



تحلیل تغییرات تراز آب دریای خزر و تعیین عوامل موثر بر آن همراه با پیش‌بینی آینده

محمد هادی معینی^{۱*}، مجید جندقی علایی^۲، سهام الدین چراغی^۳، سید مجتبی موسوی مهر^۴، خدیجه منیر واقفی^۵، زهرا مشهدی^۶، محمود پورعلی^۷، گیتا برادران ابراهیمی^۸

۱- دکتری مهندسی عمران-مهندسی آب، مهندسین مشاور پویا طرح پارس، mhmocini@gmail.com

۲- دکتری مهندسی عمران-مهندسی سواحل، مهندسین مشاور پویا طرح پارس، majid.jandaghi@gmail.com

۳- دانشجوی دکتری فیزیک دریا - اقیانوس شناسی، سازمان بنادر و دریانوردی، saham.pmo1978@gmail.com

۴- دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، سازمان بنادر و دریانوردی، mmmousavimehr@pmo.ir

۵- کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، مهندسین مشاور پویا طرح پارس، kh.m.vaghefi@gmail.com

۶- کارشناسی ارشد سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، مهندسین مشاور پویا طرح پارس، zahra.m7842@gmail.com

۷- دکتری مهندسی عمران- مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی mahmoud.pourali@gmail.com

۸- دانشجوی دکتری فیزیک دریا - سواحل، سازمان بنادر و دریانوردی، gebrahimi@pmo.ir

خلاصه

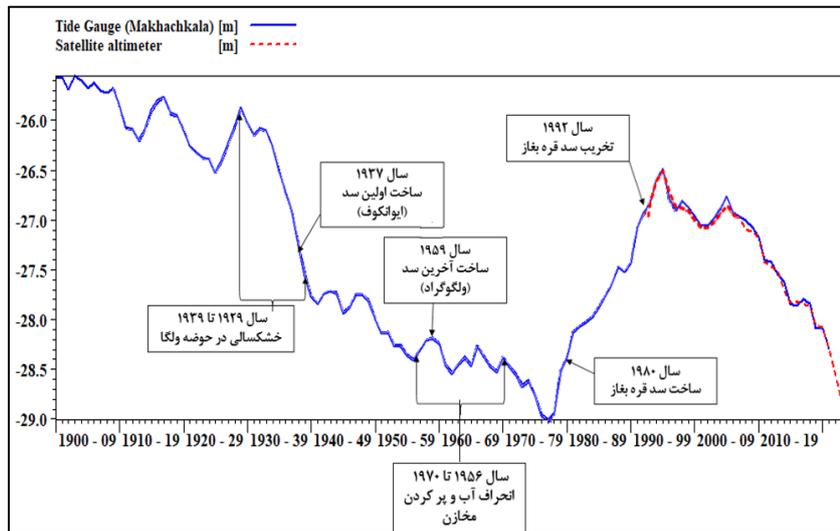
تراز سطح آب دریای خزر در سالیان گذشته همواره تغییراتی را تجربه نموده است. این تغییرات در برخی زمان‌ها به صورت صعودی و در برخی زمان‌های دیگر به صورت نزولی بوده است. در حال حاضر نیز تراز این دریا به کمترین مقدار تاریخی خود رسیده است. از آنجاییکه این تغییرات تراز بر روی پارامترهای وسیعی از جمله موارد محیط زیستی و مهندسی تاثیرگذار است، پیش‌بینی آن برای آینده از اهمیت دوچندانی برخوردار است. با توجه به اینکه دریای خزر یک دریاچه بسته است، تغییرات تراز آن تابع بارش و تبخیر از روی سطح این دریاچه، ورودی آب رودخانه‌ها به آن و خروجی آب آن به حوضچه‌های دیگر از قبیل خلیج قره بوغاز می‌باشد. تفاوت مقدار بارش و تبخیر از روی دریای خزر در حدود منفی ۷۰ سانتی متر می‌باشد که برای ثابت ماندن تراز باید توسط رودخانه‌ها جبران شود. در میان رودخانه‌های ورودی به دریاچه خزر، رودخانه ولگا به تنهایی در حدود ۹۰ درصد آورد آبی به دریای خزر را شامل می‌شود. تحلیل اطلاعات گذشته نشان می‌دهد که علت اصلی افت تراز آب دریای خزر در سال‌های اخیر، افزایش مقدار تبخیر از این دریاچه بوده است. به بیان دیگر بررسی آورد آبی رودخانه‌ها و به ویژه رودخانه ولگا نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر تغییر اندکی در آن رخ داده در حالی که روند تبخیر افزایشی بوده است. در پژوهش کنونی با بررسی جزئیات موارد مطرح شده، به بررسی پارامترهای نامبرده در گذشته با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و همچنین مدل‌های هواشناسی پرداخته شده و نهایتاً به پیش‌بینی تراز آب در آینده پرداخته شده است. به صورت کلی با توجه به اطلاعات مدل‌های اقلیمی، تراز آب در آینده به صورت کاهشی پیش‌بینی شده و مقدار آن برای سناریوهای مختلف متفاوت است.

کلمات کلیدی: دریای خزر، تراز آب، تبخیر، بارش، ولگا، قره بوغاز



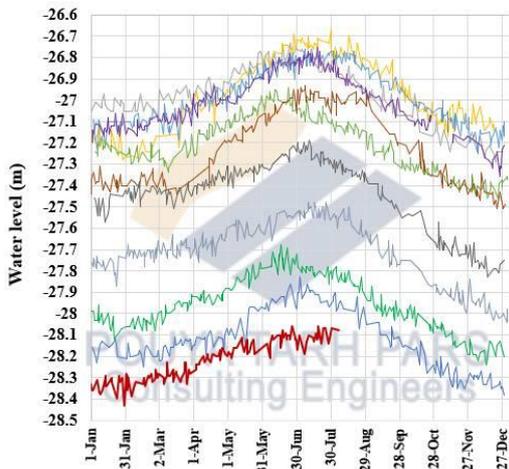
۱. مقدمه

دریای خزر بزرگترین دریاچه جهان است که در مرز آسیا و اروپا قرار گرفته است. طول آن از شمال به جنوب حدود ۱۱۵۰ کیلومتر و عرض آن از شرق به غرب حدود ۳۵۰ کیلومتر است. این پهنه آبی دارای مساحت حدود ۳۷۱۰۰۰ کیلومتر مربع و حجم تقریبی ۷۸۰۰۰ کیلومترمکعب می‌باشد. تراز آب دریای خزر در گذشته تا کنون تغییرات متفاوتی را تجربه نموده است. شکل ۱ نمودار تغییرات تراز آب دریای خزر را بر مبنای اطلاعات اندازه‌گیری شده در ایستگاه ماخاچ قلعه (ماخاچ کالا) و همچنین بر مبنای اطلاعات ماهواره‌ای نشان می‌دهد. توجه شود که مبنای این نمودار تراز آب دریاها را آزاد در بالتیک است که مقداری (حدود ۸۰ سانتی متر) با مبنای نقشه برداری ایستگاه‌های خشکی برای کشور ایران (ایستگاه شهید رجایی) متفاوت است. در شکل ۱ همچنین مهمترین رخدادهای اتفاق افتاده که بر روی تغییرات تراز آب تاثیرگذار بوده اند، ارائه شده اند. همچنانکه مشاهده می‌شود از سال ۱۹۷۸ میلادی تا کنون تراز آب این دریا یک دوره صعودی و یک دوره نزولی داشته و نوسان آن در حدود ۲/۵ متر بوده است.



شکل ۱ - تغییرات تراز آب دریای خزر در سالیان گذشته همراه با مهمترین رخدادهای

تراز آب دریای خزر دارای یک نوسان فصلی نیز می‌باشد که عمدتاً به دلیل تغییرات بارش، تبخیر و آورد رودخانه ولگا در طول سال است. شکل ۲ تغییرات سالیانه تراز آب دریای خزر را برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ بر مبنای پنج مارک شهید رجایی که مبنای نقشه برداری در ایران است نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود تغییرات فصلی تراز آب در این دریا به حدود ۵۰ سانتی متر در طول یک سال می‌رسد. بر مبنای این شکل تراز آب دریا در زمان نگارش این مقاله، حدود ۲۸/۱۰- نسبت به پنج مارک شهید رجایی می‌باشد.



