



بررسی میدانی جریان آب و رسوب خروجی رودخانه‌های کارون و اروند در شرایط سیلابی

محمد فیاض محمدی^{۱*}، امیر اشتری لری^۲

۱- محمد فیاض محمدی، استادیار فیزیک دریا دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ایران

۲- امیر اشتری لری، استادیار فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ایران

تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۷

وصول مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶

چکیده

مصباح‌ها حوضه‌های آبی هستند که از یک سمت تحت تأثیر دریا و از سمت دیگر تحت تأثیر دبی دائمی رودخانه قرار دارند. ورود جزرومد از پایین دست و دبی رودخانه از بالادست دینامیک جریان را پیچیده می‌کند و خصوصاً اگر شرایط بالادست سیلابی باشد، پیش‌بینی الگوی جریان و تراز سطح آب دشوار می‌شود. رودخانه اروند یک مصب جزرومدی در جنوب غربی ایران در مرز ایران و عراق است. در ابتدای سال ۱۳۹۸ سیل عظیمی، چند استان در جنوب غرب کشور را فراگرفت و مسیر این سیلاب‌ها در نهایت استان خوزستان و رودخانه‌های کارون و اروند بود. هدف از این تحقیق اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی جریان در رودخانه‌های کارون و اروندرود در شرایط سیلابی است. در رودخانه‌های جزرومدی مثل کارون در خرمشهر و اروندرود در مرز ایران و عراق، جزرومد باعث تغییرات شدید سرعت و جهت جریان، و تراز سطح آب می‌شود و برای رسیدن به یک برآورد خالص از حجم سیلاب و آورد رسوب، نیاز به اندازه‌گیری پیوسته در یک سیکل کامل جزرومدی به مدت ۲۵ ساعت است. اندازه‌گیری‌های میدانی در ۹۸/۲/۵ در زمان مهکشدن در دو ایستگاه کارون و اروند انجام شد. تحلیل و بررسی داده‌ها نشان می‌دهند که شرایط سیلابی تغییرات تراز سطح آب را به شدت کاهش می‌دهد به نحوی که رنج جزرومد در خرمشهر در مقایسه با فصل کم‌آبی در شرایط مشابه مهکشدن در ۲۴ مهر ۱۳۹۴ از حدود ۱۰۰ سانتی‌متر به ۲۶ سانتی‌متر کاهش یافت. میانگین شوری و سرعت جریان در کارون و اروند به ترتیب ۰/۶۲psu و ۱/۲psu و سرعت ۱/۶m/s و ۱/۹m/s اندازه‌گیری شد. جهت جریان نیز پیوسته به سمت دریا بود. بیشینه غلظت بار معلق در ایستگاه کارون و اروند به ترتیب ۸۰g/m³ و ۶۷ g/m³ اندازه‌گیری شد. با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده مذکور، میانگین دبی آب در کارون و اروند به ترتیب ۲۱۵۳ m³/s و ۷۸۸۳ m³/s و میانگین شار رسوب به ترتیب ۱۴۲kg/s و ۴۵۴kg/s محاسبه شد.

کلمات کلیدی: سیل، اندازه‌گیری میدانی، دبی، انتقال رسوب، کارون، اروند، خوزستان

۱- مقدمه

در رودخانه‌های دائمی و غیر جزرومدی، سرعت جریان پایا است و در زمان‌های کوتاه، تغییرات شدید ندارد. زمانی که پارامتر مورد نظر ما تغییر نمی‌کند و در واقع دوره‌ی تناوب تغییرات آن بی‌نهایت است، می‌توان با یک بار نمونه‌برداری، دبی و شار رسوب رودخانه را برآورد کرد (امری و تامسون^۱، ۱۹۹۶: ۳). اما جریان در رودخانه‌های جزرومدی پدیده بسیار پیچیده‌ای است. در هنگام مد معمولاً جریان به سمت بالادست است در حالی که در هنگام جزر جریان به سمت پایین‌دست جریان دارد. این موضوع مانع از تعیین یک سرعت کلی برای جریان می‌شود (ادیب و وفاپی^۲، ۱۳۸۹: ۱). به بخشی از رودخانه که از بالادست تحت تأثیر دبی یکنواخت و از پایین‌دست تحت تأثیر جریان‌ات دریایی و جزرومد است مصب^۳ گفته می‌شود (پریچارد و کامرون^۴، ۱۹۶۳). در این مناطق برای برآورد دبی و آورد رسوب، نیاز به اندازه‌گیری پیوسته در یک سیکل کامل جزرومدی است (امری و تامسون، ۱۹۹۶: ۳)

محققانی که در حوضه‌ی پارامترهای فیزیکی آب در مصبها مطالعه می‌کنند به این موضوع اذعان دارند که زمانی که رودخانه طغیان کرده است و در بالادست، شرایط سیلابی است و در پایین‌دست، شرایط جزرومدی با طوفان هم‌زمان شده است، پیش‌بینی میزان تغییر تراز سطح آب، سمت و سرعت جریان در زمان‌های مختلف کار پیچیده‌ای است (هردمن و همکاران^۵، ۲۰۱۸: ۳). مطالعاتی که در این خصوص با در نظر گرفتن، جزرومد و خیزش طوفان در پایین‌دست، و سیلاب رودخانه در بالادست انجام شده‌اند نشان داده‌اند که زمان، یکی از فاکتورهای کلیدی و پیچیده در درک میزان شدت طوفان‌های مصبی و سیلاب ناشی از بارندگی است. برای مثال ژنگ و همکاران^۶ در سال ۲۰۱۷ در یک مطالعه موردی در پرت استرالیا، متغیرهای کلیدی در پیش‌بینی تراز سطح آب در مناطق ساحلی و مصبی را بررسی کردند و در نهایت دریافتند که علاوه بر جزرومد و خیزش طوفان و دبی رودخانه، زمان‌بندی و فاز تغییرات جزرومد و دبی رودخانه نیز یکی از مهم‌ترین متغیرها برای پیش‌بینی تراز سطح آب است. این نتیجه نیز قابل توجه است که برهم‌کنش بین طوفان در پایین‌دست و باران و سیلاب در بالادست در تمام نقاط مصب یکسان نیست و در واقع نتیجه‌ای که برای یک نقطه از مصب گرفته می‌شود قابل تعمیم به تمام نقاط آن نیست (ژنگ و همکاران، ۲۰۱۴: ۱).

تنگ و همکاران^۷ در مطالعه موردی در سال ۲۰۱۷، تغییرات تراز سطح آب و سمت و سرعت جریان روی یک رودخانه جزرومدی در آمریکا را در زمان سیلابی بررسی کردند. در این تحقیق از مدل HEC-RAS برای اجرای چندین سناریو با مقادیر مختلف سیلاب به عنوان شرایط مرزی بالادستی استفاده شد. نتیجه تحقیق نشان داد

1- Emery and Thomson
 2- Adib And Vaqefi
 3- Estuary
 4- Pritchard and Cameron

5- Herdman et al.
 6- Zheng et al.
 7- Teng et al.

