

گرم سال با بالا رفتن دمای سطح آب، میزان کلروفیل آب کاهش می‌یابد. بررسی آماری پراکندگی مکانی نیز حاکی از الگوی مکانی خوشه‌ای معنادار است. در نقشه تغییرات شیب مشخص شد که مناطق جنوبی خلیج فارس به‌ویژه در کشورهای بحرین و امارات و عربستان دارای بیش‌ترین شیب مثبت تغییرات هستند. قسمت عمده محدوده مورد بررسی از جمله شمال خلیج فارس که خط ساحلی آن کلاً در اختیار ایران به‌غیر از شمال غربی شامل بندر ماهشهر و عسلویه است، دارای شیب تغییرات بسیار کم یا کاهشی بوده است. نتایج این تحقیقات می‌تواند موجب شناسایی مناطق در معرض تغییرات نامطلوب غلظت فیتوپلانکتون‌ها شود و در برنامه‌ریزی‌های محیطی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی محیطی، آماره موران، انحراف معیار مکانی، تغییر اقلیم، خلیج فارس

مقدمه

افزایش دمای جهانی، گرم شدن اقیانوس‌ها، کوچک شدن پهنه‌های یخی، بالا آمدن سطح دریاها، اسیدی شدن اقیانوس‌ها و رویدادهای حدی دمایی همه نشانه‌های مشهودی از تغییرات اقلیمی در سطح کره زمین هستند [۲۲]. طبق یک اجماع علمی، بسته به شرایط اجتماعی-اقتصادی در آینده، اگر میزان گرم شدن کره زمین فقط ۱/۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شود، احتمال دارد تنش آب منطقه‌ای با سطح اطمینان متوسط به میزان ۵۰ درصد افزایش یابد [۱۵]. یکی از آثار تغییر اقلیم و بهره‌برداری بیش‌ازحد منابع طبیعی، تغییرات مقدار طبیعی فیتوپلانکتون‌ها در سطح دریاهاست. بوم‌سازگان‌های دریایی و آب شیرین در نتیجه تغییرات اقلیمی گرم و اسیدی می‌شوند و به‌موازات آن، تأثیر شکوفه‌های جلبکی مضر بر این بوم‌سازگان‌ها تشدید می‌شود [۳].

در دهه‌های اخیر پدیده شکوفایی جلبکی به لحاظ تعداد وقوع، شدت و توزیع جغرافیایی در سطح دنیا افزایش قابل‌توجهی داشته است [۱۹] که برای سلامت محیط‌زیست و بوم‌سازگان دریایی بسیار خطرناک است [۶]. عوامل محیطی و فرآیندهای هیدرودینامیکی بسیاری بر شکل‌گیری و گسترش شکوفایی جلبکی در مناطق مختلف نظیر خلیج‌ها، اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها و سایر محیط‌های آبی مؤثر هستند [۲]. از جمله می‌توان به وجود آمدن و گسترش آن تحت تأثیر دمای سطح آب، شوری و تابش اشاره نمود [۲۰].

تحلیل مکانی-زمانی تغییرات کلروفیل و همبستگی مکانی آن با دمای سطح دریا در خلیج فارس

محمد کمانگر^۱ و زینب حزباوی^{۲*}

تاریخ دریافت ۱۴۰۲/۰۵/۱۲ تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۰۷/۱۷

DOI: 10.22034/WMJ.2023.710718

چکیده

مقدار طبیعی فیتوپلانکتون‌ها در خلیج فارس تغییر یافته و تهدیدی مداوم برای تنوع زیستی ایجاد کرده است. پایش و پیش‌بینی رفتار مکانی-زمانی این پدیده برای پیش‌گیری از تبعات منفی اقتصادی-اجتماعی و برنامه‌ریزی‌های محیطی دارای اهمیت زیادی است. بر همین اساس، پژوهش حاضر باهدف ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی کلروفیل و تحلیل ارتباط آن با دمای سطح دریا در خلیج فارس برنامه‌ریزی شده است. بدین منظور، تغییرات غلظت کلروفیل به‌عنوان یک ترکیب آلی که توسط جلبک‌ها و گیاهان تولید می‌شود، با استفاده از تصاویر سنجنده مادیس در بازه زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۴۰۰ (به‌صورت ماهانه و فصلی) برآورد و مورد تحلیل قرار گرفت. ضمن ارزیابی صحت با استفاده از معیارهای ارزیابی خطا، شاخص‌های مکانی گرانیکه نیز محاسبه شدند. در ادامه، برای شناسایی میزان خودهمبستگی مکانی و بزرگی مقادیر الگوهای فضایی از آماره‌های موران جهانی و جی‌استار (*G) استفاده شد. نتایج نشان داد که شدت این پدیده به‌طور متوسط بین ۰/۰۵ تا ۱۶/۳۸ میلی گرم بر مترمربع متغیر است. شمال غرب و جنوب غرب پیشینه و قسمت‌های مرکزی خلیج فارس کمینه کلروفیل را به خود اختصاص داده‌اند. مقادیر پایین این پدیده در خط ساحلی شمال خلیج فارس واقع در ایران و از میان آن، در مناطق با جمعیت و صنایع کم‌تر مشاهده شد. راستای بیضوی سه انحراف معیار جهت شمال غرب و جنوب شرق را به تبعیت از شهرها و صنایع نشان می‌دهد. سری زمانی تغییرات نشان داد که با کاهش دما در فصل سرد به‌ویژه ماه دی غلظت بالاتر می‌رود و در فصل

۱- پسادکتری، گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
Email: z.hazbavi@uma.ac.ir

