از شاخص‌های مؤثر جهت تعیین میزان آلودگی معرفی کردند. همچنین مولیادی و همکارانش (۲۰۲۰) در تحقیقی که بر روی کیفیت منابع آب زیرزمینی و عوامل توپوگرافیک در باندونگ اندونزی با روش GWR انجام دادند توپوگرافی سطحی را به عنوان یک شاخص مؤثر با تأثیر فضایی قابل توجهی در سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه معرفی کردند که تحقیقات سان و همکارانش (۲۰۱۴) نیز نتایج مشابهی را نشان می‌دهد.

بنابراین با توجه به این که اگر مدل تعامل از اعتبار و تنوع برخوردار باشد، روش فضایی برای درک تعامل بین آب‌های زیرزمینی و شرایط محیطی قادر است مکانیسم بهتری از فرآیند هیدرولوژیکی محلی را نشان دهد (مولیادی و همکاران، ۲۰۲۰: ۶)، و با توجه به این که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تغییرات فضایی پارامترهای کیفی آب قابل توجه است؛ جهت مدیریت منابع آب، استفاده از شاخص‌های مورفومتریک در شناسایی سرچشمه‌های شوری منابع آب زیرزمینی، به همراه یک مدل کارا و قدرتمند می‌تواند بسیار مفید واقع شود. بنابراین در این تحقیق سعی می‌شود با انتخاب حوضه ایزدخواست

¹ . Mulyadi

² - Okkonen & Klove

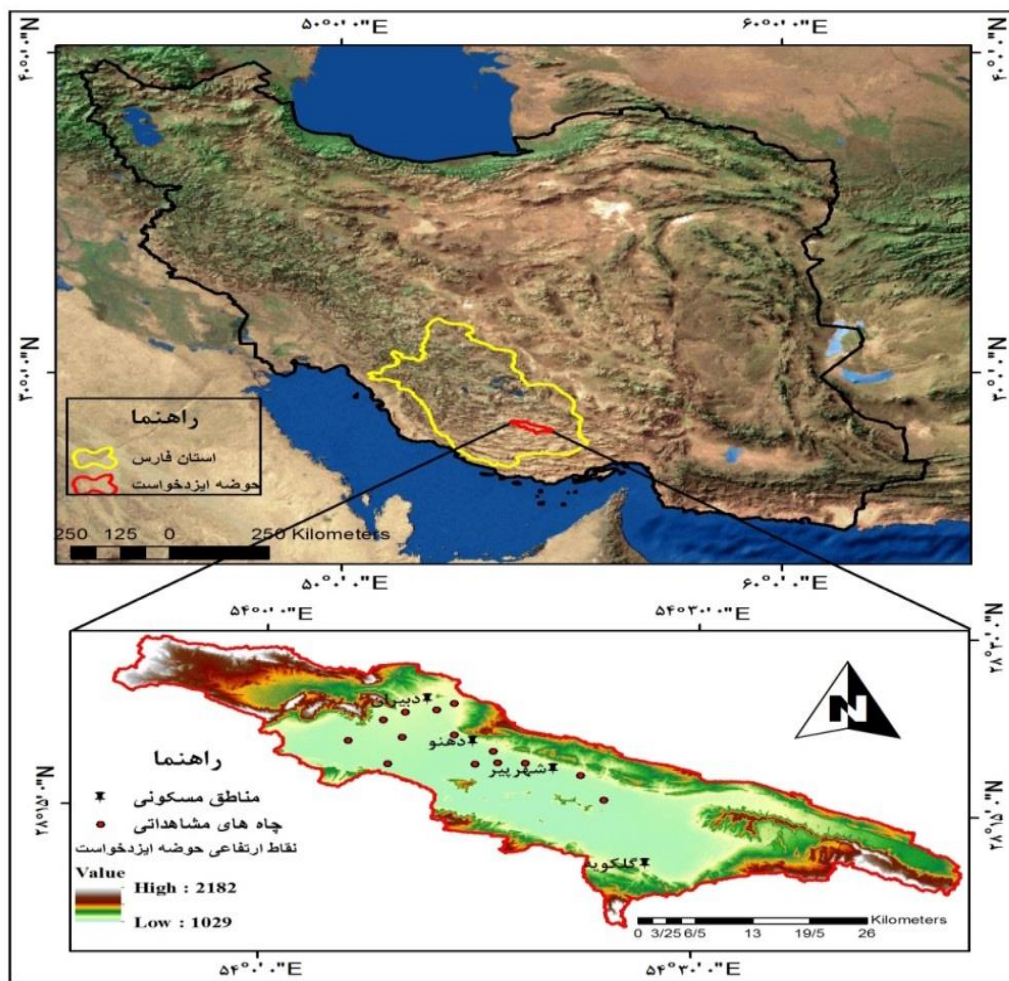
³ - geographically weighted regression

به‌عنوان نمونه‌ای از حوضه‌های داخلی زاگرس که دارای منابع آبی خوب ولی شور می‌باشد، کارایی شاخص‌های مورفومتریکی با استفاده از مدل GWR برای تعیین سرچشمه‌های آلودگی این آب‌ها، یا به‌عبارتی دیگر تعیین نواحی که بیشترین تأثیر را از سازند خاصی می‌پذیرند، سنجیده و اثرات زمین‌شناسی بر توزیع‌های مکانی شوری منابع آب‌های زیرزمینی بررسی شود.

روش تحقیق

موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز ایزدخواست با مختصات $29^{\circ} 49' 53''$ تا $28^{\circ} 48' 54''$ طول شرقی و $28^{\circ} 06' 52''$ تا $29^{\circ} 20' 28''$ عرض شمالی یکی از کفه‌های بسته حوضه آبریز رودخانه مند واقع در استان فارس می‌باشد (شکل ۱). مساحت این حوضه $1371/3$ کیلومتر مربع است که ارتفاعات $879/6$ و دشت $491/7$ کیلومتر مربع از کل مساحت حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. حداکثر ارتفاع در حوضه 2182 و حداقل ارتفاع 1029 متر می‌باشد. این حوضه دارای میانگین بارش سالانه $222/1$ میلی‌متر، میانگین سالانه دما $19/5$ درجه و متوسط تبخیر سالانه از تشتک $2955/9$ میلی‌متر می‌باشد. از نظر هیدرولوژی در این حوضه رودخانه دائمی وجود نداشته و کلیه جریان‌ها موقت و فصلی می‌باشند که تمامی جریان‌های سطحی منطقه به‌صورت همگرا از حاشیه به سمت مرکز دشت جریان یافته و در نهایت در مرکز و غرب دشت تجمع می‌یابند. در مرکز دشت آب‌های راکد پس از تبخیر، اراضی شور و غیرقابل استفاده را نمایان می‌سازند. عمده‌ترین مسیل‌های منطقه مسیل خشک آنگبینه واقع در غرب روستای دوبران، مسیل خشک چاه زبر و مسیل خشک گلکویه (گلکان) هستند (سند توسعه بلند مدت شهرستان زرین دشت، جلد اول). این جریان‌ها بر روی سازندهای مقاوم‌تر مانند آسماری جهرم که دارای شکستگی‌ها و درز و شکاف فراوان هستند بستر خود را به شکل دره‌های ژرف V مانند تبدیل ساخته‌اند اما بر روی سازندهای سست‌تری مانند آغاچاری دارای بستری پهن هستند و اغلب آن‌ها پس از ورود به دشت بستر مشخصی ندارند.



شکل ۱: موقعیت حوضه آبریز ایزدخواست

داده‌ها و روش تحقیق

در این تحقیق جهت بررسی عوارض ژئومورفولوژیکی در شناسایی سرچشمه‌های شوری منابع آب زیرزمینی در پلایای ایزدخواست و ارائه شاخصی مطمئن جهت مدل‌سازی مکانی از مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) استفاده شده است. این روش بر مبنای پردازش اطلاعات هیدرولوژی، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی می‌باشد. پارامترهای مورد نیاز به‌عنوان ورودی‌های مدل از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ برگه‌های زرین‌دشت، چهارم و بزنجان سازمان زمین‌شناسی جهت استخراج داده‌های زمین‌شناسی، نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ مربوط به سازمان نقشه‌برداری کشور و DEM ۱۲/۵ متر جهت استخراج شبکه زهکشی و داده‌های چاه‌های مشاهداتی اخذ شده از سازمان سهامی آب منطقه‌ای استان فارس استفاده شده است.

ابتدا برای شناسایی سرچشمه‌های شوری باید حساس‌ترین مناطق به فرسایش شناسایی می‌شدند پس برای نیل به هدف، شبکه زهکشی حوضه به‌عنوان زمین‌ریخت، از DEM ۱۲/۵ متر منطقه استخراج شد. سپس جهت بررسی تفاوت زمین‌ریخت‌ها در سازندهای مختلف منطقه، خصوصیات هیدروگرافی و فیزیوگرافی حوضه بررسی شدند که برای بررسی بهتر این شاخص‌ها با استفاده از DEM ۱۲/۵ متر در محیط نرم‌افزار IDRISI TerrSet 2020، منطقه به ۵۲۲ زیرحوضه تقسیم شد (شکل ۲). اما برای شاخص‌های مورد نظر نتیجه قابل قبولی را در برداشت بنابراین برای ارائه نتایج بهتر از

نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ منطقه و Google Earth جهت ارزیابی میزان دقت، شبکه زهکشی استخراج و برای محاسبه شاخص‌ها در ۵۲۲ زیرحوضه آماده شدند.

سپس لایه زیرحوضه‌ها بر روی لایه زمین‌شناسی منطقه قرار گرفت و براساس سازندهای موجود در منطقه برش داده شدند و برای هر پولیگون مساحت، محیط، ضریب فشردگی^۱، تراکم زهکشی^۲ و بافت زهکشی^۳ مورد ارزیابی قرار گرفت. شاخص‌های مورد نظر با استفاده از معادلات زیر و DEM ۱۲/۵ متر در محیط نرم‌افزار Arc GIS محاسبه شدند.

$$CC = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{معادله (۱)}$$

ضریب فشردگی که به نام ضریب گراویلوس^۴ نیز نامیده می‌شود که در آن P محیط حوضه و A مساحت حوضه (km²) است. ضریب فشردگی، شکل حوضه را به شکل یک دایره از همان منطقه مرتبط می‌کند. مقادیر نزدیک به یک (۱) حوضه‌های دایره‌ای را نشان می‌دهد، در حالی که مقادیر بزرگ‌تر اشکال کشیده را نشان می‌دهد (آلمادا و همکاران، ۲۰۱۹: ۳).

$$Dd = \frac{\sum Li}{A} \quad \text{معادله (۲)}$$

تراکم زهکشی (Dd)، نسبت طول آبراهه‌ها به مساحت یک حوضه می‌باشد (توکر^۵ و همکاران، ۲۰۰۱: ۱۸۷) که در آن Li طول همه آبراهه‌های حوضه به کیلومتر و A مساحت منطقه به کیلومتر مربع می‌باشد.

$$Dt = Nu/P \quad \text{معادله (۳)}$$

بافت زهکشی (Dt) یک مفهوم اساسی در ژئومورفولوژی است که در آن Nu تعداد کل آبراهه‌های حوضه آبریز و P محیط حوضه آبریز می‌باشد (هورتن، ۱۹۴۵). این شاخص به فاصله نسبی خطوط زهکشی اشاره دارد که به لیتولوژی زیرین، ظرفیت نفوذ و جهت پستی و بلندی زمین وابسته است (رای^۶ و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۶).

