



پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر تراز آب دریای خزر با استفاده از مدل‌های CMIP6 تحت سناریوی SSP2-4.5

زهرا مشهدی*^۱، گیتا برادران ابراهیمی^۲، محمود پورعلی^۲، سهام‌الدین چراغی^۴، محمدهادی معینی^۵، مجتبی موسوی مهر^۶

۱- کارشناسی ارشد عمران-مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، مهندسین مشاور پویا طرح

پارس zahra.mashhadi@aut.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری فیزیک دریا-اقیانوس‌شناسی، سازمان بنادر و دریانوردی gebrahimi@pmo.ir

۳- دکتری عمران-مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، مهندسین مشاور پویا طرح پارس mahmoud.pourali@gmail.com

۴- دانشجوی دکتری فیزیک دریا-اقیانوس‌شناسی، سازمان بنادر و دریانوردی saham.pmo1978@gmail.com

۵- دکتری عمران-مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، مهندسین مشاور پویا طرح پارس mhmocini@gmail.com

۶- دانشجوی دکتری عمران-مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، سازمان بنادر و دریانوردی mmousavimehr@pmo.ir

خلاصه

در این پژوهش، اثر تغییرات اقلیمی بر تراز آب دریای خزر با استفاده از دو مدل اقلیمی NorESM2-MM و EC-Earth3 از پروژه CMIP6 و تحت سناریوی SSP2-4.5 تا سال ۲۱۰۰ بررسی شده است. به این منظور پارامترهای بارش و تبخیر استخراج و به صورت جداگانه در مدلسازی سطح دریا با استفاده از مدل عددی Mike21 اعمال شدند. همچنین ارتباط میان بارش در حوضه رودخانه ولگا و دبی ورودی آن به خزر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با استفاده از مدل‌های NorESM2-MM و EC-Earth3، تراز آب سالانه به ترتیب ۷۳ و ۶۳ سانتی‌متر افت داشته است. تحلیل داده‌های بارش و دبی در حوضه ولگا نیز حاکی از همبستگی نسبی آن‌ها است ولی نقش عوامل انسانی مانند سدسازی و سیاست‌های آبی در ایجاد عدم قطعیت در پیش‌بینی دبی خروجی، چشمگیر است. یافته‌های این مطالعه بیانگر اهمیت بالای مدیریت یکپارچه و سیاست‌گذاری هماهنگ برای سازگاری با تغییر اقلیم در منطقه خزر است.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، دریای خزر، مدل‌های اقلیمی CMIP6، بارش، تبخیر، ولگا، سناریوی SSP2-4.5



۱. مقدمه

❖ اهمیت دریای خزر در بستر تغییر اقلیم

تغییر اقلیم، روند پیچیده‌ای است که چرخه‌های آب، الگوهای بارش و تبخیر را به ویژه در منابع آبی بسته‌ای مثل دریای خزر که راهی به اقیانوس ندارند، بازتعریف می‌کند. دریاچه خزر برای حفظ تعادل خود کاملاً وابسته به آبی است که رودخانه‌ها، به‌ویژه ولگا، در اختیارش می‌گذارند [۱ و ۲]. روند پربارانی که روزگاری آب زیادی همراه آن بود، در دهه‌های اخیر در حال باز تعریف است. طی سالیان اخیر، به‌ویژه در بازه ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰، شاهد افت قابل توجه «ضریب رواناب» رود ولگا بودیم؛ موضوعی که ناشی از گرمایش منطقه‌ای است و به کاهش حدود ۱۳۳ سانتی‌متری تراز دریای خزر در همین دوره انجامیده است. گذشته از این، الگوهای باد نیز تغییر کرده‌اند به نحوی که جهت‌های شرقی، خشک‌تر و تبخیرزا، اکنون بیشترند. فرایند کمتر دیده شده‌ای که به کاهش شدید سطح آب کمک کرده است [۲].

چشم‌انداز آینده نیز چندان خوشبینانه نیست: بر اساس مدل‌های CMIP6 با سناریوی انتشار متوسط، پیش‌بینی می‌شود سطح آب تا سال ۲۱۰۰ تقریباً ۱/۸ متر افت کند؛ در بدبینانه‌ترین حالت، که شدت انتشار بالا باشد، این کاهش ممکن است تا ۴/۴ متر نیز برسد [۳]. این مقدار از کاهش تراز آب، بخشی از سواحل خزر را تهدید به تبدیل به بیابان‌های جدید، فروپاشی زیستگاه‌های ساحلی و بحران زیرساخت‌ها خواهد کرد.

❖ چالش‌های فعلی و آینده تراز آب

ترکیب روندهای اقلیمی، بهره‌برداری فزاینده از منابع آب و تغییرات در الگوهای بارش و تبخیر، دریای خزر را در وضعیت شکننده‌ای قرار داده است. کاهش پیوسته تراز آب نه تنها زیستگاه‌های ساحلی و تنوع زیستی را تهدید می‌کند، بلکه امنیت غذایی، اقتصاد گردشگری و زیرساخت‌های بندری را نیز در معرض خطر قرار می‌دهد. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که در سناریوهای انتشار متوسط و بالا، بخش‌هایی از سواحل دریای خزر به ویژه در بخش شمالی آن ممکن است تا پایان قرن بیست‌ویکم به اراضی خشک تبدیل شوند. بنابراین، به‌کارگیری ابزارهای دقیق مدل‌سازی اقلیمی و سناریوهای انتشار گازه‌های گلخانه‌ای، دیگر یک گزینه نیست، بلکه ضرورتی حیاتی برای برنامه‌ریزی و مدیریت یکپارچه منابع و حفاظت از این پهنه آبی است.

۲. پیشینه تحقیق

گزارش‌های هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) تأکید می‌کنند که افزایش دمای کره زمین پیامدهای زیادی در پی دارد؛ از تغییرات الگوهای بارش تا تشدید تبخیر. این تغییرات، به‌ویژه در دریاچه‌ها و پهنه‌های آبی بسته مانند دریای خزر، بسیار اثرگذار هستند، چرا که این پهنه‌ها هیچ راهی برای تخلیه آب ندارند [۴].

در مطالعه‌ای که اخیراً از سری CMIP6 در Climate Dynamics منتشر شده است، پیش‌بینی شده است که تحت سناریوی انتشار متوسط (SSP2-4.5)، تراز سطح آب دریای خزر تا حدود ۱/۸ متر کاهش یابد (با بازه احتمالی ۶/۷- تا ۳/۱+ متر). در سناریوی بالا (high emission)، کاهش می‌تواند تا ۴/۴ متر (۹/۳- تا ۲+ متر) باشد [۳]. این کاهش عظیم نه فقط یک عدد، بلکه زنگ خطری جدی برای فروپاشی زیستگاه‌های ساحلی، تهدید زیرساخت‌ها، گسیختگی اقتصادی و اجتماعی منطقه است.