در مناطق مرزی پایین دست، عامل تعیین کننده‌ی الگوی جریان، جزرومد است و هرچه به سمت بالادست پیش برویم اثر آن کمتر می‌شود و حجم سیلاب در تعیین الگوی جریان و تراز سطح آب قالب می‌شود. بدیهی است که تغییر الگوی جریان در یک رودخانه جزرومدی، جرم رسوب معلق که توسط رودخانه انتقال می‌یابد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. گارل و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۹، اثر جزر و مد (مهکشند و کهکشند) و اثر دبی رودخانه (عادی و سیلابی) را بر گردش آب و رسوب در مصب گواردیانا در پرتغال مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، پروفایل قائم سرعت جریان، شوری و کدورت، به همراه غلظت بار معلق در سطح آب در نقاط مختلف مصب گواردیانا اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که سرعت جریان در زمان جزر بیشتر از زمان مد است و این عدم تقارن با نزدیک شدن به دهانه مصب تشدید می‌شود. میزان لایه‌بندی در مصب در درجه اول توسط دبی آب شیرین رودخانه و سپس توسط دامنه جزرومد کنترل می‌شود به نحوی که در کم‌آبی در زمان مهکشند، مصب کاملاً آمیخته است و در کهکشند به صورت جزئی دارای لایه‌بندی می‌شود. در حین وقوع سیل نیز نقطه‌ای که دارای بیشترین کدورت بود به خارج از مصب منتقل شد و غلظت بار معلق توسط زهکشی‌های متصل به مصب کنترل می‌شد. رودخانه اروند نیز یک رودخانه جزرومدی است و طبق تعریف ارائه شده در بالا، تمام ویژگی‌های یک مصب را دارد. در تحقیق پیش رو، تغییرات پارامترهای فیزیکی رودخانه اروند مورد بررسی قرار گرفته است و اطلاعاتی که در سیل فروردین ۱۳۹۸ از این رودخانه جمع‌آوری شد با داده‌های محدود سال‌های گذشته مقایسه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه‌ی مورد مطالعه

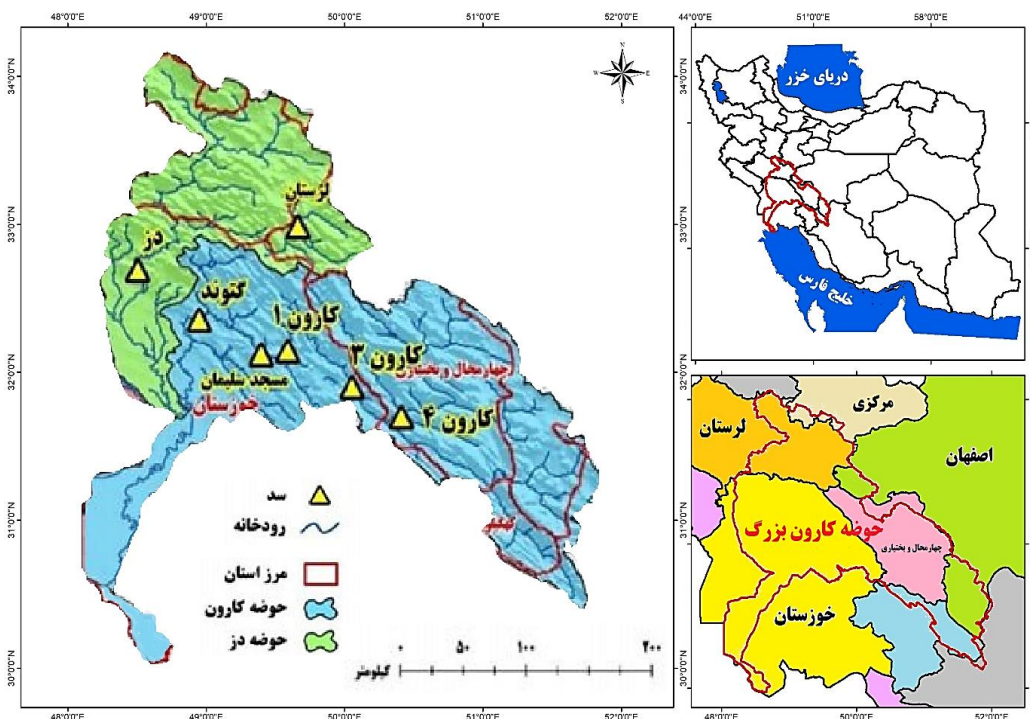
اروند رود از هم ریزش دجله، فرات و کارون بزرگ شکل می‌گیرد. حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ، خود از دو انشعاب اصلی دز (شاخه شمالی) و کارون (شاخه جنوبی) تشکیل می‌شود (افشین^۲، ۱۳۷۳).

در مسیر رودهای تشکیل دهنده‌ی کارون بزرگ، پنج سد مهم کارون ۴، کارون ۳، کارون ۱، مسجد سلیمان و گتوند علیا روی شاخه کارون، و یک سد مهم دز روی شاخه‌ی دز قرار دارند (شکل ۱). مشخصات سدهای مذکور، با استناد به گزارش کمیته ملی سدهای بزرگ ایران (IRCOLD^۳) در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس حجم مخزن، سدهای گتوند علیا و دز به ترتیب با ۴/۶۷ و ۳/۴۶ میلیارد مترمکعب بزرگ‌ترین حجم مخزن را

1- Garel et al.
2- Afshin

3- Iranian national Commission on Large Dams

دارا هستند. بر اساس ارتفاع، سد کارون ۴ با ارتفاع ۲۳۰ متر دارای رتبه ۱ و ۲۲ در ایران و جهان است (وکیلی، ۱۳۹۶). از نظر حجم مخزن، این سد با ظرفیت ۲/۲ میلیارد مترمکعب، در رتبه پنجم ایران قرار دارد.



شکل (۱): حوضه آبریز کارون بزرگ به همراه سدهای احداث شده در مسیر رودخانه
Fig (1): Karun-E Bozorg catchment area with dams built along the river

جدول (۱): مشخصات سدهای مهم روی رودخانه‌های کارون و دز (وکیلی، ۱۳۹۶)

Table (1): Properties of main dams on Karun an Dez rivers

سال بهره‌برداری (شمسی)	ظرفیت اسمی نصب نیروگاه (مگاوات)	حجم نرمال مخزن (میلیارد مترمکعب)	ارتفاع (متر)	نام سد
۱۳۹۰	۱۰۰۰	۲/۲	۲۳۰	کارون ۴
۱۳۸۳	۲۰۰۰	۳	۲۰۵	کارون ۳
۱۳۴۱	۵۲۰	۳/۴۶	۲۰۳	دز
۱۳۵۵	۲۰۰۰	۳/۱۴	۲۰۰	کارون ۱ (شهیدعباس‌پور)
۱۳۹۱	۱۰۰۰	۴/۶۷	۱۸۲	گتوند علیا
۱۳۸۰	۲۰۰۰	۰/۲۶	۱۷۷	مسجدسلیمان (گدارلندر)

وظیفه‌ی اصلی سدها، علاوه بر تولید برق و تأمین منابع آب شرب کشاورزی و صنعتی، مدیریت سیلاب است. در صورت مدیریت صحیح، سدها می‌توانند تهدیدها و خسارت‌های وحشتناک ناشی از سیل را به فرصتی برای ذخیره‌ی حجم قابل‌توجه آب و آبادانی تبدیل کنند. باوجود سلسله سدهای ساخته شده در مسیر کارون، بارش‌های غیرمنتظره در ابتدای سال ۹۸ منجر به پر شدن مخزن سدها و وقوع آب‌گرفتگی در پایین‌دست شد. بارش فروردین ۱۳۹۸ در ۵۰ سال اخیر بی‌سابقه بود. به‌طور متوسط مقدار بارش نسبت به سال قبل در حوضه‌های جنوب غرب بیش از چهار برابر شد (روایت سیلاب‌ها، ۱۳۹۸: ۶۵). بر اساس داده‌های سامانه ارائه آمار و گزارش سازمان مدیریت منابع آب ایران، میانگین ۱۰ ساله بارندگی منتهی به سال آبی ۹۷-۹۶ در حوضه آبریز کارون بزرگ سالانه ۳۹۰/۶ میلی‌متر است درحالی‌که در سال آبی پس از آن (مهر ۹۷ تا مهر ۹۸)، میزان بارندگی در این حوضه به ۷۲۹/۲ میلی‌متر رسید. از این مقدار، بیش از ۶۰۰ میلی‌متر بارندگی فقط در بازه زمانی سه ماهی بهمن ۹۷ تا فروردین ۹۸ اتفاق افتاد (سالنامه مرکز ملی خشک‌سالی و مدیریت بحران سال شمسی ۱۳۹۷). این یعنی در حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ در مدت سه ماه به‌اندازه‌ی ۱/۵ سال بارندگی شده است. با توجه به مساحت حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ و میزان بارندگی در فروردین ۹۸، پتانسیل روان آب در کارون بزرگ برابر مقدار ۹۴۳۹ میلیون مترمکعب گزارش شده است که در مقایسه با فروردین ۹۷ بیش از ۹۰۰ درصد افزایش داشته است (گزارش فروردین‌ماه مرکز ملی خشک‌سالی و مدیریت بحران، ۱۳۹۸: ۴). این حجم از بارندگی، موجب افزایش شدید دبی ورودی و همچنین خروجی سدهای خوزستان شد. براساس آمار سازمان آب و برق خوزستان (جدول ۲)، دبی خروجی سدهای گتوند و دز که سدهای پایین‌دست رودخانه‌ی کارون هستند در هفته‌ی منتهی به ۱۳۹۸/۲/۱ علی‌رغم روند کاهشی، به ترتیب به ۱۱۳۶ و ۱۱۳۷ متر مکعب بر ثانیه رسید (آخرین وضعیت سدهای خوزستان، ۱۳۹۸).