— 2015
— 2016
— 2017
— 2018
— 2019
— 2020
— 2021
— 2022
— 2023
— 2024
— 2025

بازه زمانی	روند	تغییرات تراز سطح آب (بر حسب سانتی متر)
ژانویه ۲۰۱۵ تا ژانویه ۲۰۱۶	کاهشی	۱۴
ژانویه ۲۰۱۶ تا ژانویه ۲۰۱۷	افزایشی	-۵
ژانویه ۲۰۱۷ تا ژانویه ۲۰۱۸	کاهشی	۱
ژانویه ۲۰۱۸ تا ژانویه ۲۰۱۹	کاهشی	۱۰
ژانویه ۲۰۱۹ تا ژانویه ۲۰۲۰	کاهشی	۱۵
ژانویه ۲۰۲۰ تا ژانویه ۲۰۲۱	کاهشی	۱۰
ژانویه ۲۰۲۱ تا ژانویه ۲۰۲۲	کاهشی	۲۷
ژانویه ۲۰۲۲ تا ژانویه ۲۰۲۳	کاهشی	۲۳
ژانویه ۲۰۲۳ تا ژانویه ۲۰۲۴	کاهشی	۱۶
ژانویه ۲۰۲۴ تا ژانویه ۲۰۲۵	کاهشی	۱۸

شکل ۲ - تغییرات سالیانه تراز آب دریای خزر برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ (مبنا: بنج مارک شهید رجایی)

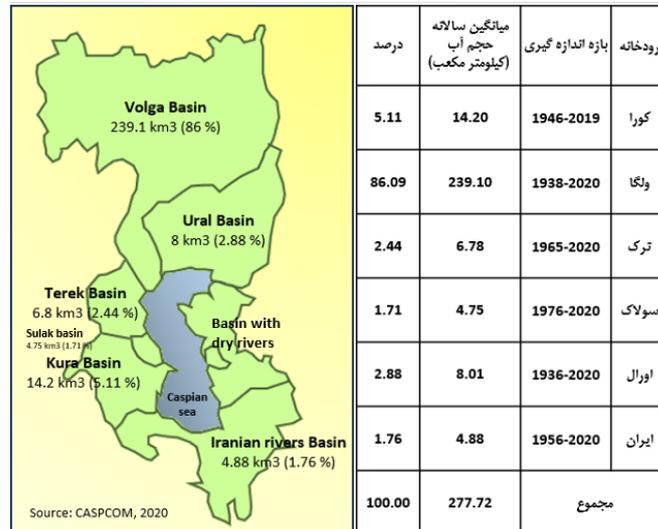
بارش، تبخیر، ورودی رودخانه‌ها و خروجی به خلیج قره بوزاغ، اجزای اصلی تعادل آبی در دریای خزر هستند. روابط متقابل این ۴ عامل، نوسانات تراز سطح آب دریای خزر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. البته در برخی پژوهش‌ها به عوامل دیگری از قبیل موارد تکتونیکی و آب‌های زیرزمینی نیز اشاره شده که بررسی‌ها نشان می‌دهد این عوامل در مقایسه با عوامل اصلی ذکر شده تأثیر چندانی ندارند. در ادامه به بررسی و تحلیل هر یک از عوامل اصلی پرداخته می‌شود.

۲. ورودی رودخانه‌های منتهی به دریای خزر

یکی از اجزای اصلی تعادل آب در دریای خزر، جریان رودخانه‌های منتهی به این دریاچه است. بیش از ۱۳۰ رودخانه به دریای خزر می‌ریزند که پرآب‌ترین آن‌ها رودخانه ولگا و رودخانه اورال در شمال خزر می‌باشند. رودخانه‌های کورا، سامور، سولاک، ترک در سواحل غربی نیز بخش قابل توجهی از جریان رودخانه‌ای به خزر را تشکیل می‌دهند. سواحل شرقی خزر عمدتاً کویری و فاقد رواناب دائمی هستند. درصد کمی از جریان ورودی به دریای خزر نیز از طریق رودخانه‌های سواحل ایران به خزر می‌ریزند. تمامی رودخانه‌هایی که به دریای خزر می‌ریزند، به استثنای ترک، جریان منظمی دارند. تنظیم جریان بر وضعیت جریان فصلی به دریا و در نتیجه نوسانات فصلی سطح خزر تأثیر می‌گذارد [1]. مساحت کل حوضه آبریز دریای خزر ۳/۵ میلیون کیلومتر مربع است که تقریباً ۱۰ برابر مساحت دریای خزر است.

با توجه به اطلاعات استخراج شده از سایت caspcom، حجم آب ورودی از سمت رودخانه‌ها به دریای خزر محاسبه شده و در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ۸۶ درصد ورودی جریان رودخانه‌ای به خزر ناشی از رودخانه ولگا است. این درصد در بازه‌های زمانی مختلف متفاوت است. سهم ورودی آب هر رودخانه در دهه‌های مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است.

حوضه ولگا با مساحت ۱۳۶۰۰۰۰ کیلومتر مربع و متوسط آبدهی ۲۴۰ کیلومتر مکعب، سالانه به طور متوسط ۶۵ سانتی متر تراز خزر را بالا می‌برد. بنابراین نوسانات سطح خزر به شدت به جریان ولگا بستگی دارد و از این رو شناخت رژیم طبیعی این رودخانه برای درک نوسانات تراز خزر حیاتی است.



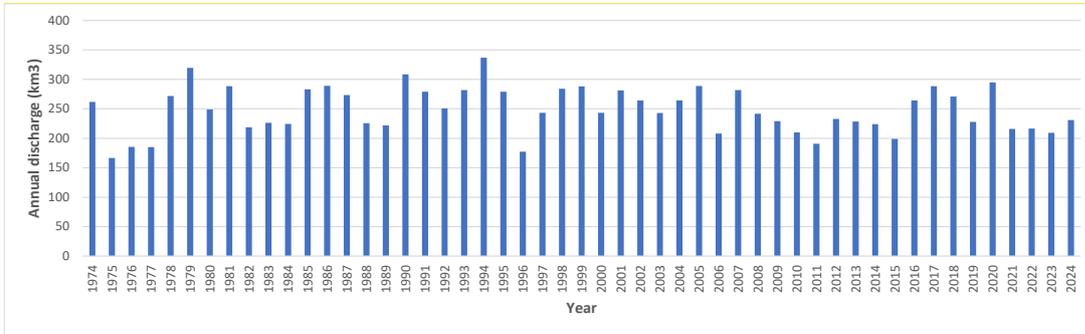
شکل ۳ - حوضه آبریز دریای خزر و حجم آب ورودی از سمت رودخانه‌های مجاور

به طور کلی رژیم آب طبیعی ولگا با سیلاب‌های بهاری، دوره‌های تابستان و پاییز و دوره کم آب زمستانی مشخص می‌شود. سیلاب‌های بهاری در بخش‌های مختلف حوضه ولگا از آوریل تا ژوئن رخ می‌دهد. سیلاب‌های بهاره بیش از ۵۰ درصد رواناب سالانه ولگا را تشکیل می‌دهند.

