

## نحوه شور شدن رودخانه کارون در اثر پدیده جزر و مد خلیج فارس با استفاده از مدل ریاضی

## مرتضی کاشفی الاصل

گروه مهندسی محیط زیست، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

امیر حسین جاوید\*، زهرا شفیعی

دانشکده محیط زیست و انرژی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۸۹/۸/۳۰

تاریخ دریافت: ۸۸/۸/۶

## چکیده

**مقدمه:** در سال‌های اخیر نگهداری و بهبود کیفیت آب رودخانه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. یکی از این رودخانه‌ها رودخانه کارون می‌باشد. رود کارون پرآب‌ترین و بزرگ‌ترین رودخانه ایران است. رودخانه کارون در انتها به دو شاخه بهمن شیر و حفار منشعب می‌گردد. شاخه بهمن شیر وارد خلیج فارس شده و شاخه حفار با اروندرود یکی شده و سپس وارد خلیج فارس می‌شود. بدلیل طرح‌های کنترل آب در بالادست رودخانه‌های کارون در ایران و اروندرود در عراق و ترکیه و وجود جریان‌های جذر و مد خلیج فارس، وضعیت شوری در این رودخانه‌ها به حدی رسیده است که مطالعه و بررسی آن بویژه از نظر علمی امری اجتناب ناپذیر می‌باشد.

**هدف:** از انجام این مقاله مقایسه وضعیت شوری در رودخانه کارون در حالت واقعی و نتایج حاصل از

شبیه‌سازی، با مدل کامپیوتری MIKE11 می‌باشد.

جبهه شوری در زمان مد به سمت بالادست رودخانه و در زمان جزر و مد به سمت دریا حرکت می‌نماید. این موضوع سبب اختلاط آب شور و آب شیرین در طول رودخانه می‌شود.

**نتایج:** مدل نشان می‌دهد در ایستگاه اندازه‌گیری دارخوین تاثیر شوری حاصل از جزر و مد وجود ندارد. در

ایستگاه سلیمانیه در دبی  $1000 \frac{m^3}{hr}$  هم در نتایج مدل و هم در اندازه‌گیری‌های واقعی، نفوذ شوری در اثر جریان

جزر و مد ضعیف است. ماکزیمم شوری گزارش شده در دبی  $200 \frac{m^3}{hr}$ ، در تاریخ ۷۵/۱۲/۱۲، ۹۶۰ psu و نتایج

حاصل از اجرای مدل با شرایط مشابه ۸۸۰ psu می‌باشد.

\*عهده دار مکاتبات: a-javid@ceers.org

**نتیجه گیری:** با توجه به نتایج مدل که تطابق قابل قبولی با داده های اندازه گیری شده دارد، مدل سازی می تواند به عنوان ابزاری مطمئن برای پیشبینی رفتار شوری در رودخانه ها بکار رود.

**واژه های کلیدی:** رودخانه کارون، نفوذ شوری، جزر و مد، مدل سازی

### مقدمه

در سال های اخیر نگهداری و بهبود کیفیت آب رودخانه ها از اهمیت ویژه ای برخوردار شده است. یکی از این رودخانه ها رودخانه کارون می باشد. رود کارون پرآب ترین و بزرگ ترین رودخانه ایران است. این رود با طول ۹۵۰ کیلومتر طولانی ترین رودیست که تنها در داخل ایران قرار دارد و همچنین تنها رود ایران است که بخشی از آن قابل کشتیرانی است. آب آشامیدنی کلان شهر اهواز از رودخانه کارون تامین می شود. رودخانه کارون در انتها به دو شاخه بهمن شیر و حفار منشعب می گردد. شاخه بهمن شیر وارد خلیج فارس شده و شاخه حفار با اروندرود یکی شده و سپس وارد خلیج فارس می شود. بدلیل طرح های کنترل آب در بالادست رودخانه های کارون در ایران و اروندرود در عراق و ترکیه و وجود جریان های جذر و مد خلیج فارس، وضعیت شوری در این رودخانه ها به حدی رسیده است که مطالعه و بررسی آن بویژه از نظر علمی امری اجتناب ناپذیر می باشد ضمن اینکه یافتن راه حل های ممکن مستلزم تهیه اطلاعات بیشتر و دقیق تری نیز می باشد. در شکل ۱ موقعیت رودخانه کارون و منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه

در این مقاله با توجه به اطلاعات موجود وضعیت شوری در رودخانه کارون با استفاده از مدل کامپیوتری MIKE11 شبیه‌سازی و با اطلاعات واقعی مقایسه شده است.

تحلیل شوری در نزدیک مصب رودخانه به دریا عموماً پیچیده‌تر از تحلیل رودخانه‌ها یا دریاچه‌ها می‌باشد. دلیل این پیچیدگی مسئله جزر و مد است که باعث می‌شود گاهی جریان به سمت بالادست و گاهی به سمت دریا باشد.

جبهه شوری در زمان مد به سمت بالادست رودخانه و در زمان جزر و مد به سمت دریا حرکت می‌نماید. این موضوع سبب اختلاط آب شور و آب شیرین در طول رودخانه می‌شود.