1. Compactness coefficient

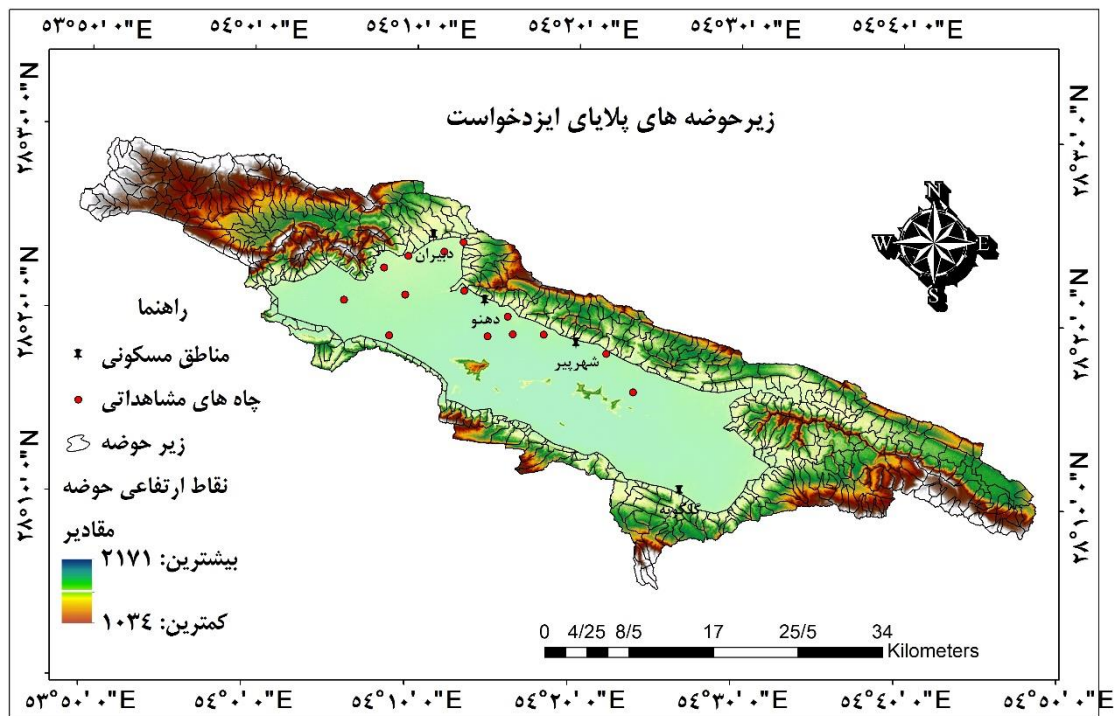
2. Drainage density

3. Drainage Texture

4. Gravelius

5. Tucker

6. Rai



شکل ۲: زیرحوضه‌های حوضه آبریز ایزدخواست

در مرحله بعد جهت انتخاب بهترین شاخص با در نظر گرفتن میزان مقاومت سازندها، هر کدام از آن‌ها با استفاده از نمودار خوشه‌ای طبقه‌بندی و مناسب‌ترین طبقه‌بندی به‌عنوان بهترین شاخص انتخاب شد. که براساس نمودار خوشه‌ای و تصاویر Google Earth، شاخص بافت و تراکم زهکشی به‌عنوان بهترین شاخص‌ها جهت تحلیل زمین‌ریخت‌ها انتخاب شدند (شکل ۵). اما از آنجایی که در زیرحوضه‌های یک حوضه زهکشی بزرگ ممکن است شاخه‌های کوچک، انگشت‌شمار ولی دارای یک آبراهه اصلی طولانی باشند و این اثر ممکن است با افزایش مقدار شاخص تراکم زهکشی پوشانده شود (اسمیت، ۱۹۵۰: ۶۵۶)، سازند بختیاری به‌عنوان شاخص صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت چون سازند بختیاری با کنگلومرای ستبر لایه با سیمان آهکی و الگوی زهکشی دندردیتی بیشتری میزان و حجم آبراهه‌ها را به‌خود اختصاص داده است (شکل ۳).

با توجه به این موضوع که اندازه قله سنگ‌های پدید آورنده کنگلومرا در این منطقه از تخته سنگ، قله سنگ، ریگ، شن و ماسه متغیر است برای تأیید و شناسایی سازند مورد نظر با استفاده از نقشه زمین‌شناسی منطقه، موقعیت این سازند بر روی Google Earth مشخص شد و با بازدیدهای میدانی میزان سستی سازند تأیید شد.

براین اساس و با توجه به نتایج بازدیدهای میدانی (شکل ۴) و نمودار خوشه‌ای (شکل ۵) شاخص بافت زهکشی با مناسب‌ترین طبقه‌بندی به‌عنوان بهترین شاخص انتخاب شد. زیرا با توجه به نمودار مربوط به بافت زهکشی سازند بختیاری به‌عنوان سست‌ترین سازند در یک خوشه و سازندهای دیگر مانند آغاچاری، لهبری، میشان و هرمز با تفاوت کمتری در خوشه دیگر قرار دارند.

در مرحله بعد جهت بررسی میزان تأثیرات سازندها در گسترش شوری و تغییرات فضایی آن‌ها برای شناسایی نقاط حساس، روابط میان پارامترهای کیفی آب و شاخص مورد نظر در هر سازند، از روش‌های رگرسیونی چند متغیره OLS و GWR استفاده شد.

در تجزیه و تحلیل این مدل، داده‌های کیفی آب مربوط به ۱۴ حلقه چاه مشاهداتی در سال ۱۳۸۹ (به دلیل کامل‌تر بودن داده‌ها) می‌باشد (جدول ۱). که از بین داده‌های ۱۶ پارامتر کیفی، پس از بررسی ارتباط بین پارامترها با هم، پارامترهای کل مواد جامد محلول (TDS)، نسبت جذب سدیم (SAR)، کلر (CL)، سدیم (Na)، پتاسیم (K) و سولفات (SO₄) که بیشترین همبستگی با هدایت الکتریکی (EC) داشتند به عنوان متغیر وابسته، جهت تجزیه و تحلیل آماری انتخاب شدند. همچنین جهت نتایج بهتر مدل‌سازی به دلیل کم بودن داده‌ها، برای هر حلقه چاه، پولیگون تیسن ترسیم شد و مقادیر شاخص بافت زهکشی در سازندهای موجود در هر یک از پولیگون‌ها به عنوان متغیر مستقل استخراج و به جدول توصیفی شیپ فایل مورد نظر، جهت مدل‌سازی در محیط Arc GIS اضافه شدند و در مراحل زیر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند:

ابتدا جهت وارد کردن بهترین مدل برای اجراسازی در روش GWR، متغیرهای مستقل و وابسته به روش آزمون و خطا در روش OLS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند تا بهترین مدل با رابطه معناداری بین متغیرها یعنی P-value کمتر از ۰/۰۵، R² بیشتر و ضریب AICc کمتر انتخاب شود. روش حداقل مربعات معمولی یا OLS به منزله ساده‌ترین و مرسوم‌ترین روش در بین روش‌های رگرسیون چند متغیره خطی است. مبنای روش OLS این است که ضرایب مدل به گونه‌ای برآورد شوند که مجموع مربعات خطای بین مقادیر برآورد شده و مقادیر مشاهده‌ای برای متغیر وابسته باید حداقل شود (حسین‌خواه و همکاران، ۲۰۱۶: ۳۵۹). مدل OLS براساس معادله ۴ به دست می‌آید:

$$y = \beta_0 + \sum_{k=1}^p \beta_k x_k + \varepsilon \quad \text{معادله (۴)}$$

که y متغیر وابسته را نشان می‌دهد، $\beta_i x_i$ ضریب و متغیر مستقل، ε اصطلاح خطا یا انحراف مدل و p تعداد متغیرهای مستقل می‌باشند. ضرایب بتا در واقع ضرایب یا پارامترهای مدل رگرسیونی‌اند که مقادیر آن‌ها در کل منطقه ثابت است. در مرحله بعد پس از انتخاب بهترین مدل، برای ارزیابی خودهمبستگی مکانی باقیمانده‌های مدل OLS از شاخص موران (معادله ۵) استفاده شد که درجه خوشه‌بندی یا پراکندگی باقیمانده‌های استاندارد را مورد ارزیابی قرار دهد. از باقیمانده‌ها برای آزمایش دقت مدل در پیش بینی شرایط محلی با اجرای آزمایشی مکانی همبستگی مکانی استفاده می‌شود (پرات و چانگا^۱، ۲۰۱۲: ۵۲).

شاخص موران به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad \text{معادله (۵)}$$

که در آن، x_i و x_j کیفیت آب به ترتیب در ایستگاه i و ایستگاه j اشاره می‌باشد. X میانگین کلی کیفیت آب و W_{ij} ماتریس وزن است. مانند ضریب همبستگی، اگر x_i و x_j بالاتر یا کمتر از میانگین قرار بگیرند، شاخص موران مثبت خواهد بود، در حالی که اگر یک ایستگاه بالاتر از میانگین و ایستگاه‌های مجاور آن کمتر از میانگین باشد، شاخص به صورت منفی ظاهر خواهد شد (پرات و چانگا^۱، ۲۰۱۲: ۵۲).

در مرحله آخر جهت دستیابی به دقت بالاتر در تحلیل روابط مکانی، متغیرهای انتخاب شده از مدل OLS وارد مدل GWR شدند. در واقع GWR تغییرات محلی را با توزین بیشتر مشاهدات نزدیکتر، نسبت به موارد دورتر ثبت می‌کند. معادله GWR از لحاظ ترکیب مختصات هر مکان متفاوت است (معادله ۶).

^۱ . Pratt and Changa

$$\gamma_j = \beta_0(u_j, v_j) + \sum_{i=1}^p \beta_i(u_j, v_j)x_{ij} + \varepsilon_j \quad \text{معادله (۶)}$$

که در آن γ_j نشان دهنده مکان است، مختصات (u_j, v_j) برای هر مکان گرفته شده و در متغیر مستقل محلی X_{ij} ضرب می‌شود. مدل با استفاده از یک تابع تجزیه فاصله نمایی کالیبره می‌شود (معادله ۷).

$$W_{ij} = \exp \frac{-d_{ij}^2}{b^2} \quad \text{معادله (۷)}$$

وزن سایت j به عنوان عامل تأثیرگذار بر سایت i می‌باشد، W_{ij} با استفاده از فاصله (d) بین سایت‌های i و j محاسبه می‌شود و b به عنوان پهنای باند هسته عمل می‌کند. وقتی هسته کوچکتر از فاصله باشد وزن به سرعت کاهش می‌یابد (پرات و چانگا، ۲۰۱۲: ۵۱).

