

بهبود تخمین جزر و مد در خلیج فارس با استفاده از همگون‌سازی داده‌ها

داود شریعتمداری^۱، سیدمصطفی سیادت‌موسوی^{۲*}، سیروس ارشادی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های دریایی، دانشگاه هرمزگان، پست الکترونیکی: davood5a5@yahoo.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، پست الکترونیکی: siadatmousavi@iust.ac.ir

۳- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه هرمزگان، پست الکترونیکی: cyrusershadi1@yahoo.co.uk

تاریخ دریافت: ۹۸/۶/۳۱

* نویسنده مسوول

تاریخ پذیرش: ۹۸/۹/۲۴

چکیده

مدل‌های هیدرودینامیکی عموماً برای پیش‌بینی سطح آب و شدت جریان‌ات مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما به دلیل عدم قطعیت‌هایی نظیر دقت داده‌های ورودی یا معادلات حاکم، همواره نتایج خاص از این مدل‌ها دارای خطا هستند. روش همگون‌سازی داده یکی از مؤثرترین راه‌کارها برای جبران برخی از این خطاها و کنترل آن در مدل است. در این مقاله کارایی یکی از روش‌های پیشرفته همگون‌سازی به نام فیلتر گروهی کالمن جهت بهبود پیش‌بینی تراز سطح آب در محدوده‌ی خلیج فارس بررسی می‌شود. برای این منظور از نرم‌افزار هیدرودینامیکی Delft3D-FM برای مدل‌سازی هیدرودینامیکی و ابزار متن باز Open DA برای اجرای فیلتر کالمن استفاده می‌شود. Open DA به نحوی توسعه داده می‌شود که یک مجموعه‌ای از فیلتر گروهی کالمن برای بهبود نیروهای مرزی به مدل هیدرودینامیکی یاد شده کوپل شود. آزمایشی برای بهبود برآورد نیروهای جزر و مد در حوضه‌ی خلیج فارس مورد بررسی قرار گرفت که طی آن، پارامترهای تعداد گروه، خطای ایستگاه‌های مشاهداتی، خطای مرز باز و همچنین بهترین ایستگاه موجود مورد بحث و آزمایش قرار گرفت و بهترین پارامترها به دست آمدند. نتایج نشان می‌دهد که همگون‌سازی داده‌ها با استفاده از فیلتر گروهی کالمن پیش‌بینی موثر و کارآمدی در ایستگاه‌های مشاهداتی دارد و می‌تواند نتایج مدل عددی را بهبود ببخشد.

کلمات کلیدی: همگون‌سازی، فیلتر گروهی کالمن، Open DA، Delft3D-FM، جزر و مد، خلیج فارس.

۱. مقدمه

خطاهای پارامترهای ورودی و یا مشکلات روش‌های عددی باشد. بنابراین نیاز است که این خطاهای شناخته شده و ناشناخته اصلاح گردد. یکی از بهترین راه‌ها برای جلوگیری از خطای تجمعی مدل‌ها، استفاده از همگون‌سازی داده‌ها^۱ است. همگون‌سازی داده‌ها ابزاری است که طی آن، داده‌های واقعی حاصل از اندازه‌گیری و مشاهدات وارد چرخه‌های مدل پیش‌بینی

علی‌رغم پیشرفت‌های زیادی که در مدل‌های عددی در بحث هیدرودینامیک جریان به وجود آمده است، هنوز نتایج مدل‌سازی با مشاهدات میدانی و آزمایشگاهی اختلافات زیادی در برخی موارد دارد. این اختلاف‌ها ممکن است به دلیل بینش محدود نسبت به مکانیزم‌های فیزیکی، فرضیات ساده‌سازی مدل عددی،

^۱ Data assimilation

در دهه‌های گذشته مطالعات بسیاری در زمینه‌های هواشناسی از روش‌های مختلف همگون‌سازی با موفقیت استفاده کرده‌اند. در مقایسه با این کاربرد، مطالعات بسیار کمتری وجود دارد که از روش‌های همگون‌سازی برای جزر و مد، به خصوص در خلیج‌ها و خورها استفاده کرده باشند. اووی و همکاران از یک شبکه ریزمقیاس در آب‌های سنگاپور استفاده کردند تا نشان دهند که می‌توان پیش‌بینی جزر و مد را با استفاده از این تکنیک بهبود بخشید [۹]. کورنینان و همکاران به طور سیستماتیک عملکرد جریان جزر و مد را با استفاده از نرم‌افزار OpenDA و Delft3D در آب‌های سنگاپور بهبود بخشیدند. آن‌ها برای بهبود نتایج مدل در پیش‌بینی جزر و مد از همگون‌سازی داده‌ها استفاده کردند و توانستند نتایج خوبی به دست آورند [۴].

کری و همکاران با استفاده از فیلتر گروهی کالمن و بسته نرم‌افزاری Delft3D به بررسی مدل هیدرودینامیکی آب‌های اطراف سنگاپور پرداختند. نتایج آنها بسیار امیدوارکننده بود و فیلتر گروهی کالمن توانست شرایط هیدرودینامیکی آب‌های اطراف سنگاپور را تا حد زیادی بهبود ببخشد [۱۲ و ۱۳]. در خلیج فارس در زمینه استفاده از همگون‌سازی برای بهبود نتایج مدل‌های هیدرودینامیکی تحقیقاتی انجام گرفته است که می‌توان به مطالعه معینی و همکاران اشاره کرد که با یک طرح هیبریدی به همگون‌سازی موج در خلیج فارس پرداخته است [۷]. سرپوشان و همکاران نیز به همگون‌سازی موج در خلیج فارس با استفاده از فیلتر گروهی کالمن پرداختند [۱۴]. عباسی و همکاران نیز به اصلاح دمای سطح آب در خلیج فارس با استفاده از همگون‌سازی داده‌ها اقدام کردند [۱]. در این مطالعه هدف آنالیز حساسیت پارامترهای مورد نیاز در طرح همگون‌سازی داده‌ها در راستای بهبود پیش‌بینی سطح آب در خلیج فارس است. برای این کار از طرح همگون‌سازی داده‌ها در چارچوب فیلتر گروهی کالمن موجود در Open DA برای بهبود پیش‌بینی سطح آب در خلیج فارس استفاده می‌شود. این مقاله به صورت زیر ساماندهی می‌شود که مدل هیدرودینامیکی مورد استفاده به همراه مفاهیم همگون‌سازی به طور خلاصه در بخش ۲ ارائه می‌گردد. در بخش ۳ منطقه مورد مطالعه و منابع مشاهداتی بیان می‌گردند. فصل ۴ به شبیه‌سازی منطقه و کوپل کردن مدل پرداخته، و نتایج آزمایشات به همراه بحث‌های مربوط به OpenDA در بخش ۵ توضیح داده می‌شود. در نهایت فصل ششم، بحث نتیجه‌گیری‌های کلی را ارائه می‌کند.

