تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۹/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۲/۱۱

نشریه شیلات، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۶۶، شماره ٤، زمستان ۱۳۹۲

مدل‌سازی هیدرودینامیکی و شوری خلیج گرگان به منظور استخراج فاصلهٔ اطمینان بین مزارع پرورش ماهی تحت بار آلودگی لحظه‌ای

❖ **آمنه یاری نسب***: دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش محیط زیست، دانشکدهٔ مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
❖ **حمید طاهری شهر آئینی:** استادیار دانشکدهٔ مهندسی عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود
❖ **حسن محمدخانی:** عضو هیئت علمی مؤسسهٔ تحقیقات علوم شیلاتی ایران
❖ **طاهر پورصوفی:** کارشناس ارشد مرکز تحقیقات ذخایر آبزیان گرگان
❖ **بهروز منصوری:** کارشناس ارشد مرکز تحقیقات ذخایر آبزیان گرگان

چکیده

از مسائل مهم در آبزی‌پروری تعیین فاصلهٔ اطمینان بین مزارع پرورش ماهی در شرایط اعمال آلودگی مختلف است؛ یکی از این شرایط اعمال بار آلودگی لحظه‌ای است. در چنین شرایطی باید یک فاصلهٔ اطمینان بین مزارع پرورش ماهی در هر پهنهٔ آبی در نظر گرفت، به نحوی که آلودگی لحظه‌ای وارده به یک مزرعه به مزارع دیگر نرسد. خلیج گرگان یکی از مهم‌ترین منابع آبی همچنین، از مهم‌ترین تأمین‌کننده‌های ماهی کشور است. هدف از این تحقیق تعیین فاصلهٔ اطمینان بین مزارع پرورش ماهی در خلیج گرگان است. در این تحقیق مدل‌سازی هیدرودینامیکی و شوری خلیج به صورت دوبعدی در محیط نرم‌افزار MIKE21 انجام شد. شوری در ۱۹ ایستگاه مختلف طی ۵ ماه (تیر تا آبان ۱۳۹۰) اندازه‌گیری شد و با استفاده از این داده‌ها مدل‌های شوری و هیدرودینامیک با دقت مطلوبی کالیبره و صحت‌سنجی شدند و مقدار ضریب مانینگ و ضریب پخش رودخانه به ترتیب برابر ۰/۰۲۵ متر بر ثانیه و ۵۰ متر مربع بر ثانیه محاسبه شدند. سپس، با اعمال منبع آلودگی پایدار (شوری) به صورت نقطه‌ای در ۶ نقطهٔ مختلف از خلیج، مدل شوری اجرا شد و با استفاده از خروجی‌های مدل میزان پیک غلظت در فواصل مختلف از منبع آلودگی محاسبه و با غلظت اولیهٔ ناشی از بار لحظه‌ای مقایسه شد. نتایج نشان داد که ۹۹/۹ درصد آلودگی تا فاصلهٔ ۱۰۰ متری از منبع آلودگی لحظه‌ای با فرآیند ترقیق کم شده است؛ بنابراین فاصلهٔ اطمینان بین مزارع پرورش ماهی در خلیج گرگان ۱۰۰m است.

واژگان کلیدی: بار آلودگی لحظه‌ای، خلیج گرگان، فاصلهٔ اطمینان، مزارع پرورش ماهی، مدل‌سازی هیدرودینامیکی، مدل‌سازی شوری.

* نویسندهٔ مسئول: تلفن: ۰۹۱۷۵۴۱۰۴۲۹ Email: ayarinasab@yahoo.com.

۱. مقدمه

یکی از مسائل مهمی که در پرورش ماهی در پهنه‌های آبی مطرح است، تعیین فاصلهٔ اطمینان لازم بین مزرعه‌های پرورش ماهی تحت بار آلودگی لحظه‌ای است. این فاصلهٔ اطمینان بدین معنی است که چنانچه یک بار آلودگی لحظه‌ای در یک مزرعهٔ پرورش ماهی اعمال شود، حداقل فاصلهٔ مزرعهٔ بعدی از مزرعهٔ آلوده چقدر باشد که از آلودگی مزرعهٔ آلوده متأثر نشود. برای مثال، چنانچه یک مزرعهٔ پرورش ماهی از غذایی برای ماهی‌ها استفاده کند که آلوده باشد یا ظرف بنزینی در مزرعهٔ پرورش ناگهان واژگون شود چنانچه مزارع پرورش ماهی به هم چسبیده باشند، این آلودگی می‌تواند باعث بیماری ماهیان مزرعهٔ کناری نیز شود؛ به همین علت، باید یک فاصلهٔ اطمینان بین مزارع پرورش ماهی در هر پهنهٔ آبی در نظر گرفت، به نحوی که آلودگی لحظه‌ای وارده به یک مزرعه به مزارع دیگر نرسد. این فاصلهٔ اطمینان به سرعت جریان آب و ضریب پخش پهنهٔ آبی وابسته است. سرعت جریان آب از طریق مدل‌سازی هیدرودینامیک دوبعدی پهنهٔ آبی تخمین‌زدنی است و یکی از روش‌های مناسب تخمین ضریب پخش پهنهٔ آبی استفاده از مدل‌سازی شوری است. تاکنون مطالعات زیادی دربارهٔ مدل‌سازی هیدرودینامیکی و شوری در پهنه‌های آبی انجام شده است؛ همچنین، در مطالعات مختلفی از نرم‌افزار MIKE21 به منظور مدل‌سازی هیدرودینامیکی و شوری استفاده شده است.

بیگی برای شبیه‌سازی تأثیرات کمّی-کیفی طرح‌های توسعهٔ کشاورزی بر رودخانهٔ کارون بازهٔ اهواز-دارخوین از مدل MIKE11 استفاده کرد. قبل از کاربرد MIKE11 برای شبیه‌سازی، مدل برای شرایط رودخانه واسنجی و کنترل شد و ضرایب مانینگ و پخشیدگی رودخانه در این بازه تعیین شدند؛ سپس، برای تعیین TDS رودخانه در گزینه‌های مختلف بهره‌برداری از طرح‌های توسعه، در ماه مرداد (ماه پیک مصرف)، که همچنین یکی از ماه‌های کم‌آب رودخانه است، شبیه‌سازی صورت گرفت (Beygi, 2000).