خروجی‌های GWR شامل باقیمانده‌های محلی و نتایج R^2 یا ضریب تعیین می‌باشد که R^2 معیاری برای مشخص کردن کارایی‌های مدل‌های رگرسیونی چند متغیره می‌باشد. این ضریب میزان درصد واریانس متغیر وابسته که توسط متغیرهای مستقل تبیین می‌شود را بیان می‌کند. به عبارت دیگر با محاسبه این ضریب می‌توان گفت که چند درصد از کل واریانس Y توسط متغیرهای مستقل X بیان می‌شود. مقدار عددی این ضریب از ۱ تا -۱ تغییر می‌کند. مقدار صفر یعنی استفاده از متغیرهای مستقل در برآورد متغیر وابسته هیچ نقشی ندارد و مقدار ۱ و -۱ بیانگر تخمین ۱۰۰ درصد واریانس متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل می‌باشد. اگر انحراف معیار متغیرهای X و Y به ترتیب به صورت S_x و S_y باشد و کواریانس آن‌ها با علامت Cov_{yx} نشان داده شود، ضریب تعیین از رابطه زیر قابل محاسبه است (عرفانیان و همکاران، ۲۰۱۳: ۳۷):

$$R^2 = \frac{S_{xy}^2}{S_{xx} S_{yy}} \quad \text{معادله (۸)}$$

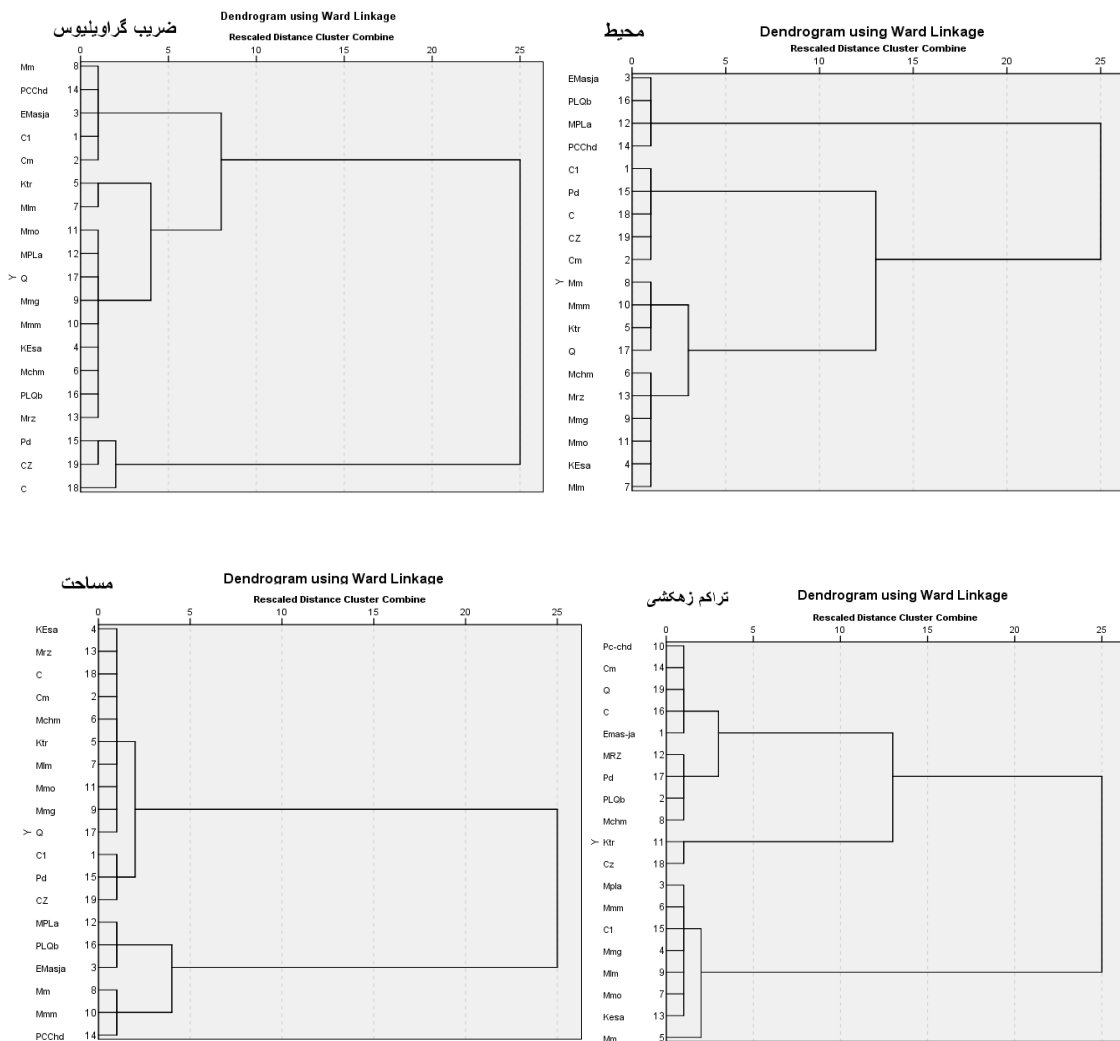
در نهایت با توجه به روابط معنی‌دار پارامترهای کیفی آب با سازندهای تعیین شده در مدل OLS و با توجه به میزان همبستگی پارامترهای کیفی آب با شاخص بافت زهکشی در هر پولیگون در مدل GWR، نقاط تخریب کیفیت منابع آب و مناطق تولید کننده شوری جهت مدیریت مشخص شدند که مراحل تحقیق در شکل ۶ نشان داده شده است.