می‌شوند؛ بدین ترتیب مدل را در برابر رشد زیاد خطاها ایمن می‌سازند و شرایط مرزی اولیه اصلاح شده‌ای برای اجرای بعدی مدل فراهم می‌آورند [۳].

اولین تحقیق با همگون‌سازی داده‌ها در سال ۱۹۰۲ توسط ریچاردسون منتشر شد و بعد از آن مطالعات زیادی در زمینه همگون‌سازی انجام گرفت و روش‌های زیادی ایجاد شدند. در آغاز تقریباً همگون‌سازی داده‌ها منحصر به مطالعات هواشناسی بود اما بعداً به عنوان یک ابزار مفید در موضوعات دیگری مانند اقیانوس‌شناسی [۵] و هوافضا [۸] نیز مورد استفاده قرار گرفت.

به طور کلی همگون‌سازی داده‌ها به دو دسته ترتیبی و روش تغییرات طبقه‌بندی می‌شوند. طرح‌های تغییراتی مانند تغییرات سه بعدی (3 D-Var) و تغییرات چهار بعدی (4 D-Var) داده‌های مشاهداتی را از طریق یک فرآیند بهینه‌سازی به یک مدل هیدرودینامیکی همگون می‌کنند؛ به عبارت دیگر بهترین مسیر مدل را که متناسب با سری زمانی مشاهدات است بهینه‌سازی می‌کنند [۱۰]. در مقابل، در روش‌های همگون‌سازی ترتیبی، در هر زمانی که اطلاعات جدید مشاهده شده به مدل وارد می‌گردد، تخمین‌های مدل بروز می‌شوند. یکی از معروف‌ترین روش‌های ترتیبی همگون‌سازی داده، روش فیلتر کلاسیک کالمن یا فیلتر کالمن-بوسی است. این روش اولین بار به وسیله کالمن ارائه شد [۸] و به وسیله اشمیت به کار گرفته شد [۱۵]. ایده اصلی این روش به این صورت است که میانگین و کواریانس مقادیر مدل را محاسبه می‌کند و این مقادیر را با استفاده از مشاهدات، به‌روزرسانی می‌نماید. در سال‌های اخیر دو روش دیگر از فیلتر کالمن استخراج شدند که فیلتر کالمن گسترش یافته^۱ و فیلتر کالمن گروهی^۲ معروف هستند [۳]. این دو روش هم می‌توانند در مدل‌های غیرخطی استفاده شوند و هم برای مجموعه‌ای از داده‌ها یا گروه داده نیز می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. فیلتر کالمن گروهی در حال حاضر پرکاربردترین فیلتر کالمن است و در این تحقیق نیز جهت همگون‌سازی از این روش استفاده می‌شود. اونس و همکاران برای اولین بار این روش را معرفی کردند. بعدها این روش توسط محققان دیگر ارتقاء یافت. یکی از مهم‌ترین این بهبودها، فیلتر گروهی کالمن محلی‌سازی بود که توسط هامیل و ویتاکر [۱۶] و ژانگ و الیور [۱۷] انجام شد.

¹ Extended Kalman Filter

² Ensemble Kalman Filter

۲. روش مطالعه

معادله پیوستگی نیز به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial v.h}{\partial y} = Q \quad (۴)$$

به طوری که u و v سرعت متوسط عمقی آب در جهت x و y است و Q نیز مقدار دبی خروجی است [۲].

۲-۲ همگون سازی داده ها

یکی از متداول ترین روش ها برای همگون سازی داده ها، استفاده از فیلتر کالمن است. فیلتر کالمن روشی ریاضی است که به نام کالمن ۱۹۶۰ نام گذاری شده است. فیلتر کالمن یک تخمین گر است که از تخمین حالت قبل و مشاهده فعلی برای محاسبه تخمین حالت فعلی استفاده می کند و نیز با محاسبه میانگین وزنی مقدار پیش بینی شده و اندازه گیری شده تولید می کند. بیشترین وزن به مقداری که کمترین عدم قطعیت را دارد اختصاص می یابد. تخمین های تولید شده به مقادیر واقعی نسبت به خروجی اولیه مدل نزدیک تر هستند. از لحاظ نظری، فیلتر کالمن الگویی کارآمد برای استنتاج دقیق در یک سیستم خطی پویا است. روش فیلتر کالمن اگر بخواهد برای ارزیابی مستقیم به کار رود بسیار پرهزینه خواهد بود ولی چندین راه حل تقریبی و ساده سازی شده برای عملی کردن الگوریتم همگون سازی با این روش توسعه داده شده است. یکی از این روش ها فیلتر گروهی کالمن است که بر پایه فیلتر کلاسیک کالمن یا ریشه دوم است و برای سیستم های بزرگ مانند مدل های اقیانوسی واقعی پرکاربرد است.

۲-۱ فیلتر کالمن گروهی

رویکرد جدید همگون سازی ترتیبی داده ها که به نام روش های فیلتر گروهی شناخته می شود بر پایه فیلتر کلاسیک کالمن یا ریشه دوم آن استوار بوده، و در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این روش برای تقریب فیلترهای کلاسیک و عملی کردن کاربردها در مسائل با داده های واقعی، از روش های تخمین با مرتبه ی کاهش یافته استفاده می کنند. در این روش ها یک گروه شامل تعداد کمی از بردارهای تحلیل به صورت همزمان توسط مدل غیرخطی از یک گام زمانی به بعدی، به منظور تولید یک گروه از وضعیت های پیش زمینه مانند الگوی ارائه شده

۱-۲ معرفی مدل هیدرودینامیک Delft3D-FM

مدل Delft 3D-FM یک برنامه شبیه سازی هیدرودینامیکی است که علاوه بر شبکه منظم، شبکه نامنظم هم پشتیبانی می کند. این مدل می تواند برای مناطق با هندسه های پیچیده نیز به طور مناسبی به کار رود. در این مطالعه، شبیه سازی در حالت عمق متوسط دو بعدی انجام شده است. این مدل معادلات ناویر استوکس را با فرضیات آب کم عمق حل می کند و برای حل معادلات دیفرانسیل، از روش تفاضل محدود استفاده می شود. این مدل با موفقیت در برنامه های مختلف از جمله آب های اقیانوسی، ساحلی و رودخانه مورد استفاده قرار گرفته است [۲].

