

کاربرد روش عکس‌العمل محلی با تابع وزنی در تعیین توپوگرافی سطح دریا، بررسی موردی: خلیج فارس

محمد رضا صلواتی زاده^{۱*} و علیرضا آزموده اردلان^۲

^۱ کارشناس ارشد نقشه‌برداری ژئودزی، گروه عمران نقشه‌برداری، دانشکده فنی دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران
^۲ دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری و قطب علمی مهندسی نقشه‌برداری و مقابله با سوانح طبیعی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۷/۳/۲۹، پذیرش نهایی: ۸۷/۱/۱)

چکیده

توپوگرافی سطح دریا (Sea Surface Topography (SST) بنا به تعریف، تفاوت بین ژئوئید و سطح متوسط دریا (Mean Sea Level (MSL) است. عوامل فیزیکی زیادی باعث ایجاد این تفاوت می‌شود، که اگر هدف تعیین ژئوئید به مثابه سطح مبنای ارتفاعی از راه مشاهدات تایدگیج باشد، لازم است اثر این عوامل به دقت محاسبه و از سطح متوسط دریا حذف شود. یکی از روش‌های بررسی عکس‌العمل دستگاهی فیزیکی در قلمرو زمان، فن عکس‌العمل محلی با "تابع وزنی" یا "تابع پاسخ ضربه" است. این تابع رابطه بین ورودی و خروجی یک دستگاه فیزیکی یا به عبارت دیگر عکس‌العمل دستگاه را به صورت تابعی از بسامد مشخص می‌سازد و بدین‌سان امکان مدل‌سازی تغییرات محلی دستگاه مورد نظر را به صورت نقطه‌ای می‌سازد. در تحقیق حاضر از مدل تابع وزنی و برای مدل‌سازی توپوگرافی سطح دریا در چهار ایستگاه‌های جزر و مدی و هواشناسی دریایی خلیج فارس استفاده شده است. براساس نتایج عددی حاصل، مقدار SST ناشی از عوامل جوی در فصل زمستان در این ایستگاه‌ها بین $+2$ تا منهای 82 سانتی‌متر متغیر بوده که مقدار کمینه مربوط به بندر شهید رجایی و بیشینه مربوط به بندر بوشهر است.

واژه‌های کلیدی: توپوگرافی سطح دریا، سطح متوسط دریا، تابع وزنی، تکنیک عکس‌العمل، توابع پاسخ ضربه

Application of the local response method with weight function for Sea Surface Topography computations Case study: Persian Gulf

Salavatizadeh, M. R.¹ and Ardalan, A. A.²

¹ Imam Hossein University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Tehran, Iran

² Associate professor, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Center of Excellence in Surveying Engineering and Disaster Management, University College of Engineering, University of Tehran, Iran

(Received: 18 Jun 2008, Accepted: 20 Jan 2009)

Abstract

Sea Surface Topography (SST) by definition is the separation between the geoid and the Mean Sea Level (MSL). The separation between the geoid and MSL is caused by various non-gravitational physical effects. If determination of the geoid as the zero point of the height systems from the tide gauge observation be the goal, it is necessary that the affect of the physical effect be precisely computed and removed from MSL. One of the methods used for the study of physical response of a system to environmental effects in time domain is the "local response with weight function" or "impact response function"

technique. The aforementioned function reveals the point-wise relation between the input and output of the physical system of interest, and in this way makes the point-wise modeling of the local variations of the system possible. In this study the weighted local response technique is used for SST computations in four tide gauge stations along the Persian Gulf, namely Shahid-Rajai Port, Kangan Port, Bushehr Port, Imam-Hasan Harbor, as well as the related meteorological stations. According to the numerical results, SST within the winter time in the studied stations varies between -82cm (in Bushehr Port) to +2cm (in Shahid-Rajai Port). The maximum SST value in Bushehr Port shows the reduction of the mean Persian Gulf level, while the minimum value of SST in Shahid-Rajai Port shows the rise of sea level due to SST in that area. This result is also in agreement with the geographical location of the two stations. Shahid-Rajai port being closer to the Oman Sea is dominantly affected by the topography of the Oman Sea and sea incoming currents to the Persian Gulf from the Oman Sea. Bushehr Port is farther away from the Oman Sea and as such is less affected by the Oman Sea currents. This finding is also reported in the previous studies over the region. Therefore, it can be concluded that SST computation using weighted local response technique is sufficiently accurate for the computation of SST and specially SST difference between the tide gauge stations.

Key words: Sea Surface Topography (SST), Mean Sea Level (MSL), Weight function, Response technique, Impact response functions

۱ مقدمه

عوامل وابسته به موقعیت یا مکان‌اند، SST از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت است (مری و ونیچک، ۱۹۸۱). یکی از روش‌های بررسی دستگاه‌های فیزیکی، فن عکس‌عملی محلی (Local Response Technique) است که آن را در این مقاله به اختصار LRT خواهیم نامید. به علاوه در این مقاله بر آنیم که این روش را جهت تعیین SST با آگاهی از عوامل ایجاد کننده آن به کار بندیم.

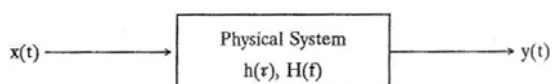
با به‌کارگیری LRT در مورد دستگاهی فیزیکی، عکس‌عمل آن دستگاه تحت تأثیر ورودی و پاسخ خروجی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و عکس‌عمل دستگاه به صورت تابعی از بسامد تعیین می‌شود. در این فن فرض بر معلوم بودن توابع ورودی و تابع خروجی است (بندات و پیرسول، ۱۹۷۱). از آنجا که MSL بسامد صفر جزر و مدی است، از عکس‌عمل دستگاه در بسامد صفر برای تعیین SST استفاده می‌شود.

ژئوئید (Geoid) که آن را گوس (Gauss) سطح ریاضی زمین نامید، سطح هم‌پتانسیلی از میدان گرانی زمین است به صورت کمترین مربعات، سطح متوسط دریا (MSL) را در مقیاس جهانی برآورد می‌کند. این سطح در خشکی‌ها از طریق حل مسائل مقدار مرزی و در دریاها از راه تعیین سطح متوسط دریا با استفاده از تایدگیج‌های ساحلی و یا مشاهده‌ها ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای پس از حذف اثر توپوگرافی سطح دریا (SST)، قابل محاسبه است. توپوگرافی سطح دریا (SST)، اختلاف ژئوئید از سطح متوسط دریا است (سیر، ۱۹۹۳) که به دلیل تأثیر عوامل گوناگونی همچون نیروی جاذبه ماه و خورشید، جریان‌های اقیانوسی (مانند گلف استریم)، تغییرات چگالی آب ناشی از شوری و درجه حرارت، تغییرات جوی مانند فشار هوا و درجه حرارت و باد ایجاد می‌شود. به علاوه در نزدیکی سواحل توپوگرافی کف دریا و تخلیه رودخانه‌ها به دریا نیز نقش مؤثری در ایجاد SST دارد. چون این

کرد (بندات و پیرسول، ۱۹۷۱). برای روشن‌تر شدن موضوع مدل یاد شده را برای دو حالت با ورودی‌های متفاوت مورد بررسی قرار می‌هیم.