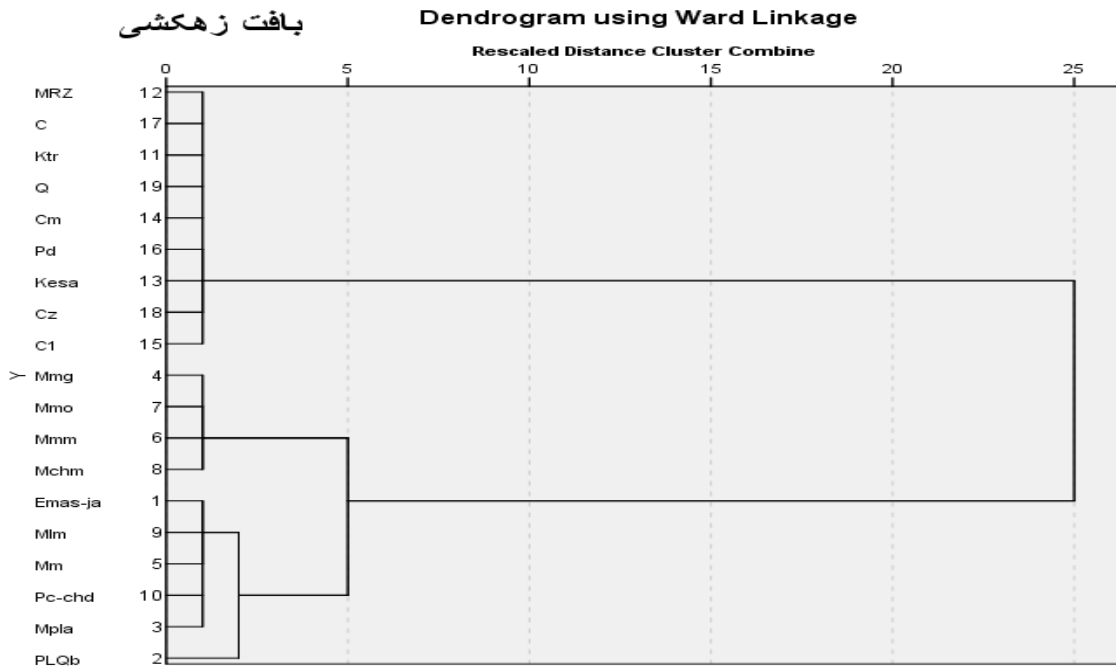


شکل ۳: سازند بختیاری در تصویر Google Earth در حوضه ایزدخواست

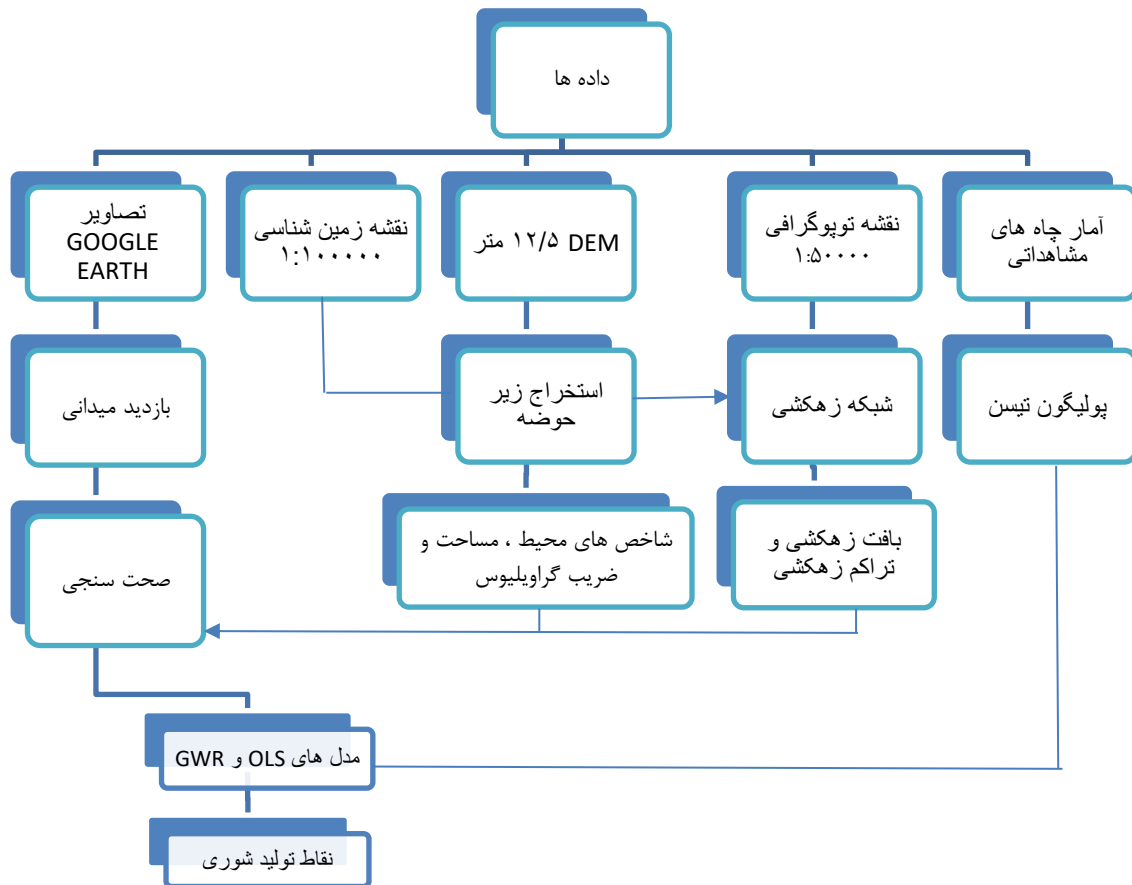


شکل ۴: کنگلومرای بختیاری در حوضه آبریز ایزدخواست





شکل ۵: نمودار خوشه‌ای شاخص‌های مطالعه شده در حوضه ایزدخواست



شکل ۶: فلوجارت مراحل روش تحقیق

جدول ۱: آنالیز پارامترهای کیفی آب چاه‌های مشاهداتی

UTMX	UTMY	Na	TDS	SAR	EC	K	CL	SO4
۲۱۵۳۸۲	۳۱۳۸۱۹۱	۱۲۷	۱۱۲۳۰	۱۶/۳۹۶	۲۰۱۵۵/۸	۱/۵	۱۹۰/۵	۱۳/۳۶
۲۱۹۴۰۲	۳۱۴۲۱۵۴	۲۰/۱	۲۹۷۶	۵/۳۷۲	۴۷۹۷/۴	/۲۲	۱۴	۲۱/۷۷
۲۱۹۸۹۶	۳۱۳۵۳۰۵	۱۳/۱۴	۴۷۶۰	۲/۳۰۵	۷۹۸۳	-/۳۶	۵۱	۲۹/۱۲
۲۲۱۵۴۱	۳۲۳۹۴۲۵	۱۳/۵۱	۴۵۱۴	۲/۴۶۷	۶۳۷۶/۲	-/۳۵	۲۹/۵	۳۲/۲۵
۲۲۱۸۴۵	۳۱۴۳۳۲۰	۶/۳۴	۱۰۵۶	۲/۸۳۵	۱۵۹۷/۶	-/۰۸	۵/۹۱	۶/۹۵
۲۲۵۴۵۸	۳۱۴۳۷۱۵	۲۰/۱۸	۲۷۹۰	۵/۷۰۸	۸۳۰۴	-/۲۱	۱۱۰/۱	۱۴/۱۲
۲۲۷۴۱۳	۳۱۴۴۶۷۲	۳۲/۶	۳۴۹۰	۹/۲۲۱	۵۷۴۷/۶	-/۲۸	۳۰/۸	۲۱/۵
۲۲۷۴۵۳	۳۱۳۹۷۸۰	۵/۶۵	۱۶۴۰	۱/۷۸۷	۳۶۱۱/۶	-/۱۲	۱۷/۷	۱۰/۵
۲۲۹۸۱۸	۳۱۳۵۲۲۶	۱۳۰/۶۱	۱۲۱۲۰	۲۰/۶۵۱	۱۷۱۰۵/۸	۱/۸۹	۱۳۰	۳۳/۶۶
۲۳۱۸۳۴	۳۱۳۷۱۷۶	۱/۸۸	۷۶۸	-/۸۴۱	۱۹۰۵	-/۰۷	۷/۷۷	۶/۹۵
۲۳۲۳۴۱	۳۱۳۵۴۱۹	۴/۸۱	۷۶۷	۲/۵۷۱	۵۱۰۵/۸	-/۰۷	۳۴/۲۵	۶/۲۴
۲۳۵۴۷۷	۳۱۳۵۳۸۹	۸/۵۴	۱۴۵۰	۳/۱۱۸	۲۲۴۳/۴	-/۱۱	۹/۸۶	۹/۲۲
۲۴۱۷۶۶	۳۱۳۳۴۲۹	۶/۷	۱۷۰۱	۲/۱۱۹	۲۲۴۶/۶	-/۱۲	۸/۷۴	۱۱/۵
۲۴۴۴۵۵	۳۱۳۹۵۸۵	۷۴/۵۳	۷۰۸۰	۱۵/۳۷۴	۱۰۰۶۵/۲	-/۹۷	۵۶/۵	۵۲/۱۷

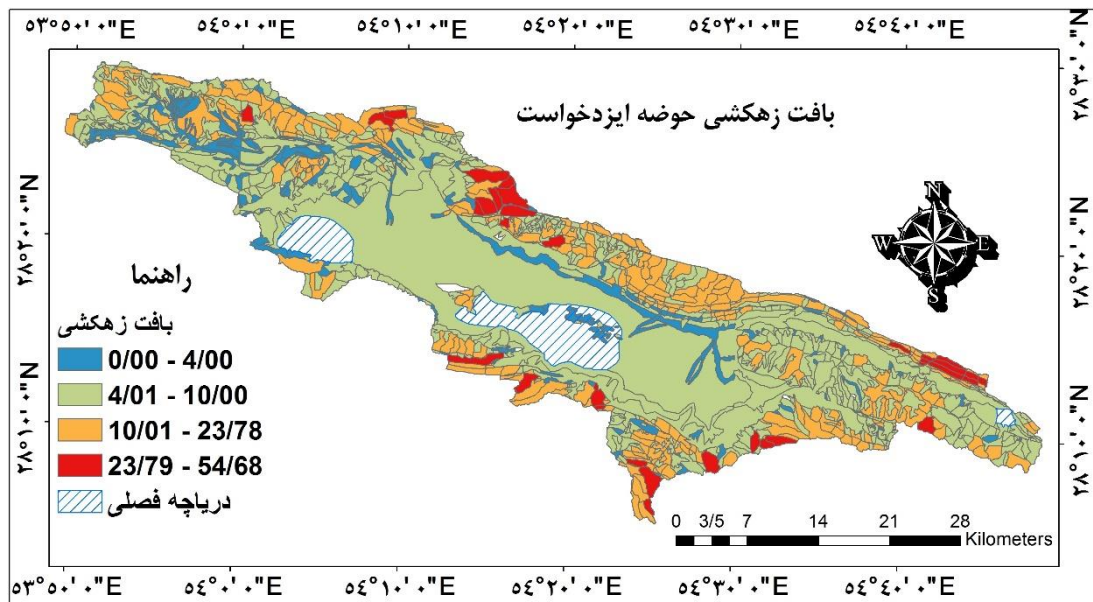
یافته‌ها و بحث

میانگین نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های مورد نظر در ۵۲۲ زیر حوضه بر اساس سازندهای زمین‌شناسی در جدول ۲ ارائه شده است. براساس این جدول و شکل ۵ شاخص‌های مساحت و محیط برای این تحقیق نتایج ضعیفی را ارائه دادند. چون در این تحقیق، هدف، طبقه‌بندی براساس مقاومت سازندها بود اما شاخص‌های محیط و مساحت، گسترده‌ترین سازندها را در یک گروه جای داده‌اند به این دلیل که زیرحوضه‌هایی که در سازندهای آغاچاری، آسماری - جهرم و بختیاری ایجاد شده‌اند مساحتی گسترده‌تر نسبت به بقیه داشتند. ضریب گراویلیوس نیز نسبت به دو شاخص قبل طبقه‌بندی بهتری داشت (شکل ۵) اما از آنجایی که دو سازند تاربور و لهبری را با مقاومت مختلف در یک گروه جای داده بود، کنار گذاشته شد. بین دو شاخص تراکم و بافت زهکشی با توجه به سازند بختیاری که به‌عنوان سازند صحت‌سنجی استفاده شده بود (شکل ۳، ۴ و ۵)، شاخص بافت زهکشی به‌عنوان بهترین شاخص مشخص (شکل ۷) و وارد مدل OLS شد.

جدول ۲: میانگین شاخص‌های استفاده شده بر اساس سازندهای زمین‌شناسی در ۵۲۲ زیرحوضه

سازندهای زمین‌شناسی	مساحت	محیط	ضریب فشردگی	تراکم زهکشی	بافت زهکشی
(Q) انباشته‌های آبرفتی - سیلابی عهد حاضر	۰/۳۱	۲/۹	۱/۶۷	۷/۴	۶/۵
(PLQb) سازند بختیاری	۰/۷۶	۴/۴	۱/۶۴	۸/۷	۲۶/۲
(Mlm) بخش لهبری	۰/۲۴	۲/۴	۱/۸۱	۱۰/۱۳	۱۷/۷
(MPLa) سازند آغاچاری	۰/۷۵	۴/۶	۱/۶۶	۹/۴	۲۲/۴۸
(Mmm) بخش مارنی میشان	۰/۴۲	۳/۳	۱/۶۳	۹/۴	۱۶
(Mm) سازند میشان	۰/۴۹	۳/۳	۱/۵۲	۱۱/۳	۲۱/۳
(Mmg) بخش گوری	۰/۲۷	۲/۶	۱/۶۳	۱۰/۱۸	۱۵
(Mmo) بخش مول	۰/۲۵	۲/۵	۱/۶۶	۱۰	۱۴/۸
(Mchm) بخش چمپه	۰/۲۱	۲/۱	۱/۶۳	۸/۶	۱۳/۳

(Mrz) سازند رازک	۰/۱۷	۲/۰۷	۱/۵۹	۸/۵	۷/۲
(EMasja) سازند آسماری - چهارم	۰/۸۵	۴/۴	۱/۵۴	۷	۱۸/۷
(KEsa) سازند ساچون	۰/۱۷	۲/۳	۱/۶۳	۹/۹	۸/۷
(Ktr) سازند تاربور	۰/۲۴	۳/۱	۱/۸۳	۴/۵۸	۶/۸
(Pd) سازند دالان	۰/۰۵	۰/۸۷	۱/۲۲	۸/۴	۷/۷
(C) انباشته های کربنیفر	۰/۱۵	۱/۵	۱/۱	۷/۸	۷/۳
(Cm) سازند میلا	۰/۱۹	۱/۲	۱/۴۲	۷/۶	۸/۲
(Cl) سازند لالون	۰/۰۶	۰/۸۵	۱/۴۳	۹/۲	۱۰/۵
(CZ) سازند زاگون	۰/۰۹	۱/۴۵	۱/۳	۵/۲	۵
(PCChd) سازند هرمز	۰/۵۸	۳/۸	۱/۵۲	۷/۶	۲۰/۹



شکل ۷: شاخص بافت زهکشی حوضه ایزدخواست

براساس نقشه بافت زهکشی، سازندها از نظر مقاومت به ۴ گروه سخت (۰-۴)، متوسط (۴-۱۰)، سست (۱۰-۲۳) و خیلی سست (۲۳-۵۴) تقسیم شدند (اسمیت، ۱۹۵۰: ۶۶۱). این شاخص به طور کامل مقاومت لیتولوژی های مختلف را در زیرحوضه ها مشخص کرده است در برخی از سازندها مانند لهبری که از دو نوع لیتولوژی کنگومرا و مارن تشکیل شده است به راحتی می توان نوع سنگ را مشخص نمود و حتی در نبود نقشه های زمین شناسی با مقیاس قابل قبول می توان جهت تشخیص نوع مقاومت سنگها از نقشه های توپوگرافی با مقیاس های موجود و جهت تشخیص جنس لیتولوژی ها با استفاده از نقشه های توپوگرافی بزرگ مقیاس تر با استخراج شبکه زهکشی به عنوان زمین ریخت از شاخص بافت زهکشی استفاده نمود.