۱-۱-۲ معادلات حاکم در مدل هیدرودینامیک

در این جا دو مجموعه مهم از معادلات وجود دارد. معادلات مومنتم که شامل سه معادله در آب کم عمق است و معادلات پیوستگی. دو معادله مومنتم در جهت افقی x و y به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x + \frac{\partial}{\partial z} + (uv \frac{\partial u}{\partial z}) + M_x \quad (۱)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + f_y + \frac{\partial}{\partial z} + (uv \frac{\partial v}{\partial z}) + M_y \quad (۲)$$

به طوری که u و v و w بردار سرعت در راستای x و y و z می باشد و f به طور کلی نشان دهنده نیروهای خارجی دیگر (مثل نیروی جاذبه) است. M_x و M_y مومنتم ورودی در مرزها در جهت های x و y هستند. در مورد جهت z ، با توجه به فرضیات معادلات آب کم عمق فقط معادله فشار باقی می ماند که بیاتگر فشار هیدرواستاتیک است:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho gh \quad (۳)$$

در عوض، توزیع با استفاده از مجموعه‌ای از ادراک^۱ به نام گروه^۲ بیان می‌شود؛ بنابراین:

$$X = [x_1, \dots, x_n] = [X_r] \quad (5)$$

ماتریس X یک ماتریس $n \times N$ است که ستون‌هایش دسته‌ای از داده‌های خروجی مدل و پیش از اعمال همگون‌سازی هستند که N تعداد پارامترهای مورد نیاز و n تعداد نقاط مدل هستند. این ماتریس، گروه پیشین نام دارد. کلیه داده‌های میدانی نیز در یک ماتریس d با ابعاد $m \times N$ ماتریس زیر حاصل می‌شود:

$$D = [d_1, \dots, d_n] = [d_r] \quad (6)$$

در این ماتریس هر ستون d_r شامل بردار داده d به همراه یک بردار تصادفی از توزیع نرمال n بعدی به شکل $N(O, R)$ است. حال برای مقدار آنالیز شده داریم:

$$X^A = X + K (D - HX) \quad (7)$$

بنابراین ستون‌های ماتریس، یک نمونه‌ی تصادفی از توزیع پسین را شکل می‌دهند. در رابطه فوق H ماتریسی است که نشان‌دهنده چگونگی مرتبط شدن مدل به مشاهدات است. هم‌اکنون فیلتر کالمن گروهی به راحتی با جابه‌جایی کواریانس وضعیت سیستم، Q در ماتریس برد کالمن به فرم:

$$K = QHT (HQHT + R)^{-1}$$

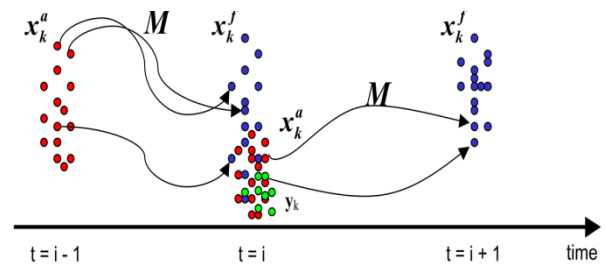
با کواریانس C که از اعضای گروهی (به نام کواریانس نمونه) محاسبه می‌شود.

۲-۲-۲- معادلات پایه برای فیلتر گروهی کالمن

فرض کنید که ماتریس گروه مدل X و ماتریس داده‌های D به صورت گفته شده در بخش قبل باشند. میانگین (E) و کواریانس گروه (C) به شکل زیر خواهند بود:

در شکل ۱ انتشار پیدا می‌کنند. هر پیش‌زمینه توسط مشاهدات برای ایجاد گروه بردارهای جدید تحلیل بروز می‌شود. همچنین تحلیل بهینه و ماتریس کواریانس خطای متناظرش توسط فیلتری مشابه فیلترهای کلاسیک تعیین می‌شود. یکی از مزایای این روش‌ها این است که مدل و عملگرهای مشاهدات به صورت خطی تقریب زده نمی‌شود و محدودیتی از این نظر وجود ندارد. با این وجود دقت وضعیت‌های تخمین زده شده بستگی به تقسیم‌شدگی گروه دارد که می‌بایست برای تخمین رفتار واقعی سیستم مطلوب و کافی باشد. انواع مختلف این روش در حال توسعه است؛ اگرچه کاربرد آنها دارای مشکلاتی نیز است. این روش‌ها مزایای فیلترهای کلاسیک کالمن و ریشه دوم را حفظ کرده‌اند و در عین حال برای استفاده در سیستم‌های بزرگ قابل کاربرد هستند.

همان‌طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است x_k^a یا داده‌های پس از اعمال همگون‌سازی در زمان $t=i-1$ به مدل داده شده تا داده‌های زمان $t=i$ توسط مدل یا همان x_k^f تولید شود. طی فرآیند همگون‌سازی، با استفاده از داده‌های مشاهداتی در این زمان، داده‌های پس از همگون‌سازی در این زمان، یا x_k^a تولید می‌شود که آماده ورود به مدل برای تولید پیش‌بینی در زمان بعدی است.



شکل ۱: اجرای طرح همگون‌سازی داده‌ها با فیلتر گروهی کالمن [۱]

در این روش، تخمین فیلتر کالمن با استفاده از روش مونت‌کارلو است؛ به گونه‌ای که از نیاز به انجام محاسبات برای ماتریس کواریانس تابع pdf بردار وضعیت x ، جلوگیری می‌کند.

¹ state
² ensemble

$$E^f(k) = [\xi_1^f(k) - x^f(k), \dots, \xi_N^f(k) - x^f(k)] \quad (14)$$

۳- مرحله تجزیه و تحلیل کردن به شرح زیر انجام می‌شود:

$$P^f(k) = \frac{1}{N-1} E^f(k) E^f(k)' \quad (15)$$

$$K(k) = P^f(k) H(k)' [H(k) P^f(k) H(k)' + R(k)]^{-1} \quad (16)$$

به طوری که بردارهای گروه با پردازش نویز مدل و نویز مشاهدات $(\theta_i(k), \eta_i(k))$ تولید می‌شوند. از نظر حجم محاسبات، عموماً در مسائل معمول، معادله (۱۲) بخش اعظم محاسبات را به خود اختصاص می‌دهد. لازم به ذکر است که برای مساله‌های همگون‌سازی با داده‌های جوی، مراحل تجزیه و تحلیل، بخش بسیار وقت‌گیری از حل الگوریتم است.