حالت اول- ورودی یگانه:

فرض کنید، مانند شکل ۱، دستگاهی فیزیکی از یک ورودی و یک خروجی تشکیل شده باشد.



شکل ۱. دستگاه فیزیکی با یک ورودی و یک خروجی.

در آن صورت می‌توان نشان داد (مری و ونیچک، ۱۹۸۱) که تابع وزنی ساده‌ای همچون w_s قابل یافتن است، به‌طوری‌که:

$$y(t) = \sum_{s=-s}^s w_s x(t - S\Delta\tau) \quad (2)$$

در این فرمول تعداد دلخواهی تأخیر (حداکثر $1 + 2S$) و یک فاصله تأخیر ثابت ($\Delta\tau$) انتخاب شده‌اند. همچنین در این رابطه، w_s نشان‌دهنده وزن‌ها مجهول‌اند که در صورت معلوم بودن $x(t - S\Delta\tau)$ و $y(t)$ می‌توان آنها را از راه دستگاه معادلات (۲) به روش کمترین مربعات به‌دست آورد. به عبارت دیگر از راه روش کمترین مربعات می‌توان معادلات نرمال را برای تعیین w_s به‌صورت زیر تشکیل داد:

$$\langle x(t - S\Delta\tau), x(t - S\Delta\tau) \rangle w_s = \langle x(t - S\Delta\tau), y(t) \rangle \quad (3)$$

یا در شکل ماتریسی حل دستگاه معادلات نرمال فوق را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\mathbf{w}_s = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b} \quad (4)$$

با به‌دست آوردن w_s ، یا همان وزن‌ها یعنی (w_1, w_2, \dots, w_s) می‌توان تبدیل فوریه گسسته را برای تعیین تابع عکس‌العمل بسامد، یعنی $H(f)$ به کار برد:

برای بررسی SST در فن LRT، دریا درحکم دستگاهی فیزیکی در نظر گرفته شده و عوامل ایجاد کننده SST یا به عبارتی همان نیروهای خارجی وارده بر سطح آب دریا، درحکم توابع ورودی دستگاه و مشاهدات تایید گیج‌ها به‌مثابه تابع خروجی آن در نظر گرفته می‌شود. سپس، عکس‌العمل سطح دریا، یعنی تغییرات سطح دریا نسبت به MSL ناشی از عوامل ایجاد کننده SST به صورت تابعی از بسامد مدل‌سازی می‌شود. با استفاده از تابع عکس‌العمل در بسامد صفر مقدار SST در آن نقطه تعیین می‌شود. در نهایت با حذف مقدار SST از MSL می‌توان ارتفاع ژئوئید را به‌صورت نقطه‌ای به‌دست آورد (مری و ونیچک، ۱۹۸۱).

یکی از انواع LRT، تابع وزنی (Weighting Function) است که در این تحقیق آن را برای محاسبه SST با استفاده از اطلاعات هواشناسی و جزر و مدی در چهار ایستگاه واقع در خلیج فارس، به‌کار می‌بریم و نتایج حاصل را مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار خواهیم داد.

۱- تابع وزنی (Weighting Function)

عکس‌العمل (یا Response) یا پاسخ دستگاهی فیزیکی را می‌توان در قلمرو زمان و یا بسامد مدل‌سازی کرد. عکس‌العمل دستگاه فیزیکی در قلمرو زمان به صورت زیر تعریف می‌شود (مری و ونیچک، ۱۹۸۱):

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) x(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

در معادله فوق $h(\tau)$ تابع وزن یا تابع پاسخ ضربه است که خصوصیات دستگاه را توصیف می‌کند. این تابع مجهول و هدف، یافتن آن است. $x(t - \tau)$ تابع ورودی با تأخیر زمانی τ است. t پارامتر زمان است. در مدل تابع وزنی، سرآغاز بحث، انتگرال کانولیشن معادله (۱) بوده که به کمک آن می‌توان $h(\tau)$ را تعیین کرد و از طریق تبدیل فوریه، برای تعیین تابع عکس‌العمل بسامد استفاده

نهایی مجموع خروجی ورودی‌های چندگانه‌ای است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$y(t) = \sum_{j=1}^n y_j(t) \quad (۹)$$

اگر در رابطه (۹) در سمت راست تساوی رابطه (۲) را قرار دهیم خواهیم داشت:

$$y(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{S=-S}^{+S} w_{js} x_j(t - S\Delta\tau) \quad (۱۰)$$

در اینجا $j = 1, 2, \dots, n$ نشان‌دهنده n ورودی دستگاه است. با معلوم بودن $x_j(t - S\Delta\tau)$ و $y(t)$ می‌توان w_{js} را به روش کمترین مربعات به دست آورد. به عبارت دیگر از طریق روش کمترین مربعات می‌توان معادلات نرمال را برای تعیین w_{js} به صورت زیر تشکیل داد:

$$\sum_{j=1}^n \langle x_k [t - S\Delta\tau], x_j [t - S\Delta\tau] \rangle w_{js} = \langle x_k [t - S\Delta\tau], y [t] \rangle \quad (۱۱)$$

که در آن برای هر s ، k از ۱ تا n تغییر می‌کند. جواب معادلات نرمال پیش گفته را می‌توان به صورت برداری زیر نمایش داد:

$$w_{js} = A^{-1}b \quad (۱۲)$$

و سرانجام با در اختیار داشتن w_{js} وزن‌ها معلوم می‌شود و

$$H(f) = \sum_{S=-S}^S W_S e^{-i 2 \pi f S \Delta\tau} \quad (۵)$$

بدین ترتیب تابع عکس‌العمل بسامد در این حالت به صورت فوق به دست می‌آید. توجه، می‌توان تابع $H(f)$ را به دو قسمت موهومی و حقیقی تقسیم کرد:

$$\text{Re}(H(f)) = \sum_{S=-S}^S w_S \cos(2\pi f S \Delta\tau) \quad (۶)$$

$$\text{Im}(H(f)) = \sum_{S=-S}^{+S} w_S \sin(2\pi f S \Delta\tau)$$

در این حالت دامنه و فاز عکس‌العمل به صورت زیر به دست می‌آید:

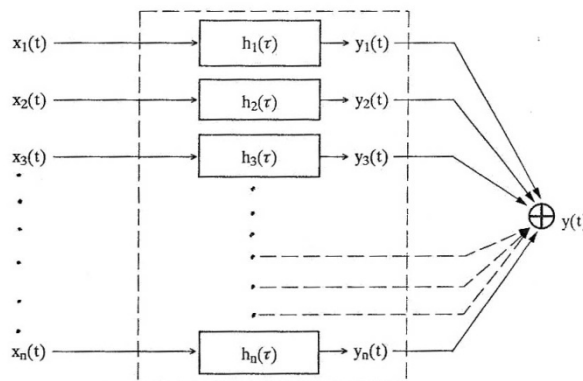
$$|H(f)| = \left[\text{Re} \left[(H(f))^2 \right] + \text{Im} \left[(H(f))^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۷)$$

$$\phi(f) = \arctan \left[\frac{\text{Im} [H(f)]}{\text{Re} [H(f)]} \right] \quad (۸)$$

حالت دوم- ورودی چندگانه:

حال فرض کنید که دستگاهی فیزیکی چندین ورودی و فقط یک خروجی داشته باشد، مانند شکل ۲.

