

مدل‌سازی آثار کاربری اراضی روی پارامترهای کیفیت آب با روش‌های رگرسیونی چندمتغیره OLS و GWR در حوزه‌های آبخیز استان فارس

مریم حسین خواه^۱، مهدی عرفانیان^{۲*}، احمد علیجانپور^۳

۱. دانش‌آموخته مقطع کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲. استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۳. دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۲/۲۷

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۴/۳/۲۴

چکیده

ارتباط بین انواع کاربری اراضی و پارامترهای کیفیت آب در هر منطقه متفاوت و میزان همبستگی بین آن‌ها دارای تغییرات مکانی است. در این تحقیق، مدل‌سازی آثار کاربری اراضی روی ۱۳ پارامتر کیفیت آب اندازه‌گیری شده در ۴۲ ایستگاه هیدرومتری مربوط به تعدادی از حوزه‌های آبخیز واقع در استان فارس بررسی شد. بدین منظور، از روش‌های رگرسیونی چندمتغیره خطی OLS و GWR برای تعیین روابط بین متغیرهای وابسته (پارامتر کیفیت آب) و متغیرهای مستقل (درصد کاربری اراضی) استفاده شد. پارامترهای کیفیت آب شامل کلسیم، کلر، هدایت الکتریکی، کربنات، بیکرنات، پتاسیم، منیزیم، سدیم، اسیدیت، سختی کل، نسبت جذب سدیم، سولفات و باقیمانده خشک بود. ارزیابی میزان کارایی مدل‌ها در حوزه‌های آبخیز انتخابی، براساس ضریب تعیین (R^2)، معیار اطلاعات آکائیکه (AICc) و شاخص موران (I) انجام شد. مقادیر ضریب تعیین یا R^2 در روش GWR در کلیه حوزه‌های آبخیز انتخابی، بزرگ‌تر از ۰/۸۳ به دست آمد. تفاوت دو روش مذکور از نظر معیار AICc در تمام پارامترهای کیفیت آب، بیشتر از سه و مقادیر این معیار در روش GWR همواره کوچک‌تر از OLS به دست آمد. همچنین، شاخص موران میزان خودهمبستگی مکانی کمتری نسبت به روش OLS نشان داد. نتایج این تحقیق نشان داد که روش GWR در مدل‌سازی آثار کاربری اراضی روی پارامترهای کیفیت آب، از کارایی بالاتری برخوردار است. میزان و علامت ضرایب مدل‌های GWR در نقشه‌های ارائه شده، بیانگر نقش و درجه تأثیر مناطق مختلف در کاهش یا افزایش پارامترهای کیفیت آب است.

کلیدواژه

خودهمبستگی مکانی، کیفیت آب، GWR.

۱. سرآغاز

(علیزاده، ۱۳۸۵). شاخص‌های کیفیت آب در مکان‌های مختلف حوزه آبخیز یا حتی در امتداد طولی جریان (رودخانه) دارای تغییرات مکانی‌اند. برای مدیریت کیفیت آب می‌توان از روش مدل‌سازی به‌منزله ابزار مهم و مؤثری استفاده کرد. به منظور برنامه‌ریزی صحیح مدیریت منابع طبیعی و شناسایی منابع آلاینده کیفیت آب، لازم است تا آثار انواع کاربری اراضی روی پارامترهای مختلف کیفیت

امروزه یکی از موضوعات بسیار مهم در هیدرولوژی آب‌های سطحی و زیرزمینی، بررسی کیفیت آب است و عمده فعالیت‌های هیدرولوژی سطحی به منظور تأمین آب با کیفیت مناسب برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعت‌اند که از نظر شاخص‌های کیفیت آب می‌بایست دارای ویژگی‌های کیفی و معیارهای قابل قبول باشند

ضرورت دارد تا مدل‌های جدیدتری مانند GWR نسبت به مدل‌های کلاسیک OLS یا شبکه‌های عصبی مصنوعی (Fatehi, et al., 2015; Kalin, et al., 2010)، ارزیابی جامع‌تری شوند. با این مقدمه، به مهم‌ترین تحقیقات انجام‌شده در زمینه کاربرد آثار کاربری اراضی روی کیفیت آب یا استفاده از مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره به دلیل ارتباط بیشتر آن‌ها با موضوع پژوهش حاضر اشاره می‌شود: ارتباط بین کاربری اراضی و کیفیت آب در منطقه اوهاییوی ایالت متحده آمریکا نشان می‌دهد که رابطه بین کاربری اراضی و پارامترهای کیفیت آب به دلیل ناهمگن بودن ویژگی‌های حوزه آبخیز و منابع آلاینده آب در مناطق مختلف حوزه آبخیز، یکسان نیست (Tong & Chen, 2002). نامبردگان نتیجه گرفتند که اراضی کشاورزی با نیتروژن کل (TN)^۳ همبستگی معنی‌دار مثبت، اما با سدیم و کلسیم همبستگی معنی‌دار منفی دارند و اراضی شهری شامل مناطق مسکونی و تجاری، همبستگی مثبت و قوی را با چهار شاخص کیفیت آب نشان دادند. به نظر آن‌ها با افزایش اراضی کشاورزی، میزان کیفیت آب، کاهش می‌یابد و بین افزایش مساحت اراضی جنگلی با مقادیر مشخصه‌های کیفیت آب، همبستگی منفی وجود دارد. در یک پژوهش در مناطق شهری شرق ماساچوست در ایالت متحده آمریکا، به منظور ارزیابی میزان و نوع آثار انواع کاربری (اراضی کشاورزی، جنگل، تفریحی، تجاری، صنعتی و مسکونی) روی ۱۴ پارامتر کیفیت آب (کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلر، سولفات، نیتريد پتاسیم، نیتروژن آمونیاک، نیتريت نیتروژن، نیترات به علاوه نیتريت- نیتروژن، فسفر به علاوه فسفات فسفر، باقیمانده خشک و هدایت الکتریکی) از مدل GWR استفاده شد (Tu, 2011). نتایج نامبرده نشان داد که ضرایب مدل GWR در مناطق کشاورزی، مثبت و در مناطق شهرنشین منفی است و کیفیت آب در مناطق حومه شهر نسبت به قسمت‌های مرکزی شهر پایین است. به منظور مقایسه نتایج مدل GWR و OLS تحقیق دیگری در منطقه مذکور انجام

آب در حوزه‌های آبخیز به طور صحیح مدل‌سازی و درک شوند. توسعه و کاربرد مدل‌های رگرسیونی معمولی (OLS)^۱ برای تخمین هر یک از پارامترهای کیفی آب (متغیر وابسته) و درصد انواع کاربری (متغیرهای مستقل) به‌منزله یکی از روش‌های آماری متداول در زمینه مدل‌سازی کیفیت آب با استفاده از نرم‌افزارهای آماری مانند SPSS است. از طرف دیگر، مدل‌های رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR)^۲ از جمله روش‌های نوین در مدل‌سازی مکانی و آنالیز رگرسیون چندمتغیره در محیط GIS است (Zhang & Shi, 2004; Zhang & Griffith, 2000). در این مدل‌ها برخلاف مدل‌های رگرسیونی معمولی، ضرایب یا پارامترهای مدل در سطح منطقه مورد مطالعه، ثابت نیستند و به مختصات مکانی (وزن مکانی و جغرافیایی) وابسته‌اند و مقدار و علامت هر یک از آن‌ها دارای تغییرپذیری مکانی است. به نظر می‌رسد به‌رغم مزیت مدل‌های GWR نسبت به مدل‌های OLS به خصوص در زمینه مدل‌سازی مکانی آثار انواع کاربری اراضی روی پارامترهای کیفیت آب، تاکنون تحقیقات جامع و درخور توجهی در ایران انجام نشده است. در تحقیق حاضر سعی شده است برای تعیین میزان و نوع تأثیر کاربری اراضی (متغیر مستقل) در کاهش، ثبات یا افزایش سطح کیفیت آب‌های سطحی (متغیر وابسته) در مقیاس حوزه آبخیز، مدل‌های مذکور مقایسه و ارزیابی شوند و با کاربرد مدل‌های GWR تغییرات مکانی آثار مثبت یا منفی انواع کاربری اراضی در قالب نقشه‌های رقومی ارائه شود و بر این اساس مناطق آلوده‌کننده کیفیت آب در قسمت‌های مختلف حوزه آبخیز را شناسایی کرد.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، تاکنون تحقیقات اندکی در زمینه کاربرد مدل‌های رگرسیونی GWR و OLS در زمینه مدل‌سازی پارامترهای کیفیت آب و در قیاس حوزه آبخیز در خارج از کشور انجام شده است. استفاده از مدل‌های GWR در ایران به خصوص در زمینه مدل‌سازی پارامترهای کیفیت آب در مراحل مقدماتی قرار دارد. لذا

وابسته استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب تعیین (R^2) در مناطق مسکونی نسبت به اراضی جنگلی و زراعی، دارای مقادیر بزرگ‌تر است و آثار اراضی زراعی و غیرزراعی روی آلودگی آب به ترتیب مثبت و منفی است. همچنین، اراضی جنگلی آثار معنی‌داری را در کاهش آلودگی آب نشان دادند. بنا به نظر آن‌ها مدل GWR از کارایی بسیار خوبی برای تعیین روابط مکانی بین انواع کاربری و شاخص‌های کیفیت آب برخوردار است.

با جمع‌بندی تحقیقات مذکور در خصوص مدل‌سازی آثار کاربری اراضی روی پارامترهای کیفیت آب می‌توان نتیجه گرفت که در مناطقی که روابط مکانی بین متغیرهای وابسته و مستقل، وجود داشته باشد روش رگرسیونی OLS قادر به توصیف روابط مکانی نیست، اما روش GWR براساس مختصات جغرافیایی متغیرهای وابسته و مستقل قادر است روابط مکانی موجود (آثار مثبت یا منفی متغیرهای مستقل) را به خوبی توصیف کند. علاوه بر این، مدل GWR در مدیریت حوزه آبخیز در مقیاس منطقه‌ای، ملی و حتی جهانی مفید و قادر به تعیین همبستگی‌های مختلف مکانی است (Tu & Xia, 2008).

در تحقیق حاضر، سعی شده است تا مدل‌های مذکور برای اولین بار در ایران و به منظور مدل‌سازی آثار انواع کاربری اراضی روی پارامترهای مختلف کیفیت آب رودخانه‌های مختلف واقع در استان فارس، ارزیابی و مقایسه شوند. شایان یادآوری است از نظر زیست‌محیطی، آگاهی از میزان تأثیر مناطق یا منابع آلاینده کیفیت آب رودخانه‌ها در هر حوزه آبخیز از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به اینکه حوزه‌های آبخیز واقع در استان فارس از نظر تنوع کاربری اراضی و وجود آمار بلندمدت پارامترهای کیفیت آب رودخانه‌ها دارای شرایط مطلوب‌اند، لذا این تحقیق در تعدادی از حوزه‌های آبخیز استان فارس اجرا شده است. متدولوژی و نتایج، به‌منزله گام اساسی برای کارشناسان و محققان ایران در مدیریت کیفیت آب و شناسایی مناطق بحرانی و آلوده‌کننده آب، قابل استفاده

شده است (Tu & Xia, 2008). این محققان از هر یک از پارامترهای کیفیت آب (به‌منزله متغیر وابسته) و درصد انواع کاربری اراضی (به‌منزله متغیر مستقل) استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضرایب مدل رگرسیونی GWR دارای تغییرات مکانی و ضرایب مدل OLS برای هر پارامتر کیفیت آب در کل منطقه مورد مطالعه، دارای مقادیر ثابت بودند.

