

محیط زیست طبیعی، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۷۰، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۶
صفحات: ۴۹۳-۵۰۸

ارزیابی شکل‌های مختلف فسفر در رسوبات معلق و بستر رودخانه روضه چای

فرخ اسدزاده^{۱*}، عثمان خالدیان^۲، عباس صمدی^۳

۱. استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه
۳. استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۰۳؛ تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۰۷/۲۶)

چکیده

فرسایش خاک سبب تجمع فسفر در رسوبات رودخانه‌ای شده و در نتیجه احتمال آزاد شدن فسفر در محیط‌های آبی را افزایش می‌دهد. آزاد شدن فسفر در محیط‌های آبی به عنوان یکی از عوامل کلیدی تشدید پدیده غنی‌شدن در آب‌های شیرین است. از این رو آگاهی از غلظت و اجزاء مختلف فسفر در رسوبات رودخانه‌ای دارای اهمیت فراوانی است. هدف از این مطالعه ارزیابی و مقایسه توزیع شکل‌های مختلف فسفر در رسوبات معلق و بستر رودخانه روضه‌چای در استان آذربایجان غربی، شهرستان ارومیه بود. برای این منظور ۱۹ نمونه رسوب بستر و ۶ نمونه رسوب معلق از رودخانه روضه‌چای تهیه شده و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها تعیین شد. شکل‌های مختلف فسفر شامل فسفر محلول و تبادل (KCl-P)، فسفر متصل به اکسیدهای آهن و آلومینیوم (NaOH-P)، فسفر متصل به کلسیم (HCl-P) و فسفر باقیمانده (Res-P) با استفاده از روش عصاره‌گیری متوالی تعیین شد. نتایج نشان داد که رسوبات بستر در مقایسه با رسوبات معلق درصد شن بیشتری داشته ولی مقدار سیلت آن‌ها کمتر است. مقدار ماده آلی نیز در رسوبات بستر بیشتر از رسوبات معلق بود. ترتیب فراوانی شکل‌های فسفر در نمونه‌های رسوب بستر به صورت $\text{KCl-P (0.9\%)} < \text{NaOH-P (3.5\%)} < \text{Res-P (40.8\%)} < \text{HCl-P (54.8\%)}$ و در رسوبات معلق نیز به صورت $\text{NaOH-P (3.5\%)} < \text{Res-P (64.9\%)} < \text{HCl-P (31.9\%)}$ بود. تحلیل چند متغیره با استفاده از تجزیه به مولفه‌های اصلی نشان داد که چهار مولفه اول قادر به تبیین ۸۵/۴ درصد از کل تغییرات ویژگی‌های نمونه‌ها بوده و ویژگی‌های نظیر مقدار سیلت و شن و ماده آلی نقش مهمی در تنظیم توزیع شکل‌های مختلف فسفر در نمونه‌های رسوب دارند.

کلید واژگان: غنی‌شدن، رسوبات رودخانه‌ای، فسفر، شکل‌های فسفر، روضه‌چای

۱. مقدمه

افزایش تخلیه فسفر به رودخانه‌ها به عنوان یک مشکل جدی زیست محیطی در طول دهه‌های اخیر در سرتاسر جهان مورد توجه بوده است. فسفر موجود در رسوبات رودخانه‌ای می‌تواند از منابع مختلفی مانند فرآیندهای طبیعی هوادیدگی و یا فعالیت‌های انسانی ناشی شود. در این بین بسیاری از پژوهشگران معتقدند که فعالیت‌های انسانی نظیر کشاورزی و استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی و همچنین افزوده شدن پساب‌های خانگی، صنعتی و کشاورزی به رودخانه‌ها از مهم‌ترین منابع آلودگی کانونی و غیرکانونی فسفر در حوضه‌های آبخیز و رسوبات رودخانه‌ای هستند (Haygarth *et al.*, 1999). فشار روز افزون بر خاک‌های کشاورزی به منظور تأمین غذای جمعیت رو به افزایش جهان سبب شده که خاک‌های زراعی به سرعت از عناصر غذایی و به‌ویژه فسفر تهی شوند (Aydin *et al.*, 2009; Sharpley & Smith., 1989). در چنین شرایطی برای جبران کمبود عناصر غذایی و حفظ سطح حاصل‌خیزی در خاک، کودهای مختلف دامی و شیمیایی حاوی فسفر به زمین‌های زراعی افزوده می‌شوند که این امر در نهایت سبب تجمع فسفر در افق‌های سطحی شده و پتانسیل انتقال این عنصر از طریق فرسایش خاک و در نتیجه تجمع آن در رسوبات طبیعی را افزایش می‌دهد (McDowell *et al.*, 2001). تجمع فسفر در رسوبات رودخانه‌ای می‌تواند باعث ایجاد پدیده غنی شدن^۱ در اکوسیستم‌های آبی پایین دست شود. پدیده غنی شدن از طریق تحریک رشد جلبک‌ها سبب تخلیه اکسیژن محلول آب شده و در نهایت موجب کاهش تنوع زیستی و تخریب شیمیایی و اکولوژیکی اکوسیستم‌های آبی می‌شود (Undercoffer, 2009).

رسوبات در اکوسیستم‌های آبی می‌توانند به عنوان منبع و یا مخزن فسفر مورد توجه قرار گیرند. تبادل فسفر بین آب و رسوبات یک فرآیند پویا است به گونه‌ای که

رسوبات می‌توانند فسفر خود را به درون آب آزاد کنند و یا این‌که فسفر محلول موجود در آب را از طریق فرآیندهای شیمیایی جذب سطحی نمایند (Correll, 1998; Jalali, 2010). فرآیند تبادل فسفر بین آب و رسوبات می‌تواند انتقال فسفر، زیست‌فراهمی و غلظت آن در آب فوقانی را تحت تأثیر قرار دهد (Pettersson, 1998). Xie و همکاران (۲۰۰۳) دریافتند که فسفر آزاد شده از رسوبات یکی از مهم‌ترین منابع فسفر موجود در آب‌های سطحی بوده و در صورتی که ورودی خارجی فسفر به رودخانه کم شود چرخه فسفر مبتنی بر رسوبات مهم‌ترین عامل کاهنده کیفیت آب خواهد بود. پژوهش‌های گوناگون بیانگر این واقعیت است که کمیت فسفر رها شده از رسوبات تحت تأثیر ماهیت شکل‌های مختلف شیمیایی فسفر و همچنین ویژگی‌های سطح جذب کننده است (Gonsiorczyk *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2009). محققین مختلف نشان داده‌اند که اندازه ذرات رسوبات نقش مهمی در کیفیت شیمیایی آب رودخانه داشته و به طور سنتی دو طیف از اندازه ذرات شامل ذرات کوچکتر از ۲۰۰۰ میکرون و ذرات کوچکتر از ۶۳ میکرون در مطالعات مربوط به زیست‌فراهمی و توزیع شکل‌های شیمیایی عناصر در رسوبات مورد توجه قرار می‌گیرند (Turner *et al.*, 2004; Devesa-Ray *et al.*, 2009). به رغم این‌که رسوبات نقش مهمی در چرخه فسفر در اکوسیستم‌های آبی بازی می‌کنند اما ذکر این نکته ضروری است که غلظت کل فسفر در رسوبات نمی‌تواند تخمین دقیقی از پتانسیل خطر اکولوژیکی مربوط به آن را برآورد نماید. از این رو به منظور مدیریت مطلوب اکوسیستم‌های آبی لازم است که نه تنها به مقدار فسفر کل رسوبات توجه شود بلکه نیاز است که غلظت شکل‌های مختلف آن نیز مورد ارزیابی کمی قرار گیرد (Aydin *et al.*, 2009). ویژگی‌های مختلفی از رسوبات مانند مقدار ماده آلی، کربنات‌ها و همچنین توزیع اندازه ذرات می‌تواند در الگوی توزیع شکل‌های فسفر مؤثر باشد. زیست‌فراهمی فسفر در