در زمینه تحلیل تغییرات مکانی-زمانی کلروفیل و عوامل محیطی مؤثر بر آن مطالعات مختلفی صورت گرفته است. برای نمونه، شناسایی عوامل محیطی مؤثر بر رشد جلبک دریایی در مناطق مرکزی و شمالی خلیج چابیک در مریلند آمریکا بررسی شده است. نتایج نشان داد که غلظت جلبک‌های سمی به‌طور مستقیم با دما، فسفات آلی و به‌طور معکوس با شوری و عمق آب ارتباط دارد و این پدیده عمدتاً در اواخر پاییز رخ می‌دهد [۱۲]. کومار و همکاران [۱۷] نیز میزان ذرات گردوغبار، کلروفیل و باد در سطح آب را در بازه زمانی ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۷ به کمک داده‌های ماهواره‌ای بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش بسیار کم میزان کلروفیل آب‌های شمال اقیانوس هند ناشی از افزایش میزان گردوغبار بوده است. علاوه بر این، با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور مدبری و همکاران [۱۹] افزایش کلروفیل دریای خزر را از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ بررسی کردند. نتایج نشان داد که قسمت‌های کم‌عمق دریا، در نزدیکی روسیه و قزاقستان، به‌ویژه جایی که ولگا و رودخانه‌های تیرک مقدار زیادی مواد مغذی (ترکیبات غنی از نیتروژن و فسفر) را به دریا می‌ریزند، بیش‌ترین تغییرات را در کلروفیل-آ تجربه کرده است.

پایش میزان کلروفیل-آ، کربن آلی، شوری و دمای سطح آب در سواحل سیستان و بلوچستان با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور توسط شهری و همکاران [۲۱] بررسی شده است. مشخص شد که میزان کربن آلی از میزان کلروفیل-آ پیروی می‌کند و مناطقی مانند چابهار و کنارک میزان کربن آلی بالاتری دارند. در فصل‌هایی که دمای آب کم‌تر است میزان کلروفیل-آ بالاتر بوده است. هم‌چنین غلظت کلروفیل-آ در مناطق موردبررسی در امتداد ساحل بیش‌تر از مناطق دور از ساحل بوده است. هم‌چنین، فضلی و همکاران [۹] مدل‌های سنجنش‌ازدوری و عددی مناسب برای پایش شکوفایی جلبکی و متغیرهای محیطی مؤثر در آن را برای تنگه هرمز بررسی کردند. دما و شوری به ترتیب مهم‌ترین متغیرهای مؤثر شناسایی شدند. محدوده دما بین ۲۷-۲۲ درجه سانتی‌گراد و شوری ۳۷-۳۹ دسی‌زیمنس بر متر برای رشد جلبک‌ها در منطقه مطلوب ارزیابی شد. هم‌چنین در بازه زمانی بین ماه‌های آبان تا بهمن بیش‌ترین احتمال رخداد شکوفایی جلبکی وجود دارد.

با بررسی مطالعات انجام‌شده مشخص می‌شود که تحقیقات بیش‌تر بر استخراج تک‌بعدی کلروفیل و ارزیابی شاخص‌های سنجنش‌ازدوری تمرکز داشته‌اند. گرچه استخراج نقشه‌های پراکندگی این پدیده مهم است اما مدل‌سازی تغییرات مکانی بر این فرآیند نیز اهمیت بیش‌تری دارد. تعیین این‌که الگوهای مکانی بیش‌تر در کجا، چه موقع و چگونه رخ می‌دهد برای بررسی پایداری حیات دریایی مهم است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تغییرات کلروفیل-آ در خلیج فارس به‌عنوان نماینده‌ای از تغییرات برخی عوامل محیط‌زیستی از جمله دما و آلودگی می‌تواند اثرات قابل توجهی بر سلامت بوم‌سازگان این منطقه داشته باشد. از طریق، بهره‌برداری بیش‌ازحد منابع انرژی در خلیج فارس، تغییرات اقلیمی و افزایش تغییرات انسانی در مناطق ساحلی منجر به افزایش

آلودگی‌های محیط‌زیست شده است. مقدار طبیعی فیتوپلانکتون‌ها تغییر یافته و تهدیدی مداوم برای تنوع زیستی در دریاها شده است [۱۷]. افزایش ورودی مواد مغذی با منشأ انسانی که می‌تواند منجر به تغییرات نامطلوب غلظت فیتوپلانکتون‌ها (یعنی اتروفیکاسیون) شود، خطر نگران‌کننده‌ای برای آب‌های ساحلی است [۲۳]. لذا، پایش و پیش‌بینی رفتار مکانی-زمانی این پدیده برای پیش‌گیری از تبعات منفی اقتصادی-جتماعی و برنامه‌ریزی‌های محیطی دارای اهمیت زیادی است. بر همین اساس، هدف از این پژوهش بررسی مکانی-زمانی تغییرات کلروفیل خلیج فارس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل ارتباط آن با تغییرات دمای سطح دریا است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

خلیج فارس در ۲۴ تا ۳۰ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ تا ۵۶ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد (شکل ۱). این خلیج توسط تنگه هرمز به دریای عمان و از طریق آن به دریاهای آزاد مرتبط است. مساحت خلیج فارس ۲۳۷۴۷۳ کیلومترمربع است. خلیج فارس از شرق از طریق تنگه هرمز و دریای عمان به اقیانوس هند و دریای عرب راه دارد، و از غرب به دلتای رودخانه اروندرود مرتبط است. هشت کشور در اطراف خلیج فارس قرار دارند. کشورهای ایران، عمان، عراق، عربستان سعودی، کویت، امارات متحده عربی، قطر و بحرین در کناره خلیج فارس هستند. در این میان سواحل شمالی خلیج فارس تماماً در جغرافیای سیاسی ایران قرار دارند. خلیج فارس یکی از شورترین منابع آبی در میان آب‌های آزاد جهان است. به‌طوری‌که شوری آن در بیش‌تر مناطق حدود ۴۰ گرم در لیتر است [۲۰]. به سبب وجود منابع سرشار نفت و گاز در خلیج فارس و سواحل آن، این آبراهه در سطح بین‌المللی و منطقه‌ای مهم و راهبردی به شمار می‌آید. عمیق‌ترین نقطه خلیج فارس با عمق ۹۳ متر در ۱۵ کیلومتری تنب بزرگ و کم‌عمق‌ترین منطقه آن با عمقی بین ۱۰ تا ۳۰ متر در سمت غرب است.