در این حالت برای تعیین $H(f)$ همچون حالت پیشین از تابعی وزنی استفاده می‌کنیم، با این تفاوت که خروجی



شکل ۲. حالت ورودی چندگانه.

نتایج حاصل تأثیر خواهد گذاشت. ولی برای ایستگاه چهارم به علت زیاد بودن فاصله، به کارگیری روش با مشکل خطای سامانمند مواجه خواهد بود. به عبارت دیگر فاصله مکانی باعث تضعیف اثرات متقابل در دستگاه فیزیکی می‌شود. این مشکل به این علت پدیده آمده است که در نزدیکی ایستگاه جزر و مدی اسکله امام حسن (ع)، ایستگاه هواشناسی وجود نداشته و اجباراً در این تحقیق از داده‌های هواشناسی ایستگاه بوشهر دریایی استفاده شده است. به هر حال با مبنا قرار دادن ایستگاه‌های جزر و مدی، از داده‌های هواشناسی نزدیکترین ایستگاه هواشناسی برای هر ایستگاه جزر و مدی استفاده شده است. زوج ایستگاه‌های هواشناسی و جزر و مدی انتخاب شده به شرح زیرند:

ایستگاه ۱ (بندر شهید رجایی): شامل ایستگاه جزر و مدی شهید رجایی و ایستگاه هواشناسی بندرعباس.
ایستگاه ۲ (بندر کنگان): شامل ایستگاه جزر و مدی کنگان و ایستگاه هواشناسی بندر دیر.
ایستگاه ۳ (بندر بوشهر): شامل ایستگاه جزر و مدی بندر بوشهر و ایستگاه هواشناسی بندر بوشهر.
ایستگاه ۴ (اسکله امام حسن (ع)): شامل ایستگاه جزر و مدی اسکله امام حسن (ع) و ایستگاه هواشناسی بوشهر دریایی.

شکل ۳ موقعیت این ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد.

۳ پردازش داده‌ها

اطلاعات اولیه باید مورد پردازش قرار گیرد و آنگاه نتایج حاصل برای محاسبه‌های مربوط در مدل تابع وزنی مورد استفاده قرار گیرد. اطلاعات هواشناسی شامل: مشاهدات درجه حرارت، فشار جو و سرعت باد و اطلاعات جزر و مدی شامل مشاهدات جزر و مد دریا در هر ایستگاه است.

از راه تبدیل فوریه به صورت پیش گفته می‌توان تابع عکس‌العمل بسامد را به دست آورد.

$$H_j(f) = \sum_{S=-S}^{+S} W_{js} e^{-isrfs\Delta\tau} \quad (13)$$

در این تحقیق برای محاسبات از همین روش استفاده شده است.

۲ داده‌ها (Data)

برای بررسی عددی روش عکس‌العمل محلی با توابع وزنی در تعیین توپوگرافی سطح دریا، منطقه خلیج فارس انتخاب و اطلاعات در دسترس این منطقه شامل اطلاعات هواشناسی و جزر و مدی جمع‌آوری شد.

با توجه به نظریه ارائه شده، مشاهدات ورودی و خروجی می‌بایست در یک زمان مشخص و به طور همزمان و در یک ایستگاه اندازه‌گیری شوند، تا رفتار متقابل دستگاه قابل بررسی شود. بر این مبنا اطلاعات هواشناسی (در حکم مشاهدات ورودی) و اطلاعات جزر و مدی (به مثابه مشاهدات خروجی) لازم است از این ویژگی برخوردار باشند. اطلاعات فوق در فصل زمستان سال ۱۹۹۶ (مطابق ۱۳۷۴-۱۳۷۵ هجری شمسی) از ایستگاه‌های جزر و مدی و هواشناسی به شرح زیر جمع‌آوری شدند:

ایستگاه‌های جزر و مدی عبارت‌اند از: بندر شهید رجایی، بندر کنگان، بندر بوشهر و اسکله امام حسن (ع).

ایستگاه‌های هواشناسی عبارت‌اند از: بندرعباس، بندر دیر، بندر بوشهر و ایستگاه بوشهر دریایی.

اطلاعات مورد نظر در ایستگاه‌های پیش گفته از سوی دو سازمان هواشناسی و نقشه‌برداری جمع‌آوری شد، که از نظر مکانی و زمانی با یکدیگر تفاوت داشته‌اند اما تفاوت مکانی در سه ایستگاه کمتر از چند کیلومتر بوده است که می‌توان آن را برای به کارگیری روش در حد قابل قبول تلقی کرد. هر چند که این تفاوت به صورت یک نوبه بر

۴ محاسبه‌ها و نتایج

اکنون از داده‌های پردازش شده در مرحله قبل برای محاسبه استفاده می‌شود. این محاسبه‌ها شامل آنالیز داده‌ها، محاسبه مدل، تعیین توپوگرافی سطح دریا به مثابه نتیجه نهایی است. هر کدام از موارد فوق خود شامل چندین مرحله است که در ادامه شرح داده می‌شود.

۱-۴ آنالیز داده‌های اولیه

آنالیز داده‌ها به ترتیب زیر صورت می‌گیرد:

الف- بررسی دقیق داده‌ها: اولین مرحله رسم نمودار مشاهدات نسبت به زمان است. بعد از رسم نمودار سری‌های زمانی و بررسی دقیق داده‌ها، معلوم شد که همه سری‌ها دارای ترند خطی و تغییرات دوره‌ای، و بعضاً دارای نقاط پرت هستند. نقاط پرت (مشاهدات دور افتاده) با توجه به شرایط نرمال هر سری، اصلاح شدند. به علت وجود نوفه در مشاهدات، محاسبات یک‌بار برای داده‌های اولیه و یک‌بار هم برای داده‌های تعدیل شده صورت گرفته است. منظور از تعدیل داده‌ها، تغییر مقدار مشاهدات پرت و مشکوک به مقدار متعارف با توجه به مشاهدات سری‌های زمانی است. بنابر این دو نوع نتیجه به دست آمده که در ادامه ارائه خواهند شد.

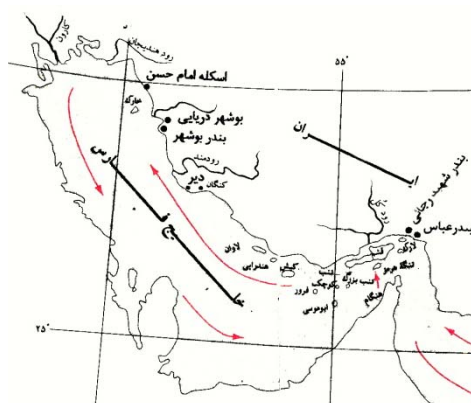
ب- تعیین بایاس دیتوم: دومین مرحله، تعیین میانگین مربوط به همه سری‌های ورودی و خروجی است که در حکم بایاس دیتوم از روی داده‌ها حذف شد. فرض کنید که تابع ورودی $x(t)$ و تابع خروجی $y(t)$ باشد حذف بایاس دیتوم به این ترتیب صورت می‌گیرد:

$$x_1(t) = x(t) - x \quad (15)$$

$$y_1(t) = y(t) - y \quad (16)$$

x و y میانگین داده‌ها هستند.

