



Investigating the Impact of Climate Regimes in Areas Surrounding the Persian Gulf and Gulf of Oman on the Persian Gulf Water Body: A Multi-Algorithm Unsupervised Machine Learning Approach

Alireza Khadem Daghigh ^{*1}, Ali Zali ², Elaheh Asgari ³

1. Dept. of Computer Science, Faculty of Mathematics and Computer Science, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

(Corresponding Author) alireza_khadem@mathdep.iust.ac.ir

2. Dept. of Computer Science, Faculty of Mathematics and Computer Science, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3. Postdoctoral in Climatology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran



<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.2.6.6>

Original Paper

As a shallow, semi-enclosed sea, the Persian Gulf is particularly sensitive to climate change and coupled atmospheric-oceanic variability. However, the role of climate regimes in the surrounding regions including adjacent coastal lands, neighboring shorelines, and the Gulf of Oman in modulating or amplifying the thermal characteristics of the Gulf's water body has not yet been comprehensively investigated. This study employs a multi-algorithm unsupervised machine learning framework to examine the influence of surrounding climate regimes on the thermal dynamics of the Persian Gulf over the period 1960-2021. ERA5 reanalysis data encompassing key atmospheric and oceanic variables (temperature, wind, precipitation, evaporation, radiation, and cloud cover) were extracted, standardized, and analyzed using five complementary clustering algorithms: K-Means, MiniBatchKMeans, Gaussian Mixture Models (GMM), DBSCAN, and Fuzzy C-Means. The outputs were integrated through consensus clustering, resulting in the identification of five robust climate regimes with distinct impacts on the Gulf's sea surface temperature (SST). The results indicate that the northern extreme-heat regime is strongly associated with sustained SST increases in the shallow northern Gulf, whereas the southern marine-moderate and monsoon-fringe regimes exert a pronounced thermal-moderating effect. Teleconnection analysis reveals that the Indian Ocean Dipole (IOD) is the dominant driver of wet winter anomalies, while ENSO primarily governs the intensification of summer monsoonal intrusions. By introducing a data-driven and transferable framework, this study provides new insights into regime-based SST predictability, ecosystem risk assessment, and climate-resilient management strategies for semi-enclosed seas.

Keywords:

Climate Regimes, El Niño-Southern Oscillation (ENSO), Unsupervised Machine Learning, Indian Ocean Dipole (IOD), Consensus Clustering, Teleconnections, Persian Gulf.



Received: Nov. 22, 2025

Revised: Dec. 20, 2025

Accepted: Jan. 07, 2026

To cite this article:

Khadem Daghigh, A. R., Zali, A., Asgari, E., 2026. Investigating the impact of climate regimes in areas surrounding the Persian Gulf and Gulf of Oman on the Persian Gulf water body: a multi-algorithm unsupervised machine learning approach. *Emergency Management*, 15(1), 38-61. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.2.6.6>.

© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Use your device to scan and read the article online



بررسی تأثیر رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان بر پهنه آبی این حوضه: رویکرد یادگیری ماشین بدون نظارت چند الگوریتمی

علیرضا خادم دقیق^۱، علی زالی^۲، الهه عسگری^۳

۱ گروه علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

(نویسنده مسئول) alireza_khadem@mathdep.iut.ac.ir

۲ گروه علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳ پسادکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران



<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.2.6.6>

مقاله پژوهشی

چکیده

خلیج فارس به عنوان یک دریای نیمه محصور و کم عمق، به طور ویژه نسبت به تغییرات اقلیمی و نوسانات جوی-اقیانوسی حساس است؛ با این حال، نقش رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف آن، شامل مناطق خشکی حاشیه‌ای، سواحل مجاور و دریای عمان، در تعدیل یا تشدید ویژگی‌های حرارتی پهنه آبی تاکنون کمتر به صورت جامع بررسی شده است. این پژوهش با بهره‌گیری از یک چارچوب یادگیری ماشین بدون نظارت چند الگوریتمی، تأثیر رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان بر دینامیک حرارتی پهنه آبی این حوضه را طی دوره ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۱ بررسی می‌کند. داده‌های باز تحلیل ERA5 شامل مجموعه‌ای از متغیرهای جوی و اقیانوسی (دما، باد، بارش، تبخیر، تابش و پوشش ابر) استخراج، استانداردسازی و با استفاده از پنج الگوریتم خوشه‌بندی مکمل (Fuzzy C-Means و DBSCAN، GMM، MiniBatchKMeans، K-Means) تحلیل شدند. خروجی‌ها از طریق خوشه‌بندی اجماعی یکپارچه‌شده و پنج رژیم اقلیمی پایدار شناسایی شد که تأثیرات متمایزی بر دمای سطح آب خلیج فارس اعمال می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که رژیم گرمای شدید شمالی با افزایش پایدار SST در نواحی کم عمق شمالی مرتبط است، در حالی که رژیم معتدل دریایی جنوبی و رژیم حاشیه موسمی نقش تعدیل‌کننده حرارتی دارند. تحلیل تله‌کانکشن‌ها حاکی از آن است که دوقطبی اقیانوس هند (IOD) محرک غالب ناهنجاری‌های زمستانی مرطوب و ENSO عامل اصلی تقویت نفوذ موسمی تابستانی است. این مطالعه با ارائه یک چارچوب داده‌محور و قابل انتقال، بینش‌های نوینی برای پیش‌بینی رژیم‌محور دمای سطح آب، ارزیابی ریسک‌های اکوسیستمی و مدیریت اقلیمی در دریاهای نیمه محصور فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی:

رژیم‌های اقلیمی، ENSO.

یادگیری ماشین بدون

نظارت، IOD، خوشه‌بندی

اجماعی، تله کانکشن‌ها،

خلیج فارس

دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱

اصلاح: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله
به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

خادم دقیق، ع. زالی، ع. عسگری، ا. ۱۴۰۵، بررسی تأثیر رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان بر پهنه آبی این حوضه: رویکرد یادگیری ماشین بدون نظارت چند الگوریتمی. مدیریت بحران، ۱۵ (۱)، ۳۸-۶۱
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.2.6.6>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

خلیج فارس، یکی از حساس‌ترین مناطق از نظر زیست‌محیطی و مهم‌ترین مناطق از نظر ژئوپلیتیکی در جهان، علی‌رغم آسیب‌پذیری رو به رشد در برابر تغییرات اقلیمی، همچنان در زمینه دینامیک‌های اقلیمی نواحی اطراف خود (شامل سواحل مجاور، مناطق خشکی حاشیه‌ای و دریای عمان) کمتر مورد کاوش قرار گرفته است. این دریای حاشیه‌ای نیمه محصور و کم‌عمق با میانگین عمق تنها ۳۶ متر، به دلیل تبادل محدود با دریای عرب از طریق تنگه باریک هرمز، به‌ویژه نسبت به تغییرات جوی و اقیانوسی حساس است. نرخ تبخیر بالا، گردش محدود و فشارهای جوی منطقه‌ای منجر به تشدید تغییرات فصلی و بین سالانه در پهنه آبی خلیج فارس می‌شود و این حوضه را به یکی از سریع‌ترین مناطق دریایی در حال گرم شدن در جهان تبدیل می‌کند، به‌طوری‌که دمای سطح آب (SST) آن با نرخ‌هایی بیش از میانگین جهانی افزایش یافته است [۶].

الگوهای مشابه تشدید رویدادهای اقلیمی شدید در سایر دریاهای نیمه محصور، مانند دریای بوهائی (واقع در شرق چین)، نیز مشاهده شده است، جایی که طوفان‌های حاره‌ای نه‌تنها تحت تأثیر گرمایش جهانی شدت بیشتری یافته‌اند، بلکه تغییر در رژیم‌های اقلیمی منجر به نوسانات معنی‌دار در صید آبزیان کوچک پلاژیک در این مناطق شده است [۱۷ و ۱۶].

رویدادهای حرارتی شدید تابستانی و تغییرات در الگوهای بارش - مشابه آنچه در سراسر شبه‌جزیره عربستان مشاهده می‌شود. مخاطرات قابل توجهی برای اکوسیستم‌های دریایی، به‌ویژه صخره‌های مرجانی، شیلات و جوامع ساحلی پهنه آبی خلیج فارس ایجاد می‌کند [۶].

افزایش دما به‌خصوص دمای شبانه، تغییر در رژیم بارشی و کاهش بارش برخی مناطق، افزایش شدت و مدت خشک‌سالی، کمبود منابع آب و ...

از پیامدهای تغییر اقلیم و گرمایش جهانی در کشور می‌باشند [۱].

با وجود آگاهی رو به رشد از حساسیت پهنه آبی خلیج فارس به تغییرات اقلیمی، مطالعات موجود اغلب از تنوع مکانی و زمانی رژیم‌های اقلیمی در نواحی اطراف (سواحل ایران و عربستان، مناطق خشکی حاشیه‌ای و دریای عمان) غفلت کرده‌اند؛ عمدتاً به دلیل ناتوانی روش‌های سنتی طبقه‌بندی اقلیمی در ارائه وضوح مکانی کافی برای ثبت ناهمگنی‌های میکرو اقلیمی و روندهای در حال تحول. برای مثال، سیستم طبقه‌بندی کوپن-گایگر، هرچند در مقیاس جهانی مؤثر است، اما قادر به تشخیص تفاوت‌های ظریف منطقه‌ای یا تغییرات پویای اقلیمی در نواحی اطراف خلیج فارس نیست [۸ و ۱۶].