روش تحقیق

الف- محصول کلروفیل ماهواره مادیس

در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای مادیس در سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۴۰۰ بهره گرفته شد. این سنجنده دارای ۳۶ باند طیفی شامل ۱۱ باند در محدوده نور مرئی، هفت باند در محدوده نزدیک به مادون قرمز، دو باند در محدوده مادون قرمز طول موج کوتاه، هشت باند در محدوده مادون قرمز طول موج متوسط و هشت باند در محدوده مادون قرمز طول موج بلند یا حرارتی است. قدرت تفکیک مکانی باندهای یک و دو در این سنجنده برابر با ۲۵۱ متر، باندهای سه تا هفت برابر با ۵۱۱ متر و باندهای هشت تا ۳۶ برابر با یک کیلومتر است. یک شاخص طیفی سنجنش‌ازدوری، با استفاده از محاسبه ریاضیاتی و آماری بین دو یا چند باند طیفی داده‌های سنجنش‌ازدوری به دست می‌آید و به‌واسطه آن یک پدیده یا عارضه بر روی زمین بارز و شناسایی



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی خلیج فارس

کامل مشاهدات و پیش‌بینی‌ها و صفر نماینده عدم توافق کامل است [۵]. این نمایه‌ها میزان صحت داده‌ها را نشان می‌دهند. برای رسیدن NS و d به حد معناداری نمی‌توان مقداری قائل شد، بلکه محقق باید بر پایه اطلاعات خود از موضوع موردبررسی دقت داده‌ها و مدل مورد استفاده مقدار این شاخص‌ها را ارزیابی کند [۱۸].

ب- تحلیل مکانی: فرآیند تحلیل مکانی توصیف چگونگی و استدلال چرایی پراکندگی‌ها را شامل می‌شود [۱]. نتیجه این فرآیند تولید دانش علمی مستند و نهایتاً تبیین پراکندگی است [۱۳]. اندازه‌گیری توزیع مکانی داده‌ها این امکان را می‌دهد تا تغییرات توزیع فضایی در راستای مؤلفه‌های مکان یعنی طول، عرض و ارتفاع بررسی و مقایسه شود. شاخص‌های مکانی گرانیگاه (مرکز میانگین، بیضوی انحراف استاندارد) از روش‌های مختصات طولی (xc) و عرضی (yc) آن‌ها بر اساس رابطه‌های ۵ و ۶ برآورد شدند:

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^n T_i x_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (5)$$

$$Y_c = \frac{\sum_{i=1}^n T_i y_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (6)$$

در اینجا x_i و y_i مختصات عارضه i و $\{X, Y\}$ میانگین مرکزی عوارض و n برابر با تعداد کل عوارض در لایه مورد تحلیل است. برای به دست آوردن الگوی مکانی پدیده غلظت کلروفیل و این‌که آیا این پدیده خوشه‌ای است یا نه روش‌های مختلفی وجود دارد. با توجه به قانون جغرافیایی اصل نزدیکی-همانندی، آزمون خودهمبستگی فضایی رویدادها و پدیده‌های اقلیمی می‌تواند حاوی اطلاعات ارزشمندی باشد [۵]. برای مثال، رابطه فضایی معنی‌دار بیان‌گر ارتباط همسایگی معنی‌دار بین نواحی مجاور است. شناسایی این روابط می‌تواند در تشخیص مرزهای آب و هوایی و نیز تعیین

می‌شود. الگوریتم ارائه‌شده توسط هو و همکاران [۱۴] غلظت نزدیک به سطح کلروفیل-آ را برحسب میلی‌گرم بر مترمکعب با استفاده از یک رابطه تجربی به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های درجا کلروفیل-آ و بازتاب‌های سنجنش‌ازدور در ناحیه آبی به سبز محاسبه می‌کند. لازمه این الگوریتم در دسترس بودن سه باند حس‌گر یا بیش‌تر در محدوده طیفی ۶۷۰-۴۴۰ نانومتر است. محصول کلروفیل-آ به‌عنوان بخشی از مجموعه محصولات استاندارد Level-2 OC و مجموعه محصولات Level-3 CHL گنجانده‌شده است. با توجه به وسعت محدوده مورد مطالعه از گوگل به‌عنوان یک پلت‌فرم متن‌باز استفاده شد. برای اعتبارسنجی تصاویر پایش و شناسایی کلروفیل، از داده‌های CTD سازمان‌های اقیانوس‌شناسی، شیلات، زمین‌شناسی و هواشناسی و از غلظت کلروفیل‌های اندازه‌گیری شده، معیارهای آماری میانگین خطای مطلق (MAE) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب نش‌ساتکلیف (NS) و نمایه توافق ویلموت (d) طبق رابطه‌های ۱ تا ۴ محاسبه شدند.

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (3)$$

$$d = 1 - \frac{N - (RMSE)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (4)$$

در روابط فوق P_i مقادیر شبیه‌سازی‌شده، O_i مقادیر مشاهده‌ای، $\bar{X}$ میانگین مشاهده‌ای و N تعداد داده‌هاست. هرچه مقادیر MAE و RMSE کم‌تر باشد کارایی مدل بهتر است. ضریب نش‌ساتکلیف و نمایه ویلموت بین صفر و یک متغیر است. عدد یک نماینده توافق

اثر عوامل مکانی بر رفتار پدیده‌ها حائز اهمیت باشد. بررسی الگوی پراکندگی خوشه‌ای بودن مکانی رویدادها، در برابر «فرض مقابل» یعنی تصادفی بودن است [۱۳]. نمایه موران یکی از شاخص‌های برآورد تجمع مکانی پدیده‌هاست که با استفاده از رابطه ۷ قابل برآورد است [۷].

