تاثیر نوسانات تراز آب دریا بر تغییرات خطوط ساحلی دریای خزر

سهیل عطایی[۱*]، مهدی عجمی[۲]، میراحمد لشته نشایی[۳]، سید حسین یعصوبی[۴]

[۱] کارشناس ارشد مهندسی سواحل، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ ataei.h.s@gmail.com
[۲] استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ adjami@shahroodut.ac.ir
[۳] دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان؛ maln@guilan.ac.ir
[۴] کارشناس پژوهشی مهندسی سواحل، مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر؛ hochehoche60@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۱۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷

کلمات کلیدی:
تغییرات خط ساحلی
تغییر تراز سطح دریا
قانون بروون
انتقال رسوب ساحلی
دریای خزر

چکیده

تغییرات تراز آب دریای خزر در بازه های زمانی مختلف، بسیار زیاد بوده است؛ این تغییرات در دوره هایی کاهشی و در دوره هایی نیز افزایشی بوده است. از آن جایی که تغییرات تراز آب دریای خزر در کوتاه مدت عموما مقدار زیادی است، پیش روی و پس روی خطوط ساحلی نیز در اثر کاهش و افزایش تراز آب دریا به مراتب زیاد خواهد بود؛ بنابراین بررسی و پیش بینی تغییرات خطوط ساحلی در دریای خزر بسیار مهم است. جهت پیش بینی تغییرات خطوط ساحلی، بروون تئوری خود را تحت عنوان Bruun rule ارائه داده است؛ این قانون وابسته به پارامتر های افزایش تراز آب دریا، عمق پایانی، فاصله عمق پایانی تا خط ساحل و ارتفاع حداکثر بالاروی آب بر روی ناحیه ساحلی در اثر امواج است. همچنین رزاتی و همکارانش در جهت بهبود پیش بینی های قانون بروون، انتقال رسوب ساحلی را در آن لحاظ نمودند که نتایج مطلوب تری را حاصل نمود.

در این تحقیق، قانون بروون و قانون اصلاح شده آن بر اساس انتقال رسوب ساحلی، برای دریای خزر مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی، معادله اصلاحی نتایج بهتری را از خود نشان داده است که نشان از این دارد که در اثر تغییرات تراز آب دریا و طوفان های طبیعی در سال، آورد رسوبی به سمت ساحل نیز وجود خواهد داشت.

The Effect of Sea Level Fluctuations on the Caspian Sea Coastline Changes

Soheil Ataei H.[1*], Mehdi Adjami[2], Mir Ahmad Lashteh Neshaei[3], Seyed Hossein Ya'asubi[4]

[1] MSc. of Coastal Engineering, Shahrood University of Technology; ataei.h.s@gmail.com
[2] Assistant Professor of Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology; adjami@shahroodut.ac.ir
[3] Associate Professor of Civil Engineering Department, Guilan University; maln@guilan.ac.ir
[4] Coastal Engineering Research Expert, Caspian Sea National Research Center; hochehoche60@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 5 Jan. 2016
Accepted: 27 Nov. 2016

Keywords:
Coastline changes
Sea level change
Bruun Rule
Landward Sediment Transport
Caspian Sea

ABSTRACT

The Caspian Sea level changes were very high in various periods of time; alternatively decreasing and increasing. Since the Caspian Sea level changes generally are remarkable in the short period of time, shoreline forward and retreat will be large due to the fluctuation of sea level; so, the prediction of shoreline changes is very important in the Caspian Sea. Bruun has presented his theory under the title of Bruun rule for shoreline change prediction; this rule is related to sea level rise, closure depth, distance from the coastline to closure depth and the maximum vertical run-up excursion above the point of bore collapse parameters. Also, Rosati et al. applied landward transport to the Bruun rule for improvement of its prediction that achieved the most favorable results.

In this research, the Bruun rule and modified Bruun rule extended for landward transport has been investigated for the Caspian Sea. In this study, the modified equation has shown the better results, which suggests that landward sedimentation could be the result of the Sea level changes as well as natural storms during the years.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.3.0]

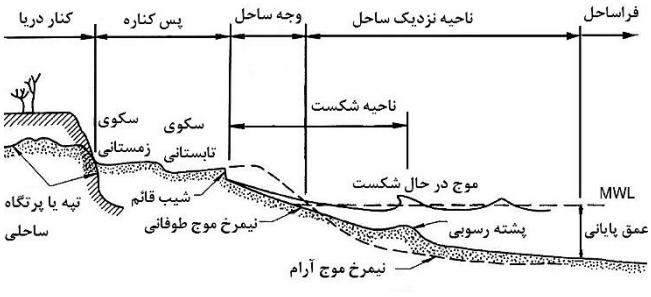
۱- مقدمه

اکثر خطوط ساحلی، سواحل ماسه ای هستند که در برخی نقاط با رودخانه، مدخل جزر و مدی[۱] یا دماغه سنگی[۲] قطع می شوند. امواجی که به سواحل ماسه ای می رسند، شکسته شده و طی بالاروی روی وجه ساحلی به طور پیوسته ساحل را تغییر شکل می دهند. تغییر شکل های مداوم به این دلیل اتفاق می افتد که مشخصات موج (ارتفاع، پریود و زاویه نزدیک شدن) برای محدوده زمانی مشخص به ندرت ثابت می باشد. تغییر شکل ساحل توسط جریانات ناشی از موج برخوردی که در ناحیه شکست امواج گسترش می یابند و توسط عمل مستقیم امواج از طریق آشفتگی ایجاد شده از امواج، شکسته و همچنین از بالا و پایین رفتن آب روی بدنه ساحل به وجود می آید. تغییر شکل همزمان ساحل به دلیل انتقال رسوب ناشی از موج، هم در جهت های به سمت ساحل و دور از ساحل و هم در جهت امتداد ساحل رخ می دهد.

اندازه گیری نیمرخ ساحلی عمود بر خط ساحل در طول منطقه فعال فرایندهای ساحلی در مطالعات مهندسی سواحل از اهمیت زیادی برخوردار است. سواحل به طور پیوسته در معرض هجوم امواج قرار داشته و بنابراین نیمرخ عرضی آنها به صورت متناوب در حال تغییر می باشد؛ این تغییرات عمدتا در مجاورت ناحیه ساحلی که در آن اثرات ناشی از شکست امواج مشهودتر است، رخ می دهد. منظور از ناحیه ساحلی[۳] ناحیه ای است که از آن به بعد موج پیش رونده ایجاد شده در آب عمیق، وارد منطقه کم عمق ساحلی شده و اثرات بستر بر روی موج محسوس می باشد [۱].

در شکل ۱ مقطع ساحلی تقریبا ایده آل نشان داده شده است. یک نیمرخ ساحل معمولا به سمت دریا از تپه ساحلی یا پرتگاه ساحلی شامل یک یا دو سکوی پله ای[۴] مسطح که به سمت ساحل شیب دارند، یک شیب پیش کرانه ای به سمت دریا که بالاروی فعال موج روی بستر در این قسمت صورت می گیرد و یک نیمرخ مقعر نزدیک ساحل که ممکن است دارای یک یا دو پشته[۵] که تقریبا به موازات ساحل امتداد یافته اند، تشکیل می شود.

خط چین ها در شکل ۱ نیمرخی را تعریف می کند که بعد از مدت



شکل۱ - مقطع عرضی ساحل با جزئیات آن [۱]

زمان نسبتا طولانی پس از عملکرد آرام موج، تشکیل می شود. ماسه به آهستگی به سمت ساحل جهت تشکیل وجه ساحل[۶] در ناحیه پس کرانه[۷] و به سمت سکوی پله ای در سمت دریا امتداد می یابد که در نتیجه، شیب نیمرخ بدنه ساحل را تندتر می کند. با ظاهر شدن امواج بلندتر و تندتر متداول در زمان طوفان، ماسه به سمت دریا جابجا شده، به نحوی که می توان انتظار داشت که خود را به صورت خط پر در شکل انطباق دهد؛ سپس نمیرخ ساحل در نزدیکی تراز میانگین آب[۸]، به سمت عقب برده شده و شیب مسطح می شود. ماسه منتقل شده به دور از ساحل، یک پشته رسوبی دور از ساحل بزرگتر در اطراف نقطه شکست موج تشکیل خواهد داد[۱].