ج- تعیین ترند خطی: مشاهداتی که در مرحله قبل بایاس دیتوم از روی آنها حذف شد، اکنون می‌بایست ترند خطی



شکل ۳. موقعیت زوج ایستگاه‌های هواشناسی و جزر و مدی انتخاب شده برای این تحقیق در خلیج فارس.

در زیر به شرح پردازش‌های مربوط به اطلاعات هواشناسی و جزر و مدی به تفکیک خواهیم پرداخت.

الف- پردازش اطلاعات هواشناسی

این پردازش شامل موارد زیر است:

- استخراج اطلاعات مورد نیاز و حذف اطلاعات اضافی
- تبدیل زمان UTC (گرینویچ) به زمان محلی
- انترپوله کردن اطلاعات سه ساعته به منظور به دست آوردن اطلاعات نیم ساعته
- محاسبه مؤلفه‌های مماسی و نرمال فشار (یا نیروی) باد
- ذخیره کردن اطلاعات پردازش شده در یک فایل
- ب- پردازش اطلاعات جزر و مدی
- استخراج اطلاعات مورد نیاز و حذف اطلاعات اضافی
- مرتب کردن اطلاعات به ترتیب ساعت و روز اندازه‌گیری
- تبدیل واحد اندازه‌گیری
- ذخیره کردن اطلاعات پردازش شده در یک فایل
- اطلاعات مربوط به فصل پاییز برای اسکله امام حسن
- (ع) و اطلاعات فصل زمستان برای سایر ایستگاه‌ها مورد پردازش قرار گرفت. در انتهای این مرحله اطلاعات هواشناسی و جزر و مدی به صورت همزمان در هر ایستگاه مهیا شده و آماده استفاده در محاسبات‌اند.

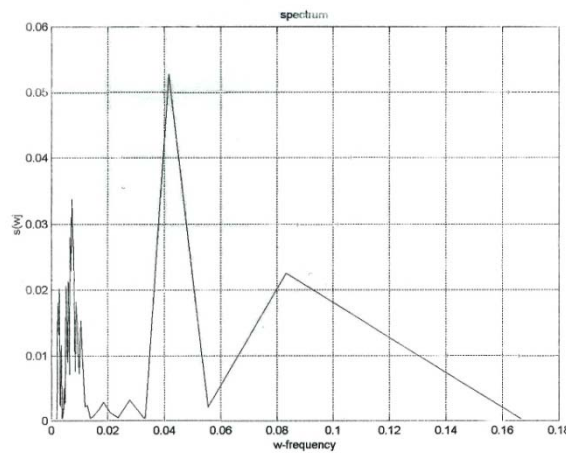
شناسایی و کشف شود و آن گاه به روش تکراری (یکی پس از دیگری) اثر آنها کاهش داده شود. بدین صورت که اثر نوفه سامانمند (یا همان بسامدهای غالب) کاهش می‌یابد، بدون آنکه موقعیت پیک‌های موجود در طیف تغییر کند. سرانجام از این سری داده‌های باقی‌مانده، که فاقد بایاس دیتوم، ترند خطی و نوفه سامانمند، برای محاسبات بعدی در مدل تابع وزنی استفاده می‌شود (مری و ونیچک، ۱۹۸۱). شکل‌های ۴ تا ۷ طیف فشار جو را نشان می‌دهند.

آنها نیز حذف شود. با حذف ترند خطی از روی بردار مشاهدات $X_1(t)$ که در مرحله قبل به دست آمده، خواهیم داشت:

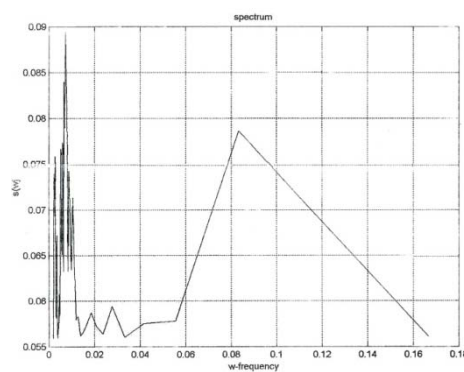
$$g(t) = x_1(t) - T(t) \quad (17)$$

g سری جدید داده‌هایی است که بایاس دیتوم و ترند خطی از روی آن حذف شده است.

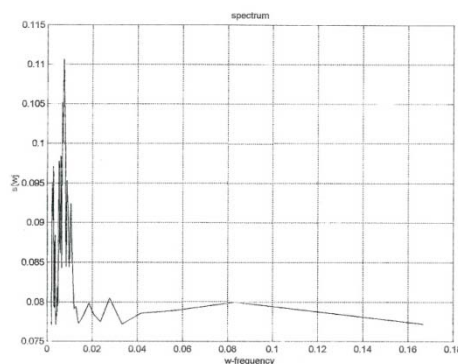
د- تعیین طیف: در انتها، طیف (spectrum) سری جدید g که در مرحله قبل به دست آمد، تعیین می‌شود. بسامدهای غالب در حکم نوفه سامانمند (systematic noise) تلقی می‌شود و می‌بایست این بسامدهای غالب در طیف



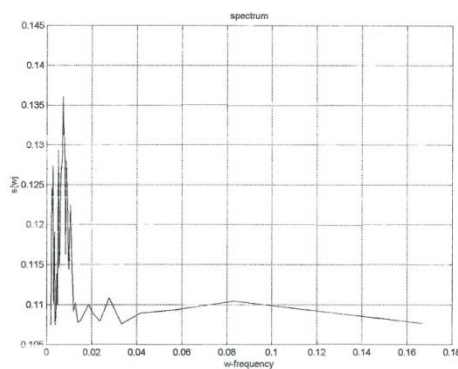
شکل ۴. طیف مماسی نیروی باد. در این شکل بسامد غالب برابر ۰.۰۴۱۷ ر است.



شکل ۵. طیف مؤلفه مماسی نیروی باد، بعد از حذف بسامد ۰.۰۴۱۷ ر. در این شکل بسامد غالب ۰.۰۸۳۳ ر است.



شکل ۶. طیف مؤلفه مماسی نیروی باد، بعد از حذف بسامد ۰.۰۸۳۳. در این شکل بسامد غالب، ۰.۰۶۷ ر است.



شکل ۷. طیف مؤلفه مماسی نیروی باد بعد از حذف بسامد ۰.۰۶۷. ظاهر شدن مجدد بسامد ۰.۰۶۷ نشان‌دهنده خاتمه روند حذف بسامدهای غالب است.