در این مطالعه برای به کارگیری فیلتر کالمن گروهی از جعبه ابزار Open DA استفاده شده که قادر است با مدل‌های جریان دلخواه برای همگون‌سازی و کالیبره کردن استفاده شود Open DA از مجموعه‌ای از روابط که بین مدل، مشاهدات و الگوریتم همگون‌سازی ارتباط برقرار می‌کند تشکیل شده است.

۳. منطقه مورد مطالعه

خلیج فارس واقع در جنوب غربی قاره آسیا، یک توده‌ی آب کم‌عمق و نیمه‌محصور در منطقه‌ای نیمه‌خشک است. این منطقه بین طول جغرافیایی ۴۸-۵۷ شرقی و عرض جغرافیایی ۲۴-۳۰ شمالی قرار دارد. این خلیج از طریق تنگه‌ی باریک هرمز به دریای عمان وصل می‌شود. خلیج فارس مساحتی حدود ۲۲۶۰۰۰ کیلومتر مربع با طول ۹۹۰ کیلومتر را پوشش می‌دهد. عرض آن بین ۵۶ تا ۳۳۸ کیلومتر متغیر بوده و ایران را از شبه‌جزیره عربستان جدا می‌کند. کوتاهترین فاصله که حدود ۵۶ کیلومتر است در تنگه هرمز رخ می‌دهد. این حوضه با عمق متوسط ۳۵ متر بوده و عمیق‌ترین عمق آب در آن حدود ۱۰۷ متر است [۶].

$$E(x) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \quad (8)$$

$$C = \frac{A A^T}{N-1} \quad (9)$$

که در آن‌ها:

$$(X \ e_{N*1}) \ e_{1*N} \ A = X - E(X) = X - \frac{1}{N} \quad (10)$$

e به معنی ماتریس واحد با اندازه اشاره شده است. ماتریس گروه موخر X^P به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$X^P = X + CH^T (HCH^T + R)^{-1} (D - HX) \quad (11)$$

می‌توان نشان داد که گروه موخر شامل ترکیبات خطی اعضای گروه پیشین است. از آنجایی که R ماتریس کواریانس است، همواره یک ماتریس مثبت بوده و عموماً نیمه معین و گاهی معین است؛ بنابراین در این‌جا علامت معکوس ماتریس وجود دارد و این رابطه را می‌توان با استفاده از رابطه تجزیه چولسکی به کار برد. با توجه به اینکه این روابط، صرفاً شامل عملیات ماتریسی هستند، کاربرد آنها با استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری مختلف بسیار کارآمد خواهد بود.

فیلتر گروهی کالمن در OpenDA به صورت زیر بیان می‌گردد:

۱- یک گروهی از N برداشت $(0) \xi_i^a$ برای نشان دادن پارامتر غیر قطعی x_0 تولید می‌شود.

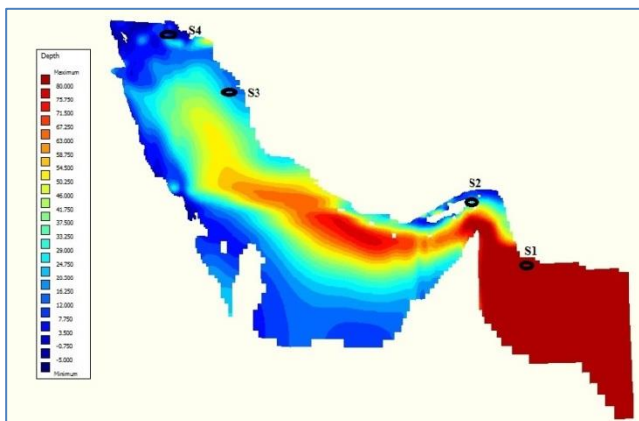
۲- مراحل پیش‌بینی انجام می‌شود.

$$\xi_i^f(k) = M [\xi_i^a(k-1)] + \eta_i(k-1) \quad (12)$$

$$x^f(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i^f(k) \quad (13)$$

است. در امتداد مرز باز، بهترین تخمین سطح آب توسط ۸ مولفه جزر و مدی به مدل داده شده است. سطح آب در مرزها از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$H(t) = H_0 + \sum_{k=1}^K H_k F_k \cos\{w_k t + (V_0 + U)_k - G_k\} \quad (18)$$



شکل ۲: محدوده مدل‌سازی به همراه عمق‌سنجی خلیج فارس و محل ایستگاه‌های مشاهداتی

جدول ۱: مختصات ایستگاه‌های مشاهداتی

ایستگاه مشاهداتی	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
S1	۵۷.۷۶۷	۲۵.۶۱۹
S2	۵۶.۲۸۳	۲۶.۹۵
S3	۵۰.۵۰۹	۲۹.۵۵۹
S4	۴۹.۰۸۳	۳۰.۴۲۳

به طوری که $H(t)$ تراز سطح آب جزر و مد در زمان t است. H_0 سطح آب میانگین در یک دوره زمانی مشخص است. H_k دامنه جزر و مد محلی در پریود مد نظر است. F_k ضریب دامنه آن پریود، w_k سرعت زاویه‌ای آن پریود، $(V_0 + U)_k$ فاز نجومی جزر و مد در گرینویچ و G_k فاز جزر و مد محلی است. شکل ۲ از مهم‌ترین مولفه‌های جزر و مد در این منطقه که عبارتند از $O_1, Q_1, K_1, P_1, N_2, M_2, S_2, K_2$ بعد از استخراج از مدل TMD به مدل عددی خلیج فارس وارد شدند. لازم به ذکر است که

خلیج فارس به دلایل اقتصادی، سیاسی و نظامی از مهم‌ترین مناطق جهان به شمار می‌رود. وجود منابع زیاد نفت، فعالیت گسترده‌ی استخراج و حمل نفت به سر تا سر جهان و قرارگیری در منطقه‌ای با اهمیت راهبردی، در مجموع شرایطی ویژه برای این منطقه به وجود آورده است. بی‌تردید شناخت خصوصیات فیزیکی، هیدرودینامیکی و نیروهای که در این منطقه است بسیار مهم خواهد بود. جزر و مد یک نیروی مهم و دائمی در خلیج فارس است. شناخت زمان و ارتفاع جزر و مد و تراز سطح آب تاثیر به سزایی بر روی ایمنی ناوبری کشتی‌ها در مناطق کم‌عمق و پروژه‌های ممیزی بنادر دارد. هیدرودینامیک پیچیده آب کم‌عمق که در نتیجه ورود و خروج جریان‌های اقیانوسی و تغییرات هواشناسی است باعث تغییرات بسیار شدیدی در سطح آب این منطقه می‌شود.