روش‌های OLS و GWR در دره کاتماندو^۴ کشور نپال برای تعیین روابط آماری بین متغیر وابسته (تغییر کاربری زمین) طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ میلادی و متغیرهای مستقل (تغییرات جمعیتی، مساحت اراضی زراعی در سال ۱۹۹۱، میانگین شیب، مساحت اراضی جنگلی در سال ۱۹۹۱، میانگین فاصله سطوح آب (مانند دریاچه) در سال ۱۹۹۱ و میانگین فاصله از جاده‌ها در سال ۱۹۹۱) ارزیابی شد (Thapa & Murayama, 2009). نتایج آن‌ها نشان داد که مدل GWR در تبیین واریانس متغیرهای وابسته از کارایی بیشتری برخوردار بوده است و میزان تغییر کاربری زمین را با خطای کمتری نسبت به مدل‌های رگرسیونی معمولی (OLS) مدل‌سازی می‌کند. در مدل‌سازی آثار پوشش زمین و توپوگرافی روی پارامترهای کیفیت آب در منطقه پرتلند و کلارک واشنگتن، روش‌های رگرسیونی GWR و OLS نشان داد که در فصول مرطوب، پارامترهای کیفیت آب به پوشش اراضی شهری مرتبط است، اما در فصول خشک، بیشتر به عامل‌های توپوگرافی مثل ارتفاع و شیب وابسته و میزان خودهمبستگی مکانی GWR نسبت به OLS کمتر است (Pratt & Chang, 2012). بتازگی از مدل GWR به منظور مدل‌سازی ارتباط بین انواع کاربری اراضی و آلودگی آب در منطقه ساحلی جنوب‌شرقی چین در دوره زمانی ۲۰۱۰-۲۰۱۳ استفاده شده است (Huang, et al., 2015). نامبردگان از درصد اراضی زراعی، جنگل و مناطق مسکونی به‌منزله متغیرهای مستقل و از هفت متغیر کیفیت آب (آمونیم، پرمنگات پتاسیم، فسفات رادیواکتیو محلول، نترات، کلر، سدیم و پتاسیم) به‌منزله متغیرهای

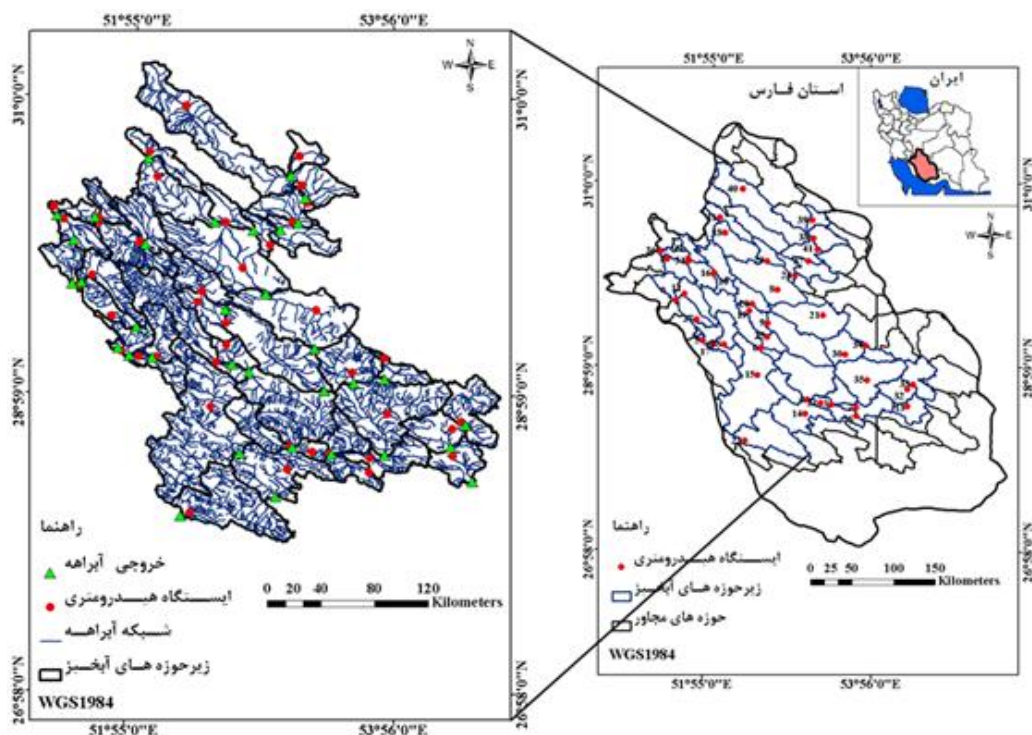
طوری که از نظر موقعیت طبیعی، کوهستانی است و به سه منطقه سردسیر شمالی، گرمسیر جنوبی و معتدل کوهستانی تقسیم می‌شود. در نواحی شمال غرب استان با وجود کوهستانی بودن منطقه و کم‌اهمیت بودن از نظر سکونت و جذب جمعیت، در تأمین منابع آب و تعدیل درجه حرارت استان اهمیت زیادی دارد. در این مناطق پوشش گیاهی جنگل‌ها و مراتع مناسب شکل گرفته و در نواحی مرکزی و غربی استان فارس، دشت‌های حاصل خیزی وجود دارد که برای کشت انواع محصولات کشاورزی استفاده می‌شوند. در برخی از مناطق بیابانی، در اثر تبخیر شدید، نمک روی سطح زمین را پوشانده و کویر (شوره‌زار) به وجود آمده است. نواحی جنوبی و شرقی استان فارس، به علت نزولات پایین جوی، گرمای شدید و خاک غیر حاصلخیز برای کشاورزی دارای محدودیت‌های زیادی است.

خواهد بود. بنابراین، به بخش‌های اجرایی و ترویجی کشور کمک خواهد کرد تا با شناسایی و مدیریت مناطق آلوده‌کننده کیفیت آب، در کاهش آثار منفی تغییرات کاربری اراضی روی پارامترهای کیفیت آب رودخانه‌ها، نقش مهم و برجسته‌ای را ایفا کنند.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۱. منطقه مورد مطالعه

استان فارس از نظر موقعیت جغرافیایی در سمت جنوب و جنوب غرب ایران بین $36^{\circ} 50'$ تا $35^{\circ} 55'$ طول شرقی و $27^{\circ} 03'$ تا $31^{\circ} 40'$ عرض شمالی قرار دارد و دارای ۲۹ شهرستان، ۸۳ بخش و ۹۳ شهر است. این استان به‌منزله پل حد فاصل بین جنوب و مرکز کشور محسوب می‌شود. مساحت تقریبی استان برابر ۱۲۲ هزار کیلومتر مربع و چهارمین استان از نظر مساحت در ایران است. اختلاف ارتفاع و عرض جغرافیایی و ورود توده‌های هوا، سبب تنوع آب و هوایی و محیطی در استان فارس شده است. به



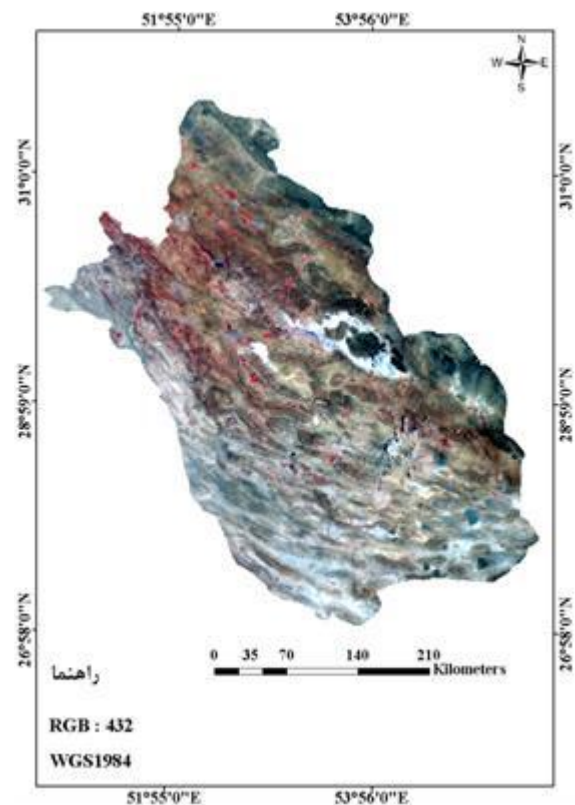
شکل ۱. موقعیت حوزه‌های آبخیز انتخابی در استان فارس

بیکربنات (HCO_3)، سولفات (SO_4)، سدیم (Na)، پتاسیم (K)، کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg) برحسب میلی‌اکی ولانت بر لیتر و سختی کل (TH) برحسب میلی‌گرم بر لیتر هستند. پیش‌پردازش و کنترل کیفیت داده‌ها (شامل شناسایی و حذف داده‌های پرت یا مشکوک)، آزمون همگنی یا تصادفی بودن داده‌ها، آزمون نکویی برآزش کلموگروف-اسمیرنوف برای تأیید نرمال‌بودن داده‌ها انجام شد. از کمیت‌های میانگین بلندمدت هر یک از پارامترهای کیفیت آب به‌منزله مقادیر متغیر وابسته در مرحله مدل‌سازی استفاده شد. شکل ۳ نمودارهای جعبه‌ای سری داده‌های میانگین تعدادی از پارامترهای مربوط به کیفیت آب را برای ایستگاه‌های انتخابی نشان می‌دهد. در این شکل، مقادیر حداقل، حداکثر، چارک اول، میانه و چارک سوم به تفکیک پارامترها نمایش داده شده است. همچنین، این نمودارها بیانگر نبود داده‌های پرت در دوره آماری ۱۳۵۰-۹۰ است. تمام داده‌های کیفیت آب که برای این پژوهش انتخاب شدند، از توزیع نرمال تبعیت کردند و همگنی یا تصادفی بودن آن‌ها براساس آزمون دنباله‌ها تأیید شد.

با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی تصحیح‌شده سنجنده ASTER (اندازه سلول ۳۰ متر) و مختصات ایستگاه‌ها در نرم‌افزار ArcGIS 9.3، مرز حوزه‌های آبخیز استخراج شد. در انتخاب ایستگاه‌های اندازه‌گیری کیفیت آب، شرط به‌هم پیوستگی مکانی مرزها و وجود داده‌های کافی در دوره آماری مذکور ملاک عمل بوده است. به منظور تهیه نقشه کاربری اراضی، از تصاویر ماهواره لندست ۵ در تیرماه ۱۳۸۹ به دلیل تصاویر کامل ماهواره‌ای پوشش‌دهنده استان فارس و مهیا بودن شرایط مطلوب از نظر رشد گیاهان استفاده شد. پس از موزائیک‌کردن ۱۲ فریم تصویر داندوده از سایت ناسا و انجام تصحیحات رادیومتریک و پیش‌پردازش‌های سنجنش از دور در نرم‌افزار Erdas Imagine 9.2 و کاربرد روش حداکثر درست‌نمایی، نقشه کاربری اراضی / پوشش اراضی (LU/LC) تهیه و اعتبارسنجی شد. تصاویر موزائیک‌شده (رنگی مرکب کاذب

۲.۲. داده‌های کیفیت آب و نقشه کاربری اراضی

خصوصیات کیفی آب یکی از مؤلفه‌هایی است که ملاحظه آن در برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب و ارزیابی سلامت حوزه‌های آبخیز کاملاً احساس می‌شود (Elshorbagy & Ormsbee, 2006). در تحقیق حاضر، برای مدل‌سازی مکانی پارامترهای مختلف کیفیت آب (به‌منزله متغیر وابسته) از داده‌های ماهانه ۴۲ ایستگاه هیدرومتری واقع در رودخانه‌های استان فارس در دوره آماری بلندمدت (۱۳۵۰-۹۰) استفاده شد (شکل ۱).



شکل ۲. تصاویر موزائیک‌شده ماهواره لندست ۵ در استان فارس (تیرماه ۱۳۸۹)

شاخص‌ها یا پارامترهای کیفیت آب شامل باقیمانده خشک (TDS) برحسب میلی‌گرم بر لیتر، هدایت الکتریکی (EC^5) برحسب میکروموس بر سانتی‌متر، اسیدیته (P^{H}) برحسب مول بر لیتر، نسبت جذب سدیم (SAR)، آنیون و کاتیون‌های مختلف شامل کلر (Cl)، کربنات (CO_3).