در اکثر نقاط ساحلی امواج طوفانی غالبا در ماه های زمستانی روی داده و امواج آرام تر در تابستان اتفاق می افتد. بنابراین عناوین نیمرخ های تابستانی و زمستانی اغلب جهت تعریف دو نوع نیمرخ بستر به کار می رود. سکوی پله ای ساحلی در زمان امواج ملایم، زمانی که موج روی وجه ساحل بالا می رود و ماسه ته نشین می شود، تشکیل می گردد. در نتیجه ارتفاع تاج سکوی پله ای به شدت وابسته به تراز متوسط بالاروی موج هنگام تشکیل وجه ساحل می باشد.

علاوه بر تغییرات نیمرخ های ساحل ناشی از برخورد امواج، درصورتی که تغییرات نسبی در تراز متوسط دریا (همانند اکثر سواحل جهان که این پدیده اتفاق افتاده است) رخ دهد، تغییراتی در نیمرخ ساحل ایجاد می گردد. هنگام افزایش تراز آب دریا، همراه با غرقاب شدن نیمرخ ، وقتی که ماسه به دور از ساحل منتقل می شود و موقعیت تراز میانگین آب روی وجه ساحل به سمت خشکی جابجا می گردد ، بازآرایی نیمرخ به وجود می آید. بروون این فرایند را توضیح داده و روشی را ارایه نموده است که با توجه به بالا آمدن مقدار کمی در تراز میانگین آب بتوان فاصله ای را که خط ساحل تغییر می کند، محاسبه نمود [۲و۳]. قانون بروون وابسته به پارامتر های افزایش تراز آب دریا، عمق پایانی[۹]، فاصله عمق پایانی تا خط ساحل و ارتفاع حداکثر بالاروی آب بر روی ناحیه ساحلی در اثر امواج است. همچنین رزاتی و همکارانش در جهت بهبود پیش بینی های قانون بروون، انتقال رسوب ساحلی[۱۰] را در آن لحاظ نمودند که نتایج مطلوب تری را حاصل نمود [۴].

تغییرات خطوط ساحلی (پیش روی و یا پس روی) بر اثر عوامل بیان شده، برای مناطق مسکونی ساحلی و خصوصا مناطق بندری از اهمیت ویژه ای برخوردار است. روند پیش بینی این تغییرات، آینده شهر های ساحلی را رقم می زند و باعث اخذ تصمیماتی مبنی بر مقابله با پیش روی خطوط ساحلی به سمت مناطق مسکونی جهت کنترل آن و آسیب نرسیدن به این مناطق، خواهد شد؛ همچنین

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.3.0]

باعث خواهد شد تا برنامه ریزی های منطقی تری در طراحی و سیستم اقتصادی بنادر مهم تجاری و ماهیگیری صورت گیرد.
تغییرات تراز آب دریای خزر در بازه های زمانی مختلف، بسیار زیاد بوده است؛ این تغییرات در دوره هایی کاهشی و در دوره هایی نیز افزایشی بوده [۵]. از آن جایی که تغییرات تراز آب این دریا در کوتاه مدت عموما مقدار زیادی است، پیش روی و پس روی خطوط ساحلی نیز در اثر کاهش و افزایش تراز آب دریا به مراتب زیاد خواهد بود؛ بنابراین بررسی و پیش بینی تغییرات خطوط ساحلی در دریای خزر بسیار با اهمیت است.

۲- پیش بینی تغییرات خطوط ساحلی

در زمینه پیش بینی تغییرات خطوط ساحلی معادلات زیادی ارائه نشده است. بروون معادله ای بر پایه تعادل حجم فرسایش یافته و انباشته شده انتقال رسوبات عرضی ارایه نمود که بر اساس تغییرات تراز آب دریا، تغییر خط ساحل را پیش بینی می کرد [۲]. رزاتی و همکارانش علاوه بر تغییرات حجم فرسایش یافته از ساحل و انباشت آن در ناحیه ساحلی، حجم آورد رسوبی به سمت خشکی را نیز مد نظر قرار دادند [۴].

۲-۱- قانون بروون

قانون بروون نرخ تغییرات افقی خط ساحل را با تغییرات تراز آب دریا، عمق پایانی، فاصله عمق پایانی تا خط ساحل و نیز ارتفاع قائم حداکثر پیشروی موج در ناحیه شستگی، مرتبط می داند که بر این اساس معادله زیر پیشنهاد شده است [۲و۳]:

$$R_B = S\,\frac{W_*}{h_* + B} \qquad (۱)$$

در معادله فوق R_B نرخ تغییرات افقی خط ساحل، S تغییرات تراز سطح آب دریا، B ارتفاع حداکثر بالاروی آب در اثر امواج بر حسب متر هستند؛ h_* و W_* نیز به ترتیب عمق پایانی و فاصله عمق پایانی تا خط ساحلی پس از تغییرات تراز آب دریا بر حسب متر هستند که معادلات آنها به صورت زیر است:

$$W_* = W + R_B \qquad (۲)$$

که در این معادلات، W فاصله عمق پایانی تا خط ساحل قبل از تغییرات تراز آب دریا بر حسب متر هستند. در شکل ۲ جزییات قانون بروون نشان داده شده است. جهت محاسبه عمق پایانی، مرکز تحقیقات مهندسی سواحل ارتش امریکا رابطه ای به صورت زیر ارائه داده است [۱]:

$$h_* = 6.75 H_s \qquad (۳)$$

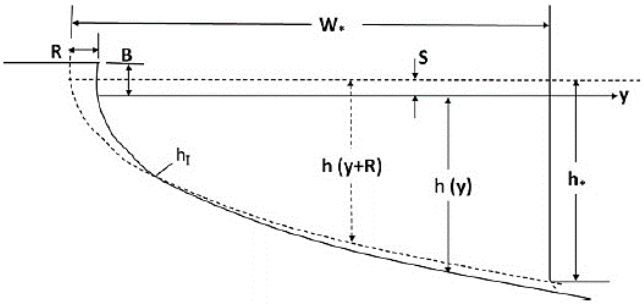
H_s میانگین ارتفاع امواج در آب های عمیق بر حسب متر است.
ارتفاع حداکثر بالاروی آب بر روی ناحیه ساحلی در اثر امواج بر حسب متر نیز از معادله زیر حاصل می شود [۶]:

$$B = \frac{U_0^2}{2g} \qquad (۴)$$

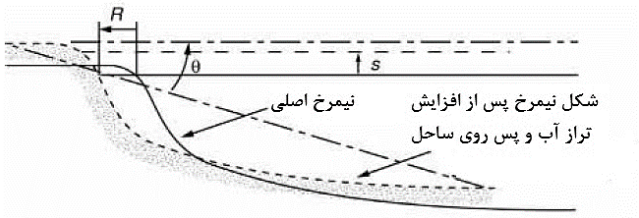
که در آن g شتاب گرانش زمین برحسب متر بر مجذور ثانیه و U_0 سرعت مرزی آب در خط ساحل بر حسب متر بر ثانیه است که از معادله زیر بدست می آید:

$$U_0 = C\sqrt{gH_B} \qquad (۵)$$

در این معادله H_B ارتفاع متوسط امواج در ناحیه شکست بر حسب متر است؛ همچنین، C ضریب وابسته به فروپاشی موج در ناحیه شکست است که در شرایط مختلف و آزمایشگاهی مقدار آن بین ۱,۱۸ تا ۱,۴۸ خواهد بود[۷]؛ در سواحل طبیعی که در ارتباط به مکانیزم شکست امواج است ، مقدار این ضریب برابر ۱,۴ خواهد بود [۸].
نرخ تغییرات خط ساحل و نحوه محاسبه شیب طبیعی ساحل پس از افزایش تراز آب دریا در شکل ۳ مشخص شده است.
بروون در قانون خود انتقال تمامی ماسه های فرسایش یافته در اثر افزایش تراز آب را به سمت دریا در نظر گرفت [۲و۳]. تحقیقات آزمایشگاهی و مدل های عددی بسیاری بر اساس قانون بروون انجام گرفته است.