۲-۴ محاسبه مدل تابع وزنی

در مدل تابع وزنی تعیین تابع عکس‌العمل در بسامد صفر مستلزم چندین مرحله محاسبه است. در این مدل برای به‌دست آوردن تابع عکس‌العمل بسامد، با توجه به بحث نظری مطابق معادله (۱۴) برای هر چهار مشاهده ورودی محاسبه می‌شود. این مشاهدات عبارت‌اند از: درجه حرارت، فشار جو، مولفه مماسی نیروی باد و مولفه نرمال نیروی باد. عکس‌العمل بسامد صفر می‌تواند با برون‌یابی (extrapolating) دامنه توابع عکس‌العمل تعیین شود. اگر دامنه توابع عکس‌العمل با بسامد به آرامی تغییر کند، یعنی نمودار تغییرات آن هموار باشد، در آن

صورت برون‌یابی به طور مطمئنی صورت پذیرفته است و نتایج فاقد تشدید خواهند بود. عمل برون‌یابی با انطباق یک منحنی هموار بر دامنه توابع عکس‌العمل، با استفاده از "روش کمترین مربعات" و یک چند جمله‌ای جبری از درجه پایین صورت می‌پذیرد. در آخرین مرحله با انطباق چند جمله‌ای بر دامنه تابع عکس‌العمل بسامد، نتایج عددی عکس‌العمل دامنه بسامد صفر حاصل می‌شود. این نتایج در جدول ۱ و ۲ آمده است. جدول (۱) مربوط به نتایج حاصل بر مبنای داده‌های اولیه و جدول (۲) مربوط به نتایج حاصل از داده‌های تعدیل شده است.

جدول ۱. عکس‌العمل دامنه بسامد صفر حاصل از مدل تابع وزنی برای داده‌های اولیه.

ایستگاه‌ها	درجه حرارت m/°C	فشار جو m/mbar	تنش باد $m/10^{-3}N.m^{-2}$	
			مماسی	نرمال
بندر شهید رجایی	0.0277 ± 0.0074	0.5501 ± 0.0935	14.9105 ± 13.1458	17.8012 ± 13.1037
بندر کنگان	0.0707 ± 0.0684	0.2673 ± 0.3217	8.3836 ± 0.6910	5.9855 ± 14.2597
بندر بوشهر	0.3763 ± 0.2245	0.0545 ± 0.0736	6.2015 ± 0.8474	4.8615 ± 4.4182
اسکله امام حسن (ع)	0.2525 ± 0.0504	0.3927 ± 0.1623	11.8645 ± 14.8575	4.2638 ± 9.5777

جدول ۲. عکس‌العمل دامنه بسامد صفر حاصل از مدل تابع وزنی برای داده‌های تعدیل شده.

ایستگاه‌ها	درجه حرارت m/°C	فشار جو m/mbar	تنش باد $m/10^{-3}N.m^{-2}$	
			مماسی	نرمال
بندر شهید رجایی	0.0825 ± 0.2043	0.0769 ± 0.0883	15.5560 ± 4.3353	16.7972 ± 2.1780
بندر کنگان	0.0704 ± 0.0141	0.0641 ± 0.3556	8.3624 ± 0.1509	5.9176 ± 13.0901
بندر بوشهر	0.0664 ± 0.1192	0.0601 ± 0.0532	6.2503 ± 9.6782	5.0426 ± 8.9615
اسکله امام حسن (ع)	0.5731 ± 0.4944	0.3055 ± 0.1738	11.3791 ± 15.6871	4.5020 ± 1.9960

۳-۴ تعیین توپوگرافی سطح دریا

به منظور تعیین توپوگرافی سطح دریا، باید بی‌هنجاری محلی هر کدام از پارامترهای هواشناسی که باعث جدائی MSL از ژئوئید می‌شود را روشن ساخت. برای تعیین سهم اثر فشار جو و درجه حرارت در ایجاد SST از مقدار میانگین منطقه‌ای این پارامترها استفاده شده است. سپس با استفاده از روابط زیر:

$$\Delta P_0 = P - P_0 \quad (18)$$

$$SST = \Delta P_0 | H(f=0) | \quad (19)$$

سهم اثر هر پارامتر در ایجاد SST محاسبه و انحراف معیار مربوطه با استفاده از قانون انتشار خطاها تعیین می‌شود. در

اینجا P_0 مقدار میانگین منطقه‌ای و P مقدار میانگین مشاهدات در هر ایستگاه و ΔP_0 بی‌هنجاری محلی است. برای تعیین سهم اثر مؤلفه مماسی و نرمال نیروی باد، ابتدا مقدار میانگین مقادیر مؤلفه‌های محاسبه می‌شود و با ضرب آنها در $|H(f=0)|$ سهم اثر هر پارامتر در ایجاد SST به دست می‌آید و انحراف معیار آنها نیز با استفاده از قانون انتشار خطاها تعیین می‌شود.

از ترکیب مقادیر هر چهار پارامتر در ایجاد SST، مقدار اثر کل در هر ایستگاه به دست می‌آید. مقدار اثر کل، یعنی $SST \pm \sigma$ می‌بایست به MSL ایستگاه مربوطه اضافه شود. نتایج حاصل از این محاسبات در جدول‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است (مری و ونیچک، ۱۹۸۱).

جدول ۳. توپوگرافی سطح دریا حاصل از مدل تابع وزنی بر اساس داده‌های اولیه.

ایستگاه‌ها	درجه حرارت (m) SST _A	فشار جو (m) SST _P	تنش باد (m)		مقدار کل SST (m)
			مماسی SST _M	نرمال SST _N	
بندر شهید رجایی	-0.0193 ± 0.1118	0.0900 ± 1.8397	0.0099 ± 0.1783	-0.0561 ± 0.2807	-0.0247 ± 1.8724
بندر کنگان	-0.0544 ± 0.2365	0.1060 ± 0.9613	-0.01320 ± 0.3606	0.0244 ± 0.3783	0.0628 ± 1.1195
بندر بوشهر	-0.8398 ± 1.3998	-0.0015 ± 0.2190	0.0158 ± 0.1251	0.0037 ± 0.1101	-0.8219 ± 1.4266
اسکله امام حسن (ع)	0.9333 ± 1.0827	-0.2089 ± 1.5359	-0.3353 ± 0.9334	0.0781 ± 0.2645	0.4672 ± 2.1148

جدول ۴. توپوگرافی سطح دریا حاصل از مدل تابع وزنی بر اساس داده‌های تعدیل شده.

ایستگاه‌ها	درجه حرارت (m) SSTA	فشار جو (m) SSTP	تنش باد (m)		مقدار کل SST (m)
			مماسی SST _M	نرمال SST _N	
بندر شهید رجایی	-0.0595 ± 0.2866	0.0557 ± 0.2172	0.0103 ± 0.1811	-0.0529 ± 0.2621	-0.0463 ± 0.4804
بندر کنگان	-0.0542 ± 0.2298	0.0277 ± 0.2521	-0.0132 ± 0.3597	0.0242 ± 0.3734	-0.0155 ± 0.6206
بندر بوشهر	-0.1499 ± 0.3269	-0.0017 ± 0.2414	0.0159 ± 0.1284	0.0039 ± 0.1143	-0.1319 ± 0.4413
اسکله امام حسن (ع)	1.5555 ± 2.1820	-0.1625 ± 1.1965	-0.3216 ± 0.9142	0.0824 ± 0.2123	1.1538 ± 2.6597

۴-۴ تجزیه و تحلیل نتایج

اکنون نتایج به دست آمده از مدل تابع وزنی برای داده‌های اولیه را به تفکیک مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهیم.

