

## مدل‌سازی سرعت جریان و تعیین محدوده فرسایش و رسوب‌گذاری در ورودی رودخانه اروند به خلیج فارس با استفاده از GIS

نسرین عبدالخانیان - دانشجوی کارشناسی ارشد محیط زیست دریا، دانشگاه علوم فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران  
هیوا علمیزاده\* - استادیار محیط زیست، دانشگاه علوم فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران  
علی دادالهی سهراب - دانشیار محیط زیست، دانشگاه علوم فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران  
احمد سواری - استاد بیولوژی، دانشگاه علوم فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران  
محمد فیاض محمدی - مربی فیزیک دریا، دانشگاه علوم فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۱۹

### چکیده

رودخانه‌ها تحت تأثیر پدیده فرسایش و رسوب‌گذاری دست‌خوش تغییرات گوناگونی می‌شوند؛ از آن جمله می‌توان اشاره کرد به: تغییر راستا؛ جابه‌جایی‌های عرضی و طولی؛ تغییر تراز بستر؛ تغییر دانه‌بندی؛ و دگرگونی ویژگی‌های هندسی مسیر. هدف از این مطالعه تعیین محدوده فرسایش و رسوب‌گذاری در ارتباط با سرعت جریان و پخش آلودگی در ساحل اروندرود با استفاده از مدل کوهپرنس و GIS است. در این تحقیق از مدل سه‌بعدی و هیدرودینامیکی کوهپرنس برای شبیه‌سازی سرعت جریان استفاده شده است که معادله پیوستگی، معادلات ناویر-استوکس در سه بُعد، و معادله‌های انتقال شوری و دما به روش جداسازی حل می‌شوند. شرایط مرزی اعمال‌شده شامل تغییرات دما، شوری، و دبی برای مرز باز رودخانه و تغییرات دما و شوری و اعمال مؤلفه‌های جزرومدی  $M2$ ،  $S2$ ،  $O1$  و  $K1$  برای مرز باز دریا در مدل به کار گرفته می‌شود. با توجه به مقاطع عرضی و خروجی سرعت جریان از مدل کوهپرنس، پهنه تحت پوشش بیشترین آلودگی منطبق با سرعت جریان آب کمتر و رسوب‌گذاری بیشتر است. همچنین، در مقطع دهانه رودخانه میانگین سرعت در وسط رودخانه بیشتر و در دو طرف ساحل رودخانه کمتر است؛ در نتیجه، در دو ساحل ایران و عراق رسوب‌گذاری بیشتر و فرسایش کمتری انجام گرفته است.

کلیدواژه‌ها: اروندرود، رسوب‌گذاری، کوهپرنس، مدل‌سازی، GIS.

### مقدمه

رودخانه‌ها تحت تأثیر پدیده فرسایش و رسوب‌گذاری دست‌خوش تغییرات گوناگونی می‌شوند؛ از آن جمله می‌توان اشاره کرد به: تغییر راستا؛ جابه‌جایی‌های عرضی و طولی؛ وقوع میان‌برها؛ تغییر نوع رودخانه؛ تغییر تراز بستر؛ تغییر دانه‌بندی؛ و دگرگونی ویژگی‌های هندسی مسیر. مطالعات فرسایش و رسوب‌گذاری این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوان، ضمن شناخت رفتار مورفولوژی رودخانه، آثار اقدامات مختلف سامان‌دهی را بر عملکرد رفتاری آن از نظر کمی و کیفی ارزیابی کرد و از این طریق امکان تشخیص عوامل ناپایداری و اعمال معیارهای مناسب حفاظتی و اقدامات مهندسی را میسر

نمود. از طرفی، عوامل تأثیرگذار در پدیده فرسایش و رسوب‌گذاری متنوع‌اند؛ از آن جمله می‌توان موارد ذیل را نام برد: وقوع سیلاب‌ها و تکرار آن‌ها؛ تغییر رژیم هیدرولیکی؛ تغییر رژیم رسوبی؛ تغییر کاربری اراضی؛ تغییر در ویژگی‌های حوضه آبریز؛ دخل و تصرف در حریم طبیعی رودخانه‌ها؛ و ساخت سازه‌های کنترل برای بهره‌برداری از منابع رودخانه‌ای (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۶).

مطالعه رژیم رسوبی رودخانه‌ها از جنبه‌های مختلف حائز اهمیت است. میزان رسوب ورودی به مخازن سدها و دریاچه‌ها تابعی از میزان بار معلق و بارکف رودخانه‌های ورودی است. همچنین، بررسی رژیم رسوبی رودخانه‌ها تعیین‌کننده وضعیت فرسایشی اراضی بالادست و مشخص‌کننده میزان آلودگی نیز هست که خود از جنبه‌های گوناگون اجتماعی و اقتصادی حائز اهمیت است. سازه‌های موجود در مسیر رودخانه‌ها مانند پل‌ها، بندها، سدها، دیواره‌های سیل‌بند، سازه‌های حفاظت بستر و کناره‌ها، و همچنین تأسیسات موجود در حواشی و اراضی اطراف از جمله جاده‌ها، مزارع، مناطق صنعتی، شهری، و کشاورزی از فرایندهای گوناگون فرسایش و رسوب‌گذاری تأثیرپذیری مستقیم دارند (گاریسا، ۲۰۰۴). در طرح‌های سامان‌دهی رودخانه مجموعه‌ای از عوامل یادشده تأثیرگذار است و لازم است نقش هر یک در فعل و انفعالات فرسایش و رسوب‌گذاری مد نظر قرار گیرد. از این رو، متخصصان رودخانه از دیرباز به بررسی این فرایند همت گماشته و راهکارها و روش‌های مختلفی برای مقابله با پیامدها و عوارض آن ارائه کرده‌اند. به‌ویژه در دهه‌های اخیر، با بهره‌گیری از توانایی‌های وسیع رایانه‌ای و بسط و گسترش مدل‌های رایانه‌ای، بررسی فعل و انفعالات فرسایش و رسوب‌گذاری از دیدگاه سامان‌دهی ابعاد وسیعی به خود گرفته است.