علاوه بر این، بخش زیادی از پژوهش‌های پیشین بر متغیرهای اقلیمی منفرد مانند دمای سطح آب (SST) یا رویدادهای شدید متمرکز بوده‌اند و کمتر به بررسی جامع تأثیر رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف بر پهنه آبی پرداخته‌اند [۶]. در مقابل، تکنیک‌های یادگیری ماشین بدون نظارت رویکردی قدرتمند و داده‌محور برای شناسایی الگوهای اقلیمی پیچیده در نواحی اطراف ارائه می‌دهند، بدون اینکه پیش‌فرض‌های از پیش تعیین‌شده تحمیل کنند. داده‌کاوی مکانی می‌تواند برای جستجوی الگوی پنهان و ارتباط بین داده‌ها به کار گرفته شود [۲]. این روش‌ها امکان تحلیل هم‌زمان چندین متغیر جوی و اقیانوسی - مانند دمای سطح آب، دمای هوا، الگوهای باد و بارش - را فراهم می‌کنند و دیدگاهی جامع از چگونگی تأثیر این رژیم‌ها بر پهنه آبی خلیج فارس ارائه می‌دهند [۲۰، ۷، ۲۶ و ۹].

یادگیری عمیق نیز در تجزیه و تحلیل رویدادهای بارش شدید در مقیاس‌های بزرگ‌تر به

کار گرفته شده و محرک‌های پنهان تغییرات اقلیم را آشکار کرده است [۲۴، ۱۰ و ۸].

هرچند مطالعات پیشین با موفقیت تکنیک‌های یادگیری ماشین را در مناطق دیگر به کار گرفته‌اند [۲۰]، نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان کمتر موضوع تحلیل‌های چندمتغیره با وضوح بالا بوده‌اند و چندین الگوریتم بدون نظارت نیز در یک چارچوب اجماعی برای بررسی تأثیر خوشه‌بندی رژیم‌های اقلیمی بر پهنه آبی یکپارچه نشده‌اند [۱۱ و ۱۰].

این خلأ فرصتی قابل توجه برای بهبود درک ما از چگونگی تأثیر محرک‌های اقلیمی جهانی - مانند نوسان جنوبی ال نینو (ENSO) و دوقطبی اقیانوس هند - (IOD) بر رژیم‌های نواحی اطراف و در نتیجه بر پهنه آبی خلیج فارس فراهم می‌کند. کارهای اخیر با مدل‌های هواشناسی مبتنی بر یادگیری عمیق نیز پیش‌بینی ماهرانه ناهنجاری‌های گردش ناشی از ENSO را نشان می‌دهند [۱۴ و ۹]. با این حال، پیش‌بینی پیامدهای فصلی این تله کانکشن‌ها بر دمای سطح آب و اکوسیستم پهنه آبی همچنان چالش برانگیز است.

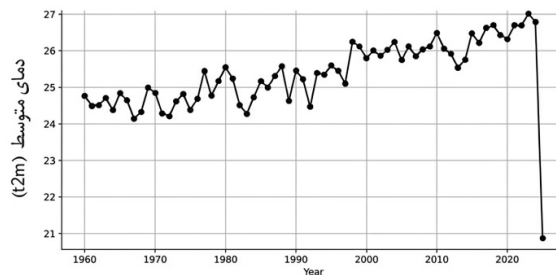
از سوی دیگر، ناهنجاری‌های اقلیمی و تغییرات رژیم‌های دمایی در پهنه‌های آبی نظیر خلیج فارس، امروزه ماهیتی فراتر از مسائل صرفاً اکولوژیک یافته و به عنوان مؤلفه‌های کلیدی در مدیریت بحران‌های محیطی شناخته می‌شوند. مطالعات اخیر بر لزوم اتخاذ رویکردهای پیشگیرانه و تدوین راهبردهای تاب‌آوری در برابر این تغییرات تأکید دارند [۱]. به‌ویژه، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و تحلیل‌های داده‌محور برای پایش اثرات دور پیوندهایی مانند نوسان جنوبی (ENSO) بر شدت وقوع مخاطرات جوی و دریایی، به عنوان راهکاری راهبردی به منظور کاهش خسارات و مدیریت ریسک در مناطق ساحلی مورد توجه قرار گرفته است [۴].

در واقع، شناسایی دقیق الگوهای مکانی و زمانی این مخاطرات، پیش‌شرط اصلی برای طراحی سیستم‌های هشدار سریع و مدیریت کارآمد بحران در اکوسیستم‌های حساس دریایی محسوب می‌شود، برای مثال برآورد سریع و دقیق مناطق سیل‌زده می‌تواند اطلاعات ارزشمند و به‌موقع را در هنگام وقوع سیل ارائه دهد [۳].

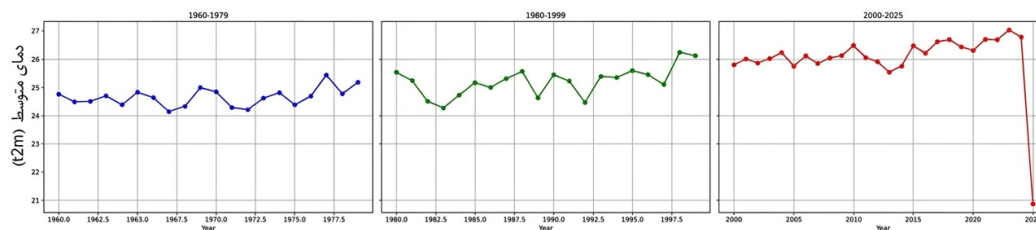
این مطالعه با به‌کارگیری یک چارچوب یادگیری ماشین بدون نظارت چند الگوریتمی، قصد دارد این خلأ را پر کند و تأثیر خوشه‌بندی رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان را بر پهنه آبی این حوضه در دوره زمانی ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۱ بررسی نماید. این پژوهش با استفاده از مجموعه‌ای متنوع از متغیرهای جوی و اقیانوسی استخراج شده از داده‌های باز تحلیل ERA5، خوشه‌بندی جامعی از رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف ارائه می‌دهد و تأثیر آن‌ها بر ویژگی‌های کلیدی پهنه آبی - به‌ویژه دمای سطح آب - (SST) را تحلیل می‌کند. در این تحقیق از طیف وسیعی از الگوریتم‌های بدون نظارت شامل K-Means، MiniBatchKMeans، مدل‌های مخلوط گاوسی (GMM)، DBSCAN و Fuzzy C-Means استفاده شده و خروجی‌های آن‌ها از طریق خوشه‌بندی اجماعی یکپارچه شده تا خوشه‌بندی پایدار به دست آید که تأثیرات فیزیکی معنادار بر پهنه آبی را نشان دهد.

علاوه بر این، مطالعه فراتر از صرف خوشه‌بندی رفته و رژیم‌های شناسایی شده در نواحی اطراف را به تله کانکشن‌های اقلیمی در مقیاس بزرگ (IOD و ENSO) پیوند می‌دهد تا مکانیسم‌های انتقال تأثیر به پهنه آبی خلیج فارس روشن شود. این رویکرد بینش‌های ارزشمندی برای بهبود مدل‌سازی پیش‌بینی دمای آب و اطلاع‌رسانی به استراتژی‌های سازگاری اقلیمی ارائه می‌دهد.

نوآوری اصلی این پژوهش در گسترش دامنه



(الف)



(ب)

شکل ۱. روندهای دمای میانگین سالانه (درجه سانتی‌گراد) در دوره مطالعه. (الف) میانگین کلی دما از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۱ را نشان می‌دهد. (ب) روندهای دمای میانگین برای دهه‌های خاص را نمایش می‌دهد: ۱۹۶۰-۱۹۷۹ (آبی)، ۱۹۸۰-۱۹۹۹ (سبز) و ۲۰۰۰-۲۰۲۱ (قرمز)

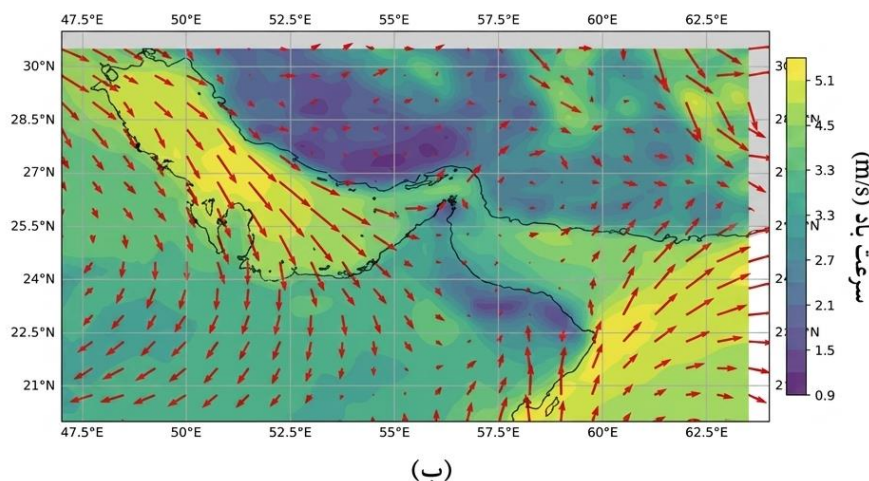
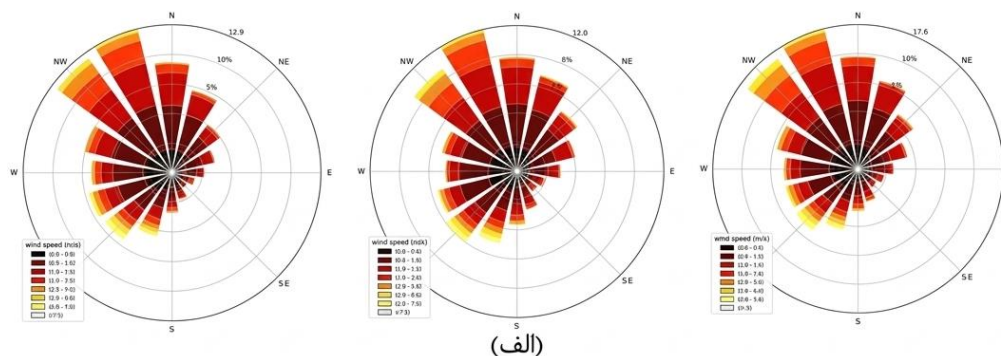
چارچوب قابل‌انتقال به سایر دریا‌های نیمه محصور بوده و پایه‌ای محکم برای پیش‌بینی رژیم‌محور دمای آب، برنامه‌ریزی سازگاری و مدیریت تاب‌آور اقلیمی در محیط‌های دریایی در حال تغییر سریع فراهم می‌کند - مزایایی که در مطالعات پیشین با تمرکز محدودتر مشاهده نشده است.