شکل ۲ – مشخصات قانون بروون [۲و۳]



شکل ۳ – مشخصات نرخ پس روی ساحل و افزایش تراز آب و شیب طبیعی ساحل [۹]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.3.0]

استیو تحقیقات جامعی در زمینه تغییرات نیمرخ ها بر اساس افزایش تراز آب دریا انجام داد. وی در تحقیقات خود به این نتیجه رسید که در امتداد خطوط سواحلی که تحت تاثیر ورودی های جزر و مدی هستند، با توجه به پاسخ حوضه های جزر و مدی مرتبط با این ورودی ها، تئوری بروون جوابگو نیست. در مواردی که حوضه های جزر و مدی با محدوده بزرگتر از ۱۰ کیلومتر مربع هستند، اثرات تئوری بروون به مراتب کمتر از اثرات جزر و مد در پاسخ به افزایش تراز آب دریا است [۱۰]. کوپر و پیلکی بیان کردند که قانون بروون بر اساس فرضیات پایه ای غلطی است و نمی توان از آن در جهت پیش بینی تغییرات خط ساحلی استفاده نمود [۱۱]. کاپلین و سلیوانف تغییرات نیمرخ دریای خزر در سال های ۱۹۷۸ تا ۱۹۹۱ را در بازه ای که دریای خزر افزایش ترازی به میزان ۱,۸ تا ۲,۵ متر داشته است، با قانون بروون مقایسه کردند. طبق نتایج حاصل شده، قانون بروون انطباق خوبی با تغییرات خطوط ساحلی داشته است. نویسندگان این مقاله اظهار داشتند که جهت رسیدن به نتایجی دقیق تر باید انتقال رسوب طولی، ناحیه شستگی و رسوبات ناشی از باد نیز در محاسبات اعمال شوند [۱۲]. بر این اساس لشته نشایی و همکارانش، تاثیر انتقال رسوب در اثر وزش باد بر تغییر شکل ساحل را بررسی نموده و مدلی ارایه کردند[۱۳].

لدرمن و همکارانش، تغییرات خطوط ساحلی مرتبط با افزایش تراز آب دریا را در پنج ساحل از میان سواحل شرقی امریکا بر اساس قانون بروون بررسی نمودند؛ نویسندگان نتیجه گرفتند که مدل صدق می کند، اما همواره دامنه تغییرات خط ساحل حداقل دو مرتبه (به توان دو برابر) بزرگتر از نرخ افزایش تراز دریا است [۱۴]. ژانگ و همکارانش بررسی دقیق تری از قانون بروون و تغییرات خطوط ساحلی بر اساس افزایش تراز دریا در پنج ساحل مشابه لدرمن و همکارانش انجام دادند؛ نویسندگان، قانون بروون را تایید کردند، با این حال بیان نمودند که دو منطقه با نرخ کم تغییرات خطوط ساحلی (لانگ ایسلند[۱۱] و دلماروا پنینسولا[۱۲]) به صورت طبیعی تغذیه می شدند؛ به همین دلیل تغییرات خط ساحل در این دو منطقه نسبت به پیش بینی های معادله ارایه شده متفاوت بود. با این حال در مطالعات آنها ناحیه شستگی و آورد رسوبی ناشی از باد دیده نشد [۱۵].

راناسینگ و همکارانش نیز نرخ تغییرات خط ساحل با توجه به افزایش تراز دریا را با قانون بروون برای سواحل استرالیا بررسی کردند و نرخ این تغییرات را تا سال ۲۱۰۰ میلادی به میزان کمتر از ۸ ٪ نسبت به زمان کنونی تخمین زدند [۱۶].

۲-۲- قانون اصلاح شده بروون بر اساس انتقال رسوب ساحلی

رزاتی و همکارانش پس از بررسی های میدانی از سواحل شرقی ایالت فلوریدا و تحلیل قانون بروون به این نتیجه رسیدند که در هنگام افزایش تراز دریا و تغییر خطوط ساحلی، علاوه بر انتقال رسوب به سمت دریا، انتقال رسوبی به سمت خشکی (انتقال رسوب ساحلی) نیز رخ خواهد داد. در طی سال طوفان هایی رخ می دهد که نتیجه این طوفان ها آورد رسوبی ساحلی در محدوده حریم سواحل خواهد بود. نویسندگان در این تحقیق مقدار حجم بحرانی آورد رسوبی به سمت ساحل (V_{crit}) را بر حسب متر مکعب بر واحد طول ساحل مطرح کردند که بر اساس این حجم بحرانی، انتقال رسوب ساحلی به عرض بحرانی حداقل ($y_{L,crit}$) و ارتفاعی معادل افزایش تراز آب دریا (S) بر حسب متر صورت خواهد گرفت. حجم بحرانی و عرض بحرانی از روابط زیر محاسبه می شوند [۴]:

$$V_{crit} = R_B B - SW_* + \frac{3}{5}A\left(W_*^{5/3} - (W_* - R_B)^{5/3}\right) \qquad (۶)$$

$$y_{Lcrit} = \frac{V_{crit}}{S} \qquad (۷)$$

در معادلات بالا R_B نرخ تغییرات افقی خط ساحل محاسبه شده از رابطه بروون است، B ارتفاع حداکثر بالاروی آب در اثر امواج، W_* فاصله عمق پایانی تا خط ساحل بر اساس معادله بروون و A پارامتر مقیاس رسوبی هستند. پارامتر مقیاس رسوبی نیز از معادله زیر بدست می آید [۱۷]:

$$A = 2.25\left(\frac{w_f^2}{g}\right)^{1/3} \qquad (۸)$$

پارامتر W_f سرعت سقوط ذرات رسوبی بستر بر حسب متر بر ثانیه است؛ این پارامتر به صورت زیر محاسبه می شود [۱۸]:

$$W_f = \frac{(s-1)gD_{50}^2}{18\upsilon} \qquad 0.001 < D_{50} < 0.1mm \qquad (۹)$$

$$W_f = \frac{10\upsilon}{D_{50}}\left[\left(1 + \frac{0.01(s-1)gD_{50}^3}{\upsilon^2}\right)^{1/2} - 1\right] \qquad 0.1 < D_{50} < 1mm \qquad (۱۰)$$

$$W_f = 1.1\left[(s-1)gD_{50}\right]^{1/2} \qquad D_{50} > 1mm \qquad (۱۱)$$

در معادلات بالا، s چگالی مخصوص دریا است که مقدار آن ۲,۶۵ است، D_{50} قطر متوسط ذرات بستر بر حسب متر و υ چگالی سینماتیکی آب دریا که مقدار آن 10^{-6} است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.3.0]

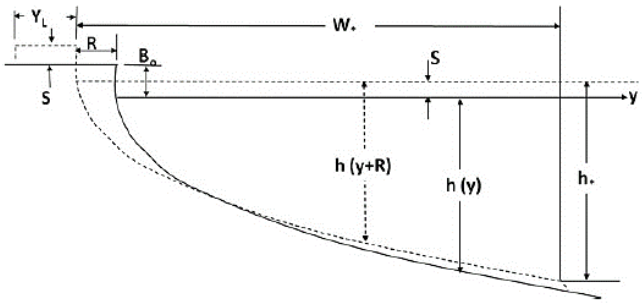
جهت محاسبه نرخ تغییرات خط ساحل پس از تغییرات تراز آب دریا با فرضیات رزاتی و همکارانش مبنی بر انتقال رسوب ساحلی، می توان از معادله زیر استفاده نمود [۴]:

$$R_R = \left(W_* + \frac{V_D}{S}\right) Ln\left(\frac{h_* + B}{h_* + B - S}\right) \approx S\,\frac{W_* + V_D/S}{h_* + B} \qquad (۱۲)$$

V_D حجم رسوب انتقال یافته به سمت خشکی بر حسب مترمکعب بر واحد طول ساحل است که برابر است با:

$$V_D = y_L \times S \qquad (۱۳)$$

در معادله بالا y_L عرض انتقال رسوب ساحلی بر حسب متر است. در شکل ۴ مشخصات نیمرخ تغییر یافته پس از افزایش تراز آب دریا بر اساس معادلات رزاتی و همکارانش مشاهده می شود.