جدول (۲): دبی ورودی و خروجی سدهای پایین‌دست کارون و دز در روز اول اردیبهشت ۹۸ (آخرین وضعیت سدهای خوزستان، ۱۳۹۸)

نام سد	دبی ورودی (مترمکعب بر ثانیه)	دبی خروجی (مترمکعب بر ثانیه)	حجم ذخیره (میلیارد مترمکعب)
دز	۱۷۶۲	۱۱۳۷	۲/۴
گتوند	۹۲۲	۱۱۳۶	۴

خروجی این دو سد در منطقه‌ای به نام بندقیقیر به هم می‌پیوندند و کارون بزرگ را شکل می‌دهند.

۲-۲- اطلاعات اولیه

از راه‌های کم‌هزینه برای برآورد پارامترهای فیزیکی رودخانه می‌توان به استفاده از مدل‌های ریاضی (ایلدرومی و

محمد پناه‌مقدم^۱، (۱۴۰۰) یا برآورد از طریق پارامترهای واسطه مانند پارامترهای فیزیوگرافی حوضه (حیات‌زاده و همکاران^۲، ۱۴۰۰) اشاره کرد. صحت داده‌های حاصل از این روش‌ها با داده‌های اندازه‌گیری میدانی سنجیده می‌شوند و همواره دارای مقداری خطا هستند. بهترین برآورد از طریق اندازه‌گیری مستقیم پارامتر حاصل می‌شود. در این تحقیق برآورد پارامترهای مورد نظر از طریق اندازه‌گیری مستقیم حاصل شده است و برای انجام اندازه‌گیری میدانی، نیاز به اطلاعات اولیه از حوضه‌ی مورد مطالعه است. برای مثال چنانچه جزرومد در منطقه از نوع کاملاً روزانه باشد، چرخه جزرومدی در مدت ۱۲ ساعت و ۲۵ دقیقه کامل می‌شود و اندازه‌گیری در همین بازه‌ی زمانی کفایت می‌کند. به کمک ۴ مؤلفه‌ی اصلی جزرومد و عدد شکل کشند (F)، می‌توان نوع جزرومد در هر منطقه را تعیین کرد:

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad (1)$$

اگر این نسبت کمتر از ۰/۲۵ باشد، جزرومد به عنوان جزرومد نیم‌روزانه مشخص می‌گردد. اگر بین ۰/۲۵ و ۱/۵ باشد، جزرومد آمیخته است، اما بیشتر نیم روزه در نظر گرفته می‌شود. اگر بین ۱/۵ و ۳ باشد، جزرومد آمیخته است، اما بیشتر روزانه در نظر گرفته می‌شود؛ و چنانچه بیشتر از ۳ باشد جزرومد روزانه است (چگینی^۳، ۱۳۷۷).

این نسبت با توجه به مؤلفه‌های جزرومدی بار بیرونی اروند^۴ در کتاب جداول جزرومدی آدمیرالتی (Admiralty tide tables. 1996, 1995) در دهانه اروندرود ۰/۷۱ است و نشان دهنده یک جزرومد آمیخته و عمدتاً نیم‌روزانه در مصب رودخانه اروندرود است. الگوی جزرومد در خرمشهر نیز به تبعیت از بخش شمالی خلیج فارس به صورت آمیخته است و از نیمه روزانه تا روزانه تغییر می‌کند (نجفی^۵، ۱۹۹۷).

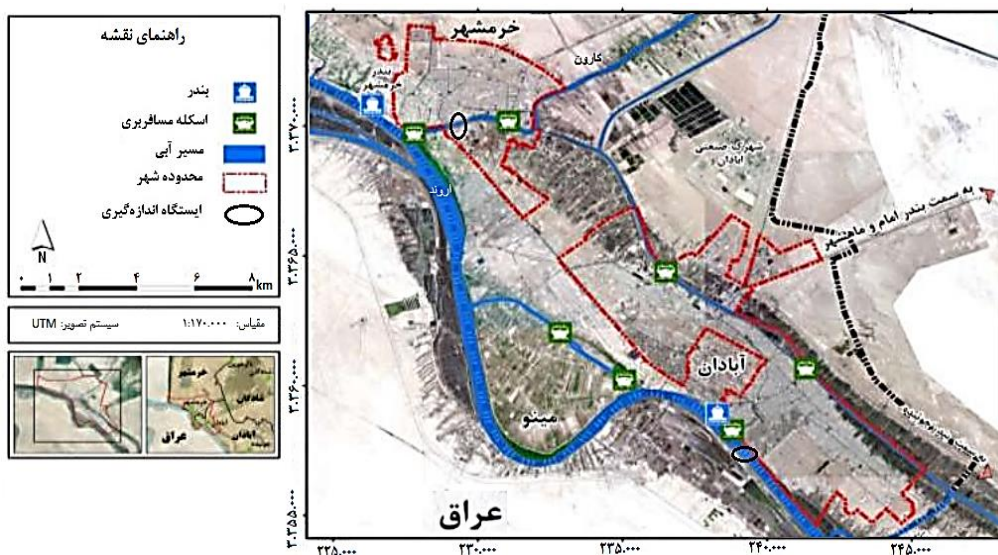
دوره تناوب جزرومد نیم روزانه ۲۴ ساعت و ۵۰ دقیقه است. از این رو در این تحقیق، اندازه‌گیری میدانی ساعت ۹:۳۰ صبح پنج‌شنبه ۱۳۹۸/۲/۵ شروع و تا ساعت ۱۰:۳۰ صبح جمعه ۱۳۹۸/۲/۶ به مدت ۲۵ ساعت ادامه یافت تا یک سیکل کامل جزرومدی پوشش داده شود. نمونه‌برداری به صورت گسسته و با فاصله زمانی یک ساعته انجام شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده عبارت‌اند از: سمت و سرعت جریان، دما، شوری، تراز سطح آب، غلظت بار معلق و عمق سنجی در عرض رودخانه. عملیات مذکور به صورت هم‌زمان در دو ایستگاه انجام شد که موقعیت آن‌ها در جدول ۳ و شکل ۲ نشان داده شده است.