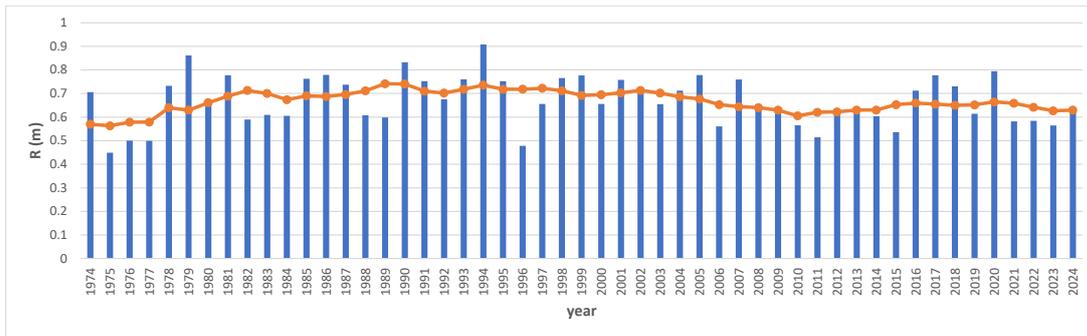
جدول ۱- درصد حجم آب ورودی از هر رودخانه نسبت به حجم ورودی کل در دهه‌های مختلف

رودخانه	1941-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2020
کورا	5.9	6.3	6.4	5.3	4.4	4.5	5.1	3.0
ولگا	84.8	85.6	85.3	86.5	87.0	86.7	86.1	88.5
ترک	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8	2.3	2.9	3.4
سولاک	1.6	1.7	1.7	1.8	1.6	1.6	2.1	1.6
اورال	4.4	3.0	3.0	2.5	3.0	3.0	2.6	2.4
پلرود	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2
چالوس	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2
هراز	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3
سفیدرود	1.0	1.1	1.1	1.6	1.5	1.4	0.6	0.5
مجموع	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

به منظور بررسی دبی رودخانه ولگا و تاثیر آن بر تغییرات تراز آب دریای خزر، نمودار حجم سالیانه آورد این رودخانه بر حسب اطلاعات اندازه‌گیری شده در ایستگاه ولگوگراد در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۵ مقدار تاثیر آورد سالیانه رودخانه ولگا بر روی تغییرات تراز آب دریای خزر در سال‌های مختلف نشان داده شده است. همچنانکه مشاهده می‌شود رودخانه ولگا در سال‌های مختلف باعث تغییرات تراز آب دریای خزر به مقدار ۶۰ تا ۸۰ سانتی متر شده است.



شکل ۴ - آورد سالیانه رودخانه ولگا به دریای خزر بر اساس اطلاعات ثبت شده در ایستگاه ولگوگراد



شکل ۵ - تاثیر آورد سالیانه رودخانه ولگا بر تراز آب دریای خزر بر اساس اطلاعات ثبت شده در ایستگاه ولگوگراد همراه با نمودار میانگین متحرک آن

۳. بارش روی سطح دریای خزر

بارش دومین بخش مهم ورودی تعادل آبی خزر است که به صورت نامتوازن در سطح آن توزیع شده است. بیشترین میزان بارندگی (تا ۱۷۰۰ میلی متر در سال) در سواحل جنوب غربی دریا، در منطقه دشت لنکران و کمترین میزان بارندگی به مقدار حدود ۱۵۰ میلی متر در سال در سواحل شرقی رخ می‌دهد.

ارزیابی بارش در منطقه دریای خزر بر اساس داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده در سواحل و جزایر انجام می‌شود و هیچ مشاهدات سیستماتیکی از بارش در روی دریا انجام نشده است. مقادیر بارش اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی نیز دارای خطای سیستماتیک می‌باشد. مشکل دیگر در تعیین مجموع بارش در سطح خزر، عدم یکنواختی سری بارش‌های اندازه‌گیری شده است. به همین علت مقادیر افزایش تراز ناشی از بارش در مطالعات انجام شده تاکنون، اختلاف قابل توجهی دارند.

اولین بار در مطالعه‌ای که توسط زایکوف در سال ۱۹۴۸ انجام شد، مجموع بارندگی سالانه در سطح دریای خزر مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه با استفاده از داده‌های درصدی در ۸۰ ایستگاه هواشناسی و روش ایزوهیت‌ها، مجموع بارش‌های سالانه به مدت ۲۸ سال تعیین شد. میانگین بارندگی سالانه در دوره مورد بررسی ۱۷۷ میلی متر برآورد شد.

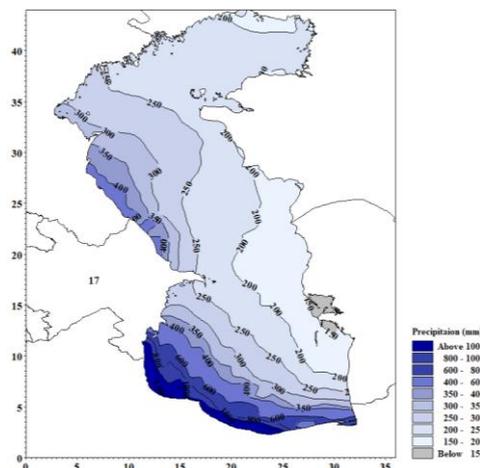


ویژگی مثبت اصلی این مطالعات، استفاده حداکثری از تمامی اطلاعات موجود در آن زمان و پردازش صحیح آن است. با این حال مشاهدات بارش در سال‌های مورد بررسی با استفاده از باران‌سنج‌هایی انجام شده است که مقادیر بارندگی را کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. همچنین هیچ اصلاحی بر روی داده‌های بارش صورت نگرفته است. بنابراین بارش به‌دست‌آمده برای محاسبه بیلان آبی خزر (تا سال ۱۹۴۶) در مقایسه با مقادیر واقعی آن به طور قابل توجهی کمتر بوده است [۲].

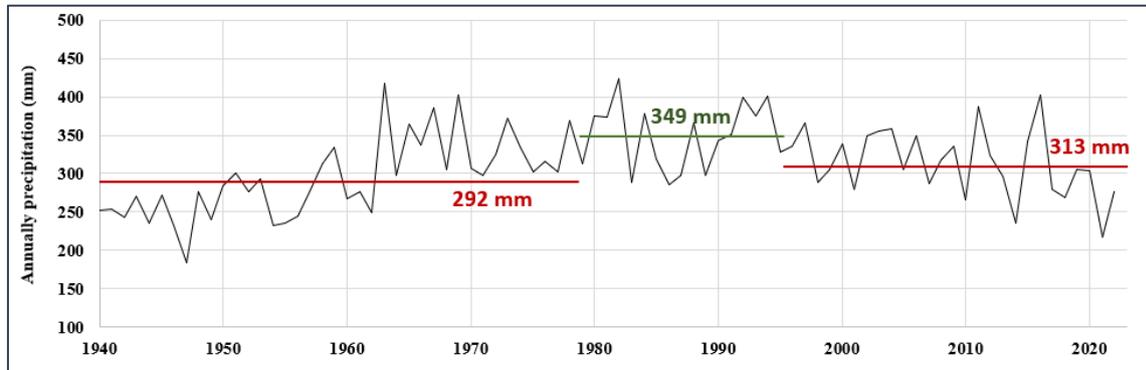
اولین اصلاحات بر روی محاسبات بارندگی توسط Arkhipova و همکاران انجام شد که نشان داد مجموع خطای حاصل از خیس شدن، تبخیر و اثر باد در منطقه خزر از ۵ درصد (در سواحل جنوب غربی) تا ۵۰ درصد (در ساحل شمالی) مقدار سالانه تغییر می‌کند. میانگین بارندگی سالانه با در نظر گرفتن انواع اصلاحات حدود ۲۵۰ میلی‌متر برآورد شد [۳]. شیکلومانوف نیز با در نظر گرفتن انواع اصلاحات، مجموع بارندگی سالانه را برای دوره ۱۸۸۰ تا ۱۹۷۲ را حدود ۲۴۰ میلی‌متر تعیین کرد [۴].

بر اساس مطالعه انجام شده توسط زهرایی، دستجردی و همکاران، میانگین بارش ۷۴ ساله در سطح خزر (۱۹۲۵ تا ۱۹۹۸) حدود ۲۲۱ میلی‌متر در سال محاسبه شده است. بر اساس نتایج این مطالعه، مقدار بارش سالیانه در نوار ساحلی خزر جنوبی از غرب به شرق کاهش می‌یابد [۵]. ایوکینا و گالاوا افزایش سطح دریای خزر در نتیجه بارندگی را حدود ۲۰۰ میلی‌متر در سال برآورد کرده‌اند [۶].