شکل ۴ - مشخصات نیمرخ تغییر یافته پس از افزایش تراز آب دریا [۴]

۳- سواحل جنوبی دریای خزر

در این تحقیق، سواحل جنوبی دریای خزر مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت بررسی دقیق تر روابط پیشنهادی برووون و همچنین رزاتی و همکارانش، با همکاری مرکز ملی تحقیقات دریای خزر اطلاعات مورد نیاز از جمله: اندازه متوسط ذرات رسوبی، تغییرات تراز سطح آب دریای خزر و نیمرخ های عرضی سواحل جنوبی دریای خزر در مناطق ساحلی بندر انزلی و دستک از استان گیلان، نمک آبرود، محمود آباد و لاریم از استان مازندران و نیز میانکاله از استان گلستان بین سال های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۳ در زمان های مختلف برداشت شده است. در شکل ۵ ناحیه جنوبی دریای خزر و سواحل مورد مطالعه مشاهده می شود.

شکل ۵ - مناطق بررسی نیمرخ ها

اطلاعات امواج دریای خزر، شامل: ارتفاع امواج و پریود نظیر آنها در آب های عمیق و ناحیه شکست موج با دوره بازگشت ۱۲ ساله نیز بر اساس کتاب مدل سازی امواج دریاهای ایران، جلد اول: دریای خزر مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول ۱ اطلاعات اندازه متوسط ذرات رسوبی، تغییر تراز دریا و اطلاعات امواج مربوط به دوره ۱۲ ساله آمده است[۱۹].

همان طور که در جدول ۱ مشاهده می شود، اندازه ذرات متوسط در سواحل دریای خزر محدوده تقریبا یکسانی دارد و در حدود ۰,۰۰۰۲ متر است؛ البته همین اختلاف اندک در اندازه ذرات متوسط موجب می شود که تابع رفتاری نیمرخ ها با یکدگیر متفاوت باشند و در نتیجه هر ساحل رفتار مختص به خود را داشته باشد. با توجه به داده های مربوط به دوره بازگشت ۱۲ ساله در سواحل جنوبی دریای خزر، ارتفاع حداکثر امواج در آب های عمیق در شرایط طوفانی معادل ۵,۸ متر و پریود نظیر آن نیز در حدود ۱۲,۷ ثانیه است که در این حالت ارتفاع امواج در ناحیه شکست موج چیزی در حدود ۵ متر خواهد بود؛ این اعداد نشان می دهند که دریای خزر ماهیتی تقریبا طوفانی دارد. در شرایط طبیعی و میانگین امواج در طول دوره ۱۲ ساله، ارتفاع آن در آب های عمیق چیزی در حدود ۰,۶۷ متر با پریود ۴,۷ ثانیه است، که این شرایط حاکی از رفتار نرمال دریای خزر در شرایط جوی خوب و آرام خواهد داشت [۱۹].

جدول ۱ - اطلاعات برداشت شده از مناطق جنوبی دریای خزر و اطلاعات امواج با دوره ۱۲ سال[۵و۱۹و۲۰]

پارامترها	انزلی	دستک	نمک آبرود	محمودآباد	لاریم	میانکاله
اندازه متوسط ذرات بستر (متر)	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۰۱۹	۰,۰۰۰۲۳	۰,۰۰۰۱۹	۰,۰۰۰۱۷	۰,۰۰۰۱۷
تغییرات تراز آب دریا (۱۳۹۲ تا ۱۳۹۳ – متر)	-۰,۱۳۲	-۰,۱۳۲	-۰,۱۳۲	-۰,۱۳۲	-۰,۱۳۲	-۰,۱۳۲
متوسط ارتفاع امواج در آب عمیق (متر)	۰,۷۱	۰,۷۱	۰,۶۵	۰,۶۵	۰,۶۷	۰,۶۷
پریود متوسط امواج در آب عمیق (ثانیه)	۴,۸۶	۴,۸۶	۴,۲۵	۴,۲۵	۴,۷	۴,۷
ارتفاع متوسط امواج در ناحیه شکست (متر)	۰,۶۸	۰,۶۸	۰,۶۵	۰,۶۵	۰,۶۶	۰,۶۶
پریود متوسط امواج در ناحیه شکست (ثانیه)	۴,۸۷	۴,۸۷	۴,۲۶	۴,۲۶	۴,۷۲	۴,۷۲

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.3.0]

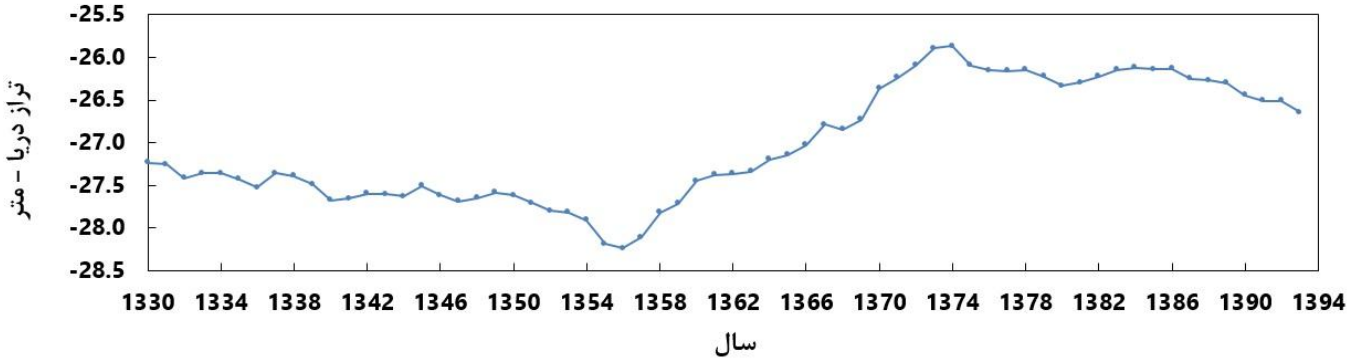
تفاوت عمده دریای خزر نسبت به آب های آزاد در نحوه تغییرات تراز سطح آب آن است؛ همان طور که از داده ها قابل مشاهده است، آب های آزاد به طور پیوسته در حال افزایش تراز هستند و این در حالی است که دریای خزر در دوره هایی با افزایش تراز و در دوره هایی با کاهش تراز سطح آب روبرو است. آب دریای خزر در سال های ۱۳۵۶ تا ۱۳۷۴ افزایش ترازی به میزان ۲,۴ متر داشته است؛ همچنین از سال ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۳ کاهش ترازی به میزان ۰,۸ متر داشته است؛ این تغییرات تراز در شکل ۶ نشان داده شده است[۵].

۴- تحلیل قانون بروون و انتقال رسوب ساحلی

جهت محاسبه عمق پایانی می توان از معادله (۳) استفاده نمود؛ این معادله را مرکز تحقیقات مهندسی سواحل ارتش امریکا پیشنهاد داده است. خروجی ها از پیش بینی منطقی این معادله حکایت دارند. پس از محاسبه عمق پایانی، فاصله آن تا خط ساحل بر اساس نیمرخ های سال ۱۳۹۲ بدست آمده است؛ همچنین شیب طبیعی ساحل نیز بر اساس مقادیر عمق پایانی و فاصله تا خط ساحلی بدست می آید.