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

در این رابطه، n تعداد پدیده‌ها، x_i اندازه مشاهده‌شده بر روی مکان پدیده i ام و میانگین $\bar{x}$ است. y_{ij} اندازه وزن متعلق به i و j است که بر اساس مجاورت برآورد شده و نشان‌دهنده میزان وابستگی فضایی است. مجموع وزن‌ها در ماتریس وزن‌های $\{w_{ij}\}$ گویای اندازه مجموعه روابط فضایی مفروض بین نواحی است [۱۳] که به روش‌های مختلفی قابل محاسبه‌اند. یکی از راه‌ها، به‌کارگیری وزن‌هایی با ارزش صفر و یک (دودویی) است. در این حالت، اگر نواحی i و j هم‌مرز باشند، $w_{ij}=0$ خواهد بود. آماره موران کلی مانند ضریب خودهمبستگی بین $+1$ و -1 بوده، تفسیر مشابهی دارد. مقادیر نزدیک به $+1$ گویای الگوی مکانی قوی است. مقادیر نزدیک به -1 گواهی بر خودهمبستگی مکانی منفی بوده و گویای این است که مقادیر با ارزش بالا نزدیک مقادیر با ارزش کم هستند (وضعیت نادر) و درنهایت، مقدار نزدیک صفر، عدم الگوی مکانی (تصادفی مکانی) را گواهی می‌دهد. بنابراین، اگر مقادیر آماره برای دوتقطه مجاور مثبت یا منفی باشد، به معنی این است که مقادیر دوتقطه مذکور بالاتر از میانگین است و همبستگی مکانی منفی است [۱۰]. سپس نمره Z در یک سطح اطمینان دلخواه ارزیابی می‌شود. در سطح اطمینان ۹۵ درصد اگر قدر مطلق نمره Z مشاهده‌شده $Z(I)$ بزرگ‌تر از نمره Z بحرانی (± 1.96) باشد؛ فرض صفر در سطح

اطمینان مذکور رد شده [۴] و معنی‌داری روابط قابل استنباط خواهد بود.

برای شناسایی بزرگی مقادیر الگوهای فضایی، آماره جی‌استار (G^*) استفاده می‌شود که از مجموع ارزش‌های موزون مکانی پدیده‌ها در فاصله مشخص (d) از یاخته i ام نسبت به مجموع ارزش‌های تمامی مکان پدیده‌ها محاسبه می‌شود. امتیاز محاسبه‌شده نشان می‌دهد که در کجای داده‌ها مقادیر زیاد و کم خوشه‌بندی شده‌اند [۱۳]. این شاخص با استفاده از رابطه ۸ محاسبه می‌شود:

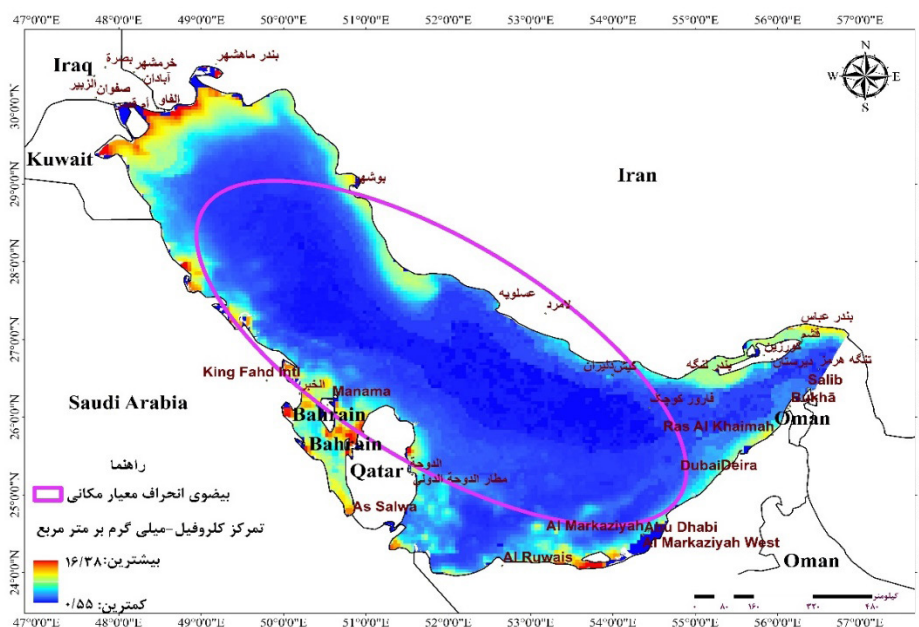
$$Z_i(d) = \frac{G_i(d) - E(G_i^*(d))}{\sqrt{\text{var}(G_i^*(d))}} = \frac{\sum_j w_{ij}(d) x_j - w_i \bar{x}}{s \sqrt{\frac{w_i^*(n - w_i^*)}{n - 1}}} \quad (8)$$

$$S^2 = \sum_{j=1}^n \frac{x_j^2}{n - \bar{x}^2} \quad w_i^* = \sum_{j=1}^n w_{ij}(d)$$

$$R = \sum_{i=1}^n R$$

نتایج و بحث

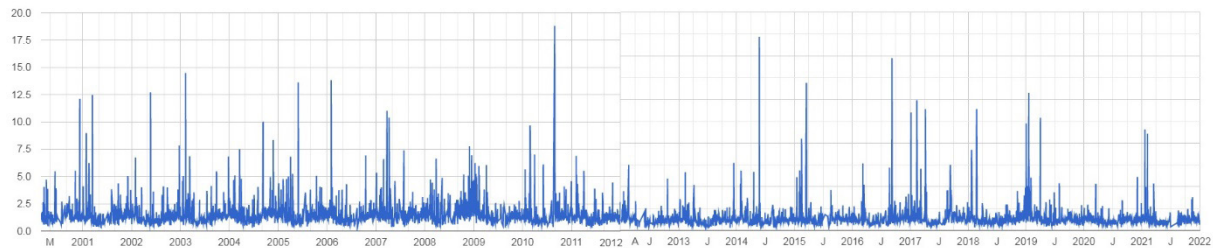
پس از پردازش تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مادیس ماهواره ترا، نقشه غلظت کلروفیل دریایی به‌صورت میانه تصاویر برای نمایش کلی شاخص و انحراف معیار مکانی در بازه زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۴۰۰ استخراج شد (شکل ۲). شدت این پدیده بین ۰/۰۵ تا ۱۶/۳۸ میلی‌گرم بر مترمربع قرار دارد. شمال غرب و جنوب غرب بیشینه و قسمت‌های مرکزی کمینه مقدار را به خود اختصاص داده‌اند. همان‌طور که در شکل ۲ به‌وضوح مشخص است قسمت‌های ساحلی به‌ویژه در جنوب خلیج فارس که کشورهای بحرین، عربستان و امارات قرار گرفته‌اند، مقدار این پدیده بسیار بالاتر از قسمت‌های دیگر است. نکته قابل توجه وجود مقدار پایین این پدیده در شمال و



