



دانشگاه گواران کشاورزی و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیست و چهارم، شماره سوم، ۱۳۹۶  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## جزءبندی فسفر و ارتباط آن با رشد جلبک *Scenedesmus Obliquus* در رسوبات رودخانه‌های غرب حوضه آبخیز دریاچه ارومیه

حامد ارفع‌نیا<sup>۱</sup>، عباس صمدی<sup>۲</sup>، \*فرخ اسدزاده<sup>۳</sup>، ابراهیم سپهر<sup>۴</sup> و زهرا عسل‌پیشه<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، <sup>۲</sup> استاد گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، <sup>۳</sup> استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، <sup>۴</sup> استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، <sup>۵</sup> دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۱۳/۱۰/۹۵؛ تاریخ پذیرش: ۳۰/۶/۹۶

### چکیده

**سابقه و هدف:** فسفر یک منبع محدود و عنصر غذایی اصلی در زیست‌بوم‌های رودخانه‌ای است. فسفر موجود در رسوبات رودخانه‌ای به شکل‌های شیمیایی مختلفی یافت می‌شود که می‌تواند به تدریج آزاد شده و در نتیجه امکان ایجاد شرایط به‌پروردگی را در رودخانه‌ها فراهم آورد. جزءبندی فسفر می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با ارزیابی خطر آن در محیط‌های آبی به همراه داشته باشد. با این حال دانسته‌های موجود در رابطه با جزءبندی فسفر در رسوبات مربوط به زیست‌بوم‌های رودخانه‌ای ایران بسیار محدود بوده و ارزیابی مشخصی از چگونگی آزاد شدن هر یک از اجزاء آن وجود ندارد. گزارش‌های مکتوب و عینی نشان می‌دهد که پدیده شکوفایی جلبکی در رودخانه‌های غرب حوضه آبخیز دریاچه ارومیه نیز به وفور یافت می‌شود. بنابراین مطالعه شکل‌های شیمیایی فسفر در این رسوبات به منظور توسعه شاخص‌های مناسب در رابطه با قابلیت استفاده آن‌ها توسط جلبک‌های بومی منطقه، ضروری است.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش از روش عصاره‌گیری گام به گام و آزمون جلبکی برای ارزیابی شکل‌های مختلف شیمیایی فسفر و قابلیت استفاده این شکل‌ها توسط جلبک سندسموس اُبلِیکوس (*Scenedesmus Obliquus*)، استفاده شد. برای این منظور ۳۴ نمونه رسوب از هفت رودخانه در غرب حوضه آبخیز دریاچه ارومیه برداشت و با عصاره‌گیری چهار مرحله‌ای (کلرید پتاسیم برای فسفر تبادل‌ی، هیدروکسید سدیم برای فسفر آهن و آلومینیومی، اسید کلریدریک برای فسفر کلسیمی و مخلوط اسید سولفوریک و نیتریک برای فسفر باقی‌مانده) شکل‌های شیمیایی فسفر آن‌ها تعیین شد. آزمون جلبکی با هدف تعیین جزء زیست‌فراهم فسفر و ارتباط آن با جمعیت جلبکی محیط اجرا شد. به منظور شناسایی ویژگی‌های پراهمیت رسوبات از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و آزمون همبستگی پیرسون به ترتیب برای گزینش نمونه‌های رسوب و تعیین جزء زیست‌فراهم فسفر مورد استفاده قرار گرفتند.

**یافته‌ها:** نمونه‌های رسوبات رودخانه‌ای اغلب آهکی و درشت بافت بودند و آنالیز مؤلفه‌های اصلی نیز بر نقش ذرات شن و کربنات کلسیم بر تبیین ویژگی‌های این رسوبات تأکید دارد. یافته‌ها نشان داد که میانگین مقادیر کمی فسفر

\* مسئول مکاتبه: [f.asadzadeh@urmia.ac.ir](mailto:f.asadzadeh@urmia.ac.ir)

استخراج شده با استفاده از عصاره‌گیری گام به گام (Sequential extraction) در تمامی رودخانه‌ها به غیر از رودخانه سیمینه‌چای به ترتیب: فسفر کلسیمی (Ca-P) < فسفر باقی‌مانده (RES-P) < فسفر آهن و آلومینیومی (Fe/Al-P) < فسفر تبدلی (EXCH-P) بود. در رودخانه سیمینه‌چای میانگین مقدار جزء فسفر آهن و آلومینیومی بیش از فسفر باقی‌مانده بود. آزمون جلبکی به روشنی نشان داد که فسفر آهن و آلومینیومی (Fe/Al-P) دارای ارتباط بسیار معنی‌دار ( $r = 0/947, P < 0/0001$ ) با جمعیت جلبکی محیط کشت بود و پس از فسفر آهن و آلومینیومی، فسفر تبدلی ( $r = 0/668, P < 0/01$ ) و فسفر باقی‌مانده ( $r = 0/563, P < 0/05$ ) نیز همبستگی معنی‌داری با جمعیت جلبکی نشان دادند. فسفر کلسیمی رابطه معنی‌داری با جمعیت جلبکی محیط نشان نداد ( $r = 0/308, P = 0/246$ ).  
**نتیجه‌گیری:** براساس نتایج این پژوهش فسفر آهن و آلومینیومی می‌تواند به‌عنوان بخشی از فسفر که پتانسیل زیست‌فراهمی بالایی دارد، در نظر گرفته شده و به‌دلیل همبستگی بالا با رشد جلبک در محیط می‌تواند شاخصی ارزنده برای ارزیابی سلامت رسوبات از دیدگاه پدیده به‌پروردگی محسوب شود.

**واژه‌های کلیدی:** فسفر، رسوب، جلبک، زیست‌فراهمی

#### مقدمه

فسفر به‌عنوان یک منبع غیرتجدیدشونده محسوب می‌شود که به‌طور متوسط در حدود ۰/۰۹ درصد از پوسته زمین را تشکیل می‌دهد. فسفر عنصر اصلی غذایی برای گیاهان بوده و ترکیبات گوناگون آن به‌عنوان کود در تولید محصولات کشاورزی به‌کار می‌رود. در دهه‌های اخیر کاربرد بیش از اندازه کودهای فسفره برای تولید محصولات بیش‌تر سبب افزایش غلظت فسفر در خاک‌های اراضی بالادست حوضه‌های آبخیز شده است (۲۶) که نتیجه آن افزایش خطر ورود فسفر به شبکه رودخانه‌ای از طریق فرآیند فرسایش خاک است.

محیط‌های آبی از جمله رودخانه‌ها و تالاب‌ها زیست‌بوم‌های پویایی هستند که چرخه‌های گوناگون بیوژئوشیمیایی در آن‌ها به وقوع می‌پیوندد (۱۰ و ۳۵). ورود فسفر به رودخانه‌ها سبب تغییر در کمیت و کیفیت چرخه‌های زیستی و غیرزیستی عناصر غذایی شده و می‌تواند تبعاتی مانند به‌پروردگی<sup>۱</sup>، شکوفایی جلبکی<sup>۲</sup> و کمبود اکسیژن را در پی داشته باشد.

وقوع این پدیده‌ها در زیست‌بوم‌های آبی تبعات زیست‌محیطی نامطلوبی دارد که کاهش تنوع زیستی مهم‌ترین آن‌ها می‌باشد (۲۰). انتقال فسفر از طریق اتصال آن به ذرات رسوب به‌عنوان اصلی‌ترین سازوکار ورود فسفر به محیط‌های آبی محسوب می‌شود. از این‌رو شناخت و ارزیابی مقدار فسفر رسوبات به‌عنوان گامی اساسی و اولیه در مدیریت سلامت درونی محیط‌های آبی با هدف ارزیابی وضعیت تروفیک این محیط‌ها و بهبود کیفیت آن‌ها در نظر گرفته می‌شود.

فسفر به شکل‌های شیمیایی مختلفی توسط رسوبات جذب می‌شود. شکل‌های شیمیایی فسفر پتانسیل متفاوتی برای آزاد شدن در محیط‌های آبی دارند. به‌عبارت دیگر غلظت کل فسفر رسوبات همواره نمی‌تواند روشی مناسب و کافی برای ارزیابی زیست‌فراهمی فسفر رسوبات باشد (۱۲). تفکیک شکل‌های شیمیایی فسفر عموماً از طریق عصاره‌گیری متوالی صورت می‌گیرد. تاکنون روش‌های گوناگونی برای تعیین سهم هر یک از شکل‌های فسفر خاک‌ها و رسوبات ابداع و مورد استفاده قرار گرفته است (۲، ۸،

1- Eutrophication

2- Algal bloom

فسفر که بیشترین تأثیر در زیست‌فراهمی آن دارند، در نظر گرفتند (۵). ویلیام و همکاران (۱۹۸۰) گزارش کردند که جلبک *Scenedesmus quadricauda* ۷۰ درصد فسفر متصل به ترکیبات غیرآپاتیت را در طول دوره رشد ۱۲ تا ۱۸ ساعته مصرف کرده است. وانگ و همکاران (۲۰۱۰) مشاهده نمودند که در رسوبات آلوده، فسفر زیست‌فراهم رابطه بسیار معنی‌داری با فسفر کل و فسفر قابل عصاره‌گیری با هیدروکسید سدیم دارد. جوشی و همکاران (۲۰۱۶) همچنین بر جابجایی و تغییر شکل فسفر از بخش زیست‌فراهم به نافراهم و برعکس در خاک‌ها و رسوبات به‌عنوان یک عامل دیگر در زیست‌فراهمی فسفر تأکید نمودند. هوفمن و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که اغلب فسفر زیست‌فراهم رسوبات به‌صورت محلول و متصل به ذرات رسوب در رودخانه‌ها جابجا می‌شود. این پژوهشگران بیان کردند که سهم فسفر پیوندیافته با اکسیدهای آهن و آلومنیوم در زیست‌فراهمی فسفر رسوبات رودخانه‌ای، قابل توجه است.