مطالعات پیشین نشان از سهم بالای رود ولگا در آورد آب به دریای خزر دارند. به عنوان مثال Chen و همکارانش در سال ۲۰۱۷ با بررسی جریان‌های رودخانه‌ای، نشان دادند که ولگا به‌تنهایی بین ۸۰ تا ۹۱ درصد از آب دریای خزر را تأمین می‌کند [۵]. معیاری که اهمیتش را در کاهش تراز آب خزر را برجسته‌تر می‌کند. Samant و Prange در سال ۲۰۲۳ در مطالعه‌ای که در آن CMIP6 را محور قرار دادند، NorESM2-MM را به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین مدل‌ها برای این حوضه معرفی کردند، و Kurich و همکاران نیز بازیابی مناسب مدل‌های AWI-CM-1-1-MR و EC-Earth3 را گزارش کرده‌اند [۶].

با این حال، بیشتر پژوهش‌ها به‌طور جداگانه به عوامل طبیعی مانند بارش یا تبخیر یا عوامل انسانی مانند سدسازی پرداخته‌اند، در حالی که ترکیب هم‌زمان این عوامل در محاسبات ترازآبی کمتر به‌چشم خورده است و این مقاله درصدد پر کردن این شکاف پژوهشی است.

۳. شبیه‌سازی تراز آب

❖ انتخاب مدل مورد استفاده از مجموعه CMIP6

در این مطالعه، با هدف ارزیابی تغییرات بودجه آب و تراز سطح دریای خزر در قرن بیست‌ویکم، از تعدادی از مدل‌های انتخابی از مجموعه مدل‌های اقلیمی پروژه مقایسه بین‌مدلی CMIP6 استفاده شد. به منظور انتخاب بهترین مدل‌ها، از مطالعات پیشین همچون مطالعات Eyring و همکارانش بر روی مدل‌ها در سال ۲۰۱۶ استفاده شد [۷]. مطالعات یادشده شامل حدود ۱۲۰ مدل مختلف است، با این حال، بررسی نقشه‌های تفکیک خشکی و دریا مربوط به این مدل‌ها نشان می‌دهد که تعداد قابل توجهی از آن‌ها یا به‌طور کامل دریای خزر را نادیده گرفته‌اند یا بازنمایی دقیقی از این ناحیه ارائه نمی‌دهند. برای انتخاب مدل‌های مناسب، نتایج دو مطالعه مرجع در زمینه تغییرات اقلیمی خزر بررسی شد. نخست، Kuriche و همکاران (۲۰۲۱) که با هدف پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در حوضه خزر، چهار مدل MPI-ESM1-1-MR، AWI-CM-1-1-MR، BCC-CSM2-MR و EC-Earth3-veg را به‌عنوان گزینه‌های برتر معرفی کردند [۶]. مرجع دوم، Samant و Prange (۲۰۲۳) که با تحلیل داده‌های ۱۵ مدل جوی-اقیانوسی CMIP6 در سه سناریوی اجتماعی-اقتصادی، پنج مدل NorESM2-MM، MPI-ESM1-2-HR، GFDL-ESM4، BCC-CSM2-MR و AWI-CM-1-1-MR را به‌عنوان دقیق‌ترین گزینه‌ها برای خزر شناسایی کردند [۵]. بر این اساس، مدل‌هایی که در هر دو مطالعه‌ی یاد شده دارای اعتبار و کارایی بیشتری در بازنمایی ویژگی‌های اقلیمی حوضه دریای خزر بوده‌اند، مبنای تحلیل‌های این پژوهش قرار گرفته‌اند. مشخصات هر یک از مدل‌ها در جدول ۱ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در نهایت هفت مدل کیفیت و اعتبار لازم را داشته، بررسی و مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۱- مشخصات مدل‌های منتخب از مطالعات

ردیف	مدل	موسسه	نوع اجرای دریای خزر	Resolution
1	AWI-CM-1-1-MR	Alfred Wegener Institute, Germany	Lake	0.9° x 0.9°
2	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center, China	Lake	1.12° x 1.12°
3	EC-Earth3	Earth Consortium, Rosssby Center, Sweden	Lake	0.7° x 0.7°
4	EC-Earth3-veg		Lake	0.7° x 0.7°

5	GFDL-ESM4	NOAA, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	Lake	1.25° x 1.0°
6	MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	Lake	0.9° x 0.9°
7	NorESM2-MM	Norwegian Climate Center, Norway	Lake	1.25° x 0.9°

برای دریافت داده‌های مدل‌های منتخب، از پایگاه داده AIMS مربوط به پروژه CMIP6 در نشانی <https://aims2.llnl.gov/search/cmip6/> استفاده شد و داده‌های بارش، تبخیر و دما استخراج گردید. به منظور ارزیابی دقت مدل‌ها در بازنمایی شرایط اقلیمی حوضه خزر، از داده‌های مشاهداتی دمای هوا بهره گرفته شد. علت این امر پوشش مناسب و در دسترس بودن داده‌های دمای ایستگاه‌های سینوپتیک در تمامی نواحی ساحلی دریای خزر بوده است. به این منظور، چهار ایستگاه در ایران و هفت ایستگاه در سایر کشورهای حاشیه خزر مورد استفاده قرار گرفت. موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱ - موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده در حاشیه خزر



با توجه به اینکه داده‌های تاریخی مدل‌های CMIP6 بازه زمانی ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۴ و داده‌های پیش‌بینی بازه ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ را پوشش می‌دهند، بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ برای مقایسه مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی انتخاب شد. برای بررسی تغییرات آبی نیز از سناریوی SSP2-4.5، به‌عنوان یک سناریوی میانه‌گرا و واقع‌بینانه استفاده گردید.

❖ منابع داده مرجع و پردازش اطلاعات

جهت ارزیابی عملکرد مدل‌ها، از داده‌های بازتحلیلی ERA5، محصول مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواشناسی اروپا (ECMWF)، با تفکیک مکانی 0.25×0.25 درجه و گام زمانی یک ساعته استفاده شد. داده‌های ERA5 علاوه بر سطوح فشاری، شامل داده‌های سطح زمین نیز هستند و از سال ۱۹۴۰ تاکنون در دسترس‌اند. داده‌های دمای ایستگاه‌های سینوپتیک به‌صورت ساعتی و داده‌های مدل‌های اقلیمی به‌صورت روزانه تهیه شده‌اند. همچنین داده‌های دمایی ERA5 نیز با گام زمانی یک‌ساعته مورد استفاده قرار گرفت. برای ارزیابی آماری مدل‌ها، از شاخص‌های ضریب همبستگی (R)، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) و اریبی (Bias) استفاده شد.

❖ ارزیابی مدل‌ها

پارامترهای آماری برای بررسی کیفیت مدل‌ها محاسبه شدند. جدول ۲ بررسی آماری را در یازده ایستگاه منتخب نشان می‌دهد. در این جدول، پارامترهای آماری بهتر با رنگ سبز پررنگتر شده است تا مدل بهتر از نظر پارامتر آماری مربوطه، به سهولت قابل تشخیص باشد.