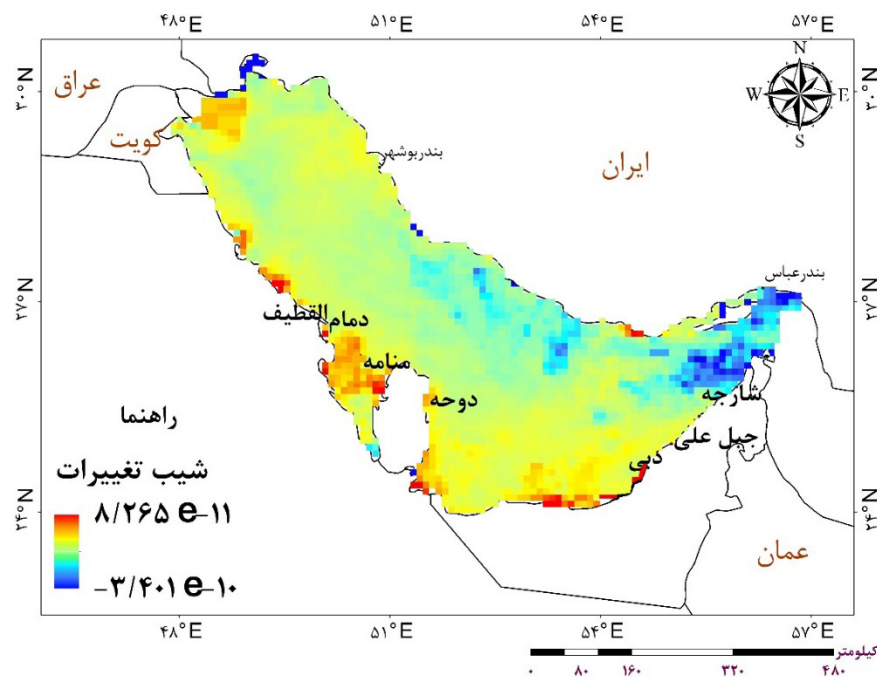
شکل ۲: غلظت کلروفیل خلیج فارس

جدول ۱: میزان خطای برآورد غلظت کلروفیل با استفاده از تصاویر سنجنده مادیس

متغیر	تصاویر سنجنده	MAE	RMSE	NS	d	تعداد نقاط تطبیقی با مرکز نزدیک‌ترین پیکسل
کلروفیل (میلی‌گرم بر مترمکعب)	MODIS-OC3M	۱/۵۲	۳/۰۷	۰/۸۲	۰/۹۶	۵۸ نقطه برداشتی



شکل ۳: سری زمانی تغییرات غلظت کلروفیل در خلیج فارس



شکل ۴: شیب تغییرات کلروفیل خلیج فارس در بازه زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۴۰۰

کاهش یافته است. در گام بعدی، با توجه به رفتار افزایشی فراوانی غلظت کلروفیل، روند تغییرات تشخیص داده شد. به همین علت الگوسازی روند مکانی با استفاده از شیب تغییرات روی تصاویر صورت گرفت (شکل ۴).

همان‌طور که در نقشه شیب تغییرات مشخص است مناطق جنوبی خلیج فارس به‌ویژه در کشورهای بحرین و امارات و عربستان بیش‌ترین شیب مثبت تغییرات و قسمت عمده محدوده از جمله شمال خلیج فارس که خط ساحلی آن کلاً در اختیار ایران به‌غیر از شمال غربی شامل بندر ماهشهر و عسلویه نیز شیب تغییرات بسیار کم یا کاهش یافته است. برای درک الگوی خوشه‌ای و یا پراکنده‌ای بودن این پدیده از آماره موران خودهمبستگی مکانی استفاده شد؛ که نتایج طبق شکل ۵ و جدول ۲ به دست آمد. در این شکل نحوه پراکنش تجمع رویدادها از حالت پراکنده تا خوشه‌ای و

شمال غرب خلیج یعنی مناطق با جمعیت صنایع کم‌تر واقع در ایران است. تابع بیضوی انحراف معیار مکانی در نقشه‌هاست که فاصله مکانی شدت پدیده‌ها را در هر پیکسل نسبت به مرکز جرمی این پدیده نشان می‌دهد یکی از دلایل عمده این جهت‌گیری می‌تواند به تبعیت از قرارگیری شهرهای بندری و صنایع مرتبط باشد که راستای آن شمال غرب به جنوب شرق است. در تاریخ‌هایی که داده واقعی کلروفیل وجود داشت، تصاویر بررسی شدند و با مقایسه پیکسل به پیکسل در آن نقاط میزان خطا برآورد شد (جدول ۱).