تصویر متریک لامبرت کانفورمال کونیک بر مبنای اسفروئید WGS1984 استفاده شد.

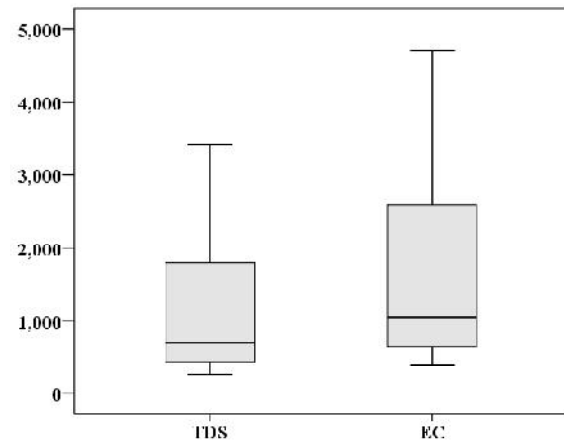
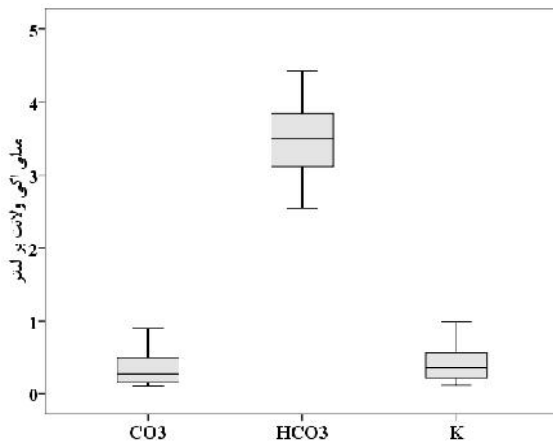
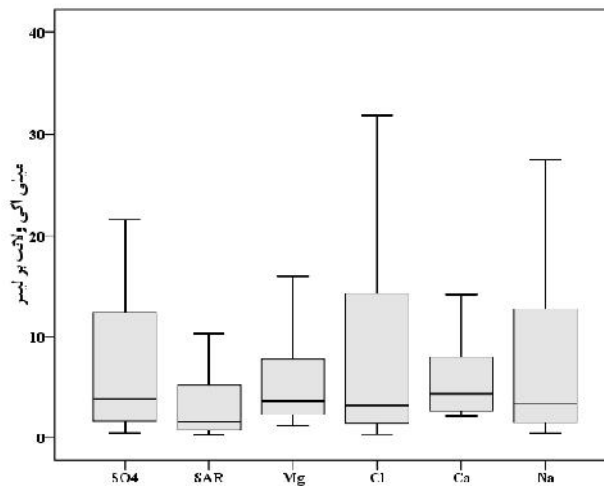
مادون قرمز) با ترکیب باندها RGB432 استان فارس در شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به وسعت زیاد استان فارس، در کلیه تصاویر و نقشه‌های رقومی از سیستم

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری استان فارس دارای داده‌های بلندمدت کیفیت آب

ردیف	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	ردیف	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)
۱	آب مروارید	۵۱° ۲۳'	۳۰° ۱۰'	۸۰۰	۲۲	حکان	۵۳° ۱۸'	۲۸° ۳۶'	۹۳۳
۲	بابا عرب	۵۳° ۴۵'	۲۸° ۳۴'	۱۰۹۵	۲۳	دژگاه	۵۲° ۲۳'	۲۸° ۱۱'	۲۳۳
۳	باغ اوز اقبال آباد	۵۳° ۲۷'	۲۸° ۳۶'	۹۸۰	۲۴	دشت بال	۵۲° ۵۸'	۳۰° ۰۰'	۱۶۶۰
۴	براک	۵۳° ۰۸'	۲۸° ۳۹'	۸۶۵	۲۵	سرچشمه	۵۲° ۳۹'	۲۹° ۲۰'	۱۵۰۰
۵	برگ شیرین	۵۱° ۵۱'	۲۹° ۱۷'	۶۷۰	۲۶	سروو	۵۳° ۴۴'	۲۸° ۲۸'	۱۳۷۰
۶	بند بهمن	۵۲° ۳۴'	۲۹° ۱۲'	۱۷۰۰	۲۷	شهرنجان	۵۱° ۴۶'	۲۹° ۳۱'	۸۲۰
۷	بوشیگان	۵۱° ۳۰'	۲۹° ۴۳'	۷۱۴	۲۸	شیب تنگ	۵۲° ۰۶'	۲۹° ۱۴'	۹۲۰
۸	پل خان	۵۲° ۴۶'	۲۹° ۵۱'	۱۶۰۶	۲۹	ضرغام آباد	۵۲° ۳۸'	۳۰° ۱۰'	۱۶۱۰
۹	پل فسا	۵۲° ۳۹'	۲۹° ۲۹'	۱۴۷۶	۳۰	قمپ آتشکده	۵۳° ۳۷'	۲۹° ۰۹'	۱۵۰۰
۱۰	تلمبه حسنی	۵۱° ۵۸'	۳۰° ۰۱'	۱۵۴۵	۳۱	کوسنگان	۵۱° ۳۹'	۳۰° ۰۹'	۱۰۶۶
۱۱	تنگ براق	۵۲° ۰۲'	۳۰° ۳۸'	۱۹۰۰	۳۲	کرسياه	۵۴° ۲۳'	۲۸° ۴۶'	۱۱۰۰
۱۲	تنگ چوگان	۵۱° ۳۶'	۲۹° ۴۷'	۸۷۰	۳۳	گوزون	۵۴° ۲۷'	۲۸° ۴۹'	۱۲۳۹
۱۳	تنگ خسویه	۵۴° ۲۳'	۲۸° ۳۵'	۱۰۶۵	۳۴	مافرخان	۵۳° ۵۲'	۲۹° ۱۵'	۱۸۰۰
۱۴	تنگ کارزین	۵۳° ۰۷'	۲۸° ۲۹'	۷۶۰	۳۵	واصل آباد	۵۳° ۵۳'	۲۸° ۵۲'	۱۳۵۰
۱۵	تنگاب	۵۲° ۳۲'	۲۸° ۵۴'	۱۳۷۶	۳۶	باتون	۵۱° ۱۸'	۳۰° ۱۵'	۷۵۴
۱۶	توکل آباد	۵۱° ۵۸'	۳۰° ۰۱'	۱۵۳۷	۳۷	تنگ بلاغی	۵۳° ۰۹'	۳۰° ۱۰'	۱۸۲۰
۱۷	جره	۵۱° ۵۸'	۲۹° ۱۴'	۷۸۰	۳۸	چم بیان	۵۳° ۱۳'	۳۰° ۲۵'	۲۰۵۰
۱۸	چمریز	۵۲° ۰۶'	۳۰° ۲۸'	۱۷۹۷	۳۹	ده بید	۵۳° ۱۲'	۳۰° ۳۷'	۲۳۰۰
۱۹	چناراهدار	۵۲° ۲۵'	۲۹° ۳۷'	۱۶۳۷	۴۰	شادکام	۵۲° ۱۹'	۳۰° ۵۷'	۲۳۴۰
۲۰	چنارسوخته	۵۲° ۲۷'	۲۹° ۴۱'	۱۶۵۰	۴۱	قادرآباد	۵۳° ۱۶'	۳۰° ۱۸'	۱۹۱۰
۲۱	حسن آباد	۵۳° ۲۰'	۲۹° ۳۴'	۱۶۰۰	۴۲	گراب	۵۱° ۳۹'	۳۰° ۱۰'	۱۰۲۰

شایان یادآوری است با فرض ثابت ماندن مشخصات توپوگرافی، اقلیم، زمین‌شناسی و خاک‌شناسی حوزه‌های آبخیز در دوره زمانی مذکور، آثار انواع کاربری اراضی روی پارامترهای کیفیت آب، مدل‌سازی شده است. لذا در این مرحله از تحقیق، عدم قطعیت مدل‌ها اجتناب‌ناپذیر است. همچنین، استخراج شاخص خودهمبستگی موران^۷ (Anselin, et al., 2006) با استفاده از نرم‌افزار GeoDa^۷ انجام شد.

برای مدل‌سازی مکانی از درصد انواع کاربری در حوزه‌های آبخیز انتخابی به‌منزله متغیرهای مستقل (X_1, X_2, X_7) شامل خاک لخت، مراتع، اراضی آیش، اراضی کشاورزی، باغات، مناطق مسکونی و جنگل استفاده شد. از مقادیر میانگین پارامترهای کیفیت آب واقع در هر زیرحوزه به‌منزله متغیر وابسته (Y) در مرحله مدل‌سازی استفاده شد. مراحل مدل‌سازی در نسخه چهارم نرم‌افزار GWR4^۷ و تهیه نقشه‌های رقومی در نرم‌افزار ArcGIS 9.3 انجام شد.



شکل ۳. نمودارهای جعبه‌ای داده‌های میانگین تعدادی از پارامترهای کیفیت آب در کلیه ایستگاه‌های انتخابی

خطی است. مبنای روش OLS این است که ضرایب مدل به گونه‌ای برآورد می‌شوند که مجموع مربعات خطای بین مقادیر برآوردشده و مشاهده‌ای برای متغیر وابسته باید

۳.۲. روش‌های رگرسیونی چندمتغیره OLS و GWR

روش حداقل مربعات معمولی یا OLS به‌منزله ساده‌ترین و مرسوم‌ترین روش در بین روش‌های رگرسیون چندمتغیره

منطقه، مثبت، اما در بخشی دیگر منفی شود، مدل GWR قادر به ارائه روابط مکانی معتبر است (Zhang & Shi, 2000; Zhang & Griffith, 2004). این روش، کاربردهای متنوعی از جمله آشکارکردن و تحلیل متغیرها در مقیاس محلی دارد و در مدل‌سازی مکانی رشته‌هایی مانند برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، محیط‌شناسی، ژئوماتیک، جغرافیا و غیره استفاده شده است.

بر اساس نتایج تحقیقات (Brunsdon, et al., 1996; Fotheringham, et al., 1996; Fotheringham, et al., 2002; Jarvie, et al., 2001)، روش GWR برای مدل‌سازی فرایندهای ناهمگن مکانی مانند پارامترهای کیفیت آب رودخانه، بسیار مناسب و بر این ایده استوار است که پارامترها یا ضرایب مدل در هر نقطه معین در سطح منطقه (نقطه هدف) قابلیت برآورد دارند. در برآورد ضرایب مدل، ابتدا باید یک فاصله مکانی به منزله پهنای باند تعیین شود. در اطراف هر نقطه هدف، تعداد نقاط مشاهداتی (ایستگاه‌های اندازه‌گیری کیفیت آب) بر اساس پهنای باند انتخاب می‌شوند و بر اساس میزان فاصله مکانی نسبت به نقطه هدف، وزن آن‌ها برآورد می‌شود. مبنای وزن‌دهی در روش GWR به گونه‌ای است که نقاط نزدیک‌تر به نقطه هدف دارای وزن بیشتری خواهند بود (Tu & Xia, 2008). با توجه به میزان پراکنش مکانی نقاط مشاهداتی (ایستگاه‌های هیدرومتری)، پهنای باند طوری انتخاب می‌شود که تعداد نقاط مشاهداتی اطراف نقاط هدف در سطح منطقه تا حد امکان به یک اندازه باشند تا میزان کارایی مدل در مقیاس منطقه‌ای نیز افزایش یابد (Paez, et al., 2002). به عبارت دیگر، چنانکه نقاط مشاهداتی، پراکنده باشند، پهنای باند بزرگ‌تری در نظر گرفته می‌شود و اگر مشاهدات حول نقطه هدف، متراکم باشند، پهنای باند کوچک‌تری انتخاب می‌شود (سوری و منیرجاوید، ۱۳۹۰). بنابراین، انتخاب پهنای باند بهینه در این روش، بسیار مهم است. روش رگرسیون وزنی جغرافیایی در واقع همان روش حداقل مربعات معمولی است با این تفاوت که به مشاهدات بر اساس مکان یا

حداقل شود. در واقع، مدل رگرسیونی باید دارای کمترین انحراف یا خطا و بیشترین مشابهت با مقادیر مشاهده‌ای متغیر وابسته باشد (Tu & Xia, 2008). این روش OLS با این فرض که ضرایب رابطه رگرسیونی نسبت به مکان ثابت است، در حالت یک‌متغیره به شکل زیر است:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

که y_i : متغیر وابسته (برآوردشده)، x_i : متغیر مستقل (برآوردکننده) و ε_i : بیانگر خطا یا انحراف مدل است. ضرایب بتا در واقع ضرایب یا پارامترهای مدل رگرسیونی‌اند که مقادیر آن‌ها در کل منطقه ثابت است و تغییرات مکانی ندارند. مدل رگرسیونی چندمتغیره OLS و ماتریس تخمین ضرایب مدل با روابط زیر ارائه شده است:

$$[Y]_{n \times 1} = [X]_{n \times k} [\hat{\beta}]_{k \times 1} + [\varepsilon]_{n \times 1} \quad (2)$$

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (3)$$

که X^T : به مفهوم ترانزاده ماتریس X است. در ماتریس X تعداد ستون $k = 1 + m$ است که m بیانگر تعداد متغیرهای مستقل است و عناصر ستون اول ماتریس X برابر یک است و تعداد سطر آن برابر تعداد زیرحوزه‌های آبخیز (n) است. علاوه بر این، ماتریس Y (متغیر وابسته) برای هر پارامتر کیفیت آب مانند EC دارای m سطر و یک ستون است. لذا در مدل OLS برای هر پارامتر کیفیت آب، تعداد k ضریب بتا برآورد می‌شود.