حرکت شوری در اثر دو مکانیزم صورت می‌گیرد یکی مکانیسم همرفتی<sup>۱</sup> و دیگری مکانیسم نفوذ<sup>۲</sup> که در مکانیسم همرفتی جریان آب به همراه خود شوری را منتقل می‌کند و در مکانیسم نفوذ، شوری به صورت انتقال جرم از بخشی که غلظت آن بیشتر است به بخشی که غلظت آن کمتر است انتقال می‌یابد. این انتقال جرم ناشی از حرکت و انرژی مولکولی است. البته تلاطم نیز در انتقال شوری موثر است و نوسانات سرعت جریان بر روی مکانیسم همرفتی اثر می‌گذارند و باعث ایجاد نوسانات در غلظت شوری می‌گردند. هر چه گرادیان غلظت شوری بیشتر باشد انتقال جرم شوری بیشتر می‌شود که نهایتاً پدیده نفوذ شوری را بدنبال خواهد داشت. گذشته از این دو، یک مورد خاص در دهانه‌های رودخانه‌های منتهی به دریای آب شور مشاهده می‌شود و آن حرکت جبهه آب شور به سمت بالادست رودخانه است. بدلیل اختلاف دانسیته بین آب شور و آب رودخانه، آب شور در کف و آب تازه و شیرین رودخانه در سطح قرار می‌گیرد. بدین ترتیب آب شور در لایه زیرین مرتباً به سمت بالا دست حرکت می‌نماید.

#### مواد و روش‌ها

در تحقیق انجام شده با توجه به تغییرات دبی رودخانه، شرایط جزر و مد خلیج فارس و نوسانات قابل توجه تراز سطح آب در اثر پدیده جزر و مد و نهایتاً تاثیر قابل توجه مدل هیدرودینامیک بر میزان صحت برآورد شوری، استفاده از معادلات حاکم بر جریان‌های غیر دائمی متغیر تدریجی (GVUF<sup>۳</sup>) امری اجتناب ناپذیر است. (۱،۶،۱۷)

معادلات حاکم به صورت زیر بیان می‌گردند: (۲۰، ۲، ۴، ۱۸)

#### ۱- معادله پیوستگی

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b_s \frac{\partial h}{\partial t} = \pm q$$

#### ۲- معادله ممتوم (Saint Venant)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( a \frac{Q^r}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{c^r AR^*} = 0$$

<sup>1</sup> Convection

<sup>2</sup> Diffusion

<sup>3</sup> Gradually varied unsteady Flow

معادله ممنتوم برای جریان‌های غیر دائمی متغیر تدریجی اولین بار توسط Saint Venant در سال ۱۹۷۱ بدست آمد و به همین نام شناخته می‌شود.

۳- معادله یک بعدی همرفتی انتشار<sup>۱</sup> (۲۱.۷)

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left[ AD \frac{\partial C}{\partial x} \right] = -AKC + C_r q$$

که:

A: سطح مقطع جریان ( $m^2$ )

C: ضریب شزی

g: شتاب جاذبه ( $m^2/sec$ )

h: تراز آب نسبت به یک سطح مبنا (m)

Q: دبی رودخانه ( $m^3/s$ )

$\alpha$ : ضریب تصحیح مربوط به سرعت‌های متفاوت در مقطع

$b_s$ : عرض رودخانه در سطح آب (m)

q: دبی جریان جانبی در واحد طول (چشمه و چاه) ( $m^2/s$ )

C: غلظت

D: ضریب انتشار، ضریب سرعت  $D=aV^b$  و b توان

K: ضریب کاهش خطی

$C_2$ : غلظت چشمه / چاه

X: مختصات مکانی (m)

t: مختصات زمانی (s)

$Q=VA$ : دبی ورودی رودخانه: V متوسط سرعت در سطح مقطع که در طول یک دوره جزر و مد تغییر می‌نماید.

$R1$ : متوسط شعاع هیدرولیکی که طبق رابطه زیر تعریف می‌شود.<sup>(۱۵)</sup>

$$\sqrt{R^*} = \frac{1}{A} \int_0^B y^{\frac{r}{2}} .db$$

فرضیات معادله ممنتوم عبارتند از: (۱۴،۱۰)

- جریان یک بعدی است بنابراین سرعت در تمام سطح مقطع یکسان است و سطح آب در هر مقطع کاملاً افقی است.

- انحنای خطوط جریان ناچیز است و شتاب قائم قابل اغماض است و در نتیجه تغییرات فشار هیدرواستاتیک در جهت عمودی فرض می‌شود.

<sup>1</sup> Advection -Dispersion

- تاثیرات اصطکاک جداره‌ها و نیز آشفتگی مربوط به جداره‌ها از همان قوانینی پیروی می‌کنند که در جریان ماندگار بکار گرفته می‌شوند.

- آب غیرقابل تراکم و هموژن است.

- جریان زیر بحرانی است.

- در همه جا جهت جریان موازی کف در نظر گرفته می‌شود.

فرضیات معادله انتقال انتشار<sup>۱</sup> عبارتند از: (۱۱،۹-۱۳،۱۰-۱۹،۱۶)

- رودخانه و خور مورد بررسی در تمام سطح مقطع‌ها بصورت کاملاً مخلوط می‌باشد.