برای محاسبه ارتفاع حداکثر بالاروی آب بر روی ناحیه ساحلی در اثر امواج نیز باید سرعت مرزی آب در خط ساحل بدست آید؛ که این سرعت تابعی از شتاب گرانشی زمین، ارتفاع موج و ضریب وابسته به فروپاشی موج در ناحیه شکست است. جهت تخمین ضریب فروپاشی موج، مقدار ضریب C برابر ۱,۴ لحاظ می شود. پارامتر های عمق پایانی، فاصله افقی عمق پایانی تا خط ساحل، شیب طبیعی ساحل، سرعت مرزی آب در خط ساحل و ارتفاع حداکثر بالاروی آب بر روی ناحیه ساحلی در اثر امواج در جدول ۲ آمده است.

همان طور که در جدول ۲ مشاهده می شود، عمق آب در انتهای ناحیه فعال ساحلی بر اساس معادلات، در حدود ۴,۵ متر پیش بینی می شود؛ با توجه به پارامتر شیب طبیعی بستر، فاصله این عمق تا خط ساحل، برای هر منطقه متفاوت خواهد بود. همان طور که مشاهده می شود فاصله افقی عمق پایانی تا خط ساحل در سواحل محمود آباد و نمک آبرود به دلیل شیب بیشتر نسبت به سایر مناطق مورد مطالعه، کمتر است؛ همچنین این فاصله در سواحل میانکاله به دلیل شیب کم، طولانی تر است. با توجه به شرایط تبدیل انرژی برای فروپاشی امواج، مشاهده می شود که بالاروی قائم آب بر اثر امواج در ناحیه ساحلی، چیزی در حدود ۰,۶۵ متر است که برای تمامی سواحل مقادیر نزدیکی بدست آمده است.



شکل ۶ – تغییرات تراز ۶۰ سال دریای خزر بر اساس تراز آب های آزاد [۵]

جدول ۲ – مقادیر پارامتر های محاسبه شده جهت تحلیل تغییرات خطوط ساحلی

پارامترها	انزلی	دستک	نمک آبرود	محمودآباد	لاریم	میانکاله
عمق پایانی (متر)	۴,۷۹۳	۴,۷۹۳	۴,۳۸۸	۴,۳۸۸	۴,۵۲۳	۴,۵۲۳
فاصله خط ساحل تا عمق پایانی (متر)	۴۵۴,۴۳۷	۴۵۱,۰۴۴	۳۲۷,۸۵۶	۲۹۶,۸۰۵	۴۵۴,۸۵۸	۸۸۵,۳۶۹
شیب طبیعی ساحل	۰,۰۱۱	۰,۰۱۱	۰,۰۱۳	۰,۰۱۵	۰,۰۱۰	۰,۰۰۵
ضریب وابسته به فروپاشی موج در ناحیه شکست	۱,۴	۱,۴	۱,۴	۱,۴	۱,۴	۱,۴
سرعت مرزی آب در خط ساحل (متر بر ثانیه)	۳,۶۱۵	۳,۶۱۵	۳,۵۳۵	۳,۵۳۵	۳,۵۶۲	۳,۵۶۲
ارتفاع حداکثر بالاروی آب بر روی ناحیه ساحلی در اثر امواج (متر)	۰,۶۶۶	۰,۶۶۶	۰,۶۳۷	۰,۶۳۷	۰,۶۴۷	۰,۶۴۷

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-03]

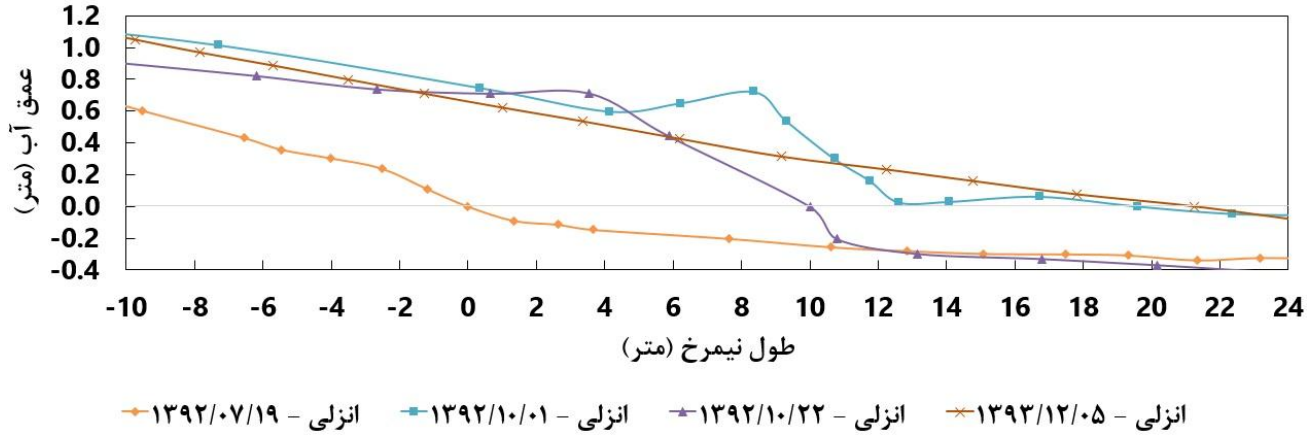
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.3.0]

۴-۱- تطبیق قانون بروون با شرایط کاهش تراز سطح آب دریا

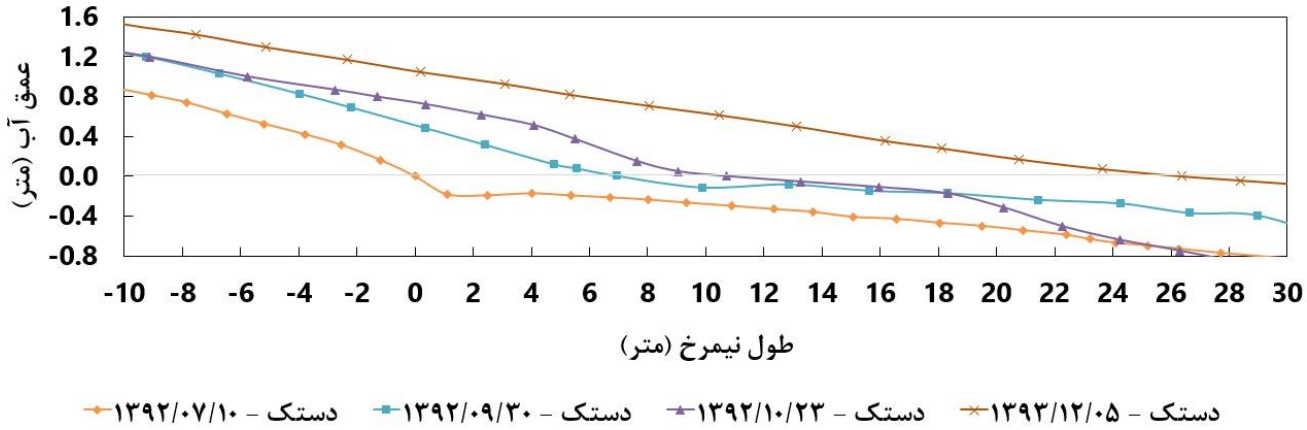
با توجه به کاهش تراز آب دریای خزر در سال های اخیر، خط ساحلی (R) به سمت دریا حرکت خواهد کرد (پیش روی خط ساحلی)؛ اما این در حالی است که تمامی معادلات بر اساس افزایش تراز آب، ارائه و اصلاح شده اند. بنابراین در این تحقیق سعی شده است تا قانون بروون و قانون اصلاحی بروون برای انتقال رسوب ساحلی در جهت کاهش تراز آب دریا بررسی و اصلاح شوند. در بررسی های انجام شده، مقادیر تغییر تراز آب (S) منفی لحاظ شده است؛ و همچنین متناسب با آن، تغییر خط ساحل (R) که به سمت دریا پیش روی خواهد داشت نیز در معادلات منفی لحاظ شده است؛ همچنین، سایر پارامتر های مرتبط با معادلات (۱) و (۱۲) بر اساس تعاریف پایه خود لحاظ شده اند.