در مطالعه کنونی به منظور بررسی وضعیت بارش سالانه در سطح اطلاعات مدل هواشناسی ERA5 با تفکیک مکانی بیست و پنج صدم درجه و با گام زمانی ۱ ساعته استخراج شده است. متوسط توزیع بارش سالانه در دریای خزر برای سال‌های ۱۹۴۰ تا ۲۰۲۲ در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین سری زمانی بارش سالیانه روی کل دریای خزر بر مبنای همین اطلاعات در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶- متوسط بارش سالیانه در بازه ۱۹۴۰ تا ۲۰۲۲ بر اساس داده‌های ERA5



شکل ۷ - سری زمانی بارش سالیانه در بازه ۱۹۴۰ تا ۲۰۲۲ بر اساس داده‌های ERA5

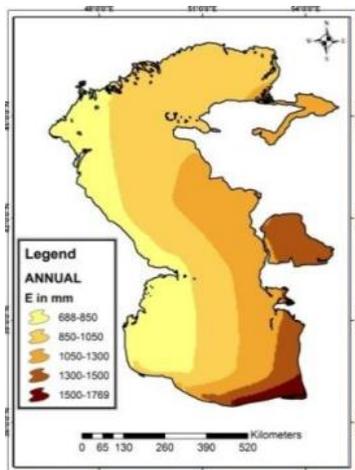
بر اساس داده‌های بررسی شده در شکل ۷، در بازه زمانی مورد بررسی، افزایش تراز آب ناشی از بارش به طور متوسط ۳۱۲ میلی‌متر در سال بوده است و حداکثر و حداقل افزایش تراز به دلیل بارش به ترتیب در سال‌های ۱۹۸۲ (۴۲۳ میلی‌متر) و ۱۹۴۷ (۱۸۴ میلی‌متر) رخ داده است. در بازه ۱۹۷۸ تا ۱۹۹۵ افزایش تراز ناشی از بارندگی در سطح خزر نسبت به دوره قبلی ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. از سال ۱۹۹۶ تاکنون افزایش تراز ناشی از بارش نسبت به دوره قبلی (۱۹۷۸-۱۹۹۵) به میزان ۱۰ درصد (۳۶ میلی‌متر در سال) کاهش یافته است.

۴. تبخیر از سطح دریای خزر

تبخیر از سطح یکی از اجزای اصلی تعادل آبی دریای خزر است. مطالعات انجام شده در زمینه تبخیر و تعرق بیشتر در سطح خشکی‌ها انجام گرفته و تعداد محدودی از مطالعات به تبخیرسنجی و پیش‌بینی آن از سطح دریا اختصاص دارد. یکی از دلایل این امر نبود داده کافی در پهناهای آبی برای محاسبه تبخیر بوده است. روش‌های مختلفی از جمله بیلان آبی و مدل‌های عددی هواشناسی برای محاسبه تبخیر وجود دارد. برای نمونه شیکلومانوف تبخیر از دریای خزر را به‌عنوان جزء باقی‌مانده بیلان آب برای دوره ۱۸۸۰ تا ۱۹۹۵ محاسبه نموده است [۷].

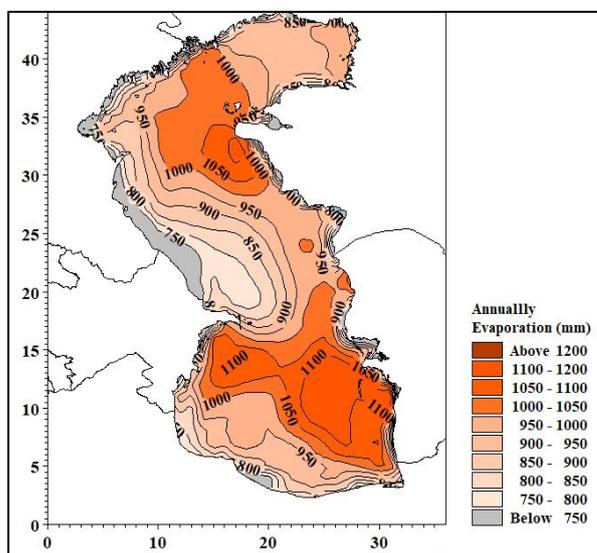
بر اساس مطالعه انجام شده توسط زهرایی، دستجردی و همکاران، میانگین تبخیر در خزر شمالی، خزر میانه و خزر جنوبی در بازه زمانی ۱۹۸۲ تا ۱۹۹۸ با استفاده از روش مایر، به ترتیب ۸۷۸، ۱۰۱۹ و ۱۱۳۴ میلی‌متر در سال برآورد شده است. توزیع میزان تبخیر سالانه به روش مایر در شکل ۸ نشان داده شده است. بر اساس این شکل تبخیر در نیمه شرقی دریای خزر بیشتر است و بالاترین میزان آن در جنوب شرقی دریای خزر به وقوع می‌پیوندد [۸].

بر اساس مطالعه انجام شده توسط ایوکینا و گالاوا در سال ۲۰۲۱، در اثر تبخیر، تراز دریای خزر به طور متوسط سالانه ۹۷۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد. در این مطالعه انحراف از مقدار متوسط تبخیر بین مثبت و منفی ۲۰۰ میلی‌متر ارزیابی شده است [۱].



شکل ۸ - متوسط بارش سالیانه توزیع تبخیر سالانه به روش مایر در بازه زمانی ۱۹۸۲ تا ۱۹۹۸ [۸]

در مطالعه کنونی به منظور بررسی توزیع تبخیر، داده‌های تبخیر ساعتی با تفکیک مکانی بیست و پنج صدم درجه از مدل هواشناسی ERA5 استخراج شده است. متوسط توزیع تبخیر سالانه در دریای خزر برای سال‌های ۱۹۴۰ تا ۲۰۲۲ در شکل ۹ نشان داده شده است.

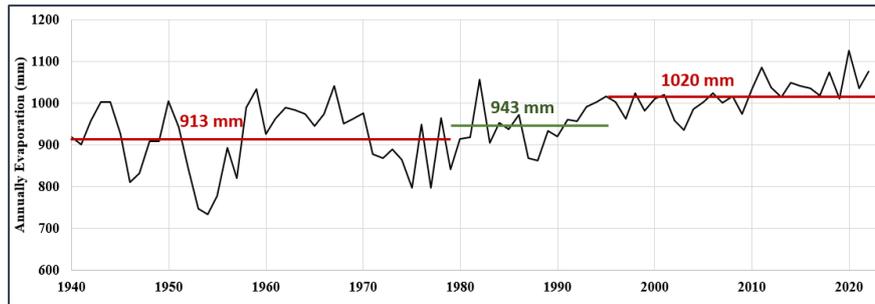


شکل ۹ - متوسط تبخیر سالیانه در دریای خزر بر اساس داده‌های ERA5 (بازه زمانی ۱۹۴۰-۲۰۲۲)

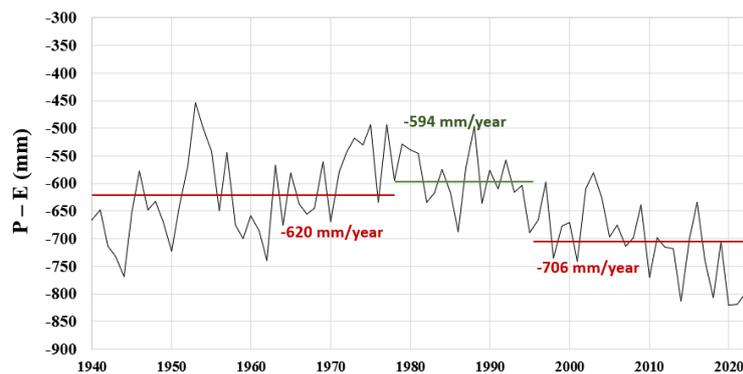
در شکل ۱۰ مقدار کاهش تراز آب ناشی از تبخیر بر روی محدوده دریای خزر بر حسب داده‌های ERA5 از سال ۱۹۴۰ تا ۲۰۲۲ به مدت ۸۲ سال نشان داده شده است. تراز سالانه خزر از سال ۱۹۹۶ تاکنون نسبت به دوره قبلی (دوره تراز سعودی خزر یعنی سال‌های ۱۹۷۸ تا ۱۹۹۵) $7/7$ سانتی متر افت بیشتری را در اثر تبخیر تجربه کرده است. افزایش مقدار تبخیر در سال‌های اخیر به خوبی در این نمودار مشخص است. در شکل ۱۱ تغییرات سالانه تراز آب دریای خزر در اثر ترکیب بارش و تبخیر نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود در سال‌های اخیر مقدار اختلاف بارش و تبخیر بر روی دریای



خزر به حدود ۸۰ سانتی متر در سال رسیده است که این مقدار به علاوه دیگر عناصر کاهنده باید توسط ورودی های رودخانه ها و عمدتاً ولگا جبران شود.