- قانون نفوذ Fick: انتقال انتشار متناسب با اختلاف غلظت می‌باشد.

- واکنش درجه یک است (کاهش خطی)

معادله دو مکانیسم انتقال را در نظر می‌گیرد.

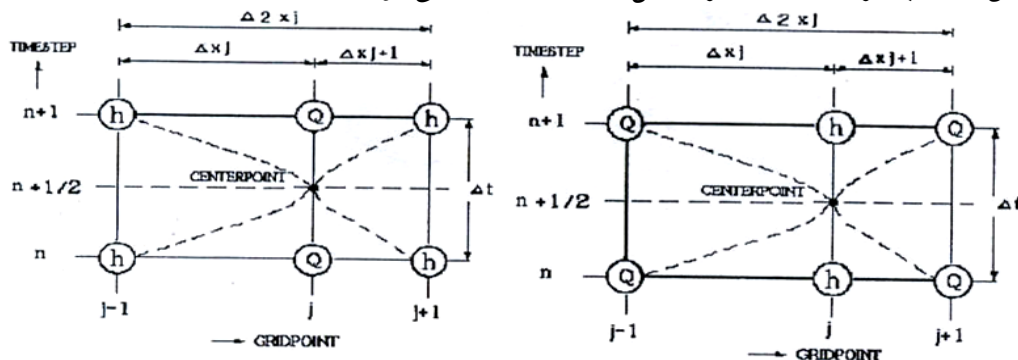
۱- انتقال همرفتی (یا جابجایی با جریان)

۲- انتقال انتشاری در نتیجه گرادیان‌های غلظت

### منقطع سازی معادلات<sup>۲</sup>

روش منقطع سازی یک روش عددی اختلاف محدود، ضمنی<sup>۴</sup> و مرکزی<sup>۵</sup> با استفاده الگوریتم<sup>۶</sup> نقطه‌ای Abbot

می‌باشد و از روش جاروب کردن دوجانبه<sup>۷</sup> برای حل معادلات استفاده می‌شود.



شکل ۲- الگوریتم<sup>۶</sup> نقطه‌ای Abbot مربوط به معادله پیوستگی و معادله اندازه حرکت

خروجی مدل هیدرودینامیک بصورت مقدار دبی و سطح آب در هر گره به‌عنوان اطلاعات ورودی برای مدل انتقال انتشار<sup>۷</sup> استفاده می‌شود. بعد از مشخص شدن مقدار شوری در نقاط گرهی بعنوان یک شرایط اولیه (Cj) و شرایط مرزی و همچنین مشخص شدن مقدار ضریب پراکندگی D، غلظت شوری در هر نقطه گرهی بصورت تابعی از زمان محاسبه می‌گردد.

<sup>1</sup> transport dispersion

<sup>2</sup> Mixed

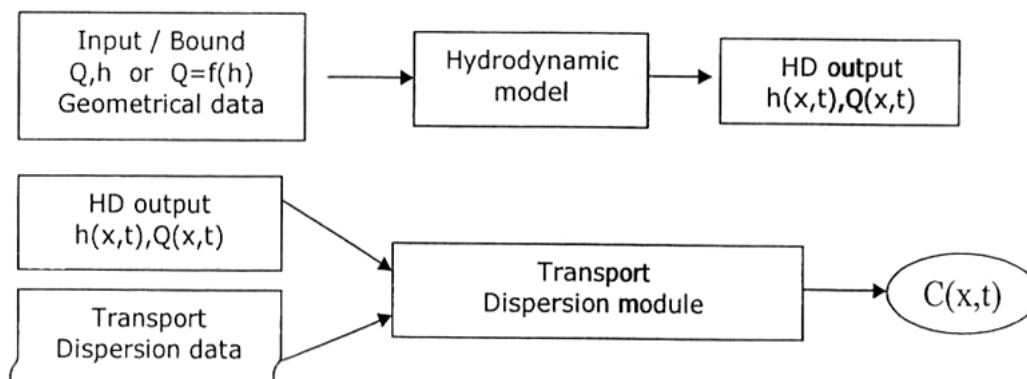
<sup>3</sup> Descritization

<sup>4</sup> implicit

<sup>5</sup> central

<sup>6</sup> Double sweep Algorithm

<sup>7</sup> transport dispersion



شکل ۳- ارتباط مدل هیدرودینامیک و شوری (۲۲)

برای اجرا و داشتن یک راه حل ایستا در حل مدل هیدرودینامیک MIKE11 فاصله زمانی  $(\Delta t)$  و فاصله گرهی  $(\Delta x)$  بایستی طبق شرایط زیر انتخاب شوند.

$$\frac{U \cdot \Delta t}{\Delta x} \ll 1.2 \quad \text{شرط سرعت}$$

$$Cr = \frac{U + \sqrt{gh} \Delta t}{x} < 10 - 15 \quad \text{محدوده عدد کورانت}$$

سپس برای مدل انتقال فشار ۱ تا فاصله گرهی  $\Delta x$  و فاصله زمانی  $\Delta t$  باید طوری انتخاب شود که عدد کورانت کمتر از یک باشد.

$$Cr, K = \frac{U \cdot t}{x} < 1$$

اطلاعات ورودی برای مدل انتقال انتشار عبارتند از:

- ضریب پراکندگی
- شوری
- الگوی جزر و مد

دبی ورودی از محاسبات قبلی به عنوان شرط مرزی بالادست وارد می‌گردد. الگوی جزر و مد و مقدار شوری به عنوان شرط مرزی پائین دست وارد می‌شود.