یکی از روش‌های جدید برای دستیابی به دقت بالاتر در تحلیل روابط مکانی، روش رگرسیون وزنی جغرافیایی یا GWR است و زمانی که همبستگی مکانی بین متغیرهای مستقل وجود داشته باشد، از کارایی زیادی برخوردار است (Fotheringham, et al., 1997). در این مدل، ضرایب مدل (بتا) بر اساس مختصات جغرافیایی نقاط اندازه‌گیری تخمین زده می‌شوند. در واقع، ضرایب مدل برای هر نقطه از منطقه (پیکسل پایه) برآورد شده و مقدار و علامت ضرایب مدل GWR در پیکسل‌ها یا نقاط مختلف منطقه، متفاوت است. اگر ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته در بخشی از یک

که h بیانگر پهنای باند است که در بالا تعریف شد. مقدار di فاصله یک نقطه مشاهداتی i واقع در فاصله جستجو یا پهنای باند است. این فاصله در واقع فاصله اقلیدسی یا هندسی بین دو نقطه هدف و مشاهداتی است. روش رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR)، زمانی که $u = \beta_{0i}(u) + \beta_{1i}(u)x_{1i} + \beta_{2i}(u)x_{2i} + \dots + \beta_{mi}(u)x_{mi} + \varepsilon_i$ جایگزینی مناسب برای رگرسیون معمولی است. در این روش $\beta_{0i}(u) = \beta_{0i}(u) + \beta_{1i}(u)x_{1i} + \beta_{2i}(u)x_{2i} + \dots + \beta_{mi}(u)x_{mi} + \varepsilon_i$ برای هر یک از متغیرهای کیفیت آب، ضرایب مدل (بتا) برای هر یک از متغیرهای مستقل (درصد انواع کاربری اراضی در هر یک از زیرحوزه‌های آبخیز) به دست می‌آید و می‌توان تغییرات مکانی این ضرایب را به صورت نقشه با رنگ‌های تدریجی آبی (کمترین) تا قرمز (بیشترین) در راهنمای نقشه‌ها نمایش داد. طبق تعریف، مقدار منفی و مثبت ضرایب مدل به ترتیب بیانگر اثر کاهنده و افزایش‌دهنده متغیرهای مستقل (درصد انواع کاربری اراضی) روی متغیر وابسته پارامتر کیفیت آب است. براساس نقشه‌های رقوم ضرایب مدل GWR می‌توان به میزان تأثیر انواع کاربری اراضی روی پارامترهای کیفیت آب در منطقه مورد مطالعه پی برد.

۴.۲. معیارهای ارزیابی مدل

در مرحله مدل‌سازی هر یک از روش‌های رگرسیونی از معیارهای مختلف آماری استفاده شد. ضریب تعیین (R^2) یکی از معیارهای پرکاربرد در ارزیابی مدل‌های آماری است. ضریب تعیین، درصد واریانس یک متغیر وابسته را که از طریق متغیرهای مستقل توصیف می‌شود بیان می‌کند. مقدار عددی این ضریب از صفر تا یک تغییر می‌کند. مقدار صفر یعنی استفاده از متغیر (های) مستقل در برآورد متغیر وابسته هیچ نقشی ندارد و مقدار یک بیانگر تخمین ۱۰۰ درصد واریانس متغیر وابسته از طریق متغیر (های) مستقل است. یکی از معیارهای متداول برای تشخیص خودهمبستگی مکانی، استفاده از شاخص موران (Moran's I) است که برای تشخیص درجه خوشه‌بندی یا پراکندگی

مختصات مکانی آن‌ها نسبت به نقاط هدف وزن داده می‌شود. هر پارامتر یا ضریب مدل GWR دارای یک علامت و مقدار است (Tu & Xia, 2008). مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

(۴)

$$u = \beta_{0i}(u) + \beta_{1i}(u)x_{1i} + \beta_{2i}(u)x_{2i} + \dots + \beta_{mi}(u)x_{mi} + \varepsilon_i$$

$$\beta_{0i}(u) = \beta_{0i}(u) + \beta_{1i}(u)x_{1i} + \beta_{2i}(u)x_{2i} + \dots + \beta_{mi}(u)x_{mi} + \varepsilon_i$$

$\beta_{0i}(u)$: نشان‌دهنده عرض از مبدأ، $\beta(u)$: ضرایب

مدل در نقطه i با مختصات مکانی u و ε_i : بیانگر خطای تصادفی است. در این روابط u به منزله مختصات x و y نقطه i در سیستم تصویر متریک مانند UTM است. لذا برای سادگی بیشتر در روابط مذکور از u به جای $u(x,y)$ استفاده شده است.

در صورتی که مؤلفه وزن نقاط مشاهدات در معادله رگرسیون وارد شود، رابطه بردار پارامترهای ارزیابی به یک رابطه رگرسیون وزنی جغرافیایی تبدیل می‌شود. براساس اصل توبلر در علم جغرافیا، نقاط مجاور از نظر مکانی، دارای مشابهت بیشتری بوده‌اند و در واقع در تخمین ویژگی نقاط نزدیک به آن‌ها (در اینجا کیفیت آب) نسبت به نقاط دورتر وزن بیشتری دارند (Tobler, 1970). ضرایب یا پارامترهای مدل با رابطه زیر برآورد می‌شوند:

$$\hat{\beta}(u) = (X^T W(u) X)^{-1} X^T W(u) y \quad (5)$$

که در آن $W(u)$ ماتریس وزن است ($n \times n$) که درایه‌های این ماتریس به جز عناصر قطری برابر صفر هستند. برای مثال، اگر در اطراف نقطه هدف، به تعداد n نقطه مشاهداتی در فضای جستجو (پهنای باند) وجود داشته باشد، تعداد n وزن براساس فاصله هندسی آن‌ها از نقطه هدف با استفاده از رابطه زیر برآورد می‌شوند:

$$W_i(u) = e^{-0.5(di(u)/h)^2} \quad (6)$$

هم تفاوت مقادیر AICc دو مدل بیشتر از عدد سه باشد (Fotheringham, et al., 2002; Wang, et al., 2005). معیار تصحیح‌شده اطلاعات آکائیکه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$AICc = AIC + \frac{2k(k+1)}{n-k-1} \quad (9)$$

$$AIC = 2k - 2\ln(L) \quad (10)$$

که k : بیانگر تعداد متغیرهای مستقل در مدل رگرسیونی، n : تعداد نقاط داده یا مشاهدات و L : مقدار حداکثر درست‌نمایی تابع مدل است و مقدار آن از رابطه زیر برآورد می‌شود (Kenneth, et al., 2004, Pages: 11-):

$$L = -n/2 \ln(\hat{\sigma}^2) - n/2 \ln(2\pi) - n/2 \quad (11)$$

که در این رابطه عبارت $\hat{\sigma}^2$: معادل میانگین مجموع مربعات باقی‌مانده تقریب زده است (Kenneth, et al., 2004, Page: 109).

به منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های رگرسیونی از ضریب کارایی نش-ساتکیلف نیز استفاده شد. این ضریب از رایج‌ترین شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل‌های هیدرولوژیکی است (Nash & Sutcliffe, 1970). دامنه تغییرات این ضریب از $-\infty$ تا $+1$ و مقدار بهینه آن یک است. این شاخص حالت استاندارد از تابع حداقل مربعات خطاست و طبق رابطه ۱۲ تخمین زده می‌شود:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

که S_i : مقادیر برآوردشده متغیر، O_i : مقادیر مشاهداتی، \bar{O} : میانگین داده‌های مشاهداتی و n : تعداد نمونه‌هاست.

کاربرد دارد. مقدار شاخص یا آماره موران نشان می‌دهد که نواحی مجاور در یک لایه رستری، دارای ارزش‌های مشابه یا غیرمشابه‌اند. آماره I براساس مفهوم کواریانس و وزن‌دهی براساس میزان مجاورت نقاط نمونه (مشاهدات زمینی)، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I = \frac{n}{S_o} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (7)$$

$$S_o = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} \quad (8)$$

در این روابط، $w_{i,j}$: وزن مکانی بین دو متغیر i و j : n : تعداد کل صفات (متغیرها)، S_o : مجموع وزن‌های مکانی، z_i : انحراف معیار متغیر i و z_j : بیانگر انحراف معیار متغیر j است. مقدار آماره I موران بین -1 و $+1$ متغیر است. هرچه مقدار I به صفر نزدیک‌تر باشد، بیانگر الگوی تصادفی است. مقدار نزدیک به $+1$ نشان می‌دهد که نواحی با ارزش‌های مشابه دارای الگویی خوشه‌ای‌اند و مقدار -1 نشان می‌دهد که نواحی ————— ارزش‌های غیرمشابه (Dispersed) در کنار یکدیگر قرار دارند. در روش GWR انتظار می‌رود میزان خودهمبستگی مکانی نسبت به روش OLS کاهش یابد (Ishizawa & Stevens, 2007).