در تحقیقی، جریان‌های ناشی از جزر و مد و امواج را در خلیج هارکی نیوزیلند به کمک مدول هیدرودینامیکی MIKE 21 شبیه‌سازی کردند. در این تحقیق از الگوی باد منطقه (گلباد) استفاده شد. بر اساس نتایج، سرعت جریان حدود ۳۰ $\frac{cm}{s}$ محاسبه شد (Christian and Coney, 2001).

مندنز و همکارانش مقدار مواد مغذی موجود در آب رودخانهٔ دللاپلاتا واقع در حد فاصل دو کشور آرژانتین و اروگوئه را با استفاده از مدل هیدرودینامیکی دوبعدی HYDROBIDII و مدل دو عدی کیفیت آب WASP بررسی کردند. واسنجی مدل WASP با هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری‌شده در رودخانه انجام گرفت. بر طبق آنالیزهای هیدرودینامیکی در رودخانه، یک تقسیم‌بندی دوبعدی برای ارزیابی میزان انتقال آلودگی و حرکت آلودگی در هر بخش انجام شد (Menéndez *et al.*, 2001).

در تحقیقی دیگر، با به‌دست‌آوردن توپوگرافی سطح آب و مدل‌کردن آن با مدول‌های هیدرودینامیکی و امواج مدل عددی MIKE 21، مورفولوژی ساحلی در خلیج تیگنموت انگلستان بررسی و نتایج مطالعات با تصاویر سنجش از دور مقایسه شد (Davidson and Huntley, 2002).

فرامرز با استفاده از روش عددی همچنین، مدل MIKE11 انتقال آلودگی را به صورت زمانی و مکانی در رودخانه‌های با مقاطع مرکب بررسی کرد. در مدل

عددی، معادلهٔ یک‌بعدی انتقال- انتشار آلودگی با روش تفاضل محدود منقطع شد. سپس، از طریق روش‌های ضمنی غلظت مواد آلوده‌کننده به صورت مکانی و زمانی به دست آمد. در این تحقیق نخست، با استفاده از روش دوبعدی شیونو-نایت پارامترهای هیدرولیکی جریان و توزیع عرضی سرعت برای مقطع فرضی آکرز به دست آمد. سپس، با به‌کارگیری این پارامترها مقدار ضریب انتشار طولی با استفاده از روابط موجود تعیین شد. نتایج مدل تهیه‌شده با نتایج روش تحلیلی حل معادلهٔ انتقال- انتشار برای شرایط مرزی و اولیهٔ معین همچنین، با مدل MIKE مقایسه شد (Faramarz, 2004).

در تحقیقی با استفاده از مدول هیدرودینامیکی نرم‌افزار MIKE21، به شبیه‌سازی جریان‌های جزر و مدی در خلیج کاچه واقع در جنوب غربی هندوستان پرداختند. نتایج واسنجی مدل نشان داد که ضریب اصطکاک باد برابر با ۰/۰۰۲۶، عدد مانینگ $\frac{\mathrm{m}^{1/3}}{\mathrm{s}}$ ۳۸ و لزجت چرخشی[1] $۰/۵\frac{m^2}{s}$ است (Babu *et al.*, 2005).

در تحقیقی مدل دوبعدی هیدرودینامیکی MIKE21 و معادله‌های واکنش-انتقال پارامترهای کربن، نیتروژن، اکسیژن و سیلیس را به کار بردند و در امتداد رودخانه- خور- دریا وضعیت هیدرودینامیک جریان و پارامترهای کیفی را بررسی کردند. قسمت مورد مطالعه تحت تأثیر فعالیت‌های انسان قرار داشته که فاضلاب اولیه و ثانویه به این بخش وارد شده است. از طرفی توانسته‌اند به کمک مدل‌سازی راهکاری را به کار برند که مقدار نیتروژن ورودی را بیش از ۵۵ درصد کاهش دهند (Vanderborght *et al.*, 2006).

Ani و همکارانش از دو مدل ریاضی برای نحوهٔ پخش و جابه‌جایی آلاینده استفاده کردند. این مدل‌ها روی رودخانهٔ Burn واقع در کشور انگلستان کالیبره و صحت‌سنجی شدند؛ ضریب هم‌بستگی برای دو منطقه از رودخانه بیش از ۰/۹۰ محاسبه شد در صورتی که برای دو منطقهٔ دیگر این مقدار بین دو عدد ۰/۵ و ۰/۶ به دست آمد (Ani *et al.*, 2009).

زرگر و صالحی نیشابوری مدل‌های MIKE11 و SMS در شبیه‌سازی پخش و انتقال غلظت در رودخانه‌ها را مقایسه کردند. در این تحقیق مدل عددی یک‌بعدی MIKE11 با مدل‌های دوبعدی RMA2 و RMA4 نرم‌افزار SMS برای پخش و انتشار غلظت مادهٔ ردیاب در رودخانهٔ اتاباسکای کانادا مقایسه و مشاهده شد که استفاده از مدل‌های یک‌بعدی به جای مدل‌های دوبعدی برای شبیه‌سازی تفاوت چندانی در میزان پیک غلظت متوسط عبور از آن مقاطع ایجاد نمی‌کند، اما به علت فرضیات مورد استفاده در مدل یک بعدی نمی‌توان میزان غلظت را در هر نقطهٔ رودخانه تعیین کرد و از لحاظ زمانی نیز نمی‌توان برآوردی دقیق از زمان گذر ابر آلودگی از هر نقطهٔ رودخانه به دست آورد (Zargar and Salehi neyshabouri, 2010).

خلیج گرگان یکی از مهم‌ترین منابع آبی کشور و از منابع بزرگ تأمین‌کنندهٔ ماهی در کشور است؛ خلیج از لحاظ غذایی و اقتصادی از اهمیت بسیاری برخوردار است. تحقیقات انجام‌شده در خلیج گرگان حاکی از آن است که این پهنهٔ آبی مکان مناسبی برای پرورش آبزیان مختلف است (Javani, 2012). با بررسی مطالعات انجام‌شده می‌توان قضاوت کرد که تاکنون شرایط هیدرودینامیکی و شوری در خلیج گرگان مدل‌سازی نشده است؛ بنابراین، پر واضح است که تخمین فاصلهٔ اطمینان بین مزارع پرورش ماهی که لازمهٔ آن مدل‌سازی هیدرودینامیکی و شوری است در این خلیج انجام نشده است.