### نتایج و بحث

برای برآورد شوری لازم است تا ابتدا مدل از نظر هیدرودینامیک اجرا و کالیبره گردد.

اطلاعات مورد نیاز برای اجرا هیدرودینامیک و کالیبراسیون عبارتند از:

- مختصات مسیر رودخانه
- مقاطع عرضی

<sup>1</sup>transport dispersion module

- شرایط مرزی شامل دبی رودخانه، سطح آب، منحنی اشل دبی، الگوی جزر و مد و... می باشد.

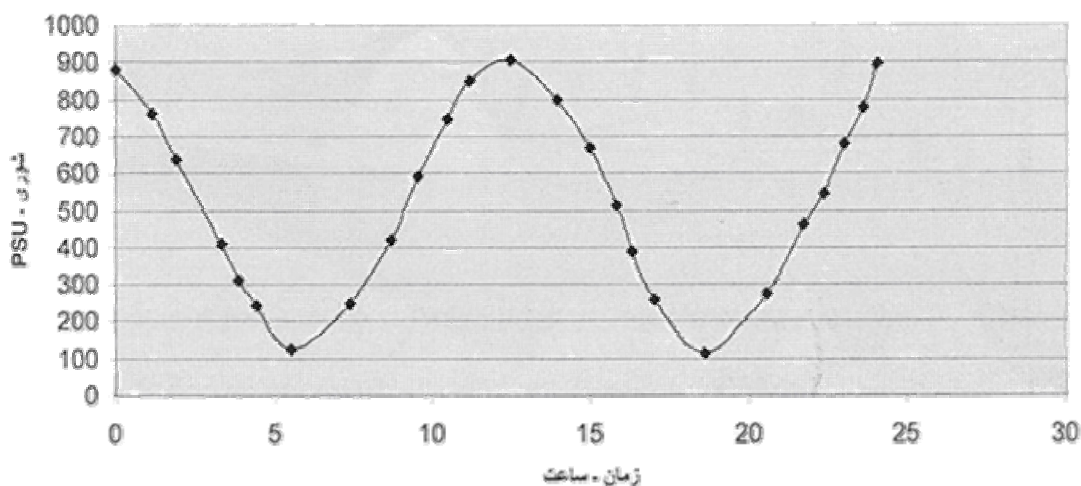
- ضرایب زبری

برای کالیبراسیون مدل از اطلاعاتی استفاده می گردید که به ازای دبی به عنوان شرایط بالادست شرایط دقیق پائین دست یعنی سطح آب مربوط به همان دبی موجود باشد. بنابراین مدل بر اساس داده های ثبت شده در ایستگاه های دارخوین و سلیمانیه به ازاء دبی رودخانه معادل ۲۰۰ مترمکعب بر ساعت و شوری ارائه شده در شکل ۴ اجزا و کالیبراسیون آن با تغییر پارامترهای هیدودینامیک (به ویژه ضریب زبری). شکل ۵ پروفیل هیدرولیکی آب را در این حالت نشان می دهد. پس از اجرا و کالیبراسیون، مدل هیدرودینامیک برای شرایط جزر و مد اجرا شد.

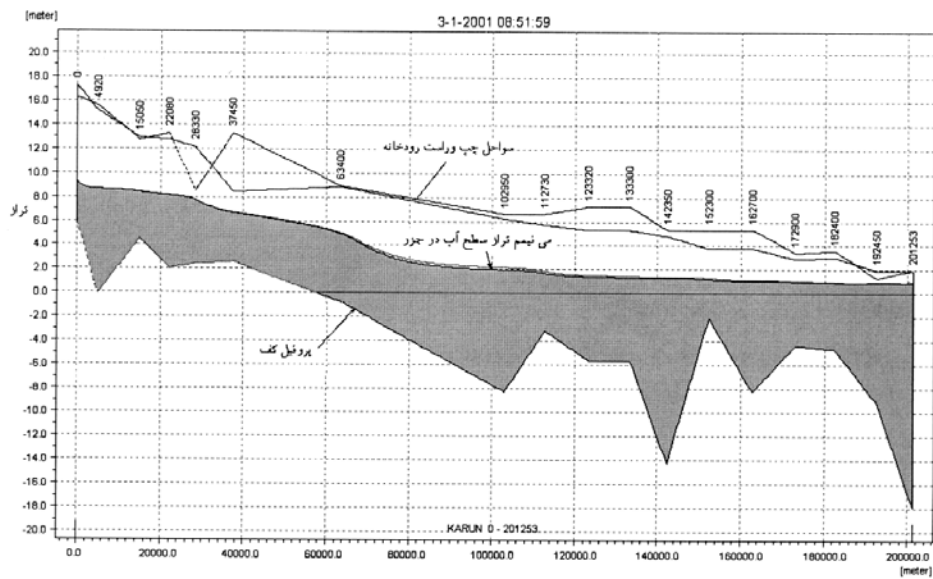
شکل ۶ ماکزیمم پروفیل هیدرولیکی آب در این حالت را نشان می دهد، میزان و طول تاثیر جریان های جزر و مدی در این شکل قابل مشاهده است.