جدول ۲ - بررسی شاخص‌های آماری داده دمای ۱۱ ایستگاه حاشیه دریای خزر



		ECMWF	AWI	BCC	Earth3	Earth3-veg	GFDL	MPI	NorESM2
Lankaran	CC or R	0.91	0.86	0.84	0.86	0.88	0.85	0.85	0.87
	ABS(BIAS)	0.43	1.16	2.74	0.60	0.07	0.52	0.68	0.45
	RMSE	3.54	5.08	6.10	4.14	4.09	4.40	4.84	4.26
Krasnovodsk	CC or R	0.91	0.86	0.84	0.81	0.86	0.85	0.86	0.88
	ABS(BIAS)	0.94	2.96	1.19	2.09	2.63	2.20	2.53	1.99
	RMSE	4.57	6.58	6.13	5.74	5.94	5.87	6.28	5.26
Makhachkala	CC or R	0.95	0.86	0.83	0.86	0.86	0.84	0.86	0.86
	ABS(BIAS)	0.20	0.35	2.29	0.67	0.10	1.11	0.67	0.02
	RMSE	2.88	5.40	6.44	4.67	4.95	5.30	5.11	4.89
Astrakhan	CC or R	0.98	0.88	0.85	0.84	0.86	0.87	0.88	0.90
	ABS(BIAS)	1.85	2.88	0.10	2.59	3.50	1.62	1.60	1.67
	RMSE	3.13	6.82	7.44	6.74	7.12	6.20	6.19	5.69
Aktau	CC or R	1.00	0.88	0.84	0.82	0.88	0.88	0.88	0.90
	ABS(BIAS)	0.81	2.92	1.05	2.99	3.66	2.28	2.10	2.01
	RMSE	1.37	6.27	6.75	6.05	6.52	5.83	5.87	5.41
Atyrau	CC or R	0.88	0.87	0.85	0.83	0.86	0.88	0.87	0.90
	ABS(BIAS)	0.23	3.17	0.79	2.95	3.86	1.54	1.86	1.42
	RMSE	6.39	7.44	7.69	7.33	7.91	6.61	6.96	6.23
Baku	CC or R	0.97	0.92	0.82	0.79	0.91	0.89	0.92	0.92
	ABS(BIAS)	0.02	1.76	2.86	1.58	2.06	0.87	1.24	1.09
	RMSE	2.14	4.25	6.28	3.94	4.21	4.29	3.92	3.60
ANZALI	CC or R	0.89	0.87	0.80	0.86	0.88	0.86	0.87	0.84
	ABS(BIAS)	0.14	1.17	5.36	2.76	2.22	1.82	1.56	2.64
	RMSE	3.49	4.73	7.78	4.95	4.65	4.33	4.63	4.95
BABOLSAR	CC or R	0.91	0.88	0.81	0.73	0.85	0.86	0.88	0.85
	ABS(BIAS)	0.27	0.85	4.44	0.09	0.40	2.38	1.20	1.60
	RMSE	3.21	4.41	7.34	3.99	4.05	4.61	4.32	4.37
NOSHAHR	CC or R	0.98	0.87	0.80	0.85	0.86	0.75	0.87	0.84
	ABS(BIAS)	1.42	0.77	3.83	1.98	1.50	3.21	1.08	1.26
	RMSE	1.94	4.50	7.06	4.47	4.25	6.12	4.38	4.42
RASHT	CC or R	0.86	0.85	0.80	0.85	0.86	0.70	0.84	0.82
	ABS(BIAS)	0.67	1.03	5.28	2.85	2.33	2.18	1.40	2.63
	RMSE	4.02	4.93	7.76	5.23	4.95	6.13	4.94	5.21

بر اساس نتایج جداول، مدل NorESM2-MM در شش ایستگاه خارج از ایران عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته است، در حالی که در ایستگاه‌های داخل ایران نتایج یکنواخت نیست. از این‌رو، ارزیابی آماری داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک ایران و داده‌های بارش مدل‌های اقلیمی نیز انجام شد. با توجه به اینکه داده‌های بارش ایستگاه‌ها به صورت سه و شش ساعته ثبت شده و داده‌های مدل‌ها به صورت روزانه در دسترس بودند، داده‌های مشاهداتی به مقیاس روزانه تبدیل و سپس مقایسه آماری بین آن‌ها صورت گرفت. نتایج این تحلیل برای چهار ایستگاه سینوپتیک ایران در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول پارامترهای آماری بهتر، با رنگ سبز پررنگتر شده است.

جدول ۳ - بررسی شاخص‌های آماری داده بارش در ۴ ایستگاه جنوب دریای خزر



		ECMWF	AWI	BCC	Earth3	Earth3-veg	GFDL	MPI	NorESM2
Anzali	CC or R	0.28	0.22	-0.04	0.56	0.42	0.35	0.38	0.56
	ABS(BIAS)	1346.18	1159.31	1306.74	1273.29	54.06	69.48	91.07	57.59
	RMSE	1837.04	1683.28	1810.81	1760.34	126.22	136.96	147.48	114.13
Babolsar	CC or R	0.74	0.29	0.04	0.36	0.40	0.29	0.15	0.17
	ABS(BIAS)	1.90	83.38	22.52	100.66	117.27	12.56	23.94	31.37
	RMSE	33.56	208.82	58.21	150.94	171.30	52.99	59.03	59.04
Nowshahr	CC or R	0.73	0.10	0.11	0.40	0.57	0.20	0.16	0.22
	ABS(BIAS)	31.57	70.59	58.86	53.59	65.99	44.59	57.46	66.64
	RMSE	69.58	252.24	108.33	103.25	115.87	101.32	107.91	110.30
Rasht	CC or R	0.86	0.32	0.04	0.49	0.39	0.28	0.35	0.32
	ABS(BIAS)	32.46	103.94	41.09	14.47	11.30	21.29	40.83	49.78
	RMSE	51.03	275.74	84.91	61.58	70.90	78.80	80.44	83.42

نتایج نشان می‌دهد که داده‌های بازتحلیل ECMWF تطابق مناسبی با داده‌های مشاهداتی بارش و دما دارند. همچنین، در میان مدل‌های اقلیمی بررسی‌شده، دو مدل NorESM2-MM و EC-Earth3 عملکرد بهتری در ناحیه دریای خزر داشته‌اند. از این رو برای استفاده در تحلیل‌های آینده انتخاب شدند.

❖ شبیه‌سازی تراز آب

پس از انتخاب مدل‌های برتر، روند تغییرات بارش (P)، تبخیر (E) و دمای هوا (T) در قرن بیست‌ویکم با استفاده از دو مدل NorESM2-MM و EC-Earth3 تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های بارش برای هر دو مدل با گام زمانی سه‌ساعته در دسترس بود. داده‌های تبخیر در مدل NorESM2-MM به‌صورت روزانه و در مدل EC-Earth3 به‌صورت ماهانه استخراج و سپس پردازش شدند.