1- Ildiromi and mohammadpanah moghadam
 2- Hayatzadeh et al.
 3- Chegini

4- SHATT AL ARAB OUTER BAR
 5- Najafi

جدول (۳): موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری
Table (3): Location of measuring stations

نام ایستگاه	موقعیت مکانی	موقعیت جغرافیایی	عرض رودخانه	بیشینه عمق (درمدکامل)	فاصله از دریا
کارون	مقابل بانک ملی مرکزی خرمشهر	۴۸°۱۰'۴۹"N ۳۰°۲۵'۵۶"E	۱۸۰ متر	۹/۸ متر	۹۴ کیلومتر
اروند	۵۰۰ متر پایین دست اسکله شیلات آبادان	۳۰°۱۹'۱۷"N ۴۸°۱۷'۱۴"E	۴۸۳ متر	۱۳/۲ متر	۶۹ کیلومتر



شکل (۲): منطقه‌ی مورد مطالعه و محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری

Fig (2) : Area of study. The location of Karun and Arvand stations is marked on the map

۲-۳- روش اندازه‌گیری

در رودخانه‌های جزرومدی، نمونه‌گیری تحت شرایط پیچیده‌ای چون، جریان متغیر تدریجی و جریانات معکوس قرار دارد. در اندازه‌گیری به روش گسسته، گرفتن نمونه از سراسر سطح مقطع عمود بر جریان دقیق‌ترین نتیجه را می‌دهد، اما این در رودخانه‌های جزرومدی شدنی نیست، به‌خصوص زمانی که رودخانه در حالت سیلابی و طغیان قرار دارد (ابتیو و پاول^۱، ۲۰۰۴: ۱۱۹۸). بنابراین نقاطی به‌عنوان نماینده کل برای نمونه‌برداری انتخاب می‌شوند تا ارزیابی از آن نقاط صورت پذیرد. ملاحظه شده است که نمونه‌های نقطه‌ای را می‌توان در جریان‌های کاملاً آمیخته و کم‌عمق که رسوبات معلق در راستای قائم و افقی به‌صورت یکنواخت پراکنده شده‌اند برداشت

1- Abtew and Powell

کرد (شلدن^۱، ۱۹۹۴: ۶۲). نظر به تغییرات گوناگون شرایط هیدرودینامیکی، به دست آوردن یک عمق به‌عنوان عمق معرف برای نمونه‌گیری دشوار است. در حالت تک نقطه‌ای این کار با قرار دادن مدخل ورودی نمونه‌بردار آب [یا حس‌گر جریان‌سنج] در عمق ۶۰٪ قابل حصول است (نیوبرن^۲، ۱۹۸۸: ۲۱۹). در مصب‌های آبرفتی از قبیل هوگلی در بنگال غربی، نمونه‌برداری از عمق ۶۰٪ در زیر سطح آب، و تنها در سه امتداد قائم انجام شده است. اتحادیه بندر کلکته برای ایستگاه‌های مختلف نمونه‌ها را در نقاط ۰/۲، ۰/۶ و ۰/۸ برابر عمق کل، در زیر سطح به دست آورده است. علاوه بر این در جمع‌آوری نمونه باید به قضاوت متکی بود، و نه به محدودیت استانداردهای نمونه‌برداری (محمودیان^۳، ۱۳۸۵). در این تحقیق، طبق روش معرفی شده توسط نیوبرن در سال ۱۹۸۸، اندازه‌گیری به روش تک نقطه‌ای انجام شد. بدین‌صورت که نمونه‌برداری بار معلق، سمت و سرعت جریان، دما و شوری از عمق ۶۰٪ در وسط رودخانه انجام شد. شروع داده‌برداری ساعت ۹:۳۰ صبح پنج‌شنبه ۱۳۹۸/۲/۵ و خاتمه آن ساعت ۱۰:۳۰ صبح جمعه ۱۳۹۸/۲/۶، مجموعاً به مدت ۲۵ ساعت بود.

برای اندازه‌گیری دما، شوری، سمت و سرعت جریان از جریان‌سنج القایی^۴ استفاده شد. این جریان‌سنج‌ها ساخت آلمان هستند و فرکانس داده‌برداری آن‌ها ۵Hz است.

برای اندازه‌گیری تغییرات تراز سطح آب، یک خط کش جزرومدی آلومینیومی در کنار رودخانه نصب، و مقدار آن به‌صورت ساعتی قرائت شد.

زمانی که تراز سطح آب در بالاترین حالت مد قرار داشت با استفاده از یک دستگاه اکوساندر، عمق مقطع عرضی رودخانه اندازه‌گیری شد. خروجی این دستگاه، به‌صورت گرافیک روی کاغذ مخصوص است. این تصویر به کمک نرم‌افزار سورفر رقوم‌سازی و سپس به‌کمک نرم‌افزار اکسل مساحت سطح مقطع در لحظه اندازه‌گیری محاسبه شد. به کمک داده‌های خط‌کش جزرومدی، تغییرات مساحت سطح مقطع بر اثر پایین رفتن سطح آب نیز محاسبه شد. برای اندازه‌گیری غلظت بار معلق، در وسط رودخانه از عمق ۶۰٪ نمونه آب برداشته و به آزمایشگاه منتقل شد. در آزمایشگاه با استفاده از کاغذ صافی و ترازو با دقت هزارم گرم میزان رسوب خشک در هر لیتر آب اندازه‌گیری شد.

۳- یافته‌ها و بحث

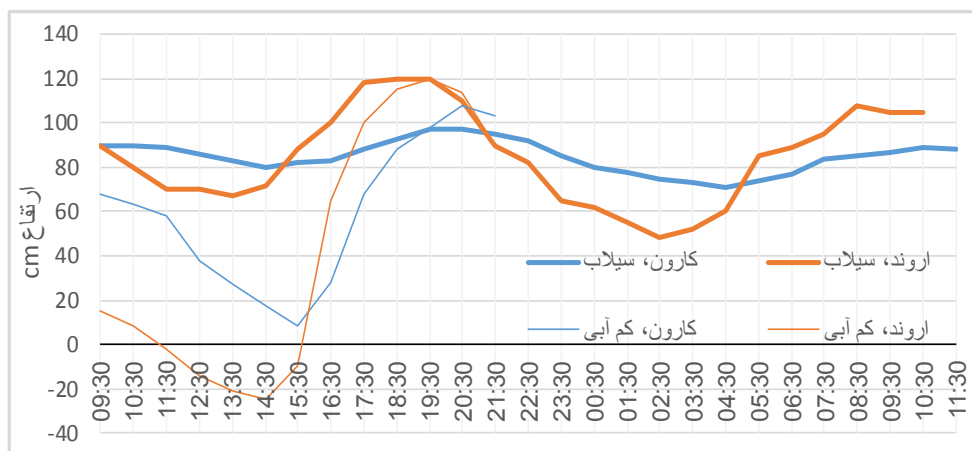
جهت مقایسه‌ی راحت‌تر داده‌های ایستگاه کارون با داده‌های ایستگاه اروند، پارامتر مورد بررسی، هم‌زمان برای هر دو ایستگاه به شرح زیر ارائه می‌شوند:

1- Sheldon
2- Newburn

3- Mahmoudian
4- Inductive Current Meter

۳-۱- تراز سطح آب

تغییرات تراز سطح آب در کارون و اروند با استفاده از دو اشل آلومینیومی اندازه‌گیری شد. این خط‌کش‌ها، هم‌تراز نیستند و رسم آن‌ها در یک دستگاه مختصات صرفاً برای مقایسه‌ی دامنه و فاز نوسان تراز سطح آب در دو ایستگاه است. شیب سطح آب بین دو ایستگاه از شکل ۳ قابل محاسبه نیست اما ارتفاع نوسانات آن‌ها قابل ملاحظه است. ارتفاع تغییرات تراز سطح آب در کارون و اروند به ترتیب ۲۶ و ۷۲ سانتی‌متر است. همچنین ملاحظه می‌شود که فاز تغییرات اروند پیش از کارون است. علاوه بر این موج جزرومدی در اروند شباهت بیشتری به موج جزرومدی دریا دارد و دارای زمان جزر و زمان مد تقریباً یکسان (حدود ۶/۵ ساعت) است درحالی‌که موج جزرومدی در کارون دارای کشیدگی در زمان جزر است و مدت زمان جزر (حدود ۸ ساعت) طولانی‌تر از زمان مد (حدود ۵ ساعت) است.