نتایج مدل OLS نیز نشان داد از بین ۱۹ نوع سازند، ۸ نوع از آنها با پارامترهای کیفی آب رابطه معنی دار دارند که سازندهای انتخاب شده در هر مدل، معیار تصحیح شده اطلاعات (AICc) و ضرایب بتای (β) مربوط به هر سازند و مدل ارائه شده است (جدول ۳).

براساس نتایج مدل OLS (جدول ۳)، علامت ضرایب بتا برای سازندهای آغاچاری (MPLa)، رازک (Mrz) و بخش های مول (Mmo) و لهبری (Mlm) منفی است که نشان دهنده رابطه معکوس آنها با پارامترهای کیفی می باشد ولی اغلب پارامترهای کیفی رابطه مستقیم و بالایی با عضو چمپه (Mchm)، گوری (Mmg) و گنبد نمکی (Pc-chd) موجود در

منطقه دارند. این سازندها نیز به دلیل ناپایداری در برابر فرسایش بیشتر خود را به شکل تپه ماهور و بدلند نشان داده‌اند که نشان‌دهنده فرسایش سطحی و شستشوی نمک و گچ از سطح، توسط جریان‌های سطحی و انتقال آنها به نقاط پست حوضه یعنی دریاچه‌های فصلی می‌باشد که با توجه به نقشه بافت زهکشی (شکل ۷) دامنه‌هایی که میزان بافت زهکشی بالایی دارند دارای اشکال بدلندی هستند.

از طرفی رابطه سازندهای سستی مانند آجاجاری، مول یا حتی لهبری با پارامترهای کیفی آب به این دلیل منفی نشان داده شده است که در این تحقیق به دلیل کافی نبودن داده‌های کیفی، فقط برای مرکز حوضه، پولیگون تیسن بسته شده است در حالی که منابع آبی در هر چاه از نقاط بالادست خود تأثیر می‌پذیرند. ولی با استفاده از میزان مقاومت آن‌ها در شاخص بافت زهکشی (شکل ۷) که نشان می‌دهد سازندهای مذکور بیشتر در شمال و شمال شرق حوضه با میزان فرسایش بیشتر رخنمون دارند، می‌توان تأثیر مثبت‌شان را در کیفیت منابع آب مشخص نمود.

جدول ۳: نتایج مدل‌های انتخاب شده برای هر پارامتر کیفی آب

پارامتر	سازندهای انتخاب شده در هر مدل و ضرایب بتای مربوط به هر سازند	AICc
EC	Pc-chd (۰/۷۶۴/۵) Mchm، Mmg (۰/۱۵۱۵/۷) Mm، Mrz (۰/۱۴۱۴/۵) (-)، (-۱۱۲۶/۶) Pc-chd	۲۹۰/۳
NA	Pc-chd (۰/۷/۶۸) Mchm، Mmg (۰/۱۳/۲۶) Mmo، Mrz (۰/۷/۱) (-)	۱۴۸/۷
SAR	Pc-chd (۰/۰/۹۵) Mchm، Mmg (۰/۲/۲۲) Mmo، Mrz (۰/۰/۸۸) (-)	۹۹/۶
TDS	Mchm (۰/۶۰/۲/۶)	۲۶۲/۹
K	Pc-chd (۰/۰/۰/۸) Mchm، Mmg (۰/۰/۱۶) Mmo، Mrz (۰/۰/۰/۸) (-)	۲۶/۳
CL	Pc-chd (۰/۷/۸) Mchm، Mlm (۰/۴/۷) (-)، Mrz (۰/۱۰/۳) (-)	۱۵۴/۱
SO4	Mmg (۰/۳/۹) Mpla، (-۰/۱/۲)	۱۱۴/۹

جدول ۴ درجه خوشه‌بندی یا پراکندگی باقیمانده‌های استاندارد را نشان می‌دهد که بر اساس این جدول تمامی باقیمانده‌ها در مدل‌های انتخابی OLS در محدوده استاندارد قرار دارند که نشان‌دهنده توزیع نرمال داده‌ها می‌باشد.

جدول ۴: نتایج شاخص موران برای مدل‌های انتخاب شده برای هر پارامتر کیفی آب

پارامترهای کیفی آب	شاخص موران	Z-score	P-value
EC	۰/۱۴	۰/۹	۰/۳۵
NA	-۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۹۷
SAR	۰/۱۶	۱/۰۹	۰/۲۷
TDS	-۰/۱۹	-۰/۴	۰/۶۶
K	۰/۴	۰/۶۶	۰/۸۸
CL	-۰/۲۵	-۰/۶۷	۰/۴۹
SO4	-۰/۳۷	-۱/۰۹	۰/۲۷

در مرحله آخر نتایج مدل GWR به صورت نقشه‌های مدل‌های مکانی برای هر پارامتر براساس نتایج ضرایب تعیین (R^2) ارائه شده است که در این نقشه‌ها جهت وضوح آن‌ها تنها سازندهایی که در مدل OLS با پارامترهای کیفی آب رابطه معنادار داشتند، آورده شده‌اند (شکل ۸).

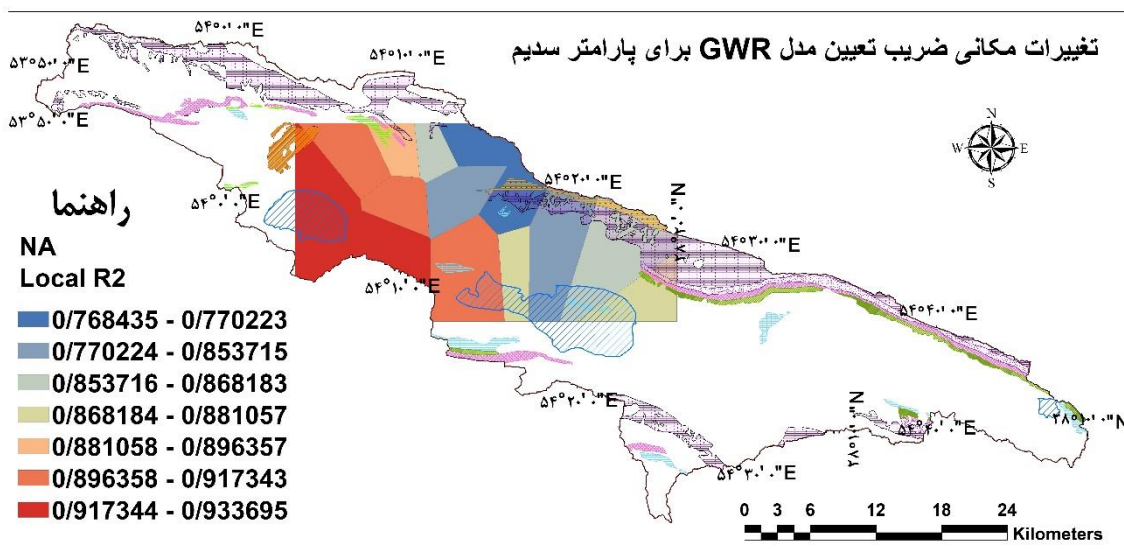
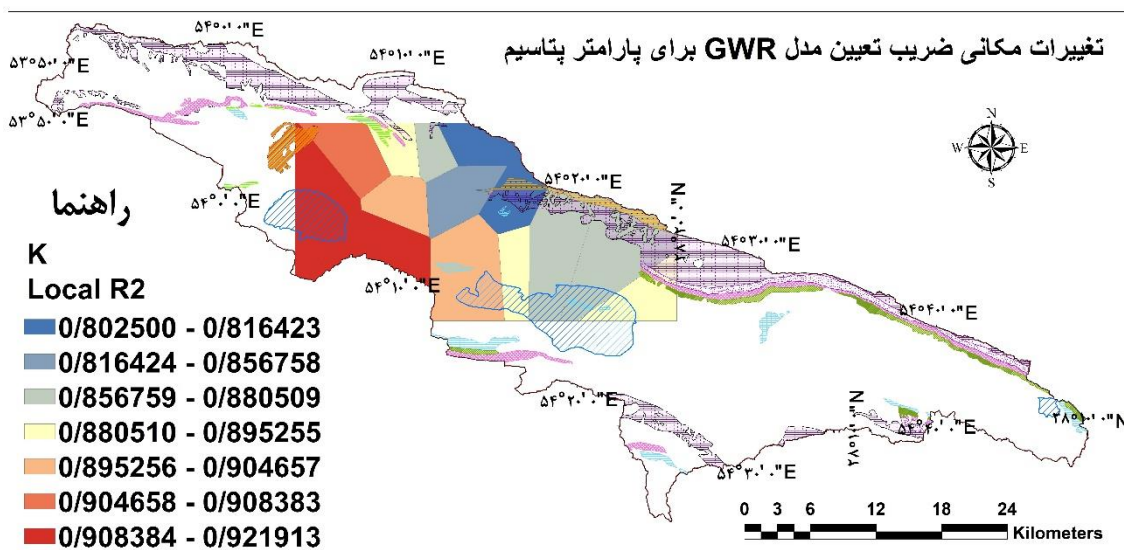
بر اساس نقشه‌ها بیشترین میزان همبستگی مربوط به پارامتر سدیم، پتاسیم و هدایت الکتریکی و کمترین مقدار مربوط به پارامتر سولفات می‌باشد در حالی که بقیه پارامترها نیز همبستگی بسیار بالایی با متغیرهای مستقل نشان دادند. در اغلب پارامترهای کیفی مانند سدیم، پتاسیم، کلر و هدایت الکتریکی بیشترین میزان همبستگی مربوط به غرب حوضه می‌باشد که نشان‌دهنده تأثیر بالای دیپایر نمکی موجود در غرب حوضه بر منابع آبی می‌باشد و چاه‌هایی که نزدیک به این نقاط هستند کیفیت پایین‌تری نسبت به چاه‌های موجود در نقاط مرتفع‌تر و دورتر دارند. همچنین مقاومت کم و فرسایش رسوبات تبخیری نیز بر این موضوع دامن زده است. به طوری که منابع آبی که با رسوبات تبخیری در تماس هستند ممکن است مقدار زیادی پتاسیم، سدیم، کلر و سولفات به صورت محلول در خود داشته باشند. ارائه نتایج مشابه نشان می‌دهد که نتایج این تحقیق از اطمینان بیشتری برخوردار است. برای مثال تحقیقی که در سروستان صورت گرفته است نشان می‌دهد که انحلال مواد و کانی‌های موجود در گنبد نمکی و نهشته‌های گچی و مارنی سازندهای مخرب، عامل اصلی کاهش کیفیت منابع آبی هستند (جهیذ، ۱۹۹۴).

