



Journal of Environmental Studies

Vol. 47, No. 3, Autumn 2021

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir

Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Investigation of Flow Pattern in Gorgan Gulf Considering Changes in Water Level of the Caspian Sea and Using Numerical Model

Document Type
Research Paper

Abdollah Jafari¹, Mohammad Hossein Niksokhan^{2*}, Mohammad Reza Majdzadeh Tabatabai³

Received
August 19, 2021

Accepted
November 18, 2021

1 Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran

2 Department of Environmental Engineering, School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3 Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

DOI: [10.22059/JES.2021.331569.1008236](https://doi.org/10.22059/JES.2021.331569.1008236)

Abstract

The Caspian Sea is a completely closed sea in which tidal currents are very small. The declining water level of the Caspian Sea during the last 19 years has caused adverse effects through epeirogeny on the shallow shores of the Gulf of Gorgan, and there is a fear that in the coming years the limited connection of Gorgan Bay with the Caspian Sea to Cut to full length. In this study, the flow pattern in different layers for one year in Gorgan Bay was simulated by considering the changes in the water level of the Caspian Sea using the three-dimensional model Mike21 and the results were analyzed. The results showed that the general flow of the Caspian Sea is often counterclockwise. The western boundary flow is north to south, the parallel shore flow is on the south coast from west to east and the flow is on the east border from south to north. And due to Ekman's significant effect, the amount of flow velocity in the lower layers is reduced and the flow direction is also inclined to the right. In general, it can be said that the flow of the eastern border and the flow created parallel to the south coast has a significant effect on the flow pattern in Gorgan Bay.

Keywords: Gorgan Bay, flow pattern, water level, Mike21 model

* Corresponding Author

Email: niksokhan@ut.ac.ir

Introduction

Wetlands and gulfs are peculiar ecosystems comprising of both land and water habitats. This, gives rise to a rich biological diversity which seldom occur elsewhere on the planet. Unhappily, most of our wetlands countrywide have undergone massive negative changes during the recent years losing much of their surface and depth. These changes have been the result of multiple causes such as climate changes, decreased rainfall in line with increased evaporation, human activities such as dam construction. Our coastal wetlands have been affected by sea water level changes. Gorgan Gulf is the sole gulf in Iran that has been located in southern part of the Caspian Sea. It has been registered as biosphere reserve in Ramsar convention. The only permanent way that connects Gorgan Gulf to Caspian water is Ashoursdeh-Bandar Torkaman; a way with approximate width of 2500 meters and depth of at most 3.3 meters when the Caspian water level rises in northeast parts of the Gulf. Caspian water level may vary as a result of one or a combination of multiple factors such as: climate change, tectonic processes and human activities. The effect of each one is not the same as the other factors. Needless to say, that any alteration in Caspian level shall exert direct effect on Anzali wetland and river systems resulting in manipulation of morphology and animal life and even economy of the coastal areas. Furthermore, since wetlands are usually affected by seas and rivers, any change in sea and river dynamics shall definitely affect them as well.

Caspian Sea is the largest river in the world. There are plenty of wetlands and gulfs surrounding it. The change in its level by nearly 3 meters affected all the surrounding wetlands. Caspian is a closed sea with meager tides, and its current pattern has always been influenced by wind, river inlets, mass difference and waves. Frequency studies (focusing on numerical modeling using MIKE) has been conducted over this area. Various researches suggest that wind is the central factor creating current in Caspian Sea. Some studies put forward a particular model for the whole Caspian Sea, proving that Mike 21 is a highly helpful software for modeling wave height and wave periods. In this study, different layers of Gorgan Gulf current pattern for one year with inclusion of Caspian level changes using Mike 21 has been simulated and analyzed.

Materials and Methods

Case Study

Gorgan Gulf with geographical width of 36°, 37', 45" and geographical length of 53°, 5', 54" spreading over an area of 400 square kilometer with a triangular shape and nearly 60 km long and 12 km at most. It is westward in direction and its height is westward as well. It is separated from sea by Miankaleh border.

Model

Mike 21 hydrodynamic module was used for the purpose of studying Caspian current pattern. This module is the most basic model of Mike 21, and other modules of this model are dependent on the outcome of this module. This module is able to simulate water level changes and currents in two dimensions; therefore, it has the capability to study full details of a current in different spots. This model is helpful in studying the water level and current patterns of seas, rivers, gulfs and coastal areas which are affected by wind and tides. This module is also used to simulate combinational effects of such phenomena. It can model inconstant currents with inclusion of bed changes, mass changes and tide changes.

Discussion and Results

Implementation of the 3D current model

This model is able to solve the three-dimensional incompressible Navier-Stokes equations with the inclusion of Boussinesq approximation and hydrostatic pressure, using unstructured mesh. Unstructured meshes are better than rectangular structured meshes for the purpose of covering complicated borders such as coastal lines and islands borders. Horizontal unstructured mesh is a collection of 20 layers, perpendicular in direction, for sigma and z level system which uses 10 sigma layers for the distance between surface level up to -40 m, and 10 sigma layers from -40 to sea bed and 10 layers with fixed thickness (z level) 4-150. We use finite volume as our numerical methodology to solve equations.

This study covers the whole Caspian Sea. We use unstructured mesh to simulate currents. Mesh dimensions vary from 0.25 degrees in northern part to 0.01 degree in some spots of southern part. To layer the model vertically, sigma and z level system was applied. In the implemented current model, time step was fixed between 0.01 to 60 seconds.

Results demonstrate that Caspian currents are often counter-clockwise, which had previously been reported by some researchers as well. Western current is north-south and southern current (parallel to coast) is east-west, and eastern current is south-north. Current rate starts to fade in bottom layers, and current direction tends towards right due to Ekman transport. It can be seen in all seasons of the year. Furthermore, a current when is parallel to coast may be affected much more from topography. Sometimes currents may be deviated towards deep water as a result of being affected by bed. This can be observed in bottom layer more than elsewhere. Results indicated that overall Caspian current in western border more intensified in autumns, while weaker in eastern border. However, in winters, big storms take place and overall current becomes intensified in southern part of the Caspian Sea. In summers, which weather is often calm, currents are weak in central part of Caspian Sea, yet intensified in eastern border. It is evident that in Gorgan Gulf and surrounding area, where coast has low slop, wind pattern and topography of currents is weak and current rate begins to slow down in central and western parts. In southeast part of Caspian Sea, current rate and current direction reach to the least levels possible in various layers as a result of low depth and weak rate of currents. In this part, current layering cannot be observed.

Effect of Water Level on Surface Area of Gorgan Gulf

To study the effect of water level changes to Gorgan Gulf morphology, we study the effect of past year decrease of water level on Gorgan Gulf. We calculated Gorgan Gulf surface area for various years along with water levels. We found that water level has a nearly 15 cm of decrease; therefore we assumed a trend of 5 cm decrease in water level for Gorgan Gulf for the future. We extracted Caspian water level from the Anzali station records available.

Given the low depth of Gorgan Gulf as well as rather low slope in most parts of the Gulf, it can be anticipated that if water level continues to decrease, most part of gulf area and particularly gulf inlet (Chapgholi channel and Ashouradeh channel which connect Gorgan Gulf to Caspian Sea) shall undergo remarkable morphological alterations.

Conclusions

Generally, it can be suggested that the current has had a similar pattern during the first three months (Gregorian calendar) which occurs when current rate has the utmost rate in western spots of middle Caspian, yet the current has less intensity in western part. In these three seasons, current rate is very low and near to zero in various layers surrounding Gorgan Gulf. In June, July and August, it is observed that current starts to dominate in a direction parallel to the coast of Gorgan Gulf. This domination is evident in cold months as well. However, its intensity starts to fade when warm months approach. It is noteworthy this occurs in July as a result of both the coastal-parallel current and the effect of north-east current in eastern border.

Results indicate that the current in eastern border as well as the current risen parallel to southern coast have immense effect on current pattern of Gorgan Gulf. When the direction of the eastern border current is towards south-north, the intensity of the current inside the gulf starts to decrease, but when this direction is towards north-south, the current starts to dominate the gulf evidently. Also, when the current that is risen parallel to southern coast has noticeable intensity, part of this current penetrates to the gulf causing the gulf water to circulate. The coincidence of the eastern border current in north-south direction and the current risen parallel to southern coast exerts the highest effect on water circulation in Gorgan Gulf giving rise to the highest current rate in the gulf. As can be observed, in this situation and more decrease in water level and continuation of this situation for the future 5,10 and 20 years, it is anticipated that:

- For the next 5 years: low-depth part of the Gorgan Gulf in west part of the gulf becomes fully dry, yet the water connection between the Gorgan Gulf and Caspian Sea still survive and water starts to regress slightly in northern and southern coasts of Gorgan Gulf and inlet point.

- For the next 10 years: water connection between Gorgan Gulf and Caspian Sea starts to fade off and the areas surrounding inlet become dry. To keep the water connection between Gorgan Gulf and Caspian Sea and to improve the situation, it is necessary to dredge this part of the gulf and deepen other parts surrounding the inlet.
- For the next 20 years: water connection between Gorgan Gulf and Caspian Sea becomes fully dry with most parts of the Chapgholi channel fully dry. The width of the water area starts to shorten evidently. If so, the water area of Gorgan Gulf in wet years (1966) shall cover no more than 2/3 of the whole gulf.

In the meantime, given the disconnection between Gorgan Gulf and Caspian Sea (over 2000 mm per annum), the decrease of the water area begins to speed up. Having considered the above matters, Chapgholi channel must be dredge as soon as possible if we want to keep the water connection between Gorgan Gulf and Caspian Sea and save the Gorgan Gulf life.