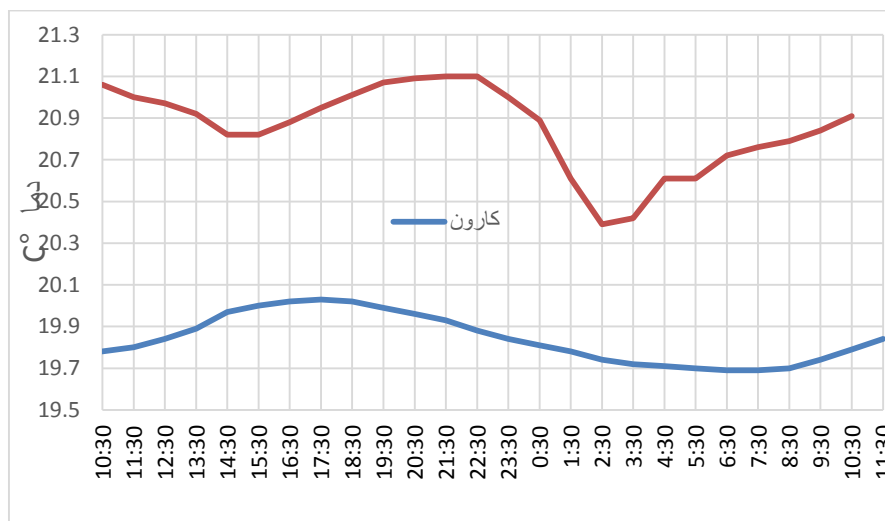
شکل (۳): مقایسه‌ی تغییرات تراز سطح آب ایستگاه‌های کارون و اروند در شرایط کم‌آبی و سیلابی

Fig (3): Comparison of changes in water level of Karun and Arvand stations in water shortage and flood conditions

موج جزرومدی یک موج تناوبی است و در صورتی‌که شرایط فیزیکی منطقه تغییر نکنند، در هر ماه قمری تقریباً به‌صورت مشابه تکرار می‌شود. بر اساس مطالعات صدری نسب و همکاران^۱ (۱۳۹۸) در زمان مشابه مهکشند و در فصل کم‌آبی در ۲۴ مهر ۱۳۹۴، بیشینه‌ی ارتفاع جزرومد در ایستگاه‌های کارون و اروند به ترتیب ۱۰۰ و ۱۴۲ سانتی‌متر اندازه‌گیری (شکل ۳). بدین ترتیب در شرایط سیلابی ارتفاع جزرومد در کارون و اروند به ترتیب ۷۴٪ و ۴۹٪ کاهش پیدا کرده است.

۳-۲-۳ دما

میانگین دمای آب در ایستگاه کارون $19/84^{\circ}\text{C}$ و در ایستگاه اروند $20/86^{\circ}\text{C}$ است. به طور میانگین دمای آب در ایستگاه اروند $1/02^{\circ}\text{C}$ بالاتر از ایستگاه کارون است. اختلاف دمایی در دو ایستگاه در ساعت ۲:۳۰ صبح به حداقل مقدار ($0/65^{\circ}\text{C}$) می‌رسد (شکل ۴).



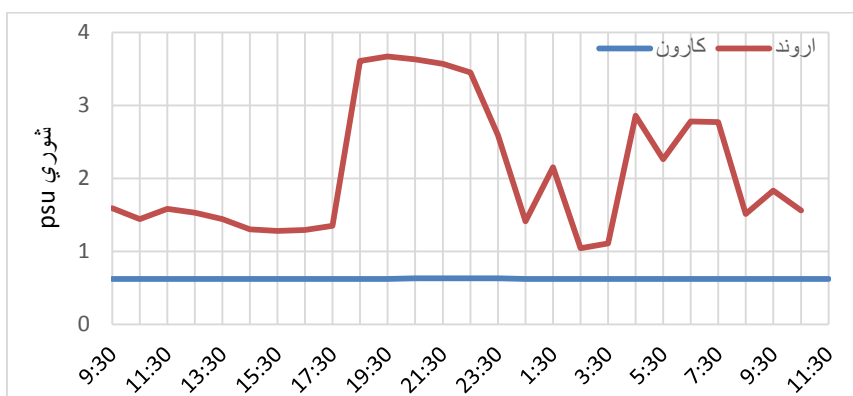
شکل (۴): تغییرات دما در ایستگاه کارون و اروند

Fig (4): Temperature changes in Karun and Arvand stations

۳-۳-۳ شوری

به طور میانگین شوری اروند $2/1\text{psu}$ است که از کمترین مقدار $1/04\text{psu}$ تا بیشترین مقدار $3/67\text{psu}$ متغیر است. با توجه به فاصله ۶۹ کیلومتری ایستگاه اروند تا دریا و شرایط سیلاب که جریان را دائماً به سمت دریا حفظ کرده است، این شوری منشأ دریایی ندارد. شوری کارون کاملاً ثابت و برابر $0/62\text{psu}$ ثابت شد (شکل ۵). بالاتر بودن میانگین شوری اروند نسبت به کارون نشان‌دهنده‌ی بالاتر بودن شوری شاخه‌های دجله و فرات است که در سه‌راهی خرمشهر با کارون یکی شده و به ایستگاه اروند می‌رسند.

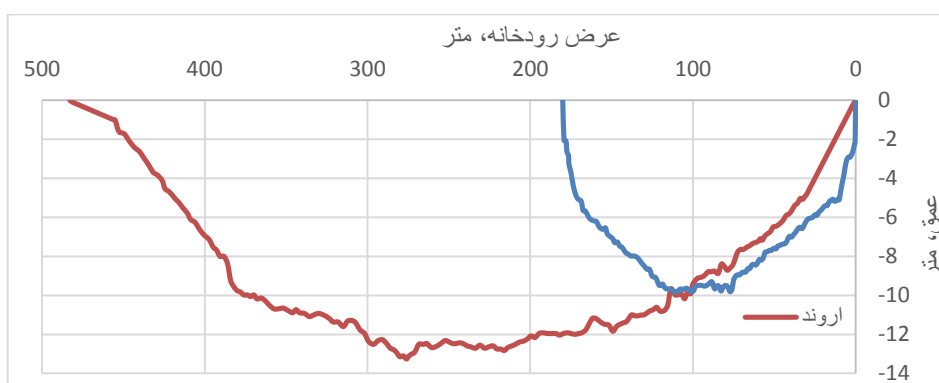
علاوه بر این در شکل ۵ ملاحظه می‌شود که از ابتدای اندازه‌گیری تا ساعت ۱۷:۳۰ مقدار شوری در ایستگاه اروند حول $1/42\text{psu}$ نوسانات کوچکی با انحراف معیار $0/12\text{psu}$ دارد اما به دلایل نامشخص در حفاصل ساعت ۱۷:۳۰ تا ۱۸:۳۰ به صورت ناگهانی از $1/35\text{psu}$ به $3/61\text{psu}$ افزایش می‌یابد. این نوسانات مقدار میانگین را به $2/1\text{psu}$ و انحراف معیار را به $0/88\text{psu}$ افزایش داده است.