۲- محدوده مورد مطالعه

خلیج فارس یک دریای کم‌عمق و نیمه محصور است که تقریباً ۱۰۰۰ کیلومتر از دلتای شط العرب در شمال غرب تا تنگه هرمز در جنوب شرق امتداد دارد و در آنجا به خلیج عمان و دریای عرب متصل می‌شود. با میانگین عمق حدود ۳۶ متر و تبادل آبی محدود از طریق تنگه، خلیج فارس به سرعت به فشارهای جوی پاسخ می‌دهد و این امر منجر به تشدید تغییرات فصلی و بین سالانه می‌شود [۱۶]. نرخ‌های تبخیر بالا که اغلب از ۱/۵ متر در سال فراتر می‌رود، شوری سطحی را در بسیاری از مناطق به بیش از ۴۰

جغرافیایی به نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان (شامل مناطق خشکی حاشیه‌ای و بخش‌هایی از دریای عمان) و تمرکز بر تأثیر خوشه‌بندی رژیم‌های اقلیمی این نواحی بر پهنه آبی است؛ رویکردی که در مطالعات پیشین غایب بوده و عمدتاً به تحلیل درون حوزه‌های خلیج فارس محدود می‌شد. برخلاف پژوهش‌های قبلی که اغلب بر متغیرهای منفرد یا طبقه‌بندی داخلی تمرکز داشتند، این مطالعه با بهره‌گیری از چارچوب چند الگوریتمی اجماعی، پایداری و اعتبار بالاتر خوشه‌بندی را تضمین می‌کند و امکان تشخیص روابط فیزیکی پیچیده‌تر بین رژیم‌های اطراف و پاسخ پهنه آبی (به‌ویژه تغییرات SST) را فراهم می‌آورد.

برتری دیگر این تحقیق، یکپارچگی تحلیل تله کانکشن‌های جهانی (ENSO و IOD) با خوشه‌بندی محلی نواحی اطراف است که مکانیسم‌های علّی تأثیر بر دمای سطح آب و ریسک‌های اکوسیستمی (مانند سفید شدگی مرجان‌ها و هیپوکسی) را روشن می‌سازد. این



شکل ۲. الگوهای باد و سرعت‌های آن در منطقه مورد مطالعه. (الف) گلبادهای برای سه مکان نماینده نشان‌دهنده فراوانی جهت باد و توزیع سرعت در سه دوره ۲۰ ساله از ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۰ (ب) نقشه توزیع مکانی میانگین سرعت باد (متر بر ثانیه) با بردارهای باد

اقلیمی و روندهای گرمایش بلندمدت حساس می‌سازد [۲۳، ۹ و ۶].

۳- روش تحقیق و ابزارها

در این پژوهش، دامنه جغرافیایی تحلیل به‌طور هدفمند گسترش‌یافته و علاوه بر پهنه آبی خلیج فارس، نواحی اطراف آن شامل بخش‌های شمالی و جنوبی دریای عمان، سواحل مجاور ایران و شبه‌جزیره عربستان و مناطق خشکی حاشیه‌ای تا حدود ۲۰۰ کیلومتر از خط ساحلی را در برمی‌گیرد تا امکان خوشه‌بندی رژیم‌های اقلیمی این نواحی و بررسی تأثیر مستقیم و غیرمستقیم آن‌ها بر ویژگی‌های حرارتی و دینامیکی پهنه آبی خلیج فارس (به‌ویژه دمای سطح آب) فراهم شود.

PSU می‌رساند و گرادیان‌های چگالی قوی ایجاد می‌کند و بر الگوهای گردش تأثیر می‌گذارد [۲۲]. اقلیم منطقه تحت سلطه گرمای شدید تابستانی، زمستان‌های ملایم و دو سیستم بادی اصلی است: شمیم شمال غربی و کوس جنوب‌شرقی (شکل ۲-الف)، درحالی‌که توزیع میانگین سرعت باد، کریدورهای باد قوی پایدار در شمال خلیج فارس و بادهای ضعیف‌تر در حوضه جنوب‌شرقی را برجسته می‌سازد.

اهمیت زیست‌محیطی و اقتصادی خلیج فارس قابل توجه است؛ این منطقه از زیستگاه‌های دریایی حیاتی پشتیبانی می‌کند و به‌عنوان یک کریدور انرژی جهانی عمل می‌نماید [۲۳، ۱۳ و ۶]. عمق کم، گردش محدود و فشارهای آنتروپوژنیک بالا، آن را به‌ویژه نسبت به تغییرات

دوره زمانی تحلیل از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۱ (معادل ۷۴۴ ماه) انتخاب شد. داده‌های اصلی از مجموعه باز تحلیل ERA5 با وضوح مکانی $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ و گام زمانی ماهانه استخراج شدند. متغیرهای ورودی چندمتغیره که برای خوشه‌بندی رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف و تحلیل تأثیر آن‌ها بر پهنه آبی انتخاب شدند، شامل دمای هوای نزدیک سطح (t2m)، دمای سطح دریا (sst)، مؤلفه‌های باد ۱۰ متری ($u10$ ، $v10$) و سرعت باد مشتق‌شده، کل بارش (tp)، تبخیر سطحی (e)، تابش خالص کوتاه موج و بلند موج سطحی (ssr، str) و کل پوشش ابر (tcc) بودند.

تمام متغیرها در هر نقطه شبکه‌ای به‌صورت جداگانه با روش z-score استانداردسازی شدند تا اثر تفاوت مقیاس میان متغیرها حذف شود. نقاط خشکی با استفاده از ماسک زمین-دریا حذف و نقاط پرت با الگوریتم Isolation Forest ($\text{contamination} = 0.05$) کنار گذاشته شدند.

برای شناسایی رژیم‌های اقلیمی از رویکرد یادگیری بدون نظارت چند الگوریتمی استفاده شد. شش الگوریتم مکمل به کار گرفته شدند:

K-Means و MiniBatchKMeans

مدل‌های مخلوط گاوسی (GMM) با کوواریانس کامل

DBSCAN (مبتنی بر چگالی)

Fuzzy C-Means (خوشه‌بندی نرم)

خوشه‌بندی اجماعی (Consensus Clustering)

به‌عنوان مرحله نهایی یکپارچه‌سازی

تعداد بهینه خوشه‌ها (k) با جستجوی گسترده در بازه ۳ تا ۱۰ و با استفاده از سه معیار اعتبارسنجی داخلی (امتیاز سیلوئت، شاخص دیویس-بولدین و شاخص کالینسکی-هاراباس) تعیین شد. تمامی معیارها به‌طور همگرا $k = 5$ را به‌عنوان مقدار بهینه تأیید کردند. خروجی‌های پنج الگوریتم پایه در یک ماتریس هم‌وقوع (co-

occurrence matrix) ترکیب و با خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (linkage = average) به نقشه نهایی اجماعی تبدیل شدند.

برای بررسی تأثیر تله کانکشن‌ها، شاخص‌های ماهانه Niño 3/4 (برای ENSO) و Dipole Mode Index (برای IOD) از منابع NOAA و JAMSTEC استخراج شدند. فازهای مثبت، منفی و خنثی با آستانه ± 0.5 انحراف معیار تعریف و ارتباط آن‌ها با فراوانی نسبی هر رژیم اقلیمی با ضرایب همبستگی پیرسون و آزمون معناداری دوطرفه بررسی شد.

تمام محاسبات با زبان Python 3.9 و کتابخانه‌های scikit-learn، hdbscan، fcmeans و pandas انجام گرفت. نقشه‌ها و نمودارها با کتابخانه‌های Matplotlib، Cartopy و Seaborn تولید شدند.

این روش‌شناسی امکان شناسایی رژیم‌های اقلیمی پایدار و فیزیکی منسجم را بدون اعمال پیش‌فرض‌های از پیش تعیین‌شده فراهم کرد و پایه‌ای برای تحلیل‌های بعدی فصلی، دهه‌ای و تله کانکشن ایجاد نمود.

۴- تئوری و محاسبات

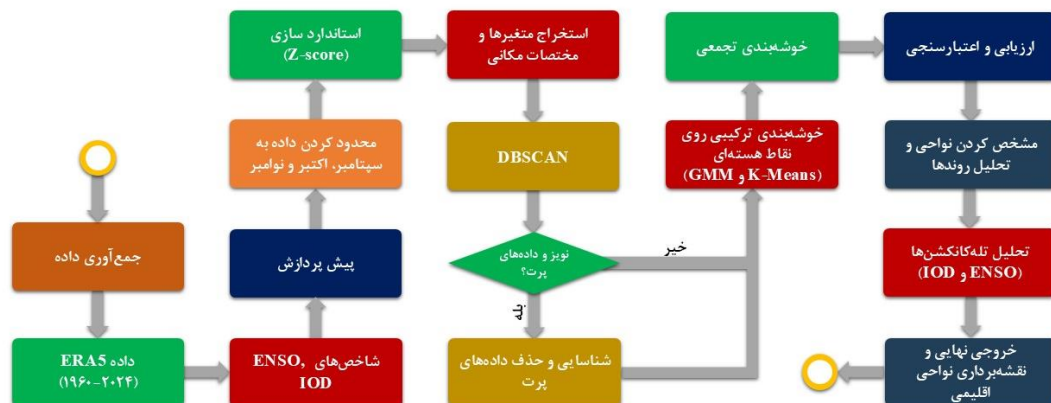
۴-۱- مرحله ۱: منابع داده، استانداردسازی

داده‌ها و انتخاب متغیرها برای خوشه‌بندی

چند الگوریتمی

برای خوشه‌بندی رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان و تحلیل تأثیر آن‌ها بر پهنه آبی، شاخص‌های جهانی Niño 3.4 (برای ENSO) و Dipole Mode Index (برای IOD) از منابع NOAA و JAMSTEC استخراج شدند تا مکانیسم‌های تله کانکشن و انتقال تأثیر به دمای سطح آب بررسی شود [۱۲، ۹ و ۵].