حوضه آبخیز دریاچه ارومیه به‌عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی در منطقه بوده و شبکه‌های رودخانه‌ای و تالاب‌ها به همراه دریاچه ارومیه به‌عنوان یکی از ذخیره‌گاه‌های ثبت‌شده زیست‌کره<sup>۱</sup> محسوب می‌شود. در طول دو دهه اخیر افزایش جمعیت و تشدید فعالیت‌های کشاورزی مانند تغییر کاربری اراضی مرتعی و چرای بی‌رویه دام‌ها سبب افزایش بی‌سابقه فرسایش در اراضی بالادست حوضه‌های منتهی به دریاچه ارومیه شده و این امر به نوبه خود با افزایش رسوب وارده به رودخانه‌ها سبب تشدید مشکلات زیست‌محیطی و از جمله خطرات مرتبط با انتقال فسفر توسط این رسوبات به رودخانه‌ها شده و منجر به بروز شرایط به‌پروردگی<sup>۲</sup> در رودخانه‌ها و

۹، ۲۴، ۲۹، ۳۳ و ۴۰) که روش هدلی و همکاران (۱۹۸۲) به‌عنوان شناخته‌شده‌ترین آن‌ها محسوب می‌شود. این روش با تفکیک فسفر به چهار بخش فسفر محلول و تبادل (EXCH-P)، فسفر آهن آلومنیومی (Fe/Al-P)، فسفر کلسیمی (Ca-P) و باقی‌مانده (RES-P)، پتانسیل متفاوتی برای زیست‌فراهمی هر یک از بخش‌های مختلف فسفر در نظر می‌گیرد. فسفر تبدلی و فسفر متصل به آهن و آلومنیوم به‌عنوان شکل‌هایی از فسفر در نظر گرفته می‌شوند که به‌ترتیب دارای زیست‌فراهمی بالا و متوسط می‌باشند (۳۲، ۴۱ و ۴۳). در حالی که فسفر کلسیمی و باقی‌مانده معمولاً پتانسیل زیست‌فراهمی کم‌تری دارند (۳۵).

هر چند پژوهش‌های فراوانی به‌منظور برقراری ارتباط بین فسفر زیست‌فراهم گیاهان گوناگون و شکل‌های مختلف شیمیایی فسفر در خاک‌های زراعی صورت گرفته است با این حال باید در نظر داشت که در ارزیابی فسفر رسوبات با استفاده از شکل‌های شیمیایی آن، زیست‌فراهمی فسفر برای جلبک‌ها و موجودات آبی اهمیت دارد. از این‌رو فسفر زیست‌فراهم رسوبات از نظر کمی به مقدار فسفوری اطلاق می‌شود که بتواند توسط جلبک مورد استفاده قرار گیرد (۱۶، ۲۱ و ۳۷). بدیهی است که سنجش کمی فسفر زیست‌فراهم رسوبات از طریق برقراری رابطه بین رشد جلبک‌ها و شکل‌های مختلف شیمیایی فسفر امکان‌پذیر خواهد بود. اکوبو و همکاران (۲۰۱۲) بر همبستگی معنی‌دار رشد جلبک (مقدار کلروفیل و جمعیت) با اکثر شکل‌های فسفر در بخش‌های متصل به کلسیم، آهن، آلومنیوم و کانی‌های رسی در خاک‌ها تحت کشت کلم تأکید داشتند. این در حالی است که اکثر منابع، فسفر متصل به اکسیدهای آهن و منگنز و فسفر متصل به اکسیدهای آلومنیوم که به‌ترتیب حساس به شرایط اکسایش و کاهش و pH محیط هستند را به‌عنوان شکل‌هایی از

1- Biosphere Reserves (UNESCO)

2- Eutrophic condition

رسوب به تفکیک رودخانه‌ها به صورت؛ نازلوچای (۱۲ نمونه)، شهرچای (۳ نمونه)، باراندوزچای (۷ نمونه)، گذارچای (۳ نمونه)، مهابادچای (۳ نمونه)، سیمینه‌چای (۴ نمونه) و زولاچای (۲ نمونه) بود (شکل ۱). برای هر یک از نمونه‌های رسوب، از ۳ نقطه در فواصل تقریبی ۱۰ متری مقداری رسوب از بستر رودخانه برداشته شده و از اختلاط آن‌ها یک نمونه مرکب حاصل شد. نمونه‌های رسوب پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در نمونه‌های رسوب شامل؛ بافت به روش هیدرومتری (۱)، pH و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۱:۵ آب به رسوب (۳۱)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با هیدروکسید سدیم (۳۰)، ماده آلی به روش والکی- بلک (۳۱) و کربنات کلسیم فعال با استفاده از نمک اگزالات آمونیوم خشتی (۱۴) تعیین شدند.

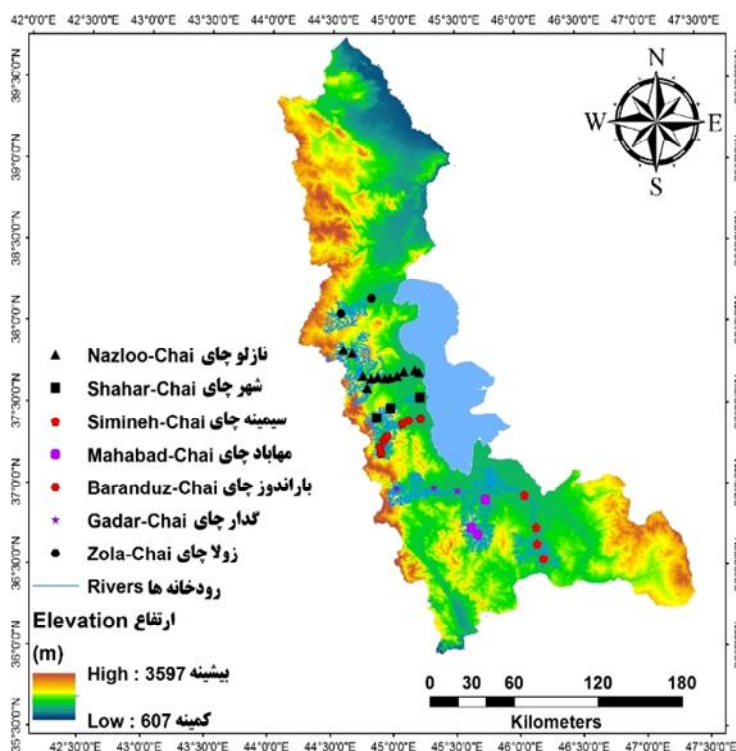
**شکل‌های فسفر در رسوبات:** تعیین شکل‌های شیمیایی فسفر در رسوبات با استفاده از عصاره‌گیری گام به گام با استفاده از روش هدلی و همکاران (۱۹۸۲) انجام شد. در این روش، چهار جزء شیمیایی فسفر به ترتیب شامل (۱) فسفر تبادل و محلول (EXCH-P) (۲) فسفر آلومینیوم و آهن (Fe/Al-P) (۳) فسفر کلسیمی (Ca-P) و (۴) فسفر باقی‌مانده (RES-P) تعیین شد. جزئیات هر یک از گام‌های عصاره‌گیری در شکل ۲ ارائه شده است. فسفر عصاره‌گیری شده از هر جزء، پس از صاف شدن، به روش مورفی و ریلی (۱۹۶۲) رنگ‌آمیزی و با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Novaspec II اندازه‌گیری شد.

تالاب‌های منتهی به دریاچه ارومیه شده است. از طرف دیگر کاهش مقدار آب ورودی به رودخانه‌ها موجب افزایش غلظت فسفر در محیط‌های آبی شده است. بنابراین در این حوضه اثرات ترکیبی تغییر اقلیم و دخالت‌های بشری موجب شده که چرخه‌های طبیعی عناصر غذایی و از جمله فسفر دگرگون شود. بر این اساس برآورد دقیق زیست‌فراهمی فسفر در رسوبات این رودخانه‌ها دارای اهمیت دو چندانی بوده و این پژوهش با هدف بررسی شکل‌های شیمیایی فسفر در رسوبات رودخانه‌های غرب دریاچه ارومیه و ارتباط آن‌ها با رشد جلبک *Scenedesmus Obliquus* به‌عنوان شناساگر زیستی و بومی رودخانه‌های استان صورت گرفته است.