بررسی پدیده رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها، با توجه به منشأ و عوامل تأثیرگذار، از پیچیدگی‌های زیادی برخوردار است. عوامل عمده مؤثر در رسوب‌گذاری عبارت است از: تغییر رژیم هیدرولیک؛ اتصال شاخه‌های پُرسوب؛ تغییر پوشش گیاهی حوضه آبخیز؛ وقوع سیلاب‌ها؛ و پدیده‌های زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی (شن، ۱۹۷۱؛ سیمونز و سنتورک، ۱۹۹۲؛ تورن و همکاران، ۱۹۸۷). همچنین، اثر فرسایش بر ریخت‌شناسی رودخانه شامل جابه‌جایی عرضی حاصل از فرسایش در رودخانه‌های پیچان‌رودی، وقوع پدیده میان‌بر، و تأثیر آن بر ساختار ریخت‌شناسی، فرسایش مستمر بستر و کاهش شیب رودخانه، و پدیدآمدن حالت پیچانی ناشی از کاهش شیب، تخریب کناره‌ها، و تعریض بستر و تغییر ویژگی‌های هندسی رودخانه است. تحلیل و برآورد میزان فرسایش و رسوب، تهیه نقشه شدت فرسایش، بررسی عوامل خطر فرسایش، و ارائه راهکارهای مدیریتی با توجه به روند فزاینده فرسایش خاک و مساحت وسیع اراضی و گاهی صعب‌العبور بودن مناطق، با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، امری ضروری به‌نظر می‌رسد (شیراستا، ۲۰۰۱؛ جهان‌سیر، ۱۳۸۰).

حسنلو (۱۳۸۲)، با بررسی نقش عوامل ژئومورفولوژیکی در فرسایش آبی بخشی از حوضه آبخیز زنگان‌رود، با استفاده از GIS نشان داد که با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌توان میزان فرسایش و رسوب را برآورد و مدل پسیاک را برای مناطق مختلف واسنجی کرد؛ به‌طوری‌که رابطه به‌دست‌آمده همبستگی خوبی با نتایج مشاهداتی دارد.

محمودیان (۱۳۹۲)، با استفاده از مدل کوهیرنس، به توزیع رسوبات معلق با تکیه بر فازهای کسندی در مصب اروند پرداخت. در این تحقیق اندازه‌گیری مقادیر لحظه‌ای پارامترهای سرعت و جهت جریان، نوسانات سطح آب، و شوری، دما، و غلظت رسوبات معلق در مصب رودخانه اروند در سه ایستگاه از یادمان شهدای والفجر روبه‌روی شهر فاو در عراق تا دهانه مصب طی فازهای مهکشند و کهکشند در تیرماه ۱۳۹۲ انجام شده است؛ نتایج به‌دست‌آمده پیروی غلظت رسوبات را با

اندازه سرعت به خوبی نشان می‌دهد. در بیشتر نمودارهای به دست آمده کمترین غلظت و کمترین اندازه سرعت ثبت شده هم‌زمان بودند؛ ولی بیشترین غلظت ثبت شده با بیشترین اندازه سرعت اختلاف زمانی حدود یک ساعت را داشتند.

کریمی (۱۳۹۰) پخش و انتشار لکه‌های نفتی و رسوب‌گذاری و روند انتقال رسوبات آغشته به مواد نفتی را مدل‌سازی کرد؛ نتایج حاصل از آزمایش نهایی نشان داد که، با افزایش نفت به ستون آب، غلظت رسوبات معلق افزایش می‌یابد. بینگوچین و همکاران (۲۰۰۸) آلودگی و انتقال رسوب را در خلیج یانگپو<sup>۱</sup> با به‌کاربردن نتایج مدل سوان و مدل کوهیرنس مدل‌سازی و نتایج تحقیق خود را با مشاهدات میدانی مقایسه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نتایج مدل با مشاهدات میدانی تفاوت‌هایی دارد.

روستایی و همکاران (۱۳۸۹) مدل‌سازی فرسایش و رسوب حوضه آبریز قلعه‌چای عجب‌شیر را با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در محیط GIS انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که سالانه در حدود ۱۳۳۰۱۶ تن در سال از خاک حوضه فرسایش می‌یابد. این رقم در واحد سطح تقریباً ۵۳۳ تن در کیلومتر مربع در سال است. مدل نهایی نشان‌دهنده این واقعیات است که دو عامل شیب و پوشش زمین نقش اساسی در کنترل فرسایش و رسوب ایفا می‌کنند.

ظهیری و همکاران (۱۳۸۸) وضعیت رسوب‌گذاری رودخانه کارون را با استفاده از مدل ریاضی GSTARS شبیه‌سازی کردند. در این پژوهش فرایند رسوب‌گذاری و فرسایش رودخانه کارون در محدوده ایستگاه هیدرومتری اهواز تا فارسیات به طول حدود ۵۰ کیلومتر شبیه‌سازی شده است. این مدل، با استفاده از مفهوم تیوب‌ها یا لوله‌های جریان، قابلیت شبیه‌سازی توزیع رسوب‌گذاری را به صورت شبه‌دوبعدی (طولی و عرضی) در رودخانه‌ها دارد. برای واسنجی هیدرولیکی و رسوبی این مدل به ترتیب از تغییرات رقوم سطح آب در سیلاب ۱۳۸۴ و تغییرات هندسی مقاطع عرضی رودخانه ده‌به مدت هفت سال (از ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۴) استفاده شده است. نتایج این واسنجی نشان می‌دهد که روابط رسوبی اکرز- وایت (۱۹۷۴) و توفالتی (۱۹۶۹) مطابقت بهتری با شرایط موجود رودخانه دارد. همچنین، نتایج این مدل ریاضی بیانگر رسوب‌گذاری شدید مواد معلق (حدود ۲.۵ میلیون تن در سال) در این بازه مطالعاتی است.