بررسی الگوی جریان در خلیج گرگان با در نظر گرفتن تغییرات تراز سطح آب دریای خزر با استفاده از مدل عددی

عبدالله جعفری^۱، محمد حسین نیک سخن^{۲*}، محمد رضا مجدزاده طباطبایی^۳

۱ دانشجوی دکتری پردیس بین المللی کیش، دانشگاه تهران

۲ دانشیار دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران

۳ استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۸/۲۷

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۰/۵/۲۸

چکیده

دریای خزر یک دریای کاملاً بسته است که در آن جریانات حاصل از جزر و مد بسیار ناچیز می‌باشد. روند رو به کاهش تراز سطح آب دریای خزر در سالیان اخیر سبب پسروری آب دریا و خشک شدن بخشی از مناطق کم عمق در خلیج گرگان گردیده است و احتمال آن وجود دارد که در سال‌های نزدیک ارتباط محدود خلیج گرگان با دریای خزر به طول کامل قطع گردد. در این مطالعه، الگوی جریان در لایه‌های مختلف برای یک سال در خلیج گرگان با در نظر گرفتن تغییرات تراز سطح آب دریای خزر با استفاده از مدل سه بعدی Mike21 شبیه سازی و نتایج حاصله مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد، جریان کلی خزر در غالب مواقع به صورت پادساعتگرد است. نتایج مدل‌سازی ها نشان می دهد که با توجه به جهت وزش باد و هندسه دریای خزر، جهت جریان ناشی از باد در مرز غربی به صورت شمال به جنوب، و در سواحل جنوب خزر، جریان موازی ساحل از غرب به شرق و در مرز شرقی از جنوب به شمال است. از مقدار سرعت جریان در لایه‌های پایین کاسته شده و جهت جریان نیز به سمت راست متمایل می‌گردد که نتیجه گیری گردید تغییر ایجاد شده به دلیل اثر اکمن می باشد. با توجه به الگوی کلی جریان در دریای خزر، به طور کلی می‌توان بیان داشت جریان ناشی از باد در مرز شرقی و جریان ایجاد شده به موازات ساحل جنوبی اثر قابل توجهی بر الگوی جریان در خلیج گرگان دارد.

کلید واژه

خلیج گرگان، الگوی جریان، تراز سطح آب، مدل Mike21

سرآغاز

بارش و افزایش تبخیر، فعالیت‌های انسانی مانند سدسازی بوده اند و در خصوص تالاب‌های ساحلی، می‌توانند تحت تاثیر تغییرات تراز آب دریاها باشند (Hamzeh et al, 2017) و (Ataie et al., 2018). همچنین خلیج گرگان تنها خلیج ایران در سواحل جنوبی دریای خزر می‌باشد که در کنوانسیون رامسر به عنوان ذخیره‌گاه زیست‌کره به ثبت رسیده است. (Goodwin et al., 2017) تنها راه ارتباطی مستمر خلیج گرگان با آب‌های دریای خزر دهانه آشوراده- بندرترکمن با عرض تقریبی ۲۵۰۰ متر و حداکثر عمق ۳/۳

تالاب‌ها و خلیج‌ها، اکوسیستم‌های منحصربه‌فردی هستند که در آنها هر دو سکونتگاه خشکی و آبی در هم آمیخته است. وجود این دو اکوسیستم در کنار هم، سبب ایجاد تنوع بیولوژیکی غنی شده است که در سایر مناطق کره زمین به ندرت دیده می‌شود. متأسفانه در سال‌های اخیر بیشتر تالاب‌های کشور دست‌خوش تغییرات منفی زیادی شده‌اند و سطح و عمق آنها کاهش چشمگیری داشته است. این تغییرات متأثر از عوامل مهمی مانند تغییر اقلیم و کاهش

جریان در این پهنه آبی می‌باشد. از جمله این مطالعات می‌توان به ایبرایف و همکاران اشاره کرد که یک مدل سه‌بعدی بر اساس معادلات مقدم در دستگاه مختصات دکارتی با آرایه قائم Z را برای مطالعه گردش فصلی و تغییرات توده آب دریای خزر تحت تأثیر شار گرمی، مومنتم و گرما توسعه دادند (Ibrayev et al., 2010). نتایج مطالعه ای نشان می‌دهد که چرخه فصلی تنش باد نقش تعیین کننده‌ای در تولید گردش آب در این حوضه دارد. از جمله نتایج این تحقیق می‌توان به پدیده فراجوشی در طول سواحل شرقی خزر میانی، جریانات غالب شمال به جنوب در طول سواحل شرقی و غربی خزر جنوبی و همچنین حساسیت بالای جریان به سرعت و جهت باد در مناطق کم عمق خزر شمالی اشاره کرد (Shiea et al., 2016). رورده و همکاران در سال ۱۳۹۲ با استفاده از نرم افزار مایک منطقه مورد مطالعه را مدل‌سازی کرده و به این نتیجه رسیدند که حداکثر ارتفاع امواج با فاصله گرفتن از خط ساحلی در آب‌های با عمق ۱۵ متر، به بالای ۲ متر می‌رسد و با نزدیک شدن به دهانه ورودی خلیج گرگان، ارتفاع امواج به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد و نهایتاً در داخل خلیج، امواج قابل ملاحظه‌ای دیده نمی‌شود. جهت رانه ساحلی در سواحل میانکاله از سمت غرب به سمت شرق است. حداکثر سرعت جریانی که در منطقه رخ می‌دهد، در منطقه شکست موج و در ادامه به سمت خط ساحلی تا ۵ سانتیمتر بر ثانیه ایجاد می‌شود و کمترین سرعت جریان در مناطق دورتر از خط ساحلی به سمت آب‌های نیمه عمیق و عمیق رخ می‌دهد (رورده و همکاران، ۱۳۹۲).

در پژوهشی دیگر که توسط کیایی در سال ۱۳۹۳ با استفاده از نرم‌افزار مایک و ماژول *model couple FM* صورت پذیرفت، پژوهشگر با استفاده از این ماژول اقدام به مدل‌سازی جریانات و انتقال رسوب در دهانه‌ها کرد که نتایج مدل حاکی از کارآمدی این ماژول در مدل‌سازی نحوه انتقال رسوب و نحوه توزیع جریان در دهانه است. (Kiaei, 2014). همچنین خیرآبادی و همکاران در پژوهشی به

متر در سال‌های افزایش تراز سطح آب دریای کاسپی در شمال شرقی خلیج می‌باشد (یاری نسب و همکاران، ۱۳۹۲). حوضه خزر بعد از جدا شدن از دریا‌های باز در زمان پلیوسن بصورت دریاچه درآمد و از آن زمان مجموعه‌ای از فعالیت‌های زمین ساختی، نوسان تراز آب، اثر موج و جریان‌های ناشی از آن و رودخانه‌ها مورفولوژی آن را بصورت کنونی پدید آوردند (علیزاده لاهیجانی و نادری، ۱۳۸۴). تغییر در سطح دریای خزر ممکن است در نتیجه یک عامل یا ترکیبی از عوامل مختلف باشد: تغییر اقلیم، فرآیندهای تکتونیکی و فعالیت انسان. تأثیر هر یک از این عوامل به عنوان یک عامل مؤثر در کل تغییرات سطح آب به یک اندازه نیست بدیهی است هرگونه تغییر بر روی دریای خزر تاثیر مستقیمی بر خلیج گرگان و عملکرد سیستم‌های رودخانه‌ای می‌گذارد. تغییر در چنین زیستگاه‌هایی اثرات مستقیمی بر روی مورفولوژی و حیات جانوری و حتی اقتصاد ساحل‌نشینان خواهد داشت. همچنین با توجه به اینکه تالاب‌ها معمولاً تحت تاثیر متغیرهای دریایی و رودخانه‌ای می‌باشند و تغییرات در دینامیک دریا و رودخانه بر روی آنها اثر می‌گذارد، مساحت تالاب تحت تأثیر نوسانات دریای خزر و پیشروی و پسروی آب این دریا قرار دارد (زبردست و جعفری، ۱۳۸۹).

دریای خزر بزرگترین دریاچه جهان است که در حاشیه ی آن تالاب‌ها و خلیج‌های متعددی تشکیل شده است. با توجه به اینکه دریای خزر در قرن بیستم حدود ۳ متر تغییر تراز داشته است، همه این تالاب‌ها تحت تاثیر تراز آب این دریا هستند (Jeihouni et al., 2019). دریای خزر یک دریای به طور کامل بسته است که در آن جزر و مد و جریانات حاصل از آن بسیار ناچیز می‌باشد و الگوی جریان در این حوضه تحت تاثیر عواملی چون باد، ورودی رودخانه‌ها، اختلاف چگالی و امواج تشکیل می‌شود. تحقیقات فراوانی (با تأکید بر مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار مایک) در منطقه انجام شده است.

مطالعات مختلف نشان می‌دهد که باد عامل اصلی ایجاد

بوده و طول آن حدود ۶۰ کیلومتر و بیشترین پهنای آن ۱۲ کیلومتر است. خلیج از شرق به غرب کشیده شده و رأس آن در غرب قرار داشته و حاشیه‌ی باریک و دراز میانکاله آن را از دریا جدا می‌سازد. بیش‌ترین عمق آن در حوالی جنوب شرقی ۵ متر و کمترین آن در ناحیه غربی در حدود ۱ متر می‌باشد. اتصال خلیج با دریا در گذشته به وسیله ۴ کانال متشکل از ۳ جزیره آشوراده و شبه جزیره میانکاله بوده است ولی امروزه تنها یک کانال در بین بندرترکمن و رأس شبه جزیره یعنی همان جزیره کوچک آشوراده قرار دارد بقیه کانال‌های مزبور به دلیل پایین آمدن سطح آب دریا خشک گردیده و جزایر آشوراده به شبه جزیره میانکاله متصل گردیده‌اند و دیگر جزیره‌ای وجود ندارد. دهانه خلیج باریک و اندازه آن ۷۰۰ متر است که در جهت شرق با دریا در ارتباط است. جنوب و غرب خلیج، دشت وسیعی قرار دارد که بیشتر آن را زمین‌های زراعی و دامداری فراگرفته است. بستر خلیج در قسمت‌های شرقی-جنوبی و غربی باتلاقی است و رودخانه‌های کوچک زیادی که از کوه‌ها جنوبی سرچشمه می‌گیرند به آن می‌ریزد. (شکل ۱) شرایط فعلی هیدروگرافی خلیج گرگان را نشان می‌دهد.