برای این منظور از درجه حرارت آغاز می‌کنیم. نتایج نشان می‌دهند که پدیده تشدید در دامنه تابع عکس‌العمل مربوط به درجه حرارت ظاهر می‌شود به طوری که بعضاً باعث ناهموار شدن توابع شده است. لکن علی‌رغم آن، مقادیر دامنه تابع عکس‌العمل در بسامد صفر به همراه انحراف معیار آنها در حدود سانتی‌متر است. بیشترین مقدار عکس‌العمل دامنه بسامد صفر در بندر بوشهر و برابر $0.3763 (m/°C)$ بوده است (رجوع به جدول ۱). نتایج حاصل از تعیین SST نشان می‌دهد که سهم اثر درجه حرارت در ایجاد SST در حدود سانتی‌متر بوده و

بیشترین مقدار آن در فصل زمستان در بندر بوشهر به مقدار $-0.8398(m)$ رخ داده است (جدول ۳). به هر حال اثر درجه حرارت در منطقه، دارای نوسان است که در بندر بوشهر بیشترین تأثیر را در فصل زمستان دارد. با این حال مقادیر SST برای بندر شهید رجایی و کنگان و بندر بوشهر منفی است و این نشان‌دهنده آن است که اثر درجه حرارت در منطقه، باعث کاهش ارتفاع سطح آب دریا می‌شود. مقدار SST در اسکله امام حسن (ع) مربوط به فصل پاییز است. این نتایج مربوط به دوره‌ای سه ماهه بوده است و مسلماً به کارگیری این فن در بازه زمانی طولانی‌تر می‌تواند موجب حصول نتایج بهتر و دقیق‌تر شود.

فشار جو را درحکم پدیده فیزیکی دیگر، در نظر

اما نتایج حاصل از تعیین SST نشان می‌دهد که سهم اثر مؤلفه‌های مماسی و نرمال باد در ایجاد SST و مقدار انحراف معیار آن در حدود سانتی‌متر است که بیشترین مقدار مؤلفه مماسی در فصل زمستان در بندر بوشهر به مقدار $0.0158(m)$ است. همچنین بیشترین مقدار مؤلفه نرمال در فصل زمستان در بندر شهید رجایی به میزان $0.0561(m)$ - اتفاق افتاده است (جدول ۳). مقدار منفی مؤلفه مماسی نشان‌دهنده کاهش ارتفاع سطح آب خلیج فارس در اثر باد از طرف آب به خشکی و مقدار مثبت آن، عکس این حالت را نشان می‌دهد. مقدار SST در اسکله امام حسن (ع) مربوط به فصل پاییز است.

به هر حال توجیه نتایج حاصل از SST به تحلیل دقیق اثرات محلی تغییرات سرعت باد و حمل آب ناشی از آن نیاز دارد. توپوگرافی محلی ممکن است تحت تأثیر عکس‌العمل سطح آب دریا به نیروی باد و حتی نسبت به وسعت بادهای ساحلی، که موجب کشیدگی سطح آب به بالا می‌شوند، باشد.

حال که اثر هر یک از پدیده‌های فیزیکی یاد شده بر SST را به تفکیک ارائه کرده‌ایم، به اثر سهم کل آنها می‌پردازیم. سهم کل پارامترهای هواشناسی در ایجاد SST حاصل از مدل تابع وزنی از $+2$ تا -82 سانتی‌متر در فصل زمستان تغییر می‌کند. در واقع نتایج نشان می‌دهند که بیشترین مقدار SST در بندر بوشهر و کمترین مقدار آن در بندر شهید رجایی اتفاق افتاده است. بیشترین مقدار SST در بندر بوشهر نشان‌دهنده کاهش ارتفاع سطح آب خلیج فارس است در حالی که کمترین مقدار SST، در بندر شهید رجایی نشان‌دهنده افزایش ارتفاع سطح آب خلیج فارس است. نتیجه به‌دست آمده با وضعیت خلیج فارس مطابقت دارد چرا که بندر شهید رجایی که نزدیک دریای عمان است، بیشتر تحت تأثیر توپوگرافی دریای عمان و جریان آبی که از دریای عمان وارد خلیج فارس می‌شود، قرار دارد. در حالی که به لحاظ دور بودن بندر بوشهر از

می‌گیریم. دامنه توابع عکس‌العمل حاصل از فشار جو نشان می‌دهد که پدیده تشدید در دامنه توابع عکس‌العمل مربوط به این عامل نیز وجود دارد و باعث ناهموار شدن توابع شده است. مقادیر دامنه تابع عکس‌العمل در بسامد صفر برای فشار جو در حدود سانتی‌متر است که بیشترین مقدار آن در بندر شهید رجایی به مقدار $0.5501(m/mbar)$ رخ داده است (رجوع به جدول ۱). نتایج به‌دست آمده در مورد تعیین SST نشان می‌دهد که بیشترین مقدار آن در فصل زمستان و در بندر کنگان به میزان $0.1060(m)$ و در فصل پاییز در اسکله امام حسن (ع) برابر مقدار $0.2089(m)$ - است (جدول ۳). مقادیر مثبت SST در بندر شهید رجایی و کنگان نشان‌دهنده افزایش سطح آب خلیج فارس، و مقادیر منفی SST در بندر بوشهر و اسکله امام حسن (ع)، نشان‌دهنده کاهش ارتفاع سطح آب خلیج فارس در این منطقه است. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که اثر فشار جو در این منطقه دارای نوسان است.

نیروی باد را به‌مثابه عامل فیزیکی سوم در نظر می‌گیریم. مقادیر دامنه تابع عکس‌العمل در بسامد صفر برای مؤلفه مماسی باد و مؤلفه نرمال باد در حدود متر است. پدیده تشدید در توابع عکس‌العمل این عامل نیز ظاهر شده که مقدار آن قابل ملاحظه است. بیشترین مقدار دامنه عکس‌العمل بسامد در بندر شهید رجایی دیده می‌شود (رجوع به جدول ۱). در این مورد مقادیر تابع عکس‌العمل در بسامد صفر، بیش از حد انتظار است. این مسئله ممکن است ناشی از موارد زیر باشد:

- ۱- داشتن نویز در داده‌های هواشناسی.
- ۲- استفاده از اطلاعات روزانه در دوره‌ای سه‌ماهه. چرا که در چنین حالتی، دامنه تغییرات حرکت باد بسیار گسترده است.
- ۳- اثر نیروی کوریولیس روی باد یا به عبارتی مؤلفه‌های مماسی و نرمال باد.

دریای عمان، این بندر کمتر تحت تأثیر آن جریان قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر این جریان آب در بندر شهید رجایی سطح آب دریا را افزایش داده که با حرکت به سمت بندر بوشهر اثر آن تضعیف می‌شود. اما برای نتایج حاصل تحلیل دیگری نیز می‌توان به شرح زیر مطرح کرد:

خصوصیات فیزیکی و محیطی دریا از نقطه‌ای به نقطه دیگر دارای تغییراتی است و لذا عوامل ایجاد کننده SST از جمله توپوگرافی کف دریا، شکل ساحل، عمق آب، شوری آب و غیره در هر ایستگاه با ایستگاه دیگر متفاوت است.