### مواد و روش‌ها

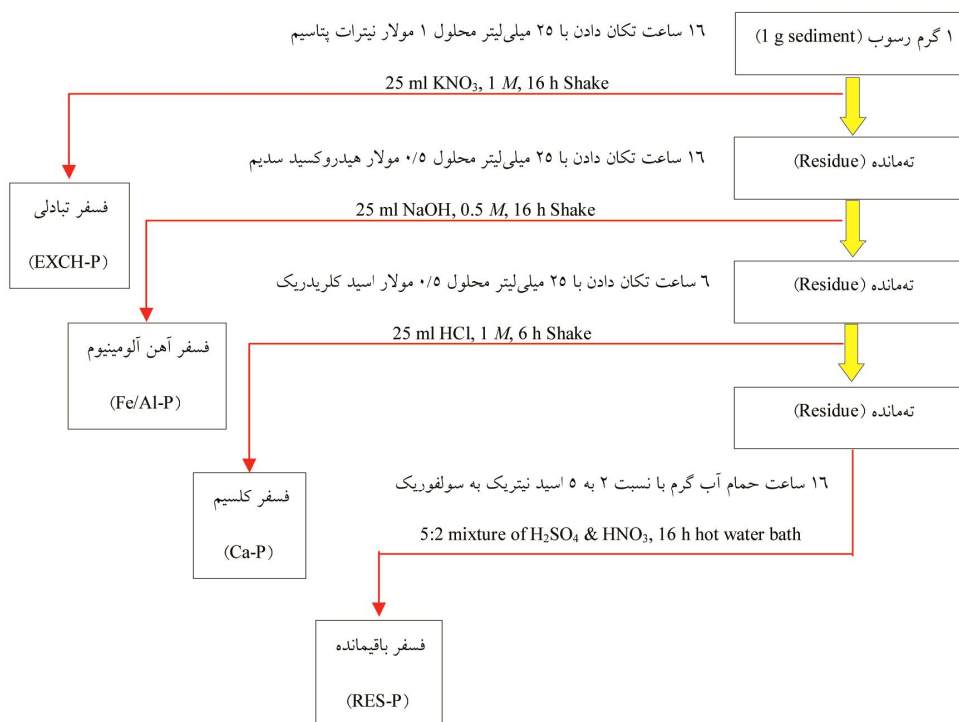
**منطقه مورد مطالعه و نمونه‌برداری رسوبات:** دریاچه ارومیه دارای ۲۱ رودخانه فصلی و دائمی است که اغلب آن‌ها در بخش غربی و جنوبی آن قرار دارند. این رودخانه‌ها از ارتفاعات مرزی ایران با کشورهای ترکیه و عراق سرچشمه گرفته و در طول مسیر خود با عبور از مناطق شیب‌دار و کوهستانی، کشاورزی و بعضاً صنعتی به سمت دریاچه حرکت می‌کنند. در سال‌های اخیر با تشدید فعالیت‌های کشاورزی و افزایش نرخ فرسایش و رسوب‌گذاری در منطقه، شرایط مناسبی برای پدیده شکوفایی جلبکی در اغلب این رودخانه‌ها ایجاد شده است. نازلوچای، شهرچای، باراندوزچای، گذارچای، مهابادچای، سیمینه‌چای و زولاچای به‌عنوان مهم‌ترین رودخانه‌های منتهی به بخش غربی دریاچه محسوب می‌شوند که در این پژوهش نمونه‌برداری از رسوبات این رودخانه‌ها صورت گرفته است.

در این پژوهش مجموعاً ۳۴ نمونه رسوب از رودخانه‌های یاد شده تهیه گردید. تعداد نمونه‌های



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه برداری از رودخانه های غرب دریاچه ارومیه.

Figure 1. Geographical location of sampling points from western rivers of Urmia lake.



شکل ۲- روندنمای عصاره گیری گام به گام فسفر.

Figure 2. Flow chart of phosphorus sequential extraction.

میکروسکوپ اینورت حدود ۲۰ سلول از محیط مایع جدا شده و سپس به پلیت‌های حاوی محیط کشت جامد آگار (کشت سریالی) انتقال یافته و خوابانیده شدند. کلنی‌های خالص به دست آمده پس از بررسی و شناسایی زیر میکروسکوپ نوری به محیط مایع با حجم بالاتر ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌لیتری انتقال داده شدند. در این مرحله از محیط کشت اختصاصی جلبک سندسموس به صورت بسته و به حجم ۵ لیتر استفاده شد که مشخصات محیط کشت برای این جلبک در جدول ۱ آورده شده است. جلبک‌ها تحت نور فلورسنت و مهتابی با شدت ۹۰ وات بر مترمربع کشت شدند.

آزمون جلبکی: به منظور انجام آزمون جلبکی ۱۷ نمونه رسوب از مجموع ۳۴ نمونه انتخاب شدند. انتخاب نمونه‌ها براساس ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و توزیع شکل‌های شیمیایی فسفر در آن‌ها، با استفاده از روش آنالیز خوشه‌ای انجام شد. در ادامه ارتباط بین شکل‌های مختلف شیمیایی فسفر در این نمونه‌ها و رشد جلبک، با استفاده از آزمون جلبکی با گونه *Senedesmus Obliquus* به عنوان جلبک بومی رودخانه‌های منطقه، بررسی شد. در فصل تابستان از آب رودخانه نمونه برداری شده و به منظور بالا بردن جمعیت جلبکی در آن از محیط کشت عمومی مایع استفاده شد (۶). سپس با استفاده از پیپت پاستور و

جدول ۱- مشخصات ترکیب شیمیایی محیط کشت اختصاصی جلبک سندسموس.

Table 1. The chemical composition of *Senedesmus obliquus* culture medium.

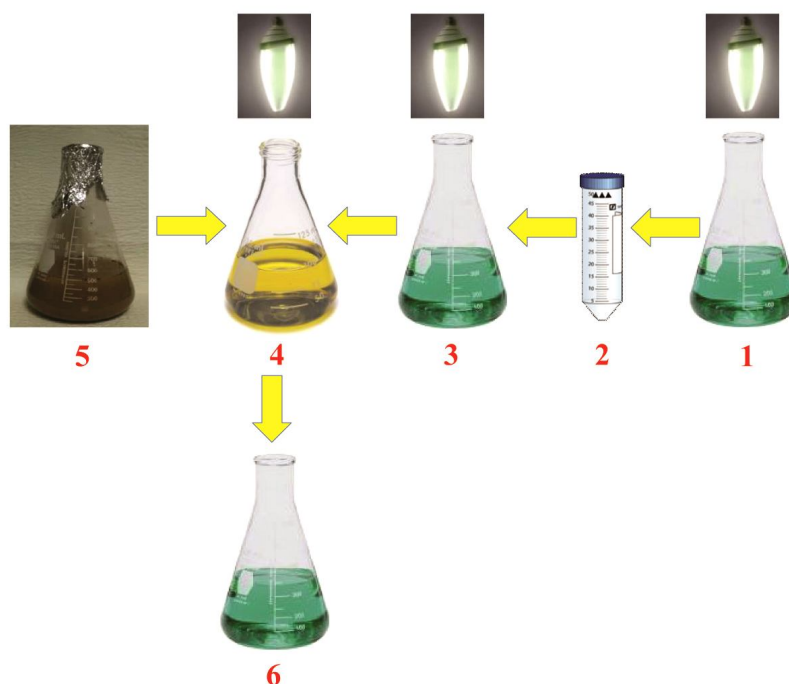
| غلظت<br>Concentration<br>(gL <sup>-1</sup> ) | ترکیب شیمیایی<br>Chemical formula  | محلول<br>Solution     |
|--|--|-----------------------|
| 25   | NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>  | محلول A<br>Solution A |
| 7  | KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>  |                       |
| 4.5  | MgSO <sub>4</sub>  |                       |
| 715  | H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>   | محلول B<br>Solution B |
| 55   | ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O   |                       |
| 19   | CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O   |                       |
| 635  | MnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O   |                       |
| 15   | Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O                               |                       |
| 4  | (NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> .4H <sub>2</sub> O |                       |
| 1075   | CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O   |                       |
| 1325   | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> .7H <sub>2</sub> O                    |                       |
| 1325   | FeC <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>7</sub>                                     |                       |

میکروسکوپ ظاهر گردد. در این مرحله ۲ میلی‌لیتر از سوسپانسیون ۵ به ۱ رسوب به آب که قبلاً به مدت ۱ ساعت در اتوکلاو قرار داده شده بود به ۵۰ میلی‌لیتر از محیط کشت جلبک بدون فسفر در

در مرحله تثبیت رشد، جلبک موردنظر به محیط کشت بدون فسفر وارد و به مدت یک ماه در این شرایط قرار داده شد تا علائم ظاهری کمبود فسفر مانند افزایش اندازه جلبک و گردشگی در زیر

در این پژوهش برای تحلیل چندمتغیره ویژگی‌های رسوبات از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و برای برقراری ارتباط بین جمعیت جلبکی با شکل‌های مختلف شیمیایی فسفر از رگرسیون ساده استفاده شد. محاسبات آماری این پژوهش با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS 22 و MINITAB 16 انجام گرفت.

لوله‌های آزمایش ۱۰۰ میلی‌لیتری اضافه شد. نمونه‌ها به‌طور مرتب و طی دو نوبت در هر روز به‌طور کامل مخلوط شدند. پس از یک ماه به‌منظور مقایسه رشد جلبک در نمونه‌های مختلف، تعداد جلبک‌ها با استفاده از لام نئوبار و میکروسکوپ نوری شمارش شدند. شکل ۳ روند طرح‌وار انجام آزمون جلبکی در نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳- روندنمای انجام آزمون جلبکی برای یک نمونه رسوب؛ ۱) کشت جلبک در محیط کشت حاوی فسفر (۲) جداسازی جلبک از محیط کشت با سانترفیوژکردن (۳) کشت جلبک در محیط بدون فسفر (۴) آشکارشدن علائم ظاهری کمبود فسفر (۵) تهیه و اضافه کردن سوسپانسیون رسوب به محیط کشت بدون فسفر (۶) شمارش جمعیت جلبکی رشدیافته پس از افزودن رسوب.