دیونت و پویسن (۲۰۰۵)، با مطالعه برای پیش‌بینی تولید رسوب در مقیاس حوضه آبخیز، به این نتیجه رسیدند که برای برآورد نزدیک به واقعیت تولید رسوب در هر حوضه آبخیزی، علاوه بر استفاده از مدل‌های شبکه کمی، باید در استفاده از این مدل‌ها از داده‌های توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای نیز برای اجرایی‌تر شدن نتایج استفاده کرد. کانفیلد و همکاران (۲۰۰۵) از مدل HEC-RAS برای مدل‌سازی آبستگي و تجمع رسوب در رودخانه سرو کرانده استفاده کردند.

گیبسون و همکاران (۲۰۰۶) قابلیت مدل HEC-RAS را برای محاسبات انتقال رسوب رودخانه بررسی کردند. همچنین، امامقلی‌زاده و همکاران (۱۳۸۹) در پژوهشی به بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه شیرین‌دره با استفاده از مدل HEC-RAS پرداختند و نتیجه گرفتند که در بین معادلات، انتقال رسوب تابع لارسن (کوپلند) در این رودخانه، نسبت به سایر توابع انتقال رسوب، برآورد بهتری دارد.

جباری و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی به منظور شبیه‌سازی جریان و برآورد دبی انتقال رسوب رودخانه ابهررود از مدل ریاضی HEC-RAS بهره گرفتند و با استفاده از رابطه‌های انتقال رسوب، ظرفیت انتقال رسوب رودخانه را محاسبه

کردند. مقایسه نتایج به دست آمده و داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که معادله یانگ<sup>۱</sup>، با میزان خطای کمتر، نسبت به سایر معادله‌ها، برآورد قابل قبول‌تری داشته است. همچنین، بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه با استفاده از معیارهای هالستروم و شیلدز نشان می‌دهد که وضعیت هیدرولیکی جریان در طول رودخانه به گونه‌ای است که همه مقاطع رودخانه در وضعیت فرسایش است. آذرنگ و همکاران (۱۳۸۸)، با استفاده از مدل یک‌بعدی CCHE، به شبیه‌سازی هیدرولیکی و رسوبی رودخانه کارون در بازه اهواز-فرسیات پرداختند و سپس نتایج حاصل از اجرای مدل را با اندازه‌گیری‌های میدانی صحت‌سنجی کردند. سرانجام، با توجه به نتایج حاصل از مدل، میزان رسوب‌گذاری در بازه اهواز-فرسیات را در حدود دو و نیم میلیون تن در سال برآورد کردند. هدف از این مطالعه تعیین محدوده فرسایش و رسوب‌گذاری در ارتباط با سرعت جریان و پخش آلودگی در ساحل اروندرود با استفاده از مدل کوهرنس و GIS است.

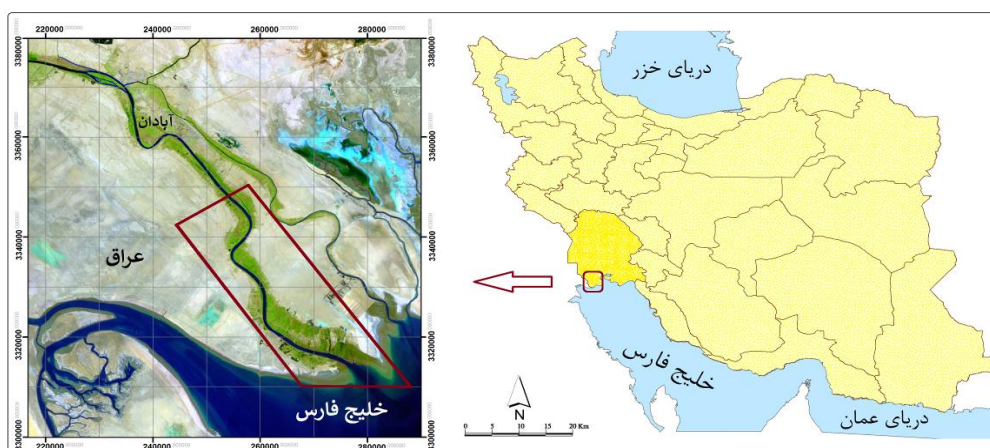
### منطقه مورد مطالعه

رودخانه اروند از به هم پیوستن رودخانه‌های دجله و فرات در عراق و شاخه‌ای از کارون در شمال غربی آبادان تشکیل می‌شود و در جهت جنوب شرقی جریان می‌یابد و در مختصات ۳۰ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۶ دقیقه طول شرقی وارد خاک ایران می‌شود و پس از طی ۶ کیلومتر در جهت جنوب شرقی از کناره شهرستان آبادان با شاخه حفار، که با طول ۴/۷ کیلومتر و عرض ۳۰۰ متر بخش اعظم آب رودخانه کارون را به اروندرود انتقال می‌دهد، مرتبط می‌شود. پهنای رودخانه در کمترین نقطه ۳۵۰ متر و بیشترین عرض آن ۹۰۰ متر است. عمق این رودخانه بین ۹ تا ۱۵ متر و پُرآب‌ترین رودی است که به خلیج فارس می‌ریزد.

رودخانه اروند یکی از مهم‌ترین منابع آب‌های جاری استان و کشور است؛ این رودخانه نقش مهمی در تعادل زیستی، اکولوژیکی، اجتماعی، و شکوفایی اقتصاد و پیشرفت صنایع دارد. بستر رودخانه نسبتاً پایدار است و به علت مرزی بودن بین ایران و عراق در طول جنگ تحمیلی دچار تخریب زیادی شده است. شست‌وشوی خاک از مناطق بالادست در کوه‌های زاگرس، که سرچشمه رودهای جراحی، کارون، و دز را تشکیل می‌دهند، باعث حمل مقدار زیادی گل و لای توسط این رودخانه‌ها شده است؛ به طوری که زمین‌شناسان بر آن‌اند که رودخانه‌های کارون، دجله، و فرات بخشی از خلیج فارس را با آوردن مقداری گل و لای به خشکی تبدیل کرده‌اند و در واقع آبادان را به وجود آورده‌اند. بنابراین، آبادان دنباله جلگه خوزستان و عراق است که با آبرفت‌های کارون، دجله، و فرات انباشته شده است و در واقع خشکی حاصل از رسوبات این سه رودخانه است (شرکت مهندسی مشاور دزآب، ۱۳۸۱). محدوده‌ای که در این تحقیق بررسی شده است از دهانه اروندرود در بخش شمالی خلیج فارس تا میانه‌های جزیره آبادان است و حدود ۴۸ کیلومتر از طول رودخانه را دربر می‌گیرد (شکل ۱).