برای آماده‌سازی داده‌ها جهت شبیه‌سازی، مقادیر بارش و تبخیر به فرمت dfs2 تبدیل گردید. این داده‌ها به‌صورت جداگانه در مدل Flow Model FM اجرا شدند. شبیه‌سازی بر پایه یک شبکه محاسباتی دوبعدی انجام شد که در آن اثر جریان‌های رودخانه‌ای لحاظ نشده است تا بتوان اثرات مستقیم تبادل بارش-تبخیر بر تراز آب را بدون تأثیر متغیرهای هیدرولوژیکی جانبی ارزیابی کرد. این رویکرد امکان جداسازی نقش تغییرات اقلیمی از عوامل انسانی مانند بهره‌برداری از رودخانه‌ها را فراهم می‌کند. خروجی مدل، تغییرات سطح آب در بازه زمانی شبیه‌سازی، از بخش Surface Elevation استخراج و برای تحلیل‌های بعدی استفاده شد.

۴. بررسی نقش رودخانه ولگا در تراز آب دریای خزر

❖ سهم ولگا در ورودی آب خزر

دبی ورودی به دریای خزر از طریق رودخانه‌ها تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله تغییرات اقلیمی، بهره‌برداری انسانی و ویژگی‌های طبیعی حوضه‌های آبخیز قرار دارد. کاهش بارش، استفاده بی‌رویه از منابع آب برای کشاورزی و صنعت، تغییر

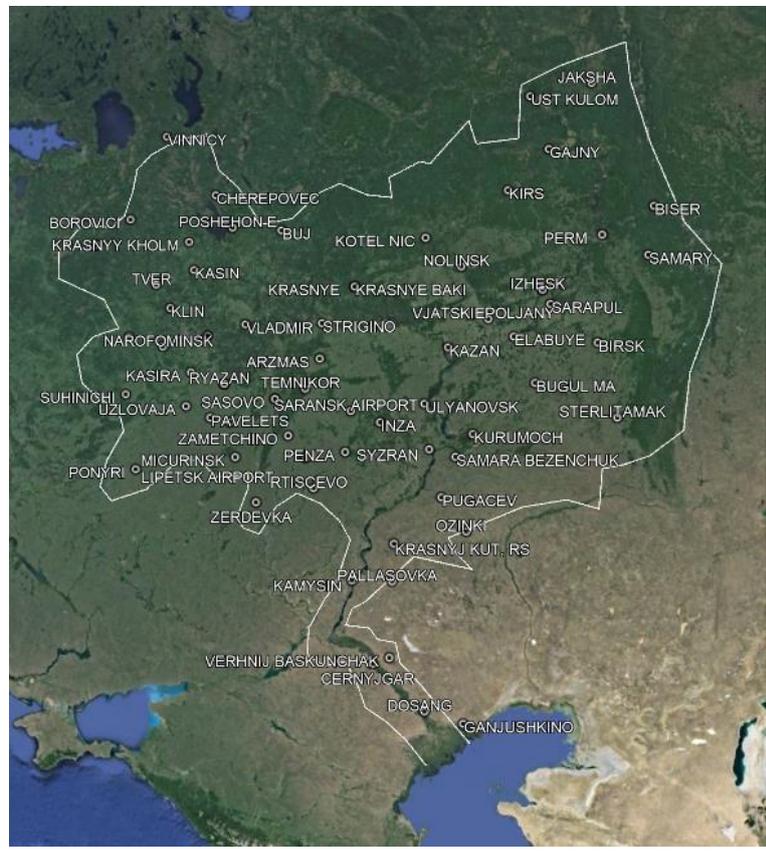


کاربری اراضی و ساخت سازه‌هایی نظیر سدها از جمله عواملی هستند که می‌توانند منجر به کاهش جریان ورودی رودخانه‌ها به خزر شوند.

در میان رودخانه‌های منتهی به دریای خزر، رودخانه ولگا با اختلاف قابل توجهی بیشترین سهم را در تأمین آب این دریا دارد. به طوری که بر اساس گزارش Chen و همکارانش در سال ۲۰۱۷، ولگا حدود ۸۰ تا ۹۱/۵ درصد از کل جریان رودخانه‌های ورودی به خزر را تأمین می‌کند [۸]. پس از آغاز ساخت سدهای متعدد در مسیر ولگا از سال ۱۹۵۹، دبی سالانه این رودخانه بین ۱۶۰ تا ۳۴۰ کیلومتر مکعب متغیر بوده و به طور میانگین سالانه موجب تغییر حدود ۶۵ سانتی‌متر در تراز سطح آب دریای خزر شده است. این در حالی است که مجموع تأثیر سایر رودخانه‌های حاشیه خزر تنها حدود ۱۲ سانتی‌متر برآورد می‌شود. رودخانه‌هایی مانند سفیدرود، تالش، قزل‌اوزن، هراز، کورا و اورال نیز در دبی ورودی به خزر نقش دارند، اما سهم آن‌ها نسبت به ولگا بسیار کمتر است. به طور خاص، رودخانه اورال نیز با توجه به ذوب برف‌ها و بارندگی‌های فصلی، نقش مهمی در نوسانات فصلی تراز آب خزر دارد.