سری زمانی تغییرات در شکل ۳ آورده شده است. همان‌طور که مشخص است در فصل سرد و به‌ویژه ماه دی غلظت بالاتر می‌رود. با کاهش نسبی دما شرایط رشد و افزایش کلروفیل در خلیج فارس بیش‌تر می‌شود که با سایر مطالعات [۸، ۱۱، ۱۶] هم‌خوانی دارد. در فصل گرم سال با بالا رفتن دمای سطح آب میزان کلروفیل آب

سطح معنی داری با آماره p_value و مقادیر بحرانی (آماره Z) آورده شده است؛ مقدار شاخص ۱/۰۸ موران مکانی با سطح معناداری ۰/۰۰۰ محاسبه شد (جدول ۲). با در نظر گرفتن مقادیر هر پیکسل و شاخص های جدول ۱ فرض صفر مبنی بر تصادفی بودن الگوهای غلظت کلروفیل رد می شود و پراکندگی خوشه ای این پدیده که به لحاظ آماری معنادار است، تأیید می شود.

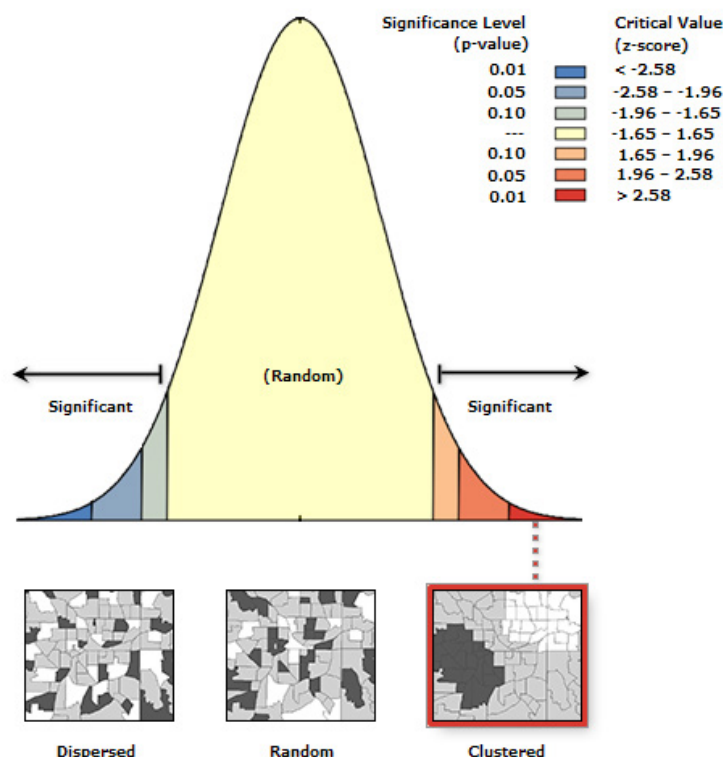
با توجه به مطالعات قبلی [۸، ۱۱، ۱۶] و بررسی روند زمانی تأثیر دما بر پدیده رشد جلبک ها، ارتباط مکانی این پدیده با دمای سطح دریا بررسی شد (شکل ۶). هم نوایی معنادار در قسمت های مرکزی خلیج وجود دارد. با توجه به این مسئله افزایش رشد جلبکی شدید در نوار ساحلی نمی تواند مربوط به دمای سطح باشد و در آنجا ارتباط معنادار بین غلظت کلروفیل و دما وجود ندارد. احتمالاً می توان بیان داشت افزایش این پدیده بیش تر وابسته به فعالیت های انسانی است. غلظت کلروفیل در خلیج فارس در حال افزایش است و این افزایش عمدتاً در مناطق جنوبی خلیج فارس که در معرض آلودگی های انسانی بیش تری قرار دارند، مشاهده می شود. این یافته ها نشان می دهد که آلودگی های انسانی مانند کاهش کیفیت آب، کاهش اکسیژن آب و مرگ و میر موجودات دریایی می توانند اثرات مخربی بر بوم سازگان های خلیج فارس داشته باشند [۸، ۲۴].

بر اساس مطالعه النعیمی و همکاران [۲۳] آلودگی های اصلی خلیج فارس عمدتاً شامل آلودگی نفتی، فاضلاب، کشاورزی، صنعتی و صوتی است. آلودگی نفتی به دلیل نشت نفت و سوخت

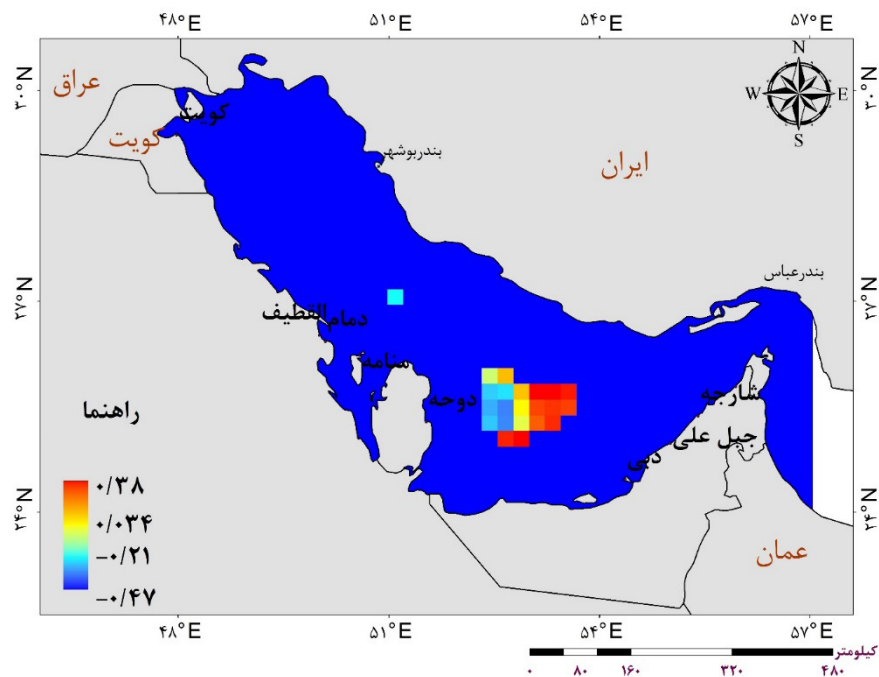
از کشتی ها، سکوها ی نفتی و تأسیسات صنعتی رخ می دهد. نفت می تواند باعث مرگ و میر موجودات دریایی، کاهش کیفیت آب و تخریب بوم سازگان های ساحلی شود. همچنین، آلودگی فاضلاب به دلیل تخلیه فاضلاب شهری و صنعتی به خلیج فارس رخ می دهد. فاضلاب می تواند حاوی مواد شیمیایی، فلزات سنگین و مواد آلی باشد که می توانند برای موجودات دریایی سمی باشند. آلودگی کشاورزی نیز به دلیل استفاده از کودهای شیمیایی و آفت کش ها در کشاورزی رخ می دهد و از طریق آب های سطحی و زیرزمینی تبعاتی مشابه با آلودگی نفتی به دنبال داشته باشد. آلودگی صنعتی به دلیل تخلیه پساب های صنعتی به خلیج فارس رخ می دهد. پساب های صنعتی می توانند حاوی مواد شیمیایی، فلزات سنگین و مواد آلی باشند که می توانند برای موجودات دریایی سمی باشند. آلودگی صوتی به دلیل فعالیت های انسانی مانند کشتیرانی و اکتشاف نفت و گاز رخ می دهد. آلودگی صوتی می تواند باعث صدمه به شنوایی موجودات دریایی و اختلال در رفتارهای طبیعی آنها شود و اثرات مخربی بر بوم سازگان های خلیج فارس داشته باشد [۲۳].