شکل (۵): تغییرات شوری در ایستگاه کارون و اروند
Fig (5): Salinity changes in Karun and Arvand stations

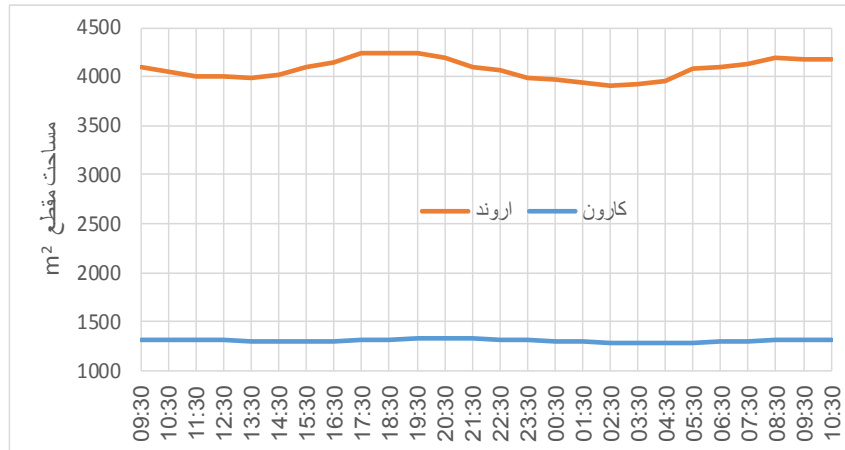
۳-۴- سطح مقطع

دستگاه اکوساندر، عمق را به صورت گرافیکی روی کاغذ مخصوص چاپ می‌کند. تصویر ثبت شده روی کاغذ، با اسکنر به فایل تصویری (jpg) تبدیل و به کمک نرم‌افزار سورفر رقومی سازی شد. فایل رقومی شده، برای ترسیم و محاسبه مساحت سطح مقطع و دبی، به برنامه اکسل منتقل شد. در شکل ۶ سطح مقطع ایستگاه کارون و اروند ملاحظه می‌شود. در این شکل موقعیت (۰/۰) ساحل سمت راست رودخانه است. مساحت سطح مقطع ایستگاه‌های کارون و اروند در زمانی که آب در بالاترین سطح قرار دارد به ترتیب ۱۳۳۰ و ۴۲۶۴ مترمربع است.



شکل (۶): سطح مقطع رودخانه در ایستگاه‌های کارون و اروند
Fig (6): River cross section in Karun and Arvand stations

با جزر و پایین آمدن سطح آب، سطح مقطع کاهش می‌یابد. منحنی تغییرات مساحت سطح مقطع در دو ایستگاه در شکل ۷ نشان داده شده است.

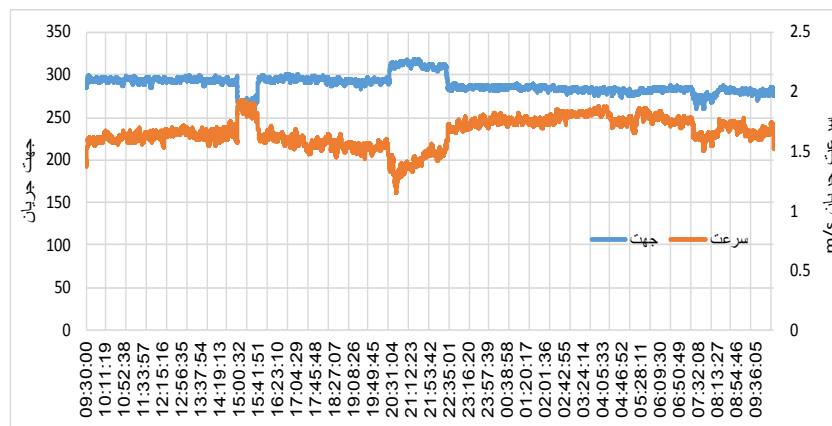


شکل (۷): تغییرات مساحت سطح مقطع رودخانه در ایستگاه کارون و اروند بر اثر جزرومد

Fig (7): Changes in the cross-sectional area of the river at Karun and Arvand stations due to tides

۳-۵- سرعت و جهت جریان

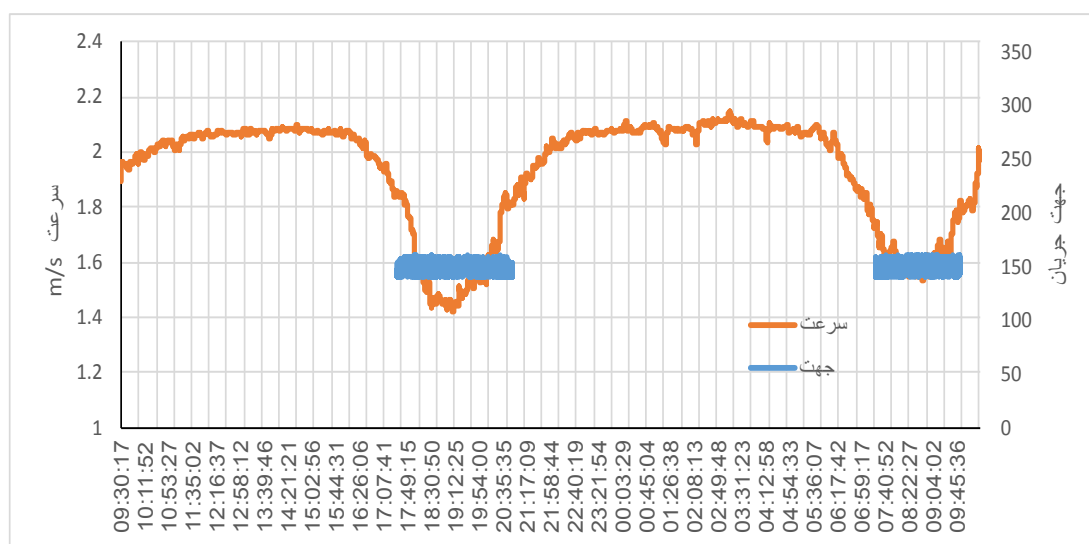
بر اساس نقشه‌های عمق نگاری سازمان جغرافیای نیروهای مسلح، جهت جریان رودخانه در ایستگاه کارون، به سمت ۲۹۰ درجه است (راستای شمال صفر درجه است و به‌صورت ساعت‌گرد افزایش می‌یابد). در شکل ۸ ملاحظه می‌شود که جهت جریان تقریباً در تمام مدت اندازه‌گیری در همان جهت طبیعی رودخانه و به سمت دریا است و اگرچه این اندازه‌گیری در زمان مهکشند انجام شده است اما مد بزرگ دریا نیز نتوانسته است جهت جریان را در این ایستگاه عوض کند. میانگین زمانی و مکانی سرعت جریان در ایستگاه کارون $1/6\text{m/s}$ است که از بیشینه مقدار $1/9\text{m/s}$ تا کمینه مقدار $1/1\text{m/s}$ متغیر است.



شکل (۸): منحنی تغییرات سرعت و جهت جریان در ایستگاه کارون

Fig (8): Curve of changes in current speed and direction at Karun station

جهت جریان طبیعی رودخانه در ایستگاه اروند، بر اساس نقشه‌های عمق نگاری سازمان جغرافیای نیروهای مسلح، به سمت ۱۴۵ درجه است. با توجه به سرعت زیاد جریان در این ایستگاه و آشفتگی شدید جریان در اطراف جریان‌سنج، جهت جریان فقط در زمان مد و بالا آمدن سطح آب، که باعث کاهش سرعت جریان شده است، اندازه‌گیری شده است. در شکل ۹ ملاحظه می‌شود که حتی در زمان مد نیز جهت جریان در همان جهت طبیعی رودخانه و به سمت دریا است و همانند ایستگاه کارون، در ایستگاه اروند نیز مد بزرگ دریا نتوانسته است جهت جریان را در این ایستگاه معکوس کند. میانگین سرعت جریان در ایستگاه اروند $1/9\text{m/s}$ است که از بیشینه مقدار $2/1\text{m/s}$ تا کمینه مقدار $1/4\text{m/s}$ متغیر است.