¹Eutrophication

ترتیب بیشترین و کمترین مقدار را در بین شکل‌های مختلف فسفر دارا هستند. Sun و همکاران (۲۰۰۹) نیز گزارش کردند که در رسوبات رودخانه‌های هابه در چین، فسفر متصل به کربنات‌ها (HCl-P) بیشترین فراوانی و فسفر قابل عصاره‌گیری با کلرید آمونیوم (NH₄Cl-P) کمترین فراوانی را دارند. Jalali (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای بر روی رسوبات رودخانه‌ای گزارش کرد که فسفر قابل عصاره‌گیری با کلرید پتاسیم به عنوان جزئی از فسفر که دارای بیشترین قابلیت آزاد شدن از رسوبات است دارای کمترین فراوانی در بین سایر شکل‌ها فسفر رسوبات بوده و به طور متوسط در حدود ۶/۷ درصد از کل فسفر رسوبات را تشکیل می‌دهد. پژوهش‌های ذکر شده به روشنی نشان می‌دهند که فسفر کل رسوبات به تنهایی نمی‌تواند پتانسیل آزاد شدن فسفر از آن‌ها را تبیین نموده و ارزیابی کمی شکل‌های مختلف رسوبات دارای اهمیت فراوانی است. بنابراین مدیریت حوضه‌های آبخیز از دیدگاه کیفیت رسوبات به منظور جلوگیری از آلودگی‌های زیست محیطی و مبارزه با پدیده‌هایی مانند غنی‌شدن اکوسیستم‌های آبی نیازمند آگاهی از توزیع شکل‌های فسفر در رسوبات است. بر این اساس این پژوهش با هدف بررسی شکل‌های مختلف فسفر در رسوبات معلق و بستر رودخانه‌ی روضه‌چای واقع در استان آذربایجان غربی صورت گرفته و طی آن تلاش شده تا شکل‌های مهم شیمیایی فسفر به صورت کمی در رسوبات بستر و معلق رودخانه اندازه‌گیری شده و مورد مقایسه قرار گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. معرفی منطقه مورد مطالعه

نمونه‌های رسوب مورد آزمایش در این تحقیق از رودخانه‌ی روضه‌چای واقع در استان آذربایجان غربی و شهرستان ارومیه تهیه شدند. روضه‌چای رودخانه‌ای است با طول تقریبی ۵۱ کیلومتر که مساحت حوضه آن در

سیستم‌های آبی به طور کلی در ارتباط با مقدار فسفر محلول است اما کمی کردن مقدار فسفر محلول به تنهایی نیز نمی‌تواند زیست‌فراهمی فسفر در اکوسیستم‌های آبی را تبیین نماید. با توجه به اینکه فسفر در شکل‌های مختلف شیمیایی بر روی رسوبات انباشته شده و هر یک از این شکل‌ها می‌توانند پتانسیل متفاوتی در آزادسازی فسفر به منابع آبی داشته باشند، استفاده از روش‌های شیمیایی به ویژه روش‌های عصاره‌گیری متوالی برای کمی کردن شکل‌های مختلف فسفر بسیار مفید بوده و می‌تواند پتانسیل زیست‌فراهمی فسفر در رسوبات رودخانه‌ای را به خوبی تبیین نماید (Chang & Jackson, 1957). از این روش شناخت جزءبندی فسفر در رسوبات برای پیش‌بینی زیست‌فراهمی، قابلیت آبشویی، تغییر و تبدیل شکل‌های مختلف شیمیایی فسفر بین آب سطحی و رسوبات و همچنین جلوگیری از پدیده‌ی غنی‌شدن در اکوسیستم‌های آبی مفید خواهد بود. Penn و همکاران (۱۹۹۵)، در مطالعه‌ای بر روی تعیین شکل‌های مختلف فسفر در رسوبات، گزارش کردند که فسفر قابل عصاره‌گیری با کلرید پتاسیم (KCl-P) به عنوان بخشی از فسفر که قابلیت انحلال بالایی دارد در حدود ۱-۲۵ درصد از کل فسفر رسوبات را تشکیل می‌دهد. Aviles و همکاران (۲۰۰۶) با مطالعه‌ی رسوبات رودخانه‌ای در اسپانیا گزارش کردند که شکل‌های غیرآلی فسفر فراوانی بیشتری نسبت به شکل‌های آلی آن در رسوبات دارند. Kaiserli و همکاران (۲۰۰۲) جزءبندی فسفر در رسوبات ۲ دریاچه واقع در یونان را مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند که فسفر قابل عصاره‌گیری با اسیدکلریدریک (HCl-P) بیشترین فراوانی و فسفر قابل عصاره‌گیری با کلرید آمونیوم (NH₄Cl-P) کمترین فراوانی را در رسوبات داشتند. Wang (۲۰۱۲) جزءبندی فسفر در دو منطقه‌ی میانی و پایین‌دست رودخانه‌ی یانگتزه در کشور چین را مورد بررسی قرار داده و گزارش نمود که NaOH-P (فسفر متصل به اکسیدهای آهن و آلومینیوم) و NH₄Cl-P به

نمونه از بخش پایین دست رودخانه بود تهیه شد. همچنین در این پژوهش ۶ نمونه رسوب معلق نیز تهیه شد؛ به این ترتیب که در شرایط وقوع جریان سیلابی در آبان ماه ۱۳۹۳ حجمی از آب گل آلود رودخانه گرفته شده و پس از تبخیر آب نیز نمونه‌های رسوب معلق به دست آمد (شکل ۱).

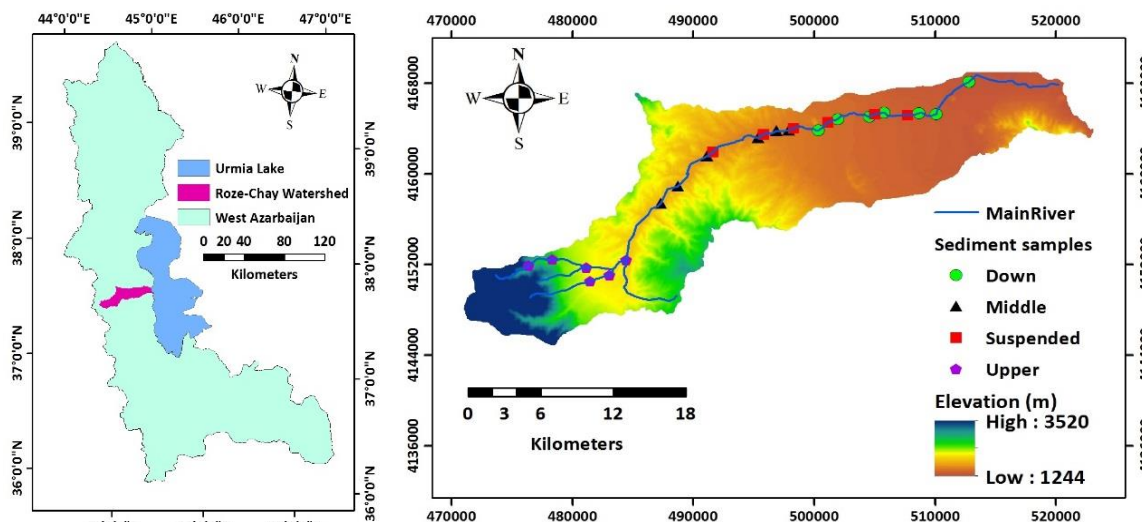
نمونه‌های رسوب پس از خشک شدن در دمای آزمایشگاه، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. توزیع اندازه ذرات رسوبات به روش هیدرومتری، pH و هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع، کربن آلی به روش اکسیداسیون مرطوب، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید، فسفر قابل استفاده به روش اولسن، فسفر کل به روش هضم نمونه با اسید نیتریک و اسید پرکلریک غلیظ و در نهایت فسفر آلی از اختلاف فسفر کل و فسفر معدنی تعیین شد (Rowell, 1994).

حدود ۴۵۳۰۰ هکتار است. این رودخانه از ارتفاعات مرزی ایران و ترکیه به نام قارلی‌داغ سرچشمه گرفته و جزء رودخانه‌های فصلی است که با نزول باران و یا ذوب شدن برف‌ها جریان‌های سیلابی در آن به‌وجود آمده و در نهایت به دریاچه ارومیه می‌ریزد. فعالیت‌های کشت و کار در بخش‌های بالادست حوضه به دلیل شیب‌دار بودن اراضی از نوع کشت دیم بوده در در بخش‌های پایین دست حوضه نیز کشت آبی انجام می‌شود.