خلیج گرگان در سال ۱۳۵۴ به همراه تالاب میانکاله به عنوان نخستین مجموعه تالاب بین‌المللی جهان در فهرست تالاب‌های کنوانسیون رامسر به ثبت رسیده است. خلیج گرگان و نواحی اطراف آن شامل شبه جزیره میانکاله و تالاب بین‌المللی گُمیشان، مجموعه‌ای ارزشمند محیط‌زیستی می‌باشد. همچنین خلیج گرگان بخشی از پناهگاه حیات وحش میانکاله محسوب می‌شود (Goodwin et al., 2017).

مدل مورد استفاده

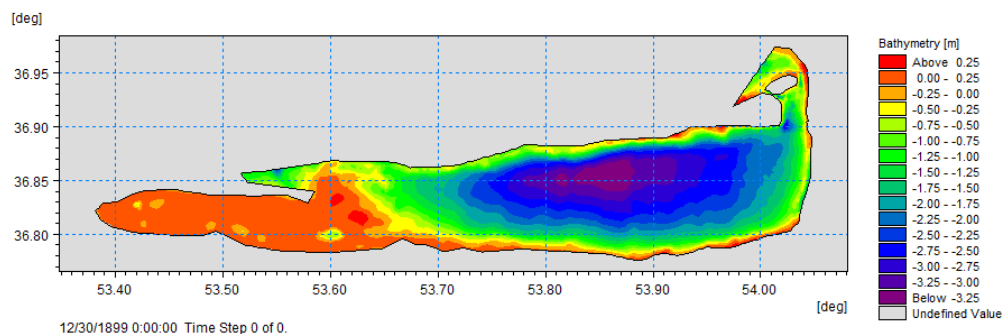
به منظور شناخت الگوی جریان دریای خزر، از مدول هیدرودینامیک نرم افزار Mike21 استفاده شده است. مدول هیدرودینامیک از پایه‌ای‌ترین مدول‌های مدل ریاضی

مطالعه یک مدل هیدرودینامیکی برای بازسازی جریانات سطحی در خلیج گرگان پرداختند (Kheirabadi et al., 2018)، در پژوهشی که شربتی در سال (۱۳۹۵) با نرم افزار مایک ۲۱ به انجام رساند، به این نتیجه رسید که خلیج گرگان در تراز منفی ۲۷/۶ متر عملاً هیچگونه ارتباطی با دریای کاسپین نخواهد داشت (شربتی، ۱۳۹۵). شربتی همچنین شبیه‌سازی الگوی جریان خلیج گرگان را با استفاده از نرم افزار مایک ۲۱ در سال (۱۳۹۰) انجام داد، در این مطالعه نوسانات تراز سطح آب دریای خزر به عنوان داده مرزی به مدل معرفی شد و در نهایت الگوی جریان به صورت پادساعتگرد در خلیج گرگان نتیجه گیری شد. ضمناً در این مطالعه حرکت رسوبات در خلیج گرگان از غرب به شرق گزارش گردید و همچنین ابعاد مش محاسباتی ۷۵ متر در نظر گرفته شده بود (شربتی، ۱۳۹۰). در مطالعه‌ای دیگر، شربتی و شعبانی (۱۳۹۳) اثر بازگشایی کانال خوزینی بر الگوی عمومی جریان در خلیج گرگان را بررسی نمودند و نتیجه گیری نمودند که بازگشایی کانال خوزینی تأثیری بر الگوی جریان در خلیج گرگان نداشته و الگوی جریان تحت تأثیر دبی ورودی و خروجی در دهانه آشوراده، بندر ترکمن و کانال خوزینی است (شربتی و شعبانی، ۱۳۹۳). در این مطالعه با استفاده از مدل سه بعدی Mike21 الگوی جریان در لایه‌های مختلف برای یکسال شبیه سازی و نتایج حاصله مورد تحلیل قرار گرفت. در تحقیق حاضر سعی شده است الگوی جریان در لایه‌های مختلف برای یکسال در خلیج گرگان با در نظر گرفتن تغییرات تراز سطح آب دریای خزر با استفاده از مدل سه بعدی Mike21 شبیه‌سازی و نتایج حاصله مورد تحلیل قرار بگیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

خلیج گرگان بین عرض جغرافیایی "۴۵، ۳۷، ۳۶" و طول جغرافیایی "۵۴، ۵، ۵۳" واقع شده است. مساحت کلی آن ۴۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد شکل آن سه گوش



شکل ۱. شرایط فعلی هیدروگرافی خلیج گرگان

$$f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S$$

رابطه ۳

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S$$

\bar{u} و \bar{v} سرعت‌های انتگرال‌گیری شده در عمق هستند که

از روابط ۳ و ۴ بدست می‌آیند:

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \quad \text{رابطه ۴}$$

$$h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad \text{رابطه ۵}$$

T_{xx} ، T_{xy} و T_{yy} تنش‌های جانبی با استفاده از

ویسکوزیته گردابی بر اساس گرادیان سرعت‌های

متوسط‌گیری شده در عمق بدست می‌آیند.

رابطه ۶

$$\tau_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \cdot \tau_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \cdot \tau_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}$$

رابطه انتقال برای کمیت اسکالر \bar{C} مقدار متوسط

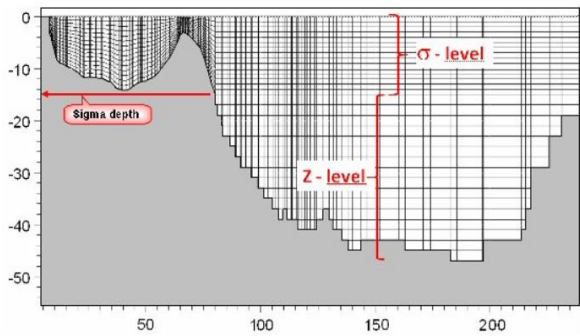
کمیت اسکالر در عمق):

Mike21 می‌باشد و سایر مدول‌های این مدل به نوعی به نتایج حاصل از اجرای این مدول نیازمند می‌باشند. این مدول قادر به شبیه‌سازی تغییرات سطح آب و جریان‌ها به صورت مقادیر متوسط عمقی در دو بعد می‌باشد؛ و بنابراین توانایی بررسی کامل و با جزئیات شرایط جریان در نقاط مختلف را فراهم می‌سازد. وضعیت تراز سح آب و الگوی جریان در دریاها، دریاچه‌ها، خورها، خلیج‌ها و مناطق ساحلی که ناشی از پدیده‌های مختلف همچون باد، موج و جزر و مد می‌باشند و نیز شبیه‌سازی اثرات ترکیبی این پدیده‌ها، بوسیله این مدول قابل بررسی است. این مدول قادر به مدل‌سازی جریان غیر دائمی با در نظر گرفتن تغییرات بستر، تغییرات چگالی و همچنین تغییرات جزرومدی است.

این مدل بر اساس حل روابط دوبعدی افقی جریان آب کم‌عمق که در واقع روابط جریان متوسط‌گیری شده در عمق هستند، استفاده می‌شود. با انتگرال‌گیری از روابط مومنوم و پیوستگی در عمق $(h = \eta + d)$ روابط دوبعدی آب کم‌عمق بدست می‌آید (Simons, 1974):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = \quad \text{رابطه ۲}$$



شکل ۲. شبکه ترکیبی سیگما و z-level

همانطور که در (شکل ۳) مشاهده می‌شود سطح سرعت‌های موازی ساحل از بزرگی قابل توجهی برخوردار نیستند و در محدوده میانی خزر سرعت‌های نزدیک به ۱ متر بر ثانیه با جهت شمال به جنوب حاکی از شکل‌گیری یک طوفان دارد. در بخش جنوبی جهت جنوب به شمال جریان مشاهده می‌گردد. سرعت جریان در لایه‌های زیرین با مقدار قابل توجه کاهش به ۰/۶ متر بر ثانیه رسیده و در لایه نزدیک بستر به میزان کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه می‌رسد. جهت‌های جریان نیز تا حدی به سمت راست متمایل شده‌اند.

در ماه فوریه سرعت‌های بالای جریان با بزرگی ۰/۶ متر بر ثانیه در محدوده خزر میانی مشاهده می‌گردد. ضمناً سرعت جریان‌های موازی ساحل در سواحل جنوبی به ۰/۵ متر بر ثانیه میرسد. تغییر جهت بردارهای سرعت به سمت راست در لایه‌های پایین تر مشاهده می‌گردد. در این ماه در محدوده غربی خزر جریان‌ها شدت کمتری نسبت به بخش شرقی دارا می‌باشند. سرعت جریان در محدوده خلیج گرگان با توجه به هندسه و موقعیت خلیج و نیز عمق کم آب بسیار کم و در حدود ۰/۰۴ متر بر ثانیه در سطح تا ۰/۰۲۵ متر بر ثانیه در لایه ۱۲ سیگما می‌رسد.