**Figure 3. Flow chart of algal assay in a sediment sample: 1) Algae cells growth in phosphorus (P) medium 2) Separation of the cells with centrifugation 3) Algae cells transfer to P-free nutrient growth medium 4) Appearance of severe phosphorus deficiency symptom 5) Preparation and addition of sediment suspension to P-starved cells 6) Cell counting after ending incubation period.**

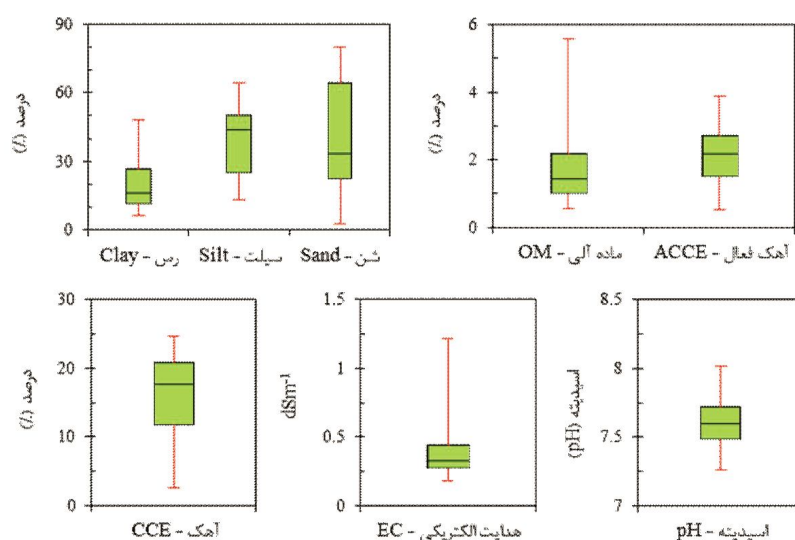
شن‌لومی و لوم‌شنی قرار دارند. دامنه تغییرات مقدار شن و سیلت در نمونه‌های رسوب در مقایسه با رس بیشتر است. رسوبات رودخانه‌ها آهکی بوده و دامنه نوسان و میانگین درصد کربنات کلسیم (CCE) و کربنات کلسیم فعال (ACCE) به‌ترتیب برابر با

### نتایج و بحث

در شکل ۴ دامنه تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رسوبات به‌صورت نمودارهای جعبه‌ای ارائه شده است. از نظر کلاس بافتی رسوبات اغلب دارای بافت سبک بوده و در محدوده کلاس‌های بافتی

آهکی کواترنری و همچنین وقوع فرسایش کنار رودخانه‌ای می‌تواند از دیگر عوامل افزایش آهک و pH در نمونه‌های رسوب باشد. ویلیام و همکاران (۱۹۷۱) گزارش کردند که رسوبات ریزدانه شانس بیشتری برای جذب یا نگهداری کربنات کلسیم دارند و درصد بالای کلسیت در بخش سیلت رسوبات تجمع می‌یابد. آهک کل و آهک فعال رسوبات ارتباط معنی‌داری نشان دادند ( $r = ۰/۳۹$ ,  $P < ۰/۰۵$ ).

(۲/۵-۲۴/۸، ۳/۹-۰/۵) و (۲/۲) بود. رسوبات دارای pH قلیایی بوده و دامنه تغییرات pH در تمامی نمونه‌ها اندک و در محدوده ۷/۲۶ تا ۸ و با میانگین ۷/۶ بود. بالابودن pH و کربنات کلسیم در نمونه‌های رسوب می‌تواند مربوط به منشاء رسوبات که خاک‌های اراضی بالادست هستند، باشد. خاک‌های منطقه دارای pH قلیایی بوده و علاوه بر آن آهکی نیز می‌باشند. از سوی دیگر عبور رودخانه‌ها از سازندهای



شکل ۴- نمودار جعبه‌ای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رسوبات رودخانه‌ای (تعداد = ۳۴).

Figure 4. Box plots of the physicochemical properties of river sediments (n=34).

از نمونه‌ها که مربوط به رودخانه‌های مهاباد و سیمینه‌چای بودند دارای ماده آلی بیش از ۲/۵ درصد می‌باشند. این مقادیر ماده آلی در مقایسه با محتوای ماده آلی گزارش شده برای خاک‌های منطقه بیش‌تر است. به‌نظر می‌رسد فرآیندهای زیستی درون‌رودخانه‌ای به همراه فعالیت‌های انسانی مانند دفع فاضلاب شهری و روستایی از عوامل افزایش ماده آلی در رسوبات رودخانه‌ای باشد. از سویی دیگر پائین بودن چگالی مواد آلی در مقایسه با سایر ذرات معدنی خاک شانس آن را برای انتقال توسط جریان آب افزایش می‌دهد (۲۳).

میانگین هدایت الکتریکی برابر  $۰/۴۲ \text{ dSm}^{-1}$  بود که نشان‌دهنده شیرین بودن منابع آب سطحی رودخانه‌های مورد مطالعه می‌باشد. با این حال در دو مورد شامل نمونه‌های مربوط به پائین‌دست رودخانه‌های زولا و مهابادچای بیش از  $۱ \text{ dSm}^{-1}$  بود. مقدار ماده آلی در نمونه‌های رسوب بسیار متغیر در دامنه ۰/۵۶ تا ۵/۵۷ و با میانگین ۱/۷۶ درصد بود. با این‌حال دامنه میان‌چارکی ( $Q_3-Q_1$ ) برای ماده آلی محدود و برابر با ۱/۱۵ درصد است. تفاوت بین دامنه میان‌چارکی و دامنه کل داده‌ها به همراه نمودار جعبه‌ای ماده آلی به روشنی نشان می‌دهد که تعدادی



مخزن‌های آهن آلومینیومی و تبادلی است (۳). بنابراین، این بخش نمی‌تواند سهم قابل‌توجهی در به‌پروردگی پیکره‌های آبی داشته باشد (۳۹). حضور بالای فسفر در بخش پیوندیافته با کلسیم نشان‌دهنده توانایی این بخش در نگهداری فسفر در طبیعت و زیست‌فراهمی کم فسفر در اغلب رسوبات رودخانه‌ای مورد مطالعه می‌باشد. این یافته با نتایج ویژگی‌های رسوبات که نشان‌دهنده pH بالا و حضور بالای کربنات کلسیم می‌باشد، سازگار است. با این حال باید تأکید شود که بالا بودن کربنات کلسیم در رسوبات لزوماً نشان‌دهنده پیوند بیش‌تر فسفر با بخش کلسیم نیست زیرا کانی‌های کلسیمی فسفر با اهمیت شامل آپاتیت، اکتا کلسیم فسفات، تری کلسیم فسفات و دی کلسیم می‌باشند که انحلال آن بیش‌تر وابسته به pH و غلظت فسفر است و محیط‌های رسوبی رودخانه‌ای معمولاً توانایی ایجاد غلظت ثابت کلسیم در دامنه وسیعی از pH را دارند (۱۷).

فسفر آهن و آلومینیومی در پیوند با اکسیدهای آهن و آلومینیوم بوده و می‌تواند با یون هیدروکسید و سایر ترکیبات معدنی فسفر که در بازها قابل انحلال هستند، تبادل شود (۱۳). برخی از پژوهشگران بر این باور هستند که فسفر آهن و آلومینیومی به‌علت قابلیت آن در فراهم نمودن شرایط رشد فیتوپلانکتون‌ها، می‌تواند به‌منظور ارزیابی فسفر زیست‌فراهم جلبکی مورد استفاده باشد (۴۲ و ۴۴). با این حال نتایج بررسی رسوبات رودخانه‌ها نشان داد که در مقایسه با دو جزء فسفر کلسیمی و باقی‌مانده، مقدار فسفر آهن و آلومینیومی در اغلب رودخانه‌ها کم‌تر است. اما در نمونه‌های رسوب رودخانه سیمینه‌چای این بخش سهم قابل‌توجهی داشته و از نظر فراوانی به‌عنوان دومین جزء محسوب می‌شود که دلیل این امر شاید مربوط به غلظت بالای آهن و آلومینیوم در رسوبات این رودخانه باشد. رسوبات رودخانه مهاباد نقش فعالی در ایجاد تنوع زیستی در سیستم رودخانه‌ای

جزءبندی فسفر در رسوبات رودخانه‌ای: فسفر به شکل‌های مختلفی توسط رسوبات جذب و نگهداری می‌شود. که توزیع شکل‌های فسفر در رسوبات می‌تواند تابعی از ویژگی‌های رسوبات و شرایط رودخانه باشد (۳۸). آمار توصیفی مربوط به شکل‌های مختلف فسفر در رودخانه‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده بیانگر این واقعیت است که به‌رغم تفاوت‌های کمی در مقدار شکل‌های مختلف فسفر، الگوی توزیع این شکل‌ها بر مبنای فراوانی در اغلب رودخانه‌ها کم و بیش مشابه است. به این ترتیب که مقدار فسفر تبادلی (EXCH-P) از ۲/۱۱ تا ۲۱/۳، فسفر آهن و آلومینیومی (Fe/Al-P) از ۹/۸۶ تا ۲۰۱ و فسفر کلسیمی (Ca-P) از ۲۴۷ تا ۵۰۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نوسان بوده و ترتیب توالی از نظر مقدار شکل‌های مختلف فسفر به‌صورت  $Ca-P > RES-P > Fe/Al-P > EXCH-P$  است.