جهت محاسبه حجم بحرانی آورد رسوبی به سمت خشکی در معادله (۶) که رزاتی و همکارانش به آن اشاره کرده اند، می توان آن را به سه بخش تقسیم نمود؛ بخش اول، حجم رسوبی ناشی از بالاروی آب در اثر امواج ($R_B \times B$) که با توجه به ماهیت آن، مثبت لحاظ شده است؛ بخش دوم، حجم رسوبی ناشی از تغییرات تراز ($-S \times W_*$) که با توجه به کاهش تراز دریای خزر و در نتیجه اضافه شدن این حجم به خشکی، مقدار آن مثبت لحاظ شده است؛ بخش سوم، حجم رسوبی ناشی از تغییرات خطوط ساحلی وابسته به پارامتر مقیاس رسوبی ($+\frac{3}{5}A(W_*^{5/3}-(W_*-R_B)^{5/3})$) است، در این بخش با توجه به پیش روی خط ساحل و مقدار منفی آن، تغییرات فاصله افقی عمق پایانی تا خط ساحل پیش از تغییر تراز، به صورت $W_*-(-R_B)$ در نظر گرفته شده است. جهت محاسبه تغییرات خط ساحل بر اساس معادله ارایه شده توسط رزاتی و همکارانش، با توجه به حریم ساحلی دریای خزر، برای پارامتر عرض آورد رسوب ساحلی، مقدار عرض آورد رسوبی بحرانی لحاظ شده است.

در شکل ۷، تغییرات خطوط ساحلی از نیمرخ های برداشت شده سواحل مورد مطالعه نشان داده شده است. همچنین، در جدول ۳، مقادیر تغییرات خطوط ساحل بر اساس قانون بروون، قانون اصلاح شده بروون برای انتقال رسوب ساحلی، تغییر خط ساحل بر مبنای نیمرخ های برداشت شده در سال های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۳، مقادیر حجم بحرانی آورد رسوبی به سمت خشکی و عرض بحرانی حداقل آورد رسوبی به سمت خشکی، آورده شده است.



(الف)

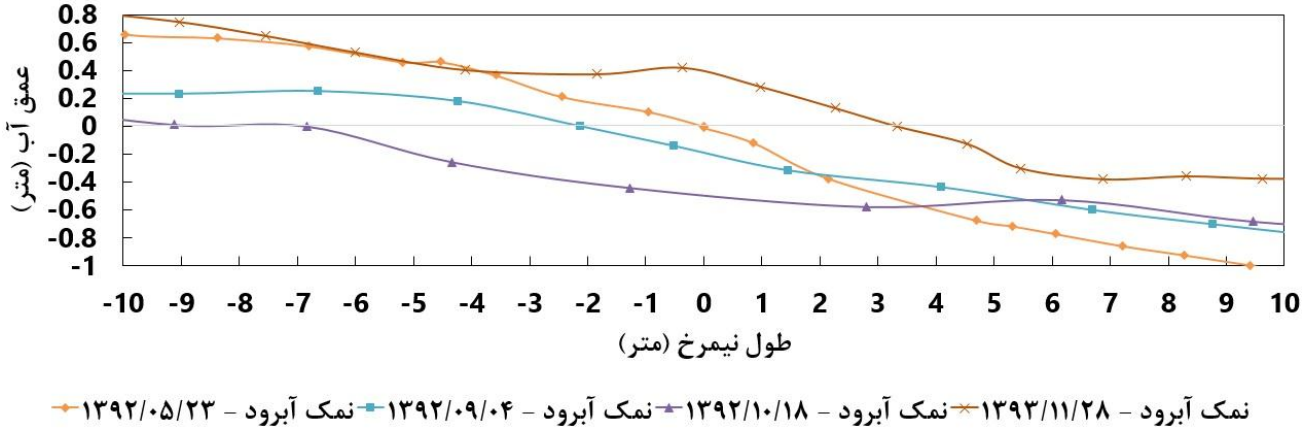


(ب)

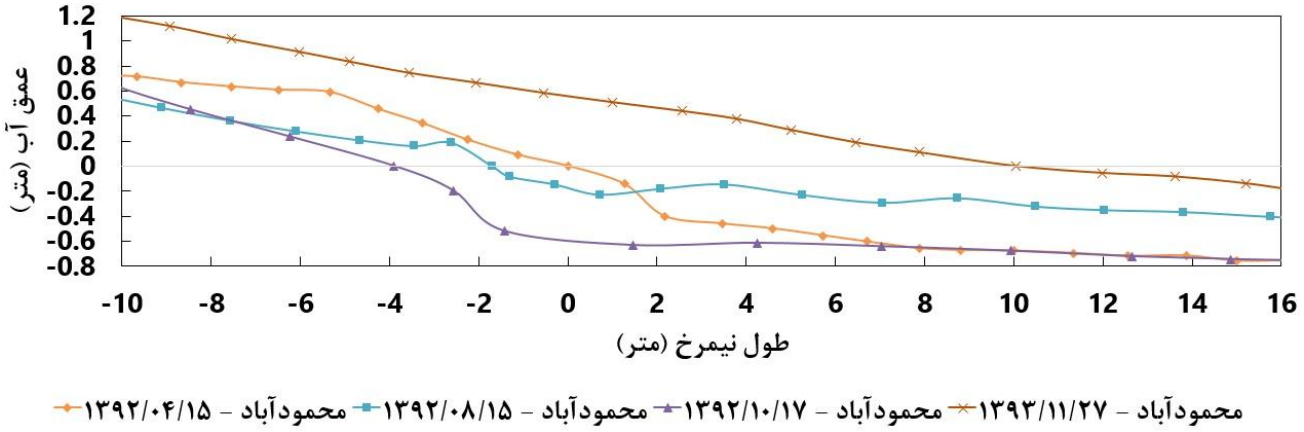
شکل ۷ - تغییرات خط ساحلی از نیمرخ های مشاهده شده در سواحل مورد مطالعه ؛ (الف): نیمرخ های بندرانزلی، (ب): نیمرخ های دستک، (پ): نیمرخ های نمک آبرود، (ت): نیمرخ های محمودآباد، (ث): نیمرخ های لاریم، (ج): نیمرخ های میانکاله

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-03]

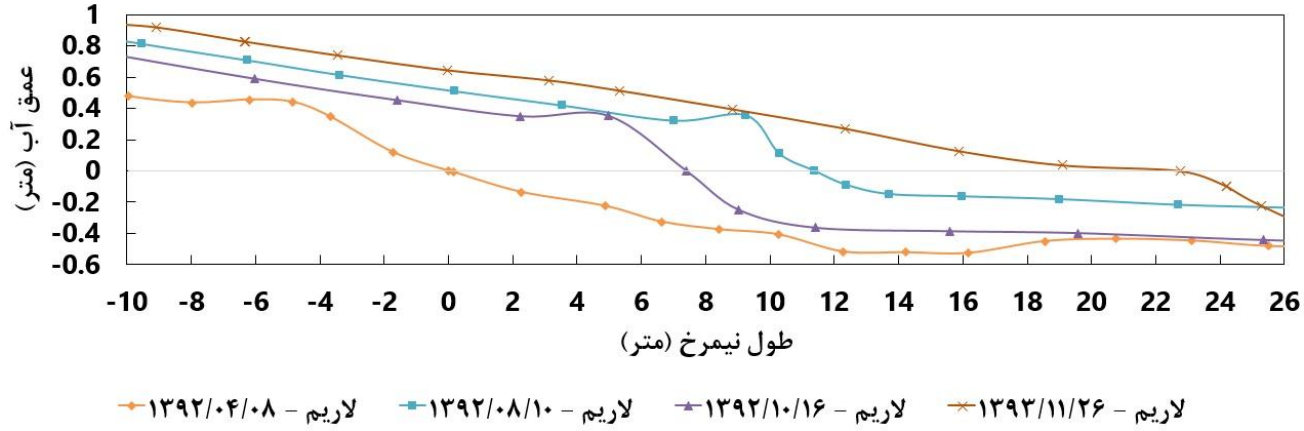
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.3.0]