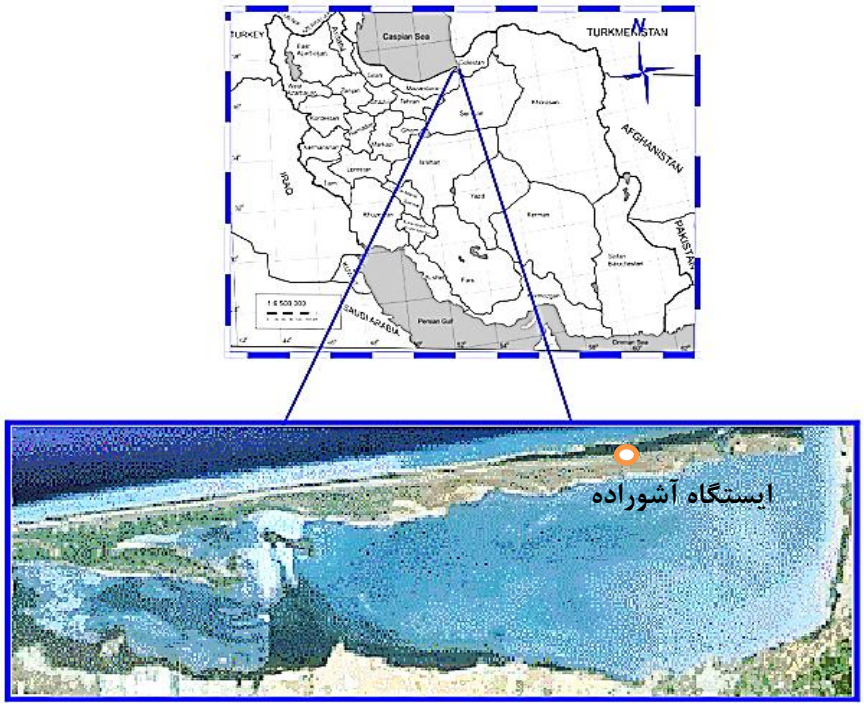
1-Eddy Viscosity

بنابراین، هدف از این مطالعه مدل‌سازی هیدرودینامیکی و شوری دوبعدی در خلیج گرگان و محاسبهٔ فاصلهٔ اطمینان بین مزارع پرورش ماهی در این خلیج است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. منطقهٔ مطالعاتی

خلیج گرگان با وسعتی حدود ۴۵۰ کیلومتر مربع، در جنوب شرقی دریای خزر واقع شده است و بزرگ‌ترین خلیج کرانهٔ خزر به شمار می‌آید که یگانه مرز باز این خلیج مرز آشوراده در قسمت شمال شرقی خلیج است که خلیج را به دریای خزر متصل می‌کند. طول متوسط منطقه در حدود ۴۰ کیلومتر و عرض متوسط آن در حدود ۱۰ کیلومتر است. مختصات جغرافیایی خلیج از ′۲۵ °۵۳ تا ′۰۲ °۵۴ شرقی و از ′۴۶ °۳۶ تا ′۵۴ °۳۶ شمالی است. بخشی از این خلیج در استان گلستان و بخش دیگر آن در استان مازندران واقع شده است. ایستگاه آشوراده یگانه ایستگاه ترازسنجی این خلیج است که در آن، با استفاده از ترازسنج دیجیتالی، تراز آب هر ۶۰ دقیقه یک بار برداشت می‌شود. در شکل ۱ منطقهٔ مورد مطالعه همچنین، موقعیت ایستگاه ترازسنجی آشوراده نشان داده شده است.



شکل ۱. منطقهٔ مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه ترازسنجی آشوراده

۲.۲. معادلات حاکم در نرم‌افزار MIKE21

MIKE21 یک مدل دوبعدی (طولی و عرضی) است که مؤسسهٔ هیدرولیکی دانمارک (DHI)، که یکی از مهم‌ترین و مطرح‌ترین مؤسسات تحقیقاتی دنیا در زمینهٔ کارهای هیدرودینامیکی است، آن را توسعه داده است.

این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سازی هیدرودینامیکی به صورت موج سینماتیکی، پخشنده و کاملاً دینامیکی را دارد. در این مدل فرض می‌شود که در

بعد قائم تغییرات وجود ندارد؛ به همین علت، برای خلیج گرگان که میزان عمق آب نسبت به سطح آن بسیار کوچک است، این فرض معقول و مناسب به نظر می‌رسد. از طرفی از قابلیت‌های ویژهٔ معرفی‌شده برای نرم‌افزار MIKE21 می‌توان به قابلیت مدل‌سازی شوری در خلیج‌ها و خورها یا مدل‌سازی فرآیند Transport (TM) اشاره کرد. چنانچه مدل هیدرودینامیکی با MIKE21 ایجاد شود، به‌سادگی می‌توان از مدل هیدرودینامیکی ساخته‌شده در مدل‌سازی شوری استفاده کرد.

مدل هیدرودینامیک MIKE21 بر اساس روش گسسته‌سازی به روش تفاضل محدود برای معادلات پیوستگی، اندازهٔ حرکت و مدل شوری بر اساس معادلهٔ انتقال و پخش کار می‌کند.

بنابراین، در این مطالعه، با توجه به قابلیت‌های مدل MIKE21، از این مدل برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک و شوری همچنین، محاسبهٔ فاصلهٔ اطمینان بین مزارع پرورش ماهی استفاده شده است.

معادلات حاکم در مدل هیدرودینامیک و شوری در جدول ۱ ارائه شده است. پارامترهای مورد استفاده در روابط هیدرودینامیک و شوری در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۱. معادلات هیدرودینامیکی و شوری حاکم بر مدل MIKE21

معادله	فرمول
پیوستگی	$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial q}{\partial y}=\frac{\partial d}{\partial t}$
اندازهٔ حرکت در جهت x	$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{pq}{h}\right)+gh\frac{\partial \text{EBBED Equation.3}}{\partial x}+gp\sqrt{\frac{p^2+q^2}{c^2h^2}}-\left[E_x\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+E_y\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}\right]-\Omega q=0$
اندازهٔ حرکت در جهت y	$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{p^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{pq}{h}\right)+gh\frac{\partial \text{EBBED Equation.3}}{\partial y}+gp\sqrt{\frac{p^2+q^2}{c^2h^2}}-\left[E_x\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}+E_y\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}\right]-\Omega q=0$
انتقال و پخش	$\frac{\partial}{\partial t}(hc)+\frac{\partial}{\partial x}(uhc)+\frac{\partial}{\partial y}(vhc)-\frac{\partial}{\partial x}\left(h.Dx\ \frac{\partial c}{\partial x}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(h.Dy\frac{\partial c}{\partial y}\right)-Qs(cs-c)-S_c=0$