فسفر کلسیمی (Ca-P) بیش‌ترین سهم را در جذب و نگهداشت فسفر در رسوبات رودخانه‌های منطقه دارد. در رسوبات رودخانه‌های شهرچای و باراندوزچای غلظت فسفر کلسیمی در مقایسه با رودخانه‌های دیگر کم‌تر بود. تعیین این‌که آیا این فسفر ناشی از فسفر فرسایشی از اراضی بالادست بوده و یا این‌که ناشی از ورودی‌های نقطه‌ای از فعالیت‌های کنار رودخانه‌ای است، مشکل می‌باشد. حداکثر مقدار فسفر کلسیمی (۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در بین رسوبات رودخانه نازلوچای مشاهده شد. به‌نظر می‌رسد فعالیت‌های کشاورزی و شیلاتی گسترده در بالادست این رودخانه در این بخش نمود یافته است. رسوب فسفات کلسیم از آب منفذی یک فرآیند پیچیده می‌باشد که توسط واکنش‌های حد واسطی که تحت تأثیر pH محلول، غلظت فسفات و ترکیب شیمیایی محلول به‌خصوص یون‌های رقابت‌کننده هستند، کنترل می‌شود (۴ و ۳۶). صرف‌نظر از سازوکار تشکیل، فسفر کلسیمی بسیار پایدارتر از

ایجاد تغییر در شرایط سطح مشترک بین آب روئین و رسوب شده و در نتیجه مقدار فسفر تبدلی را تحت تأثیر قرار دهد (۴۲). این بخش از فسفر معمولاً قادر به تأمین کوتاه‌مدت فسفر مورد نیاز جلبک می‌باشد (۱۹). گزارش‌های مختلف نشان می‌دهد که فسفر تبدلی می‌تواند با زیست‌توده میکروبی نیز ارتباط مستقیمی داشته باشد (۷ و ۲۷).

فسفر باقی‌مانده در رسوبات تمامی رودخانه‌ها به‌جز رودخانه سیمینه‌چای، پس از شکل فسفر کلسیمی دارای بیش‌ترین فراوانی بود. ترنر و همکاران (۲۰۰۵) بخش فسفر باقی‌مانده را مربوط به بخش‌های پایدار مواد آلی مانند لیگنین و کمپلکس‌های آلی فلزی مربوط دانستند. پاهو و همکاران (۲۰۰۵) تأکید کردند که شرایط احیایی شدید می‌تواند فسفر باقی‌مانده (RES-P) و همین‌طور سایر شکل‌های فسفر را آزاد نماید. با این حال این بخش از فسفر عموماً به‌عنوان جزء شیمیایی پایدار و غیرفعال فسفر که زیست‌فراهمی چندانی نیز ندارد، تلقی می‌شود (۳۴). میانگین مقدار فسفر باقی‌مانده از ۱۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم در رودخانه زولاچای تا ۶۹/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم در رودخانه باراندوزچای متغیر بود. غلظت نسبتاً بالای فسفر باقی‌مانده در رسوبات رودخانه‌ای را تاحدی می‌توان به پایداری بالای این جزء از فسفر و شرکت نکردن آن در تبادلات نسبت داد. در خاک‌ها نیز کاربرد درازمدت کودهای فسفره و کودهای دامی موجب افزایش سهم بخش باقی‌مانده فسفر می‌شود (۱۵).

به‌منظور شناخت بهتر روابط موجود بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رسوبات و شکل‌های فسفر، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) روی داده‌های مربوط به ویژگی‌های رسوبات انجام شد. نتایج مربوط به تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج این جدول، سه مؤلفه اول با مقادیر ویژه بیش از یک، قادر به تبیین ۷۵/۸۶ درصد از تغییرات در نمونه‌های رسوب بودند.

داشتند. به‌نظر می‌رسد سهم نسبتاً بالای بخش آهن و آلومینیومی در این رسوبات سهم به‌سزایی در پدیده به‌پروردگی در این رودخانه داشته است. اکسیدهای آهن و آلومینیوم با تغییر شرایط اکسایش و کاهش در محیط دچار دگرگونی می‌شوند که این امر می‌تواند منجر به تحت‌تأثیر قرار گرفتن مقدار فسفر آهن و آلومینیومی شود. اکسیدهای آهن و آلومینیم اغلب به‌عنوان مخزن‌های پرارزش فسفر مدنظر بوده و بیش‌تر به‌صورت پوششی بر روی ذرات شن موجود هستند. همچنین این ترکیبات می‌توانند به‌صورت ذرات مستقل غنی از فسفر نیز یافت شوند (۲۵).

میانگین مقدار فسفر تبدلی از ۴/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم در رودخانه سیمینه‌چای تا ۲۳/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم در رودخانه نازلوچای متغیر بود. در مجموع در رابطه با رودخانه‌های مورد مطالعه این بخش از فسفر دارای کم‌ترین مقدار فراوانی بود. فسفر تبدلی (EXCH-P) بر روی سطوح جذب‌کننده قرار داشته و می‌تواند از سطح رسوبات به طرف آب روئین انتشار یابد (۴۲). در برخی از رودخانه‌ها مانند زولاچای اختلاف زیادی بین رسوبات بالادست و پائین‌دست وجود داشت به‌طوری‌که تغییرات این بخش از فسفر در این رودخانه در دامنه ۲۱/۵-۴/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که در مقایسه با دیگر رودخانه‌ها دارای حداکثر دامنه تغییرات بوده و بیش‌ترین انحراف معیار را نیز دارا است. با وجود این که سهم بخش تبدلی در رسوبات رودخانه‌ای کم بود ولی باید در نظر داشت که فسفر تبدلی می‌تواند به آسانی در آب رودخانه آزاد و به سهولت مورد استفاده جانداران قرار گیرد (۱۸ و ۴۵). از طرف دیگر این بخش حساسیت نسبتاً زیادی به تغییرات pH محیط دارد.

اپرتی و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که ۳۰ تا ۶۰ درصد فسفر تبدلی با افزایش pH از ۷/۴ تا ۹ از رسوبات تخلیه می‌شود. تغییرات شرایط هیدرولیکی اعم از سرعت جریان و یا عمق آن می‌تواند سبب

جدول ۲- آمار توصیفی مقادیر فسفر استخراج شده از اجزاء مختلف رسوبات.

Table 2. Descriptive statistics of phosphorus concentration extracted in different sediment fractions.

| فسفر باقی مانده<br>RES-P | فسفر کلسیمی<br>Ca-P | فسفر آهن و آلومینیومی<br>Fe/Al-P | فسفر تبادل<br>EXCH-P | آماره<br>Statistics | رودخانه<br>River              |
|--------------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------|---------------------|-------------------------------|
| mg kg <sup>-1</sup>      |                     |                                  |                      |                     |                               |
| 76.2                     | 288                 | 9.86                             | 3.51                 | حداقل (Minimum)     | نازلوچای<br>Nazloo Chai       |
| 111                      | 500                 | 53.3                             | 6.98                 | حداکثر (Maximum)    |                               |
| 86.7                     | 395                 | 23.6                             | 23.59                | میانگین (Average)   |                               |
| 10.3                     | 54.5                | 15.5                             | 1.11                 | انحراف معیار (SD)   |                               |
| 64.4                     | 247                 | 27.4                             | 4.2                  | حداقل (Minimum)     | باراندوزچای<br>Barandooz Chai |
| 74.3                     | 362                 | 62.9                             | 11.2                 | حداکثر (Maximum)    |                               |
| 69.3                     | 306                 | 49.0                             | 7.21                 | میانگین (Average)   |                               |
| 4.94                     | 57.6                | 18.9                             | 3.6                  | انحراف معیار (SD)   |                               |
| 62.6                     | 247                 | 17.1                             | 4.55                 | حداقل (Minimum)     | شهرچای<br>Shahar Chai         |
| 99.4                     | 421                 | 25.7                             | 10.8                 | حداکثر (Maximum)    |                               |
| 81.6                     | 327                 | 20.9                             | 6.63                 | میانگین (Average)   |                               |
| 13.9                     | 61.7                | 3.21                             | 2.6                  | انحراف معیار (SD)   |                               |
| 85.4                     | 421                 | 10.9                             | 4.89                 | حداقل (Minimum)     | گدارچای<br>Gadar Chai         |
| 109                      | 478                 | 59.8                             | 12.1                 | حداکثر (Maximum)    |                               |
| 98.9                     | 449                 | 39.1                             | 8.25                 | میانگین (Average)   |                               |
| 12.2                     | 28.3                | 25.3                             | 3.68                 | انحراف معیار (SD)   |                               |
| 103                      | 393                 | 75.7                             | 5.24                 | حداقل (Minimum)     | مهابادچای<br>Mahabad Chai     |
| 118                      | 465                 | 118                              | 10.1                 | حداکثر (Maximum)    |                               |
| 108                      | 432                 | 93.0                             | 6.0                  | میانگین (Average)   |                               |
| 8.56                     | 36.7                | 22.0                             | 2.71                 | انحراف معیار (SD)   |                               |
| 87.3                     | 321                 | 59.5                             | 2.11                 | حداقل (Minimum)     | سیمینهچای<br>Simineh Chai     |
| 106                      | 455                 | 201                              | 5.93                 | حداکثر (Maximum)    |                               |
| 99.1                     | 401                 | 115                              | 4.20                 | میانگین (Average)   |                               |
| 8.36                     | 60.1                | 61.8                             | 1.72                 | انحراف معیار (SD)   |                               |
| 95.3                     | 400                 | 21.9                             | 4.20                 | حداقل (Minimum)     | زولاچای<br>Zola Chai          |
| 159                      | 439                 | 148                              | 21.5                 | حداکثر (Maximum)    |                               |
| 127                      | 420                 | 85.4                             | 12.9                 | میانگین (Average)   |                               |
| 45.5                     | 27.5                | 89.7                             | 12.3                 | انحراف معیار (SD)   |                               |