۲.۲. نمونه‌برداری و تعیین ویژگی‌های فیزیکی و

شیمیایی

نمونه‌های رسوبات بستر رودخانه از سه بخش بالادست، میانی و پایین دست حوضه آبخیز و از عمق ۵-۰ سانتی‌متری بستر رودخانه (Katsaounos *et al.*, 2007) تهیه شد. در مجموع ۱۹ نمونه رسوب بستر که شامل ۶ نمونه از بخش بالادست، ۶ نمونه از بخش میانی و ۷



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز رودخانه روضه‌چای در استان آذربایجان غربی و نقاط نمونه‌برداری در طول رودخانه

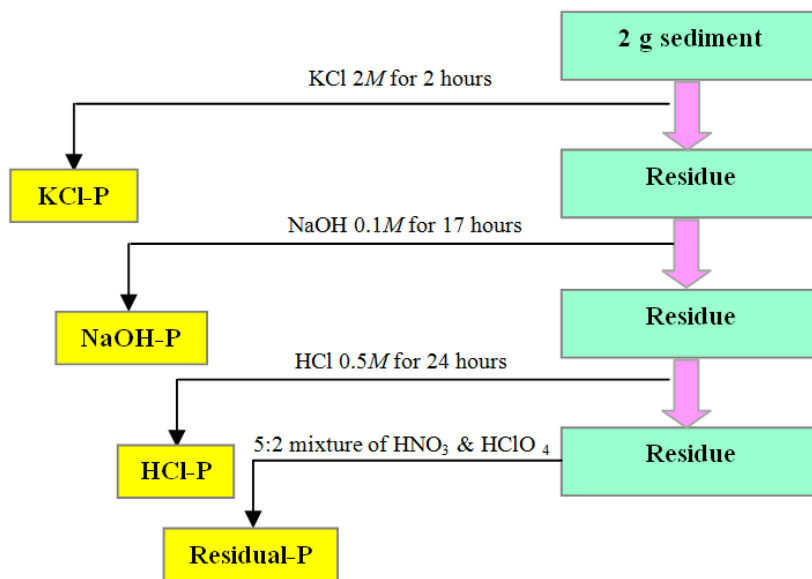
و همکاران (۲۰۰۷) اصلاح شده است صورت گرفت. این روش یک روش عصاره‌گیری متوالی است که فسفر معدنی را در ۴ شکل فسفر محلول و تبدالی (قابل عصاره‌گیری با

۲.۳. تعیین شکل‌های فسفر در نمونه‌های رسوبات

جزءبندی فسفر معدنی در رسوبات با استفاده از روش Hedley و همکاران (۱۹۸۲) که توسط Alvarez-Rogel

غلظت عصاره‌گیری‌های مختلف و زمان تعادل مربوطه به صورت طرح‌دار در شکل ۲ ارائه شده است. اندازه‌گیری غلظت فسفر در عصاره‌ها به روش رنگ سنجی (Murphy & Riley, 1962) و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر انجام گرفت.

کلرید پتاسیم (KCl-P)، فسفر متصل به اکسیدهای آهن و آلومینیوم (قابل عصاره‌گیری با هیدروکسید سدیم؛ NaOH-P)، فسفر متصل به کلسیم (قابل عصاره‌گیری با اسید کلریدریک؛ HCl-P) و فسفر باقیمانده (Res-P) جزءبندی می‌کند. مراحل عصاره‌گیری متوالی به همراه



شکل ۲. ترتیب طرح‌وار عصاره‌گیری متوالی فسفر به روش اصلاح شده Hedley

مقدار pH در رسوبات بستر و معلق در محدوده خنثی و یا کمی بازی نوسان داشت. کاهش pH در رسوبات بستر احتمالاً ناشی از ورود فاضلاب‌های روستایی به داخل رودخانه مورد مطالعه است. مقدار میانگین هدایت الکتریکی در رسوبات بستر $1/34 \text{ dSm}^{-1}$ و در رسوبات معلق $0/59 \text{ dSm}^{-1}$ بود. همچنین مقدار میانگین کربنات کلسیم معادل در رسوبات بستر و معلق به ترتیب ۱۴/۲۶ و ۱۸/۴۲ درصد به دست آمد. بالابودن درصد کربنات کلسیم معادل در هر دو گروه از رسوبات می‌تواند بیانگر آهکی بودن خاک‌های بالادست که طی فرآیند فرسایش و رسوب وارد رودخانه می‌شوند، باشد. میانگین ماده آلی در رسوبات بستر ۱/۱۹ درصد و در رسوبات معلق ۰/۷ درصد بود. بالابودن ماده آلی در رسوبات بستر را شاید بتوان به

۳. نتایج

۱،۳. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رسوبات

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های رسوب بستر و معلق در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود نمونه‌های رسوبات بستر و معلق دارای محتوای رس اندکی بوده و تفاوت قابل توجهی با یکدیگر ندارند. در حالی که نمونه‌های رسوب بستر و معلق از نظر محتوای سیلت و شن تفاوت نسبتاً زیادی با یکدیگر داشته و میزان سیلت در نمونه‌های رسوب معلق با میانگین ۴۴/۰۲ درصد بسیار بیشتر از میزان سیلت در نمونه‌های بستر با میانگین ۱۵/۹۴ درصد (میانگین تمامی رسوبات بستر) است.

ورود فاضلاب‌های خانگی به درون رودخانه نسبت داد. همچنین مقدار میانگین فسفر قابل استفاده در رسوبات بستر و معلق به ترتیب ۱۴ و ۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسوب هوا خشک به دست آمد.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی عمومی در نمونه‌های رسوبات رودخانه

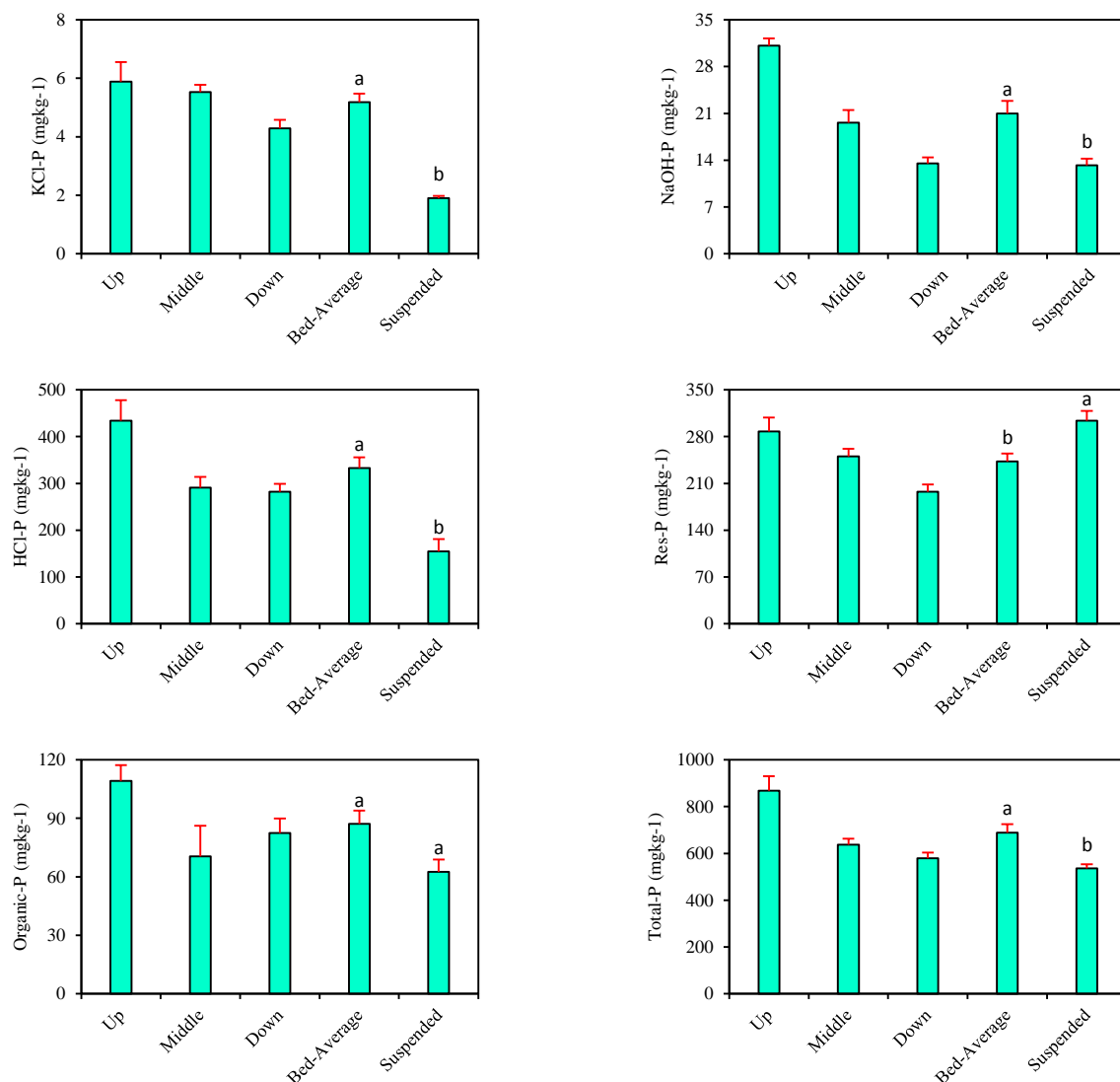
رسوبات معلق	رسوبات بستر						ویژگی رسوبات	
	پایین دست		میانی		بالادست			
انحراف میانگین معیار	انحراف میانگین معیار	انحراف میانگین معیار	انحراف میانگین معیار	انحراف میانگین معیار	انحراف میانگین معیار	انحراف میانگین معیار		
۳/۴۸	۹/۲۵	۱/۷۶	۷/۴۳	۱/۷۵	۷/۵۸	۱/۴۲	۸/۴۶	رس (%)
۹/۶۳	۴۴/۰۲	۰/۷۹	۱۴/۰۱	۵/۱۹	۱۹/۴۲	۲/۰۶	۱۴/۴۱	سیلت (%)
۱۲/۸۰	۴۶/۷۳	۲/۱۸	۷۸/۵۶	۶/۶۷	۷۲/۹۹	۲/۶۸	۷۷/۱۲	شن (%)
۰/۴۳	۷/۸۴	۰/۱۵	۷/۱۷	۰/۱۶	۷/۱۵	۰/۳۳	۷/۵۸	pH
۰/۱۴	۰/۵۹	۰/۳۰	۱/۰۱	۰/۲۰	۱/۱۳	۰/۶۳	۱/۹۰	EC (dSm ⁻¹)
۰/۱۹	۰/۷۰	۰/۱۶	۰/۹۷	۰/۲۳	۱/۱۶	۰/۲۶	۱/۴۴	ماده آلی (%)
۱/۲۸	۱۸/۴۲	۰/۸۶	۱۳/۷۹	۰/۵۲	۱۳/۷۵	۱/۳۳	۱۵/۲۵	کربنات کلسیم معادل (%)
۱/۵۴	۱۵/۸۸	۱/۲۵	۱۱/۱۸	۲/۴۷	۱۴/۲۰	۱/۷۰	۱۷/۰۰	فسفر اولسن (mgkg ⁻¹)