استانداردسازی z-score در هر نقطه شبکه‌ای اعمال شد تا تسلط متغیرهای با دامنه بالا



شکل ۳. فلوچارت چارچوب روش‌شناسی پژوهش

ساختار داده‌ها دارد و روابط کلیدی مانند جهت/سرعت باد با شدت بارش (مانند خشکی جریان شمیم در برابر رطوبت جریان‌های جنوب شرقی و تقویت اوروگرافیک ساحلی) را به شیوه‌های متفاوت آشکار می‌کند [۱۵ و ۱۱]. K-Means و MiniBatchKMeans (با مقاداردهی اولیه K-Means++) تقسیم‌بندی اولیه پایدار ارائه دادند؛ GMM شکل‌های بیضی و عضویت نرم برای مناطق انتقالی ساحلی فراهم کرد؛ DBSCAN خوشه‌های نامنظم و ناهنجاری‌های محلی را بدون تعیین پیشینی k شناسایی نمود؛ و Fuzzy C-Means درجه عضویت نرم برای تغییرات تدریجی شمال-جنوب به دست داد. خوشه‌بندی اجماعی نهایی با یکپارچه‌سازی همه خروجی‌ها از طریق ماتریس هم‌وقوع و خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، سوگیری‌های منفرد را کاهش داد و رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف را با پایداری بالا استخراج کرد که امکان تحلیل دقیق مکانیسم‌های تأثیر بر ویژگی‌های حرارتی و اکوسیستمی پهنه آبی خلیج فارس را فراهم می‌سازد. پارامترهای کلیدی به کار گرفته‌شده در هر الگوریتم در جدول ۱ ارائه شده است.

جلوگیری شود؛ نقاط پرت با الگوریتم Isolation Forest حذف شدند. با جستجوی گسترده پارامترها بر روی مجموعه داده چندمتغیره استانداردشده، الگوریتم‌های K-Means، DBSCAN، MiniBatchKMeans، Fuzzy C-Means کاندیدهای خوشه‌بندی تولید کردند. معیارهای اعتبار داخلی (Silhouette، Davies-Bouldin، Calinski-Harabasz) در چندین seed محاسبه شد تا پایداری ارزیابی شود؛ تعداد بهینه خوشه‌ها ($k = 5$) بر اساس بیشینه‌سازی امتیازها و حفظ قابلیت تفسیر فیزیکی تأثیر بر پهنه آبی انتخاب شد. ماتریس هم‌وقوع (co-occurrence matrix) از برچسب‌گذاری‌های همه روش‌ها تشکیل و با خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (linkage = average) به نقشه اجماعی نهایی تبدیل شد که رژیم‌های پایدار نواحی اطراف با تأثیرات معنادار بر دمای سطح آب خلیج فارس را نشان می‌دهد.

۲-۴-۲ مرحله ۲: الگوریتم‌های خوشه‌بندی

چارچوب چند الگوریتمی با هدف کاوش دیدگاه‌های متنوع در مورد مرزبندی رژیم‌های نواحی اطراف و تأثیر آن‌ها بر پهنه آبی طراحی شد؛ زیرا هر الگوریتم فرضیات متفاوتی درباره

جدول ۱. الگوریتم‌های خوشه‌بندی به کاررفته به همراه پارامترهای کلیدی برای بهینه‌سازی مدل

الگوریتم	پارامترهای کلیدی	مقادیر / بازه‌های آزمون شده
K-Means	Initialization, k range, max iterations	k-means++, 3-10 clusters, max_iter=300
MiniBatchKMeans	Batch size, k range, initialization	batch=100, 3-10 clusters, k-means++
GMM	Components, covariance type, init method	3-6 components, full covariance, k-means
DBSCAN	ϵ (eps), minPts, metric	eps=0.5-1.5, minPts=5-10, Euclidean
Fuzzy C-Means	k range, fuzziness (m), max iterations	3-6 clusters, m=2, max_iter=150
Consensus Clustering	Base algorithms, similarity metric	All above, Jaccard index

۳-۴- معیارهای داخلی و ارزیابی پایداری در الگوریتم‌های مختلف

برای ارزیابی کیفیت و پایداری خوشه‌بندی رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف، سه معیار اعتبارسنجی داخلی مکمل امتیاز سیلوئت (Silhouette Score)، شاخص دیویس-بولدین (Davies-Bouldin Index) و شاخص کالینسکی-هاراباس (Calinski-Harabasz Index) بر خروجی‌های الگوریتم‌ها اعمال شد [21]. این معیارها به‌طور همگرا تعداد بهینه خوشه‌ها را $k = 5$ تعیین کردند که تعادلی مطلوب بین جدایی بالا، فشردگی خوشه‌ها و تمایز درون/بین خوشه‌ای برقرار می‌سازد؛ الگوریتم‌های K-Means و MiniBatchKMeans بالاترین امتیازهای سیلوئت را کسب نمودند، GMM عملکرد رقابتی با تأکید بر مرزهای احتمالی نشان داد و DBSCAN به دلیل تمرکز بر خوشه‌های نامنظم، امتیازهای پایین‌تری به دست آورد (جدول ۲). همچنین، میانگین شاخص رند تعدیل‌شده جفتی (Adjusted Rand Index) بین خروجی‌های الگوریتم‌ها ۰/۸۱ بود که توافق قابل توجهی را تأیید می‌کند.

علاوه بر این، اعتبارسنجی کیفی خارجی با روی هم‌گذاری مرزهای مکانی رژیم‌های شناسایی‌شده بر نقشه‌های وقوع سفید شدگی

مرجان‌ها انجام شد و هم‌پوشانی قوی، به‌ویژه در نواحی شمالی را آشکار ساخت که از ارتباط فیزیکی و زیست‌محیطی تأثیر رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف بر افزایش دمای سطح آب و ریسک‌های اکوسیستمی پهنه آبی خلیج فارس پشتیبانی می‌نماید [۲۵ و ۶]. خوشه‌بندی اجماعی نهایی، با یکپارچه‌سازی خروجی‌های همه روش‌ها، پایدارترین طبقه‌بندی را ارائه داد که پایه‌ای محکم برای تحلیل تأثیرات حرارتی بر پهنه آبی فراهم می‌سازد.

در این پژوهش، تحلیل تله کانکشن‌ها تنها به‌صورت هم‌زمان (بدون تأخیر زمانی) انجام شد، به این معنا که هیچ تأخیر زمانی بین متغیرهای اقلیمی و شاخص‌های تله کانکشن (مانند ENSO و IOD) در نظر گرفته نشد. همه روابط زمانی با استفاده از داده‌های هم‌زمان (هم‌زمان) برای رژیم‌های اقلیمی و تله کانکشن‌ها بررسی شدند. در این پژوهش، مقادیر ماهانه Niño 3.4 و شاخص حالت دوقطبی (DMI) برای دوره ۱۹۶۰-۲۰۲۱ به دست آمد و با فراوانی زمانی هر خوشه شناسایی‌شده از طبقه‌بندی اجماعی پایه مقایسه شد. سری‌های زمانی خوشه‌ها به‌صورت فصلی تجمیع و بر اساس فازهای مثبت، منفی و خنثی انسو و IOD کامپوزیت شدند. ارتباطات آماری با استفاده از ضرایب همبستگی پیرسون و

جدول ۲. ارزیابی الگوریتم‌های خوشه‌بندی بر اساس معیارهای اعتبارسنجی داخلی و پارامترهای بهینه مربوطه

الگوریتم	امتیاز سیلوئت (Silhouette Score)	شاخص دیویس-بولدین (Davies-Bouldin Index)	شاخص کالینسکی-هاراباس (Calinski-Harabasz Index)	k / پارامترهای بهینه
K-Means	0.62	0.54	2850	$k = 5$
MiniBatchKMeans	0.60	0.56	2785	$k = 5$
GMM	0.58	0.60	2620	$k = 5$
DBSCAN	0.41	0.78	1450	$eps = 1.0, minPts = 6$
Fuzzy C-Means	0.55	0.65	2510	$k = 5, m = 2$
Consensus Clustering	-	-	-	Combined output

جدول ۳. رابطه بین خوشه‌های اقلیمی شناسایی شده و محرک‌های اقلیمی اصلی، با نمایش ناهنجاری‌های کامپوزیت در فازهای مثبت و منفی انسو و دوقطبی اقیانوس هند. (IOD) ضرایب همبستگی پیرسون نشان داده شده‌اند و مقادیر آماری معنادار ($p < 0.5$) با علامت ستاره مشخص شده‌اند

نام خوشه	ENSO Positive	ENSO Negative	IOD Positive	IOD Negative
Northern Gulf Extreme Heat	-0.05	+0.08	-0.21	+0.15
Southern Gulf Moderate	+0.12	-0.10	+0.05	-0.07
Wet Winter Anomaly	+0.18	-0.05	+0.48*	-0.32*
Monsoon Fringe Influence	-0.09	+0.42*	-0.14	+0.21

۴۷
شماره ۳۳
بهار ۱۴۰۵
فصلنامه علمی و پژوهشی



بررسی تأثیر رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان بر بهینه آبی این حوضه، رویکرد یادگیری ماشین بدون نظارت چند الگوریتمی / علیرضا خادم دقیق، علی زالی و الهه عسکری

تقویت‌شده فصل سرد در خلیج فارس است [۱۸]. در مقابل، رژیم حاشیه موسمی در سال‌های لانینا فراوانی بیشتری داشت ($r \approx +0.42$) که با تقویت بادهای جنوب غربی موسمی و انتقال رطوبت به جنوب شرقی خلیج فارس سازگار است [۱۲]. رژیم گرمای شدید حساسیت کمی به انسو نشان داد اما در فازهای مثبت IOD به‌طور متوسط سرکوب شد که احتمالاً به دلیل افزایش ابرناکی و کاهش تابش خورشیدی خالص است.