در ماه مارس جهت جریان‌های موازی ساحل در این ماه از غرب به شرق می‌باشد. جریان موازی ساحل در محدوده کیشهر به سمت آب عمیق منحرف می‌شود. این امر در لایه پایین مشهودتر می‌باشد و به نظر می‌رسد در لایه‌های پایین تر اثر توپوگرافی بر جهت جریان اهمیت

رابطه ۷

$$\frac{\partial h\bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{C}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{C}}{\partial y} = hF_c - hk_p\bar{C} + hC_sS$$

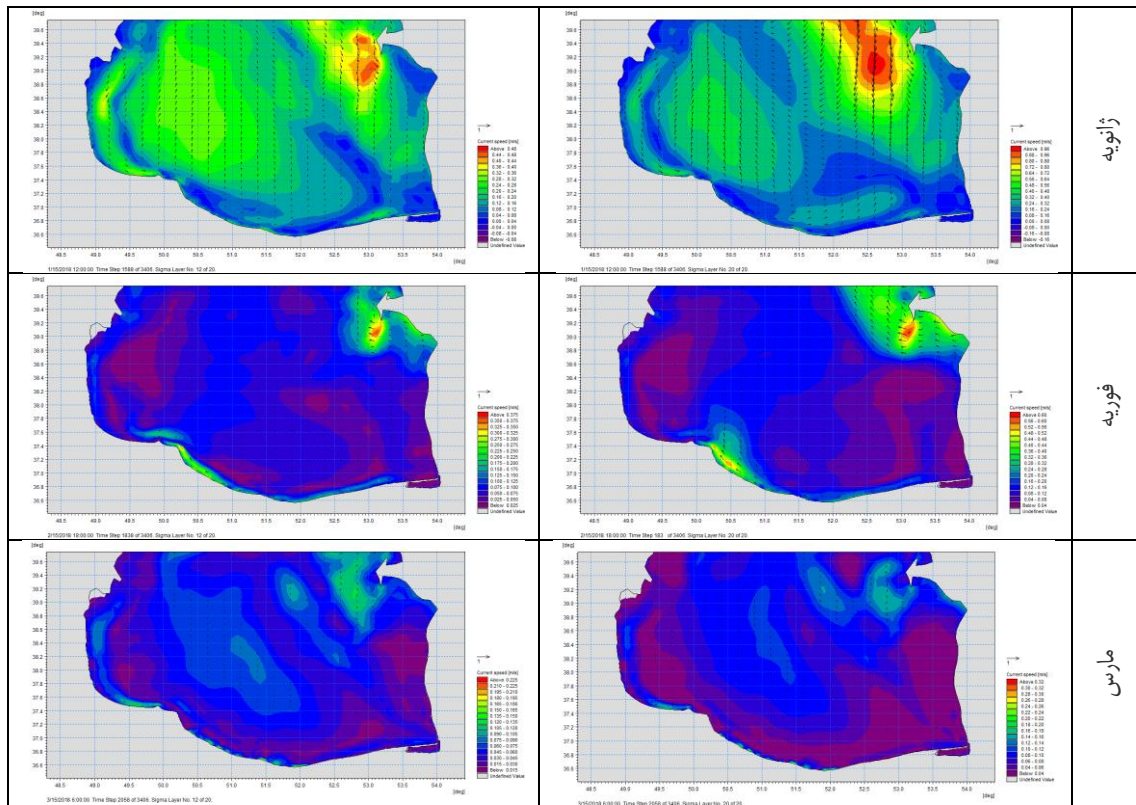
مدل MIKE3-FM روابط ناویراستوکس سه‌بعدی تراکم‌ناپذیر را با فرض بوزینسک و فشار هیدرواستاتیک حل می‌نماید. شبکه‌بندی مورد استفاده در راستای افقی به صورت نامنظم (بدون ساختار) است. شبکه‌های نامنظم به منظور پوشش دادن مرزهای پیچیده مانند خطوط ساحلی و مرزهای اطراف جزیره مناسبتر از شبکه‌های منظم (دارای ساختار) مستطیلی هستند. شبکه‌بندی افقی نامنظم، لایه‌بندی در راستای قائم سیستم ترکیبی سیگما-تراز z (sigma and z level) با ۲۰ لایه قائم است که از تراز سطح تا تراز -۴۰ متری از ده لایه سیگما و از تراز -۴۰ تا بستر دریا از ۱۰ لایه با ضخامت ثابت (z level) با ضخامت‌های ۴ تا ۱۵۰ استفاده شده است. روش عددی مورد استفاده برای حل روابط به صورت حجم محدود است.

نتایج

اجرای مدل سه بعدی جریان

محدوده مورد مطالعه شامل کل دریای خزر است. به منظور شبیه‌سازی جریان از شبکه نامنظم استفاده شده است. ابعاد شبکه در محدوده مورد مطالعه از ۰/۲۵ درجه در نواحی شمالی تا ۰/۰۱ درجه در برخی مناطق از سواحل جنوبی تغییر می‌کند. برای لایه‌بندی قائم مدل، از سیستم ترکیبی سیگما-تراز z استفاده شده است (شکل ۲). در مدل جریان اجرا شده بر اساس مشخصات حل عددی روابط، مقدار گام زمانی محاسبات بین ۰/۰۱ تا ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

برای تحلیل نتایج خروجی سرعت جریان روز ۱۵ هر ماه در دو تراز سطح، لایه سطح و بستر (۱۲ سیگما) در (شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶) برای تمامی ماه‌های سال ارائه شده است. در نتایج اثر اکمان قابل توجه بوده و سرعت جریان از سطح تا عمق کاهش می‌یابد.



چپ: لایه مجاور بستر (۱۲ سیگما)

راست: لایه سطحی

شکل ۳. الگوی جریان در خزر جنوبی و خلیج گرگان برای ماه‌های (ژانویه، فوریه و مارس ۲۰۱۸)

برخوردار است. در این سه فصل سرعت جریان در لایه‌های مختلف اطراف خلیج گرگان بسیار کم و نزدیک به صفر می‌باشد.

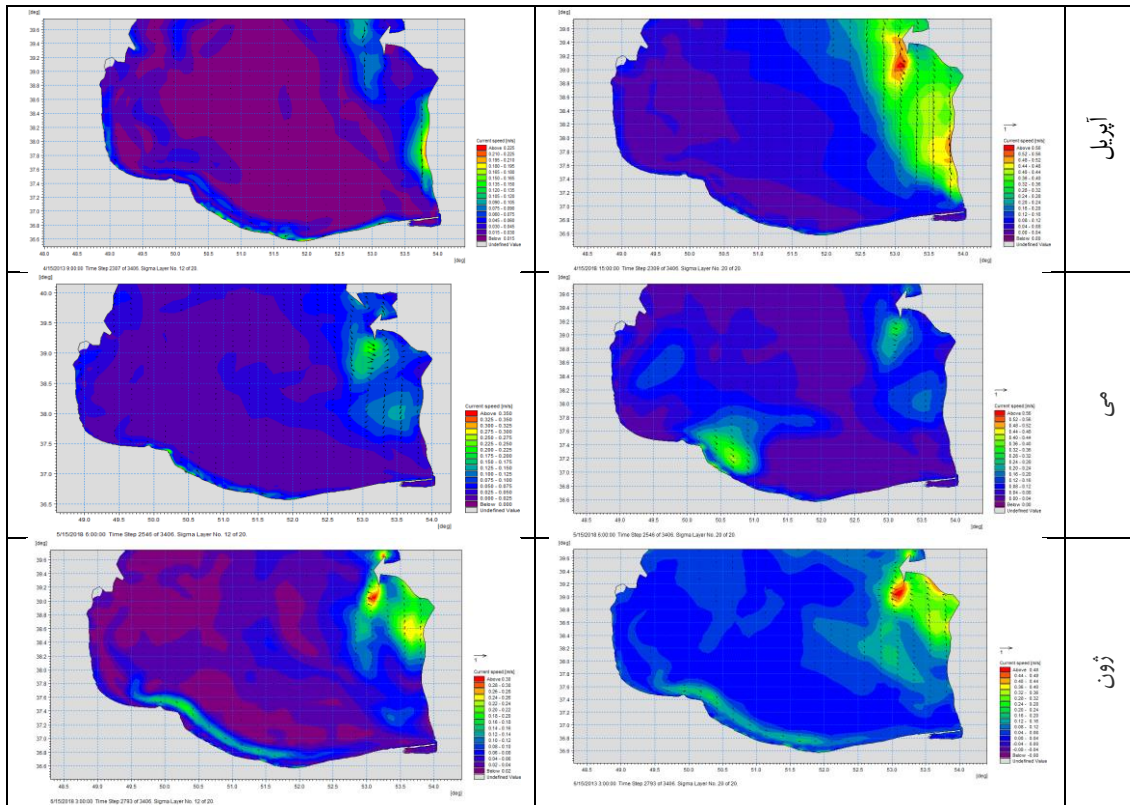
در ماه آپریل در محدوده شرقی خزر جنوبی جریان قویتر از محدوده غربی است. سرعت‌های جریان در عرض‌های بالاتر بیشتر از عرض‌های پایین‌تر است. در محدوده مرز شرقی نیز سرعت‌ها قابل توجه می‌باشد. جهت جریان سطحی در مرز شرقی در این ماه از شمال به جنوب است. در محدوده غرب خزر جریان از شدت بسیار کمی برخوردار بوده و جریان‌های موازی ساحل نیز سرعت‌ها نسبت به ماه‌های گذشته از بزرگی کمتری برخوردارند. به طورکل مشاهده می‌شود الگوی کلی جریان در این ماه با ماه‌های قبل که الگویی مشابه داشتند متفاوت است (شکل ۴).