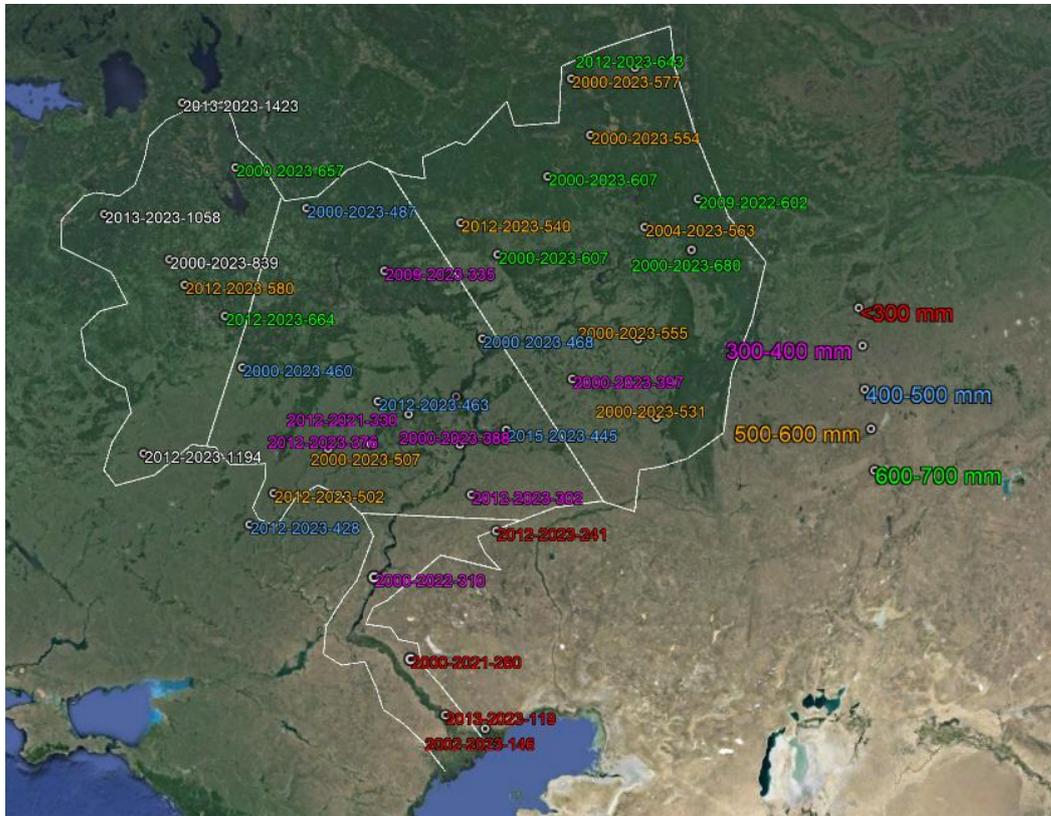
❖ تغییرات بارش در حوضه ولگا

تغییرات بارش در حوضه آبخیز ولگا نقش کلیدی در دبی ورودی به خزر ایفا می‌کند. در سال‌هایی با بارش بالا، ورودی آب از طریق ولگا افزایش یافته و در سال‌های کم‌بارش، این دبی کاهش می‌یابد. با این حال، عوامل دیگری از جمله مدیریت منابع آب، بهره‌برداری از آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق، و سیاست‌های آبی نیز در این ارتباط مؤثر هستند. همچنین، ساخت سدها و تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی، ارزیابی دقیق‌تر تأثیر بارش بر دبی خروجی از ولگا را پیچیده کرده است. برای بررسی رابطه بین بارش و دبی رودخانه ولگا، داده‌های بارش روزانه، ماهانه و سالانه از ایستگاه‌های سینوپتیک مستقر در حوضه ولگا جمع‌آوری شد و با داده‌های دبی سالانه ورودی از ولگا به خزر، که از پایگاه Caspcom به دست آمده است، مقایسه شد. موقعیت ایستگاه‌های منتخب سینوپتیک در حوضه ولگا در شکل ۲ نمایش داده شده است. این ایستگاه‌ها با استفاده از سنسورهای اندازه‌گیری بارش (باران‌سنج)، امکان پایش دقیق تغییرات بارندگی و تحلیل روندهای اقلیمی در سطح حوضه را فراهم می‌کنند.



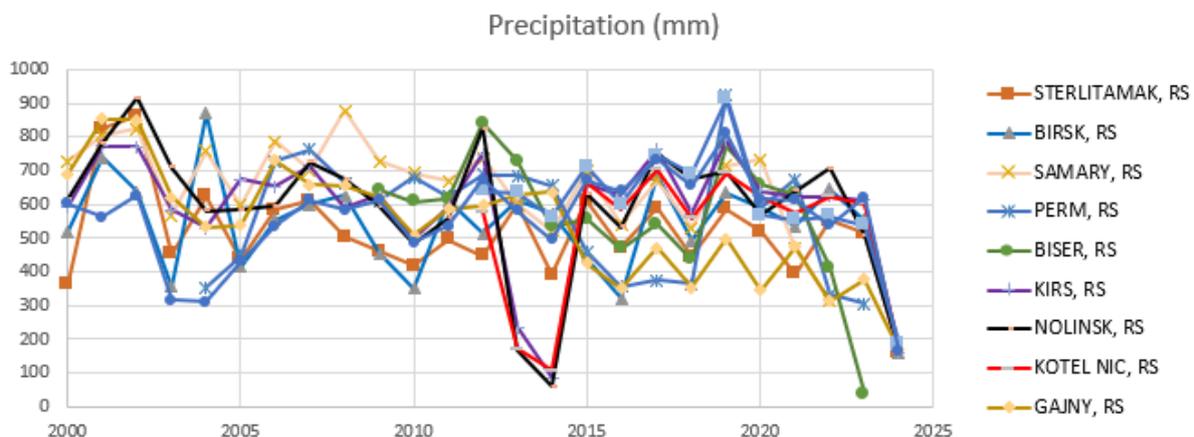
شکل ۲ - ایستگاه‌های بررسی شده سینوپتیک حوضه ولگا

با توجه به گستردگی جغرافیایی حوضه رودخانه ولگا، این منطقه شامل اقلیم‌ها و الگوهای بارشی متنوعی است. به‌منظور بررسی این تنوع، میانگین سالانه بارش ایستگاه‌های سینوپتیک در بازه زمانی موجود محاسبه و در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳ - بازه زمانی و میانگین بارش سالانه و تقسیم‌بندی حوزه ولگا

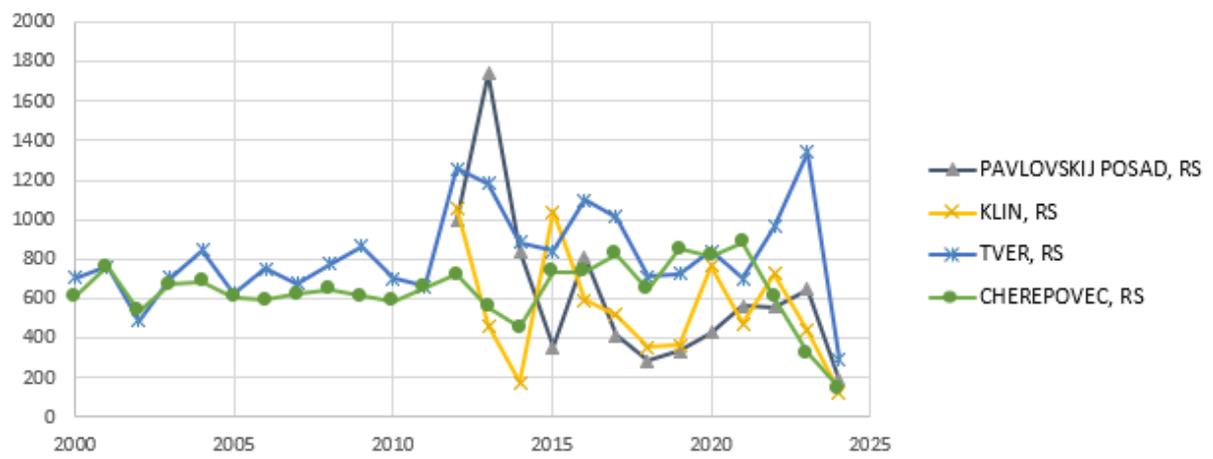
بر اساس الگوهای مشاهده‌شده در شکل ۳، حوزه ولگا به چهار ناحیه‌ی شرقی، غربی، جنوبی و مرکزی تقسیم شده است. بررسی داده‌های سالانه بارش در هر ناحیه نشان‌دهنده روندهای مشابه درون هر بخش است. که در شکل‌های ۴ تا ۷ نشان داده شده است.