این یافته‌ها بر نقش تغییرات اقیانوس-جو دور در تعدیل حالت‌های اقلیمی محلی تأکید دارند و پتانسیل پیش‌بینی فصلی رژیم‌های اقلیمی خلیج فارس را بر اساس پایش انسو و IOD برجسته می‌سازند.

ناهنجاری‌های کامپوزیت کمی شدند و نتایج در جدول ۳ خلاصه شده‌اند. برای هر همبستگی، مقادیر p دوطرفه محاسبه شد تا معناداری آماری ارزیابی شود؛ مقادیر کمتر از ۰.۵۰، معنادار تلقی شدند و در جدول ۳ با علامت ستاره مشخص شده‌اند. همبستگی‌های مثبت نشان‌دهنده افزایش فراوانی یک رژیم خاص در فاز معین تله کانکشن هستند، درحالی‌که همبستگی‌های منفی بیانگر سرکوب آن می‌باشند.

تحلیل روابط متمایز و از نظر فیزیکی سازگار را آشکار کرد. رژیم زمستان مرطوب همبستگی مثبت قوی با فازهای مثبت IOD ($r \approx +0.48$) و ارتباط ضعیف‌تری با شرایط خنثی انسو نشان داد که حاکی از آن است IOD محرک غالب بارش

۵- بحث و نتایج

۵-۱- نقشه‌های خوشه‌بندی حاصل از

الگوریتم‌های مختلف و طبقه‌بندی اجماعی

نقشه‌های خوشه‌بندی تولیدشده توسط الگوریتم‌های مختلف (۴) توافق مکانی بالایی را در شناسایی رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان نشان می‌دهند که تأثیرات متمایزی بر پهنه آبی خلیج فارس اعمال می‌کنند. روش‌های مبتنی بر مرکز (K-Means و MiniBatchKMeans) مرزهای نسبتاً تیزتری را ترسیم کردند و رژیم‌های اصلی مانند گرمای شدید شمالی، معتدل دریایی جنوبی و تأثیر حاشیه موسمی را با وضوح بالا جدا نمودند. در مقابل، مدل‌های مخلوط گاوسی (GMM) و Fuzzy C-Means مناطق انتقالی گسترده‌تری را با عضویت نرم برجسته ساختند که انتقال تدریجی سیگنال‌های اقلیمی بین رژیم‌ها را منعکس می‌سازد و تأثیرات متقابل این رژیم‌ها بر گرادیان‌های حرارتی پهنه آبی را بهتر نشان می‌دهد. الگوریتم DBSCAN نیز ناهنجاری‌های محلی ساحلی در مقیاس کوچک را ایزوله کرد که تعاملات باد-جریان-توپوگرافی را در نواحی اطراف آشکار می‌سازد و بر پیچیدگی‌های محلی تأثیرگذار بر اختلاط عمودی و دمای سطح آب تأکید دارد.

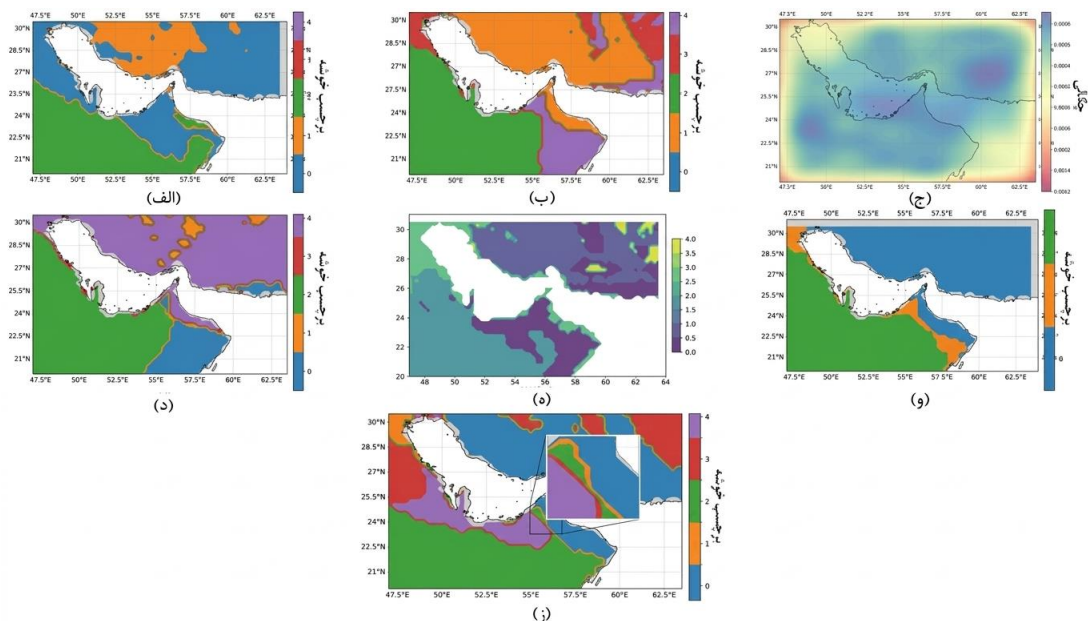
طبقه‌بندی اجماعی نهایی ($k = 5$)، با یکپارچه‌سازی خروجی‌های همه روش‌ها، پایدارترین نقشه را تولید کرد که ویژگی‌های کلیدی هر الگوریتم را حفظ می‌نماید: وضوح مکانی روش‌های مرکز‌یافته، انتقال‌های نرم احتمالی و فازی، جزئیات ناهنجاری‌های محلی DBSCAN. این توافق چند الگوریتمی (میانگین $ARI \approx 0.81$) اطمینان می‌دهد که رژیم‌های شناسایی شده ساختارهای اقلیمی زیربنایی نواحی

اطراف را منعکس می‌کنند و پایه‌ای محکم برای تحلیل تأثیرات حرارتی و دینامیکی آن‌ها بر پهنه آبی خلیج فارس فراهم می‌آورد.

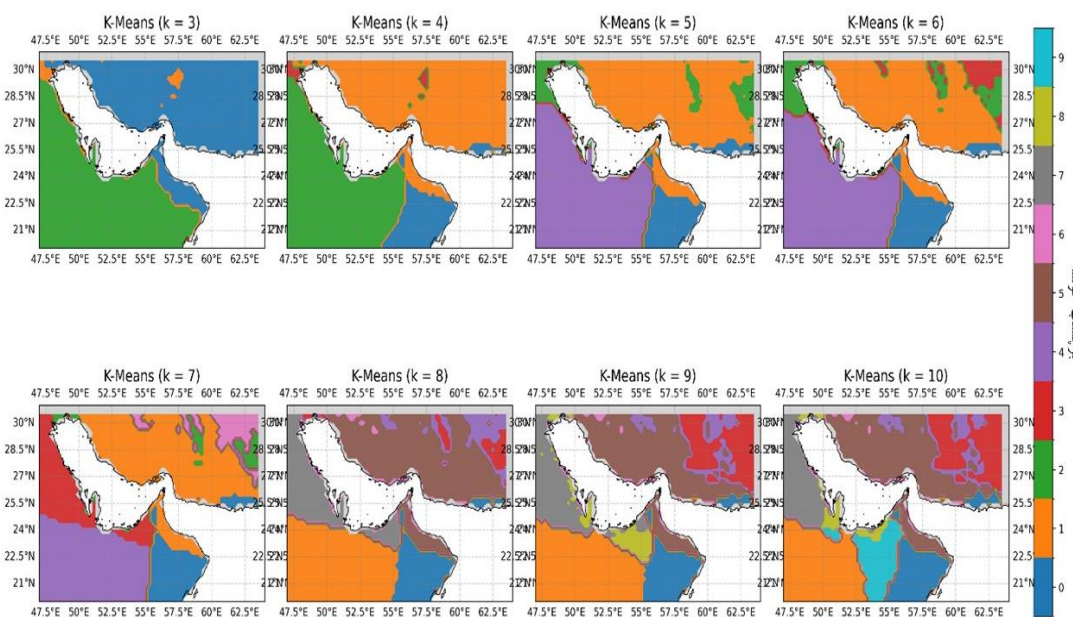
۵-۲- تعداد بهینه خوشه‌ها

پدیده تقسیم‌بندی بیش‌ازحد (over-segmentation) یعنی تفکیک مصنوعی مناطق همگن به زیر خوشه‌های کوچک بدون تمایز اقلیمی معنادار به‌ویژه در نواحی شمالی پهنه آبی خلیج فارس مشهود بود، جایی که گرادیان‌های دمای هوا قوی اما از نظر مکانی نسبتاً هموار هستند و افزایش تعداد خوشه‌ها منجر به ایجاد لکه‌های ایزوله ناشی از تغییرات جزئی در اختلاط باد یا گرادیان‌های شوری می‌شود. ۵ الگوهای مکانی تولیدشده توسط الگوریتم K-Means با $k = 3$ بازه آزمون شده k را نشان می‌دهد. برای $k = 3$ ، طبقه‌بندی بیش‌ازحد درشت بود و رژیم‌های فیزیکی متمایز نواحی اطراف مانند رژیم گرمای شدید شمالی و رژیم معتدل دریایی جنوبی که تأثیرات متفاوتی بر دمای سطح آب خلیج فارس دارند را در خوشه‌های واحد ادغام می‌کرد.