همانطور که مشاهده می‌گردد سرعت جریان در لایه‌های

بیشتری می‌یابد.

نتایج حاصل از مدلسازی نشان داد که در ماه مارس الگوی مشابه ماه‌های ژانویه و فوریه، با وقوع جریان‌های قویتر در محدوده غرب خزر میانی و رژیم آرامتر در محدوده غربی تکرار می‌شود. سرعت‌های جریان نسبت به دو ماه قبل از شدت کمتری برخوردارند و این امر در خصوص سرعت‌های جریان موازی ساحل ناشی از باد مشهودتر است. در این ماه سرعت جریان سطحی به ۰/۵ متر بر ثانیه میرسد. در لایه‌های پایین تر کاهش سرعت مشهود بوده و در لایه ۱۵ به ۰/۲۵ متر بر ثانیه و در لایه ۱۲ حداکثر سرعت جریان ۰/۲۲ متر بر ثانیه می‌باشد.

به طور کلی می‌توان بیان داشت رژیم جریان در سه ماهه نخست سال ۲۰۱۸ میلادی الگویی مشابه داشته که در آن حداکثر سرعت‌های جریان در محدوده غربی خزر میانی حادث می‌شود و در بخش غربی جریان از شدت کمتری



چپ: لایه مجاور بستر (۱۲ سیگما)

راست: لایه سطحی

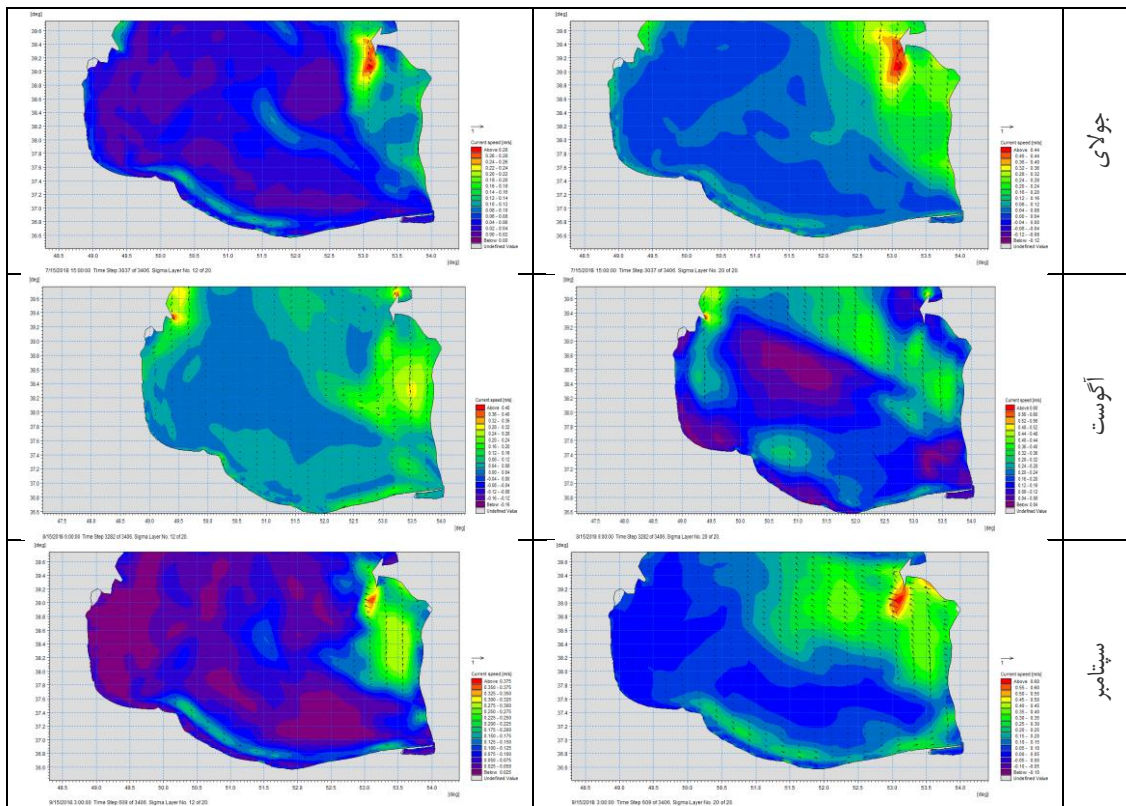
شکل ۴. الگوی جریان در خزر جنوبی و خلیج گرگان برای ماه‌های (آوریل، می و ژون)

می‌شوند. بیشترین سرعت جریان در محدوده شرقی خزر مرکزی حادث شده و جریانات در بخش شرقی خزر جنوبی جهت جنوب به شمال دارند. یک پیچک نیز در این بخش از خزر مشاهده می‌گردد. در این ماه با توجه به جهت جریانات، نفوذ جریانات موازی ساحل به داخل خلیج گرگان رخ نمی‌دهد. در بخش قابل توجهی از خزر جنوبی جریانات بزرگای کوچکی داشته و تقریباً الگوی ماه‌های میو آوریل تکرار می‌شود (شکل ۴).

در ماه جولای در محدوده شرقی خزر جنوبی جریان قویتر از محدوده غربی است. سرعت‌های جریان در عرض‌های بالاتر بیشتر از عرض‌های پایین‌تر است. در محدوده مرز شرقی نیز سرعت‌ها قابل توجه می‌باشد. جهت جریان سطحی در مرز شرقی در این ماه از شمال به جنوب است. در محدوده غرب خزر جریان از شدت بسیار کمی برخوردار بوده و جریانات موازی ساحل نیز سرعت‌ها

لایه‌های پایین‌تر از سطح به طور مشهودی کاهش می‌یابد در ماه می جریانات شرقی مجدداً مشاهده شده با این حال محدوده شرقی بالاخص محدوده خلیج گرگان شرایط آرامی را دارد. بیشترین سرعت جریان در این ماه در حدود ۰/۵۶ متر بر ثانیه است. در این ماه سواحل شرقی گیلان بیشترین سرعت‌ها را تجربه می‌کنند. سرعت‌های جریان در محدوده مازندران و گلستان مقدار کوچکی دارند. در لایه ۱۲ سیگما جریانات شرقی و جریانات موازی ساحل در بخش جنوبی مشاهده می‌گردد. سرعت جریان موازی ساحل در محدوده امیرآباد در این لایه مشاهده می‌گردد. ورود این جریان به داخل خلیج مشاهده می‌گردد. ورود جریان به داخل خلیج در لایه ۱۲ نیز مشاهده می‌گردد.

در ماه ژون در لایه سطحی جریانات مرز شرقی و جریانات موازی با ساحل در بخش جنوبی مشاهده



چپ: لایه مجاور بستر (۱۲ سیگما)

راست: لایه سطحی

شکل ۵. الگوی جریان در خزر جنوبی و خلیج گرگان برای ماه‌های (جولای، آگوست و سپتامبر)

لایه ۱۲ تغییر جهت جریان و اثر اکمان مشهود بوده و بردارهای جریانات به سمت راست متمایل شده‌اند. در این لایه‌ها نفوذ جریان موازی ساحل به خلیج گرگان مشاهده می‌گردد (شکل ۵).

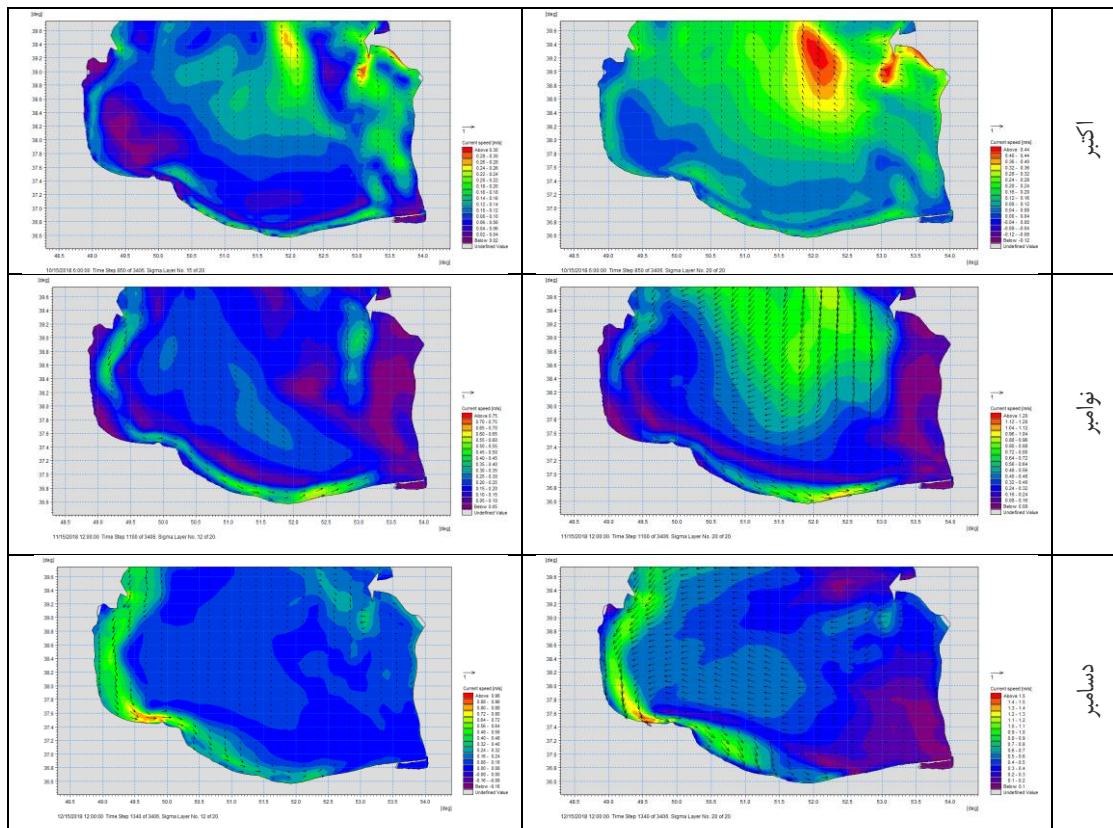
در ماه سپتامبر نیز مانند ماه آگوست جریانات قوی در کل محدوده خزر مرکزی با جهت شمال غربی حضور دارند. با این تفاوت که جریان مرز غربی دیده نمی‌شود. در مرز شرقی در نزدیکی خلیج گرگان جریانات موازی ساحل شدت قابل توجه دارند. در لایه ۱۲ تغییر جهت جریان و اثر اکمان مشهود بوده و بردارهای جریان به ویژه در بخش شرقی به سمت راست متمایل شده‌اند. در این لایه‌ها نفوذ جریان موازی ساحل به خلیج مشاهده می‌گردد (شکل ۵).