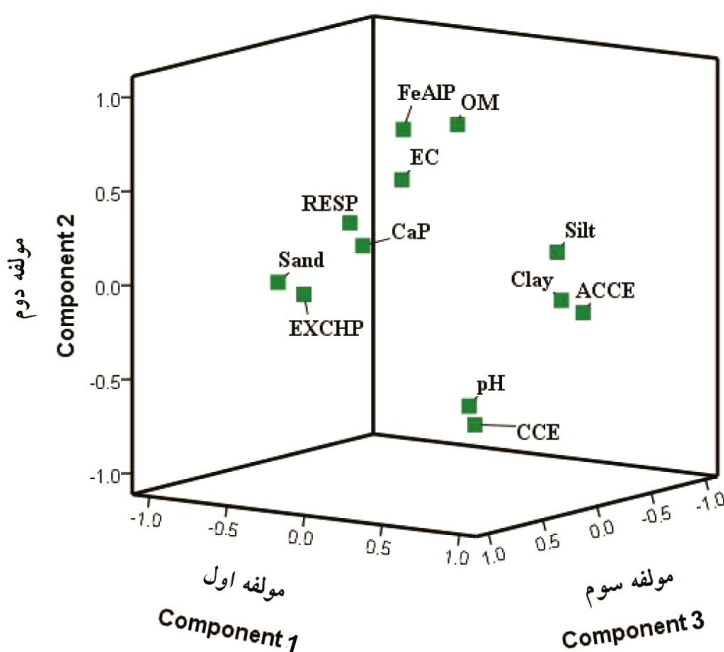
جدول ۳- ویژگی‌های مربوط به مؤلفه‌های اصلی ایجاد شده در روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی.

Table 3. Characteristics of the main components derived from PCA.

| مؤلفه چهارم<br>PC4 | مؤلفه سوم<br>PC3 | مؤلفه دوم<br>PC2 | مؤلفه اول<br>PC1 | ویژگی<br>Characteristics                     |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|--|
| 0.83               | 1.09             | 3.50             | 4.51             | مقدار ویژه (Eigen values)                    |
| 6.90               | 9.08             | 29.18            | 37.59            | درصد واریانس (% of Variance)                 |
| 82.76              | 75.86            | 66.77            | 37.59            | درصد واریانس تجمعی (Cumulative of Variance%) |

ماده آلی و شکل‌های شیمیایی فسفر در تبیین ویژگی‌های آن‌ها است. در مؤلفه اول با توجه به علامت (مثبت و یا منفی) وزن پارامترها، می‌توان گفت که مقدار سیلت و رس به همراه کربنات کلسیم فعال در ارتباط منفی با فسفر تبادلی هستند. از سوی دیگر مقدار شن و فسفر تبادلی در یک راستای مثبت با هم مرتبط می‌باشند. براساس مؤلفه دوم فسفر آهن و آلومینیومی در ارتباط مثبت با ماده آلی و در ارتباط منفی با کربنات کلسیم معادل و pH است.

با توجه به اهمیت سه مؤلفه اول و به‌منظور شناسایی ویژگی‌های تأثیرگذار رسوبات در هر مؤلفه، اقدام به ترسیم توزیع وزن‌های مربوط به ویژگی‌های رسوبات نسبت به سه مؤلفه اول شد (شکل ۵). درصد شن و کربنات کلسیم فعال در مؤلفه اصلی اول، فسفر آهن آلومینیومی و ماده آلی در مؤلفه اصلی دوم و فسفر تبادلی به همراه فسفر باقی‌مانده در مؤلفه اصلی سوم بیش‌ترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۵). این امر نشانگر اهمیت توزیع اندازه ذرات،

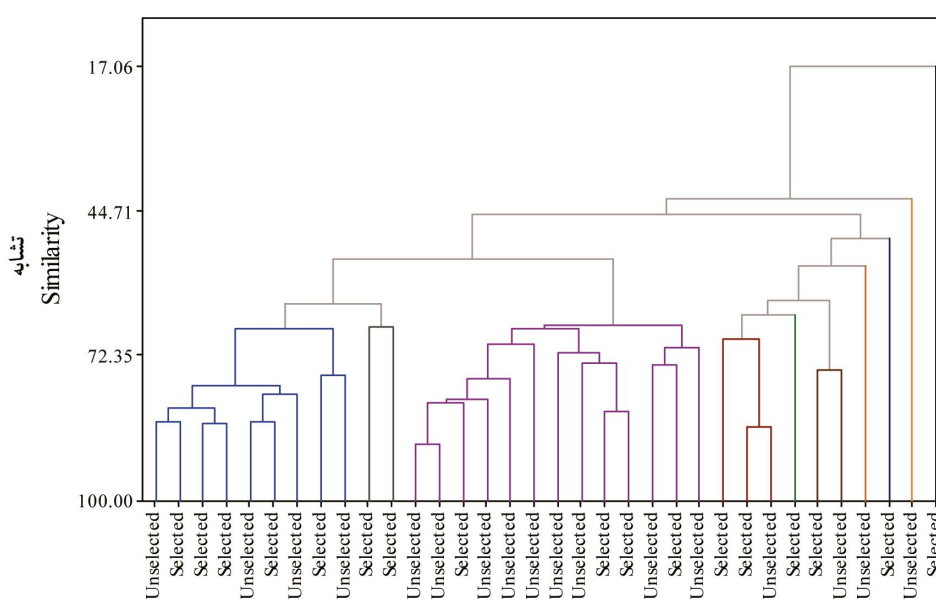


شکل ۵- توزیع وزن‌های دوران‌یافته به روش واریماکس برای سه مؤلفه اصلی.

Figure 5. Varimax rotated loadings for the three components.

خوشه‌ای نمونه‌ها بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و شکل‌های فسفر رسوبات شد. به عبارت دیگر نمودار خوشه‌بندی رسوبات بر مبنای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها ترسیم و از خوشه‌های مختلف که نشان‌دهنده رسوباتی با ویژگی‌های متفاوت هستند، تعدادی نمونه متناسب با تعداد رسوب عضو هر خوشه انتخاب شد. بر این اساس ۱۷ نمونه رسوب برای آزمون جلبکی برگزیده شد (شکل ۶).

همبستگی بین بخش زیست‌فراهم رسوبات با رشد جلبک: با توجه به تعداد زیاد نمونه‌های رسوب و با در نظر گرفتن این واقعیت که آزمون جلبکی یک آزمایش زمان‌بر و هزینه‌بر محسوب می‌گردد، اقدام به انتخاب تعدادی از نمونه‌ها برای ادامه پژوهش در زمینه آزمون جلبکی شد. گزینش نمونه‌های رسوب به نحوی صورت گرفت که این نمونه‌ها دربرگیرنده ویژگی‌های غالب رسوبات منطقه باشند. برای انجام این کار اقدام به آنالیز



شکل ۶- نمودار خوشه‌بندی نمونه‌های رسوب همراه با نمایش نمونه‌های منتخب برای آزمون جلبکی.

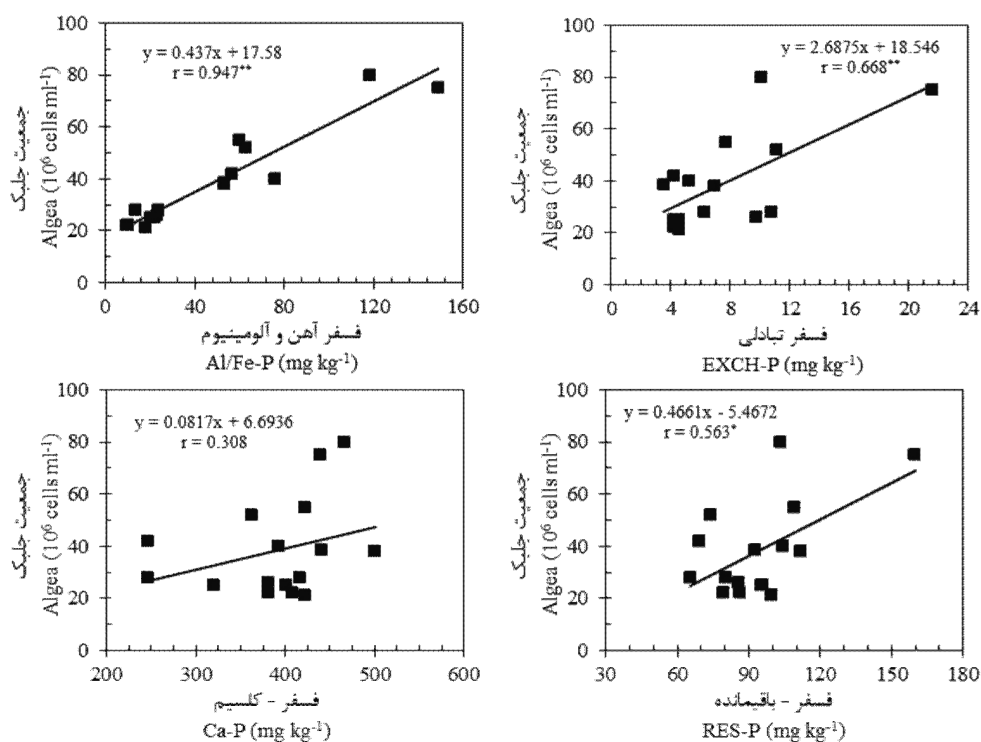
Figure 6. Hierarchical cluster analysis of the samples with depiction of selected samples for algal assay.