در $k = 4$ و $k = 5$ ، این رژیم‌ها به‌طور واضح جدا شدند و خوشه‌های اضافی قادر به ثبت مناطق انتقالی و ناهنجاری‌های فصلی با تأثیر معنادار بر پهنه آبی شدند. باین‌حال، برای $k = 7$ و بالاتر، تکه‌تکه شدن مکانی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت و زیر خوشه‌های کوچک و پراکنده‌ای ایجاد شد که فاقد تفسیر اقلیمی مستقل بودند، بنابراین، $k = 5$ به‌عنوان تعداد بهینه خوشه‌بندی انتخاب شد که بهترین تعادل را بین وضوح مکانی، پایداری آماری و قابلیت تفسیر فیزیکی تأثیر رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف بر ویژگی‌های حرارتی پهنه آبی خلیج فارس برقرار می‌سازد.



شکل ۴. طبقه‌بندی رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان با استفاده از الگوریتم‌های مختلف خوشه‌بندی و تأثیر آن‌ها بر پهنه آبی خلیج فارس. (الف) خوشه‌بندی K-Means با $k = 3$ (طبقه‌بندی درشت‌تر)، (ب) خوشه‌بندی K-Means با $k = 5$ (جداسازی دقیق‌تر رژیم‌های اصلی شامل گرمای شدید شمالی، معتدل دریایی جنوبی، ناهنجاری زمستان مرطوب، تأثیر حاشیه موسمی و رژیم انتقالی)، (ج) خروجی niBatchKMeans، (د) نقشه چگالی نقاط از DBSCAN با تأکید بر ناهنجاری‌های محلی ساحلی، (ه) طبقه‌بندی سخت مدل‌های مخلوط گاوسی (GMM)، (و) خوشه‌بندی نرم Fuzzy C-Means با نمایش درجه عضویت کسری در مناطق انتقالی، (ز) طبقه‌بندی اجماعی نهایی ($k = 5$) با یکپارچه‌سازی خروجی‌های همه روش‌ها، ارائه پایدارترین نقشه رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف و برجسته‌سازی تأثیرات متمایز آن‌ها بر گرادیان‌های حرارتی و دمای سطح آب پهنه آبی خلیج فارس



شکل ۵. الگوهای مکانی حاصل از K-Means برای تعداد خوشه‌های مختلف

۵-۳- رژیم‌های اقلیمی مکانی

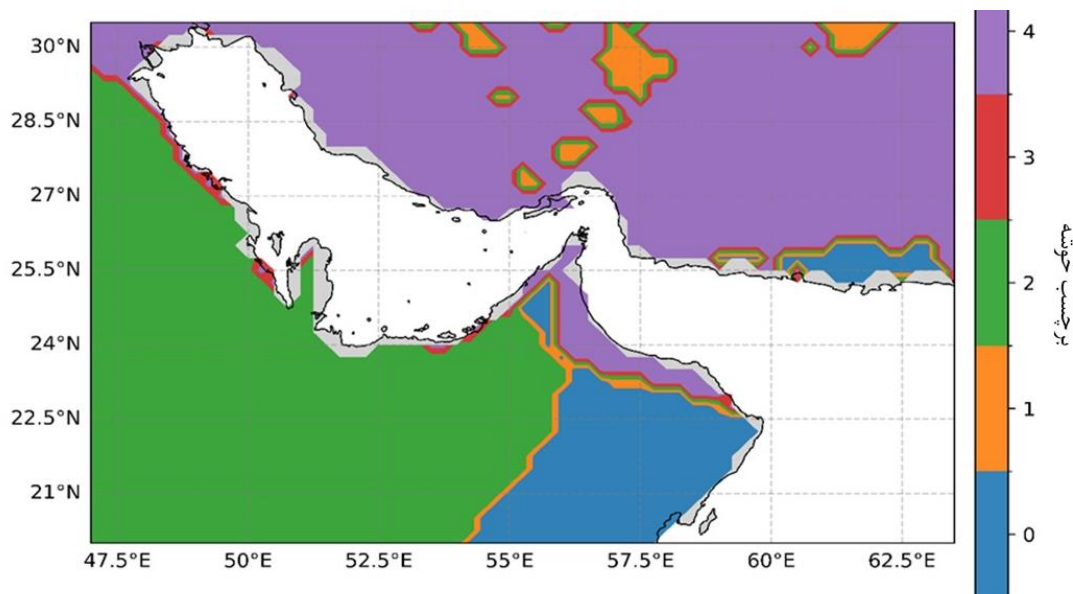
طبقه‌بندی اجماعی، بر اساس پیکربندی بهینه $k = 5$ ، پنج رژیم اقلیمی پایدار را در نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان آشکار کرد که تأثیرات متمایزی بر ویژگی‌های حرارتی پهنه آبی خلیج فارس (به‌ویژه دمای سطح آب) اعمال می‌کنند. این رژیم‌ها - شامل گرمای شدید شمالی، معتدل دریایی جنوبی، ناهنجاری زمستان مرطوب، تأثیر حاشیه‌ای موسمی و منطقه انتقالی - در اکثر الگوریتم‌ها به‌طور یکسان شناسایی شدند و تنها تغییرات جزئی در مکان مرزها مشاهده شد. به‌طور میانگین، ۸۶٪ از سلول‌های شبکه‌ای در همه الگوریتم‌ها به یک رژیم اختصاص یافتند که نشان‌دهنده توافق مکانی بالا در خوشه‌بندی نواحی اطراف است؛ کم‌ترین هم‌پوشانی (۷۸٪) در مناطق انتقالی ساحلی رخ داد، جایی که روش‌های فازی و احتمالی مرزهای گسترده‌تری نشان دادند. هر رژیم را می‌توان به ویژگی‌های جوی-اقیانوسی متمایز و کنترل‌های جغرافیایی نواحی اطراف مرتبط ساخت که از طریق کوپلینگ هوا-دریا و تله کانکشن‌ها بر دینامیک دمای سطح آب و اکوسیستم پهنه آبی خلیج فارس تأثیر می‌گذارند.

۱) رژیم گرمای شدید شمالی - یکی از رژیم‌های اقلیمی پایدار شناسایی‌شده در نواحی اطراف خلیج فارس بخش‌های شمالی و شمال غربی حوضه را پوشش می‌دهد و تأثیر قابل توجهی بر افزایش دمای سطح آب در پهنه آبی کم‌عمق شمالی خلیج فارس اعمال می‌کند. این رژیم با دماهای هوای سطحی بسیار بالا که در فصل تابستان اغلب در طول روز به بیش از ۶۰ درجه سانتی‌گراد و در شب به بیش از ۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، حداقل بارش سالانه و تبخیر شدید مشخص می‌شود. حفظ این شرایط گرم ناشی از عمق کم حوضه شمالی، تابش خورشیدی بالا، تبادل آبی محدود با دریای عمان و سرعت

باد نسبتاً پایین است که با هم اختلاط عمودی را کاهش می‌دهند و گرمایش فصلی را تشدید می‌کنند. این رژیم همچنین با شوری بالای سطحی ($PSU > 40$) همراه است که از نرخ‌های تبخیر شدید ناشی می‌شود و ریسک سفید شدگی مرجان‌ها و اختلالات اکوسیستمی را در پهنه آبی شمالی افزایش می‌دهد [۲۲]. الگوریتم‌های GMM و Fuzzy C-Means مرزهای تدریجی‌تری در لبه جنوبی این رژیم نشان می‌دهند که بیانگر انتقال نرم به رژیم معتدل دریایی مجاور و تأثیر متقابل این رژیم‌های نواحی اطراف بر گرادیان‌های حرارتی پهنه آبی خلیج فارس است.

۲) رژیم معتدل دریایی جنوبی - این رژیم عمدتاً حوضه جنوب‌شرقی نواحی اطراف و مجاورت تنگه هرمز را در برمی‌گیرد و با قله‌های دمای سطح آب خنک‌تر (در مقایسه با نواحی شمالی) و رطوبت نسبی بالاتر مشخص می‌شود. تعدیل حرارتی این رژیم ناشی از تبادل قوی‌تر با دریای عرب، اختلاط عمودی افزایش‌یافته به دلیل بادهای فصلی (به‌ویژه شمیم تابستانی و جریان‌های مرتبط با حاشیه موسمی) و پوشش ابر بیشتر است که گرمایش سطحی پهنه آبی خلیج فارس را محدود می‌کند. این رژیم همچنین مجموع بارش کمی بالاتر را نشان می‌دهد که به‌ویژه در فازهای مثبت دوقطبی اقیانوس هند (IOD) تقویت می‌شود و از این طریق تأثیر تعدیل‌کننده‌ای بر دمای سطح آب در بخش‌های جنوبی پهنه آبی دارد.