شکل ۱۰ - متوسط افت تراز سالانه خزر در اثر تبخیر بر اساس داده‌های ERA5



شکل ۱۱ - تغییرات سالانه تراز آب دریای خزر در اثر بارش و تبخیر بر اساس داده‌های ERA5

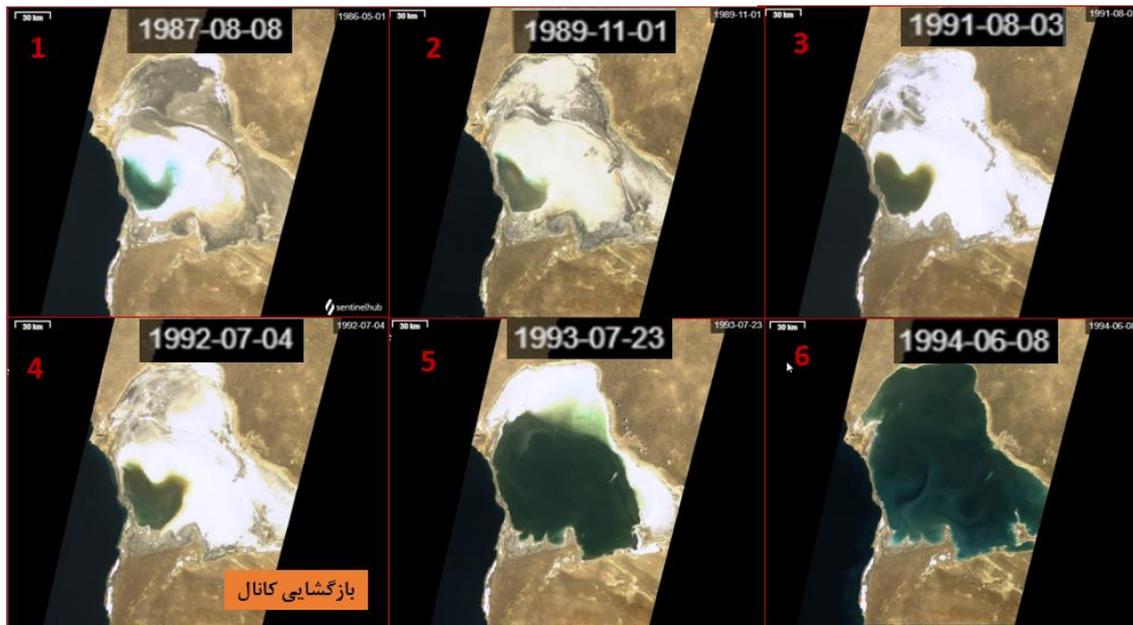
۵. تاثیر خلیج قره بوغاز

خلیج قره بوغاز با مساحت ۱۸۰۰۰ کیلومترمربع در شرق دریای خزر واقع شده است. سطح آب این خلیج پایین‌تر از سطح دریای خزر است و آب از طریق یک تنگه باریک از دریای خزر به خلیج می‌ریزد و در آنجا تبخیر می‌شود. طول این تنگه حدود ۹ کیلومتر و عمق آن بین ۳ تا ۶ متر است. با توجه به اینکه سالانه به طور متوسط حدود ۱۰۵ سانتی‌متر از آب خلیج تبخیر می‌شود و تنها ۱۵ سانتی متر بارندگی در این حوضه رخ می‌دهد، می‌توان گفت قره بوغاز نقش یک تشت تبخیری عظیم را برای دریای خزر ایفا می‌کند. لازم به ذکر است خلیج قره بوغاز یکی از شورترین آب‌های جهان است و شوری آن ۲۷۰ تا ۳۰۰ گرم در لیتر است. در اوایل قرن گذشته، زمانی که سطح دریای خزر بالا بود، تفاوت بین سطح خزر و خلیج نسبتاً کم بود. در دهه ۱۹۳۰ با سقوط تراز خزر، ورودی آب به خلیج نیز کاهش یافت و تراز خلیج و دریا از هم فاصله گرفتند.

در سال ۱۹۸۰ به علت افت سریع تراز سطح آب در دریای خزر، سد قره بوغاز ساخته شد. در اثر این مداخله انسانی در اواخر سال ۱۹۸۴ خلیج خشک شد. در سپتامبر ۱۹۸۴ لوله‌هایی در بدنه سد نصب شد تا آب دریای خزر را به خلیج هدایت



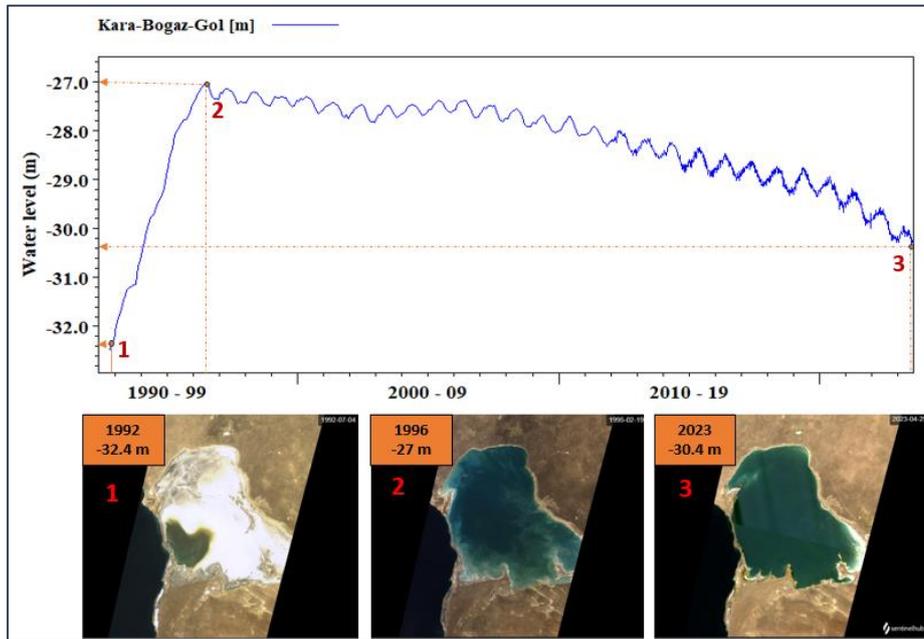
کند. نزدیک یک دهه، سالانه به طور متوسط ۱/۸ کیلومتر مکعب آب از طریق لوله‌ها به خلیج منتقل می‌شد ولی وضعیت خلیج بهبود نیافت. در ژوئن ۱۹۹۲ رئیس جمهور ترکمنستان دستور برچیدن سد را صادر کرد و تا سال ۱۹۹۶ خلیج پر شد (شکل ۱۲).