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده در معادلات حاکم در مدل MIKE21

تعریف پارامتر	علامت پارامتر	تعریف پارامتر	علامت پارامتر
عمق آب	h	ضریب نفوذ در جهت	Dx
ارتفاع سطح آب	$\zeta(x,y,t)$	ضریب نفوذ در جهت	Dy
تغییرات زمانی عمق آب	$d(x,y,t)$	منبع آلودگی	S_c
سرعت در جهتy	v	ضریب ویسکوزیته	E
سرعت در جهت x	u	ضریب شزی	C
چگالی‌های شار در جهت‌های x و y	$p,q(x,y,t)$	پارامتر کوریولیس	Ω
زمان	t	ثابت گرانشی	g

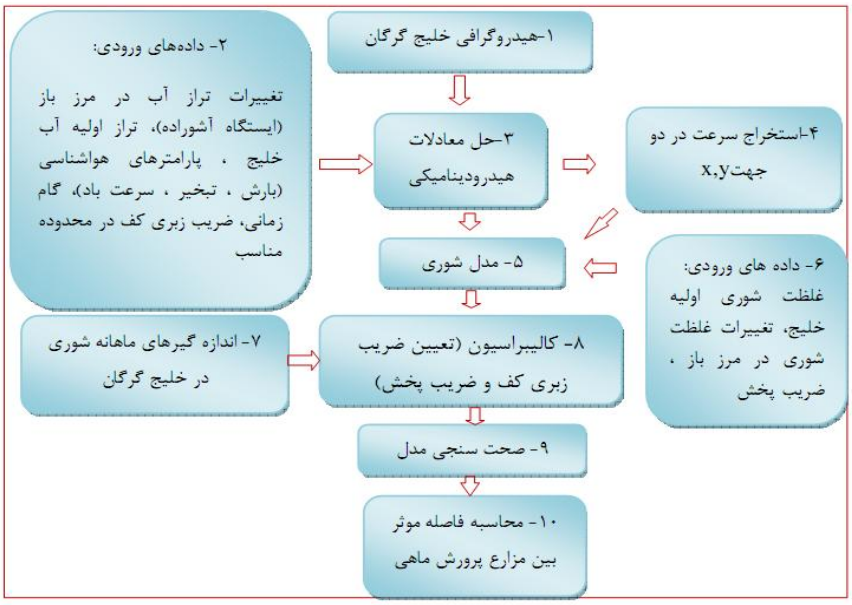
۳.۲. الگوریتم تحقیق

با توجه به در دسترس‌بودن کل اطلاعات مورد نیاز مدل‌سازی برای یک دورهٔ ۵ ماهه (تیر تا آبان ۱۳۹۰)، این بازهٔ ۵ ماهه به منظور انجام‌دادن مدل‌سازی‌ها در نظر گرفته شد. الگوریتم تحقیق در شکل ۲ آورده شده است. در ادامه، مراحل نمایش داده‌شده در شکل ۲ به اختصار تشریح می‌شود.

۱. برای دست‌یابی به اطلاعات مرز آب، داغاب و عمق آب خلیج گرگان، به منظور انجام‌دادن مدل‌سازی، به عملیات هیدروگرافی و نقشه‌برداری میدانی در منطقهٔ مطالعاتی اقدام شد که کامل‌ترین اطلاعات موجود در این زمینه است. برداشت نقاط مرز آب و داغاب با دو دوربین نیوو و توتال استیشن و یک دستگاه GPS دستی صورت گرفت؛ سطح مبنای استفاده‌شده برای تمامی نقاط برداشت‌شده در عملیات نقشه‌برداری زمینی و هیدروگرافی، BM ترازیابی دقیق سازمان نقشه‌برداری است که تراز مبنای آن برابر ۲۳/۳۲۶- متر از سطح دریاهای آزاد است (Yarinasab, 2012).

۲. اطلاعات و داده‌های ورودی مدل شامل موارد زیر است:

- تغییرات زمانی تراز آب مرز باز خلیج گرگان در ۵ ماه از سال ۱۳۹۰ (تیر تا آبان) که با ترازسنج دیجیتالی ایستگاه آشوراده هر ۶۰ دقیقه برداشت می‌شود؛
- تغییرات زمانی باد به صورت ۶ ساعته از ایستگاه سینوپتیک بندر ترکمن به علت نزدیک‌بودن به خلیج برداشت شد؛
- تغییرات زمانی بارش مؤثر (تفاضل بارندگی و تبخیر) به صورت متوسط روزانه از اطلاعات ایستگاه تبخیر و باران‌سنجی مجاور دریاچه برداشت شد؛
- در این مطالعه از اثر موج در ایجاد جریان صرف‌نظر شده است (اختلاف تراز آب در خلیج ناچیز است)؛
- گام زمانی اجرای مدل ۳۶۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد که متناسب با عدد کورانت ۰/۸ است.

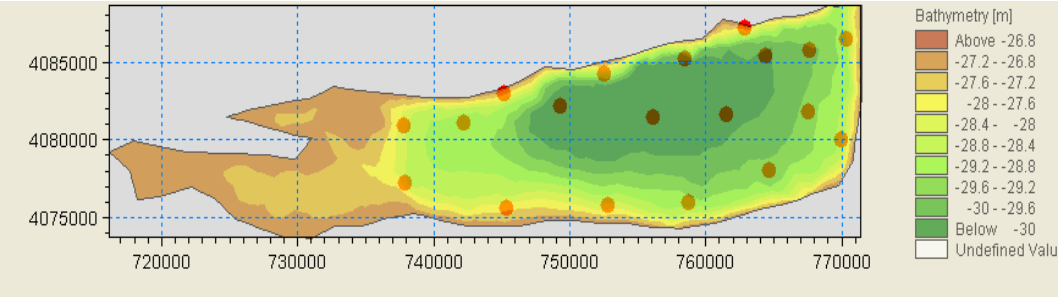


شکل ۲. الگوریتم تحقیق

۳ و ۴. پس از ایجاد فایل اطلاعات ورودی و واردکردن آنها به مدل هیدرودینامیکی به همراه یک ضریب مانینگ، سرعت جریان آب در دو جهت x,y استخراج شد.