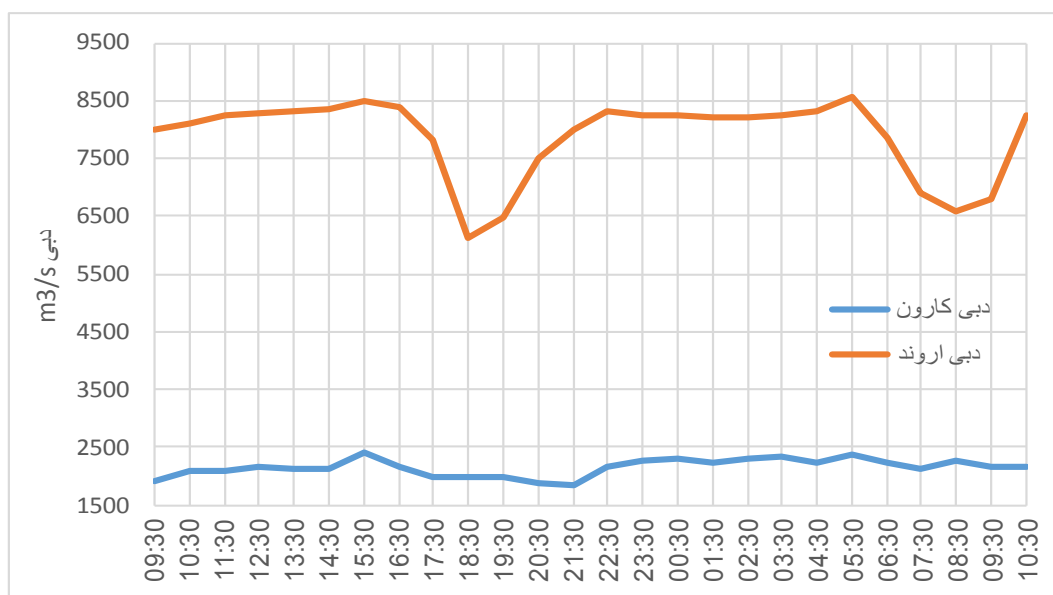
شکل (۹): منحنی تغییرات سرعت و جهت جریان در ایستگاه اروند

Fig (9): Curve of changes in current speed and direction at Arvand station

۳-۶- تغییرات دبی رودخانه

در شکل ۱۰ تغییرات دبی آب در دو ایستگاه رسم شده است. جزرومد باعث تغییر سرعت و سطح مقطع جریان و در نهایت تغییر دبی جریان می‌شود. میانگین دبی رودخانه‌های کارون و اروند در بازه‌ی زمانی اندازه‌گیری، به ترتیب ۲۱۵۳ و ۷۸۸۳ مترمکعب بر ثانیه بوده است که بیشینه مقدار آن به ترتیب ۲۴۱۱ و ۸۵۶۶ مترمکعب بر ثانیه است. دبی اندازه‌گیری شده برای اروندرود در شرایط سیلابی، بیش از ۲۷ برابر دبی برآورد شده توسط

فیاض محمدی^۱ (۱۳۹۶) در فصل کم‌آبی است. در آن تحقیق به کمک اندازه‌گیری میدانی در تاریخ ۱۳۹۴/۰۷/۲۴ و مدل‌سازی عددی، دبی اروندرود در خشک‌سالی و در فصل کم‌آبی $290 \text{ m}^3/\text{s}$ برآورد شد.

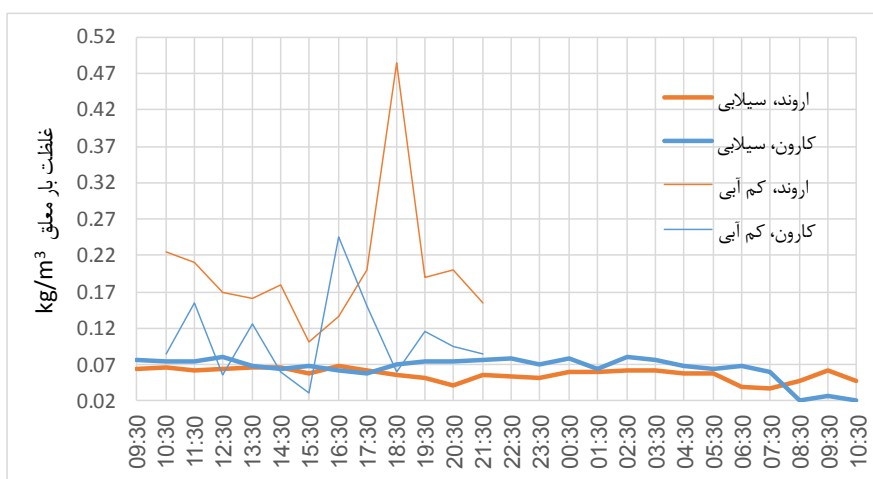


شکل (۱۰): منحنی تغییرات دبی رودخانه‌های کارون و اروند

Fig (10): Curve of changes in rivers discharge at Karoun and Arvand stations

۳-۷- غلظت بار معلق

با وجود اینکه رودخانه در شرایط سیلابی قرار دارد غلظت بار معلق در ایستگاه‌های کارون و اروند در تمام مدت اندازه‌گیری به ترتیب کمتر از ۸۰ و ۶۷ گرم در هر مترمکعب است (شکل ۱۱). این در حالی است که در اندازه‌گیری مشابه در تاریخ ۹۴/۷/۲۴ در فصل کم‌آبی، میانگین غلظت بار معلق در ایستگاه خرمشهر $104 \text{ g}/\text{m}^3$ و بیشینه مقدار $245 \text{ g}/\text{m}^3$ اندازه‌گیری شده است (صدری نسب و همکاران^۲، ۱۳۹۸). در مجموع غلظت بار معلق در کارون بیشتر از اروندرود است.

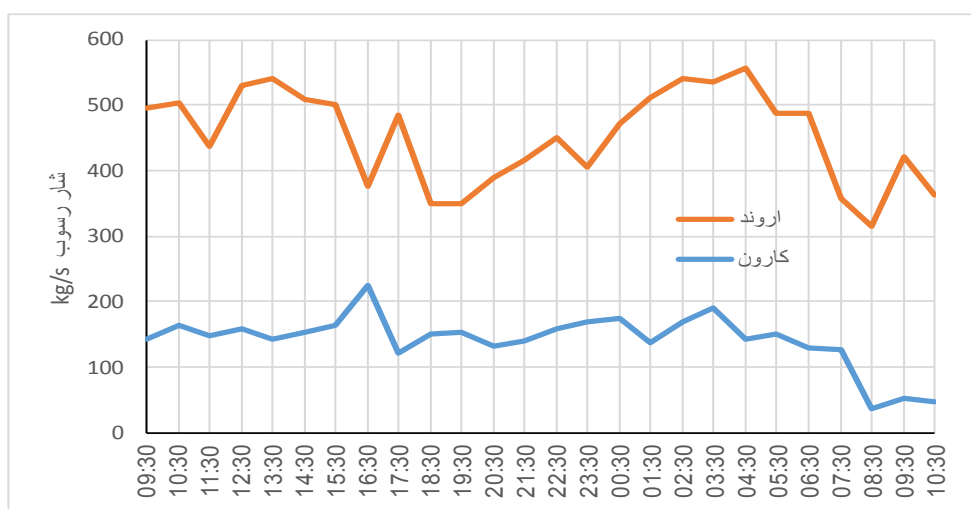


شکل (۱۱): مقایسه‌ی غلظت بار معلق ایستگاه‌های کارون و اروند در شرایط سیلابی و کم‌آبی

Fig (11): Curve of changes in suspended sediment concentration at Karoun and Arvand stations

۳-۸- شار بار معلق

در مجموع در بازه‌ی زمانی ۲۵ ساعته اندازه‌گیری که یک سیکل کامل جزرومدی را در بر گرفت، از ایستگاه کارون و اروند به ترتیب ۳۶۸۳ و ۱۱۷۹۲ کیلوگرم رسوب به سمت دریا عبور کرد. میانگین شار رسوب در این دو رودخانه به ترتیب ۱۴۲kg/s و ۴۵۴kg/s است که بیشینه مقدار آن به ترتیب ۲۲۶kg/s و ۵۵۷kg/s است (شکل ۱۲).