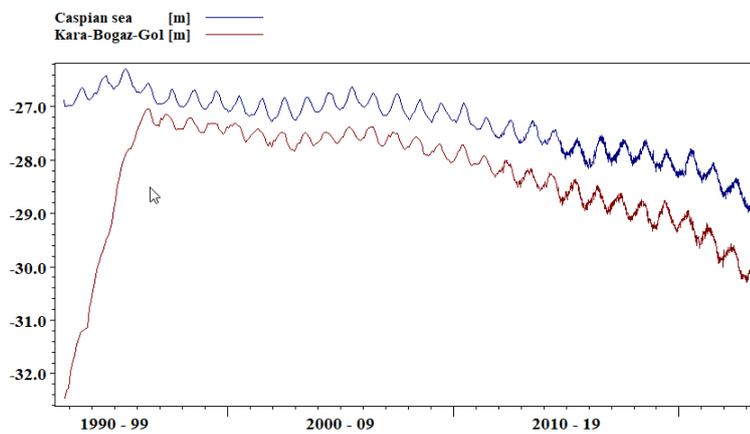
شکل ۱۲ - تصاویر ماهواره‌ای ثبت شده از خلیج قره‌بوغاز

تراز سطح آب خلیج قره بوغاز از سال ۱۹۹۲ تاکنون از طریق داده‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای در شکل ۱۳ نشان داده شده است. از زمان بازگشایی کانال (نقطه ۱) تا اواسط سال ۱۹۹۶ (نقطه ۲)، خلیج به سرعت در حال پر شدن بود. همزمان با کاهش تراز در خزر، تراز آب در خلیج قره بوغاز نیز شروع به پایین آمدن کرد و در سال ۲۰۲۳ به $۳۰/۴$ متر بر مبنای بالتیک رسید (نقطه ۳).

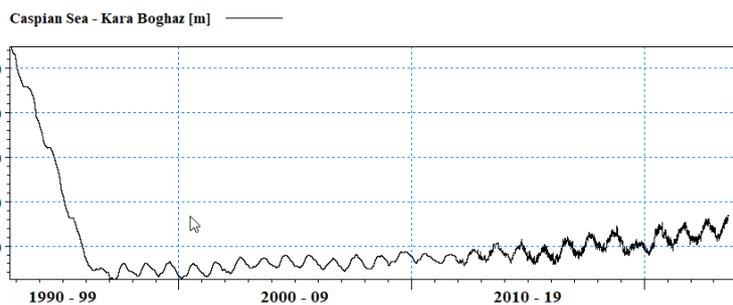
با مقایسه تراز آب دریای خزر و خلیج قره بوغاز مشاهده می‌شود روند تغییرات فصلی و درازمدت تراز در خلیج مشابه دریای خزر است (شکل ۱۴). بعد از بازگشایی کانال، اختلاف تراز دریا و خلیج از $۵/۵$ متر به ۲۵ سانتی متر در سال ۱۹۹۶ رسید. از آن زمان تاکنون تراز خزر و خلیج قره بوغاز شروع به فاصله گرفتن کرده است و در حال حاضر اختلاف این دو سطح به $۱/۸$ متر رسیده است (شکل ۱۵).



شکل ۱۳ - تغییرات تراز در خلیج قره بوغاز بعد از برچیدن سد



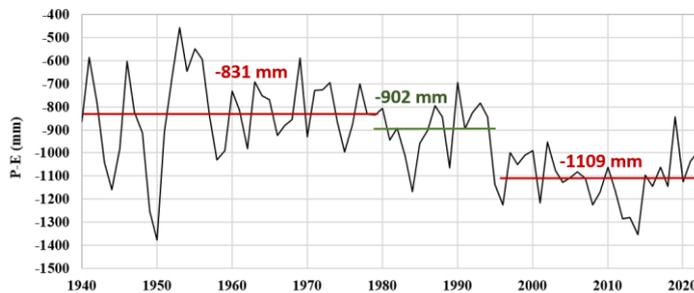
شکل ۱۴ - مقایسه تغییرات تراز آب دریای خزر و خلیج قره‌بوغاز



شکل ۱۵ - اختلاف تراز سطح آب دریای خزر و خلیج قره بوغاز

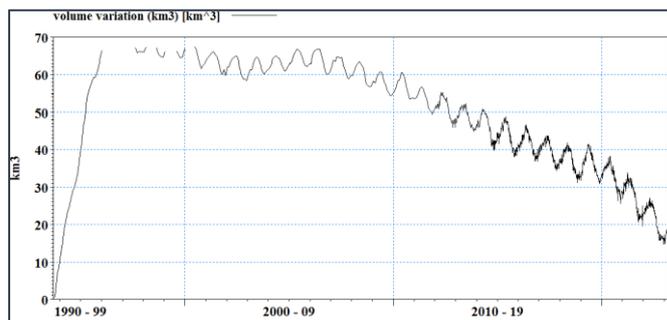


عوامل مؤثر بر تراز آب خلیج قره بوغاز شامل بارش و تبخیر و آب ورودی از سمت دریای خزر به این خلیج می‌باشد. در پژوهش کنونی تأثیر بارش و تبخیر بر تراز قره بوغاز از طریق داده‌های مدل هواشناسی ERA5 محاسبه شده است. تغییرات تراز خلیج قره بوغاز در اثر بارش منهای تبخیر در بازه ۱۹۴۰ تا ۲۰۲۳ در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در سال‌های اخیر مقدار بارش منهای تبخیر روی سطح خلیج قره بوغاز روند افزایشی (منفی) را طی کرده است که عمدتاً به دلیل افزایش روند تبخیر بوده است.



شکل ۱۶- تغییرات تراز سالانه خلیج قره بوغاز در اثر بارش و تبخیر بر اساس داده‌های مدل ERA5

تغییرات حجم آب قره بوغاز نیز از سال ۱۹۹۲ تاکنون در دسترس است. این اطلاعات بر حسب کیلومتر مکعب در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۷- تغییرات حجم در خلیج قره بوغاز (سال ۱۹۹۲ تاکنون)

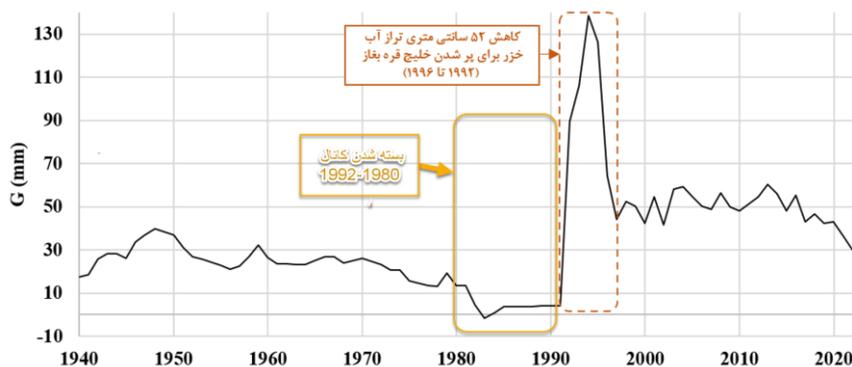
در نهایت با توجه به اطلاعات ارائه شده، حجم آب ورودی از دریای خزر به خلیج قره بوغاز با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده است. در این رابطه P_G و E_G به ترتیب تغییرات سالانه تراز آب خلیج قره بوغاز در اثر بارش، تغییرات سالانه تراز آب خلیج قره بوغاز در اثر تبخیر، A_G مساحت خلیج و ΔV_G تغییرات سالانه حجم آب خلیج قره بوغاز می‌باشد.

$$FLUX \text{ to KBG} = \Delta V_G - (P_G - E_G)A_G \quad \text{رابطه ۱}$$

در نهایت با توجه به اطلاعات حاصل شده از رابطه ۱ تأثیر خروج آب از دریای خزر به خلیج قره بوغاز بر روی تراز دریای