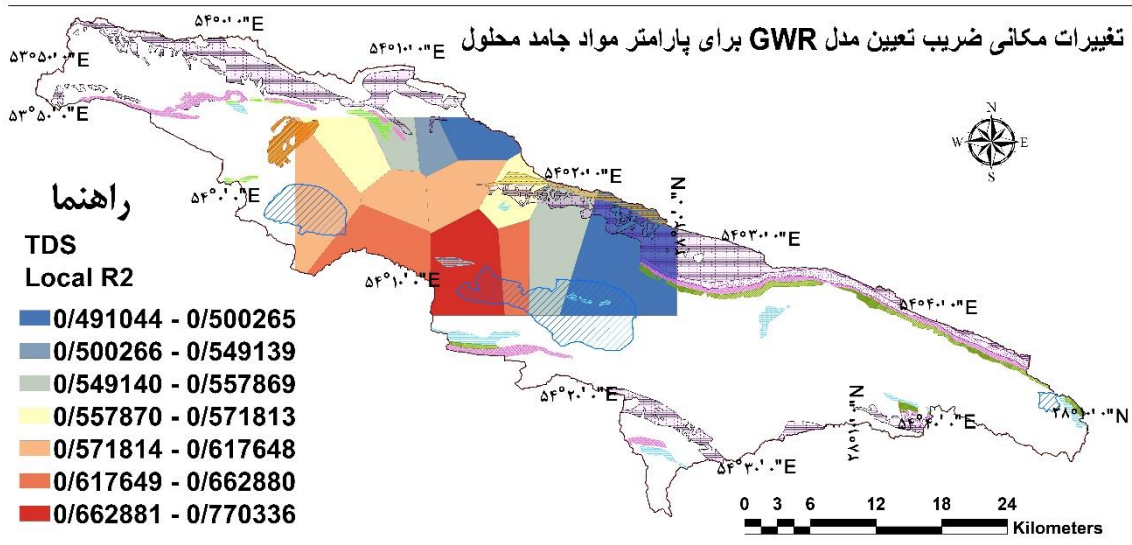
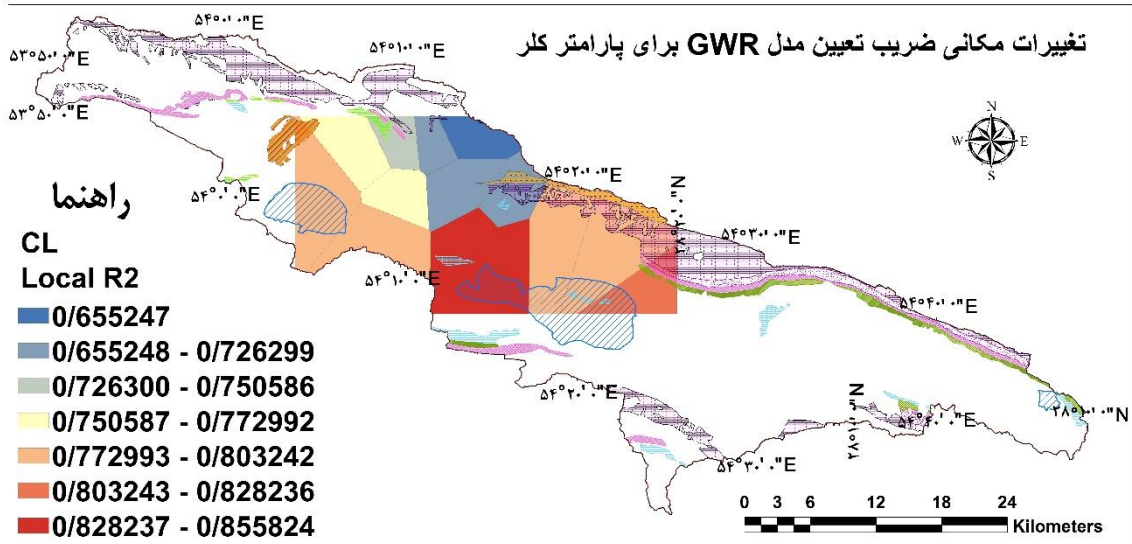
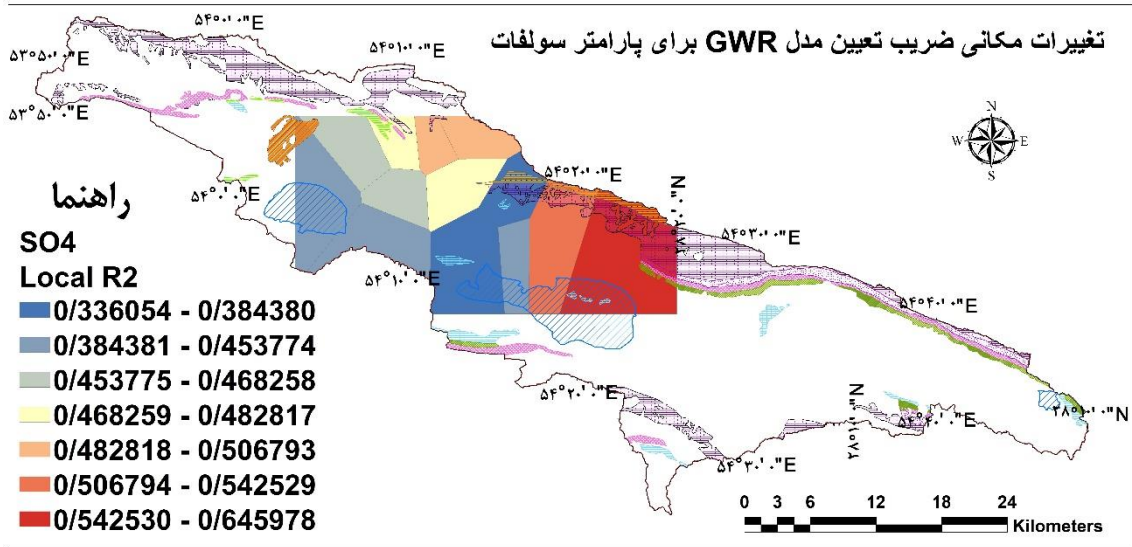
همچنین نتایج مدل GWR با زمین‌ریخت‌های منطقه رابطه مستقیم دارد به طوری که سازند آجاجاری و بخش‌های مول، چمپه و گوری که سهم بسزایی در تغییر کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه دارند در مرکز، شمال، شمال شرق و شمال غرب منطقه به صورت تپه‌ماهور و بدلدن رخنمون دارند که شاخص بافت زهکشی به خوبی نقاط فرسایش‌پذیرتر و سست را در هر زیرحوضه نشان داده است. با توجه به این شاخص (شکل ۷) زیرحوضه‌هایی که در سازندهای مذکور از مقاومت کمتری برخوردارند با میزان بافت زهکشی بیشتر مشخص شده‌اند.

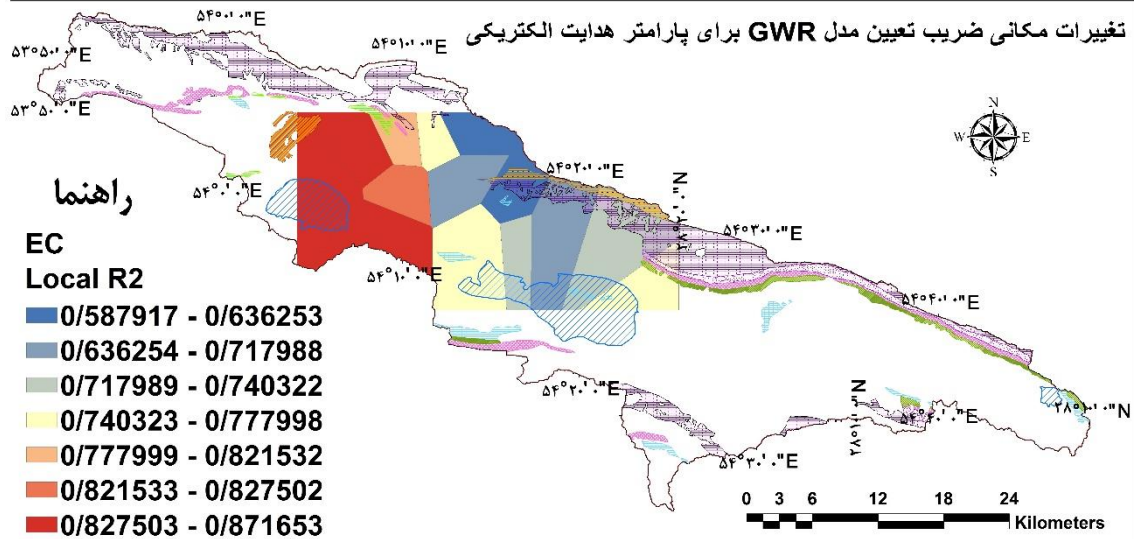
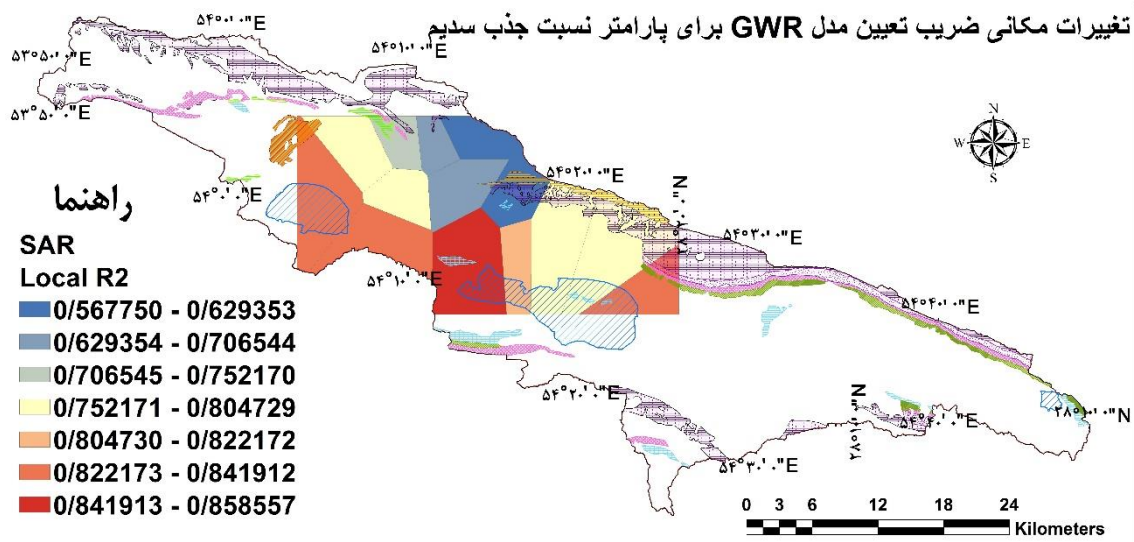
این نوع بافت زهکشی خاصی که در زمین رخ می‌دهد در واقع زمین‌ریخت آشکاری را در سطح نسبتاً وسیعی از حوضه به وجود می‌آورد که می‌تواند بیانگر کیفیت منابع آب زیرزمینی در منطقه باشد. زیرا این نوع بافت در سازندهایی به وجود آمده است که قبلاً رابطه آن‌ها (سازندها) با کیفیت آب‌های زیرزمینی در همین حوضه به اثبات رسیده است (انصاری و همکاران، ۱۴۰۰). اما با توجه به اینکه در پژوهش ذکر شده متغیر مستقل، مساحت سازندهای زمین‌شناسی می‌باشد، سازندهای سست و مخرب، کمتر در مدل سازی خود را نشان داده‌اند و رابطه معنادار دریاچه‌های فصلی با پارامترهای کیفی آب، بیشتر شکل پلایا را که یکی از نمادهای شوری می‌باشد، بارزتر می‌کند (راهنمای مدیریت شوری، ۲۰۱۹: ۴۲). در صورتی که در تحقیق حاضر استفاده از شاخص بافت زهکشی به عنوان مشخصه‌ای از زمین‌ریخت‌های منطقه نقاط حساس و کلیدی را با توجه به میزان فرسایش و سستی به راحتی مشخص کرده است. به طوری که براساس نتایج نقشه‌های همبستگی (شکل ۸) سازندهای هرمز، چمپه، گوری، مول، آجاجاری و رازک از مهم‌ترین سازندهای آلاینده می‌باشند. همچنین میزان تغییرات فضایی و همبستگی بین متغیرهای مورد نظر در پژوهش حاضر نتایج قابل قبول‌تر با توجه به نقاط حساس و فرسایش‌پذیر ارائه داده است. به عنوان مثال در مناطقی که رسوبات تبخیری وجود دارند، انحلال سنگ نمک باعث افزایش غلظت سدیم در آب‌های زیرزمینی می‌شود همچنین کانی‌های رسی تحت شرایطی خاص مقدار زیادی سدیم از طریق تبادل یونی در محیط‌های آبی رها می‌کنند (جهیذ، ۱۳۷۳: ۳۸) که نتایج ارائه شده به خوبی رابطه پارامتر سدیم را با سازندهای هرمز و چمپه و رازک در غرب حوضه مشخص کرده است. پس نتایج نشان می‌دهد که شاخص بافت زهکشی به عنوان مشخصه‌ای از زمین‌ریخت‌های منطقه با توجه به نشان دادن میزان فرسایش سازندها در هر زیرحوضه نتایج قابل قبولی را ارائه نموده است.