جدول ۲: خلاصه آماره کلی موران محاسبه شده

شاخص موران	شاخص مورد انتظار	واریانس	Z-score	P-value
۱/۰۸	-۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰	۱۸۴۷/۰۴	۰/۰۰۰۰



شکل ۵: نتایج تابع خودهمبستگی پدیده غلظت کلروفیل در خلیج فارس



شکل ۶: همبستگی مکانی دمای سطح و غلظت کلروفیل در خلیج فارس

بر بوم‌سازگان خلیج فارس باید صورت بگیرد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از شاخص محصول کلروفیل-آ مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای مادیس، میزان غلظت کلروفیل خلیج فارس استخراج و تغییرات آن از نظر زمانی و مکانی تحلیل شد. غلظت متوسط کلروفیل خلیج فارس بین ۰/۰۵ تا ۱۶/۳۸ میلی گرم بر مترمربع برآورد شد. نتایج نشان داد که غلظت کلروفیل در خلیج فارس در حال افزایش است. این افزایش عمدتاً در مناطق جنوبی خلیج فارس که در معرض آلودگی‌های انسانی بیش‌تری قرار دارند، مشاهده می‌شود. غلظت کلروفیل با افزایش دمای سطح دریا افزایش می‌یابد. پراکندگی مکانی کلروفیل در خلیج فارس الگوی خوشه‌ای دارد. شیب تغییرات کلروفیل در مناطق جنوبی خلیج فارس مثبت است، درحالی که در مناطق شمالی خلیج فارس شیب تغییرات بسیار کم یا کاهشی است. این تحقیق نشان داد آلودگی‌هایی که کشورهای ساحلی به خلیج می‌ریزند می‌تواند باعث افزایش غلظت و تراکم کلروفیل در سواحل شده و نقش عامل انسانی بیش‌تر از عوامل طبیعی می‌تواند در رشد جلبکی تأثیر بگذارد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که آلودگی‌های انسانی نقش مهمی در افزایش غلظت کلروفیل در خلیج فارس دارند. هم‌چنین نشان می‌دهد که افزایش دمای سطح دریا نیز می‌تواند بر این افزایش تأثیر بگذارد. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان‌دهنده نیاز به اقدامات فوری برای کاهش آلودگی‌های انسانی و حفاظت از خلیج فارس است. اقداماتی ازجمله افزایش نظارت بر آلودگی‌های صنعتی و کشاورزی، بهبود مدیریت پساب‌های شهری و صنعتی، افزایش آگاهی عمومی در مورد اهمیت حفاظت از محیط‌زیست را می‌توان در راستای کاهش آلودگی‌های خلیج فارس انجام داد. هم‌چنین، تحقیقات جامع‌تری در زمینه بررسی اثرات تغییرات اقلیمی

منابع

1. Alijani, B. 2015. Spatial analysis. Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards, 2(3): 1-14. (In Persian).
2. Anderson, D.M., Glibert, P., and Burkholder, J. 2002. Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences. Estuaries, 25(4): 704-726.
3. Andrew, W., Griffith, T., Christopher, J., and Gobbler, N. 2020. Harmful algal blooms: A climate change co-stressor in marine and freshwater ecosystems. Harmful Algae, 91: 101590.
4. Asakareh, H., and Shadman, H. 2015. Identifying the spatial relationships of pervasive hot days in Iran. Geographical Research Quarterly, 30(1): 53-69. (In Persian).
5. Asakareh, H., and Seifipour, Z. 2012. Spatial modeling of annual rainfall in Iran. Geography and Development, 10(29): 15-30. (In Persian).
6. Attaran-Fariman, G., and Bolch, C.J.S. (2012). Morphology and phylogeny of scrippsiella trochoidea (dinophyceae) a potentially harmful bloom forming species isolated from the sediments of Iran's south coast. Iranian Journal of Fisheries Sciences, 11(2): 252-270.
7. Dai, A. 2011. Drought under global warming: a review: Drought under global warming. WIREs Climate Change, 2(1): 45-65.
8. Farzin, M., Nazari Saman, A., Menbar, A., Feiznia, S., and Kazemi, Gh. 2018. Identification of potential areas for presence