برای سنجش میزان کارایی نسبی مدل‌های GWR نسبت به مدل‌های OLS، از معیار تصحیح‌شده اطلاعات آکائیکه (AICc) استفاده شد. این معیار نشان می‌دهد که استفاده از مدل آماری به چه میزان سبب از دست رفتن اطلاعات می‌شود. به عبارت دیگر، این معیار تعادلی میان صحت مدل و پیچیدگی آن برقرار می‌کند. ارزش کم این معیار نشان‌دهنده این است که مقدار تخمینی مدل به واقعیت نزدیک است (Wang, et al., 2005). از نظر آماری به شرطی مدل GWR به منزله مدل کارا تر تعریف می‌شود که هم معیار AICc آن نسبت به مدل OLS کمتر باشد و

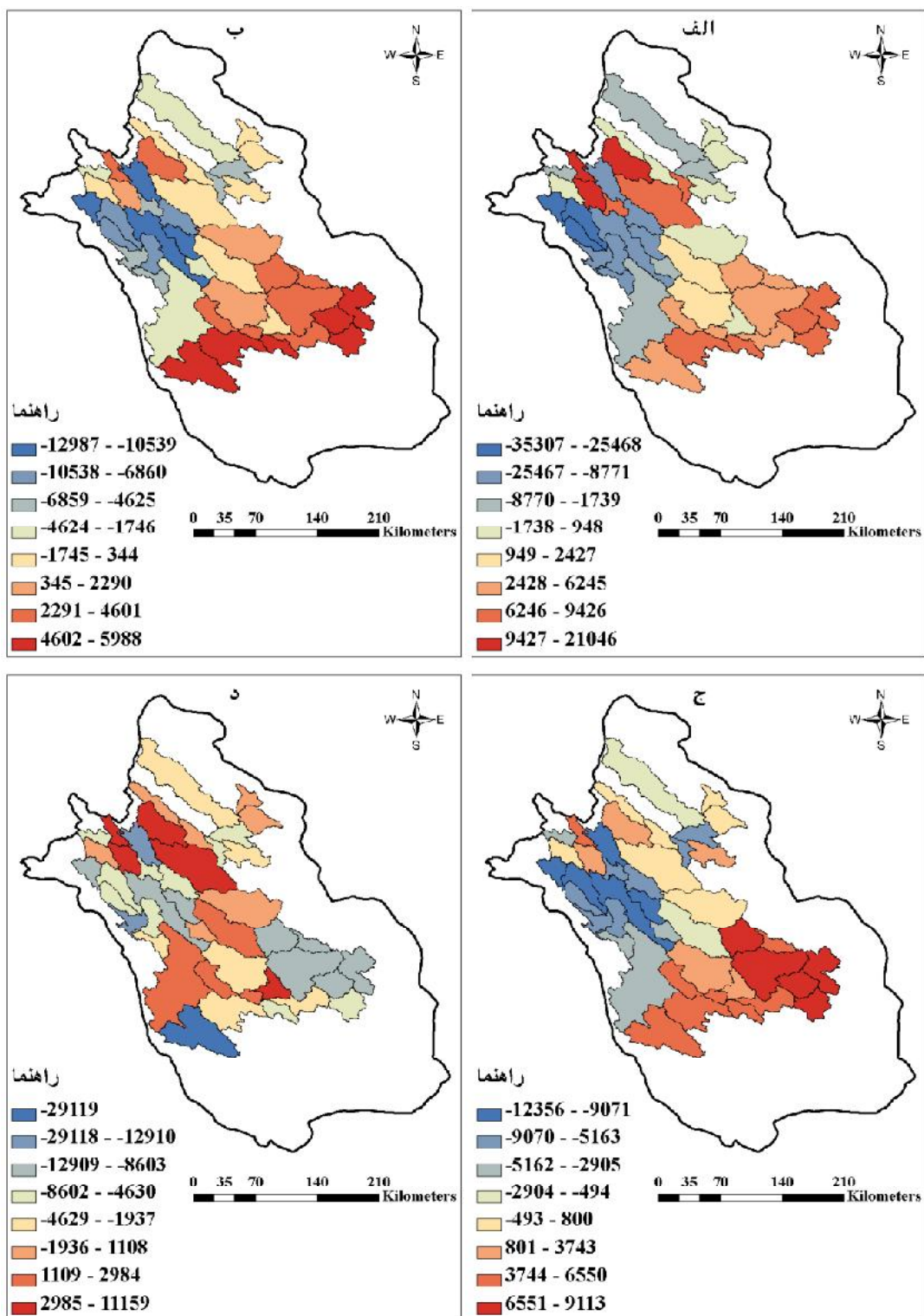
۳. نتایج و بحث

۴۲ حوزه آبخیز انتخاب شده در مرحله مدل‌سازی با هم تفاوت دارند و در واقع ناهمگنی مکانی وجود دارد، لذا نتایج مدل OLS قادر نیست میزان تغییرپذیری مکانی را در منطقه نشان دهد. بدیهی است ارائه ضرایب ثابت رگرسیونی برای هر پارامتر کیفیت آب برای تمام حوزه‌ها با توجه به ناهمگنی مکانی، معقول و منطقی نیست. به منظور درک بهتر تأثیرات مکانی انواع کاربری اراضی روی پارامترهای کیفیت آب، مقادیر ضرایب β برای هر یک حوزه آبخیز در مدل GWR به تفکیک هر پارامتر کیفیت آب محاسبه و پس از انتقال نتایج به نرم‌افزار ArcGIS 9.3 نقشه‌های رقومی این ضرایب تهیه شد. به دلیل تعداد زیاد نقشه‌ها، فقط نتایج مدل GWR برای دو پارامتر هدایت الکتریکی و کلر در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

مقادیر β یا ضرایب متغیرهای مستقل (درصد کاربری اراضی) در مدل‌های رگرسیونی OLS به تفکیک برای پارامترهای مختلف کیفیت آب در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق این جدول، علامت این ضرایب برای انواع کاربری‌ها در برآورد پارامتر کلسیم مثبت است. همچنین، تأثیرات مثبت انواع کاربری اراضی روی پارامترهای کلر، سدیم، منیزیم، نسبت جذب سدیم، باقیمانده خشک و هدایت الکتریکی (غیر از اراضی کشاورزی)، سولفات (غیر از باغات) و کربنات (غیر از باغات و مناطق مسکونی) مشاهده می‌شود. بیشترین مقدار این ضرایب (با علامت مثبت) در اغلب پارامترها مربوط به کاربری باغات و مناطق مسکونی است که بیانگر نقش فعالیت‌های انسانی در افزایش مقدار شاخص‌های آلاینده آب است. درصد انواع کاربری‌ها در

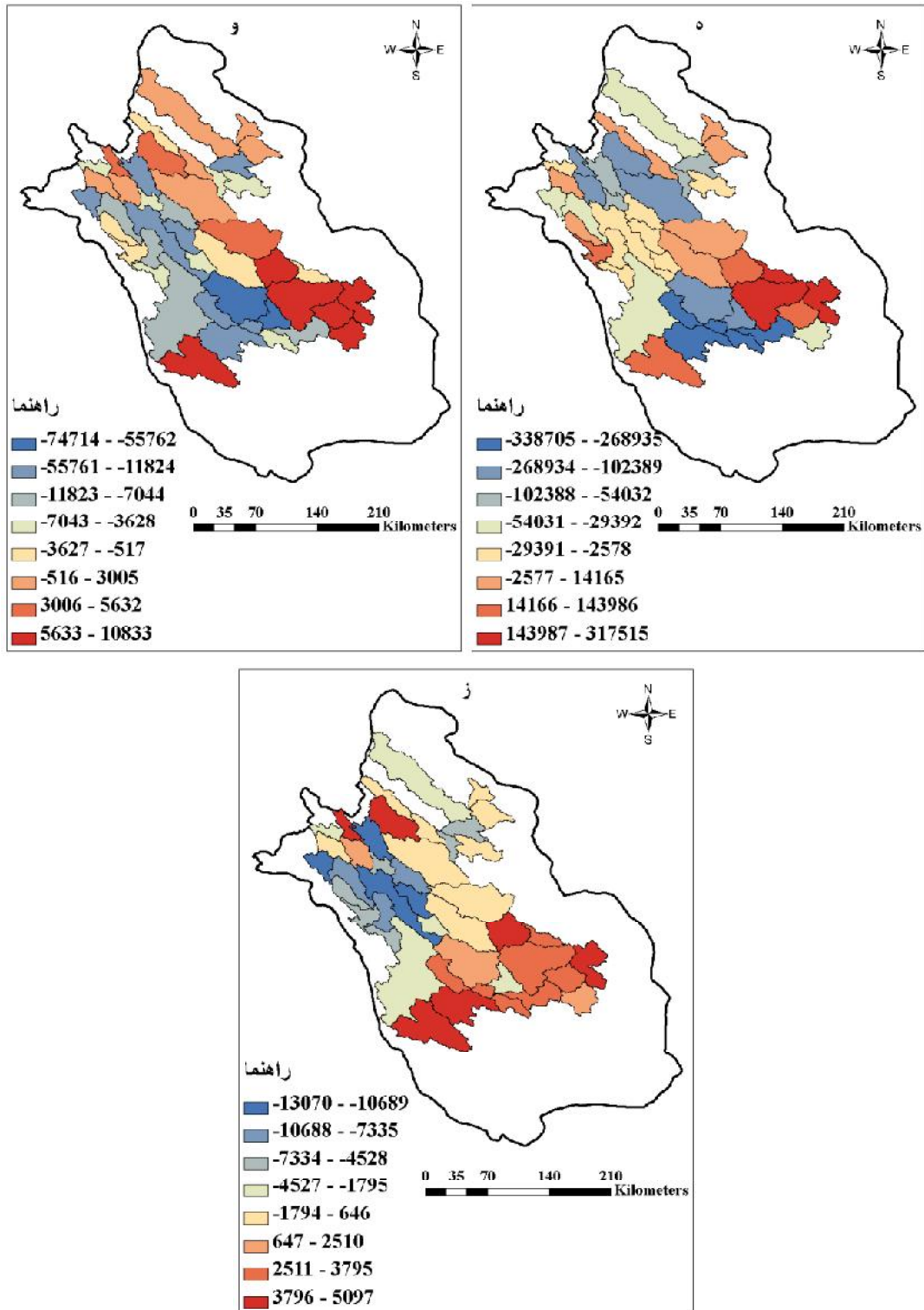
جدول ۲. ضرایب β و β_0 مدل رگرسیونی OLS برای هر یک از پارامترهای کیفیت آب

ضریب β_0	ضرایب β							پارامتر کیفیت آب
	جنگل	مناطق مسکونی	باغات	اراضی کشاورزی	اراضی آیش	مراتع	خاک لخت	
-۱۷۹/۲۶۴	۱/۷۲	۷/۸۶۸	۳۵/۸۸	۰/۵۰۹	۲/۰۶۸	۱/۸۴۵	۱/۹۰۷	کلسیم
-۳۱۴/۱۰۷	۲/۹۳۱	۹/۵۰۷	۱۳۲/۵۳۵	-۰/۳۹۶	۵/۰۶۲	۳/۲۰۲	۳/۳۶۷	کلر
-۴۰۶۱۸/۵۸۱	۳۶۶/۳۸۸	۱۰۵۱/۲۴۸	۸۰۰۲/۰۴۶	-۳۹/۵۸۲	۶۱۵/۷۷۲	۴۲۴/۳۵۸	۴۳۸/۱۳۶	هدایت الکتریکی
-۴/۷۶۰	۰/۰۴۶	-۰/۰۱۳	-۰/۳۲۹	۰/۰۷۵	۰/۰۵	۰/۰۴۹	۰/۰۸	کربنات
۴۵/۲۸۱	-۰/۳۹۲	-۰/۳۵۵	-۲/۷۶۵	-۰/۲۴۱	-۰/۴۵	-۰/۴۱۸	-۰/۴۳	بیکربنات
-۱/۰۴۲	۰/۰۰۹	۰/۰۴۵	۰/۲۱۸	۰/۰۰۱	۰/۰۱۸	۰/۰۱۲	۰/۰۱۱	پتاسیم
-۷۷/۱۲۸	۰/۶۲۵	۲/۳۸۷	۸/۰۰۹	-۰/۳۵۶	۱/۰۱۷	۰/۸۳۵	۰/۸۶۳	منیزیم
-۲۹۲/۵۶۱	۲/۶۱۷	۴/۵۷	۷۶/۹۱۴	-۰/۱۰۲	۴/۷۳۶	۳/۰۰۷	۳/۱۲۲	سدیم
۸/۸۴۹	-۰/۰۱۱	-۰/۱۱۷	-۱/۰۱۵	۰/۰۰۵	-۰/۰۱۱	-۰/۰۰۹	-۰/۰۱	اسیدیته
۱۱۶۵/۲۱۷	۲/۷۵۲	۱۹۶/۴۵۹	۷۷۶/۵۶۹	-۳۴/۵۶۸	-۱۳/۴۲۵	-۱۱/۳	-۱۰/۱۴۴	سختی کل
-۲۶/۹۳۹	۰/۲۱۶	-۰/۲۴۸	۵/۰۶۸	-۰/۲۳۳	۰/۷۵۳	۰/۲۹۶	۰/۲۹۵	نسبت جذب سدیم
-۲۶۲/۸۰۸	۲/۲۴۶	۵/۳۸۳	-۱۳/۳۰۹	۰/۵۳۶	۳/۰۰۶	۲/۷۳۵	۲/۷۸	سولفات
-۲۱۶۲۲/۳۴۵	۱۸۶/۱۶۶	۵۶۵/۲۸۳	۲۷۷۶/۷۷۶	-۱۰/۸۳۳	۳۳۵/۶۲۶	۲۲۹/۴۱۸	۲۳۰/۶۴۷	باقیمانده خشک