شکل (۱۲): تغییرات شار رسوب در ایستگاه‌های کارون و اروند

Fig (11): Curve of Sediment flux changes in Karoun and Arvand stations

۴- نتیجه گیری

در سیل فروردین ۱۳۹۸ استان خوزستان از تمام ظرفیت خود برای تخلیه سیلاب استفاده کرد و اندازه گیری هایی که نتایج آن ها در این تحقیق ارائه شد درست در همان زمان انجام شد. در زمان سیل و در ناحیه ی مورد مطالعه یکی از نگرانی های مسئولان زیربط، هم زمان شدن سیل با مهکشدن بود که در رسانه ها از آن به مد اکبر یاد شد. طبق داده های موجود، در حالت عادی در مهکشدن ارتفاع جزرومد در ایستگاه خرمشهر به یک متر می رسد این در حالی است که مطالعه ی حاضر کاهش حدود ۷۴٪ و ۴۹٪ ارتفاع تغییرات تراز سطح آب در ایستگاه کارون و اروند را نشان داد. این به معنی غلبه سیل بر جزرومد دریا دارد به نحوی که جهت جریان در هر دو ایستگاه کارون و اروند، برخلاف معمول، دائماً به سمت دریا اندازه گیری شد. میانگین سرعت جریان در ایستگاه کارون $1/6\text{m/s}$ اندازه گیری شد که از بیشینه مقدار $1/9\text{m/s}$ تا کمینه مقدار $1/1\text{m/s}$ متغیر است. در ایستگاه اروند نیز میانگین سرعت جریان $1/9\text{m/s}$ است که، از بیشینه مقدار $2/1\text{m/s}$ تا کمینه مقدار $1/4\text{m/s}$ متغیر است.

بیشینه دبی در حال تخلیه در خرمشهر $2411\text{m}^3/\text{s}$ اندازه گیری شد و به نظر می رسد چنانچه نیاز به تخلیه حجم بیشتر آب باشد باید از مسیرهای جایگزین مانند رودخانه ی بهمن شیر استفاده شود. در اروندرود نیز میانگین دبی رودخانه $7883\text{m}^3/\text{s}$ و بیشینه مقدار آن $8566\text{m}^3/\text{s}$ اندازه گیری شد.

بیشینه ی غلظت بار معلق نیز $80\text{gr}/\text{m}^3$ اندازه گیری شد که بسیار کمتر از شرایط کم آبی است و نشان می دهد رسوب معلق تابع شرایطی غیر از حجم دبی عبوری است. اگرچه غلظت بار معلق قابل توجه نیست اما به علت دبی فوق العاده بالای رودخانه، میزان شار بار معلق قابل ملاحظه است. میانگین شار رسوب در ایستگاه های کارون و اروند به ترتیب $142\text{kg}/\text{s}$ و $454\text{kg}/\text{s}$ اندازه گیری شد که تا بیشینه مقدار $226\text{kg}/\text{s}$ و $557\text{kg}/\text{s}$ نیز رسید.

با توجه به اینکه جهت جریان همواره به سمت دریا است، شوری $2/1\text{psu}$ در ایستگاه اروند منشأ دریایی ندارد و می توان نتیجه گرفت شوری $0/6\text{psu}$ در خرمشهر پس از مخلوط شدن با آب دجله و فرات به شوری $2/1\text{psu}$ رسیده است.

۵- منابع

- Abtew W. and Powell B. (2004). Water quality sampling schemes for variable flow canals at remote sites. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 40: 1197-1204.
- Adib, A. And Vaqefi, M. (2010). Determining the stage-discharge curve and converting it to regression relations in Karun tidal river, *5th National Congress of Civil Engineering*, Mashhad (in Persian)
- Admiralty tide tables 1996, (1995). Atlantic and Indian Oceans, including tidal stream tables, Hydrographer of the Navy, Hydrographic Department, Great Britain
- Afshin, Y. (1994). Rivers of Iran, *Ministry of Energy - Jamab Consulting Engineers*. P.255-257 (in Persian)
- April Report of the National Center for Drought and Crisis Management, (2019). *Hydrometeorology Monthly*, Ministry of Energy, Tehran, 7 pages (in Persian)
- Chegini, W. (1998). Wave Theories, *Jihad Water and Watershed Management Research Company*, 301 pages (in Persian)
- Emery, w. j. and Thomson, R. E. (1996). Data Analysis Methods in Physical Oceanography, *ELSEVIER*, 613 P.
- Fayaz Mohammadi, M. (2017). Numerical and field study of the effect of tides on sediment transport in Arvand River estuary, PhD thesis, Khorramshahr University of Marine Sciences and Technology, Faculty of Marine Sciences, Department of Marine Physics, 169 pages (in Persian)
- Garel, E., Pinto, L., Santos, A., Ferreira, O'. (2009). Tidal and river discharge forcing upon water and sediment circulation at a rock-bound estuary (Guadiana estuary, Portugal), *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, No. 84 (2009) P. 269–281, doi: 10.1016/j.ecss. 2009.07.002
- Hayatzadeh, M., Amini, S., Fathzadeh, A., Asadi, M. (2021). Estimation of Suspended Sediment Load based on Physiographic Parameters of the Watershed, *Hydrogeomorphology* 8(26), pp. 21-1. doi:10.22034/hyd.2021.30405.1452
- Herdman, L., Erikson, L., and Barnard, P. (2018). Storm Surge Propagation and Flooding in Small Tidal Rivers during Events of Mixed Coastal and Fluvial Influence, *Journal of Marine Science and Engineering*, doi:10.3390/jmse6040158
- Ildoromy, A., Mohammadpanah moghadam, M. (2021). Optimization of the Best Model to Estimate Suspended Sediment Load of Abshine River Dam Hamedan, *Hydrogeomorphology* 8(27), pp. 57-37. doi:10.22034/hyd.2021.41680.1546
- Mahmoudian, M. (2006). Tidal Hydraulic Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, 273 pages (in Persian)

- Najafi, H. S. (1997). Modelling tides in the Persian Gulf using dynamic nesting, Ph.D. thesis, University of Adelaide, South Australia.
- Narrative of the Floods of 2018-19 Iran, (2019). Special Committee of the National Flood Report, Presidential Institution, First Report, *Event Description*, 122 pages (in Persian)
- Newburn, L.H., (1988). Modern sampling equipment: Design and application. In Principles of environmental sampling, Keith LH (ed). *American Chemical Society: Salem, MA: USA*; 209 - 220.
- Pritchard, P.W. and Cameron w.m. (1963). Estuaries in the sea (ed.m.n.Hill) Vol. 2, John Wiley and Sons, New York, 306-324.
- Sadri Nasab, M., Fayaz Mohammadi, M., Chegini, V., Ashtari Larki, A. (2019). The effect of river meandering on suspended sediment concentration and amplitude of water level fluctuations-Case study of Arvand River, *Journal of Marine Science and Technology*, Volume 18 , No. 2, pp. 76-89 (in Persian)
- Sheldon L.R. (1994). Field guide for collecting and processing stream-water samples for the National Water-Quality Assessment Program. 62.
- Statistics and Reporting System of Iran Water Resources Management Organization, Ministry of Energy, Tehran, available at : <http://wrs.wrm.ir> (in Persian)
- Teng, F., Shen, Q., Huang, W., Ginis, I., and Cai, Y. (2017). Characteristics of river flood and storm surge interactions in a tidal river in Rhode Island, USA, IUTAM Symposium on Storm Surge Modelling and Forecasting, *Procedia IUTAM 25* (2017) P.: 60-64
- The latest status of Khuzestan dams + table, Mashreq News Agency, (2009). News code 952679, available at: <https://www.mashrehnews.ir/news/952679> (in Persian)
- Vakili, A. (2017). Dams and Water Transfer, Ministry of Energy, National Committee of Large Dams of Iran (in Persian)
- Yearbook of the National Center for Drought and Crisis Management (2018), Ministry of Energy, Tehran, 40 pages (in Persian)
- Zheng, F., Leonard, M., Westra, S. (2017). Application of the design variable method to estimate coastal flood risk. *J. Flood Risk Manag.* P: 522–534.
- Zheng, F., Westra, S., Leonard, M., Sisson, S.A. (2014). Modeling dependence between extreme rainfall and storm surge to estimate coastal flooding risk. *Water Resource.* P.: 2050–2071.