بنابراین SST حاصل از مدل تابع وزنی، مدلی نقطه‌ای یا به عبارت دیگر مدلی محلی (local) است. یعنی SST حاصل مربوط به نقطه یا محلی است که مشاهدات در آنجا صورت گرفته است (مری و ونیچک، ۱۹۸۱).

همچنین مقدار انحراف معیار SST در نتایج حاصل بزرگ است که این امر ممکن است ناشی از عوامل متفاوتی به شرح زیر باشد:

۱- مدل‌سازی نشدن سایر عوامل که در ایجاد SST نقش دارند، از جمله توپوگرافی کف دریا، عمق آب، درجه حرارت آب دریا، نیروی جاذبه خورشید و ماه، بارندگی، اثر نیروی کوریولیس روی باد، تخلیه رودخانه به دریا، برای مثال تخلیه اروندرود به خلیج فارس، و مانند آن.

۲- تفاوت موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و جزر و مدی موجب می‌شود که دقیقاً مشاهدات جزر و مدی و هواشناسی نشان‌دهنده اثرات متقابل آنها بر سطح آب دریا نباشد. و به عبارت دیگر خروجی دستگاه دقیقاً ناشی از اثرات ورودی نیست و در نتیجه عکس‌العمل واقعی و دقیق دستگاه فیزیکی، یعنی آب دریا، را نتیجه نمی‌دهد. SST به‌دست آمده در اسکله امام حسن (ع) برای فصل پاییز ۴۶+ سانتی‌متر با انحراف

معیار بزرگ بوده است که می‌تواند ناشی از عوامل یاد شده باشد. البته تخلیه رودخانه اروندرود به خلیج فارس، شکل جغرافیایی اسکله امام حسن (ع) و دوره زمانی جمع‌آوری اطلاعات (فصل پاییز) نیز ممکن است از جمله دلایل دیگر باشند.

۳- همچنین وجود نوفه در مشاهدات ورودی و خروجی را می‌توان از عوامل مؤثر دانست (مری و ونیچک، ۱۹۸۱). نصب دستگاه تایدگیج (Tide Gauge) که مشاهدات خروجی یعنی جزر و مد را اندازه‌گیری می‌کند، در نزدیکی بنادر که محل تردد کشتی‌ها و فعالیت‌های ناوبری و دریایی است، احتمال وجود نوفه را در مشاهدات جزر و مدی افزایش می‌دهد. با این حال عوامل دیگر نیز ممکن است مؤثر باشند. دستگاه‌های اندازه‌گیری عوامل جوی در سطح آب دریا نصب نشده‌اند، بلکه در یک ارتفاع مشخص در بالای سطح زمین و در نزدیکی ساحل واقع‌اند و لذا این عوامل دقیقاً در سطح آب دریا اندازه‌گیری نمی‌شوند. این مسئله باعث تحمیل خطا یا نوفه به مشاهدات ورودی، یعنی عوامل جوی می‌شود. برای مثال درجه حرارت در سطح آب دریا با درجه حرارت در بالای سطح آب دریا تفاوت دارد. در تحقیقی جداگانه روشن شده است که اندازه‌گیری مقدار درجه حرارت در سطح آب دریا در ایستگاه بوشهر به کمک حسگر AVHRR با مقدار درجه حرارتی که با ایستگاه هواشناسی در ارتفاع دومتری از سطح دریا اندازه‌گیری شده، نیم درجه سلسیوس تفاوت دارد (فرج‌زاده، ۱۳۸۱). بنابراین، تفاوت ارتفاع بین محل دستگاه‌های اندازه‌گیری و سطح آب دریا، باعث ایجاد نوفه یا خطا در مشاهدات ورودی و به تبع آن نتایج خروجی می‌شود. علاوه بر این عوامل نباید اثر خطای ابزارهای اندازه‌گیری را فراموش کرد (مباشری، ۱۳۷۹).

حال به مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با کارهای دیگران خواهیم پرداخت. در این تحقیق سطح آب خلیج فارس در بندر شهید رجایی نسبت به سطح آب در بندر بوشهر بالاتر برآورد شد. به عبارت دقیق‌تر، محاسبات در بندر شهید رجایی سطح دریا همراه با افزایشی در حدود ۲ سانتی‌متر و در بندر بوشهر کاهش در حدود ۸۲ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. این نتیجه با نتایج حاصل از تحقیقات سازمان نقشه‌برداری کشور در رابطه با MSL سازگار است (تاج‌فیروز، ۱۳۷۴). در آنجا نشان داده شده است که MSL در بندر بوشهر پایین‌تر از MSL در بندر عباس است. مقایسه دیگر را می‌توان با نتایج صلواتی‌زاده و اردلان (۱۳۸۷) عملی ساخت که SST را با استفاده از مدل آنالیز طیفی متقابل به صورت محلی (local) محاسبه کرده‌اند. نتایج حاصل بر اساس داده‌های اولیه در این تحقیق با تحقیق صلواتی‌زاده و اردلان (۱۳۸۷) سازگاری کامل داشته و نتایج تفاوت اندکی دارند. در بندر بوشهر مقداری SST به‌دست آمده از هر دو تحقیق منفی است که نشان‌دهنده کاهش ارتفاع سطح آب است و هر دو نتایج با تفاوتی اندک مقدار SST را در حد دسی‌متر نشان می‌دهند. در بندر کنگان مقدار SST حاصل از دو روش مثبت بوده و در حدود سانتی‌متر است. به‌طور دقیق‌تر، SST حاصل از مدل تابع وزنی +۶ سانتی‌متر و از مدل آنالیز طیفی متقابل +۸ سانتی‌متر به‌دست آمده است. در بندر شهید رجایی مقدار SST حاصل از هر دو روش نشان‌دهنده افزایش سطح آب دریا در این ایستگاه با مقداری تفاوت است. در اسکله امام حسن (ع) مقدار SST حاصل از هر دو روش مثبت است که افزایش سطح آب در حدود دسی‌متر را نشان می‌دهد. مقدار SST از مدل تابع وزنی +۴۶ سانتی‌متر و از مدل آنالیز طیفی متقابل +۴۵ سانتی‌متر به‌دست آمده است. نتایج حاصل از داده‌های تعدیل شده نیز دارای همین توافق بوده‌اند، لکن مقادیر حاصل، بهبود قابل توجهی یافته‌اند.