می‌تواند به عنوان بخش زیست‌فراهم فسفر برای رشد و توسعه جلبک‌ها در محیط آبی رودخانه‌های حاشیه غربی دریاچه ارومیه در نظر گرفته شود. در رابطه با دلایل بالا بودن سهم بخش آهن و آلومینیوم در تأمین نیاز جلبک می‌توان به حلالیت بالای کانی‌های فسفر آهن و آلومینیوم مانند استرانگایت<sup>۱</sup> و وارسایت<sup>۲</sup> در pHهای بالا (۱۷) و افزایش pH محیط در اثر شرایط احیایی که ناشی از طول دوره نسبتاً بالای (یک ماه) رشد جلبک (۲۲) است، اشاره نمود. همچنین سهم نسبتاً قابل توجه فسفر آهن و آلومینیومی در برخی از نمونه‌های رسوب مانند

ارتباط بین جمعیت جلبکی با شکل‌های مختلف شیمیایی فسفر در شکل ۷ ارائه شده است. نتایج به روشنی نشان می‌دهد که فسفر آهن و آلومینیومی (Fe/Al-P) در مقایسه با سایر شکل‌های شیمیایی فسفر همبستگی بیشتری با جمعیت جلبکی ( $r = 0.947, P < 0.0001$ ) دارد. فسفر کلسیمی همبستگی معنی‌داری ( $r = 0.308, P = 0.246$ ) با جمعیت جلبکی از خود نشان نداد. در مقابل ارتباط فسفر تبادلنی ( $r = 0.668, P < 0.01$ ) و فسفر باقی‌مانده ( $r = 0.947, P < 0.05$ ) با جمعیت جلبکی معنی‌داری بود. این امر نشان می‌دهد که فسفر آهن و آلومینیومی

سهم فسفر تبادلی که در اکثر منابع از آن به‌عنوان بخش سهل‌الوصول و با زیست‌فراهمی بالا یاد می‌شود (۳۲ و ۴۳)، در تأمین نیاز فسفر جلبکی هر چند معنی‌دار بود، اما در مقایسه با فسفر آهن و آلومینیومی بسیار کم‌تر بود. دلیل احتمالی این وضعیت می‌تواند سهم بسیار کم این بخش از فسفر در مقایسه با سایر شکل‌ها باشد که در نتیجه در طول دوره نسبتاً طولانی رشد جلبک، فسفر تبادلی نمی‌تواند به‌طور کامل نیاز فسفری آن را تأمین نماید. ویلامز و همکاران (۱۹۸۰) تأکید کردند که فسفر مورد استفاده توسط جلبک در آزمایشگاه به‌عنوان فسفری که پتانسیل زیست‌فراهمی دارد در نظر گرفته شود زیرا که شرایط بهینه رشد جلبک در طبیعت به‌ندرت اتفاق می‌افتد.

سیمینه‌چای و برخی از نمونه‌های مهابادچای و زولاچای اشاره نمود (۲۸). لو و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که فسفر مورد نیاز برای رشد جلبک سبز-آبی *Microcystis aeruginosa* در طول زمان آزمایش ۴۲ روزه به‌طور عمده از بخش آهن و آلومینیومی تأمین شده و مقدار این شکل از فسفر پس از رشد جلبک به‌شدت کاهش می‌یابد. سهم فسفر کلسیمی در تأمین فسفر مورد نیاز جلبک بسیار اندک و از نظر آماری غیرمعنی‌دار بود و در نتیجه می‌توان گفت که جلبک سندسموس قادر به استفاده از این ذخیره فسفر در طول دوره رشد نمی‌باشد. فسفر کلسیمی بخش ثابت فسفر می‌باشد و بیش‌تر در نوسانات pH و در شرایط اسیدی از رسوبات آزاد می‌شود و معمولاً به‌عنوان مدفن دائمی فسفر در رسوبات در نظر گرفته می‌شود (۱۹ و ۴۲).



شکل ۷- ارتباط بین شکل‌های شیمیایی فسفر با جمعیت جلبکی.

Figure 7. Relationship between algal growth and different phosphorous chemical forms.

- 1- Strongite
- 2- Varasite

## نتیجه گیری کلی

در این پژوهش نمونه‌های رسوب رودخانه‌های غرب دریاچه ارومیه از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و همچنین شکل‌های شیمیایی فسفر مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که رسوبات رودخانه‌ای اغلب آهنکی و درشت‌بافت هستند. به طوری که ذرات شن و سیلت سهم مهمی از ماتریکس رسوبات را تشکیل داده و آنالیز مؤلفه‌های اصلی نیز بر نقش ذرات شن و کربنات کلسیم بر تبیین ویژگی‌های این رسوبات تأکید دارد. ترتیب فراوانی میانگین شکل‌های شیمیایی فسفر در تمامی رودخانه‌ها به غیر از رودخانه سیمینه‌چای به صورت فسفر کلسیمی (Ca-P) < فسفر باقی‌مانده (RES-P) < فسفر آهن و آلومینیومی (Fe/Al-P) < فسفر تبادلی (EXCH-P) بود. در رودخانه سیمینه‌چای فسفر آهن و آلومینیومی بیش از فسفر باقی‌مانده بود. با توجه به همبستگی بسیار بالای فسفر آهن آلومینیومی با جمعیت جلبکی می‌توان انتظار داشت که پتانسیل به‌پروردگی در رودخانه سیمینه در مقایسه با سایر رودخانه‌ها بیش‌تر باشد. با توجه به سهم بالای فسفر کلسیمی در رسوبات و با در نظر گرفتن این واقعیت که این بخش از فسفر کم‌ترین مشارکت را در تأمین

نیاز فسفوری جلبک دارد، تا حدودی انتظار کم بودن خطر پدیده به‌پروردگی در این رودخانه‌ها می‌رود. با این حال اضافه شدن فسفر از منابع نقطه‌ای و همچنین وجود شرایط احیایی در بخشی از مسیر رودخانه‌ها می‌تواند خطر آزاد شدن فسفر به‌ویژه از بخش آهن و آلومینیومی را افزایش داده و در نتیجه منجر به ایجاد شرایط محیطی مطلوب برای پدیده به‌پروردگی شود. بنابراین پایش‌های متناسب برای ارزیابی فسفر قابل‌استفاده در رسوبات رودخانه‌ای به‌ویژه در نقاطی که مورفولوژی رودخانه در اثر عواملی مانند ایجاد بندهای انحرافی و یا سدها تغییر نموده و امکان ایجاد شرایط احیایی پدید می‌آید، ضروری است. نتایج این پژوهش همچنین نشان می‌دهد که استراتژی مدیریتی فسفر در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه باید براساس مقدار فسفر زیست‌فراهم جلبک ارزیابی شود که در این زمینه نیز با توجه به نتایج، فسفر عصاره‌گیری‌شده با هیدروکسید سدیم (فسفر آهن و آلومینیومی) در مرحله دوم عصاره‌گیری گام به گام در روش روش هدلی و همکاران (۱۹۸۲) به‌عنوان معیار ارزیابی زیست‌فراهمی فسفر در رسوبات منطقه پیشنهاد می‌شود.

## منابع

1. Bauyco, G.J. 1962. Hydrometer methods improved for making particle size of soils. *Agron. J.* 56: 464-465.
2. Chang, S.C., and Jackson, M.L. 1957. Fractionation of soil phosphorous. *Soil Sci.* 84: 2. 133-144.
3. Diaz, O.A., Daroub, S.H., Stuk, J.D., Clark, M.W., Lang, T.A., and Reddy, K.R. 2006. Sediment inventory and phosphorous fractions for water conservation Area canals in Everglades. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 868-871
4. Elliott, J.C. 1994. *Structure and Chemistry of the Apatite and other Calcium Orthophosphates.* Elsevier Science, Amsterdam, 404p.
5. Ellison, M.E., and Brett, M.T. 2006. Particulate phosphorus bioavailability as a function of stream flow and land cover. *Water Res.* 40: 6. 1258-1268.
6. Guillard, R.R., and Ryther, J.H. 1962. Studies of marine planktonic diatoms: I. *Cyclotella Nana* Hustedt and *Detonula Confervacea* (CLEVE) *Gran. Can. J. Microbiol.* 8: 2. 229-239.