سپس مدل برای برآورد شوری در شرایط جزر و مدی در دبی های ۵۰، ۲۰۰ و ۱۰۰۰ مترمکعب بر ساعت اجرا شد. شکل های ۷ و ۸ و ۹ به ترتیب نفوذ شوری را در دبی های ۵۰ و ۲۰۰ و ۱۰۰۰ مترمکعب بر ساعت نشان می دهد.

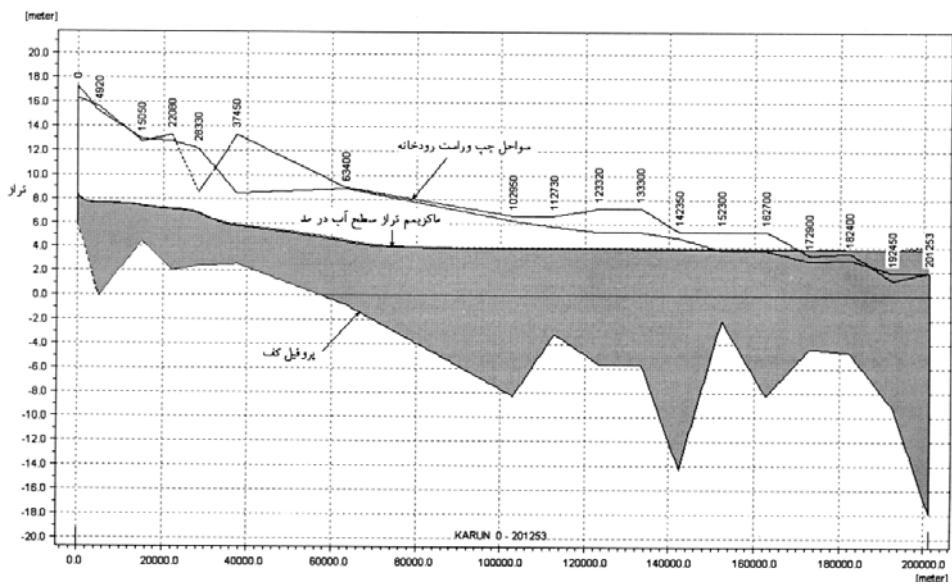
ضمناً برای بررسی تاثیر پروفیل کف رودخانه مدل برای شرایطی که پروفیل کف تغییر می کند (مانند شرایط لایروبی) نیز اجرا شد. شکل ۱۰ نفوذ شوری را در این حالت نشان می دهد. دقت مدل هیدرودینامیک تاثیر قابل توجهی بر نتایج شوری خواهد گذارد. بنابراین کالیبراسیون بسیار حائز اهمیت است.