شکل ۴ - تغییرات بارش در ایستگاه‌های ناحیه شرقی

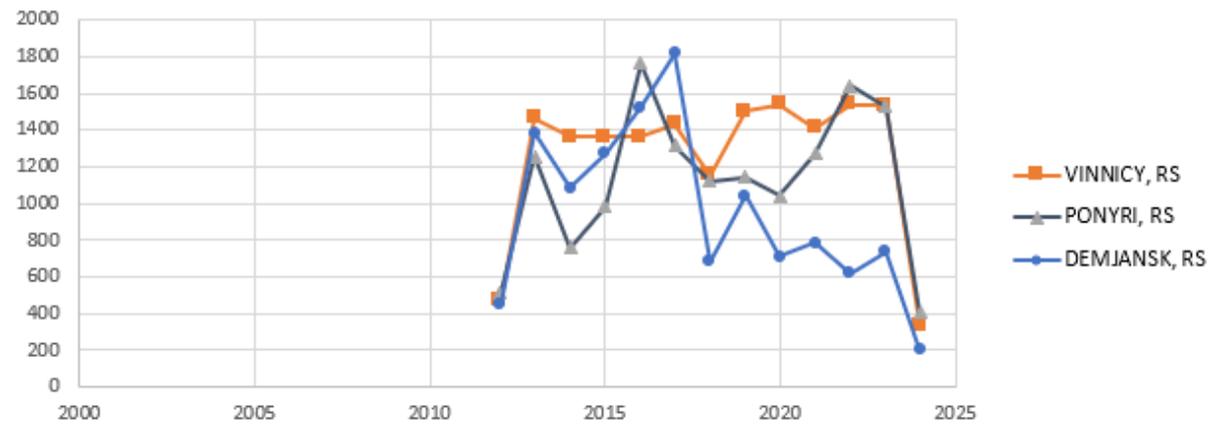


Precipitation (mm)



شکل ۵ - تغییرات بارش در ایستگاه‌های ناحیه غربی

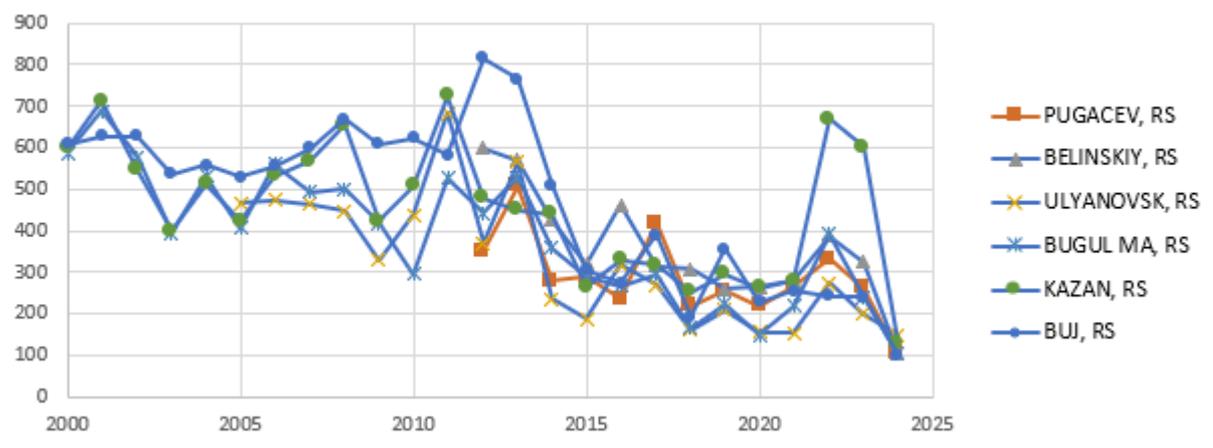
Precipitation (mm)



شکل ۶ - تغییرات بارش در ایستگاه‌های ناحیه جنوبی



Precipitation (mm)



شکل ۷ - تغییرات بارش در ایستگاه‌های ناحیه مرکزی

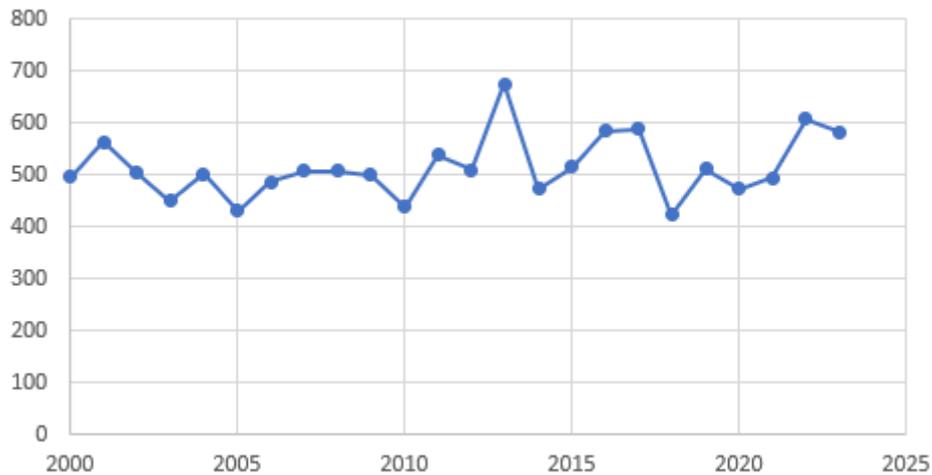
در گام بعد، به منظور تحلیل دقیق‌تر، میانگین بارش سالانه ایستگاه‌های هر ناحیه برای بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ محاسبه شد. نتایج این محاسبات در شکل ۸ ارائه شده است. شکل ۹ نیز سری زمانی میانگین بارش سالانه را در این بازه زمانی در حوضه ولگا نشان می‌دهد.



شکل ۸ - مقادیر متوسط بارش سالانه ایستگاه‌های هر بخش از حوضه ولگا طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳



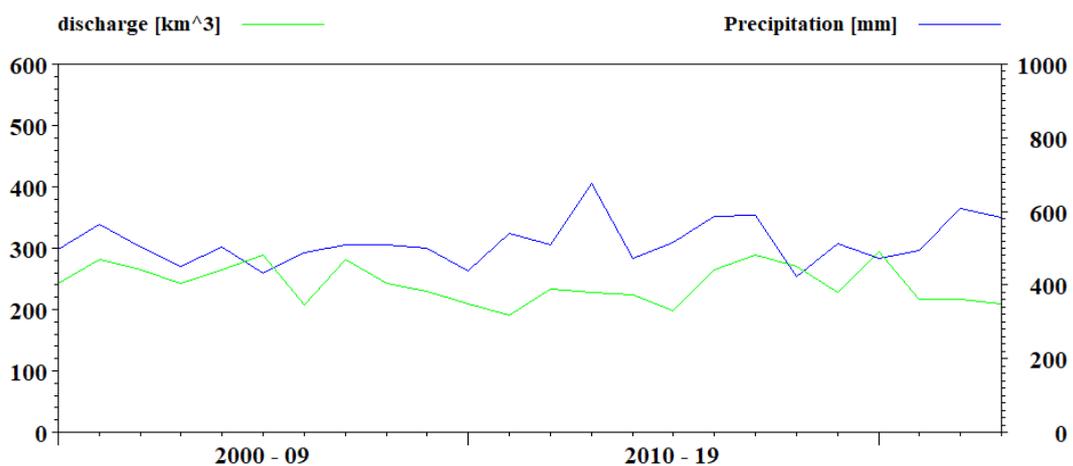
Average Precipitation (mm)