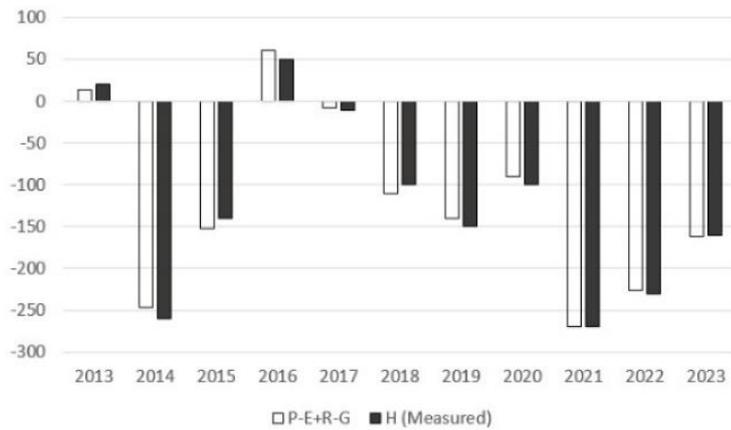
خزر محاسبه شده و با پارامتر G نشان داده شده است. نمودار کاهش سالانه تراز آب دریای خزر در اثر خروج آب به خلیج قره بوغاز در شکل ۱۸ نشان داده شده است. بیشترین کاهش تراز در اثر خروجی به خلیج قره بوغاز در سال ۱۹۹۴ به میزان ۱۴ سانتی متر رخ داده است. از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۷ تراز خزر در اثر خروج آب به خلیج قره بوغاز به طور متوسط ۵ سانتی متر در سال کاهش داشته است. در سال‌های اخیر این عدد به ۳ سانتی متر در سال کاهش یافته است. اگر تأثیر تجمعی خروج آب به قره بوغاز را بر کاهش تراز خزر در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۲ محاسبه کنیم، رقم قابل توجه ۱/۳۴ متر به دست خواهد آمد. بنابراین می‌توان گفت اگر خلیج قره بوغاز در دوران کاهش تراز خزر (۱۹۹۶ تاکنون) بسته بود، تراز آب خزر حدود ۱/۴ متر بالاتر از وضع کنونی قرار می‌گرفت.



شکل ۱۸ - کاهش سالانه تراز آب دریای خزر در اثر خروج آب به خلیج قره بوغاز

۶. صحت سنجی اطلاعات مورد استفاده

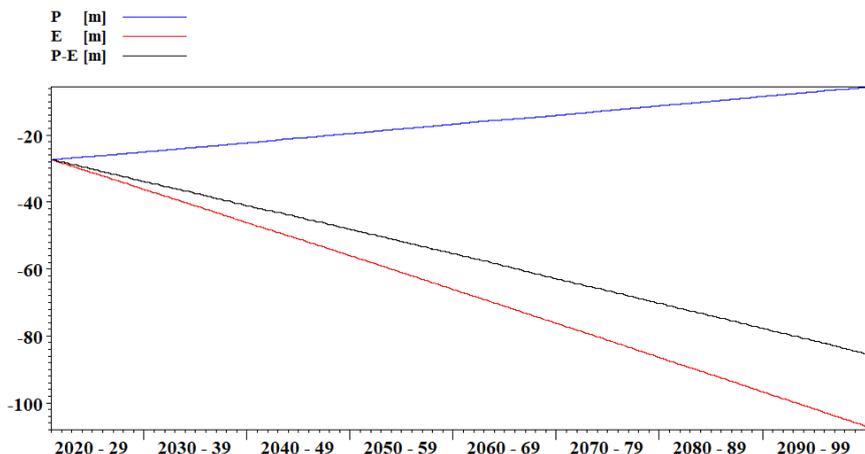
به منظور صحت سنجی اطلاعات مورد استفاده، مقدار سالیانه تغییرات تراز آب دریای خزر که از طریق رابطه تعادل آبی حاصل از مولفه‌های بارش، تبخیر، ورودی رودخانه‌ها و خروجی به خلیج قره بوغاز محاسبه می‌شود با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه شده و نتیجه در شکل ۱۹ نشان داده شده است. در این نمودار، P مقدار بارش سالیانه بر مبنای اطلاعات مدل هواشناسی ERA5، E مقدار تبخیر سالیانه بر مبنای اطلاعات مدل هواشناسی ERA5، R مقدار تأثیر آورد کل رودخانه‌ها روی تراز آب دریای خزر و G مقدار تأثیر آب خروجی به خلیج قره بوغاز روی تراز دریای خزر است. مقدار تغییر سالیانه تراز آب دریای خزر بر مبنای این اطلاعات به صورت « $P-E+R-G$ » محاسبه شده و با مقدار اندازه‌گیری شده تغییرات سالیانه تراز آب مقایسه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود همخوانی مناسبی بین اطلاعات محاسبه شده و داده‌های اندازه‌گیری شده وجود دارد که حاکی از دقت مناسب اطلاعات مورد استفاده است.



شکل ۱۹- مقایسه مقدار سالیانه تغییرات تراز آب دریای خزر حاصل شده از رابطه تعادل آبی با مقدار اندازه‌گیری شده

۷. پیش‌بینی تراز آب دریای خزر در آینده

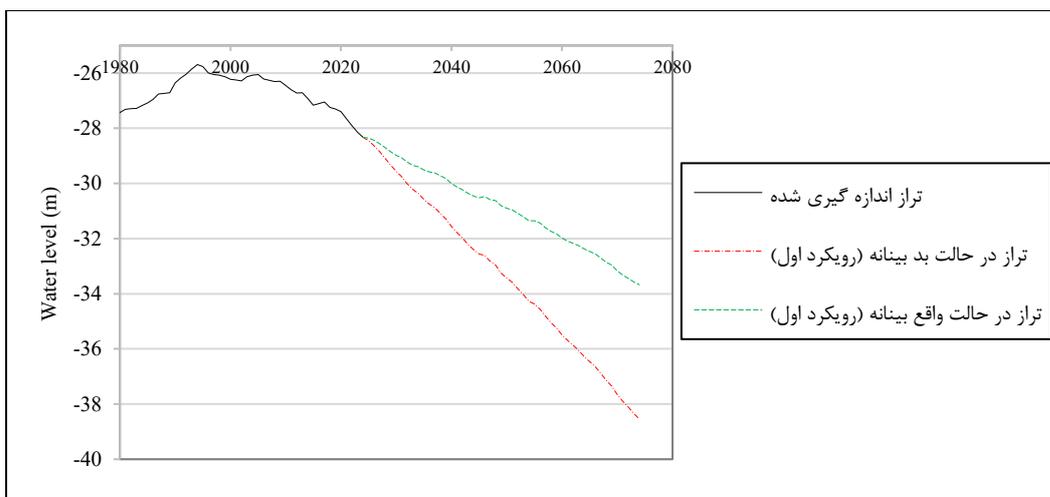
برای پیش‌بینی تراز آب دریای خزر در آینده باید عوامل موثر بر تراز پیش‌بینی گردند. در این خصوص برای پیش‌بینی بارش و تبخیر از مدل‌های اقلیمی استفاده شده است. برای انتخاب مدل اقلیمی که بهترین تطابق را با شرایط دریای خزر داشته باشد، مطالعه وسیعی صورت گرفته که نتایج آن طی پژوهشی دیگر برای کنفرانس کنونی ارسال شده است. نهایتاً مقدار تبخیر و بارش برای سال‌های آینده برای سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 و مدل اقلیمی NorESM2-MM که بیشترین تطابق را در میان مدل‌های اقلیمی با اطلاعات اندازه‌گیری شده داشته است، محاسبه شده است. در شکل ۲۰ مقدار بارش، تبخیر و برآیند این دو پارامتر بر اساس داده‌های مدل ذکر شده تا سال ۲۱۰۰ میلادی بر روی دریای خزر نشان داده شده‌اند. با توجه به این شکل تراز آب دریای خزر با در نظر گرفتن بارش و تبخیر به $-۸۶/۱۶۳۸$ رسیده است. بنابراین سالانه حدود ۷۳ سانتی‌متر تراز آب کاهش پیدا کرده است.