در ماه اکتبر جریانات با سرعت تقریباً بیشتر از ۰/۳ متر بر ثانیه در کل محدوده خزر مرکزی با جهت شمالی حضور

نسبت به ماه‌های گذشته از بزرگی کمتری برخوردارند. به طورکل مشاهده می‌شود الگوی کلی جریان در این ماه با ماه‌های قبل که الگویی مشابه داشتند متفاوت است.

همانطور که مشاهده می‌گردد سرعت جریان در لایه‌های پایین‌تر از سطح به‌طور مشهودی کاهش می‌یابد سرعت جریان در محدوده خلیج گرگان در این لایه کمتر از ۰/۰۲ متر بر ثانیه می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود در لایه ۱۲ نیز روند کاهش سرعت جریان وجود دارد.

در ماه آگوست جریانات قوی در کل محدوده خزر مرکزی با جهت شمال غربی حضور دارند. جریان مرز غربی با جهت شمال به جنوب قابل توجه بوده و بیشترین سرعت در این محدوده رخ داده است. در مرز شرقی در نزدیکی خلیج گرگان جریانات شدت کمی دارند. جریان موازی ساحل در محدوده امیرآباد قابل توجه می‌باشد. در



چپ: لایه مجاور بستر (۱۲ سیگما)

راست: لایه سطحی

شکل ۶. الگوی جریان در خزر جنوبی و خلیج گرگان برای ماه‌های (اکتبر، نوامبر و دسامبر)

دارند. بیشترین سرعت در محدوده خزر مرکزی رخ داده است. جریان مرز غربی و جریان موازی ساحل هم دیده می‌شود. در مرز شرقی در نزدیکی خلیج گرگان جریانات موازی ساحل شدت قابل توجه دارند و نفوذ جریان به خلیج گرگان مشاهده می‌شود. در لایه ۱۲ تغییر جهت جریان و اثر اکمان مشهود بوده و بردارهای جریان به ویژه در بخش شرقی به سمت راست متمایل شده‌اند. در این لایه‌ها نفوذ جریان موازی ساحل به خلیج گرگان مشاهده می‌گردد (شکل ۶).

قوی ترین جریان در مدت یکسال مدلسازی در ماه نوامبر رخ داده است. در لایه سطحی سرعت جریان به بیش از یک 0.8 بر ثانیه می‌رسد. جهت غالب جریان از شمال به جنوب است و جریان مرز غربی و جریان موازی ساحل در سواحل جنوبی مشاهده می‌گردد. با این حال در بخش شرقی خزر جریان بزرگای بسیار کمی دارد. سرعت جریان موازی ساحل نیز به بیش از 0.6 متر بر ثانیه می‌رسد. جریان موازی ساحل قبل از رسیدن به بخش شرقی تغییر جهت داده و به سمت شمال منحرف می‌شود. سرعت جریان در خلیج گرگان در حدود 0.8 متر بر ثانیه می‌باشد. در لایه‌های زیرین تغییر جهت بردارهای سرعت در اثر پدیده اکمان مشهود است. جهت جریان در بخش مرکزی برخلاف جهت جریان موازی ساحل در بخش جنوبی است. این امر باعث شده محدوده آرامش بین دو جبهه را نشان می‌دهد.

در ماه دسامبر جریان مرز غربی نسبت به ماه‌های دیگر از شدت بیشتری برخوردار است و سرعت جریان در لایه سطحی به بیش از 1 متر بر ثانیه می‌رسد. در بخش میانی و شرقی خزر جنوبی جریان از سرعت قابل توجهی برخوردار

دارند. بیشترین سرعت در محدوده خزر مرکزی رخ داده است. جریان مرز غربی و جریان موازی ساحل هم دیده می‌شود. در مرز شرقی در نزدیکی خلیج گرگان جریانات موازی ساحل شدت قابل توجه دارند و نفوذ جریان به خلیج گرگان مشاهده می‌شود. در لایه ۱۲ تغییر جهت جریان و اثر اکمان مشهود بوده و بردارهای جریان به ویژه در بخش شرقی به سمت راست متمایل شده‌اند. در این لایه‌ها نفوذ جریان موازی ساحل به خلیج گرگان مشاهده می‌گردد (شکل ۶).

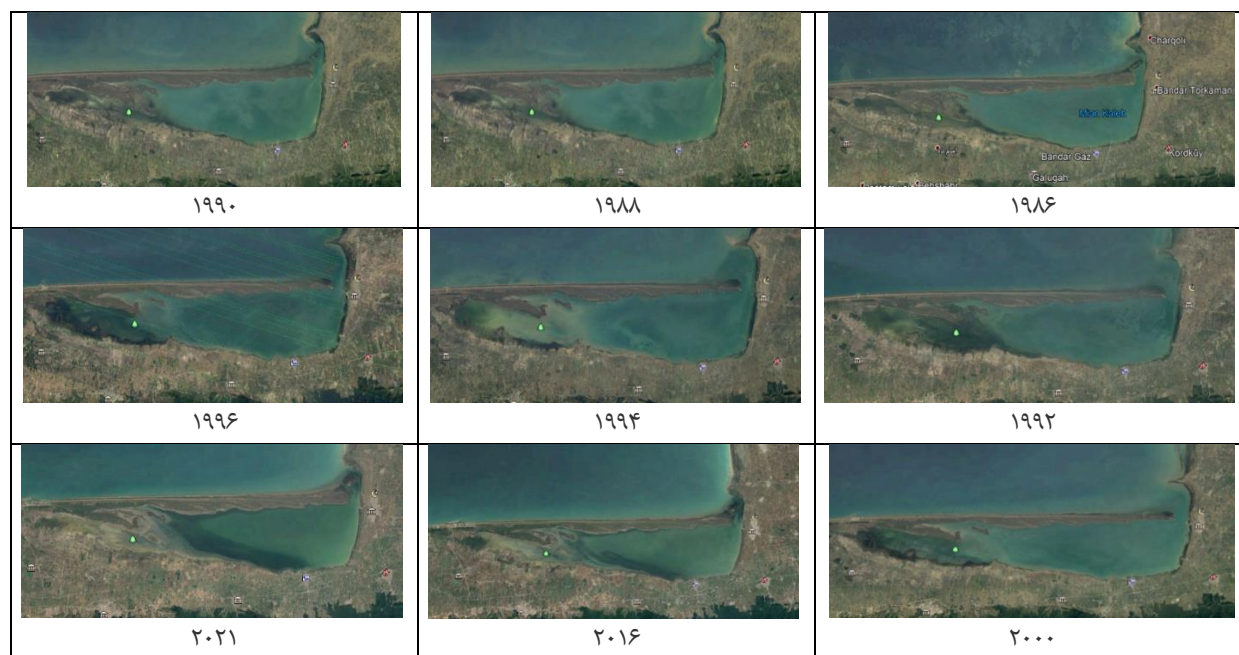
قوی ترین جریان در مدت یکسال مدلسازی در ماه نوامبر رخ داده است. در لایه سطحی سرعت جریان به بیش از یک 0.8 بر ثانیه می‌رسد. جهت غالب جریان از شمال به جنوب است و جریان مرز غربی و جریان موازی ساحل در سواحل جنوبی مشاهده می‌گردد. با این حال در بخش شرقی خزر جنوبی جریان از سرعت قابل توجهی برخوردار

مورفولوژی خلیج گرگان) در ابتدا اثر کاهش تراز سطح آب در سال‌های گذشته بر سطح خلیج گرگان مورد بررسی قرار گرفت. (شکل ۷) تصاویر ماهواره لندست در سال‌های مختلف از محدوده خلیج گرگان را نمایش می‌دهد.

دار است. در لایه‌های زیرین نیز این امر مشاهده می‌گردد. به طور کلی بیشترین سرعت‌های جریان در سه ماه آخر سال بویژه نوامبر و دسامبر مشاهده می‌گردد (شکل ۶).

بررسی اثر تغییرات تراز آب بر مساحت خلیج گرگان

به منظور بررسی این موضوع (اثر تغییرات تراز آب بر



شکل ۷. روند تغییرات مورفولوژی خلیج گرگان طی سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۱

جدول ۱. روند تغییرات مساحت خلیج گرگان در سال‌های مختلف در اثر تغییرات تراز آب دریای خزر

سال	تراز سطح آب (متر)	مساحت خلیج (میلیون متر مکعب)
۱۹۸۴	-۲۸,۲	۳۴۲
۱۹۸۸	-۲۸	۳۷۶
۱۹۹۰	-۲۷,۸	۴۰۸
۱۹۹۲	-۲۷,۶	۴۶۵
۱۹۹۴	-۲۶,۷	۴۸۵
۱۹۹۶	-۲۶,۶	۴۹۰
۲۰۰۰	-۲۶,۷	۴۸۵
۲۰۱۶	-۲۷,۸	۴۰۵
۲۰۲۰	-۲۷,۳	۳۶۵

مساحت خلیج گرگان بر اساس این تصاویر برای سال‌های مختلف محاسبه و همراه با تراز سطح آب دریا به صورت خلاصه در جدول ۱ نمایش داده شده است. داده‌های تراز سطح آب دریای خزر نیز از رکورد تراز سطح آب دریای خزر در ایستگاه انزلی برداشت شده است.