شکل ۴ - تغییرات شوری طی زمان در ایستگاه سلیمانیه

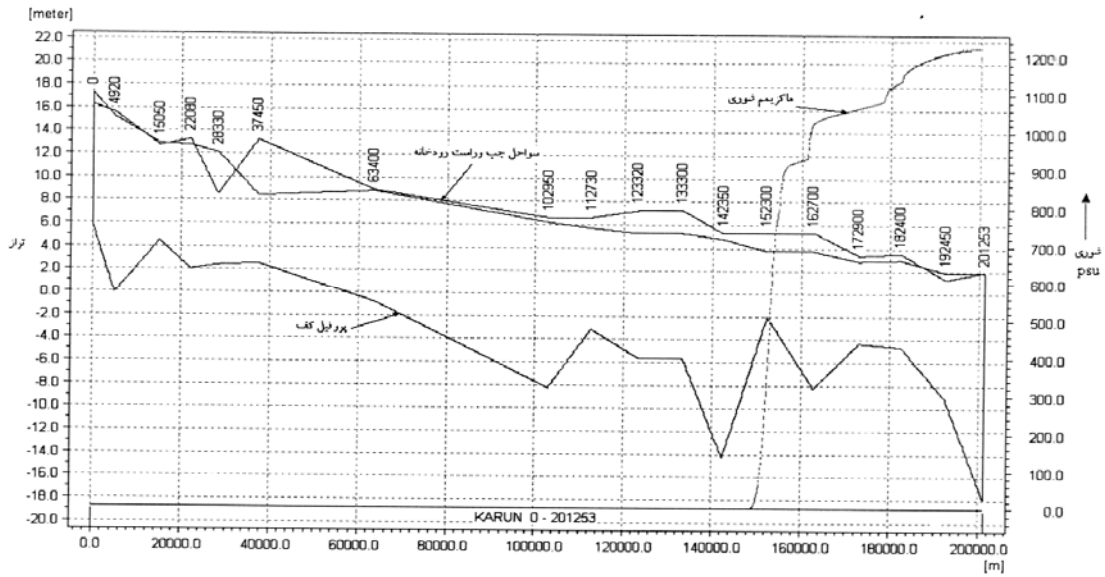


شکل ۵ - پروفیل سطح آب بدون جزر و مد

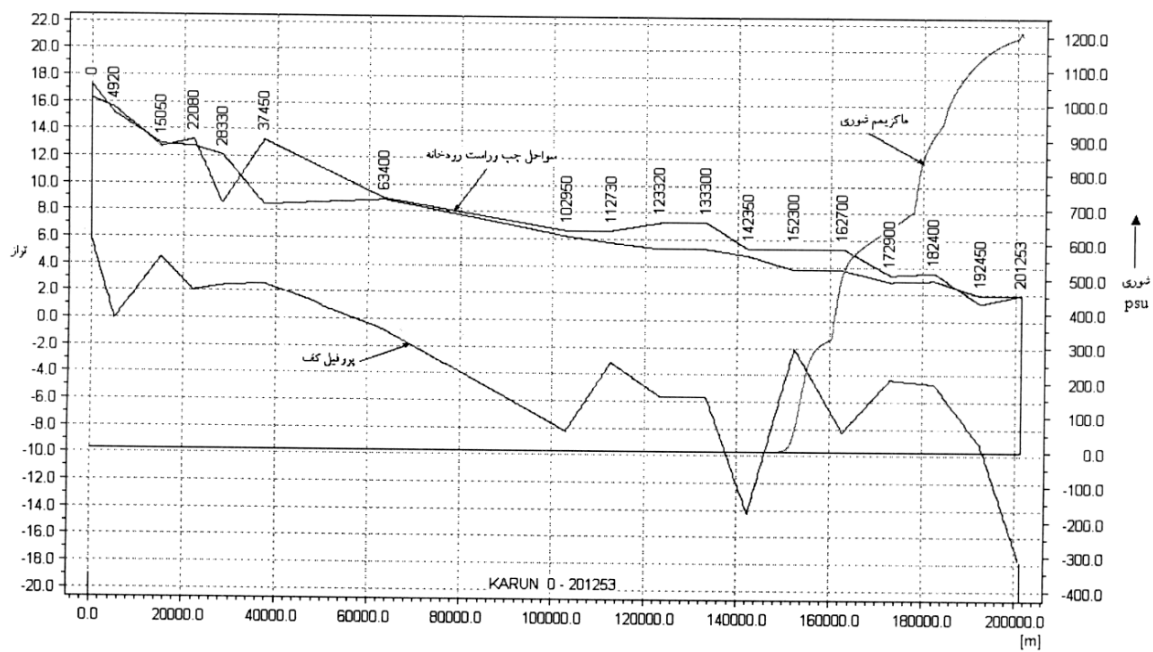


شکل ۶ - پروفیل سطح آب با جزر و مد

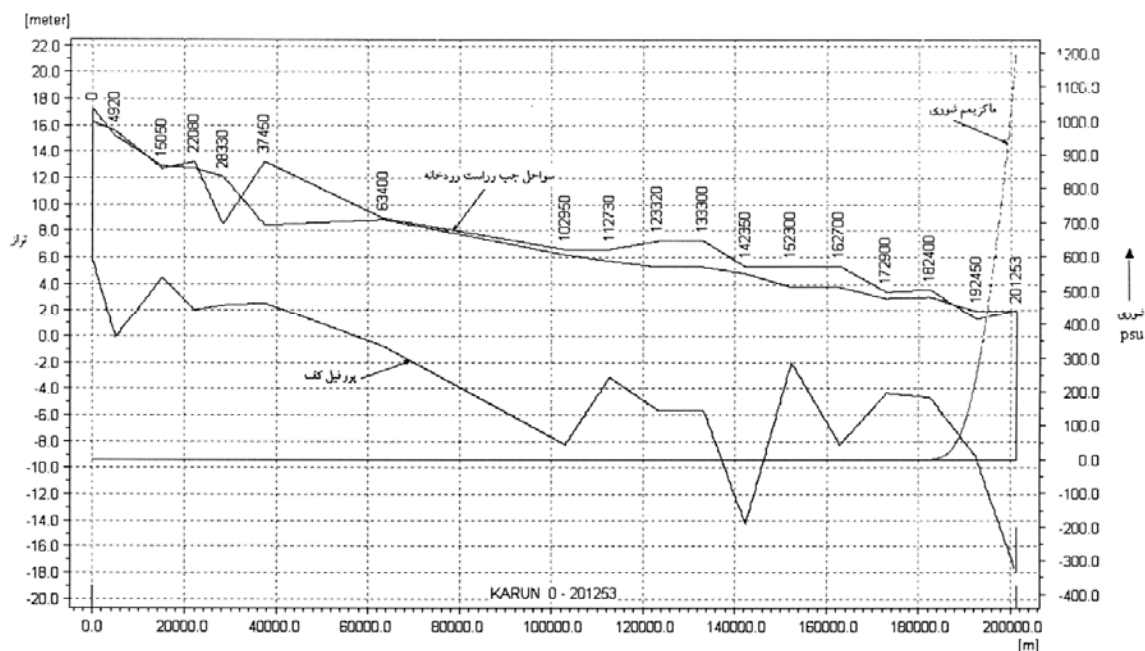




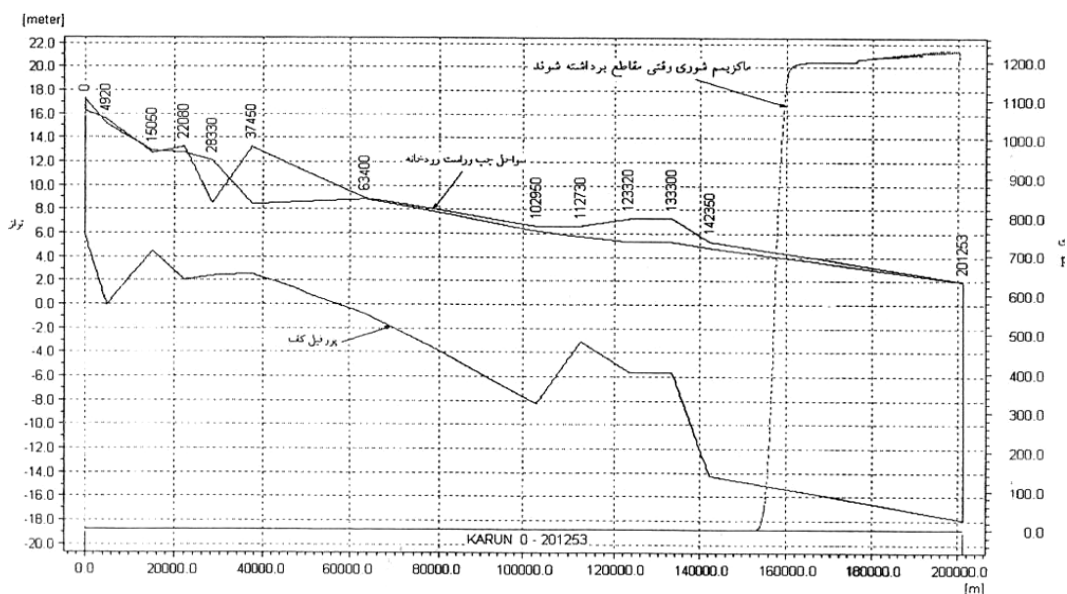
شکل ۷- نفوذ شوری در دبی  $50 \text{ m}^3/\text{hr}$



شکل ۸- نفوذ شوری در دبی  $200 \text{ m}^3/\text{hr}$



شکل ۹- نفوذ شوری در دبی  $1000 \text{ m}^3/\text{hr}$



شکل ۱۰- نفوذ شوری زمانی که مقاطع برداشته شوند (در دبی  $1000 \text{ m}^3/\text{hr}$ )

مقایسه مقادیر واقعی شوری با مقادیر محاسبه توسط نرم افزار

در محدوده نفوذ شوری توسط نرم افزار دو ایستگاه وجود دارد که اطلاعات کیفیت در آنها اندازه گیری می شود.

ایستگاه اندازه گیری دارخوین در ۱۵۰ کیلومتری اهواز