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق از نرم‌افزارهای Arc GIS و سورفر و مدل کوهرنس<sup>۲</sup> استفاده شده است. مدل هیدرودینامیکی کوهرنس بر اساس یک مختصات سیگمای عمودی عمقی متشکل از سه لایه سیگما و فضای شبکه‌ای کارترین با  $\Delta x = 83m$  (سمت شرقی - غربی) و  $\Delta y = 80m$  (سمت شمالی - جنوبی) است. این مدل یک برنامه مدل‌سازی عددی و سه‌بعدی



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

رایانه‌ای چندمنظوره با زبان برنامه‌نویسی فرترن<sup>۱</sup> است، که از مدل‌های هیدرودینامیکی توأم با مدل‌سازی بیولوژیکی، مدل بررسی مسیر ذرات معلق، آلودگی‌ها و مواد محلول در آب سود می‌برد و فرایندهای مقیاس‌سازی فصلی را مدل‌سازی می‌کند. مؤلفه‌های کوه‌رنس عبارت‌اند از:

۱. بخش فیزیکی که مدلی عمومی برای حل معادلات فرارفتی و پخش است؛
۲. بخش چگونگی رسوب‌گذاری در مختصات اویلری<sup>۲</sup>؛
۳. بخش بررسی توزیع و انتقال آلودگی، در مختصات اویلری و یا لاگرانژی<sup>۳</sup>؛
۴. بخش بیولوژیکی، که بررسی تحرک میکروپلانکتون‌ها، ذرات، و محلول‌های غیرآلی مانند نیتروژن و اکسیژن را به‌عهده دارد (لویتن، ۱۹۹۹).

برای تهیه فایل عمق‌سنجی از نقشه‌های هیدروگرافی سازمان نقشه‌برداری نیروهای مسلح در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ استفاده شده است و به کمک نرم‌افزار GIS، ژئورفرنس و سپس رقومی و درون‌یابی شده‌اند. کمترین عمق آب ۳ متر و بیشترین عمق آب ۲۳ متر است.

برای تهیه نقشه سرعت جریان رودخانه و پخش آلودگی، به جهت اینکه شرایط اولیه داده‌شده به مدل کاملاً به وسیله نیروها و شرایط مرزی اعمال‌شده به پایداری برسد، مدل پنجاه روز بدون دریافت خروجی اجرا شده و خروجی‌های مدل از ماه دوم به بعد استخراج شده است. دبی اعمال‌شده به مدل برای فصل پُربابی ۱۴۰۰ متر مکعب درنظر گرفته شده است. مرز باز رودخانه در بالادست است و نوسانات سطح آب در این مرزها ناشی از نفوذ موج جزرومدی از دهانه رودخانه است؛ شوری مرز رودخانه ثابت و برابر ۳/۵ppt درنظر گرفته شده است.

اطلاعات مربوط به وضعیت هواشناسی ایستگاه آبادان (مؤلفه‌های سرعت باد، دمای هوا، رطوبت نسبی، پوشش ابر، و بارش) از اداره کل هواشناسی استان دریافت و در مدل از آن‌ها استفاده شده است. همچنین، دامنه و فاز چهار مؤلفه اصلی جزرومد ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $O_1$ ,  $K_1$ ) در مرز جنوبی به صورت مقادیر ثابت درنظر گرفته شده است.

1. fortran  
2. eulerian  
3. lagrangian

جدول ۱. مؤلفه‌های اصلی جزر و مدی

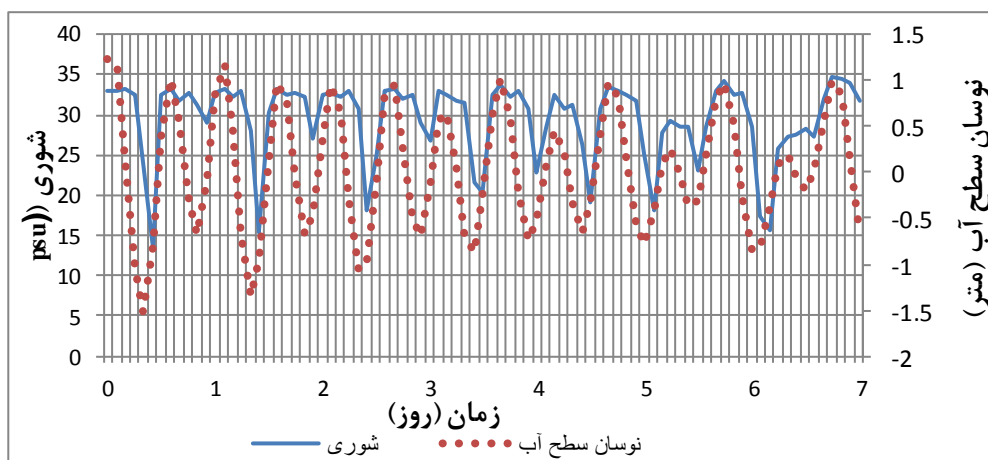
نام مؤلفه جزرومدی	$M_2$	$S_2$	$K_1$	$O_1$
دامنه (متر)	۰٫۸۴	۰٫۲۹	۰٫۵	۰٫۳

برای اعمال دما و شوری در مرز دریا نیز مدل Nesting با دقت بالا برای کل خلیج فارس اجرا شده است؛ برای اینکه شرایط اولیه داده شده به مدل کاملاً به وسیله نیروها و شرایط مرزی اعمال شده به پایداری برسد، مدل برای بیست سال بدون دریافت خروجی اجرا و سپس برای یک سال به منظور دریافت خروجی اجرا شده و از خروجی‌های شوری و دمای آن در محل مورد نظر به عنوان شرایط مرزی استفاده شده است.