۴. شبیه‌سازی و برپایی مدل

برای فهم بهتر پویایی و پردازش جریانات در خلیج فارس، یک مدل جریان با تفکیک مکانی مناسب برای کاربرد در مدل عددی Delft 3D-FM برپا گردید. این مدل با هدف شبیه‌سازی جریانات باروکلینیک جزرومدی است و بنابراین مدل در حالت عمق متوسط به کار گرفته شده است. داده‌های ژرفاسنجی از داده‌های پایگاه GEBCO با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ ثانیه استفاده شده است. شبکه‌بندی در مدل خلیج فارس در نزدیکی‌های مرز باز حدود ۲۵×۲۵ کیلومتری است و این شبکه‌بندی در نزدیک آب‌های کم‌عمق و سواحل کاهش می‌یابد تا به حدود ۱×۱ کیلومتری می‌رسد. به طور کلی تعداد گره‌ها در راستای طول جغرافیایی ۲۰۵ و در راستای عرض جغرافیایی ۱۷۶ عدد استفاده شده است. گام زمانی آزمایش ۳۰ ثانیه است و برای محاسبه اصطکاک کف بستر از فرمول مانینگ با ضریب ۰٫۰۲۲ می‌شود. در شکل (۲) محدوده مدل‌سازی به همراه داده‌های عمق و ایستگاه‌های مشاهداتی آمده است.

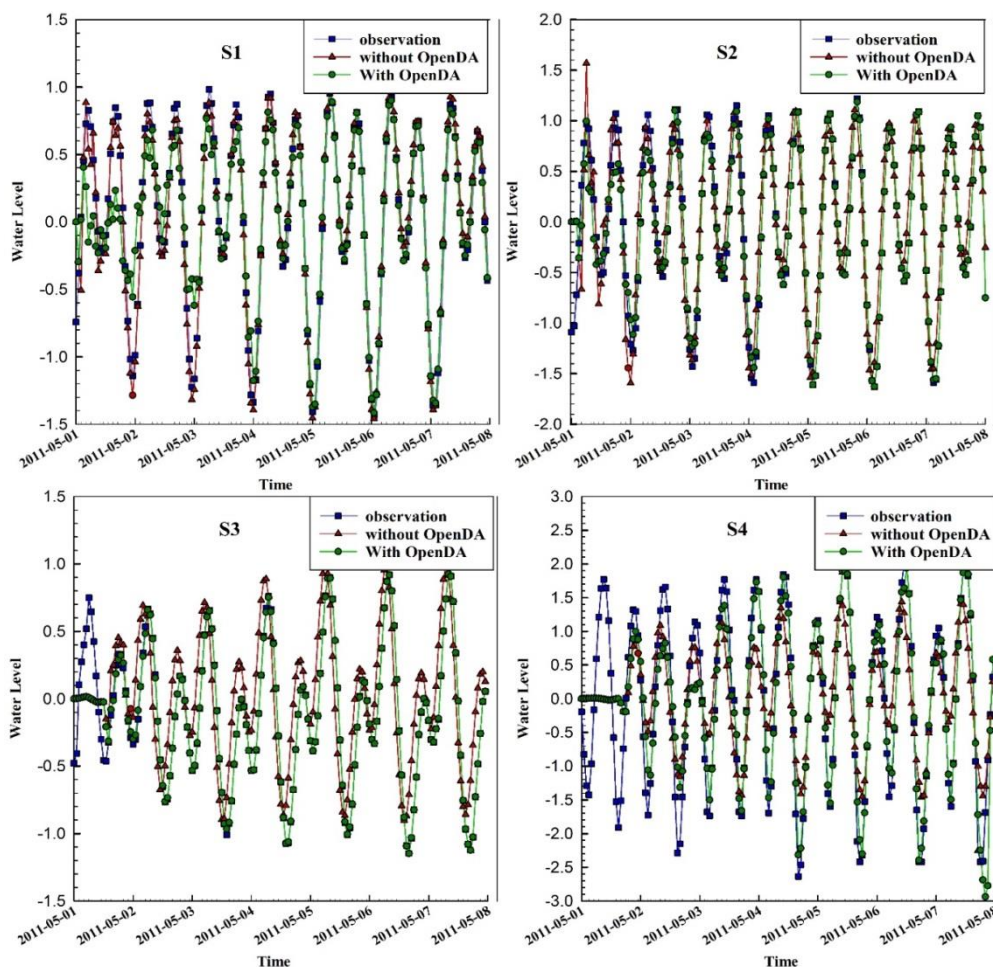
دامنه و گره‌های مدل به همراه توزیع مکانی ایستگاه‌های مشاهداتی در شکل ۲ آمده است. مختصات ۴ ایستگاه مشاهداتی نیز در جدول ۱ آمده است که داده‌های ساعتی تراز آب در این ایستگاه‌ها برای به کارگیری همگون‌سازی در مدل اعمال شده

۵. نتایج

همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان گردید هدف از این تحقیق امکان‌سنجی و به دست آوردن بهترین پارامترهای فیلتر گروهی کالمن در خلیج فارس برای پیش‌بینی جزر و مد است. در ابتدا مدل بدون همگون‌سازی داده‌ها برپا گردید و نتایج آن بعد از صحت‌سنجی و کالیبره کردن مدل با نتایج ایستگاه‌های مشاهداتی مقایسه گردید. همچنین مدل کالیبره شده با فیلتر گروهی کالمن در OpenDA کوپل گردید و نتایج همگون‌سازی هر ایستگاه نیز محاسبه گردید. نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها با همگون‌سازی و بدون آن در شکل ۳ و جدول ۲ ارائه گردیده است. همان‌طور که از پارامترهای آماری جدول ۲ مشخص است، استفاده از همگون‌سازی توانسته است نتایج را بهبود دهد.