نتایج مدل نشان می دهد در ایستگاه اندازه گیری دارخوین تاثیر شوری حاصل از جزر و مد وجود ندارد، همچنین در آمار واقعی شوری در ایستگاه اندازه گیری دارخوین بندرت اثری از شوری حاصل از جزر و مد دیده می شود فقط شوری پایه رودخانه یعنی حدود ۵-۲ میلی اکی والان گرم بر لیتر (حدود ۳۰۰-۱۲۰ psu) وجود دارد. بنابراین آمار واقعی با نتایج مدل مطابقت دارد.

ایستگاه اندازه‌گیری سلیمانیه در ۱۸۰ کیلومتری اهواز

- برای دبی  $1000 \frac{m^3}{hr}$

در دبی  $1000 \frac{m^3}{hr}$  هم در نتایج مدل و هم در اندازه‌گیری‌های واقعی، نفوذ شوری در اثر جریان جزر و مد ضعیف است.

- برای دبی  $200 \frac{m^3}{hr}$

ماکزیمم شوری گزارش گردیده در آمار اندازه‌گیری شده ۱۶ میلی اکری والان گرم بر لیتر (۹۶۰ psu) در تاریخ ۷۵/۱۲/۱۲ می‌باشد، که دبی رودخانه کارون دقیقاً در همین تاریخ  $200 \frac{m^3}{hr}$  بوده است (همان دبی run شده در مدل) و شوری حاصل از نرم افزار ۸۸۰ psu می‌باشد که تطابق قابل قبولی با نتایج واقعی اندازه‌گیری شده دارد.

- برای دبی  $50 \frac{m^3}{hr}$

برای این دبی آنالیزی وجود ندارد و این دبی فقط برای کاهش ورودی‌های آب در آینده run شده است.