شکل ۹ - میانگین بارش سالانه حوضه ولگا از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

❖ همبستگی بارش و دبی ولگا

به منظور بررسی ارتباط میان بارش و جریان رودخانه، میانگین بارش سالانه حوضه ولگا با دبی خروجی این رودخانه مقایسه شد. نتایج این مقایسه در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در این شکل نمودار با رنگ سبز، دبی برحسب کیلومتر مکعب و نمودار با رنگ آبی بارش برحسب میلی‌متر است.



شکل ۱- مقایسه دبی ولگا با میانگین بارش سالانه حوضه ولگا

همان‌طور که نمودارها نشان می‌دهند، دبی رودخانه ولگا تا حد زیادی تحت تأثیر میزان بارش در حوضه آبخیز آن قرار دارد. به‌عنوان مثال، در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۳، تغییرات دبی تقریباً همسو با تغییرات بارندگی بوده و افزایش یا کاهش



بارش مستقیماً بر دبی خروجی تأثیر گذاشته است. با این حال، در سال‌هایی مانند ۲۰۰۴، کاهش میانگین بارندگی با افزایش دبی همراه بوده و در سال ۲۰۱۳ نیز با وجود افزایش بارش، دبی تغییر محسوسی نداشته است. همچنین در برخی موارد، تأثیر بارندگی بر دبی با یک سال تأخیر مشاهده می‌شود؛ به‌طور مثال، کاهش بارش در سال ۲۰۱۸ و افزایش آن در سال ۲۰۱۹ بر دبی خروجی در سال‌های بعد اثرگذار بوده‌اند.

در مجموع، اگرچه بارش یکی از عوامل اصلی و مؤثر بر دبی رودخانه ولگا محسوب می‌شود، اما نمی‌توان از تأثیر غیرمستقیم آن و نقش عوامل انسانی، بهره‌برداری از منابع آب و سیاست‌های مدیریت حوضه چشم‌پوشی کرد. این عوامل می‌توانند گاه حتی مستقل از تغییرات اقلیمی، تأثیر قابل توجهی بر جریان خروجی از رودخانه ولگا داشته باشند. مدل‌های سناریوهای تغییرات اقلیمی ابزار مهمی برای ارزیابی پیامدهای اقدامات و سیاست‌های مختلف در مواجهه با تغییر اقلیم به‌شمار می‌روند. این مدل‌ها با فراهم‌سازی چشم‌اندازهای متنوع، به سیاست‌گذاران کمک می‌کنند تا راهبردهای مؤثرتری برای کاهش اثرات منفی و افزایش سازگاری با تغییرات اقلیمی تدوین کنند.

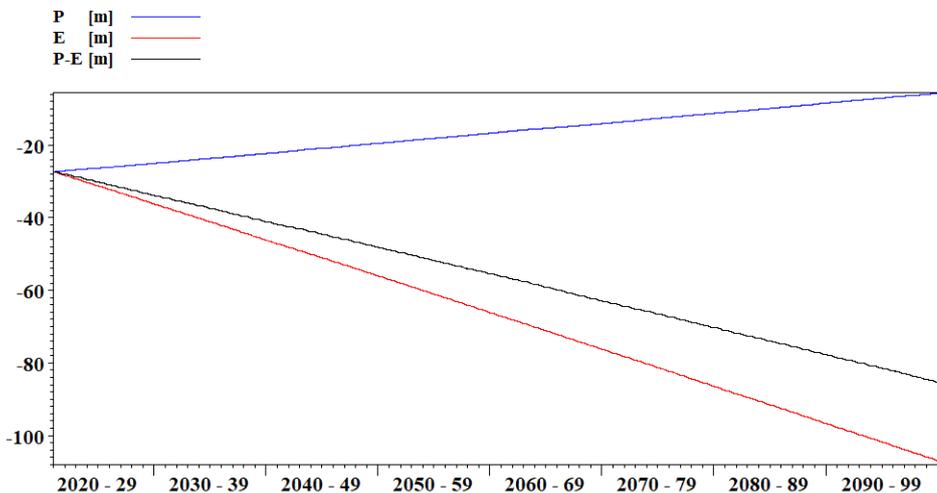
در مطالعه حاضر، استفاده از مدل‌های اقلیمی برای تحلیل بارش و تبخیر در منطقه دریای خزر، به‌عنوان رویکردی کارآمد برای شناخت بهتر روندهای اقلیمی و مدیریت منابع آبی این پهنه آبی مورد توجه قرار گرفته است. دسترسی به پیش‌بینی‌های دقیق‌تر، امکان برنامه‌ریزی مؤثرتر و تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر را در برابر چالش‌های اقلیمی فراهم می‌سازد و به حفظ محیط زیست و حمایت از جوامع محلی کمک می‌کند.

همچنین، نتایج تطبیقی نشان می‌دهد که داده‌های بارش و دمای مدل بازتحلیلی (ERA5) ECMWF انطباق قابل قبولی با داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک حاشیه دریای خزر دارند و می‌توان از آن‌ها به‌عنوان مرجع مناسبی در تحلیل‌های اقلیمی منطقه بهره گرفت.