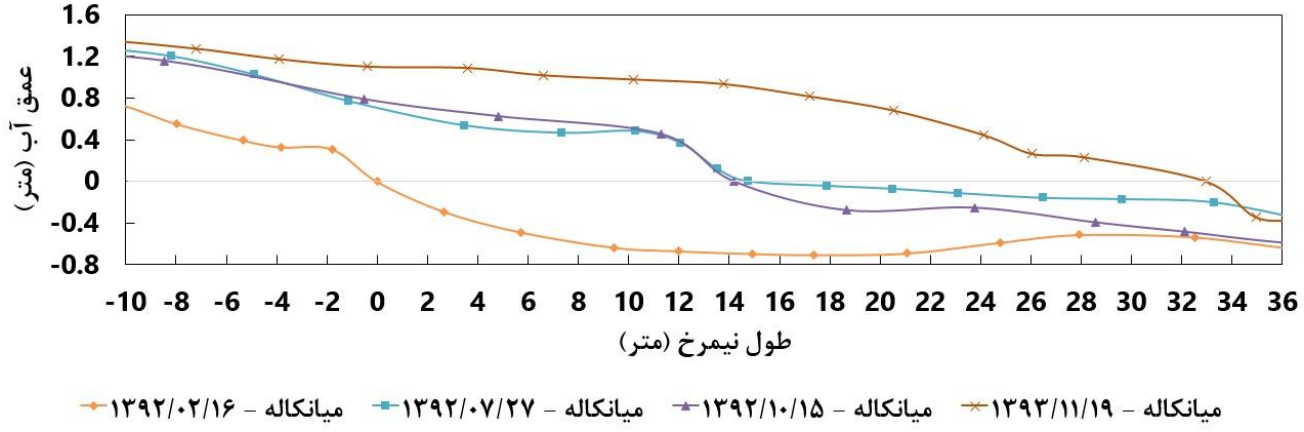
(پ)



(ت)



(ث)



(ج)

شکل ۷ - تغییرات خط ساحلی از نیمرخ های مشاهده شده در سواحل مورد مطالعه (ادامه)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.3.0]

جدول ۳ – مقادیر پارامتر های تغییرات خط ساحل بر اساس قانون بروون، قانون اصلاح شده بروون برای انتقال رسوب ساحلی، تغییر خط ساحل بر مبنای نیمرخ های برداشت شده در سال های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ [۲۰]

پارامترها	انزلی	دستک	نمک آبرود	محمودآباد	لاریم	میانکاله
تغییرات طبیعی خط ساحل (متر)	۱۱,۳۶۷	۲۰,۴۷۹	۶,۳۲۲	۱۱,۹۱۹	۱۶,۴۹۱	۲۳,۲۹۸
تغییرات خط ساحل بر اساس معادله بروون (متر)	۱۰,۷۲۹	۱۰,۶۴۹	۸,۳۹۲	۷,۵۹۷	۱۱,۳۲۴	۲۲,۰۴۲
تغییرات خط ساحل بر اساس معادله رزاتی و همکارانش (متر)	۱۲,۱۷۲	۱۲,۶۴۵	۹,۵۷۴	۱۰,۲۸۳	۱۴,۰۵۰	۱۶,۷۹۷
اختلاف تغییرات طبیعی خط ساحل با معادله بروون (متر)	۰,۶۳۸	۹,۸۳۰	۲,۰۷۰	۴,۳۲۲	۵,۱۶۷	۱,۲۵۶
اختلاف تغییرات طبیعی خط ساحل با معادله رزاتی و همکارانش (متر)	۰,۸۰۵	۷,۸۳۴	۳,۲۵۲	۱,۶۳۶	۲,۴۴۱	۶,۵۰۱

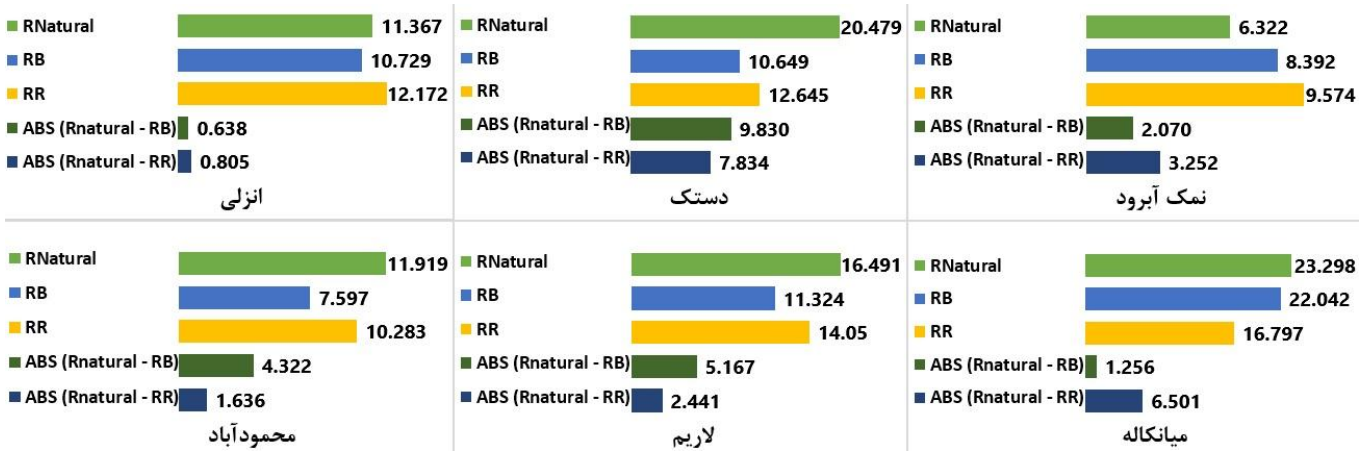
تعیین مقادیر حجم بحرانی، نشان خواهد داد که مرز حداقل آورد رسوب ساحلی در هر منطقه چقدر خواهد بود؛ همچنین با توجه به مقدار بدست آمده این حجم برای سواحل میانکاله، می توان نتیجه گرفت که نواحی با شیب کم، بسیار مستعد انتقال رسوب به سمت ساحل هستند. همین طور برای پارامتر وابسته $y_{L,crit}$ نیز می توان چنین برداشتی نمود.

اختلاف نرخ تغییرات خط ساحل بر اساس پیش بینی های حاصل از معادلات قانون بروون و قانون بروون اصلاح شده با داده های واقعی از سواحل مورد مطالعه در دوره یک ساله را می توان در شکل ۸ مشاهده نمود.