شکل ۲۰- پیش‌بینی تراز آب دریای خزر تحت بارش و تبخیر مدل NorESM2-MM با سناریوی SSP245



یکی دیگر از عوامل موثر، آورد رودخانه‌ها و به ویژه رودخانه ولگا به خزر است. با توجه به اینکه آورد این رودخانه به صورت تنظیم شده (دخالته انسانی) وارد دریای خزر می‌گردد، پیش‌بینی آن برای آینده از روی عوامل هواشناسی و هیدرولوژی کمی مشکل و تقریباً امکان‌ناپذیر است. البته، پژوهشگران مطالعه کنونی مطالعات وسیعی را روی رواناب، بارش و تبخیر و سایر عوامل موثر در حوزه ولگا به انجام رسانده‌اند ولی نتایج کلی همبستگی مناسبی را بین اطلاعات آورد خروجی ولگا به خزر و پارامترهای موثر مذکور نشان نمی‌دهد. بنابراین برای تخمین آورد ولگا در آینده بر مبنای اطلاعات ثبت شده پیشین دو مقدار واقع بینانه و بدبینانه انتخاب شده است. بر این اساس، در حالت اول (واقع بینانه)، دبی ولگا برای آینده معادل متوسط تغییرات دبی در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ و برابر ۲۳۰ کیلومتر مکعب در سال معادل ۶۲۰ میلی متر افزایش تراز آب دریای خزر در نظر گرفته شده است. گفتنی است در این دوره کاهش تراز آب دریای خزر شدت متوسطی داشته است. در حالت دوم (بدبینانه)، دبی ولگا برابر میانگین حداقل‌های رخ داده در دوران تراز نزولی دریای خزر یعنی از ۱۹۹۶ تاکنون و برابر ۱۹۳/۹ کیلومتر مکعب در سال معادل ۵۲۲ میلی متر افزایش تراز آب دریای خزر در نظر گرفته شده است. همانطور که گفته شد، حجم آب ورودی به خلیج قره بوغاز به تراز آب در دریای خزر وابسته است و با کاهش تراز خزر این حجم نیز کاهش می‌یابد. از آنجایی که در سال‌های اخیر تراز خزر با شتاب قابل ملاحظه‌ای افت کرده است، تغییرات حجم ورودی به قره بوغاز نیز باید متأثر از این افت باشد. از این رو تاثیر کاهش خلیج قره بوغاز بر روی تراز دریای خزر (پارامتر G) از سال ۲۰۱۳ با شیب قابل ملاحظه‌ای در حال کم شدن است و با توجه به این شیب پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۱ خروج آب از دریای خزر به خلیج قره بوغاز به مقدار صفر برسد. با توجه به موارد یاد شده، پیش‌بینی تراز خزر برای دو حالت واقع بینانه و بدبینانه در شکل ۲۱ نشان داده شده است. همچنین بر مبنای این رویکرد مقادیر عددی تراز آتی دریای خزر برای بازه‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ ساله در جدول ۲ ارائه شده است. گفتنی است ترازهای ارائه شده نسبت به پایین ترین تراز در سال ۲۰۲۴ (تراز ۲۸/۳۳- نسبت به شهید رجایی) محاسبه شده است.



شکل ۲۱ - نمودار پیش‌بینی تراز خزر تا ۵۰ سال آینده بر مبنای مدل‌های اقلیمی



جدول ۲- نتایج پیش‌بینی تراز خزر بر مبنای مدل‌های اقلیمی

سناریوی بدبینانه		سناریوی واقع‌بینانه		سال هدف	بازه هدف (سال)
تراز (متر)	کاهش تراز نسبت به سال ۲۰۲۴ (متر)	تراز (متر)	کاهش تراز نسبت به سال ۲۰۲۴ (متر)		
-0.30	-28.63	-0.11	-28.44	2026	2
-1.01	-29.34	-0.53	-28.86	2029	5
-2.04	-30.37	-1.07	-29.40	2034	10
-4.08	-32.41	-2.13	-30.46	2044	20
-5.95	-34.28	-3.02	-31.35	2054	30
-10.21	-38.54	-5.34	-33.67	2074	50

۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در پژوهش کنونی در ابتدا عوامل موثر بر تغییرات تراز دریای خزر بررسی گردید. این عوامل شامل بارش، تبخیر، آورد رودخانه‌ها و خروجی به خلیج قره‌بوغاز می‌باشند. در میان رودخانه‌ها، رودخانه ولگا بخش اعظمی از آورد آبی به دریای خزر را شامل می‌شود و به تنهایی بین ۶۵ تا ۷۰ سانتی‌متر تاثیر افزایشی روی تراز آب دریای خزر دارد. آورد رودخانه ولگا به صورت تنظیم شده وارد دریای خزر می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد در سال‌هایی که تراز آب دریا نزولی بوده است اندکی از آورد میانگین رودخانه ولگا به دریای خزر کاسته شده است. از طرف دیگر، بررسی‌ها نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر که روند کاهشی تراز آب دریای خزر شدت گرفته است، نرخ تبخیر از روی سطح دریا افزایش یافته در حالی که نرخ بارش تقریباً ثابت مانده و یا اندکی کاهش یافته است. نرخ تبخیر از حدود ۸۰ سانتی‌متر در سال برای سال‌های حدود ۱۹۸۰ به حدود ۱۰۰ سانتی‌متر در سال برای سال‌های کنونی افزایش یافته در حالی که نرخ بارش برای همین سال‌ها از حدود ۳۰ سانتی‌متر در سال به حدود ۲۵ سانتی‌متر در سال کاهش یافته است. بنابراین افزایش تبخیر بیشترین سهم را در کاهش تراز آب دریای خزر داشته است. در ادامه، به پیش‌بینی تراز آب دریای خزر برای سال‌های آینده پرداخته شده است. در این راستا تراز آب با استفاده از اطلاعات مدل‌های اقلیمی هواشناسی پیش‌بینی شده و نتایج نشان می‌دهد که روند کاهشی برای سال‌های آینده با نرخ بین ۱۱ الی ۲۰ سانتی‌متر برای سناریوهای مختلف ادامه خواهد داشت.

۹. تشکر و قدردانی

مطالعه کنونی با حمایت سازمان بنادر و دریانوردی ایران انجام شده است. نویسندگان مقاله بدینوسیله تشکر و قدردانی خود را از این سازمان ابراز می‌نمایند.



۱۰. مراجع

1. Ivkina, N. and A. Galayeva (2021). "Assessment of fluctuations in the Caspian sea level under the influence of climate change for the future until 2050." *Гидрометеорология и экология*(1 (100)): 100-107.
2. Zaikov, B. (1948). "The Water Balance of the Caspian Sea in Relation to the Causes of the Drop in Its Level." *Trans. Second All-Union Geogr. Congr., Moscow*
3. ARKHIPOVA, Y., et al. (1975). "Role of river runoff and of water exchange in the salinity of the northern Caspian sea."
4. Shiklomanov, I. (1981). "The effects of man on basin runoff, and on the water balance and water stage of the Caspian Sea/Influence de l'homme sur l'écoulement du bassin fluvial, sur le bilan hydrologique et sur les niveaux de la Mer Caspienne." *Hydrological sciences journal* 26(3): 321-328.
5. Zahraei, A., et al. (2018). "Estimation of Evaporation from the Surface of the Caspian Sea and its Temporal and Spatial Analysis." *Physical Geography Research* 50(3): 425-441.
6. Ivkina, N. and A. Galayeva (2021). " Assessment of fluctuations in the caspian sea level under the influence of climate change for the future until 2050." *Гидрометеорология и экология*(1 (100)): 100-107
7. Shiklomanov, I., et al. (1995). *Water balance of the Caspian Sea and reasons of water level rise in the Caspian Sea.*
8. Zahraei, A., et al. (2018). "Estimation of Evaporation from the Surface of the Caspian Sea and its Temporal and Spatial Analysis." *Physical Geography Research* 50(3): 425-441.
- 9.