نرم‌افزار TMD یکی از ابزارهای کاربردی برای استخراج مولفه‌های جزر و مد تراز آب بر اساس داده‌های ترازسنجی ماهواره‌ای است.

اگرچه هدف از آزمایشات همگون‌سازی، بررسی این مساله است که آیا می‌توان با تنظیمات پارامترهای مدل، به پیش‌بینی بهتر و دقیق‌تر تراز سطح آب دست یافت، لیکن اجرای طولانی‌مدت به دلیل مشکل حجم محاسبات بالا عملاً مقدور نیست. با توجه به زمانگیر بودن محاسبات هر مدل، مدلسازی برای یک بازه ۷ روزه با خروجی‌های ساعتی از تاریخ ۲۰۱۱/۵/۱ تا ۲۰۱۱/۵/۸ انجام گردید. همچنین برای مقایسه نتایج از آزمایشات مختلف دو پارامتر آماری متعارف جزر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی R مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۳: نتایج مدل با و بدون همگون‌سازی در ایستگاه قشم S2

جدول ۲: مقایسه نتایج مدل با و بدون همگون‌سازی با ایستگاه‌های مشاهداتی

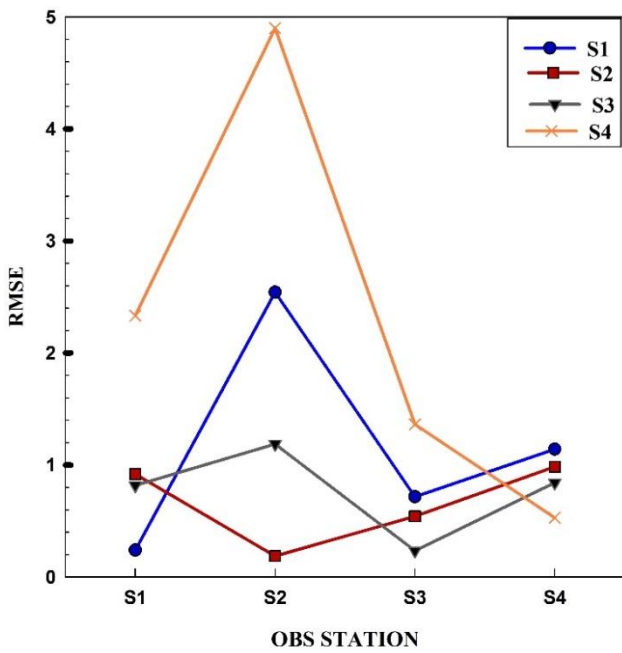
ایستگاه	بدون همگون‌سازی		با همگون‌سازی	
	RMSE	R	RMSE	R
S1	0.240	0.938	0.096	0.989
S2	0.290	0.928	0.188	0.974
S3	0.329	0.822	0.236	0.918
S4	0.803	0.846	0.530	0.913

داده‌ها بهترین گزینه است. به عبارت دیگر کدام ایستگاه بیش‌ترین تاثیر را در بهبود نتایج دارد. برای جواب به این سوال ۴ آزمایش انجام گرفت که در آنها یکی از ایستگاه‌ها جهت همگون‌سازی انتخاب و سه ایستگاه دیگر به عنوان ایستگاه ناظر استفاده شدند. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در ایستگاه‌های S2 و S1 نتایج مدل‌ها دارای خطای بسیار زیاد در برخی از ایستگاه‌ها بودند و S3 و S4 نتایج به نسبت بهتری ارائه کردند. با توجه به موقعیت مکانی ایستگاه S3، که در میانه خط ساحلی خلیج فارس قرار دارد، این ایستگاه به عنوان ایستگاه همگون‌سازی انتخاب می‌گردد.

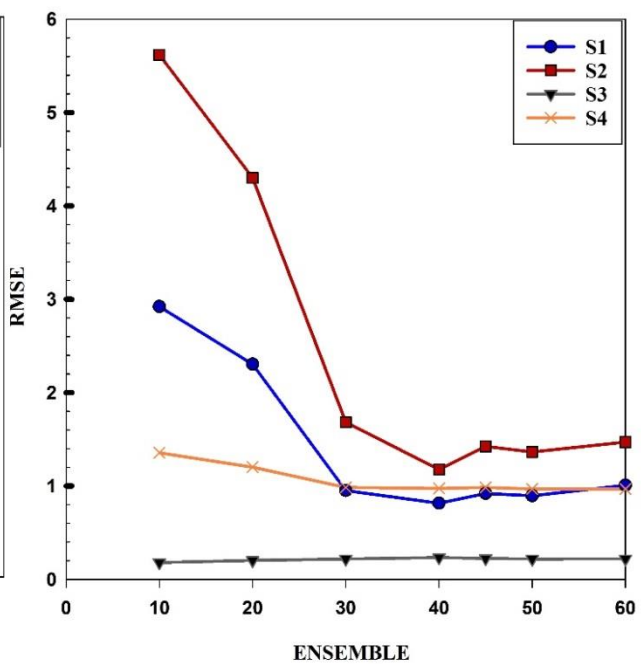
همان‌طور که در بخش ۲ بیان گردید یکی از پارامترهای فیلتر گروهی کالمن مقدار انحراف استاندارد خطای مشاهدات است که به سادگی قابل دستیابی نیست. در این بخش مقدار بهینه برای این پارامتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. تاثیر تغییرات خطای اندازه‌گیری با تغییرات انحراف استاندارد از ۰,۰۰۱ تا ۰,۱ با اندازه‌گیری گروه ۴۰ برای ایستگاه S3 در شکل ۶ آمده است. شکل ۶ نشان می‌دهد که تغییرات انحراف استاندارد برای بهینه کردن مدل ۰,۰۰۵ مناسب است. لازم به ذکر است هر چه میزان انحراف معیار در اندازه‌گیری کاهش داده شود، مدل بیش‌تر موظف به رعایت اعداد به دست آمده از اندازه‌گیری در محل‌های یاد شده خواهد بود، ولی ممکن است به دلیل خطاهای اندازه‌گیری، دچار ناپایداری‌های مقطعی گردد. از طرفی در صورتی که این عدد بیش از اندازه بزرگ در نظر گرفته شود، اثر همگون‌سازی بر بهبود نتایج مدل کاهش می‌یابد. در شکل ۷ نیز تاثیر تغییرات خطای پارامترهای ورودی در مرز باز با تغییرات از ۰,۰۰۱ تا ۰,۱ نشان داده شده است که ۰,۰۱ مناسب‌ترین گزینه است. در واقع بخشی از اطلاعات مرزی به اطلاعات درون حوزه محاسباتی وابسته است، مانند امواج بلندی چون امواج کلونین که از حوزه به بیرون منتشر می‌شوند. الزام مدل بدون هیچ رواداری به رعایت بی‌قید و شرط شرایط مرزی، سبب خطا در مدل می‌شود. لیکن نباید محدوده رواداری آن‌قدر بزرگ در نظر گرفته شود که نوسانات جزرومدی به درستی به مدل اعمال نگردد.