7. Goedkoop, W., and Pettersson, K. 2000. Seasonal changes in sediment phosphorus forms in relation to sedimentation and benthic bacterial biomass in Lake Erken. *Hydrobiologia*. 431: 1. 41-50.
8. He, Z., Senwo, Z.N., and Tazisong, I.A. 2012. Long-term dynamics of labile and stable phosphorous following poultry litter application to pasture soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 43: 22. 2835-2850.
9. Hedley, M.J., Stewart, J.W.B., and Chauhan, B. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorous fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 5. 970-976.
10. Hoffman, A.R., Armstrong, D.E., Lathrop, R.C., and Penn, M.R. 2009. Characteristics and influence of phosphorous accumulated in the bed sediments of a stream located in an agricultural watershed. *Aquat. Geochem.* 15: 3. 371-389.
11. Joshi, S.R.J., Li, X., and Jaisi, D.P. 2016. Transformation of phosphorous pools in an agricultural soil: an application of oxygen-18 labeling in phosphate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 80: 69-78.
12. Katsaounos, C.Z., Giokas, D.L., Leonardos, I.D., and Karayannis, M.I. 2007. Speciation of phosphorus fractionation in river sediments by explanatory data analysis. *Water Res.* 41: 2. 406-418.
13. Kleeberg, A., and Kozerski, H.P. 1997. Phosphorus release in Lake Großer Müggelsee and its implications for lake restoration. In *Shallow Lakes' 95* Springer Netherlands, 9p.
14. Loeppert, R.H., and Suarez, D.L. 1996. Carbonate and Gypsum. P 437-474, In: D.L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods.* SSSA, NO.5, Madison.
15. Lehmann, J., Lan, Z., Hyland, C., Sato, S., Solomon, D., and Ketterings, Q.M. 2005. Long-term dynamics of phosphorus forms and retention in manure-amended soils. *Environ. Sci. Technol.* 39: 17. 6672-6680.
16. Li, B., and Brett, M.T. 2013. The influence of dissolved phosphorus molecular form on recalcitrance and bioavailability. *Environ. Poll.* 182: 37-44.
17. Lindsay, W.L. 1979. *Chemical equilibria in soils.* John Wiley and Sons Ltd, 429p.
18. Liu, S.M., Zhang, J., and Li, D.J. 2004. Phosphorous cycling in sediments of the Bohai and Yellow Seas. *Estuar Coast Shelf Sci.* 59: 209-218.
19. Liu, J., Luo, X., Zhang, N., and Wu, Y. 2016. Phosphorus release from sediment of Dianchi Lake and its effect on growth of *Microcystis aeruginosa*. *Environ. Sci. Poll. Res.* 23: 16. 16321-16328.
20. Officer, C.B., Biggs, R.B., Taft, J.L., Cronin, L.E., Tyler, M.A., and Boynton, W.R. 1984. Chesapeake Bay anoxia: origin, development and significance. *Science.* 223: 6. 22-27.
21. Okubo, Y., Inoue, T., and Yokota, K. 2012. Estimating bioavailability of soil particulate phosphorus to *Microcystis aeruginosa*. *J. Appl. Phycol.* 24: 6. 1503-1507.
22. Magdoff, F.R., Hryshko, C., Jokela, W.E., Durieux, R.P., and Bu, Y. 1999. Comparison of phosphorus soil test extractants for plant availability and environmental assessment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 999-1006.
23. Mehdizadeh, L., Asadzadeh, F., and Samadi, A. 2015. Application of mathematical models to describe the particle size distribution of sediments behind successive check dams. *Watershed Engineering and Management.* 6: 4. 323-336. (In Persian with English abstract)
24. Murphy, J., and Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.* 27: 31-36.
25. Pacini, N., and Gächter, R. 1999. Speciation of riverine particulate phosphorus during rain events. *Biogeochem.* 47: 1. 87-109.
26. Pheav, S., Bell, R.W., White, P.F., and Kirk, G.J.D. 2005. Phosphorus mass balances for successive crops of fertilised rainfed rice on a sandy lowland soil. *Nutrient Cycling in Agroecosyst.* 73: 2-3. 277-292.
27. Pettersson, K. 2001. Phosphorus characteristics of settling and suspended particles in Lake Erken. *Sci. Total Environ.* 266: 1. 79-86.



- 28.Reddy, K.R., Diaz, O.A., Scinto, L.J., and Agami, M. 1995. Phosphorous dynamics in selected wetlands and streams of the Lake Okeechobee Basin. *Ecol. Eng.* 5: 183-207.
- 29.Shelton, J.E., and Coleman, N.T. 1968. Inorganic phosphorous fractions and their relationship to residual value of large applications of phosphorous on high phosphorous fixing soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 32: 1. 91-94.
- 30.Sims, J.T. 1996. Lime requirement. P 491-516, In: D.L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods.* SSSA, NO.5, Madison.
- 31.Thomas, G.W. 1996. Soil pH and Soil Acidity. P 475-490, In: D.L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods.* SSSA, NO.5, Madison.
- 32.Tiessen, H., Stewart, J.W.B., and Moir, J.O. 1983. Changes in organic and inorganic phosphorous composition of two grassland soils and their particle size fractions during 60-90 years of cultivation. *Soil Sci.* 34: 815-823.
- 33.Tiessen, H.J.W.B., Stewart, J.W.B., and Cole, C.V. 1984. Pathways of phosphorous transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 4. 853-858.
- 34.Turner, B.L., Cade-Menun, B.J., Condron, L.M., and Newman, S. 2005. Extraction of soil organic phosphorus. *Talanta.* 66: 2. 294-306.
- 35.Upreti, K., Joshi, S.R., McGrath, J., and Jaisi, D.P. 2015. Factors controlling phosphorus mobilization in a Coastal Plain tributary to the Chesapeake Bay. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79: 3. 826-837.
- 36.Van Cappellen, P., and Berner, R.A. 1991. Fluorapatite crystal growth from modified seawater solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 55: 1219-1234.
- 37.Wang, C., Kong, H., He, S., Zheng, X., and Li, C. 2010. The inverse correlation between growth rate and cell carbohydrate content of *Microcystis aeruginosa*. *J. Appl. Phycol.* 22: 105-107.
- 38.Wang, S., Jin, X., Zhao, H., and Wu, F. 2006. Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reach of Yangtze River area in China. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 273: 1. 109-116.
- 39.Wright, A.L. 2009. Soil phosphorous stocks and distribution in chemical fractions for long-term sugarcane, pasture, turfgrass and forest systems in Florida. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 83: 3. 223-231.
- 40.Williams, J.D.H., Syers, J.K., Harris, R.F., and Armstrong, D.E. 1971. Fractionation of inorganic phosphate in calcareous lake sediments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 35: 2. 250-255.
- 41.Williams, J.D.H., Shear, H., and Thomas, R.L. 1980. Availability to *Scenedesmus quadricauda* of different forms of phosphorus in sedimentary materials from the Great Lakes. *Limnol. Oceanogr.* 25: 1. 1-11.
- 42.Wu, M., Huang, S., Wen, W., Sun, X., Tang, X., and Scholz, M. 2011. Nutrient distribution within and release from the contaminated sediment of Haihe River. *J. Environ. Sci.* 23: 7. 1086-1094.
- 43.Zhang, T.Q., and MacKenzie, A.F. 1997. Changes of soil phosphorous fractions under long-term corn monoculture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 485-493.
- 44.Zhou, Q., Gibson, C.E., and Zhu, Y. 2001. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK. *Chemosphere.* 42: 2. 221-225.
- 45.Yao, Q.Z., Du, J.T., Chen, H.T., and Yu, Z.G. 2015. Particle-size distribution and phosphorous forms as a function of hydrological forcing in the Yellow River. *Environ. Sci. Poll. Res.* 23: 4. 3385-3398.

Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 24(3), 2017*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## Phosphorus fractionation in relation to algal growth (*Scenedesmus Obliquus*) in western river sediment of Urmia Lake basin

H. Arfania<sup>1</sup>, A. Samadi<sup>2</sup>, \*F. Asadzadeh<sup>3</sup>, E. Sepehr<sup>4</sup> and Z. Asal Pisheh<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Dept. of Soil Science, Urmia University, <sup>2</sup>Professor, Dept. of Soil Science, Urmia University, <sup>3</sup>Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Urmia University, <sup>4</sup>Associate Prof., Dept. of Soil Science, Urmia University, <sup>5</sup>Urmia Lake Research Institute, Urmia University

Received: 01/02/2017; Accepted: 09/21/2017

### Abstract

**Background and Objectives:** Phosphorus is a finite resource and an essential nutrient for sustaining all forms of life in aquatic environment. It was also found in various chemical forms which might be gradually released into water column and exacerbate eutrophic condition in rivers and lakes. Thus, P fractionations provide useful insight into risk posed by P-associated sediments to aquatic environment. There is little information available regarding P chemical forms and its bioavailability in aquatic ecosystems in Iran and there was limited number of publications regarding the evaluation of P forms release from river sediments. The published reports and field observations clearly insist on the phytoplankton growth and some dense algal blooms occurring during years with low water in river sediments. Thus, evaluation of P in aquatic environments by algal bioassay and threats of losing biodiversity could be essential.

**Materials and Methods:** Thirty four river sediments from seven main rivers of the Urmia Lake basin were taken from depth of 0-10 cm for algae (*Scenedesmus Obliquus*) bioavailable P evaluation by sequential chemical extraction. Phosphorous pools in these sediments extracted using operationally defined method that includes as exchangeable (EXCH-P), iron and aluminum oxide-bound (Fe/Al-P), calcium bound (Ca-P) and residual P (RES-P). Principle component analysis was conducted to determine the important properties and chemical forms of P in sediment samples. Algal bioassay was carried out to distinguish the bioavailable P fractions. Hierarchical cluster analysis and Pearson simple correlation were applied for selection of the samples of algal assay and determining bioavailable P fraction, respectively.

**Results:** Generally, sediments had coarse texture with high amount of silt and very fine sand. Principle component analysis indicates that particle and carbonate-related properties have significant role in determination of sediments properties. The average rank order of P extraction by sequential extraction were, Ca-P > RES-P > Fe/Al-P > EXCH-P for all rivers except the Simineh Chai. Simineh Chai sediments had higher concentration of Fe/Al-P than RES-P, indicating possible pollution in the river. There was significant correlation between Fe/Al-P ( $r = 0.947$ ,  $P < 0.0001$ ), EXCH-P ( $r = 0.668$ ,  $P < 0.01$ ) and RES-P ( $R=0.563$ ,  $P < 0.05$ ) with *Scenedesmus Obliquus* growth in studied sediments. However, Ca-P did show no correlation with algal growth during 30 day incubation period.

**Conclusion:** Analysis of P fractions in sediments by sequential chemical extraction shows that Fe/Al-P fraction provided higher potential bioavailability and due to significant correlation with algal growth is proper indicator to evaluate river health and eutrophication of Urmia Lake. River sediment of Urmia Lake had high ability to retain P in Ca-P fraction which could be recalcitrant P pool for algal growth.

**Keywords:** Phosphorus, Sediment, Algae, Bioavailability

\* Corresponding Author; Email: f.asadzadeh@urmia.ac.ir