۴- مسئله اثرگذار دیگر، وابستگی (correlation) عوامل فیزیکی تأثیرگذار بر سطح آب دریا است. برای نمونه فشار جو و حرارت و باد به هم وابسته‌اند و مستقل از یکدیگر نیستند (مری و ونیچک، ۱۹۸۱ و لیست، ۱۹۵۱) حال آن که ما در محاسبات، آنها را مستقل از یکدیگر فرض کرده‌ایم. معادله "حالت گازهای ایدئال" بیانگر این وابستگی است:

$$P = \delta_a (R / M) T \quad (20)$$

در این معادله P فشار جو، δ_a چگالی هوا، R ثابت عمومی گازها، M وزن مولکولی هوا و T درجه حرارت مطلق است (ونیچک، ۱۹۸۰). تغییرات چگالی هوا با باد ایجاد می‌شود و باد ناشی از تغییرات درجه حرارت و فشار هوا است. باد تحت اثر نیروی کوریولیس در نیم‌کره شمالی به سمت راست و در نیم‌کره جنوبی به سمت چپ مسیر حرکت خود منحرف می‌شود. و شتاب کوریولیس از عوامل ایجاد بادهای ژئوستروفیک در دریاها است (ونیچک، ۱۹۸۰). البته معادله فوق برای هوای خشک صادق است و برای هوای مرطوب معادله دیگری وجود دارد (ونیچک، ۱۹۸۰). لذا در این بررسی به اصلاح داده‌های ورودی و تصفیه و فیلترسازی آنها اقدام شد، که به آنها تحت عنوان داده‌های تعدیل شده اشاره می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود استفاده از این داده‌ها باعث بهتر شدن نتایج شده که خود مؤید نحوه اثر کیفیت داده‌های ورودی بر نتایج حاصل و توجیه‌کننده علت بزرگ بودن انحراف معیارهای حاصل است (جدول ۴). شکی نیست، که در صورت لحاظ کردن عوامل مدل‌سازی نشده به مجموع محاسبات، موجب حصول نتایج بهتر خواهد بود. با این وصف علی‌رغم دقت مطلق کم، نتایج به‌دست آمده از دقت نسبی زیادی برخوردار بوده است و بر این اساس تفاوت SST بین ایستگاه‌ها می‌تواند با اطمینان زیاد، مورد استفاده قرار گیرد.

همخوانی مقایسه نتایج حاصل از تحقیق حاضر با دو تحقیق دیگر، را می‌توان اثباتی بر صحت نتایج به‌دست آمده در تحقیق حاضر (مدل تابع وزنی) محسوب کرد.

۵ بحث و نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به دنبال تعیین عکس‌العمل سطح آب دریا نسبت به عوامل جوی مانند فشار جو، درجه حرارت و باد به کمک مدل تابع وزنی است و رفتار سطح آب دریا را با توجه به جزر و مد روزانه و نیم‌روزانه مورد بررسی قرار می‌دهد و به علاوه از عکس‌العمل بسامد صفر (Zero Frequency Response Technique) به منظور برآورد SST بهره برده است. روش حاضر را می‌توان روشی محلی (و نه مطلق)، با دقت نسبی زیاد، برای به‌دست آوردن SST به حساب آورد. منابع خطا در این روش را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- عوامل جوی به طور پیوسته در طول زمان بر سطح آب دریا اثر می‌گذارد اما مشاهدات به صورت گسسته و در نقاطی از زمان صورت گرفته است.

۲- انترپوله کردن اطلاعات هواشناسی، که در هر سه ساعت یک‌بار اندازه‌گیری شده‌اند، به مشاهداتی در فاصله زمانی نیم ساعت که مورد نیاز محاسبات این تحقیق است، خود منبع خطا است. لازم به توضیح است که در این روش هر چه فاصله زمانی بین مشاهدات کمتر باشد، به عبارت دیگر مشاهدات به حالت پیوسته نزدیک‌تر باشند، دقت نتایج بیشتر خواهد شد.

۳- وجود تفاوت ارتفاع بین محل نصب دستگاه‌های اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی و سطح آب دریا، که به صورت خطا یا نویز در مشاهدات وارد می‌شود.

۴- وجود تفاوت در موقعیت بین ایستگاه‌های جوی و جزر

و مدی.

۵- عوامل جوی به طور هم‌زمان بر سطح آب دریا اثر می‌کند و به‌علاوه دارای وابستگی (correlated) است (مری و ونیچک، ۱۹۸۱ و روبرت، ۱۹۵۱)، در حالی که این عوامل با فرض مستقل بودن، وارد محاسبات حاضر شده‌اند و لذا باعث ایجاد نوعی نوفه در اطلاعات می‌شوند.

۶- لحاظ نشدن سایر عوامل فیزیکی در مدل‌سازی SST. به غیر از دما، باد و فشار عوامل فیزیک بسیاری بر تغییرات سطح آب دریا اثر می‌گذارد، در حالی که در عمل مدل‌سازی بر پایه عوامل اصلی اثر گذارنده صورت می‌پذیرد.

۷- کاهش نوفه سامانمند طیف و تعیین طیف به کمک LSSA بدون خطا نیست.

۸- استفاده و تعیین مقدار میانگین منطقه‌ای فشار جو و درجه حرارت، بدون خطا نیست.

۹- خطای حاصل از محاسبه $H(f)$ با استفاده از تبدیل فوریه.

۱۰- خطای حاصل از برون‌یابی برای یافتن $|H(f=0)|$ با یک چندجمله‌ای از درجه کم.

نتیجه نهایی آن که علی‌رغم وجود همه عوامل یاد شده، تعیین SST به روش تابع وزنی، دارای دقت نسبی کافی است و می‌تواند تفاوت SST بین ایستگاه‌های جزر و مدی را که دارای کاربردهای زیادی در تحقیقات ژئودزی و ژئودینامیکی است را مهیا سازد.

تشکر و قدردانی

نگارندگان مقاله از دانشگاه تهران به خاطر حمایت از این تحقیق تحت طرح پژوهشی شماره ۸۱۵۱۰۰۷/۱/۰۳ و سازمان‌های نقشه‌برداری کشور و هواشناسی کشور که اطلاعات مورد این تحقیق را فراهم ساخته‌اند کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

تاج فیروز، ب.، ۱۳۷۴، تجزیه و تحلیل مشاهدات جزر و مدی و محاسبه سطح متوسط دریا (MSL) در ایستگاه‌های جزر و مدی سواحل خلیج فارس و دریای عمان. مجله نقشه‌برداری سال ششم، شماره ۴، چاپ سازمان نقشه‌برداری کشوری.

فرح‌زاده، م.، ۱۳۸۱، همایش ژئوماتیک ۸۱ سازمان نقشه‌برداری کشور.

مباشری، م.، ۱۳۷۹، آشنایی با فیزیک هوا، به نشر.

صلواتی‌زاده، م.، آزموده اردلان، ع.، ۱۳۸۷، کاربرد آنالیز طیفی متقابل در تعیین توپوگرافی سطح آب دریا، مطالعه موردی خلیج فارس. مجله فیزیک زمین و فضا،

(۱) ۳۴.

Bendat J. S., and Piersol A. G., 1971, Radom Data: Analysis and measurement procedures.

List R. J., 1951, Smithsonian meteorological tables. Meteorologist, Smithsonian Institute Press, Washington.

Merry C. L., and Vanicek P., 1981, The zero frequency response of sea level to meteorological influences. University of New Brunswick Fredericton, N.B. Canada.

Seeber G., 1993, Satellite Geodesy. Berlin, New York, de Gruyter 1993.

Vanicek P., 1980, Geodesy: The Concepts. North-Holland, Amsterdam, New York, Oxford, Tokyo.