مهم‌ترین پارامترهای موثر در فیلتر گروهی کالمن با توجه به بخش ۲، تعداد گروه، خطای مشاهدات اندازه‌گیری شده، خطای اطلاعات ورودی در مرز باز است و در این قسمت سعی شده که بهینه‌ترین پارامترها به همراه مناسب‌ترین ایستگاه مشاهداتی موجود مشخص گردد. جهت انجام این کار در مجموع ۱۸ آزمایش انجام گرفت که در همه مدل‌ها، مدل خلیج فارس در Delft3D-FM با فیلتر گروهی کالمن موجود در Open DA کوپل گردید و نتایج بررسی شد. بدیهی است هر چه گروه‌های فیلتر کالمن بیشتر باشد زمان اجرای مدل بیشتر خواهد بود و البته نتایج پیش‌بینی نیز مشخصاً بهتر خواهد شد. البته از جایی به بعد نرخ بهبود نتایج با افزایش گروه بسیار کند خواهد بود. بنابراین مناسب است که بین زمان و دقت نتایج پیش‌بینی شده یک وضعیت بهینه انتخاب گردد. در تحقیق حاضر مدل‌سازی برای گروه‌هایی با سایز بین ۱۰ تا ۶۰ انجام گرفت که نتایج مدل‌سازی در شکل ۴ آمده است. هر چه گروه‌ها بزرگ‌تر می‌شوند، دقت نتایج نیز بهبود می‌یابد اما با افزایش گروه بیش از ۴۰ نرخ رشد این بهبود بسیار کم بوده ولی حجم محاسبات و زمان اجرای مدل رشد زیادی دارد؛ بنابراین گروه ۴۰ به دلیل اینکه بین حجم و زمان محاسبات با دقت مدل‌سازی توانسته است تعادل مناسبی به وجود آورد به عنوان مناسب‌ترین تعداد گروه برای فیلتر گروهی کالمن در خلیج فارس انتخاب گردید.

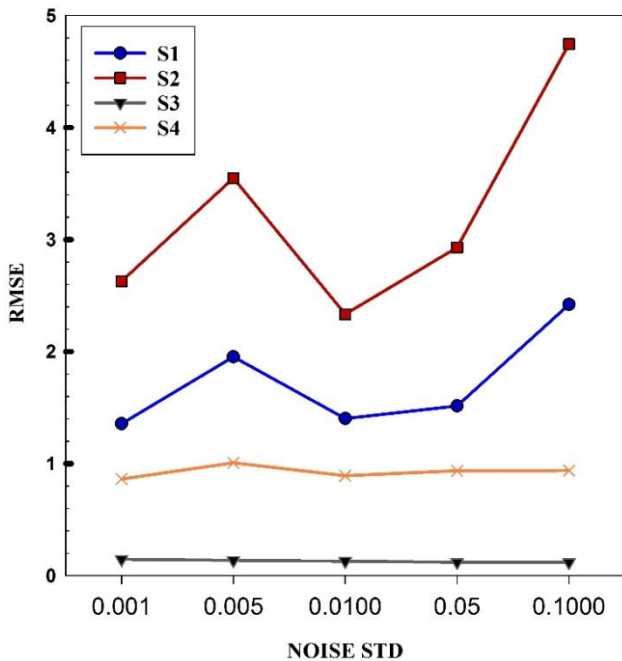
در این مجموعه آزمایشات ۴ ایستگاه مشاهداتی در دسترس بوده است که تقریباً در کل خلیج فارس گسترده شده‌اند. سوالی که می‌تواند مطرح شود این است که اگر تنها یک ایستگاه در دسترس بود، کدام‌یک از این ایستگاه‌ها جهت همگون‌سازی



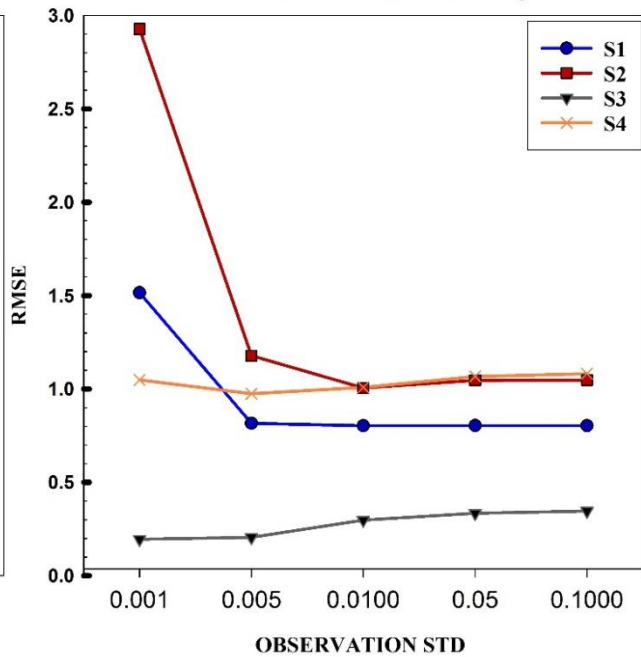
شکل ۵- اثر تغییر ایستگاه مشاهداتی



شکل ۴- اثر تغییر اندازه گروه در ۴ ایستگاه



شکل ۷- اثر تغییر خطای اندازه گیری مرز باز



شکل ۶- اثر تغییر خطای اندازه گیری ایستگاه مشاهداتی

۶. بحث و نتیجه‌گیری

است، پیش‌بینی سطح آب را چالش‌برانگیز کرده است. مدل عددی خلیج فارس که توسط نرم‌افزار Delft3D-FM ارائه گردید می‌تواند پیش‌بینی‌های خوبی از سطح آب نشان دهد. با این وجود، عدم اطمینان در نیروهای شناخته شده و ناشناخته، کارایی پیش‌بینی‌های ایجاد شده را محدود می‌کند. برای رفع این مشکل می‌توان از یک طرح همگون‌سازی داده مناسب استفاده نمود که

آب‌های منطقه‌ای خلیج فارس جزء پرترددترین مسیرهای حمل و نقل کشتی‌رانی در جهان است. از این رو پیش‌بینی سطح آب منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پدیده‌های هیدرودینامیکی پیچیده‌ای که بر این آب‌های نیمه‌بسته حاکم

Laurent Bertino, Geir Evensen, and Hans Wackernagel. Sequential Data Assimilation Techniques in Oceanography. *International Statistical Review*, 71(2):223–241, 2003. ISSN 03067734.