با بررسی داده‌های سه سال گذشته مشخص شد که تراز آب در حدود ۱۵ سانتیمتر کاهش داشته و بر اساس همین روند میزان کاهش ۵ سانتیمتر در سال در شرایط فعلی برای پیش بینی شرایط خلیج گرگان در آینده در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن کاهش سالانه ۵ سانتیمتر در سال، اثر کاهش تراز آب بر شرایط آبی خلیج گرگان در سه افق ۵، ۱۰ و ۲۰ ساله مورد بررسی قرار گرفت:

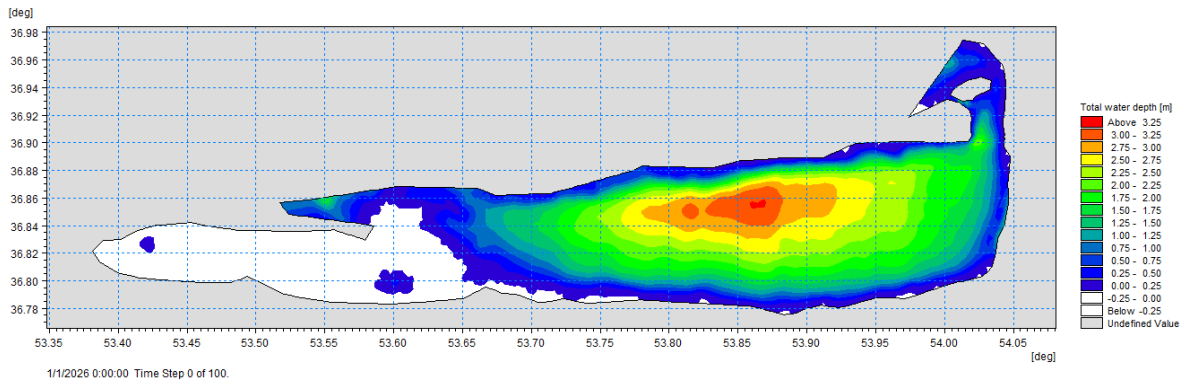
در افق ۵ ساله تراز سطح آب با روند فعلی ۲۵ سانتیمتر

(کانال چپغلی و کانال آشوراده که ارتباط آبی بین دریای خزر و خلیج گرگان از طریق این کانال‌ها صورت می‌پذیرد) دستخوش تغییرات قابل توجه مورفولوژیکی گردد.

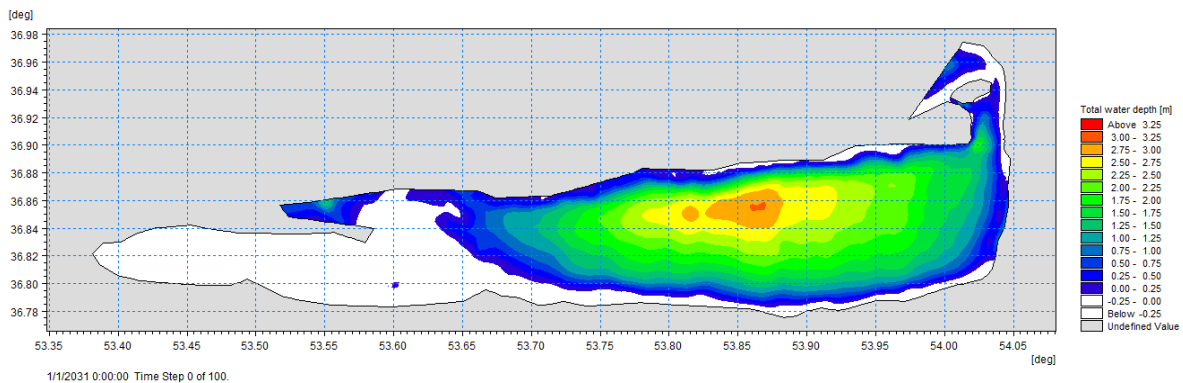
شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ تغییرات مورفولوژیکی خلیج گرگان در افق‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ ساله و ادامه روند کاهش تراز سطح آب به میزان ۵ سانتیمتر در سال را نمایش می‌دهد.

کاهش می‌یابد. در افق ۱۰ ساله تراز سطح آب کاهش ۵۰ سانتیمتری را تجربه خواهد کرد در افق ۲۰ ساله میزان کاهش تراز سطح آب به ۱ متر خواهد رسید.

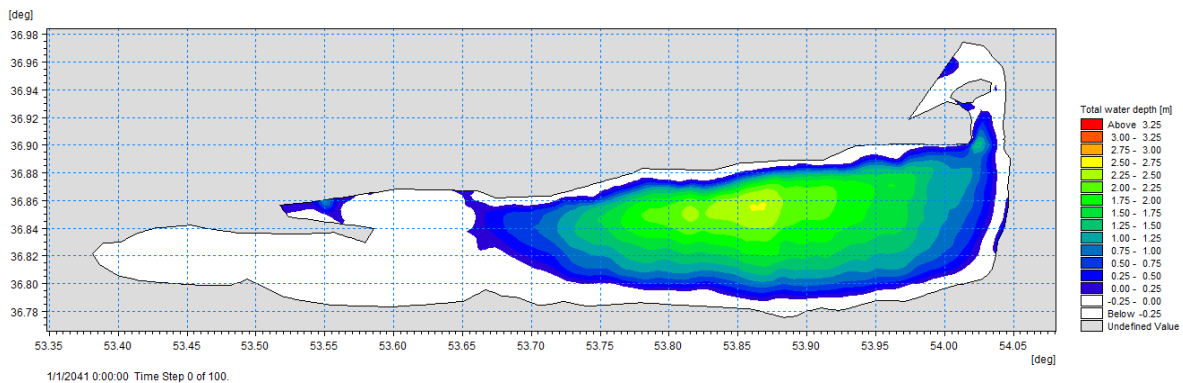
با توجه به عمق کم خلیج گرگان و همینطور شیب نسبتاً کم آن در بخش قابل توجهی از خلیج، می‌توان انتظار داشت که در اثر پایین رفتن بیشتر تراز آب، بخش قابل توجهی از پهنه خلیج و به طور خاص دهانه ورودی خلیج



شکل ۸. مساحت خلیج گرگان در افق ۵ ساله (کاهش ۲۵ سانتیمتر تراز سطح آب)



شکل ۹. مساحت خلیج گرگان در افق ۱۰ ساله (کاهش ۵۰ سانتیمتر تراز سطح آب)



شکل ۱۰. مساحت خلیج گرگان در افق ۲۰ ساله (کاهش ۱۰۰ سانتیمتر تراز سطح آب)

بحث و نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که جریان کلی خزر در غالب مواقع به صورت پادساعتگرد است، این نتیجه پیشتر نیز توسط شربتی و حسینی در شبیه سازی‌های دوبعدی گزارش گردیده است (شربتی و حسینی، ۱۳۹۱). جریان مرز غربی به صورت شمال به جنوب، جریان موازی ساحل در ساحل جنوبی از غرب به شرق و جریان در مرز شرقی از جنوب به شمال است. از مقدار سرعت جریان در لایه‌های پایین کاسته شده و جهت جریان نیز با توجه به اثر اکمن به سمت راست متمایل می‌گردد که این اصل در تمام فصول سال مشاهده می‌گردد. همچنین جریان در موازات ساحل از توپوگرافی تاثیر بیشتری می‌پذیرد و گاهاً جریانات در اثر عوارض بستر به سمت آب عمیق منحرف می‌شود. این امر در لایه پایین مشهودتر می‌باشد. نتایج نشان داد که در ماه‌های پاییز جریان کلی خزر بگونه‌ای است که جریان مرز غربی تشدید شده و جریان مرز شرقی تضعیف می‌گردد و در ماه‌های زمستان که توام با وقوع طوفان‌های شدید است جریان کلی در کل محدوده خزر جنوبی از شدت قابل توجه برخوردار است همچنین در ماه‌های تابستان که متناظر با شرایط آرامتر آب و هوایی است جریانات در محدوده مرکزی خزر از شدت کمتری برخوردار است ولی در مرز شرقی شدت جریانات از شدت قابل توجه برخوردار است. مشاهده می‌شود که در محدوده خلیج گرگان و سواحل مجاور به دلیلی شیب کم ساحل، الگوی وزش باد و شرایط توپوگرافی جریان شدت جریان ضعیف بوده و سرعت جریان در این محدوده از مناطق مرکزی و غربی خزر کمتر است و در محدوده جنوب شرق خزر تغییرات سرعت و جهت جریان در لایه‌های مختلف با توجه به عمق کم و سرعت پایین جریان به کمترین میزان خود می‌رسد که در این محدوده لایه‌بندی جریان مشاهده نمی‌گردد. نتایج با مطالعات شربتی ۱۳۹۰ در تحقیق تحت عنوان "شبیه سازی دو بعدی الگوی جریان در خلیج گرگان با استفاده از نرم افزار مایک ۲۱" همخوانی

دارد (شربتی، ۱۳۹۰).