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصله نشان می‌دهد که مطابق تئوری‌های بیان شده میزان نفوذ شوری به سه عامل زیر بستگی دارد:

- شوری اولیه

- دبی ورودی آب رودخانه

- پروفیل و شیب رودخانه

به ویژه مشاهده شد پروفیل‌های شوری کاهش مشخصی را در مقاطعی که عمق رودخانه کم است نشان می‌دهد. یعنی در این مقاطع برآمدگی‌های کف رودخانه به عنوان سدی در مقابل نفوذ شوری عمل می‌نمایند. کاهش ورودی‌های آب و پروفیل کف رودخانه تاثیر قابل توجهی روی میزان نفوذ شوری می‌گذارد. لذا کاملاً ضروری است که جهت جلوگیری از افزایش پیشرفت شوری، ورودی‌های آب رودخانه و طرح‌های لایروبی دقیقاً مورد بررسی قرار گیرند اگر کاهش دبی آب رودخانه طبق برنامه‌های توسعه با همین روند ادامه یابد خطر شوری بخش‌های قابل توجهی از اراضی اطراف بویژه زمین‌های کشاورزی منطقه را تهدید می‌کند که علاوه بر تاثیر بر چشم‌اندازهای طبیعی منطقه و ایجاد مشکلات زیست‌محیطی، می‌تواند مشکلات معیشتی جمعیت موجود را که پس از جنگ بشدت افزایش یافته است به معضلات منطقه‌ای بزرگی تبدیل کند.<sup>(۸)</sup>

بنابراین با استناد به موارد فوق ضروری است جهت جلوگیری از افزایش روند شوری:

۱- دبی پایه حداقل  $200 \frac{m^3}{hr}$  جهت رودخانه حفظ شود، و در صورت استفاده از آب رودخانه جهت طرح‌های

توسعه بجای زهکش کردن آب‌ها آنها را تصفیه و به رودخانه بازگرداند.

۲- در صورت لایروبی، عمق لایروبی دقیقاً مورد بررسی قرار گیرد.

۳- احداث سدهای کوتاه یا موانع در کف رودخانه می‌تواند راه‌حل مناسبی برای پیشروی شوری باشد و در صورتی که کشتیرانی در رودخانه مد نظر باشد از بند کشتیرانی بدین منظور استفاده شود.

### References:

1. Abraham, C., *Reference Notes on Density Currents and Transport Processes*, International Course on Hydraulic Engineering Delft (1983).
2. Litrico, X., and Fromion, V., *Advanced River Engineering*, saint venant Equation, April 14 (2003).
3. Cameron, W.M., and Pritchard, D.W., *Estuaries, Chapter of the Sea*, (ed.M.N.Hill), John Wiley, NewYork (1963).
4. Chow, Ven.te., *Open Channel Hydraulics*, MC-Graw Book company Inc., New York (1995).
5. Chung, J.A., Holly, F.M., J.R., and verwey, A., *practical Aspects of computational River Hydraulics*, Pitman, London (1980).
6. Dyer, KR, *Estuaries, a physical introduction*, John Wiley, New York (1973).
7. Fischer, H.B., *Mixing and dispersion in estuaries*, *Annual Review of Fluid Mechanics*, **8**, 107, (1976).
8. Gholizadeh, M.B, *Water Resources Series*, **39**, 177 (1969).
9. HarlemaN, D.R.F., and Abraham, C., *one-Dimensional Analysis of Salinity Intrusion in the Rotterdam Water Way*, delft Hydraulics Laboratory publication (1966).
10. Ippen, *Estuary and coastline Hydrodynamics*, McGraw Hill, New York (1966).
11. Ippen, A.T., and Harleman, D.R.F.I., *One Dimensional Analysis of Salinity Intrusion in Estuaries*, Technical bulletin, **5**, Committee on Tidal Hydraulics, Water ways Experiment station, Vicksbuity, Mississippi (1961).
12. Lupacheiv, Yu.V., *The Peculiarities of Penetration of Saltwater into the Tidal River Mouth (on the Example of the Mouth of the North Dvina)*, Proceedings of the state oceanographic Institute, Russia (1976).
13. Lupachiev, Yu.V., and makarta, T.A., *The Penetration of Seawaters into the Delta Branches of the North Dvina and its Possible Variation D*, Proceedings of the state oceanographic Institute, Russia (1984).
14. MC Dowell, D.M., and O Connor, B.A, *Hydraulic Behavior of Estuaries*, MacMillan press, New York (1977).
15. Orlob, G.T, *Impact of Upstream Storage and Diversions on Salinity Balance in EstuarIE in M.*, Wiley(ed.), *Estuarine Processes*, **II**, 3, Academic Press, New York (1976).
16. Prandle, D., *Oceanography*, **11**, 1311 (1981).
17. Ranga Raju, K.G., *Flow Through open channels*, Tata McGraw Hill, NewYork (1983).
18. Rigter, B.P., *Hydr. Div. of ASCE*, **I**(99), 1475 (1973).
19. Sriptunov, N.A., and Lupachiev, Yu.V., *Processes of the Penetration of the Brackish Waters from the Sea into Non-Tidal river Mouths*, Proceedings of the state oceanographic In statute, Russia (1982).
20. Subramany, A.K., *Flow in Open Channels*, MC craw-Hill Book Company, New Delhi (1982).
21. UNESCO, Editor: H., van dertuin, *Guidelines on the Study of Seawater Intrusion into Rivers*, Prepared For International Hydrological programmed by the working Group of Project 4.4b (IHP-III) (1991).
22. Danish Hydraulic Institute, *DHI, MIKE 11 Reference manual* (2003).