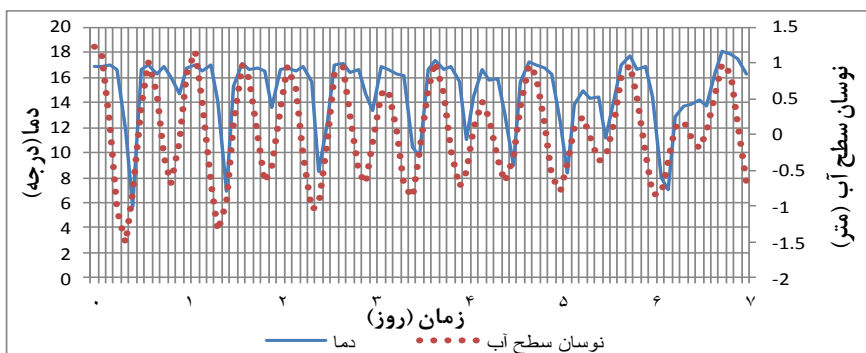
### یافته‌های تحقیق

در این تحقیق از یک شبکه محاسباتی با دقت  $80 \times 83$  متر استفاده شده که محدوده‌ای به مساحت  $48,97 \times 52,96$  کیلومتر را پوشش می‌دهد. از آنجا که در شرایط اولیه، سرعت‌ها صفر و همچنین دما و شوری برای کل محیط یکنواخت وارد می‌شود، مدل برای پنجاه روز بدون دریافت خروجی و صرفاً برای پایداری اجرا شده است. بعد از رسیدن به حالت پایدار، اگر برای هر نقطه از شبکه مورد استفاده در شبیه‌سازی نمودار دما و شوری را نسبت به زمان رسم کنیم، یک شکل تکرارپذیر را خواهیم داشت که نشان‌دهنده رسیدن برنامه به حالت پایدار است. شکل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که دما و شوری بعد از پنجاه روز اجرای مدل به حالتی تکرارپذیر رسیده‌اند. مطابق این شکل‌ها، الگوی تغییرات شوری با نوسان سطح آب و همچنین الگوی تغییرات دما با نوسان سطح آب یکسان است و نشان‌دهنده رسیدن برنامه به حالت پایدار است.

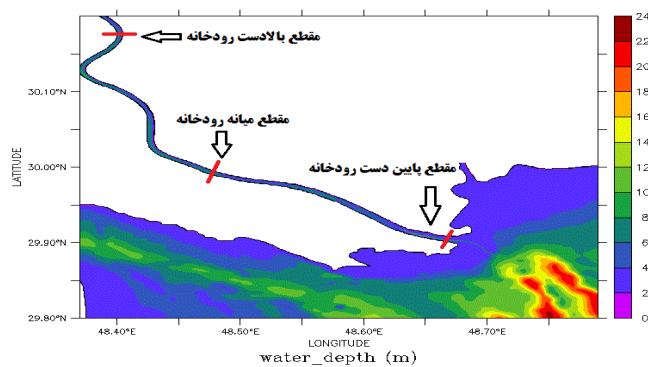
به منظور نشان دادن سرعت جریان در بخش‌های مختلف رودخانه، سه مقطع عرضی در بالادست رودخانه، میانه رودخانه، و دهانه رودخانه برای میانگین سرعت در زمان‌ها (یک سیکل کامل جزرومدی) و مکان‌های مختلف در شکل‌های ۵ تا ۷ آمده است. شکل ۴ موقعیت این مقاطع را نشان می‌دهد. هر یک از شکل‌های یادشده نشان‌دهنده میانگین سرعت در بازه‌های زمانی و مکانی متفاوت و همچنین عمق‌ها و عرض‌های مختلف رودخانه است.



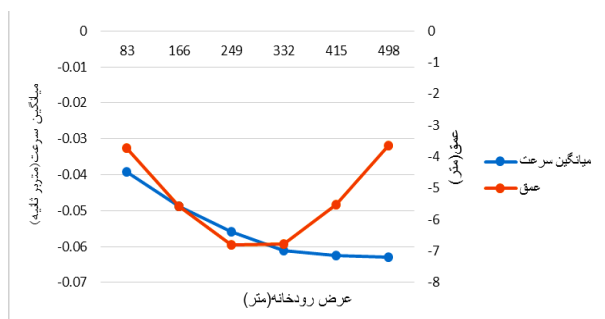
شکل ۲. سری زمانی مربوط به شوری و نوسان سطح آب



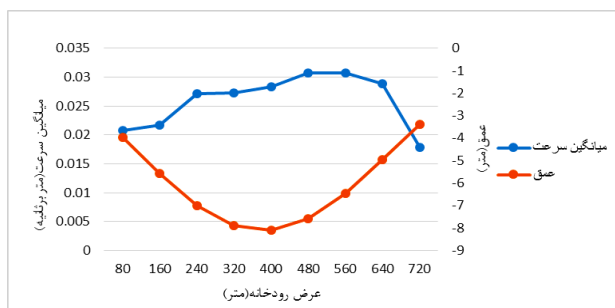
شکل ۳. سری زمانی مربوط به دما و نوسان سطح آب