<https://doi.org/10.1111/j.1751-5823.2003.tb00194.x>

Moeini, M.H., Etemad-Shahidi, A., Chegini, V. and Rahmani, I., 2012, "Wave Data Assimilation Using a Hybrid Approach in the Persian Gulf", *Ocean Dynamics*, 62, pp. 785-797.

<https://doi.org/10.1007/s10236-012-0529-5>

Moeini, M.H., Etemad-Shahidi, A. and Chegini, V., 2010, "Wave Modeling and Extreme Value Analysis off the Northern Coast of the Persian Gulf", *Applied Ocean Research*, 32(2), pp. 209–218.

<https://doi.org/10.1016/j.apor.2009.10.005>

Mohinder S. Grewal and Angus P. Andrews. Applications of Kalman filtering in aerospace 1960 to the present. *IEEE Control Systems Magazine*, 30(3):69–78, 2010. ISSN 08880611.

<https://doi.org/10.1109/MCS.2010.936465>

Ooi SK, Zemskyy P, Sisomphon P, Gerritsen H, Twigt D (2009) The effect of grid resolution and weather forcing on hydrodynamic modelling of South East Asian waters In: Proc of 33rd IAHR Congress, Vancouver, Canada, pp 3712-3719.

P. Courtier, J.-J. Thepaut, and A. Hollingsworth. A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 120, 1994.

<https://doi.org/10.1002/qj.49712051912>

R. E. Kalman. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 82(1):35, 1960. ISSN 00219223.

<https://doi.org/10.1115/1.3662552>

Rama Rao Karri, StefHummel, Ghada El Serafy, and Vladan Babovic. Data Assimilation for Water Levels and Currents in the Singapore Region: An Ensemble

از مشاهدات سطح آب موجود برای تصحیح پیش‌بینی‌ها استفاده می‌شود. در این زمینه، توسعه یک طرح همگون‌سازی موثر مورد نیاز است. در این مقاله، از یک آزمایش با استفاده از فیلتر گروهی کالمن جهت همگون‌سازی استفاده شد و مشخص گردید که استفاده از گروه ۴۰ برای همگون‌سازی، بهینه‌ترین نتایج را جهت پیش‌بینی سطح آب فراهم می‌کند؛ به طوری که افزایش بیشتر گروه‌ها منجر به بهبود ناچیزی در مدل می‌گردد اما زمان و حجم محاسبات را بسیار زیاد می‌کند. همچنین تاثیر خطای اندازه‌گیری ایستگاه‌های مشاهداتی و تاثیر خطای داده‌های ورودی به مرز باز نیز مورد بررسی قرار گرفت که تاثیر تغییرات در این خطاها به نسبت تغییرات گروه خیلی زیاد ارزیابی نگردید. به طور کلی، تجزیه و تحلیل فوق نشان می‌دهد که سطح آب پیش‌بینی‌شده توسط کوپل فیلتر گروهی کالمن و OpenDA نتایج رضایت‌بخشی، مخصوصاً در ایستگاه‌های مشاهداتی نشان می‌دهد و مقادیر نزدیک به مقادیر واقعی را پیش‌بینی می‌کند؛ بنابراین توصیه می‌شود که این روش بهینه‌سازی سطح آب برای خلیج فارس با ایستگاه‌های مشاهداتی بیشتر به کار رود.

منابع

Abbasi, M.R, Chegini, V., Sadrinassab, M., Siadatmousav, S.M., 2019. "Correcting the Sea Surface Temperature by Data Assimilation Over the Persian Gulf", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, Springer International Publishing, pp.141-149.

<https://doi.org/10.1007/s40995-017-0357-z>

Deltares. Delft3D-FM, 2016. URL <https://oss.deltares.nl/web/delft3dfm>.

Geir Evensen, Monte Carlo, and Monte Carlo. with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlomethods to forecast error statistics. 99, 199.

<https://doi.org/10.1029/94JC00572>

Kurniawan A, Ooi SK, Hummel S, Gerritsen H (2011) Sensitivity analysis of the tidal representation in Singapore Regional Waters in a data assimilation environment. *Ocean Dynam* 61 (8):1121-1136.

<https://doi.org/10.1007/s10236-011-0415-6>

- development for aerospace applications. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 4(1):4-7, 1981. ISSN 0731-5090. doi: 10.2514/3.19713.
- Thomas Hamill and Jeffrey Whitaker. Distance-Dependent Filtering of Background Error Covariance Estimates in an Ensemble Kalman Filter. pages 2776-2790, 2001.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<2776:DDFOBE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<2776:DDFOBE>2.0.CO;2)
- Yanfen Zhang and Dean S. Oliver. Improving the Ensemble Estimate of the Kalman Gain by Bootstrap Sampling. *Mathematical Geosciences*, 42(3):327-345, 2010. ISSN 18748961.
<https://doi.org/10.1007/s11004-010-9267-8>
- Steady State Kalman Filtering Approach. (July), 2012.
- Rama Rao Karri, Xuan Wang, and Herman Gerritsen. Ensemble based prediction of water levels and residual currents in Singapore regional waters for operational forecasting. *Environmental Modelling and Software*, 54(April):24-38, 2014. ISSN 13648152.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.006>
- Serpoushan, N, Mostafa Zeinoddini, M, Golestani, M., 2013: An ensemble kalman filter data assimilation scheme for modeling the wave climate in Persian Gulf, American Society of Mechanical Engineers, pp.V005T06A028-V005T06A028.
<https://doi.org/10.1115/OMAE2013-10399>
- S. F. Schmidt. The Kalman filter- Its recognition and