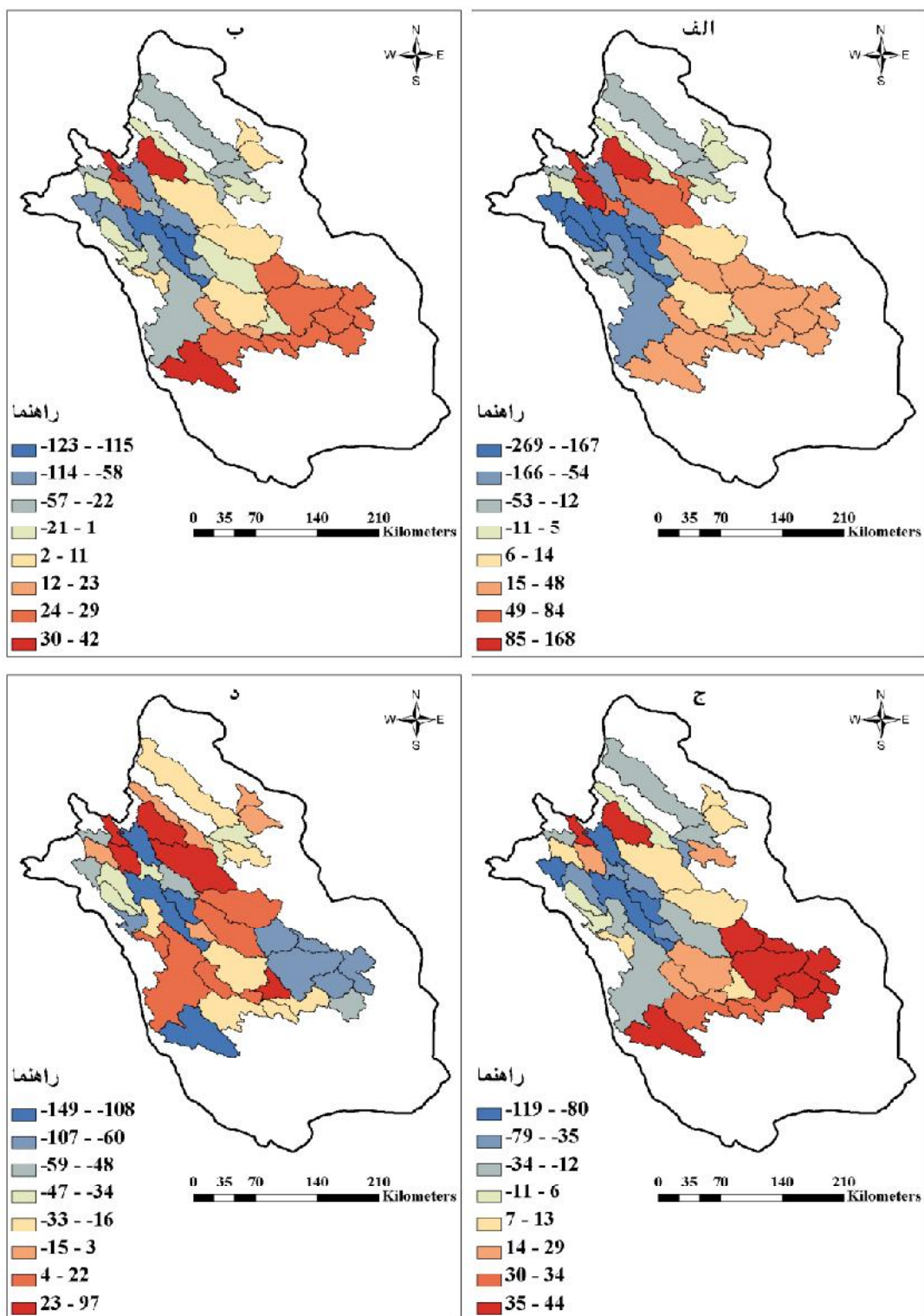
شکل ۴. نقشه تغییرات مکانی ضریب β برای انواع کاربری اراضی در مدل GWR برای تخمین هدایت الکتریکی (EC)

(الف) خاک لخت؛ (ب) مراتع؛ (ج) اراضی آیش؛ (د) اراضی کشاورزی



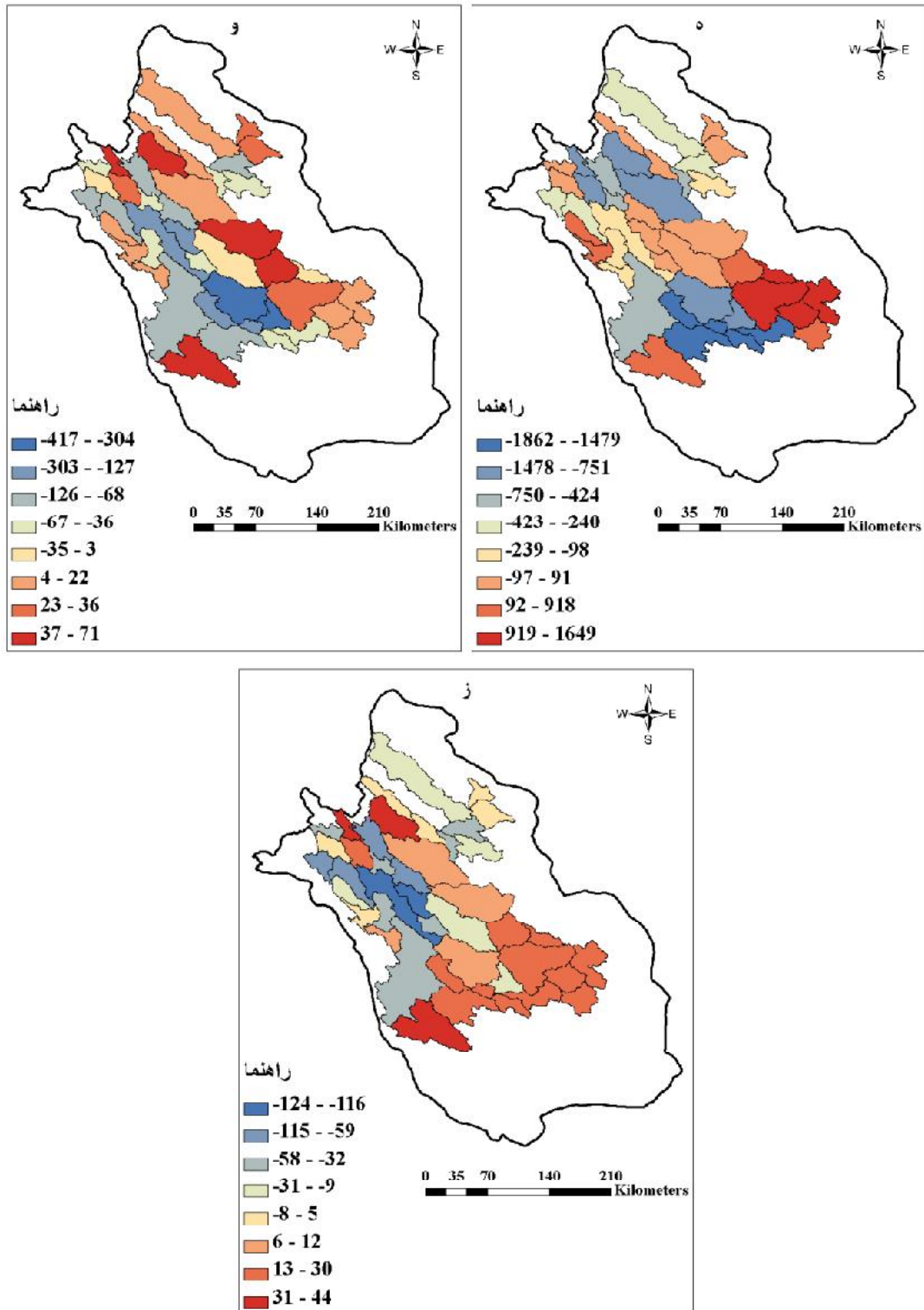
ادامه شکل ۴. نقشه تغییرات مکانی ضریب β برای انواع کاربری اراضی در مدل GWR برای تخمین هدایت الکتریکی (EC)

(ه) باغات؛ (و) مناطق مسکونی؛ (ز) جنگل



شکل ۵. نقشه تغییرات مکانی ضریب β برای انواع کاربری اراضی در مدل GWR برای تخمین کلو (Cl)

(الف) خاک لخت؛ (ب) مراتع؛ (ج) اراضی آیش؛ (د) اراضی کشاورزی



ادامه شکل ۵. نقشه تغییرات مکانی ضریب β برای انواع کاربری اراضی در مدل GWR برای تخمین کلر (CI)

(ه) باغات؛ (و) مناطق مسکونی؛ (ز) جنگل

مدل شامل ضریب تعیین (R^2)، شاخص موران (I) و معیار تصحیح شده اطلاعات آکائیکه (AICc) در جدول ۳ نشان داده شده است. در مدل OLS یک ضریب تعیین برای هر متغیر کیفیت آب به دست می‌آید، اما در مدل GWR مقدار میانگین ضرایب تعیین حوزه‌های مختلف برای هر متغیر وابسته محاسبه می‌شود. مطابق جدول ۳، مقدار میانگین این ضریب در GWR در تمام پارامترهای کیفیت آب، بیشتر از ۹۶ درصد و مقادیر حداکثر و حداقل این ضریب به ترتیب مربوط به متغیرهای کربنات و بی‌کربنات است. در مدل OLS مقادیر ضرایب تعیین، کوچک‌تر است و حداقل آن برابر $0/0846$ (منیزیم) و حداکثر آن برای متغیر کربنات ($0/5814$) به دست آمد. نقشه‌های رقومی تغییرات مکانی ضرایب تعیین حوزه‌های آبخیز در مدل GWR برای تمام پارامترهای کیفیت آب محاسبه شد، اما به دلیل زیادبودن تعداد آن‌ها فقط نقشه‌های R^2 برای دو پارامتر هدایت الکتریکی و کلر ارائه شده است (شکل ۶). در تمام پارامترهای کیفیت آب، مقادیر ضریب تعیین در قسمت‌های جنوب شرقی استان فارس بزرگ‌تر و در قسمت‌های شمال غربی کوچک‌ترند. از مقادیر ضریب تعیین در جدول مذکور می‌توان نتیجه گرفت که در تمام متغیرهای کیفیت آب، مقدار این ضریب در GWR نسبت به OLS بزرگ‌تر است. این موضوع بیانگر دقت بالاتر GWR در تبیین درصد بالاتر واریانس متغیرهای وابسته است که با نتایج محققان دیگر هم‌خوانی دارد (Foody, 2003; Yu & Wu, 2005).