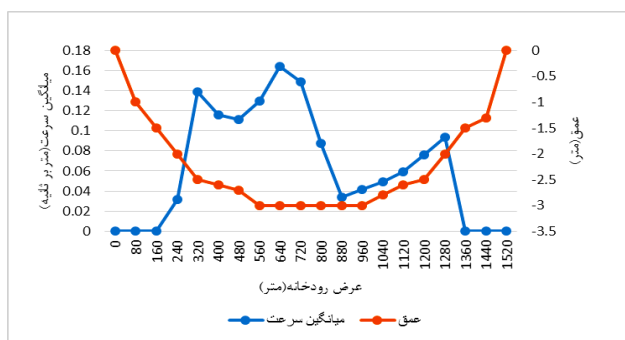
شکل ۴. مقاطع عرضی رودخانه



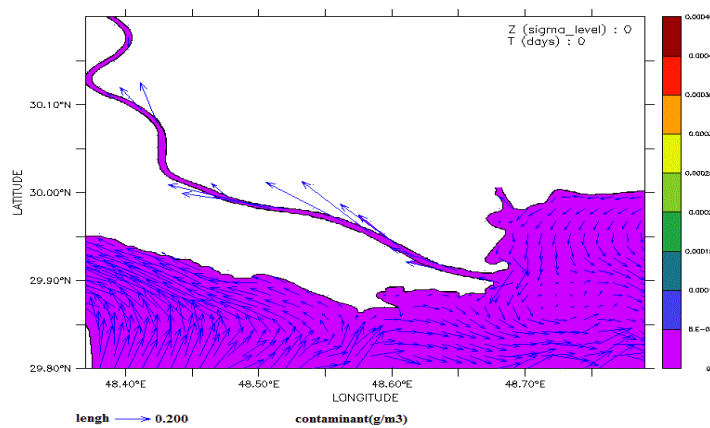
شکل ۵. میانگین سرعت در بالادست رودخانه



شکل ۶. میانگین سرعت در میانه رودخانه



شکل ۷. میانگین سرعت در دهانه رودخانه

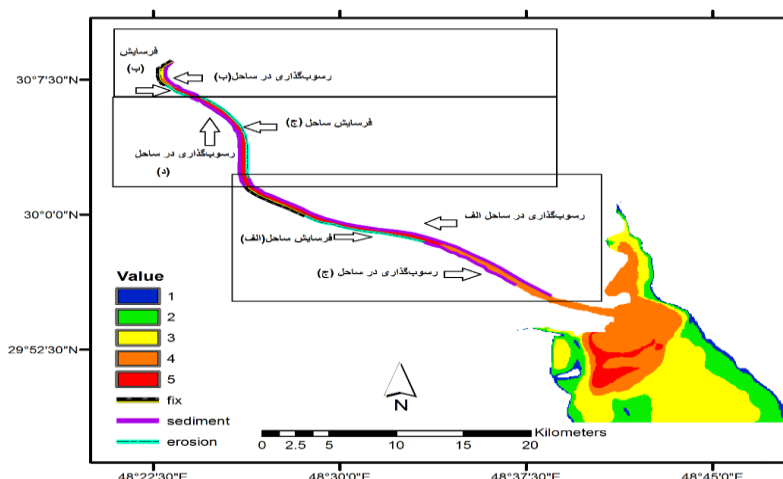


شکل ۸. بردارهای سرعت جریان

در شکل ۵، میانگین سرعت در بالادست رودخانه نشان داده شده است. روند منحنی سرعت جریان نشان می‌دهد که سرعت جریان آب در سمت ساحل عراق بیشتر از سرعت جریان آب در سمت ساحل ایران است. سرعت‌های مثبت به این معناست که جهت جریان به سمت بالادست رودخانه و سرعت‌های منفی یعنی جهت جریان به سمت پایین دست رودخانه و دریاست؛ مطابق شکل ۵، سرعت جریان منفی است؛ بدین معنا که جهت جریان به سمت پایین دست رودخانه و دریاست. همچنین، مطابق شکل ۶، که میانگین سرعت را در مقطع میانی رودخانه نشان داده است، میانگین سرعت جریان آب در سمت ساحل ایران بیشتر از ساحل عراق است. در شکل ۷ نیز، که میانگین سرعت مقطع دهانه رودخانه نمایش داده شده است، میانگین سرعت در وسط رودخانه بیشتر و در دو طرف ساحل رودخانه کمتر است.

همچنین، در شکل ۸ بردارهای سرعت جریان در محدوده مطالعاتی نمایش داده شده است. این شکل نشان‌دهنده طول و جهت بردارهای سرعت جریان در رودخانه ارون است. مطابق شکل ۸، هر چه بردار سرعت بزرگ‌تر باشد، بدین معناست که سرعت جریان هم بیشتر است و برعکس، هر چه بردارهای سرعت کوچک‌تر باشد، سرعت جریان کمتر است. در ادامه، برای تعیین بازه‌های فرسایشی و ناپایدار در ساحل رودخانه ارون، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست، بازه‌هایی از مسیر رودخانه در دو دوره زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۱۵- که در اثر پدیده فرسایش دچار جابه‌جایی‌های عرضی و طولی شده‌اند- ترسیم شده است. شکل ۹ محدوده رسوب‌گذاری و فرسایش همراه درجه‌بندی آلودگی در ساحل رودخانه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.





شکل ۹. محدوده رسوب‌گذاری و فرسایش در منطقه مورد مطالعه

در شکل ۹ رودخانه با رنگ‌های مختلفی طبقه‌بندی شده و نشان‌دهنده درجه آلودگی است. رنگ آبی مربوط به درجه آلودگی خیلی کم، رنگ سبز درجه آلودگی کم، رنگ زرد درجه آلودگی متوسط، رنگ نارنجی درجه آلودگی زیاد، و رنگ قرمز درجه آلودگی خیلی زیاد است. همچنین، رودخانه‌ها در مقیاس‌های ۱ تا ۵ رتبه‌بندی شده است؛ رتبه ۱ نشان‌دهنده کمترین درجه آلودگی است و رتبه ۵ بیشترین درجه آلودگی را نشان می‌دهد. همچنین، پهنه تحت پوشش به صورت درصد نشان داده شده است. جدول‌های ۲ و ۳ مربوط به طول کل محدوده رسوب‌گذاری و فرسایش در منطقه مورد مطالعه با استفاده از GIS است.