۵ و ۶. مدل هیدرودینامیکی پایهٔ مدل شوری است؛ بنابراین، مدل هیدرودینامیکی به همراه یک ضریب مانینگ به‌منزلهٔ حدس اولیه به مدل شوری معرفی می‌شود. در این مرحله فایل پارامترهای شوری ایجاد می‌شود. مهم‌ترین بخش‌هایی که باید در این مرحله معرفی شوند: شرایط اولیهٔ شوری، شرایط مرزی شوری، نرخ تجزیه و مقادیر ضریب پخش است. باید این مقادیر به نرم‌افزار معرفی شوند. چون شوری ماده‌ای پایدار است، نرخ تجزیه صفر در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق مقدار شوری در لحظهٔ آغاز مدل‌سازی به‌منزلهٔ شرایط اولیهٔ شوری برابر psu ۱۰/۴۵ و شرایط مرزی شوری که شامل اطلاعات شوری ماهانهٔ ایستگاه آشوراده (مرز باز) در محدودهٔ زمانی تیر- آبان ۱۳۹۰ است به مدل معرفی شده است.

۷. برای عملیات کالیبراسیون و صحت‌سنجی به یک سری مقادیر واقعی از پارامتر شوری در مدت مدل‌سازی نیاز است که این اطلاعات از اندازه‌گیری ماهانهٔ پارامتر شوری در ۱۹ ایستگاه مختلف درون خلیج گرگان حاصل شده است. در شکل ۳ موقعیت مکانی ۱۹ ایستگاه درون خلیج نشان داده شده است.

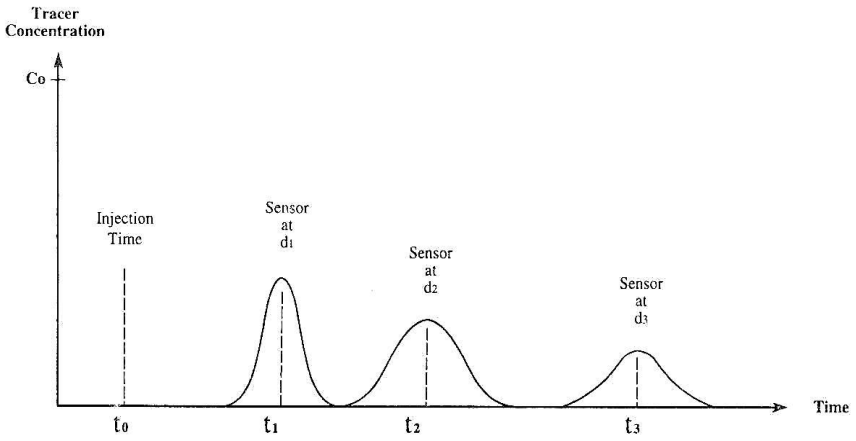


شکل ۳. موقعیت مکانی ۱۹ ایستگاه اندازه‌گیری شوری در خلیج گرگان

۸ . در این مرحله باید عملیات کالیبراسیون مدل هیدرودینامیکی و شوری انجام شود و مقدار بهینهٔ ضریب مانینگ و ضریب پخش برای خلیج گرگان تعیین شود. طی عملیات کالیبراسیون، مدل‌سازی هیدرودینامیکی و شوری به ازای مقادیر مختلف ضریب مانینگ در محدودهٔ ۰/۰۲ – ۰/۰۲۵ و ضریب پخش در محدودهٔ ۱۰۰–۳۰ تکرار شد (DHI, 2007)؛ سپس، نتایج مدل‌سازی (سرعت آب و غلظت شوری) با مقادیر ضریب مانینگ و ضریب پخش در ۱۹ ایستگاه مختلف درون خلیج گرگان تعیین می‌شود. برای عملیات کالیبراسیون از اطلاعات شوری ۱۹ ایستگاه خلیج در ۳ ماه از سال ۱۳۹۰ (تیر تا شهریور) استفاده شد.

۹. در این مرحله بعد از کالیبره‌کردن مدل هیدرودینامیکی و شوری، به صحت‌سنجی مدل‌ها اقدام می‌شود. برای صحت‌سنجی از اطلاعات شوری ۱۹ ایستگاه در ۲ ماه از سال ۱۳۹۰ (مهر و آبان) استفاده شد. پس از صحت‌سنجی مدل‌ها، مقادیر بهینهٔ ضریب مانینگ و ضریب پخش خلیج گرگان تعیین می‌شود.

۱۰. در این مرحله بـه منظـور محاسـبهٔ فاصـلهٔ اطمینان بین مزرعه‌های مختلف پرورش ماهی بدترین سناریو برای آلودگی در نظر گرفته شد. بدین ترتیـب که آلودگی مورد نظر همانند شـوری تجزیـه‌ناپـذیر و ماده‌ای پایدار باشد؛ در چنین شرایطی می‌توان از مدل شوری برای بررسی رفتار آلایندهٔ مـورد نظـر اسـتفاده کـرد. بنـابراین، در ۶ نقطـه از خلـیج منبـع نقطـه‌ای آلودگی لحظه‌ای قرار داده شد و اطلاعات ایـن منـابع آلودگی نقطه‌ای به مدل شـوری اعمـال سـپس، مـدل اجرا شد. زمانی که یک بار لحظه‌ای بـه یـک سیسـتم اعمال شود، همان طور که در شکل ۴ در حالت تـک بعدی نشان داده شده است، آلودگی بـا فرآینـد پهـن رفت-پخشیدگی، در آب جابه‌جا و پخش می‌شـود و مثلاً در زمان t_1 به پیک آلودگی به نقطهٔ x_1 می‌رسـد و هر چه زمان می‌گذرد، پلوم آلودگی به نقاط دورتـری می‌رسد و پیک آلودگی نیز بـه سـبب فرآینـد پخـش کاهش می‌یابد (شکل ۴). اکنون متوسط پیک غلظـت در فواصل مختلف از منبع آلودگی محاسبه مـی‌شـود. سپس، با درنظرگرفتن مقـدار ۱۰۰ بـرای نقطـهٔ منبـع آلودگی و محاسبهٔ غلظت در فواصل مختلـف نسـبت به منبع، درصد آلودگی در فواصل مختلف نسـبت بـه منبع محاسبه می‌شـود. در نهایـت، فاصـله‌ای از منبـع آلودگی کـه غلظـت آلـودگی در آن بـه ۹۹/۹ درصـد کاهش می‌یابد، به‌منزلـهٔ فاصـلهٔ اطمینـان بـین مـزارع تعیین می‌شود.