Res-P در رسوبات معلق نسبت به رسوبات بستر بیشتر است. در رابطه با میزان فسفر آلی نیز نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که هرچند مقدار فسفر آلی در نمونه‌های رسوب بستر بیش از نمونه‌های معلق است، اما تفاوت فسفر آلی در این دو گروه از رسوبات معنی‌دار نبود. در شکل‌های ۴ و ۵ نیز درصد فراوانی هریک از شکل‌های فسفر معدنی به ترتیب برای رسوبات معلق و بستر ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود هم در رسوبات بستر و هم در رسوبات معلق مقدار KCl-P دارای کمترین فراوانی است. به طوری که جزء KCl-P در رسوبات معلق به طور میانگین ۰/۴ درصد و در رسوبات بستر ۰/۹ درصد از کل فسفر معدنی رسوبات را به خود اختصاص داده‌اند. شکل HCl-P و Res-P نیز به ترتیب با میانگین ۵۴/۸ و ۴۰/۸ درصد داری بیشترین فراوانی در رسوبات بستر هستند. در رابطه با رسوبات معلق نیز بیشترین فراوانی مربوط به جزء Res-P با میانگین ۶۴/۹ درصد است.

۲،۳. شکل‌های مختلف فسفر در رسوبات بستر و معلق

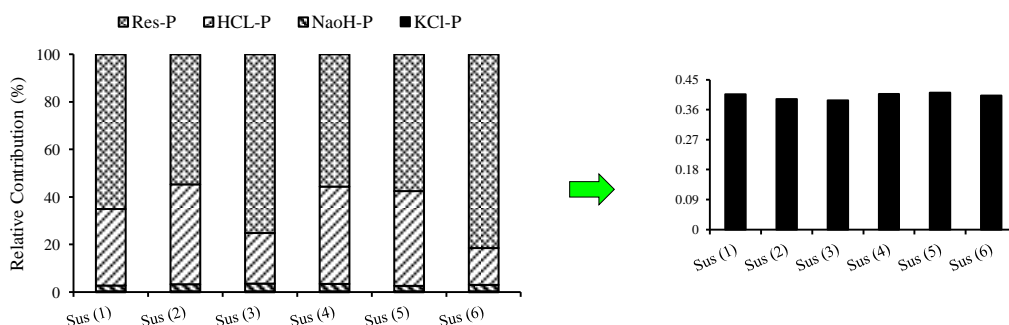
نتایج مربوط به اندازه‌گیری شکل‌های مختلف فسفر در رسوبات بستر و معلق به تفکیک در شکل ۳ ارائه شده است. میانگین غلظت شکل‌های مختلف فسفر معدنی شامل HCl-P، NaOH-P، KCl-P و Res-P در رسوبات بستر به ترتیب برابر با ۵/۱، ۲۱/۰، ۳۳۲/۸ و ۲۴۲/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد. مقادیر شکل‌های فسفر ذکر شده برای رسوبات معلق نیز به ترتیب برابر با ۱/۹، ۱۳/۲، ۱۵۴/۳ و ۳۰۳/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود.

در این شکل همچنین نتایج مقایسه میانگین شکل‌های مختلف فسفر در رسوبات معلق و بستر با استفاده از آزمون t نیز ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل نیز مشاهده می‌شود میزان شکل‌های مختلف فسفر معدنی در رسوبات بستر و معلق با یکدیگر دارای تفاوت معنی‌داری است. به گونه‌ای که در مجموع، میانگین HCl-P، NaOH-P، KCl-P و Total-P در رسوبات بستر نسبت به رسوبات معلق بیشتر است در حالی که میانگین

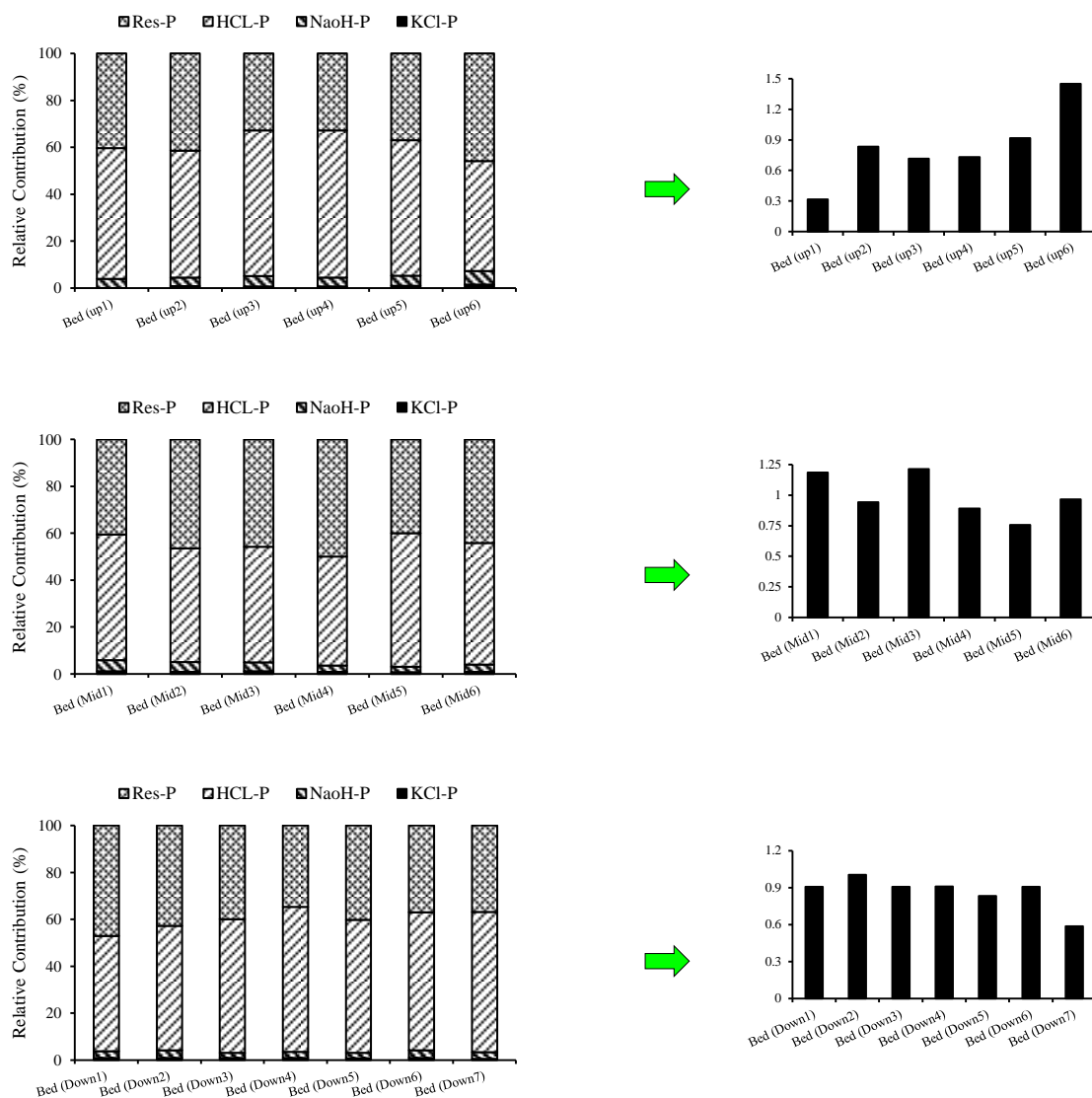


شکل ۳. میانگین غلظت شکل‌های معدنی و آلی فسفر در رسوبات بستر و معلق

(در این شکل مقایسه‌های آماری بین میانگین کل رسوبات بستر و رسوبات معلق صورت گرفته است)