18. Moriasi, D., Gitau, M., Pai, N., and Daggupati, P. 2015. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 58: 1763-1785.
19. Modabberi, A., Noori, R., Madani, K., Ehsani, A., Danandeh Mehr, A., Hooshyaripor, F., and Kløve, B. 2020. Caspian Sea is eutrophying: the alarming message of satellite data. *Environmental Research Letters*, 15: 124047.
20. Ritzman J, Brodbeck A, Brostrom S, McGrew S, Dreyer S, Klinger T, Moore K. 2018. Economic and sociocultural impacts of fisheries closures in two fishing-dependent communities following the massive 2015 US West Coast harmful algal bloom. *Harmful Algae*, 80: 35-45.
21. Shahri E, Sayadi M, Yousefi E. 2022. Monitoring of chlorophyll-A, organic carbon, salinity and water surface temperature off the coast of Sistan and Baluchestan using remote sensing data. *RS & GIS for Natural Resources*, 12(4): 119- 134. (In Persian).
22. IPCC. 2021. Sixth assessment report. Intergovernmental Panel on Climate Change.
23. Al-Naimi, N., Raitsos, D.E., Ben-Hamadou, R., and Soliman, Y. 2017. Evaluation of Satellite Retrievals of Chlorophyll-a in the Arabian Gulf. *Remote Sensing*, 9(3): 301.
24. Barzegari, A., Karimzadeh, M., and Moghaddam, B. (2022). Assessment of the spatial and temporal patterns of chlorophyll-a concentration in the Persian Gulf. *Environmental Pollution*, 287, 117826.
25. Cai, W., Zhang, Q., and Li, J. 2022. Impacts of climate change on phytoplankton blooms in the Yellow Sea. *Ecological Indicators*, 136, 107963.
26. Liu, L., Zhang, X., and Wang, Y. 2022. Global trends and spatial-temporal patterns of phytoplankton blooms in coastal oceans. *Journal of Environmental Management*, 316, 113790.
- of submarine springs in the Persian Gulf on the coasts of Bushehr province using thermal data of Landsat 8. *RS & GIS for Natural Resources*, 8(4): 91-108. (In Persian).
9. Fazli, S.H., Sima, S., and Mosivand, A. 2022. Spatiotemporal analysis of harmful algal bloom (HAB) in the Strait of Hormuz and identifying abiotic driving forces. *Journal of Environmental Studies*, 48(2): 125-152. (In Persian).
10. Gail, M., Krickeberg, K., Samet, J., Tsiatis, A., and Wong, W. 2007. *Statistics for Biology and Health*. USA: Springer.
11. Gao, R., Clare, S., Rose, C., and Caldwell, G. 2017. Eutrophication and warming-driven green tides (*Ulva rigida*) are predicted to increase under future climate change scenarios. *Marine Pollution*, 114: 439-47.
12. Gurbisz, C., and Kemp, W. 2014. Unexpected resurgence of a large submersed plant bed in Chesapeake Bay: Analysis of time series data. *Limnology and Oceanography*, 59(2), 482-494.
13. Haining, R. 2004. *Spatial data analysis: Theory and practice*. UK: Cambridge University Press, 545.
14. Hu, C., Lee, Z., and Franz, B. 2012. Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *Journal of Geophysical Research*, 117(C1): 518-531. <https://doi.org/10.1029/2011JC007395>
15. IPCC, 2018. Summary for Policymakers. In: *Global warming of 1.5_C*. An.
16. Kärcher, O., Filstrup, C. T., Brauns, M., Tasevska, O., Patceva, S., Hellwig, N., Walz, A., Frank, K., and Markovic, D. 2020. Chlorophyll a relationships with nutrients and temperature and predictions for lakes across perialpine and Balkan mountain regions. *Inland Waters*, 10(2): 29-41.
17. Kumar, P., Roshin, P., Narvekar, J., Kumar, D., and Vivekanandan, E. 2010. What drives the increased phytoplankton biomass in the Arabian Sea. *Current Science*, 18: 101-106.



Abstract

Spatial-Temporal Analysis of Chlorophyll Changes and their Spatial Correlation with Sea Surface Temperature in the Persian Gulf

M. Kamangar¹ and Z. Hazbavi²

Received: 2023/08/03 Accepted: 2023/10/09

The natural abundance of phytoplankton in the Persian Gulf has changed, creating a constant threat to biodiversity. Monitoring and predicting the spatial-temporal behavior of this phenomenon is crucial to prevent negative social-economic consequences and environmental planning. On this basis, the current research aims to assess the spatial-temporal changes of chlorophyll and analyze its relationship with the sea surface temperature in the Persian Gulf. To this end, we estimated and analyzed changes in the concentration of chlorophyll as an organic compound produced by algae and plants using MODIS sensor images from 2000 to 2021 (monthly and seasonally). Spatial indices of the barycenter were also calculated in addition to accuracy assessment using error evaluation criteria. Global Moran and G-star (G^*) statistics were used to identify the degree of spatial autocorrelation and the magnitude of spatial patterns. The results showed that the intensity of this phenomenon on average varies between 0.05 and 16.38 mg m⁻². The northwest and southwest have the maximum values and the central parts of the Persian Gulf have the minimum values. The northern coast of the Persian Gulf is located in Iran, and the northern parts, i.e., areas with less population and industries, have a low amount of this phenomenon. The ellipse line shows three standard deviations in the northwest and southeast directions following the cities and industries. The time series of changes showed that as the temperature decreases in the cold season, especially in January, the concentration increases, and as the temperature of the water surface increases in the hot season the amount of chlorophyll in the water decrease. Statistical analysis of the spatial distribution also indicates a significant cluster spatial pattern. Slope changes verified that the southern regions of the Persian Gulf, especially in the countries of Bahrain, UAE, and Saudi Arabia, have the most positive slope of changes. In the main part of the area, including the northern part of the Persian Gulf, whose coastline is entirely owned by Iran, except for the northwest, which includes the Mahshahr port and Asaluyeh, the slope of changes has been very low or decreasing. This research could identify areas exposed to adverse changes in phytoplankton concentrations and can be used in environmental planning.

Keywords: Climate change, Environmental pollution, Moran's statistic, Persian gulf, Spatial standard deviation

1. Postdoc, Department of Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2. Associate Professor, Department of Rang and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Corresponding author, Email: z.hazbavi@uma.ac.ir