جدول ۲. طول کل رسوب‌گذاری ساحل در طبقه‌بندی درجه آلودگی

پهنه تحت پوشش (کیلومتر)	رنگ محدوده	درجه ریسک آلودگی	ردیف	طول رسوب‌گذاری در ساحل (km)
۰	آبی	خیلی کم	۱	
۰٫۱۵	سبز	کم	۲	
۱٫۳۴	زرد	متوسط	۳	۴۵٫۵۴
۱۶٫۶۷	نارنجی	زیاد	۴	
۲۷٫۳۸	قرمز	خیلی زیاد	۵	
۴۵٫۵۴		جمع		

جدول ۳. طول کل فرسایش ساحل در طبقه‌بندی درجه آلودگی

پهنه تحت پوشش (کیلومتر)	رنگ محدوده	درجه ریسک آلودگی	ردیف	طول فرسایش ساحل (km)
۰	آبی	خیلی کم	۱	
۰	سبز	کم	۲	
۰	زرد	متوسط	۳	۱۹٫۴۷
۰٫۳۶	نارنجی	زیاد	۴	
۱۹٫۱۱	قرمز	خیلی زیاد	۵	
۱۹٫۴۷		جمع		

با توجه به جدول ۲، طول محدوده رسوب‌گذاری در ساحل ۴۵/۵۴ کیلومتر است که بیشترین مقدار رسوب‌گذاری مربوط به درجه آلودگی خیلی زیاد است که ۲۷/۳۸ کیلومتر از کل محدوده رسوب‌گذاری را دربر گرفته است. همچنین، با توجه به جدول ۳، طول محدوده فرسایش ساحل ۱۹/۴۷ کیلومتر است که بیشترین مقدار فرسایش مربوط به درجه آلودگی خیلی زیاد است و ۱۹/۱۱ کیلومتر از کل محدوده فرسایش را دربر گرفته است.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه محدوده فرسایش و رسوب‌گذاری در ساحل رودخانه اروند با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست، که در اثر پدیده فرسایش دچار جابه‌جایی‌های عرضی و طولی شده‌اند، در نرم‌افزار GIS و همچنین پخش آلودگی در ساحل اروندرود با استفاده از مدل کوهیرنس و GIS به‌دست آمد و محدوده رسوب‌گذاری و فرسایش همراه درجه‌بندی آلودگی در ساحل رودخانه مورد مطالعه نشان داده شد. میانگین سرعت در بازه‌های مختلف زمانی، مکانی، و عمق‌ها و عرض‌های مختلف رودخانه نشان می‌دهد که در بالادست رودخانه سرعت منفی است؛ بدین معنا که جهت جریان به سمت پایین‌دست رودخانه و خلیج فارس است.

با توجه به میانگین سرعت در بالادست رودخانه مشاهده می‌شود که سرعت جریان آب در سمت ساحل عراق بیشتر از سرعت جریان آب در سمت ساحل ایران است. همچنین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از محدوده رسوب‌گذاری و فرسایش در منطقه مورد مطالعه، که نشان‌دهنده میزان فرسایش و رسوب‌گذاری در دو ساحل یادشده (ایران و عراق) است، می‌توان نتیجه گرفت که میزان فرسایش در بالادست رودخانه به دلیل سرعت بالای جریان آب در سمت ساحل عراق بیشتر است و در سمت ساحل ایران به دلیل سرعت پایین جریان آب میزان فرسایش کم و رسوب‌گذاری بیشتر است.

همچنین، در مقطع میانی رودخانه میانگین سرعت جریان آب در سمت ساحل ایران بیشتر از ساحل عراق است؛ در نتیجه، با توجه به محدوده رسوب‌گذاری و فرسایش، مشاهده می‌شود که میزان فرسایش در ساحل ایران بیشتر و در ساحل عراق میزان رسوب‌گذاری بیشتر و فرسایش کمتر است. همچنین، در مقطع دهانه رودخانه، طبق شکل ۷، مشاهده می‌شود که میانگین سرعت در وسط رودخانه بیشتر و در دو طرف ساحل رودخانه کمتر است؛ در نتیجه، در دو ساحل ایران و عراق، رسوب‌گذاری بیشتر و فرسایش کمتری انجام گرفته است.

با توجه به جدول ۴، در محدوده مورد مطالعه بیشترین محدوده سواحل مربوط به رسوب‌گذاری است که طول این محدوده ۶۲ درصد است و بیشتر از محدوده تحت فرسایش و محدوده ساحل تثبیت‌شده است. بیشترین رسوب‌گذاری مربوط به درجه آلودگی خیلی زیاد است که می‌تواند به دلیل چسبندگی رسوبات ناشی از آلودگی نفتی باشد. بدین ترتیب، در محدوده‌ای که رسوب‌گذاری انجام می‌گیرد تحت پوشش بیشترین آلودگی قرار دارد.

جدول ۴. بخش‌های مختلف ساحلی رودخانه اروند از نظر فرسایش و رسوب

طول محدوده (کیلومتر)	طول محدوده (درصد)	
۴۵/۵۴	۶۲/۵۷	رسوب‌گذاری در ساحل
۱۹/۴۷	۲۶/۷۵	فرسایش ساحل
۷/۷۷	۱۰/۶۸	ساحل تثبیت‌شده
جمع	۱۰۰	