شکل ۴. سهم نسبی هر یک از شکل‌های فسفر در رسوبات معلق



شکل ۵. سهم نسبی هریک از شکل های فاسفر در رسوبات بستر

۴. بحث و نتیجه گیری

۴.۱. ویژگی های فیزیکوشیمیایی رسوبات

نتایج مربوط به مقایسه‌ی ویژگی‌های عمومی رسوبات بستر و معلق نشان داد که در مجموع رسوبات بستر نسبت به رسوبات معلق دارای سیلت کم‌تر و شن بیشتری هستند. به نظر می‌رسد که دلیل این اختلاف در قابلیت انتقال این دو ذره باشد. ذرات شن به دلیل درشت‌تر بودن سرعت ته‌نشست بیشتری داشته و در نتیجه قابلیت

انتقال کمتری دارند در حالی که ذرات سیلت نسبت به ذرات شن اندازه کوچک‌تر و سرعت ته‌نشست کمتری دارند و در نتیجه قابلیت انتقال آن‌ها توسط رواناب سطحی و جریان‌های رودخانه‌ای بیشتر است. با این حال مقدار میانگین محتوای ذرات رس هم در نمونه‌های بستر و هم در نمونه‌های رسوب معلق کم و به ترتیب برابر با ۷/۸ و ۹/۳ درصد بود. Lair و همکاران (۲۰۰۹)، Wang و همکاران (۲۰۰۹) و همچنین Li و همکاران (۲۰۱۳) نیز

زمینه نتایج مشابهی توسط پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است (Wang, 2012; Jalali, 2010; Lair و همکاران (۲۰۰۹) میانگین مقدار سیلت در نمونه‌های رسوب معلق رودخانه دانوب را در حدود ۵۰ درصد گزارش کردند. Wang و همکاران (۲۰۰۹) نیز مقدار سیلت در چهار نمونه رسوب رودخانه‌ای را در دامنه ۴۴-۵۳ درصد گزارش کردند. در مقایسه بین رسوبات بستر و معلق رسوبات بستر دارای مقدار ماده آلی بیشتری بودند. با توجه به فصلی بودن رودخانه و با در نظر گرفتن این‌که اغلب فاضلاب‌های خانگی به‌ویژه در بخش‌های بالادست رودخانه مستقیماً به بستر خشک رودخانه وارد می‌شوند، رسوبات بستر رودخانه در اثر مواد آلی منشاء گرفته از فاضلاب‌های خانگی، دارای محتوای ماده آلی بیشتری بوده باشند.

۴.۲. شکل‌های معدنی فسفر

فسفر عصاره‌گیری شده با کلریدپتاسیم (KCl-P) نشان دهنده شکل زیست‌فراهم فسفر است که با پیوند ضعیفی جذب رسوبات شده است (Kaiserli et al., 2002). مقدار فسفر محلول و تبادلی (زیست‌فراهم) در رسوبات سطحی پارامتر مهمی در برآورد بار درونی و قابلیت رهاسازی فسفر به درون آب است (Rydin, 2000). مقدار میانگین فسفر محلول و تبادلی در رسوبات بستر و معلق به ترتیب ۵/۱ و ۱/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسوب هوا خشک بود. در رسوبات بستر نیز با حرکت به سمت پایین‌دست رودخانه مقدار KCl-P کاهش یافت. این جزء از فسفر در رسوبات بستر ۰/۹ و در رسوبات معلق ۰/۴ درصد از کل فسفر معدنی را تشکیل می‌دهد. به طور کلی فسفر محلول و تبادلی (KCl-P) با قدرت کمی جذب رسوبات شده است و همواره در حال تبادل با آب منفذی و همچنین سایر شکل‌های فسفر است که این امر می‌تواند دلیلی بر کم بودن مقدار آن نسبت به سایر شکل‌های فسفر در هر دو گروه از رسوبات باشد. نتایج نشان داد که این شکل از فسفر در هر دو گروه از رسوبات کمترین فراوانی را در بین سایر شکل‌ها دارد. در این

زمینه نتایج مشابهی توسط پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است (Wang, 2012; Jalali, 2010; Penn et al., 1995 و همکاران (۱۹۹۵) فراوانی جزء KCl-P را در رسوبات آهکی در محدوده ۱-۲۵ درصد گزارش کردند. Jalali (۲۰۱۰) نیز فراوانی KCl-P را در رسوبات رودخانه آبشینه به طور متوسط ۶/۷ درصد گزارش کرده است. مقدار کم این جزء در رسوبات معلق می‌تواند ناشی از شدت و تلاطم جریان در یک رخداد بارندگی باشد چرا که در حین جریان متلاطم سیلابی، بخشی از فسفر تبادلی از سطح ذرات به درون آب رها می‌شود (Andrieux-Loyer & Aminot, 2001). در این زمینه نتایج Liu و همکاران (۲۰۱۳) نیز نشان می‌دهد که مقدار فسفر محلول و تبادلی در رسوبات معلق مربوط به شاخه‌های فرعی رودخانه که در معرض جریان‌های سیلابی هستند در مقایسه با رسوبات بستر کمتر است. pH رسوبات نیز در زیست‌فراهمی فسفر و در نتیجه میزان KCl-P مؤثر است به طوری که در شرایط قلیایی، شدت جذب فسفر توسط ذرات رسوب افزایش یافته و در نتیجه مقدار جزء قابل دسترس یا زیست‌فراهم آن کاهش می‌یابد (White, 1981). از سوی دیگر مقدار ماده آلی بیشتر در رسوبات بستر می‌تواند در افزایش فسفر زیست‌فراهم این رسوبات مؤثر باشد. در این زمینه Huo و همکاران (۲۰۱۱) به وجود رابطه مثبت و معنی‌دار بین محتوای ماده آلی و فسفر قابل استفاده اشاره نموده‌اند. همچنین کاهش جزء تبادلی در رسوبات معلق را می‌توان به سرعت بالای جذب و رهاسازی فسفر بین آب و رسوب در شرایط تلاطم جریان نیز نسبت داد. Hoffman (۲۰۰۸) به افزایش سرعت فرآیند جذب و رهاسازی فسفر، بین رسوبات و آب رودخانه در شرایط تلاطم جریان در مقایسه با جریان آرام پایه‌ای اشاره نموده است. فسفر عصاره‌گیری شده با هیدروکسید سدیم (NaOH-P)، شامل فسفر پیوندشده با اکسیدها و هیدروکسیدهای بی‌شکل و کریستالی آهن و آلومینیم

بتواند کم بودن غلظت NaOH-P را در رسوبات توجیه کند. در برخی از تحقیقات انجام شده بر روی رسوبات کف رودخانه‌ها و دریاچه‌ها نیز نتایج نسبتاً مشابهی گزارش شده است (Tournoud *et al.*, 2005). با این حال بایستی این نکته مورد تأکید قرار گیرد که این جزء فسفر پس از جزء محلول و قابل تبدالی بیشترین پتانسیل رهاسازی در محیط را دارا بوده و می‌تواند نقش قابل توجهی در تشدید پدیده شکوفایی جلبکی داشته باشد (Shan *et al.*, 2016) و بر مبنای این واقعیت می‌توان به پتانسیل آزاد شدن این جزء از فسفر به ویژه از رسوبات بستر رودخانه روضه‌چای اشاره نمود.