در واقع با افزایش میزان شاخص بافت زهکشی می‌توان به وجود سازندهای مخرب کیفیت منابع آب، در هر منطقه، شک نمود. اما برای برخی از سازندهای موجود در هر حوضه مانند سازند بختیاری که سست هستند ولی نقش مخربی در کیفیت آب ندارند می‌توان از نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس‌های موجود، جهت بررسی وجود لایه‌های آلاینده استفاده نمود.

در نهایت نتایج نشان می‌دهد که استفاده از شاخص‌های مورفومتریکی جهت بررسی عوامل مؤثر در تغییرات کیفیت منابع آبی (آلمادا و همکاران، ۲۰۱۹:۱۱) به همراه مدل GWR و قدرت بالای آن جهت مدل‌سازی مکانی (پرات و چانگ، ۲۰۱۲؛ نظیر و بلال، ۲۰۱۸) به مدیران و برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا نقاط حساس تخریب منابع آبی را با استفاده از زمین-ریخت‌های سطحی، شناسایی و برای مدیریت هرچه بهتر به کار گیرند. به طوری که نتایج پژوهش مولیادی و همکاران (۲۰۲۰) که تغییرات سطح آب زیرزمینی را با استفاده از توپوگرافی سطحی و رگرسیون وزن جغرافیایی انجام دادند نیز این موضوع را تأیید می‌کند.





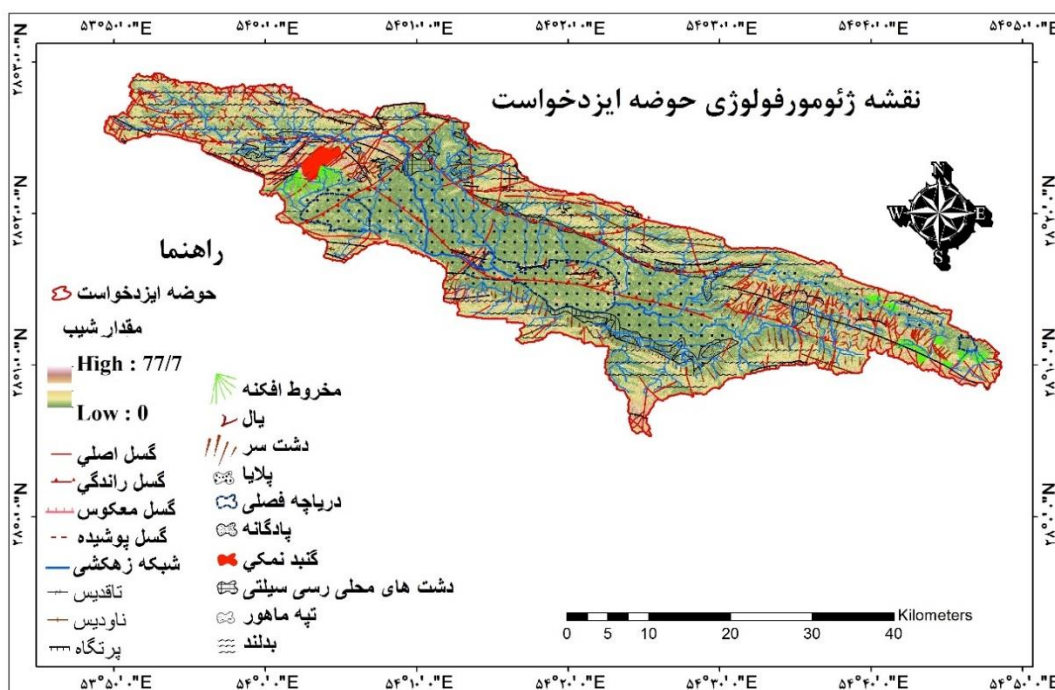


جهت وضوح تصویر تنها سازندهایی که با مدل OLS رابطه معنی دار داشته اند، در نقشه مشخص شده اند

راهنما



شکل ۸: نتایج مدل GWR براساس نتایج ضرایب تعیین (R^2)



شکل ۹: نقشه ژئومورفولوژی حوضه ایزدخواست

نتیجه گیری

در این تحقیق جهت بررسی عوارض مورفولوژیکی در شناسایی سرچشمه های شوری منابع آب زیرزمینی در پلایای ایزدخواست و ارائه شاخصی مطمئن جهت مدل سازی مکانی از شاخص بافت زهکشی در مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که بیشترین میزان همبستگی مربوط به پارامتر سدیم، پتاسیم و هدایت الکتریکی و کمترین مقدار مربوط به پارامتر سولفات می باشد در حالی که بقیه پارامترها نیز همبستگی بسیار بالایی با متغیرهای مستقل نشان دادند. در اغلب پارامترهای کیفی مانند سدیم، پتاسیم، کلر و هدایت الکتریکی بیشترین میزان همبستگی مربوط به غرب حوضه می باشد که نشان دهنده تأثیر بالای دیپایر نمکی موجود در غرب حوضه بر منابع آبی می باشد و چاه هایی که نزدیک به این نقاط هستند کیفیت پایین تری نسبت به چاه های موجود در نقاط مرتفع تر و دورتر دارند. همچنین مقاومت کم و فرسایش رسوبات تبخیری نیز بر این موضوع دامن زده است. به طوری که منابع آبی که با رسوبات تبخیری در تماس هستند ممکن است مقدار زیادی پتاسیم، سدیم، کلر و سولفات به صورت محلول در خود داشته باشند. همچنین نتایج مدل GWR با زمین ریخت های منطقه رابطه مستقیم دارد به طوری که سازند آغاچاری و بخش های مول، چمپه و گوری که سهم بسزایی در تغییر کیفیت آب های زیرزمینی منطقه دارند در مرکز، شمال، شمال شرق و شمال غرب منطقه به صورت تپه ماهور و بدلند رخنمون دارند. این زمین ریخت ها که مهم ترین اشکال فرسایشی منطقه می باشند بخش نسبتاً وسیعی را در حوضه به خود اختصاص داده اند که به علت فرسایش، از مهم ترین نقاط تغییر کیفیت منابع آب زیرزمینی در منطقه می باشند.

علاوه بر این با استفاده از شاخص بافت زهکشی به طور کامل مقاومت لیتولوژی های مختلف در زیرحوضه ها مشخص شد. که نتایج نشان می دهد در نبود نقشه های زمین شناسی با مقیاس قابل قبول می توان جهت تشخیص نوع مقاومت سنگ ها از نقشه های توپوگرافی با مقیاس های موجود و حتی برای تعیین جنس لیتولوژی ها با استفاده از نقشه های توپوگرافی بزرگ مقیاس تر با استخراج شبکه زهکشی به عنوان زمین ریخت از شاخص بافت زهکشی استفاده نمود.

بنابراین استفاده از شاخص بافت زهکشی جهت بررسی عوامل مؤثر در تغییرات کیفیت منابع آبی به همراه مدل GWR و قدرت بالای آن جهت مدل‌سازی مکانی به مدیران و برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا نقاط حساس تخریب منابع آبی را با استفاده از زمین‌ریخت‌های سطحی شناسایی و برای مدیریت هرچه بهتر به کار گیرند.