۳) رژیم ناهنجاری زمستان مرطوب - این رژیم در نواحی جنوب غربی و مرکزی اطراف خلیج فارس متمرکز است و با بارش زمستانی ناهنجار بالا، افزایش پوشش ابر و رطوبت نسبی بیشتر تعریف می‌شود. این رژیم به‌شدت با عبور سیکلون‌های میان‌عرض جغرافیایی و فعالیت جبهه‌ای تقویت‌شده مرتبط است که عمدتاً در فازهای مثبت IOD رخ می‌دهد. مرزهای این رژیم



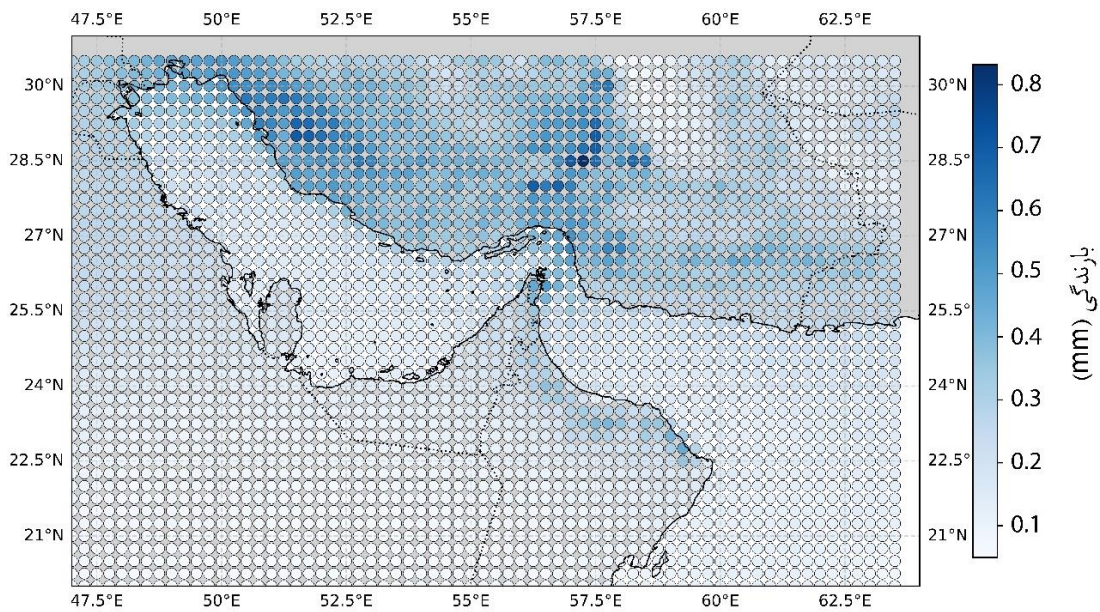
شکل ۶. نقشه طبقه‌بندی مبتنی بر اجماع با $k = 5$

۵) رژیم انتقالی - این رژیم در نواحی مرزی بین رژیم‌های شمالی و جنوبی اطراف خلیج فارس و دریای عمان قرار دارد و مناطقی را پوشش می‌دهد که سیگنال‌های اقلیمی در آن‌ها هم‌پوشانی دارند، مانند تأثیر بادهای مختلط، مقادیر متوسط رطوبت نسبی و نوسانات بارش. این رژیم نقش مهمی در جابه‌جایی‌های فصلی و انتقال تأثیرات رژیم‌های مجاور به پهنه آبی خلیج فارس ایفا می‌کند؛ به گونه‌ای که گرادیان‌های حرارتی و رطوبتی تدریجی آن، تعدیل دمای سطح آب (SST) را در نواحی مرکزی و انتقالی پهنه آبی تسهیل می‌نماید و از این طریق بر پایداری اکوسیستمی و پاسخ به تغییرات جوی تأثیر می‌گذارد.

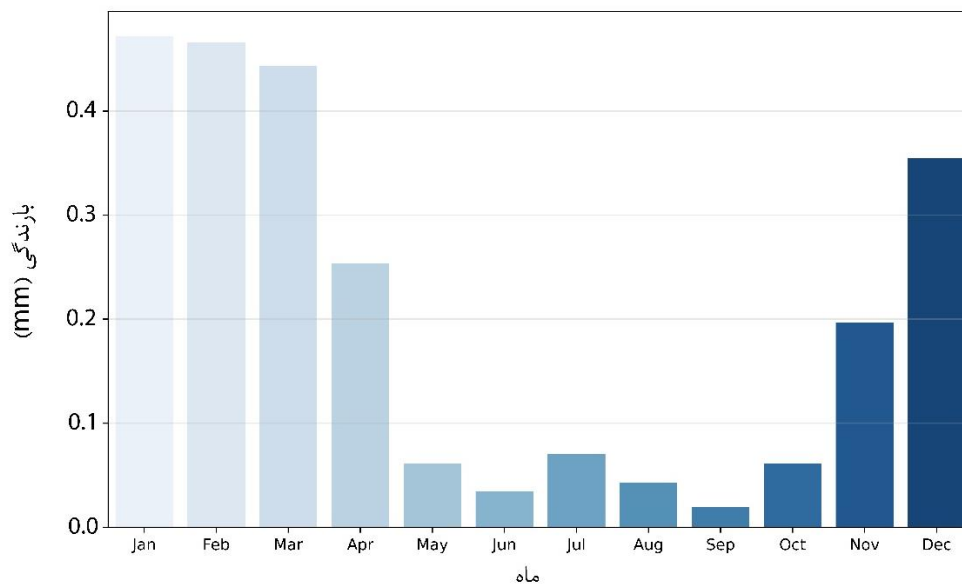
الگوریتم DBSCAN به‌ویژه در شناسایی ناهنجاری‌های محلی ساحلی در مقیاس کوچک مؤثر بود که تعاملات باد-جریان-توپوگرافی را در نواحی اطراف منعکس می‌سازد و تأثیر این ناهنجاری‌ها بر اختلاط عمودی و گرمایش موضعی پهنه آبی خلیج فارس را برجسته می‌کند. این ویژگی، پایداری خوشه‌بندی در برابر تغییرات جزئی پارامتری را افزایش داد و به درک بهتر

در خروجی‌های الگوریتم‌های احتمالی (GMM) و فازی (Fuzzy C-Means) پراکنده‌تر هستند که بیانگر پتانسیل نفوذ اپیزودیک این ناهنجاری‌های مرطوب به پهنه آبی مجاور و تأثیر آن بر کاهش موقت دمای سطح آب و تغییرات اکوسیستمی است.

۴) رژیم تأثیر حاشیه موسمی - این رژیم عمدتاً در نواحی جنوب‌شرقی اطراف خلیج فارس و بخش‌های شمالی دریای عمان قرار دارد و با موج‌های رطوبتی اپیزودیک اواخر تابستان ناشی از امتداد شمالی حاشیه موسمی تابستانی هند مشخص می‌شود. فعالیت این رژیم به‌ویژه در سال‌های لانینا افزایش می‌یابد که جریان موسمی جنوب غربی را تقویت می‌کند. این رژیم با کریدورهای باد قوی پایدار هم‌راستا است که انتقال رطوبت را تسهیل می‌نماید و در نتیجه، تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش رطوبت نسبی و تعدیل دمای سطح آب در بخش‌های جنوب‌شرقی پهنه آبی خلیج فارس دارد؛ پدیده‌ای که ریسک‌های مرتبط با هیپوکسی و اختلالات اکوسیستمی را تحت شرایط گرمایش مداوم تعدیل می‌کند.



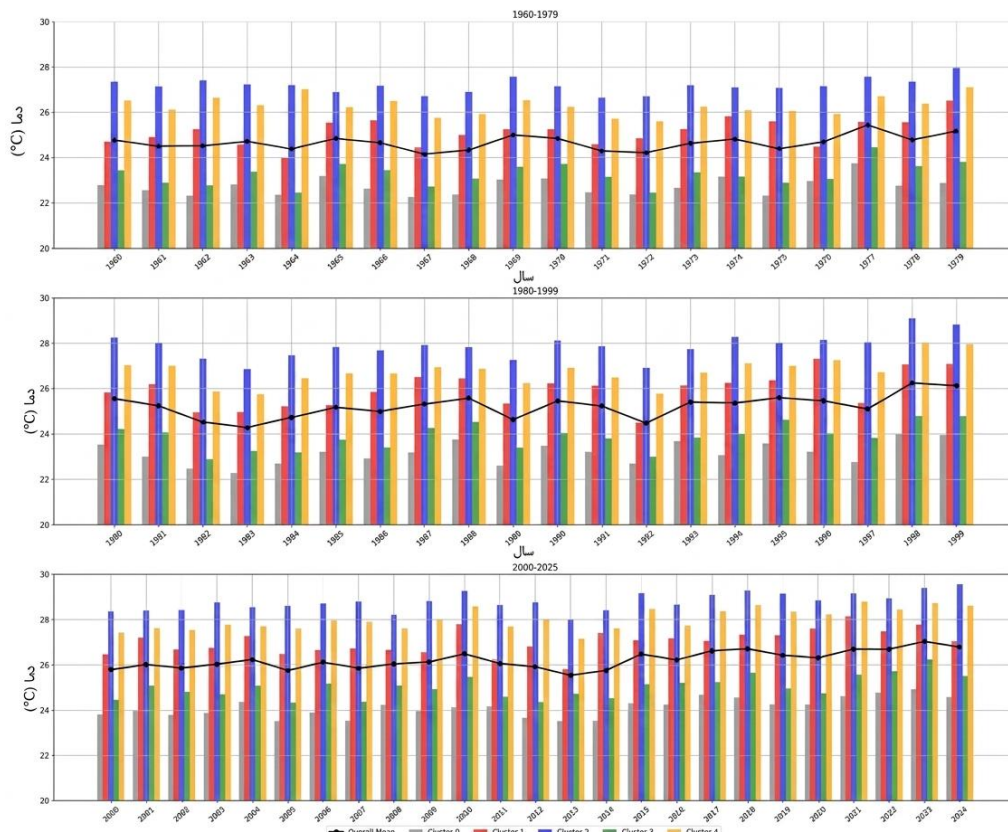
شکل ۷. توزیع میانگین بارندگی در منطقه و بازه زمانی مورد مطالعه



شکل ۸. میانگین ماهانه بارش (میلی متر) در رژیم تأثیر حاشیه موسمی (جنوب شرقی خلیج فارس)

مبتنی بر مرکز (K-Means و MiniBatchKMeans) مرزهای نسبتاً تیزتری را ترسیم نمودند، مدل های مخلوط گاوسی (GMM) و Fuzzy C-Means مناطق انتقالی گسترده تری را آشکار ساختند و DBSCAN بر پیچیدگی های محلی ساحلی تأکید ورزید. این توافق چند روشه اطمینان می دهد که رژیم های استخراج شده

مکانیسم های محلی انتقال انرژی هوا-دری در مرزهای رژیم های اطراف کمک نمود. انسجام مکانی رژیم های اقلیمی شناسایی شده در نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان، توافق چند الگوریتمی را برجسته می سازد و ارتباط فیزیکی آن ها با مکانیسم های تأثیرگذار بر پهنه آبی را تقویت می کند. در حالی که روش های