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد در محاسبه شاخص موران I فرض می‌شود که بین متغیرها خودهمبستگی مکانی وجود دارد (فرض صفر) که باید آزمون آماری شود. مقادیر شاخص موران برای مدل GWR در جدول ۴ نشان می‌دهد که فرض وجود خودهمبستگی مکانی برای پارامترهای کلسیم، هدایت الکتریکی، پتاسیم، منیزیم، سولفات و باقیمانده خشک، در سطح معنی‌داری ۵ درصد رد می‌شود و در بقیه پارامترها، میزان خودهمبستگی

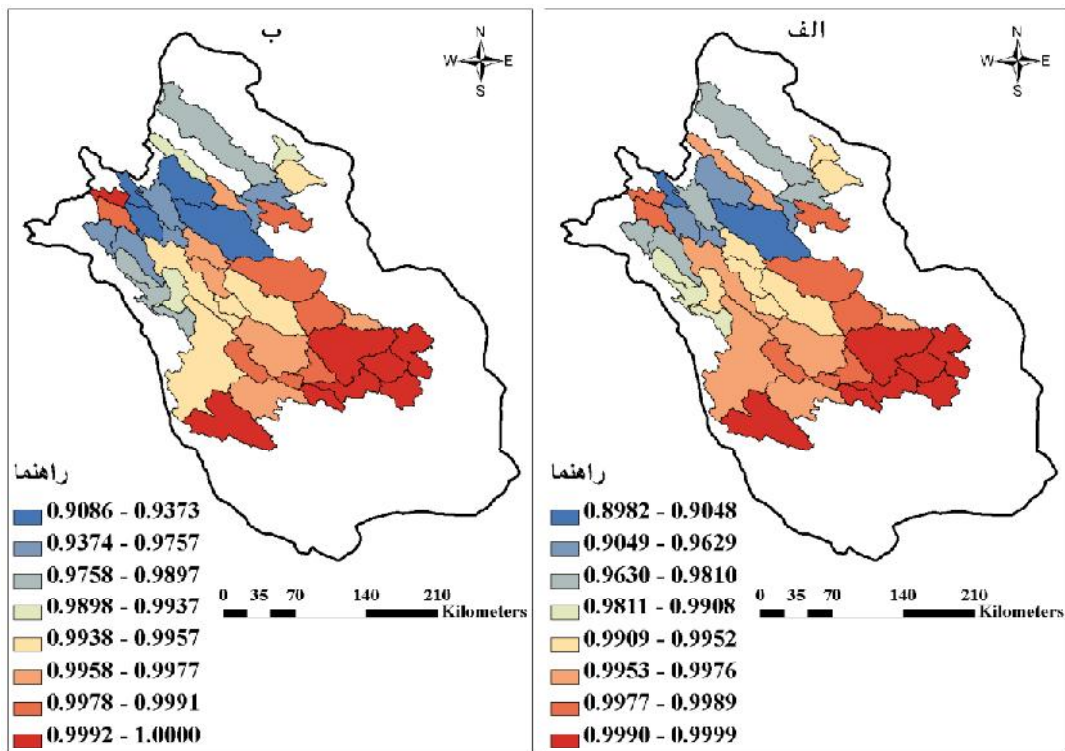
کلیه نقشه‌ها با روش طبقه‌بندی بازه‌های طبیعی (Jenks) در هشت کلاس در نرم‌افزار ArcGIS تهیه و از رنگ‌های تدریجی آبی (کمترین) تا قرمز (بیشترین) برای نمایش و درک بهتر آن‌ها استفاده شد. براساس این نقشه‌ها، کاربری مراتع و اراضی آیش، باغات و مناطق مسکونی در قسمت جنوب شرقی، خاک لخت و اراضی کشاورزی در شمال و جنگل در قسمت جنوب غربی تأثیر معنی‌داری در افزایش مقدار پارامتر هدایت الکتریکی دارند و اراضی با خاک لخت، مراتع و اراضی آیش، جنگل در قسمت غرب و اراضی کشاورزی در سمت جنوب غربی و باغات و مناطق مسکونی در جنوب سبب کاهش مقدار هدایت الکتریکی می‌شوند. کاربری خاک لخت، مراتع، اراضی کشاورزی و جنگل در قسمت شمال، باغات و اراضی آیش در جنوب شرقی و مناطق مسکونی در سمت شرق سبب افزایش مقدار پارامتر کلر می‌شوند و کاربری خاک لخت در شمال غربی، مراتع، اراضی آیش و جنگل در قسمت مرکز، باغات و مناطق مسکونی در جنوب و اراضی کشاورزی در جنوب غربی تأثیر معنی‌داری در افزایش پارامتر کلر ندارند.

با توجه به نتایج ضرایب β مدل‌های رگرسیونی مشاهده می‌شود که تغییرات درخورد توجهی در پارامترهای کیفیت آب براساس تغییرات مکانی وجود دارد که این موضوع تا حد زیادی به دلیل ناهمگن بودن حوزه‌های آبخیز از نظر درصد کاربری اراضی است. نتایج مدل‌سازی مکانی با روش GWR نشان داد که بیشترین تأثیر معنی‌دار، مربوط به پارامتر هدایت الکتریکی و باقیمانده خشک و کمترین تأثیر معنی‌دار، مربوط به اسیدیت و پتاسیم است که علت آن می‌تواند به مقدار میانگین هر یک از این پارامترها به‌منزله متغیر وابسته مرتبط باشد. به عبارت دیگر، مقدار میانگین پارامترهای هدایت الکتریکی و باقیمانده خشک در دوره آماری ۱۳۵۰-۹۰ نسبت به مقدار میانگین سایر پارامترهای کیفیت آب، بالاتر و میانگین اسیدیت و پتاسیم نیز نسبت به دیگر پارامترها کمتر است.

مقادیر به‌دست‌آمده برای معیارهای مختلف ارزیابی

مکانی را کاهش می‌دهد (Zhang & Gove, 2005; Zhang & Shi, 2004). همچنین، در شکل ۷ مقادیر شاخص موران (خروجی نرم‌افزار GeoDa) برای هدایت الکتریکی و کلر به‌منزله نمونه ارائه شده است (Anselin, et al., 2006). در مدل GWR مقدار این شاخص نزدیک‌تر به صفر است که بیانگر نبود خودهمبستگی مکانی است.

معنی‌دار نیست، اما میزان مقادیر خودهمبستگی مکانی مدل GWR نسبت به OLS کمتر است و با نتایج سایر محققان (Pratt & Chang, 2012; Zhang, et al., 2004). تحقیقات دیگر محققان نشان می‌دهد که مدل OLS در آنالیز خودهمبستگی مکانی به خصوص در تحقیقات زیست‌محیطی دارای مشکل خودهمبستگی مکانی بالاتر است و روش GWR تا حد زیادی میزان خودهمبستگی



شکل ۶. نقشه تغییرات مکانی ضریب تعیین در مدل GWR برای پارامترهای کیفیت آب

(الف) هدایت الکتریکی؛ (ب) کلر

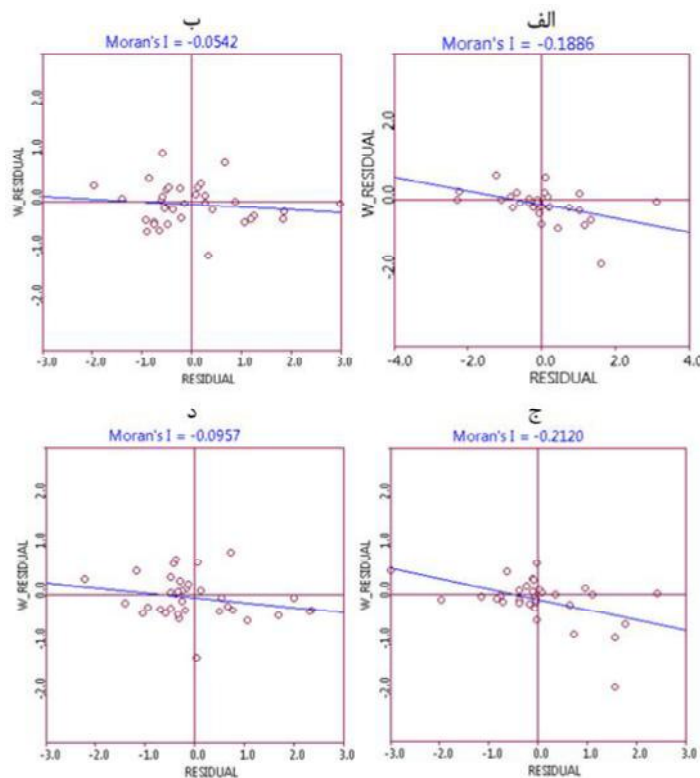
کیفیت آب، مدل GWR نسبت به OLS دارای معیار AICc کوچک‌تری و تفاوت این معیار در بین دو مدل همواره بزرگ‌تر از حد آستانه ۳ است. به عبارت دیگر، در تمام موارد، مدل GWR نسبت به OLS از کارایی خیلی بالاتری برخوردار است که با نتایج سایر محققان نیز مشابَهت دارد (Tu, 2011; Tu & Xia, 2008).

برای مقایسه میزان کارایی نسبی GWR نسبت به OLS از مقادیر معیار AICc و میزان تفاوت این معیار در بین دو مدل استفاده می‌شود. هرچه مقدار این معیار در یک مدل رگرسیونی کمتر باشد، بیانگر برتری نسبی آن نسبت به یک مدل با معیار بزرگ‌تر است. به هر حال اگر تفاوت معیار در دو مدل کوچک‌تر از مقدار آستانه ۳ باشد کارایی آن‌ها یکسان فرض می‌شود (Fotheringham, et al., 2002). مقادیر جدول ۳ نشان می‌دهد که در تمام پارامترهای

جدول ۳. مقادیر معیارهای مختلف ارزیابی کارایی مدل‌های رگرسیونی

ضریب نش (NSE)		معیار اطلاعات آکائیکه (AICc)		شاخص موران (I)		ضریب تعیین (R ²)		پارامتر کیفیت آب
GWR	OLS	GWR	OLS	GWR	OLS	GWR	OLS	
۰/۹۹۷۸	۰/۳۶۸۱	۸۵/۴۴	۲۶۰/۸۷	-۰/۲۴۴*	-۰/۰۷۹	۰/۹۹۸	۰/۳۴۹	کلسیم
۰/۹۹۵۶	۰/۲۸۰۶	۲۱۲/۹۳	۳۶۳/۹۷	-۰/۲۱۲	-۰/۰۹۵	۰/۹۹۶۱	۰/۲۷۳	کلر
۰/۹۹۵۳	۰/۲۲۰۶	۶۱۵/۱۵	۷۶۷/۵	-۰/۱۸۸*	-۰/۰۵۴	۰/۹۹۵۸	۰/۲۰۲۴	هدایت الکتریکی
۰/۹۹۸۴	۰/۵۸۵۹	-۱۷۸/۷۸	-۷/۸۸	-۰/۰۷۴	-۰/۰۰۵	۰/۹۹۸۵	۰/۵۸۱۴	کربنات
۰/۹۶۲۴	۰/۰۹۴۵	۴۴/۹۸	۱۱۴/۶۳	-۰/۱۷۴	-۰/۰۷۵	۰/۹۶۶۸	۰/۰۹۴۵	بی کربنات
۰/۹۹۱۱	۰/۰۸۷۹	-۱۷۷/۶۳	-۴۶/۹۷	-۰/۲۱۸*	-۰/۰۸۱	۰/۹۹۲۱	۰/۰۸۷۹	پتاسیم
۰/۹۹۵	۰/۰۸۴۶	۱۲۴/۲۳	۲۷۹/۱۶	-۰/۱۳۸*	-۰/۰۱۱	۰/۹۹۵۷	۰/۰۸۴۶	منیزیم
۰/۹۹۵۸	۰/۲۳۰۹	۱۹۹/۴۲	۳۵۵/۲۹	-۰/۲۱۵	-۰/۰۴۷	۰/۹۹۶۲	۰/۲۲۱۶	سدیم
۰/۹۷۸۸	۰/۲۵۷۸	-۱۳۱/۲۴	-۴۵/۸۳	۰/۰۱۱	-۰/۰۰۵	۰/۹۸۱۳	۰/۲۵۷۸	اسیدیته
۰/۹۸۵۷	۰/۳۰۰۴	۴۷۹/۰۴	۵۷۸/۸۵	-۰/۰۳۸	-۰/۰۸۲	۰/۹۸۸۸	۰/۲۹۳۳	سختی کل
۰/۹۹۴	۰/۲۲۰۵	۹۶/۸۱	۲۳۷/۳۲	-۰/۲۳۱	۰/۰۳۱	۰/۹۹۴۴	۰/۲۲۰۵	نسبت جذب سدیم
۰/۹۹۶۸	۰/۱۳۵۳	۱۵۱/۴۶	۳۲۳/۴۴	-۰/۱۶*	۰/۰۰۶	۰/۹۹۷۲	۰/۱۲۴۶	سولفات
۰/۹۹۵۷	۰/۱۴۴۶	۵۷۵/۰۴	۷۳۴/۲۳	-۰/۱۵۷*	-۰/۰۲۴	۰/۹۹۶۳	۰/۱۴۴۶	باقیمانده خشک

* مقدار P-value کوچک‌تر از ۰/۰۵ است و فرض صفر مبنی بر وجود خودهمبستگی مکانی در سطح معنی‌داری ۵ درصد، رد می‌شود.