با توجه به نتایج به دست آمده از نمودارها در شکل ۸، پیش بینی تغییر خط ساحلی بر اساس قانون بروون در تمامی سواحل به جز ساحل نمک آبرود، کمتر از مقدار طبیعی است. این در حالی است که قانون اصلاح شده بروون بر اساس آورد رسوب ساحلی، در سواحل انزلی و نمک آبرود مقادیر تغییر خطوط ساحلی را بیشتر از حد طبیعی آن پیش بینی می کند. اما همان طور که از بررسی ها مشاهده می شود، انتقال رسوب ساحلی که رزاتی و همکارانش به آن اشاره کردند، در سواحل دستک، محمود آباد و لاریم پیش بینی نزدیک تری نسبت به قانون اولیه بروون ارائه می کند؛ در سواحل انزلی و نمک آبرود نیز پیش بینی ها نزدیک است. همچنین بر اساس خطای جذر میانگین مربعات[۱۳] نیز مشاهده می شود که خطای پیش بینی تغییرات خط ساحل بر اساس معادله رزاتی و همکارانش کمتر از معادله بروون خواهد بود [۲۱].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(R_{Natural} - R_{B,or,R}\right)^2}{n_{\text{Numbers of data}}}} \qquad (۱۴)$$

بر اساس معادله (۱۴)، خطای جذر میانگین مربعات معادله بروون مقدار ۴,۹۷۱ متر و معادله اصلاح شده بروون بر اساس انتقال رسوب ساحلی مقدار ۴,۵۳۷ متر خواهد بود؛ این یعنی اختلاف ۰,۴۳ متر بین این دو معادله و دقت بالاتر معادله پیشنهادی رزاتی و همکارانش که پیش بینی ها را به واقعیت نزدیک تر خواهد کرد.



شکل ۸ – نمودار میله ای مقایسه پیش بینی تغییرات خطوط سواحل با داده های واقعی از سواحل مورد مطالعه بر حسب متر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.3.0]

۵- نتیجه گیری

جهت پیش بینی تغییرات خطوط ساحلی در اثر افزایش تراز آب دریا، بروون معادله ای را ارایه و توسعه داد (معادله ۱)؛ در این معادله تغییرات خطوط ساحلی با پارامتر های افزایش تراز آب دریا، عمق پایانی، فاصله عمق پایانی تا خط ساحل و ارتفاع حداکثر بالاروی آب بر روی ناحیه ساحلی در اثر امواج در ارتباط است؛ مطالعات آزمایشگاهی و میدانی بسیاری در این زمینه انجام شده است که نتایج حاکی از پیش بینی منطقی قانون بروون دارند. در این تحقیق نیز، این قانون بررسی و تحلیل شده است، که با توجه به کاهش تراز آب دریای خزر، برای مناطق مورد مطالعه پیش بینی های خوبی را انجام داده است؛ حداقل و حداکثر اختلاف پیش بینی خط ساحلی نسبت به مقدار واقعی آن به ترتیب ۰,۶۳۸ و ۹,۸۳۰ متر بوده است و همچنین، خطای جذر میانگین مربعات نیز مقدار ۴,۹۷۱ متر بدست آمده است.

پس از بررسی های فراوان، رزاتی و همکارانش به این نتیجه رسیدند که انتقال رسوب ساحلی نیز در تعیین خطوط ساحلی نقش بسزایی را ایفا می کند و با اعمال آن به قانون بروون، پیش بینی تغییرات خطوط ساحلی را بهبود بخشیدند. معادله پیشنهادی رزاتی و همکارانش (معادله ۱۲) نیز در این تحقیق مورد بررسی کامل قرار گرفته است که تحلیل ها نشان از پیش بینی های مطلوب تر نسبت به قانون بروون دارند. در این بررسی، حداقل و حداکثر اختلاف پیش بینی خط ساحلی نسبت به مقدار واقعی آن به ترتیب ۰,۸۰۵ و ۷,۸۳۴ متر بوده است و همچنین، خطای جذر میانگین مربعات نیز مقدار ۴,۵۳۷ متر بدست آمده است.

همین طور که از بررسی نتایج بر می آید، تحلیل قانون بروون بر اساس انتقال رسوب ساحلی که توسط رزاتی و همکارانش ارایه گردیده است، در مجموع نتایج بهتری نسبت به حالت اولیه، یعنی انتقال تمام رسوبات به سمت دریا در اثر تغییرات تراز آب که توسط بروون ارایه شده، بدست می دهد.

۶- تشکر و قدردانی

با تشکر از همکاران تحقیقاتی، مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر و اداره کل بنادر و دریانوردی استان گیلان جهت در اختیار قرار دادن اطلاعات مورد نیاز از دریای خزر؛ همچنین، با سپاس فراوان از مهندس ملک (مدیریت مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر) و مهندس سلیمی (اداره کل بنادر و دریانوردی استان گیلان – بخش آبنگاری[۱۴]) بابت ایجاد هماهنگی های لازم جهت دریافت اطلاعات.

کلیدواژگان

1- Tidal inlet
2- Rocky promontory
3- Shore face
4- Berm
5- Bar
6- Beach face
7- Backshore
8- Mean Sea Level
9- Closure Depth
10- Landward sediment transport
11- Long Island
12- Delmarva Peninsula
13- Root mean square error
14- Hydrography

۷- مراجع

1-Sorensen, R.M., (2006), *Basic coastal engineering, Third Edition (Vol. 10)*, Springer Science & Business Media, Printed in the United States of America

2-Bruun, P., (1954), *Coast erosion and the development of beach profiles*, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 44

3-Bruun, P., (1962), *Sea-level rise as a cause of shore erosion*, Journal of the Waterways and Harbors division, 88(1), 117-132

4-Rosati, J.D., Dean, R.G. and Walton, T.L., (2013), *The modified Bruun Rule extended for landward transport*, Marine Geology, 340, 71-81

5- Iran, Ports and Marine Administrations of Guilan province, (2015), *Caspian Sea Level Changes*, Data center, http://anzaliport.pmo.ir/en/home

6-Baldock, T.E. and Holmes, P., (1999), *Simulation and prediction of swash oscillations on a steep beach*, Coastal Engineering, 36(3), 219-242

7-Yeh, H.H., Ghazali, A. and Marton, I., (1989), *Experimental study of bore run-up*, Journal of Fluid Mechanics, 206, pp.563-578

8-Svendsen, I.A., Madsen, P.A. and Hansen, J.B., (1978), *Wave characteristics in the surf zone*, Coastal Engineering Proceedings, 1(16)

9-Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., (2004), *Coastal processes with engineering applications*, Cambridge University Press, ISBN 0-511-03791-0 eBook

10-Stive, M.J., (2004), *How important is global warming for coastal erosion?*, Climatic Change, 64(1), 27-39

11-Cooper, J.A.G. and Pilkey, O.H., (2004), *Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule*, Global and planetary change, 43(3), 157-171

12-Kaplin, P.A. and Selivanov, A.O., (1995), *Recent coastal evolution of the Caspian Sea as a natural model for coastal responses to the possible acceleration of global sea-level rise*, Marine Geology, 124(1), 161-175

13-Neshaei, M.A.L., Veiskarami, M. and Nadimy, S., (2011), *Computation of shoreline change: A transient cross-shore sediment transport approach*,

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.3.0]

14-Leatherman, S.P., Zhang, K. and Douglas, B.C., (2000), *Sea level rise shown to drive coastal erosion*, Eos, Transactions American Geophysical Union, 81(6), 55-57

15-Zhang, K., Douglas, B.C. and Leatherman, S.P., (2004), *Global warming and coastal erosion*, Climatic Change, 64(1-2), 41-58

16-Ranasinghe, R., Callaghan, D. and Stive, M.J., (2012), *Estimating coastal recession due to sea level rise: beyond the Bruun rule*, Climatic Change, 110(3-4), 561-574

17-United States, Army. Coastal Engineering Research Center, (2006), *Coastal engineering manual*, U.S. Government Printing Office, Washington DC 20314-1000

18-Van Rijn, L.C., (1993), *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas (Vol. 1006)*, AQUA Publications, Published in the Netherlands, Amsterdam

19-Iran, Ports and Maritimes Organization, (2009), *Waves modeling of Iranian seas first volume: Caspian Sea*. (In Persian)

20- Iran, Water Research Institute, Caspian Sea National Research Center, (2015), Data center, http://wri.ac.ir/

21-Willmott, C. J., and Matsuura, K., (2005). *Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance*, Climate research, 30(1), 79

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.3.0]