به طور کلی می‌توان بیان داشت رژیم جریان در سه‌ماهه نخست سال میلادی الگویی مشابه داشته که در آن حداکثر سرعت‌های جریان در محدوده غربی خزر میانی حادث می‌شود و در بخش غربی جریان از شدت کمتری برخوردار است. در این سه فصل سرعت جریان در لایه‌های مختلف اطراف خلیج گرگان بسیار کم و نزدیک به صفر می‌باشد. در ماه‌های ژون و جولای و آگوست (خرداد، تیر و مرداد) نفوذ قابل توجه جریان موازی ساحل به خلیج گرگان مشاهده می‌شود. نفوذ جریان در ماه‌های سرد نیز مشاهده می‌شود ولی شدت آن نسبت به ماه‌های گرم کمتر است. لازم به ذکر است در ماه جولای جریان ورودی به خزر هم در اثر جریان موازی ساحل و هم در اثر جریان شمال به جنوب مرز شرقی است که در این سه ماه رخ می‌دهد.

نتایج گویای این است که جریان مرز شرقی و جریان ایجاد شده به موازات ساحل جنوبی اثر قابل توجهی بر الگوی جریان در خلیج گرگان دارد. در زمانی که جریان مرز شرقی جنوب به شمال است از شدت جریان داخل خلیج گرگان کاسته می‌شود و در زمانی که جریان مرز شرقی شمال به جنوب است نفوذ قابل توجه جریان به محدوده خلیج گرگان مشاهده می‌شود. همچنین در مواقعی که جریان ایجاد شده به موازات ساحل جنوبی دارای شدت قابل توجهی است، بخش از این جریان پس از نزدیک شدن به دهانه خلیج گرگان، به داخل خلیج نفوذ کرده و گردش آب در خلیج را باعث می‌شود. همزمانی وقوع جریان مرز شرقی شمال به جنوب و جریان ایجاد شده به موازات ساحل جنوبی بیشترین تاثیر را بر گردش آب خلیج گرگان گذاشته و باعث وقوع بیشترین سرعت‌های جریان در آن خلیج می‌گردد. این نتایج تطابق بالایی با مطالعات مشابه قبلی انجام شده در این حوضه از جمله مطالعه (کميجانی و همکاران، ۲۰۱۶) و همچنین مطالعه (شیعه علی و همکاران، ۲۰۱۶) دارد.

با بررسی داده‌های گذشته مشخص شد که تراز آب در

دهانه خلیج همراه با تعمیق بخش‌های دیگر دهانه ضروری است.

در افق ۲۰ ساله: ارتباط آبی بین خلیج گرگان و دریای خزر به صورت کامل قطع شده و بخش قابل توجهی از کانال چپغلی خشک می‌شود. عرض پهنه آبی باقیمانده نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این شرایط مساحت پهنه آبی باقیمانده تقریباً ۲/۳ مساحت خلیج گرگان در زمان پراپی (سال ۱۹۶۶) است. همچنین با توجه به قطع ارتباط آبی با دریای خزر و به دلیل تبخیر قابل توجه (بیش از ۲۰۰۰ میلیمتر در سال دریای خزر)، کاهش پهنه آبی باقیمانده سرعت خواهد گرفت. با توجه به موارد ذکر شده فوق، لایروبی بخش خارجی کانال چپغلی می‌بایست هر چه زودتر انجام شده تا در صورت ادامه روند فعلی، ارتباط آبی خلیج گرگان و دریای خزر ادامه یافته و خلیج به حیات خود ادامه دهد.

حدود ۵ سانتی متر در سال کاهش داشته که نتایج با پژوهش (حمزه و ترابی، ۱۴۰۰؛ خیرآبادی و همکاران، ۱۳۹۴) مطابقت دارد. همانطور که مشاهده شد در صورت ادامه وضع موجود و کاهش بیشتر تراز آب و با ادامه روند کاهش تراز آب کنونی افق‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ ساله نشان می‌دهد که:

در افق ۵ ساله: بخش کم عمق غربی خلیج گرگان به صورت کامل خشک شده ولی ارتباط آبی بین خلیج گرگان و دریای خزر هنوز برقرار است در این شرایط در سواحل شمالی و جنوبی خلیج گرگان و دهانه ورودی به میزان کمی پسروی می‌کند.

در افق ۱۰ ساله: ارتباط آبی بین خلیج گرگان و دریای خزر به صورت کامل قطع شده و بخش خارجی دهانه خشک می‌شود. برای برقراری ارتباط آبی پهنه خلیج و دریای خزر و نیز بهبود شرایط فعلی لایروبی این بخش از

فهرست منابع

- یاری نسب، آ؛ طاهری، ح؛ محمدخانی، ح؛ پورصوفی، ط؛ منصوری، ب، (۱۳۹۲). مدلسازی هیدرودینامیکی و شوری خلیج گرگان به منظور استخراج فاصله اطمینان بین مزارع پرورش ماهی تحت بار آلودگی لحظه ای. نشریه شیلات، مجله منابع طبیعی ایران، ۶۶ (۴)، صص ۵۱۷-۵۰۵.
- رورده، ه؛ لرستانی، ق؛ اعتمادی، ف؛ ولی خانی، س، (۱۳۹۲). شبیه سازی دینامیک امواج و انتقال ماسه در سواحل دریای خزر، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۲ (۲)، صص ۱-۱۸.
- زبردست، ل؛ جعفری، ح، (۱۳۸۹). ارزیابی روند تغییرات تالاب انزلی با استفاده از سنجش از دور و ارائه راه حل مدیریتی، محیط شناسی، ۳۷ (۱)، صص ۵۷-۶۴.
- حمزه، س؛ ترابی، ا، (۱۴۰۰). بررسی تغییرات پهنه آبی خلیج گرگان و ارتباط آن با تغییرات بارش و تراز آب دریای خزر با استفاده از داده های سنجش از دور، اکوهیدرولوژی، ۱۸ (۲)، صص ۴۸۴-۴۷۵.
- شربتتی، س؛ شعبانی، م، (۱۳۹۳). اثرات بازگشایی کانال خزینی بر الگوی عمومی جریان در خلیج گرگان، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۸ (۳)، صص ۶۷-۸۰.
- شربتتی، س، حسینی، س، (۱۳۹۱). شبیه سازی دوبعدی الگوی جریان خلیج گرگان در خلال یک دوره یکساله، گزارش طرح پژوهشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۲۹ صفحه.
- شربتتی، س، (۱۳۹۵). ضرورت بررسی اثرات کاهش سطح تراز آب دریای کاسپین بر وضعیت خلیج گرگان و ارائه راهکار

- جهت برون رفت از بحران در سالهای آتی، بهره برداری و پرورش آبزیان، (۱) ۵، صص ۸۳-۱۰۵.
- شربت، س، (۱۳۹۰). شبیه سازی دو بعدی الگوی جریان در خلیج گرگان با استفاده از نرم افزار مایک ۲۱. پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۱۸(۴)، صص ۲۴۵-۲۴۱.
- علیزاده لاهیجانی، ح؛ نادری، م، (۱۳۸۴). ژئومورفولوژی سواحل و بستر دریای خزر و اثر نوسان تراز آب بر روی آن. ششمین همایش علوم و فنون دریایی مرکز ملی اقیانوس شناسی، تهران، ایران.
- کمیحانی، ف؛ چگینی، و؛ صدری نسب، م؛ سیادت موسوی، س، (۱۳۹۵). شبیه سازی الگوی جریان سه بعدی، توزیع دما و شوری سطحی آب در حوضه جنوبی دریای خزر، مهندسی دریا، ۱۲ (۲۳)، ۶۹-۸۰.
- Ataei, H., Jabari, A., Khakpour, A.M., Adjami, M., & Neshaei, S.A. (2018). Investigation of Caspian Sea Level Fluctuations Based on ECMWF Satellite Imaging Models and Rivers Discharge. *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*, 2(2), 21-30.
- Goodwin, E.J. (2017). Convention on Wetlands of International Importance, Especially as Waterfowl Habitat 1971 (Ramsar). In M. Faure (Ed.), *Elgar Encyclopedia of Environmental Law*. (pp. 101-108). Edward Elgar Publishing Limited.
- Hamzeh, S., Akbari, E., Kakroodi, A.A., & Jeihooni, M. (2017). Investigation the dynamic response of the Anzali lagoon to sea-level changes using multisources remotely sensed data. *The 38th Asian Conference on Remote Sensing*. New Delhi.
- Ibrayev, R.A., Ozsoy, E., Schrum, C., & Sur, H. (2010). Seasonal variability of the Caspian Sea three dimensional circulation, sea level and air-sea interaction. *Ocean Science Discuss*, 6, 311-329.
- Jeihooni, M., Kakroodi, A., & Hamzeh, S. (2019). Monitoring shallow coastal environment using Landsat/altimetry data under rapid sea-level change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 224, 260-271.
- Kheirabadi, H., Noori, R., Samani, J., Adamowski, J. F., Ranjbar, M.H., & Zaker N.H. (2018). A reduced-order model for the regeneration of surface currents in Gorgan Bay, Iran. *Journal of Hydroinformatics*, 20(6), 1419-1435.
- Kiaei, S. (2014). The survey of sedimentation and erosion of ideal tidal inlets effected by both tide and cross -shore wave by numerical modeling, *Watershed Management Research*, 104, 62-74.
- Shiea, M., Chegini, V., & Bidokhti, A.A. (2016). Impact of wind and thermal forcing on the seasonal variation of three-dimensional circulation in the Caspian Sea. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 45(5), 671-686.
- Simons, T. J. (1974). Verification of Numerical Models of Lake Ontario: I. Circulation in Spring and Early Summer. *Journal of Physical Oceanography*, 4, 507-523.