فسفر عصاره‌گیری شده با اسید کلریدریک (HCl-P) نشان دهنده شکل‌هایی از فسفر است که به pH های پایین حساس هستند. این جزء عمدتاً شامل فسفر موجود در آپاتیت، فسفر متصل به کربنات‌ها و فسفر آلی قابل هیدرولیز است (Kaiserli *et al.*, 2009). به طور کلی این جزء از فسفر نقش کمتری در وقوع پدیده غنی شدن دارد و در مقایسه با سایر جزءهای فسفر در رسوبات آهکی فراوانی بیشتری دارد (Wright, 2009). این شکل از فسفر در مقایسه با NaOH-P و KCl-P دارای پایداری بیشتری بوده و به ایجاد ذخیره دائمی در رسوبات کمک می‌کند (Jalali, 2010). میانگین غلظت HCl-P در رسوبات بستر و معلق به ترتیب برابر با ۳۳۲/۸ و ۱۵۴/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسوب هوا خشک بود. این جزء از فسفر در رسوبات بستر ۵۴/۸ و در رسوبات معلق ۳۱/۹ درصد از فسفر معدنی کل را تشکیل می‌دهد و با حرکت به سمت پایین دست رودخانه از غلظت HCl-P کاسته می‌شود. یکی از دلایل بالا بودن جزء HCl-P در رسوبات بستر می‌تواند تشکیل کلسیت و رسوب همزمان فسفر و تشکیل کانی هیدروکسی آپاتیت در رسوبات بستر باشد. Hartley و همکاران (۱۹۹۷) فرآیند تشکیل کلسیت و رسوب همزمان فسفر و تشکیل کانی هیدروکسی آپاتیت را عامل اصلی کنترل فسفر در شدت جریان‌های پایین گزارش کردند. از طرف دیگر اضافه شدن فسفر به رسوبات توسط

است (Sun *et al.*, 2009). فسفر موجود در این بخش ممکن است تحت شرایط احیایی ناپایدار باشد، بنابراین بسته به شرایط محیطی، جابجایی فسفر به داخل و یا خارج از این شکل می‌تواند قابل توجه باشد (Wang *et al.*, 2009). میانگین غلظت فسفر پیوند شده به اکسیدهای آهن و آلومینیم در رسوبات بستر و معلق به ترتیب ۲۱/۰ و ۱۳/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسوب هوا خشک بود. این جزء از فسفر در رسوبات بستر ۳/۵ و در رسوبات معلق ۲/۸ درصد از فسفر معدنی کل را تشکیل می‌دهد. در رسوبات بستر نیز با حرکت به سمت پایین دست رودخانه مقدار NaOH-P کاسته می‌شود. در شرایط سیلابی، به دلیل کمبود اکسیژن و در نتیجه احیاء آهن سه ظرفیتی و تحرک کمپلکس‌های رس-هومیکی حاوی فسفر، فسفر به درون آب رها شده و در نتیجه مقدار فسفر متصل به اکسیدهای آهن کاهش می‌یابد (Ryden *et al.*, 1977). این شرایط در مقایسه مقدار NaOH-P رسوبات بستر و معلق به روشنی قابل مشاهده است. به نظر می‌رسد که تشدید شرایط احیایی با حرکت به سمت پایین دست آبراهه نیز به همان نحو سبب کاهش میزان NaOH-P در رسوبات پایین دست رودخانه شده باشد. در مجموع این جزء از فسفر با نوسان شرایط اکسید و احیایی ناپایدار گشته و در نتیجه مقدار آن در رسوبات تحت تأثیر شرایط اکسید و احیایی است (Moore & Reddy, 1994) بنابراین افزایش این شکل از فسفر در رسوبات بستر را نیز می‌توان به دلیل شرایط اکسیدی (فصل خشک) در بستر رودخانه نسبت داد (Spears *et al.*, 2006). در کل در هر دو گروه از رسوبات غلظت فسفر متصل به آهن و آلومینیم اندک بوده و کمتر از ۴ درصد کل غلظت فسفر معدنی را به خود اختصاص می‌دهد. به نظر می‌رسد که در شرایط قلیایی ضعیف نظیر آنچه در این رسوبات مشاهده می‌شود، کانی‌های آهن‌دار به خاطر دوره‌های اکسید و احیایی که بر رسوبات حاکم بوده است، فسفر موجود در ساختار خود را به داخل آب رودخانه آزاد کرده‌اند. شاید این موضوع تا حدودی

بالای فسفر باقیمانده در هر دو گروه از رسوبات را تاحدی می‌توان به پایداری بالای این جزء از فسفر و شرکت نکردن آن در تبادلات نسبت داد. افزایش جزء باقیمانده در رسوبات معلق نسبت به بستر را می‌توان به توزیع اندازه ذرات رسوب و شدت جریان رواناب نسبت داد. Leinweber و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند که با افزایش مقدار شن در رسوبات، مقدار فسفر باقیمانده کاهش می‌یابد که این امر می‌تواند از دلایل کاهش فراوانی Res-P در رسوبات بستر نسبت به رسوبات معلق باشد. از سوی دیگر مقدار بالای فسفر باقیمانده در رسوبات معلق احتمالاً ناشی از رسوب کلسیم فسفات، آپاتیت یا واریسایت و کمپلکس‌های تبادلی فسفر در بخش سیلت است (Dhillon et al., 2007). Li و همکاران (۲۰۱۵) نیز تغییرات شکل‌های فسفر در امتداد رودخانه را مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند که در سرشاخه‌های فرعی حاوی رسوبات معلق جزء باقیمانده (Res-P) بیشترین فراوانی را دارد. در مجموع برای رسوبات مورد مطالعه ترتیب فراوانی شکل‌های فسفر در رسوبات بستر روخانه به صورت $KCl-P < NaOH-P < Res-P < HCl-P$ بود. در رسوبات معلق نیز ترتیب فراوانی شکل‌های مختلف فسفر به صورت $KCl-P < NaOH-P < HCl-P < Res-P$ بود.

۴.۳. دسته‌بندی رسوبات

به منظور درک بهتر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رسوبات و همچنین چگونگی تأثیرگذاری این ویژگی‌ها بر توزیع شکل‌های فسفر از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی استفاده شد. به منظور تأیید نتایج حاصل از خوشه‌بندی و شناخت بهتر روابط موجود بین ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی رسوبات و شکل‌های معدنی و آلی فسفر، تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA) نیز روی داده‌های مربوط به ویژگی‌های رسوبات انجام شد و نمودار پراکنش رسوبات نسبت به مؤلفه‌های اول و دوم که معیاری از دسته‌بندی رسوبات بستر و معلق را نیز ارائه می‌دهد، ترسیم گردید.

منابع مختلف مانند فاضلاب‌های خانگی در امتداد رودخانه می‌تواند از دیگر دلایل بالا بودن مقدار جزء HCl-P در رسوبات بستر باشد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که فسفر اضافه شده توسط منابع مختلف در امتداد رودخانه عمدتاً در جزء HCl-P رسوبات آهکی ذخیره می‌شود به طوری که مقدار بالای جزء HCl-P در رسوبات آهکی را می‌توان به اضافه شدن فسفر و کلسیم توسط منابع کانونی و غیرکانونی در امتداد رودخانه نسبت داد (Jalali, 2010). پژوهشگران دیگری نظیر Jin و همکاران (۲۰۰۶) و همچنین Kaiserli و همکاران (۲۰۰۲) نیز به نتایج مشابهی دست یافته‌اند. غالب بودن مقدار HCl-P در مقایسه با سایر شکل‌های فسفر در رسوبات رودخانه‌ای توسط Jin و همکاران (۲۰۱۳) نیز گزارش شده است. در این زمینه به نظر می‌رسد ماهیت آهکی رسوبات سبب می‌شود تا جذب و نگذاشت فسفر توسط این جزء نیز افزایش یافته و در نتیجه بر مقدار فسفر متصل به کربنات‌ها نیز افزوده شود. در این زمینه Shan و همکاران (۲۰۱۶) به نتایج مشابهی دست یافته و گزارش کردند که مقدار HCl-P با سهم نسبی ۳۴/۷۵ تا ۹۳/۶۹ درصد، فراوان‌ترین جزء فسفر در رسوبات رودخانه‌های منتهی به دریای بوهایی^۱ است.

فسفر باقیمانده شامل فسفر متصل به لیگنین‌های پایدار و کمپلکس‌های آلی-فلزی است (Ivanoff et al., 1998). میانگین غلظت فسفر باقیمانده در رسوبات بستر و معلق به ترتیب ۲۴۲/۷ و ۳۰۳/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسوب هوا خشک بود. این جزء از فسفر در رسوبات بستر ۴۰/۸ و در رسوبات معلق ۶۴/۹ درصد از فسفر کل معدنی را تشکیل می‌دهد. این شکل از فسفر در رسوبات معلق بیشترین فراوانی را نسبت به سایر شکل‌های فسفر داشت و در رسوبات بستر هم از نظر فراوانی رتبه دوم را دارا بود. به طور کلی فسفر باقیمانده به عنوان جزء شیمیایی پایدار و غیر فعال فسفر در نظر گرفته می‌شود (Turner et al., 2004). از این رو غلظت

¹ Bohai sea

مقایسه با پارامترهای دیگه دارای بالاترین وزن بوده و در دسته‌بندی رسوبات تأثیر بیشتری داشتند. که این نتایج به نوعی بیانگر این واقعیت است که توزیع اندازه ذرات رسوب نقش مهمی در تعیین رفتار شیمیایی آن‌ها داشته و از عوامل اصلی در تفکیک گروه‌های مختلف رسوبات است (Katsaounos et al., 2007; Dhillon et al., 2007).