۵. نتایج شبیه‌سازی

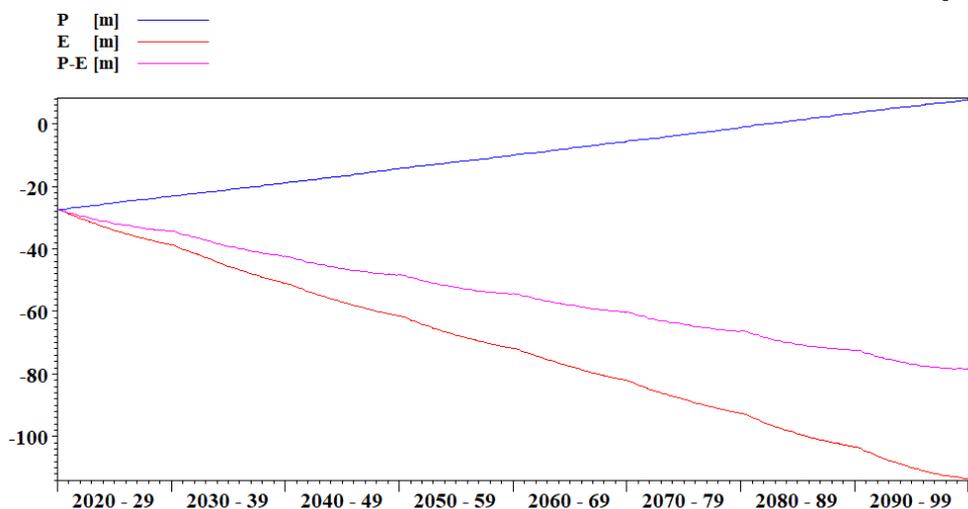
❖ پیش‌بینی تراز آب

در مدل NorESM2-MM، داده‌های بارش با گام زمانی سه‌ساعته و داده‌های تبخیر به‌صورت روزانه استخراج شد. برای محاسبه تفاضل میان این دو متغیر، داده‌های تبخیر به گام زمانی بارش درون‌یابی گردید. شکل ۱۱ روند پیش‌بینی تراز آب دریای خزر را تحت تأثیر بارش و تبخیر بر اساس سناریوی SSP2-4.5 نشان می‌دهد. مطابق این نتایج، تراز سطح آب تا مقدار ۸۶/۱۶۳۸- متر در طول دوره زمانی مربوط به داده‌های مورد استفاده، کاهش یافته است که بیانگر کاهش میانگین سالانه ۷۳ سانتی‌متر طی دوره مورد بررسی است.



شکل ۱۱- پیش‌بینی تراز آب دریای خزر تحت بارش و تبخیر مدل NorESM2-MM با سناریوی SSP245

در مدل EC-Earth3 نیز داده‌های بارش به صورت سه‌ساعته و تبخیر به صورت ماهانه دریافت شد که در این جا نیز درون‌یابی زمانی برای هماهنگ‌سازی داده‌ها انجام شد. نتایج این مدل در شکل ۱۲ ارائه شده است. تراز اولیه آب دریای خزر نسبت به سطح متوسط دریا (MSL) در تاریخ ۱ ژانویه ۲۰۲۰ برابر با ۲۷/۴۴- متر در نظر گرفته شد و داده‌ها نسبت به این مقدار تنظیم گردید.



شکل ۲- پیش‌بینی تراز آب دریای خزر تحت بارش و تبخیر مدل EC-Earth3 با سناریوی SSP245

بر اساس خروجی مدل، تراز آب در پایان دوره به ۷۸/۴۱۵- متر رسیده که بیانگر کاهش سالانه متوسط حدود ۶۳ سانتی‌متر است.



❖ مقایسه عملکرد دو مدل

تایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که هر دو مدل NorESM2-MM و EC-Earth3 روند کاهشی قابل‌توجهی در تراز آب دریای خزر طی قرن بیست‌ویکم پیش‌بینی می‌کنند، اما دامنه این کاهش و جزئیات زمانی آن بین دو مدل متفاوت است. در بازه‌ی شبیه‌سازی، مدل NorESM2-MM افت متوسط سالانه حدود ۷۳ سانتی‌متر و مدل EC-Earth3 افتی معادل ۶۳ سانتی‌متر را برآورد کرده است. این اختلاف حدود ۱۳ درصدی را می‌توان به تفاوت در بازنمایی فرآیندهای اقلیمی، تفکیک زمانی مکانی داده‌ها و روش محاسبه تبخیر در هر مدل نسبت داد.

با این حال، هر دو مدل در مقایسه با داده‌های بازتحلیل ERA5 و مشاهدات ایستگاهی، همبستگی مکانی و زمانی قابل قبولی را نشان داده‌اند (ضریب همبستگی R بزرگ‌تر از ۰/۷). این موضوع بیانگر توانایی هر دو مدل در بازتولید الگوهای اقلیمی اصلی حوضه خزر است، هرچند NorESM2-MM حساسیت بیشتری به تغییرات بارش و تبخیر نشان می‌دهد که باعث برآورد افت تراز بالاتر شده است.

۶. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با استفاده از دو مدل برتر CMIP6 یعنی NorESM2-MM و EC-Earth3 تحت سناریوی SSP2-4.5 نشان داد که تراز آب دریای خزر طی قرن بیست‌ویکم با کاهش قابل توجهی مواجه خواهد شد. افت پیش‌بینی شده بین ۶۳ سانتی‌متر در سال (مدل EC-Earth3) و ۷۳ سانتی‌متر در سال (مدل NorESM2-MM) تا پایان قرن متغیر است، که این تفاوت بیانگر اهمیت عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی در برآورد تغییرات سطح آب است.

کاهش این‌چنینی می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای بر اکوسیستم‌های ساحلی، زیستگاه‌های آبی، زیرساخت‌های بندری، اقتصاد منطقه‌ای و امنیت غذایی داشته باشد. همچنین نقش رودخانه ولگا به‌عنوان تأمین‌کننده بیش از ۸۰ درصد ورودی آب خزر، در حساسیت تراز آب به تغییرات بارش و مدیریت منابع هیدرولوژیکی، حیاتی است.

این یافته‌ها بر ضرورت استفاده هم‌زمان از چند مدل اقلیمی، سناریوهای انتشار متفاوت و ترکیب عوامل اقلیمی و انسانی در مدل‌سازی آینده تأکید می‌کند. علاوه بر این، اتخاذ راهبردهای مدیریت یکپارچه منابع آب و هماهنگی میان کشورهای حاشیه خزر برای کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم بر این پهنه آبی بسته، امری اجتناب‌ناپذیر است.

۷. مراجع

1. Azizpour, J., Ghaffari, P. Low-frequency sea level changes in the Caspian Sea: long-term and seasonal trends. *Clim Dyn* 61, 2753–2763 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06715-9>
2. Safarov, E.; Safarov, S.; Bayramov, E. Changes in the Hydrological Regime of the Volga River and Their Influence on Caspian Sea Level Fluctuations. *Water* 2024, 16, 1744. <https://doi.org/10.3390/w16121744>
3. Hoseini, S.M., Soltanpour, M. & Zolfaghari, M.R. Projected changes in Caspian Sea level under CMIP6 climate change scenarios: probabilistic and deterministic approaches. *Clim Dyn* 63, 44 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07548-w>
4. Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou, 2021: Weather and Climate Extreme Events in a



Changing Climate. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513–1766, doi: 10.1017/9781009157896.013

5. Samant, R., Prange, M. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections. *Commun Earth Environ* 4, 357 (2023). <https://doi.org/10.1038/>
6. Koriche, S.A., Singarayer, J. S. & Cloke, H. L. (2021). The fate of the Caspian Sea under projected climate change and water extraction during the 21st century. *Environmental Research Letters*, 16(9), 094024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1af5>
7. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937–1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016.
8. J. L. Chen, T. Pekker, C. R. Wilson, B. D. Tapley, A. G. Kostianoy, J.-F. Cretaux, E. S. Safarov, Long-term Caspian Sea level change, 2017, <https://doi.org/10.1002/2017GL073958>