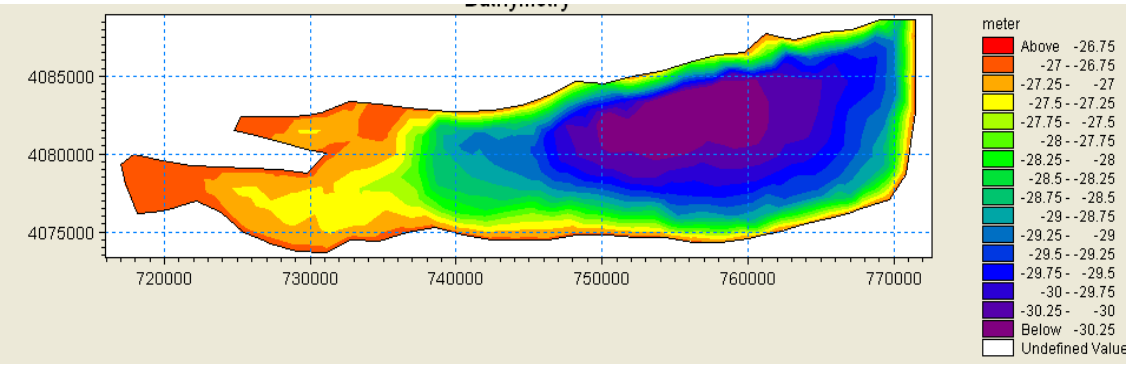
شکل ۴. نحوهٔ جابه‌جایی و پخش یک بار آلودگی لحظه‌ای در آب به صورت تک‌بعدی

۳. نتایج

در نتیجهٔ عملیات هیدروگرافی و نقشه‌برداری زمینـی مـرز آب و داغـاب خلـیج گرگـان بـا اسـتفاده از نرم‌افزارهای MATLAB، ILWIS و Google Earth بـه دست آمد. در ادامه با درون‌یابی داده‌های هیدروگرافی در محیط نرم‌افزار ILWIS و واردکـردن اطلاعـات بـه محیط نرم‌افـزار MATLAB نقـاط کـف بسـتر خلـیج گرگان به صورت فایلی از طول و عرض جغرافیـایی و عمق استخراج شد که در شکل ۵ ارائه شـده اسـت (Yarinasab, 2012).

مدل‌سازی با مقادیر مختلف ضریب مانینـگ و ضریب پخش انجام شد و در نهایت، با درنظرگـرفتن معیارهای ارزیابی مختلـف (میـانگین اریبـی (MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE))، مقادیر بهینهٔ ضریب مانینگ و ضریب پخش در مرحلهٔ کالیبراسیون به ترتیب برابر با ۰/۰۲۵

و ۵۰ محاسبه شد. در جدول ۳ مقادیر معیارهای ارزیابی مختلف در شرایط بهینه ارائه شده است. در شکل‌های ۵ تا ۷ مقادیر شوری حاصل از مدل با مقادیر شوری برداشت‌شده از خلیج در سه ماه کالیبراسیون مقایسه شده است. با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۳ و شکل‌های ۵ تا ۷، به راحتی می‌توان قضاوت کرد که کالیبراسیون مدل به نحو مطلوبی انجام شده است.

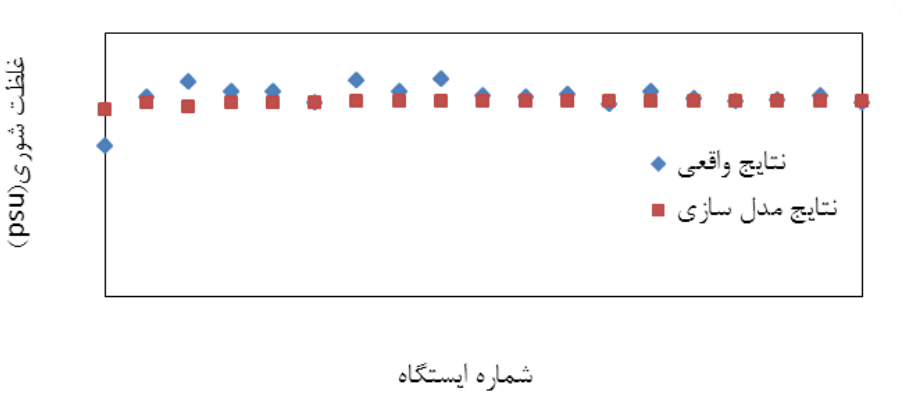


شکل ۵. اطلاعات مرز آب و تراز کف خلیج گرگان در محیط MIKE 21.

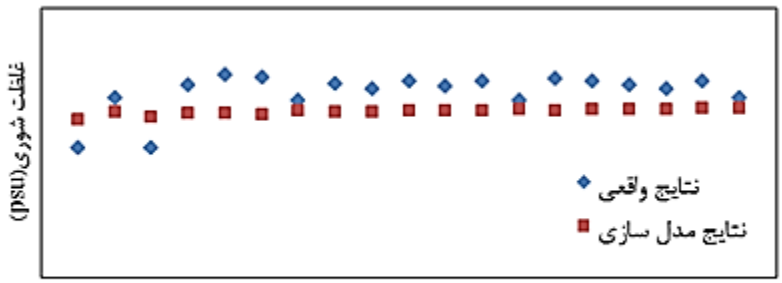
پس از کالیبره‌شدن مدل، اقدام به صحت‌سنجی مدل شد. نتایج مربوط به صحت‌سنجی در ۲ ماه (مهر و آبان) در جدول ۴ و شکل‌های ۸ تا ۹ ارائه شده است. نتایج مناسب مرحلهٔ صحت‌سنجی تأیید می‌کند که مقادیر بهینهٔ ضریب مانینگ و ضریب پخش خلیج به ترتیب برابر با ۰/۰۲۵ و ۵۰ است.