شکل ۷. خودهمبستگی مکانی هدایت الکتریکی و کلر در مدل‌های رگرسیونی OLS و GWR (الف) هدایت الکتریکی: GWR: (ب) هدایت الکتریکی: OLS: (ج) کلر: GWR: (د) کلر: OLS

ضرایب یا پارامترهای مدل‌ها، مناطق بحرانی با بیشترین آثار منفی روی کیفیت آب را شناسایی کنند. تحقیق حاضر برای اولین بار در ایران در زمینه مدل‌سازی پارامترهای کیفیت آب انجام شد و در گام نخست فقط به تأثیرات درصد انواع کاربری ارضی با فرض ثابت بودن آن نسبت به زمان طی دوره آماری (۱۳۹۰-۱۳۵۰) توجه شده است. به محققان و پژوهشگران توصیه می‌شود در مدل‌سازی کیفیت آب با روش GWR از سایر خصوصیات حوزه آبخیز مانند اقلیم، بافت خاک، زمین‌شناسی و نوع گونه‌های گیاهی و زراعی که می‌توانند تا حد زیادی روی پارامترهای کیفیت آب رودخانه‌ها تأثیرات مثبت یا منفی داشته باشند، استفاده کنند. همچنین، توصیه می‌شود در استفاده از مدل رگرسیونی GWR از تعداد بالاتر حوزه‌های آبخیز به منظور افزایش کارایی مدل استفاده شود. با توجه به تغییرات زمانی نقشه کاربری اراضی، پیشنهاد می‌شود تا نقشه کاربری اراضی در چهار دوره زمانی ده ساله تهیه و برای هر دوره زمانی، آثار درصد انواع کاربری اراضی روی پارامترهای کیفیت آب حوزه‌های آبخیز جداگانه بررسی شود. در این صورت می‌توان از نقشه‌های تغییرات درصد کاربری و نقشه‌های تغییرات ضرایب پارامترهای مدل به منظور تحلیل تغییرات مکانی و زمانی انواع کاربری اراضی روی پارامترهای کیفیت آب استفاده و تأثیر مناطق بحرانی آلاینده در سطح منطقه در یک دوره بلندمدت را بهتر مشخص کرد.

تشکر و قدردانی

از شرکت آب منطقه‌ای استان فارس که آمار کیفیت آب ایستگاه‌های هیدرومتری استان فارس را در اختیار نویسندگان مقاله قرار دادند قدردانی می‌شود. از جناب آقای دکتر مهدی رضائیان‌زاده (عضو سابق گروه مستندات علمی مدیریت استراتژیک سازمان جهاد کشاورزی استان فارس) که در مراحل اولیه پژوهش پایان‌نامه و در مرحله تهیه و اعتبارسنجی نقشه کاربری اراضی، همکاری فعال

۴. نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف مدل‌سازی آثار کاربری اراضی روی پارامترهای کیفیت آب با استفاده از روش‌های رگرسیونی چندمتغیره OLS و GWR انجام شد. روش OLS قادر به کاهش خودهمبستگی مکانی موجود بین متغیرها و ارائه روابط مکانی بین انواع کاربری اراضی (متغیرهای مستقل) و پارامتر کیفیت آب (متغیر وابسته) نیست. در تحقیق حاضر از روش نوین رگرسیونی وزنی جغرافیایی GWR برای ارائه روابط مکانی موجود بین پارامترهای کیفیت آب و درصد انواع کاربری اراضی در ۴۲ حوزه آبخیز استان فارس استفاده شد. کارایی بالای مدل‌های GWR نسبت به مدل‌های OLS براساس مقادیر ضریب تعیین (R^2) و معیار تصحیح‌شده اطلاعات آکائیکه (AICc) ارائه شد. نتایج نشان داد که مدل GWR براساس مقادیر شاخص موران I ، میزان خودهمبستگی مکانی بین متغیرها را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و ضرایب روابط رگرسیونی بین کاربری اراضی و پارامترهای کیفیت آب نسبت به مکان تغییر می‌کنند. به عبارت دیگر، در این روش ضرایب مدل دارای تغییرپذیری مکانی‌اند.

نتایج این تحقیق نشان داد که تکنیک GWR دارای توانمندی بالایی است و می‌توان از آن به‌منزله ابزار مفید در مدیریت و تحقیقات زیست‌محیطی حوزه‌های آبخیز در مقیاس‌های مکانی مختلف (محلی، ناحیه‌ای و ملی) استفاده کرد. محققان و نهادهای حفاظت محیط‌زیست، همواره نگران این موضوع هستند که چگونه یک حوزه آبخیز به‌منزله محیط‌زیست طبیعی تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی مانند خاک، اقلیم، کاربری اراضی و سیاست‌گذاری قرار می‌گیرد. با توجه به اهمیت موضوع شناسایی منابع آلاینده زیست‌محیطی به خصوص عوامل آلوده‌کننده آب رودخانه‌ها، لازم است از مدل‌ها یا روش‌های کارآمدتر استفاده شود. در این راستا، نتایج کاربرد مدل‌های GWR به کارشناسان و برنامه‌ریزان محیط‌زیست کمک می‌کند تا مقیاس حوزه آبخیز و با توجه به نقشه‌های مربوط به

یادداشت‌ها

1. Ordinary Least Squares
2. Geographically Weighted Regression
3. Total Nitrogen
4. Kathmandu Valley
5. Electrical Conductivity
6. Land Use/Land Cover
7. <https://www.geodacenter.asu.edu>
8. Akaike Information Criterion

داشتند قدردانی می‌شود. در پایان از زحمات داوران محترم مقاله به خاطر ارائه نظرها و پیشنهادهای ارزشمندشان که سبب افزایش کیفیت علمی مقاله شد سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- سوری، د.، منیری جاوید، س. ۱۳۹۰. «مدل تعیین قیمت مسکن، کاربردی از روش رگرسیون موزون جغرافیایی»، فصل‌نامه مدیریت شهری، سال نهم، شماره ۲۸، صص ۷-۲۸.
- علیزاده، ا. ۱۳۸۵. اصول هیدرولوژی کاربردی، چاپ بیست و پنجم، انتشارات آستان قدس رضوی مشهد، ۸۷۲ صفحه.
- Anselin, L., Syabri, I., Kho, Y. 2006. GeoDa: an introduction to spatial data analysis. *Geographical Analysis*. 38(1): pp. 5–22.
- Brunsdon, C., Fotheringham, A.S., and Charlton, M. 1996. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial non-stationarity. *Geographical Analysis*. 28(4): pp. 281-298.
- Elshorbagy, A., and Ormsbee, L. 2006. Object-Oriented Modeling Approach to Surface Water Quality Management. *Environmental Modeling and Software*. 21(5): pp. 68-69.
- Fatehi, I., Amiri, B.J., Alizadeh, A., and Adamowski, J. 2015. Modeling the Relationship between Catchment Attributes and In-stream Water Quality. *Water Resources Management*. 29 (14): pp. 5055-5072.
- Foody, G.M. 2003. Geographical weighted as a further refinement to regression modeling: an example focused on the NDVI-rainfall relationship. *Remote Sensing of Environment*. 88(3): pp. 283-293.
- Fotheringham, A.S., Brunsdon, C., and Charlton, M. 1996. The geography of parameter space, an investigation of spatial non-stationarity. *International Journal of Geographical Information Systems*. 10(5): pp. 605-627.
- Fotheringham, A.S., Brunsdon, C., and Charlton, M. 2002. *Geographically Weighted Regression: the analysis of spatially varying relationships*. Chichester: Wiley, 269 Pp.
- Fotheringham, A.S., Charlton, M., and Brunsdon, C. 1997. Two techniques for exploring nonstationarity in geographical data. *Geographical Systems*. 4(1): pp. 59-82.
- Fotheringham, A.S., Charlton, M.E., and Brunsdon, C. 2001. Spatial variations in school performance, a local analysis using geographically weighted regression. *Geographical and Environmental Modelling*. 5(1): pp. 43-66.
- Huang, J., Huang, Y., Pontius JR, R.G., and Zhang, Z. 2015. Geographically weighted regression to measure spatial variations in correlations between water pollution versus land use in a coastal watershed. *Ocean & Coastal Management*. 103: pp. 14-24.
- Kenneth, B., Anderson, P., and David, R. 2004. *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*, The 2nd Edition. Springer-Verlag, New York, 515 Pp.
- Ishizawa, H., and Stevens, G. 2007. Non-English language neighborhoods in Chicago, Illinois: 2000. *Social Science Research* 36(3): pp. 1042-1064.
- Jarvie, H. P., Oguchi, T., and Neal, C. 2002. Exploring the linkages between river water chemistry and watershed characteristics using GIS-based catchment and locality analyses. *Regional Environmental Change*. 3(1): pp. 36-50.
- Kalin, L., Isik, S., Schoonover, J.E., and Lockaby, B.G. 2010. Predicting water quality in unmonitored watersheds using artificial neural networks. *Journal of Environmental Quality*. 39(4): pp. 1429-1440.

- Nash, J.E., and Sutcliffe, J. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part 1, A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10: pp. 282–290.
- Paez, A., Uchida, T., and Miyamoto, K. 2002. a general framework for estimation and inference of geographically weight regression models, 1, Location- specific kernel bandwidths and a test for location heterogeneity. *Environmental Planning A*. 34(4): pp. 733- 754.
- Pratt, B., and Chang, H. 2012. Effect of land cover topography and built structure on seasonal water quality at multiple spatial scales. *Journal of Hazardous Materials*. 209: pp. 48-58.
- Thapa, R.B., and Murayama, Y. 2009. Examining spatiotemporal urbanization patterns in Kathmandu Valley, Nepal: Remote Sensing and Spatial Metrics Approaches. *Remote Sensing*. 1(3): pp. 534-556
- Tobler, W.R. 1970. A Computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*. 46(2): pp. 234-240.
- Tong, S.T.Y., and Chen, W. 2002. Modeling the relationship between land use and surface water qualities. *Journal of environmental management*. 66(4): pp. 377-393.
- Tu, j. 2011. Spatially varying relationships between land use and water quality across an urbanization gradient explored by geographically weighted regression. *Applied Geography*. 31(1): pp. 376-392.
- Tu, J., and Xia, Z.G. 2008. Examining spatially varying relationships between land use and water quality using geographically weighted regression: model design and evaluation. *Science of the Total Environment*. 407(1): pp. 358-378.
- Wang, Q. Ni, J., and Tenhunen, J. 2005. Application of a geographically-weighted regression analysis to estimate net primary production of Chinese forest ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*. 14(4): pp. 379-393.
- Yu, D.L., and Wu, C. 2005. Understanding population segregation from Landsat ETM+ imagery, a geographically weight regression approach. *GIS and Remote Sensing*. 41(3): pp. 187-206.
- Zhang, L., Bi, H., Change, P., and Davis, C.J. 2004. Modelling spatial variations in tree diameter-height relationships. *Forest Ecology and Management*. 189(1): pp. 317-329.
- Zhang, L., and Gove, J.H. 2005. Spatial assessment of model errors from four regression techniques. *Forest Science*. 51(4): pp. 334-346.
- Zhang, Z., and Griffith, D.A. 2000. Integrating GIS components and spatial analysis in DBMSs. *International Journal of Geographical Information Science*. 14(6): pp. 543-566.
- Zhang, L., and Shi, H. 2004. Local modeling of tree growth by geographically weight regression. *Forest Science*. 50(2): pp. 225-244.