نتایج مربوط به خوشه‌بندی رسوبات در شکل ۶ و نتایج مربوط به تجزیه به مولفه‌های اصلی در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول ۲، مولفه اول و دوم قادر به تبیین ۷۰ درصد از تغییرات در داده‌های مشاهده‌ای بودند. درصد سیلت و جزء (HCl-P) در PC1، فسفر اولسن و فسفر باقیمانده (Res-P) در PC2، درصد رس و فسفر آلی در PC3 و شن خیلی ریز در PC4 در

جدول ۲. مشخصات مؤلفه‌های ایجاد شده در روش PCA اول برای رسوبات بستر و معلق

شماره مؤلفه	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد تجمعی واریانس
PC1	۷/۵	۴۴/۰	۴۴/۰
PC2	۴/۴	۲۶/۰	۷۰/۰
PC3	۱/۶	۹/۰	۷۹/۰
PC4	۱/۰	۶/۴	۸۵/۴

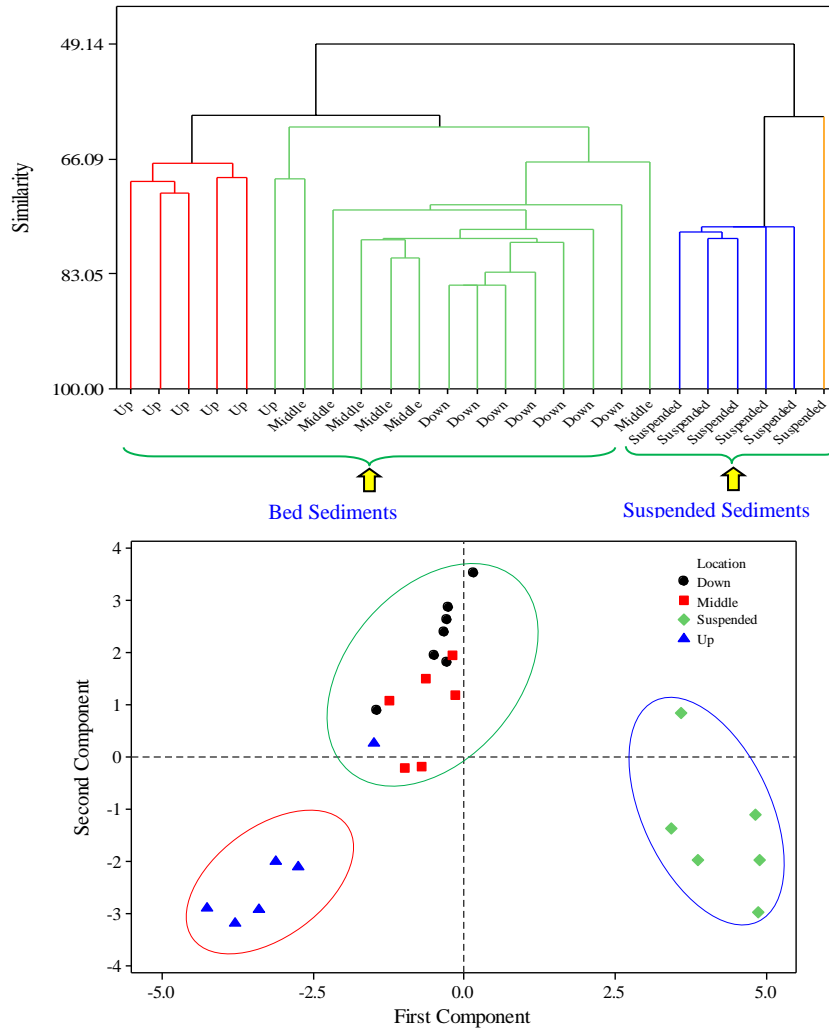
دیگر رسوبات بستر دارای ماده آلی بیشتری نسبت به رسوبات معلق هستند که این امر می‌تواند در اثر افزوده شدن فاضلاب‌های خانگی به بستر رودخانه در طول فصل خشک باشد. این تفاوت‌ها سبب شده تا میزان و نحوه توزیع شکل‌های فسفر نیز در این دو دسته از رسوبات متفاوت باشد. رسوبات بستر رودخانه به ویژه در بخش بالادست آن دارای مقادیر بیشتری از دو جزء KCl-P و NaOH-P هستند. این دو جزء فسفر در مقایسه با سایر شکل‌های آن پتانسیل بیشتری برای آزاد شدن در محیط داشته و ممکن است سبب افزایش خطر پدیده شکوفایی جلبکی در این ناحیه شوند. با توجه به اینکه این بخش از رودخانه در مقایسه با بخش‌های دیگر مقادیر بیشتری از فاضلاب‌های خانگی را دریافت می‌کند به نظر می‌رسد که در این بخش کنترل فاضلاب‌های خانگی و جلوگیری از ورود آن‌ها به بستر رودخانه نقش مؤثری در کاهش پتانسیل آلودگی فسفر در منطقه خواهد داشت. به طور کلی در رودخانه‌های فصلی مناطق خشک و نیمه‌خشک که بخشی از سال را بدون آب هستند، اضافه نمودن فاضلاب‌ها و سایر آلاینده‌ها به بستر رودخانه می‌تواند با

همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود رسوبات بستر و معلق، از لحاظ خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و شکل‌های معدنی و آلی فسفر، متفاوت می‌باشند لذا در دو گروه مجزا قرار گرفته‌اند. همچنین در رسوبات بستر هم، رسوبات واقع در منطقه میانی و پایین‌دست مسیر رودخانه از لحاظ خصوصیات فیزیکی-شیمیایی و شکل‌های معدنی و آلی فسفر تقریباً مشابه هستند در حالی که رسوبات بستر در بخش بالادست رودخانه رفتار تقریباً متفاوتی را از خود نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد که ماده آلی و فسفر اولسن بیشتر در رسوبات بستر بالادست در مقایسه با بخش میانی و پایین‌دست، از عوامل اصلی این تفکیک باشد. در این زمینه به احتمال زیاد نقش ورود فاضلاب‌های خانگی به بستر خشک رسوبات به ویژه در قسمت‌های بالادست حوضه می‌تواند از عوامل اصلی این اختلاف باشد.

در مجموع یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که رسوبات بستر و معلق دارای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوتی بوده و رسوبات بستر در مقایسه با رسوبات معلق شن بیشتر و سیلت کمتری دارند. از سوی

انتقالی بستر و معلق، احتمال بروز خطرات زیست‌محیطی ناشی از آزاد شدن فسفر از رسوبات وجود دارد.

افزایش ماده آلی و همچنین زیست‌فراهمی فسفر سبب تشدید پدیده غنی‌شدگی در مواقع پرآبی گردد. در بخش پایین‌دست رودخانه نیز با تجمع حجم زیادی از رسوبات



شکل ۶. دسته‌بندی رسوبات بستر و معلق بر مبنای روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی و نمودار پراکنش رسوبات نسبت به مؤلفه‌های اصلی اول و دوم

برای کاهش مقدار رسوب ورودی به رودخانه و همچنین افزایش ابزارهای نظارت زیست‌محیطی به منظور جلوگیری از ورود فاضلاب‌های خانگی به رودخانه به عنوان دو اقدام ضروری در جهت کاهش خطرات زیست‌محیطی فسفر در این رودخانه محسوب می‌شوند.