جدول ۳. مقادیر معیارهای ارزیابی مختلف در مرحلهٔ کالیبراسیون

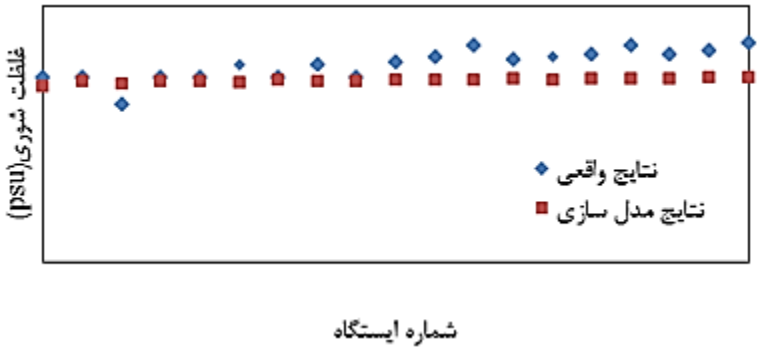
پارامتر	RMSE	MAE	MBE
n=۰/۰۲۵ , D=۵۰	۰/۵۱۷	۰/۳۲	−۰/۳۲



شکل ۶. مقادیر اندازه‌گیری و مدل‌شدهٔ غلظت شوری در ۱۹ ایستگاه در تیر ۱۳۹۰



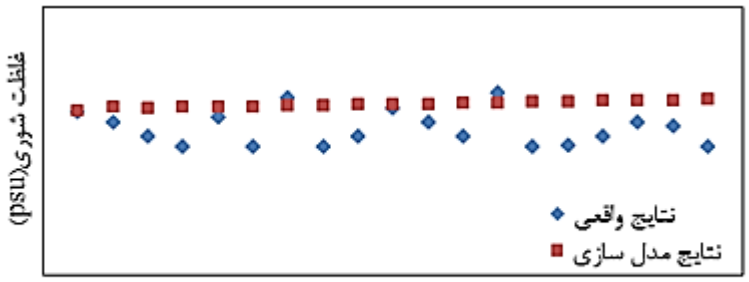
شکل ۷. مقادیر اندازه‌گیری و مدل‌شدهٔ غلظت شوری در ۱۹ ایستگاه در مرداد ۱۳۹۰



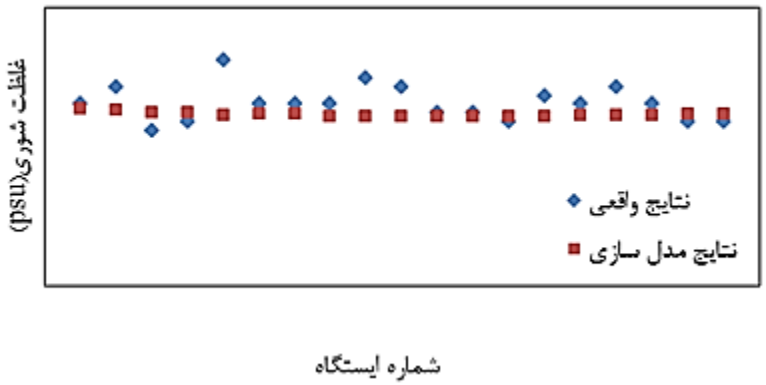
شکل ۸. مقادیر اندازه‌گیری و مدل‌شدهٔ غلظت شوری در ۱۹ ایستگاه در شهریور ۱۳۹۰

جدول ۴. مقادیر معیارهای ارزیابی مختلف در مرحلهٔ صحت‌سنجی

پارامتر	RMSE	MAE	MBE
n=۰/۰۲۵ , D=۵۰	۰/۲۹	۰/۱۲	۰/۱۲



شکل ۹. مقادیر اندازه‌گیری و مدل‌شدهٔ غلظت شوری در ۱۹ ایستگاه در مهر ۱۳۹۰

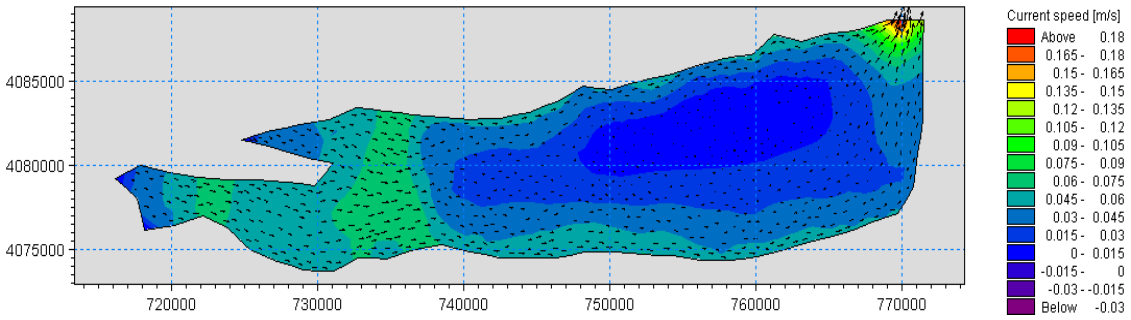


شکل ۱۰. مقادیر اندازه‌گیری و مدل‌شدهٔ غلظت شوری در ۱۹ ایستگاه در آبان ۱۳۹۰

حال که مدل‌های مناسب هیدرودینامیک و شوری توسعه داده شده‌اند، می‌توان سرعت جریان آب را از مدل هیدرودینامیک استخراج کرد. جدول ۵ وضعیت سرعت آب را در ۶ ماههٔ اول، دوم و کل سال نشان می‌دهد. در شکل ۱۱ نمونه‌ای از نتایج سرعت جریان در خلیج نمایش داده شده است.

جدول ۵. مشخصه‌های آماری سرعت جریان آب در خلیج گرگان در۶ ماههٔ اول و دوم و کل سال ۱۳۹۰

دوره (ماهانه)	میانگین	واریانس	انحراف استاندارد	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی
۶ ماه اول سال	۰/۰۳۳۸	۰/۰۰۰۳۷۴۵	۰/۰۱۹۴	۰/۵۷۳	۴/۴۳۸	۳۰/۱۸۰۷
۶ ماه دوم سال	۰/۰۳۸۶	۰/۰۰۰۸۱۱۵۳	۰/۰۲۸۵	۰/۷۳۸	۵/۳۰۹۷	۳۶/۸۰۲۹
۱۲ ماهه	۰/۰۳۶۲	۰/۰۰۰۵۵۸۵۴	۰/۰۲۳۶	۰/۶۵۳	۵/۱۱۹۹	۳۵/۶۰۷۵