منابع

- تیموری، م.، اسدی نلیوان، ا.، ۱۳۹۹، تاثیر کاربری اراضی و زمین‌شناسی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از تکنیک‌های آماری چند متغیره و زمین‌آمار (مطالعه موردی: بخشی از حوضه آبریز حبله‌رود)، هیدروژئومورفولوژی، دوره ۷، شماره ۲۵، صص ۹۷-۱۲۱.
- اسدیان، ف.، خلفی، ج.، ۱۳۸۹، تأثیر پدیده‌های ژئومورفولوژی بر منابع آب زیرزمینی، مطالعه موردی: دشت سپهرین زنجان، فصلنامه جغرافیا، دوره ۴، شماره ۱۵، صص ۶۴-۸۶.
- انصاری، م.، جباری، ا.، سرگردی، ف.، ۱۴۰۰، مدل‌سازی مکانی پارامترهای کیفی آب بر اساس سازندهای زمین‌شناسی، هیدروژئومورفولوژی، دوره ۸، شماره ۲۶، صص ۱۱۷-۱۳۷.
- بهرامی، ش.، زنگنه‌اسدی، م. ع.، رهبر، ح.، ۱۳۹۲، بررسی نقش ژئومورفولوژی در ویژگی‌های هیدرولوژیکی و شیمیایی چشمه‌های حوضه آبخیز کنگیر، جغرافیا و آمایش شهری- منطقه‌ای، دوره ۳، شماره ۷، صص ۷۱-۸۴.
- جعفری، م.، طویلی، ع.، ۱۳۹۲، احیای مناطق خشک و بیابانی، چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- جوانی، و.، جباری، ا.، ۱۳۸۸، شاخص‌های زمین‌ریخت‌شناسی در شناسایی آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت اهر)، مجله علمی- پژوهشی فضای جغرافیایی، سال ۹، شماره ۲۵، صص ۵۱-۷۱.
- جهبذ، ا.، ۱۳۷۳، بررسی ویژگی‌های هیدرو شیمیایی حوضه آبخیز سروستان با تأکید بر نقش سازندهای زمین‌شناسی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته زمین‌شناسی- آب‌شناسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ۴۳۶ ص.
- خجسته، پ.، ۱۳۹۰، تفکیک بخش‌های سازندهای گچ‌ساران و آسماری از روی خرده‌های حفاری با رویکرد پردازش تصویر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته برق- الکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ۱۲۹ ص.
- رحمتی، ا.، محمودی، ن.، مساعدی، ا.، حیدری، ف.، ۱۳۹۳، بررسی اثر کاربری اراضی و سنگ‌شناسی بر کیفیت آب چشمه‌های حوزه آبخیز پیرانشهر، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، شماره ۲۷، صص ۱۹-۲۶.
- رنجبر، غ.، پیرسته‌انوشه، ه.، ۱۳۹۴، نگاهی به تحقیقات شوری در ایران با تأکید بر بهبود تولید گیاهان زراعی، مجله علوم زراعی ایران، جلد ۱۷، شماره ۲، صص ۱۶۵-۱۷۸.
- زنگنه‌اسدی، م. ع.، بهرامی، ش.، اکبری، ا.، پوراسکندر، ب.، ۱۳۹۱، بررسی میزان ارتباط نوسان آب زیرزمینی با عوارض ژئومورفولوژی، مطالعه موردی: دشت پارس‌آباد، اولین همایش ملی انجمن ایرانی ژئومورفولوژی، ژئومورفولوژی و زیستگاه انسان (فرصت‌ها و محدودیت‌ها)، صص ۱۷۲-۱۷۴.
- عرفانیان، م.، حسین‌خواه، م.، علیچانپور، ا.، ۱۳۹۲، مقدمه‌ای بر روش‌های رگرسیونی چند متغیره OLS و GWR در مدل‌سازی مکانی اثرات کاربری اراضی بر کیفیت آب، ترویج و توسعه آبخیزداری، شماره ۱، صص ۳۳-۳۹.
- لآوری‌نیا، ع.، اصغری‌مقدم، م. ر.، ۱۳۸۷، بررسی ژئومورفولوژی تاقدیس گزه و تأثیر آن بر منابع آبی منطقه مغرب هرمزگان و جنوب شرق فارس، فصلنامه جغرافیایی سرزمین، سال ۵، شماره ۲۰، صص ۱۱۷-۱۳۰.
- Almada, H. K. S., Silvério, D. V., Macedo, M. N., Santos, L. M., Zaratim, E. C. P., Zaratim, K. P., Maccari, A., Nascimento, M. R., Umetsu, R. K., 2019. Effects of geomorphology and land use on stream water quality in southeastern Amazonia, *Hydrological Sciences Journal*, 64(5), pp. 1-13.
- Andersson, J., Nyberg L., 2009. Using official map data on topography, wetlands and vegetation cover for prediction of stream water chemistry in boreal headwater catchments, *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(4), pp. 537-549.

- Chang, H., 2008. *Spatial analysis of water quality trends in the Han River basin, South Korea*, *Water Research*, 42(13), pp. 3285-3304.
- Chopra, R., Sharma, P.K., 1993. *Landform analysis and ground water potential in the Bist Doab area*, *International Journal of Remote sensing*, 14(17), pp.3221-3229.
- Drever, J. L., 1988. *The geochemistry of natural waters*, the University of Michigan, Prentice-Hall, 2, 437 p.
- Elewa, H. H., 2006. *Water resources and geomorphological characteristics of Tushka and west of Lake Nasser, Egypt*, *Hydrogeology Journal*, 14(6), pp. 942–954
- Ferdowsian, R., Ryder, A., George, R., Bee, G., Smart, R., 2002. *Groundwater level reduction under Lucerne depend on the landform and groundwater flow systems (local or intermediate)*, *Australian Journal of Soil Research*, 40(3), pp. 381-396.
- Haldar, D., Sehgal, V.K., Kumar, G., Sundara Sarma, K.S., 2011. *Evaluation of ground water and land resources in relation to landforms in Alwar District (Rajasthan): A remote sensing based approach*, *Archives of Environmental Science*, 5, pp. 37-45.
- Kamarudin, M. K. A., Nalado, A. M., Toriman, M. E., Juahir, H., Umar, R., Ismail, A., Wahab, N. A., Saad, M. H. M., Maulud, K. N., Hanafiah, M. M., Saudi, A., Harith, H., 2019. *Evolution of river geomorphology to water quality impact using remote sensing and GIS technique*, *Desalination and Water Treatment*, 149, pp. 258-273.
- Lecomte, K. L., García, M. G., Fórmica, S. M., Depetris, P. J., 2009. *Influence of geomorphological variables on mountainous stream chemistry (Sierras Pampeanas, Córdoba, Argentina)*, *Geomorphology*, 110(3-4), pp. 195–202.
- Mainali, J., Chang, H., Chun, Y., 2019. *A review of spatial statistical approaches to modeling water quality*, *Progress in physical geography, earth and environment*, 43(6), pp. 1-26.
- Mulyadi, A., Dede, M., Widiawaty, M. A., 2020. *Spatial interaction of groundwater and surface topographic using geographically weighted regression in built-up area*, *Sustainable Urban Water International Seminar, Series: Earth and Environmental Science* 477, pp. 1-8.
- Nagarale, V. R., 2017. *Groundwater Zonation by using Landform Characteristics in Karha River Basin, Pune*, major research project, department of geography, women's university, Pune campus, Pune, 98 p.
- Nayyeri, H., Zandi, S., 2018. *Evaluation of the effect of river style framework on water quality*, *Environmental Earth Sciences*, 77(9), pp. 1-12.
- Nazeer, M., Bilal, M., 2018. *Evaluation of Ordinary Least Square (OLS) and Geographically Weighted Regression (GWR) for water quality monitoring a case study for the estimation of salinity*, *Oceanic and coastal sea research*, 17(2), pp. 305-310.
- Okkonen, J., Klove, B., 2012. *Assessment of temporal and spatial variation in chemical composition of groundwater in an unconfined esker aquifer in the cold temperate climate of Northern Finland*, *Cold Regions Science and Technology*, 71, pp. 118-128.
- Pratt, B., Changa, H., 2012. *Effects of land cover, topography, and built structure on seasonal water quality at multiple spatial scales*, *Journal of Hazardous Materials*, 209–210, pp. 48-58.
- Rai, P. K., Singhi, P., Mishra, V. N., Singh, A., Sajan, B., Shahi, A., 2019. *Geospatial approach for quantitative drainage morphometric analysis of varuna river basin, India*, *Journal of Landscape Ecology*, 12(2), pp. 1-25.
- Rajaveni, S. P., Brindha, K., Elango, L., 2016. *Geological and geomorphological controls on groundwater occurrence in a hard rock region*, *Applied Water Science*, 7(2017), pp. 1377–1389.
- *Salinity management handbook*, 2019, Second edition, National landcare program press, Department of Environment and Resource Management, 172 p.
<https://www.publications.qld.gov.au/dataset/salinity-management-handbook>

- Shajari, J., Raeisi, E.T., 2006. Influences of anticlinal structures on regional flow. Zagros, Iran, *Journal of Cave and Karst studies*, 68(3), pp. 118-129.
- Shi, W., Xia, J., Zhang, X., 2016. Influences of anthropogenic activities and topography on water quality in the highly regulated Huai River basin, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(21), pp. 21460-21474.
- Shrestha, A., Luo, W., 2017. Analysis of groundwater Nitrate contamination in the central valley: comparison of the geodetector method, principal component analysis and Geographically Weighted Regression, *International Journal of Geo-Information*, 6(10), pp.1-25.
- Sliva, L., Williams, D.D., 2001. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality, *Water Research*, 35(14), pp. 3462–3472.
- Smith, K.G., 1950, Standards for grading texture of erosional topography, *American Journal of Science*, 248 (9), pp. 655-668.
- Sun, Y., Guo, Q., Liu, J., Wang, R., 2014. Scale effects on spatially varying relationships between urban landscape patterns and water quality, *Environmental Management*, 54(2), pp. 272–287.
- Thapa, R., Ravindra, K., Sood, R.K., 2008. Study of morphotectonics and hydrogeology for groundwater prospecting using remote sensing and GIS in the north west Himalaya, district Sirmour, Himachal, Pradesh, India, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Part B4*. Beijing, pp. 227-232.
- Tucker, G.E., Catani, F., Rinaldo, A., Bras, R.L., 2001. Statistical analysis of drainage density from digital terrain data. *Geomorphology*, 36(3-4), pp.187–202.
- Varanka, S., Luoto, M., 2012. Environmental determinants of water quality in boreal rivers based on partitioning methods, *River Research and Applications*, 28(7), pp. 1034-1046.
- Varanka, S., Hjort, J., Luoto, M., 2015. Geomorphological factors predict water quality in boreal rivers, *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(15), pp. 1989–1999.
- Verma, S., Mukherjee, A., 2016. Geomorphological Influence on Groundwater Quality and Arsenic Distribution in Parts of Brahmaputra River Basin Adjoining Eastern Himalayas. In: Raju N. (Eds) *Geostatistical and Geospatial Approaches for the Characterization of Natural Resources in the Environment*. Springer, Cham, pp. 207-211, https://doi.org/10.1007/978-3-319-18663-4_33
- Young, R.G., Quarterman, A.J., Eyles, R.F., Smith, R.A., Bowden, W.B., 2005. Water quality and thermal regime of the Motueka River: influences of land cover, geology and position in the catchment. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 39(4), pp. 803–825.
- Zhou, T., Wu, J., Peng, S., 2012. Assessing the effects of landscape pattern on river water quality at multiple scales: A case study of the Dongjiang River watershed, China, *Ecological Indicators*, 23(2012), pp. 166-175.