در مجموع انتقال فسفر از طریق اراضی شیب‌دار بالادست حوضه و همچنین افزوده شدن آن در اثر فعالیت‌های انسانی دو منشأ اصلی فسفر موجود در رسوبات این رودخانه هستند که بر این اساس می‌توان بیان کرد که انجام عملیات صحیح مدیریت حوضه آبخیز

References

- Álvarez-Rogel, J., Jiménez-Cárceles, F.J., Egea-Nicolás, C., 2007. Phosphorus retention in a coastal salt marsh in SE Spain. *Science of the total environment*, 378(1): 71-74.
- Andrieux-Loyer, F., Aminot, A., 2001. Phosphorus forms related to sediment grain size and geochemical characteristics in French coastal areas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 52(5), 617-629.
- Avilés, A., Rodero, J., Amores, V., De Vicente, I., Rodríguez, M. I., Niell, F. X., 2006. Factors controlling phosphorus speciation in a Mediterranean basin (River Guadalfeo, Spain). *Journal of Hydrology*, 331(3), 396-408.
- Aydin, I., Aydin, F., Saydut, A., Hamamci, C., 2009. A sequential extraction to determine the distribution of phosphorus in the seawater and marine surface sediment. *Journal of hazardous materials*, 168(2), 664-669.
- Chang, S. C., Jackson, M. L., 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil science*, 84(2), 133-144.
- Correll, D. L., 1998. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *Journal of Environmental Quality*, 27(2), 261-266.
- Devesa-Rey, R., Iglesias, M. L., Díaz-Fierros, F., Barral, M. T., 2009. Total phosphorous distribution and bioavailability in the bed sediments of an Atlantic basin (Galicia, NW Spain): spatial distribution and vertical profiles. *Water, air, and soil pollution*, 200(1-4), 341-352.
- Dhillon, N. S., Brar, B. S., 2007. Relative contribution of different sized soil separates to inorganic P fractions in a Typic Ustochrept of NW India. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 79(2), 161-168
- Gonsiorczyk, T., Casper, P., Koschel, R., 1998. Phosphorus-binding forms in the sediment of an oligotrophic and an eutrophic hardwater lake of the Baltic Lake District (Germany). *Water Science and Technology*, 37(3), 51-58.
- Hartley, A. M., House, W. A., Callow, M. E., Leadbeater, B. S. C., 1997. Coprecipitation of phosphate with calcite in the presence of photosynthesizing green algae. *Water Research*, 31(9), 2261-2268.
- Haygarth, P. M., Heathwaite, A. L., Jarvis, S. C., Harrod, T. R., 1999. Hydrological factors for phosphorus transfer from agricultural soils. *Advances in Agronomy*, 69, 153-178.
- Hedley, M. J., Stewart, J. W. B., Chauhan, B., 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 46(5), 970-976.
- Hoffman, A. R., 2008. Bioavailability of sediment phosphorus in geochemically contrasting aquatic systems. *Journal of Environmental Sciences*. 20(2): 291-295.
- Huo, S., Zan, F., Xi, B., Li, Q., Zhang, J., 2011. Phosphorus fractionation in different trophic sediments of lakes from different regions, China. *Journal of Environmental Monitoring*, 13(4), 1088-1095.
- Ivanoff, D.B., Reddy K.R., and Robinson S. 1998. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected histosols. *Soil Science*. 163(1):36-45
- Jalali, M., 2010. Phosphorus fractionation in river sediments, Hamadan, western Iran. *Soil and Sediment Contamination*, 19(5): 560-572.
- Jin, X., Wang, S., Pang, Y., Wu, F. C., 2006. Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*, 139(2), 288-295.
- Jin, X., He, Y., Kirumba, G., Hassan, Y., Li, J., 2013. Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics of the sediment in the Yangtze River estuary reservoir. *Ecological engineering*, 55, 62-66.
- Kaiserli, A., Voutsas, D., Samara, C., 2002. Phosphorus fractionation in lake sediments—Lakes Volvi and Koronia, N. Greece. *Chemosphere*. 46(8): 1147-1155
- Katsaounos, C. Z., Giokas, D. L., Leonardos, I. D., Karayannis, M. I., 2007. Speciation of phosphorus fractionation in river sediments by explanatory data analysis. *Water Research*, 41(2), 406-418.
- Lair, G. J., Zehetner, F., Khan, Z. H., Gerzabek, M. H., 2009. Phosphorus sorption–desorption in alluvial soils of a young weathering sequence at the Danube River. *Geoderma*, 149(1), 39-44.

- Leinweber, P., Turner, B. L., Meissner, R., 2002. Phosphorus. In: Haygarth, P. M., Jarvis, S. C. (Eds.), *Agriculture, Hydrology and Water Quality*. CABI, UK, pp. 8-37.
- Li, M., Whelan, M. J., Wang, G. Q., White, S. M., 2013. Phosphorus sorption and buffering mechanisms in suspended sediments from the Yangtze Estuary and Hangzhou Bay, China. *Biogeosciences*, 10(5), 3341-3348.
- Liu, Q., Liu, S., Zhao, H., Deng, L., Wang, C., Zhao, Q., Dong, S., 2013. Longitudinal variability of phosphorus fractions in sediments of a canyon reservoir due to cascade dam construction: a case study in Lancang River, China. *PloS one*, 8(12), e83329. 1-9.
- Liu, Q., Liu, S., Zhao, H., Deng, L., Wang, C., Zhao, Q., Dong, S., 2015. The phosphorus speciations in the sediments up-and down-stream of cascade dams along the middle Lancang River. *Chemosphere*. 120: 653-659.
- McDowell, R., Sharpley, A., Folmar, G., 2001. Phosphorus export from an agricultural watershed. *Journal of Environmental Quality*, 30(5), 1587-1595.
- Moore, A., Reddy, K. R., 1994. Role of Eh and pH on phosphorus geochemistry in sediments of Lake Okeechobee, Florida. *Journal of Environmental Quality*, 23(5), 955-964.
- Murphy, J. A., Riley, J., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica chimica acta*, 27, 31-36
- Penn, M. R., Auer, T., Van Orman, E. L., Korienek, J. J., 1995. Phosphorus diagenesis in lake sediments: investigations using fractionation techniques. *Marine and Freshwater Research*, 46(1), 89-99.
- Pettersson, K., 1998. Mechanisms for internal loading of phosphorus in lakes. In Amiard, J. C., Le Rouzic, B., Berthet, B., Bertru, G. (Eds.), *Proceedings of the Third International Joint Conference on Limnology and Oceanography*, Nantes, France, pp. 21-25 Netherlands.
- Rowell, D. L. 1994. *Soil science: Methods & applications*. John Wiley & Sons, New York, 350 p
- Ryden, J. C., McLaughlin, J. R., Syers, J. K., 1977. Mechanisms of phosphate sorption by soils and hydrous ferric oxide gel. *Journal of Soil Science*, 28(1), 72-92.
- Rydin, E., 2000. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment. *Water Research*, 34(7), 2037-2042.
- Shan, B., Li, J., Zhang, W., Di, Z., Jin, X., 2016. Characteristics of phosphorus components in the sediments of main rivers into the Bohai Sea. *Ecological Engineering*, 97, 426-433.
- Sharpley, A. N., Smith, S. J., 1989. Prediction of soluble phosphorus transport in agricultural runoff. *Journal of Environmental Quality*, 18(3), 313-316.
- Spears, B. M., Carvalho, L., Perkins, R., Kirika, A., Paterson, D. M., 2006. Spatial and historical variation in sediment phosphorus fractions and mobility in a large shallow lake. *Water Research*, 40(2), 383-391.
- Sun, S., Huang, S., Sun, X., Wen, W., 2009. Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China. *Journal of Environmental Sciences*. 21(3): 291-295.
- Tournoud, M. G., Perrin, J. L., Gimbert, F., Picot, B., 2005. Spatial evolution of nitrogen and phosphorus loads along a small Mediterranean river: implication of bed sediments. *Hydrological Processes*, 19(18), 3581-3592.
- Turner, A., Millward, G. E., Le Roux, S. M. 2004. Significance of oxides and particulate organic matter in controlling trace metal partitioning in a contaminated estuary. *Marine Chemistry*, 88(3), 179-192.
- Undercoffer, J., 2009. *Monitoring Phosphorus Transport and Soil Test Phosphorus From Two Distinct Drinking Water Treatment Residual Application Methods*. PhD thesis. The Ohio State University. USA, 91p.
- Wang, X., 2012. *Phosphorus Fractionation and Bio-availability in Surface Sediments from the Middle and Lower Reaches of the Yellow River*. *Procedia Environmental Sciences*, 12, 379-386.
- Wang, Y., Shen, Z., Niu, J., Liu, R., 2009. Adsorption of phosphorus on sediments from the Three-Gorges Reservoir (China) and the relation with sediment compositions. *Journal of Hazardous Materials*, 162(1), 92-98.
- White, R., 1981. Retention and release of phosphate by soil and soil constituents Prediction of phosphorus fertilizer requirements. *Journal of Environmental Quality*. 21(2): 31-38.

Wright, A. L., 2009. Phosphorus sequestration in soil aggregates after long-term tillage and cropping. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 406-411.

Xie, L. Q., Xie, P., Tang, H. J., 2003. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by *Microcystis* blooms - an enclosure experiment in a hyper-eutrophic, subtropical Chinese lake. *Environmental Pollution*, 122(3), 391-399.