شکل ۱۱. مقدار سرعت جریان و بردار جهت جریان آب در خلیج گرگان در ۲۰ مهر ۱۳۹۰

در ادامه، برای اطمینان از اینکه آلودگی لحظه‌ای از مزرعهٔ پرورش به مزرعهٔ پرورش نرسد، می‌توان فاصله‌ای بین آنها در نظر گرفت که ۹۹/۹ درصد آلودگی ترقیق شده و کاهش یافته باشد. بدین منظور با اعمال منبع آلودگی لحظه‌ای از نوع شوری در ۶ نقطه از خلیج، مدل شوری اجرا شد و میزان پیک غلظت در فواصل مختلف از منبع محاسبه و نسبت به غلظت اولیهٔ ناشی از بار لحظه‌ای مقایسه شد (جدول ۶). با توجه به جدول ۶، در حدود فاصلهٔ ۱۰۰ متری از منبع آلودگی تقریباً حدود ۰/۱ درصد

آلودگی باقی مانده و مابقی در خلیج ترقیق شده است. این فاصله بیانگر بدترین سناریو است، زیرا آلودگی از نوع شوری و تجزیه‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. در صورت تجزیه‌پذیربودن آلاینده، مقدار غلظت باقی‌مانده در فاصلهٔ ۱۰۰ متری از منبع از ۰/۱ درصد نیز کمتر خواهد شد. بدین ترتیب فاصلهٔ اطمینان بین مزارع پرورش در خلیج گرگان برای حذف اثر بار آلودگی لحظه‌ای برابر با ۱۰۰ متر در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۶. ماکزیمم درصد آلودگی در فواصل مختلف نسبت به منبع آلودگی

ماکزیمم درصد آلودگی	فاصله از منبع آلودگی (متر)	ماکزیمم درصد آلودگی	فاصله از منبع آلودگی (متر)
۰/۲۲	۶۴	۱۰۰	۰
۰/۱۷	۷۷	۱۳/۸۸	۴/۵۵
۰/۱۴	۸۶	۳/۳۸۵	۱۵/۶
۰/۰۹	۱۰۶	۱/۸۹	۲۳
۰/۰۵۹	۱۱۶	۰/۶۴	۳۶
۰/۰۵۶	۱۲۱	۰/۴۵	۴۶
۰/۰۴۸	۱۲۹	۰/۲۸۵	۵۶

۴. بحث و نتیجه‌گیری

۱. در این مطالعه، طی عملیات مدل‌سازی هیدرودینامیکی و شوری انجام‌شده روی خلیج گرگان، ضریب مانینگ و ضریب پخش این خلیج با استفاده از داده‌های شوری ماه‌های تیر- شهریور ۱۳۹۰ در محل ۱۹ ایستگاه کالیبره و با استفاده از داده‌های شوری ماه‌های مهر و آبان ۱۳۹۰ در همان ایستگاه‌ها صحت‌سنجی شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که مدل MIKE21 می‌تواند با دقت مطلوبی شرایط هیدرودینامیکی و شوری خلیج گرگان را شبیه‌سازی کند. طی مدل‌سازی‌های انجام‌شده، ضریب مانینگ بهینهٔ خلیج گرگان برابر ۰/۰۲۵ و ضریب پخش بهینهٔ آن ۵۰ متر مربع بر ثانیه تعیین شد.

۲. با اعمال بار آلودگی در نقاط مختلف خلیج و اجرای مدل شوری، مقدار فاصلهٔ اطمینان لازم بین مزارع پرورش ماهی در بدترین سناریوی تعریف‌شده محاسبه شد. نتایج نشان داد که در فاصلهٔ حدود ۱۰۰ متر، ۹۹/۹ درصد آلودگی لحظه‌ای ترقیق می‌یابد؛ بنابراین، فاصلهٔ اطمینان بین مزارع پرورش ماهی در خلیج گرگان برابر ۱۰۰ متر محاسبه شد.

References

[1]. Ani, E., Wallis, S., Kraslawski, A. and Agachi, P. S. 2009. Development, calibration and evaluation of two mathematical models for pollutant transport in a small river. Journal of Environmental Modelling & Software 24, 1139–1152.

[2]. Babu, M.T., Vethamony, P., Ehrlich D., 2005. Modelling tide-driven currents and residual eddies in the Gulf of Kachchh and their seasonal variability A marine environmental planning perspective. Ecol Model 184, 299- 312.

[3]. Beygi, M., 2000. Simulate the effects of quantitative-qualitative agricultural development designs on Karoon river (Ahvaz-Darkhoein), MSc Thesis, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, 152p. In persian.

[4]. Christian, C.D., Coney, P. A., 2001. Department of Civil and Resource Engineering, University of Auckland, New Zealand.

[5]. DHI, 2007. MIKE 21 Reference Manual, DHI Software.

[6]. Faramarz, M., 1D mathematical model of pollution transport in composite channels, MSc Thesis, Hydraulic Structures department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. In persian

[7]. Huntley, D.A., Davidson, A.D., 2002. Modelling water surface topography at a complex inlet system teingmouth. Journal of Coastal Res 36, 675-685.

[8]. Javani, A., 2012. Spatial modeling of different pollution in Gorgan gulf, MSc Thesis. Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University. Tehran, Iran, 116p. In Persian.

[9]. Menéndez, A. N., Natale, P. and Jaime, O. 2002. Nutrient balance in the Río dela Plata River using mathematical modeling .5th International Conference HydroInformatics, Cardiff, UK.

[10]. Vanderborght, J.P., Folmer, I.M., Aguilera, D.R., Uhrenholdt, T., Regnier P., 2007. Reactive-transport modelling of C, N, and O2 in a river–estuarine–coastal zone system: Application to the Scheldt estuary. Marine Chemistry 106, 92-110.

[11]. Yarinasab, A., 2012. Water quality modeling of Gorgan bay, Ms thesis. MSc Thesis. Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University Tehran, Iran, 106p. In persian

[12]. Yarinasab, A., Taheri Shahraiyni, H., Mohammadkhani, H., Amini, K., 2012. Retrieval of the boundary and area of Gorgan bay using IRS1D images. 1st Wetland Management and Engineering Conference. Tehran, Iran. In Persian.

[13]. Yarinasab, A., Taheri Shahraiyni, H., Mohammadkhani, H., Pour sufi, T., 2012. Derivation of the Gorgan bay volumetric model from bathymetry data. 1st Wetland Management and Engineering Conference. Tehran, Iran. In Persian.

[14]. Zargar, M., Salehi neyshabouri, S. A. A., Comparison between MIKE11 and SMS models for the simulation of distribution and transport of contaminants in rivers, 8th International Congress on Civil Engineering, Shiraz University. Shiraz, Iran. In Persian.