## منابع

- آذرنگ ف.؛ شفاعی بجستان م.؛ دهان‌زاده، ب. و شاهی‌نژاد، ب. (۱۳۸۸). کاربرد مدل یک‌بعدی CCHE در شبیه‌سازی هیدرولیکی و رسوبی رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه کارون، بازه اهواز- فارسیات)، هشتمین سمینار مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- امامقلی‌زاده، ص.؛ شیردل، س.؛ گنجویان، م.؛ محمدیون، م. و فتحی‌مقدم، م. (۱۳۸۹). بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه شیرین‌دره با استفاده از مدل HEC-RAS، *مجله مهندسی آب*، ۱: ۱۹-۳۴.
- جباری، آ.؛ حسینی، س.؛ حقی‌آبی، ا.ح.؛ امامقلی‌زاده، ص. و بهنیا، ع. (۱۳۹۳). برآورد دبی انتقال رسوب رودخانه با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS، فصل‌نامه علمی- پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، ۴(۱۶).
- جهان‌سیر، ر. (۱۳۸۰). بررسی تأثیر عوامل خطر فرسایش خاک (عوامل مدل FAO) در میزان فرسایش با استفاده از GIS در حوضه آبخیز زیارت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- حسنلو، م. (۱۳۸۲). مقایسه و واسنجی روش MPSIAC با آمار رسوب در حوضه آبخیز تهم زنگان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس.
- شرکت مهندسی مشاور دزآب. (۱۳۸۱). گزارش زیست‌محیطی، طرح ساماندهی آبراهه کارون.
- روستایی، ش.؛ رسولی، ع.ک و احمدزاده، ح. (۱۳۸۹). مدل‌سازی فرسایش و رسوب حوضه آبریز قلعه‌چای عجب‌شیر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در محیط GIS، *نشریه جغرافیا و توسعه*، ۸(۱۸): ۱۵۹ - ۱۷۸.
- ظهیری، ع.؛ شاهی‌نژاد، ب. و رستمی، س. (۱۳۸۸). شبیه‌سازی وضعیت رسوب‌گذاری رودخانه کارون با استفاده از مدل ریاضی GSTARS 2.0 (حداصل ایستگاه‌های هیدرومتری اهواز تا فارسیات)، *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۱۶(۴): ۲۵ - ۴۲.
- کریمی، م. (۱۳۹۰). مدل‌سازی عددی ترکیبی پخش و انتشار لکه‌های نفتی و رسوب‌گذاری و روند انتقال رسوبات آغشته به مواد نفتی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته آب- هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- محمودیان، م. (۱۳۹۲). توزیع رسوبات معلق با تکیه بر فازهای کشندی در مصب اروند، پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر.
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (۱۳۸۶). *راهنمای مطالعات فرسایش و رسوب در سامان‌دهی رودخانه‌ها*، تهران: انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، مرکز مدارک علمی، نشریه شماره ۳۸۳.
- Admiralty tide table U port No.4268 (2008). *Arvand Rod*, Hydrographic of the Navy.
- Alessi, C.A.; Hunt, H.D. and Bower, A.S. (1999). *Hydrographic data from the U. S. Naval Oceanographic Office: Persian Gulf, southern Red Sea. and Arabian Sea 1923 - 1996*, Tech. Rep. WHOI-99-02, WoodsHole Oceanography. Inst., Woods Hole, Mass.
- Azarang F.; Shafaei bejestan, M.; Dahanzadeh, B. and Shahinezhad, B. (2009). *CCHE one-dimensional model for simulating the hydraulic and Sediment (Case study: Karoon River, between Ahvaz - Farsiat)*, Eighth River Engineering Conference, Shahid Chamran University of Ahvaz.

- Bingchen, L.; Huajun, L. and Aiqun, W. (2008). *Application of COHERENS-SED in modeling, contaminant transport of Yangpu Bay Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering*, August 24-30, Darmstadt, 159-163.
- Canfield, H.E.; Wilson, C.J.; Lane, L.J.; Crowell, K.J. and Thomas, W.A. (2005). *Modeling scour and deposition in ephemeral channels after wildfire*, *Journal of Catena*, 61(2-3): 273-291.
- Devent, J. and Poesen., J. (2005). *Peredictig Soil erosion and sediment yield at the basin scale, Scale issues and and semi-quantitation Model*, *Earth Science*, 20: 1-31.
- Emamgholizadeh, S.; Shirdel, S.; Ganjavian, M.; Mohammadioun, M. and Fathimoghadam, M. (2010). *Check the status of the shirindareh river erosion and and sedimentation model HEC-RAS*, *Water Engineering Journal*, 1: 19-34.
- Garcia, M.H. (2004). *Sedimentation and Erosion Hydraulics*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Gibson, S.; Brunner, G.; Piper, S. and Jensen, M. (2006). *Sediment transport computations with HEC-RAS*, Proceedings of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference (8thFISC), April 2-6, 2006, Reno, NV, USA.
- Hasanloo, M. (2003). *Comparison and calibration methods MPSIAC Statistics watershed of tahm Zanjan*, Master Thesis, Department of Natural Resources Tarbiat Modarres University.
- Hey, R.D. (1986). *River response to hydraulic structures*, Paris: UNESCO.
- Jabari, A.; Hoseini, S.A.; Haghabi, A.H.; Emamgholizadeh, S. and Behnia, A. (2014). *River sediment transport Flow is estimated using a mathematical model HEC-RAS*, *Journal of Irrigation & Water Engineering*, 16: 93.
- JahanSyr, R. (2001). *The effect of the risk factors of soil erosion (of the FAO) on the rate of erosion in the ziarat Aquiverous Basin using GIS*, M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.
- Karimi, M. (2011). *Numerical modeling composition and distribution of oil spills and oil-stained sediment transport*, Master's thesis in the field of water-hydraulic, Department of Civil Engineering, University of Nasir al-DinTusi.
- Luyten, P.J.; Jones, J.E.; Proctor, R.; Tabor, A.; Tett, P. and Wild- Allen, K. (1999). *COHERENS – A coupled hydrodynamical -ecological model for regional and shelf seas: user documentation*, MUMM Rep, Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea.
- Mahmoodian, M. (2013). *Suspendedsediment distribution based on tidal phases In estuaries the Arvand*, M.Sc Thesis Department of Physical Oceanography Khorramshahr University of Marine Science & Technology.
- Organization for Management and Planning of the Country (2007). *Guidelines for erosion and sediment studies in river Organizing*, Center for Scientific Documents, Journal Number of 383.
- Rostaei, Sh.; Rasoli, A.K. and Ahmadzadeh, H. (2010). *Erosion and sedimentation basin modeling using satellite data ghaleh chay Ajabshir in GIS*, *Journal of Geography and Development*, Summer 1389, 8(18): 159-178.
- Shen, H.W. (1971). *River mechanics*, fort collins, Colorado, U.S.A.
- Shersta, M.K. (2001). *Soil erosion modeling using remote sensing and GIS*, Case study of Jhikhu Khola watershed, Nepal.
- Simons, D.B. and Senturk, F. (1992). *Sediment transport technology*, Book Crafters Inc., Chelsea, Michigan, USA.

- Thorn, C.R.; Bathurst, J.C. and Hey, R.D. (1987). *Sediment transport in gravel-bed rivers*, John Wiley sons, New York.
- Zahiri, A.; Shahinezhad, B. and Rostami, S. (2009). Karun river sedimentation simulation using mathematical models GSTARS 2.0 (hydrometric stations in Ahvaz between the Farsiat), *Journal of Soil and Water Conservation preceding studies (Agricultural Sciences and Natural Resources)*, 16(4): 25-42.