شکل ۹. توزیع مکانی دما در خلیج فارس بر اساس خروجی یکپارچه چندین الگوریتم خوشه‌بندی که مرزهای پیچیده و تنوع مناطق اقلیمی منطقه را نشان می‌دهد

جامعی از توزیع میانگین سالانه دمای سطح آب (SST) در پهنه آبی خلیج فارس ارائه می‌دهد که تحت تأثیر خوشه‌بندی رژیم‌های نواحی اطراف قرار دارد. این شکل الگوهای حرارتی متمایز را برجسته می‌سازد و نشان می‌دهد که چگونه رژیم‌های مختلف اطراف مانند رژیم گرمای شدید شمالی با دماهای بالاتر و رژیم معتدل دریایی جنوبی با تعدیل حرارتی بیشتر گرادیان‌های دمایی پهنه آبی را شکل می‌دهند. نقشه مرزهای حرارتی پیچیده بین نواحی شمالی (با دماهای مداوم بالاتر) و جنوبی (با دماهای خنک‌تر به دلیل نفوذ دریای عمان) را آشکار می‌سازد و ناهمگنی حرارتی ناشی از تأثیر رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف را تقویت می‌کند. این نمایش بصری از استحکام رویکرد چند الگوریتمی خوشه‌بندی پشتیبانی می‌نماید و تصویر روشنی از چگونگی

مصنوعات یک الگوریتم منفرد نیستند، بلکه ساختارهای اقلیمی زیربنایی نواحی اطراف را منعکس می‌کنند که از طریق کوپلینگ هوا-دریا بر دمای سطح آب و دینامیک پهنه آبی خلیج فارس تأثیر می‌گذارند.

بالاین حال، وضوح مکانی داده‌های ERA5 (حدود ۳۱ کیلومتر) به‌طور اجتناب‌ناپذیری ویژگی‌های میکرو اقلیمی ساحلی در مقیاس کوچک‌تر مانند نواحی بالاآمدگی موضعی ناشی از بادهای محلی، گرادیان‌های مصبی و رویدادهای حرارتی شدید در خلیج‌های فرعی را هموار می‌سازد و ممکن است جزئیات این پدیده‌های محلی را در خوشه‌بندی کمتر نمایان کند.

برای نشان دادن توزیع مکانی رژیم‌های اقلیمی شناسایی‌شده در نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان و تأثیر آن‌ها بر پهنه آبی، ۹ نمای

انتقال تأثیرات رژیم‌های اطراف به الگوهای دمای سطح آب پهنه آبی خلیج فارس ارائه می‌دهد.

۵-۴- مقایسه‌های الگوریتمی

روش‌های مبتنی بر چگالی مانند DBSCAN به‌ویژه در تفکیک تضادهای ساحلی-فراساحلی در مقیاس کوچک مؤثر بودند که الگوریتم‌های دیگر تمایل به هموارسازی آن‌ها داشتند. با تکیه بر چگالی نقاط به‌جای شکل‌های خوشه‌ای از پیش تعیین‌شده، DBSCAN توانست ناهنجاری‌های محلی در امتداد پهنه‌های ساحلی کم‌عمق و نزدیک خروجی‌های رودخانه‌های بزرگ را ایزوله کند. این ویژگی‌های در مقیاس کوچک اغلب با نواحی کدورت بالا، گرادیان‌های شوری یا بالاآمدگی محلی ناشی از تعامل بادهای شمیم و باتیمتری ساحلی هم‌زمان بودند.

با این حال، وابستگی DBSCAN به آستانه‌های چگالی گاه خوشه‌های کوچک تکه‌تکه تولید می‌کرد یا نواحی انتقالی فراساحلی را به‌عنوان نویز طبقه‌بندی می‌نمود که کارایی آن را برای نقشه‌برداری رژیم در مقیاس حوضه محدود می‌کرد.

برای هماهنگی تفاوت‌های موجود میان خروجی‌های الگوریتم‌های مختلف، خوشه‌بندی اجماعی خروجی‌های همه روش‌ها را یکپارچه ساخت و با وزن‌دهی به توافقات مکانی، نقشه نهایی پایداری تولید کرد که ویژگی‌های کلیدی هر روش را حفظ می‌نماید: جزئیات ناهنجاری‌های محلی ساحلی از DBSCAN، انتقال‌های نرم و احتمالی از GMM و وضوح مکانی بالا از روش‌های مبتنی بر مرکزیت (K-Means و MiniBatchKMeans). این طبقه‌بندی اجماعی پایدار، با تأکید بر رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان که تأثیرات متمایزی بر دمای سطح آب و دینامیک پهنه آبی اعمال می‌کنند، پایه‌ای محکم برای تحلیل‌های بعدی

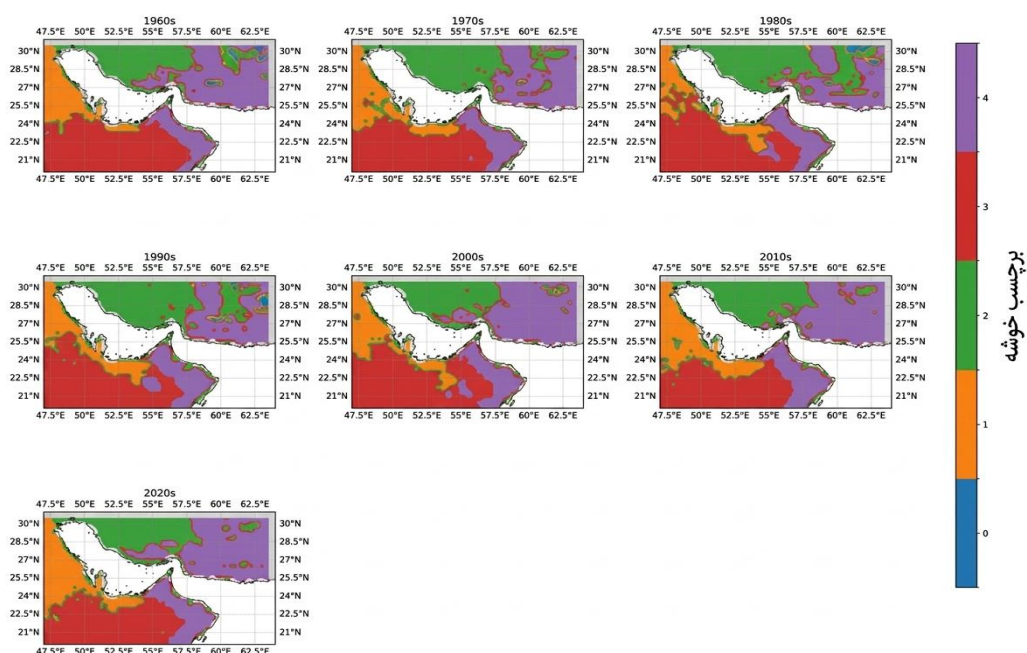
فصلی، روندهای بلندمدت و پیوندهای تله کانکشن فراهم آورد.

جدول ۴ میانگین گستره مکانی (کیلومتر مربع) هر یک از پنج رژیم اقلیمی شناسایی‌شده در نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان را طی دهه‌های مختلف نشان می‌دهد؛ مقادیر این جدول از میانگین خروجی‌های همه الگوریتم‌های خوشه‌بندی به‌دست‌آمده است. در الگوریتم K-Means، رژیم معتدل دریایی جنوبی (که عمدتاً بخش‌های جنوب‌شرقی اطراف و مجاورت دریای عمان را پوشش می‌دهد) طی تمام دهه‌ها بزرگ‌ترین گستره مکانی را حفظ کرد و پایداری نسبی در تأثیر تعدیل‌کننده خود بر دمای سطح آب پهنه آبی خلیج فارس نشان داد. در مقابل، رژیم حاشیه موسمی (متمرکز در نواحی جنوب‌شرقی اطراف و بخش‌های شمالی دریای عمان) بیشترین تغییرات بین‌دهه‌ای را تجربه کرد که حساسیت بالای آن به نوسانات بین سالانه و دهه‌ای تله کانکشن‌ها (به‌ویژه فازهای لانینا) را منعکس می‌سازد و پیامدهای متغیری بر رطوبت و دمای سطح آب در بخش‌های جنوب‌شرقی پهنه آبی دارد.

الگوریتم MiniBatchKMeans الگوهای دهه‌ای تقریباً همسان با K-Means تولید کرد، با اندکی هموارسازی در نوسانات بین‌دهه‌ای که پایداری نتایج را تأیید می‌نماید. مدل‌های مخلوط گاوسی (GMM) انتقال‌های نرم‌تر و تدریجی‌تر رژیم‌ها در طول زمان را آشکار ساختند، به‌ویژه در نواحی مرزی و انتقالی اطراف که تأثیرات متقابل رژیم‌ها بر گرادیان‌های حرارتی پهنه آبی را بهتر نشان می‌دهند. الگوریتم Fuzzy C-Means نیز، منطبق با ماهیت عضویت کسری خود، جابه‌جایی‌های کندتر و پیوسته‌تری در گستره برخی رژیم‌ها (مانند رژیم ناهنجاری زمستان مرطوب) برجسته کرد که بیانگر پتانسیل نفوذ

جدول ۴. میانگین گستره مکانی دهه‌ای (کیلومتر مربع) هر یک از رژیم‌های اقلیمی شناسایی شده در نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان (دهه‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۰)

دهه	کلاس ۱	کلاس ۲	کلاس ۳	کلاس ۴	کلاس ۵
۱۹۶۰	252068.7	261755.4	274349.2	393082.3	242508.9
۱۹۷۰	249637.2	255559.5	296146.4	380055.9	242365.5
۱۹۸۰	253304.9	248496.4	299085.5	391960.2	230917.6
۱۹۹۰	256969.5	236875.6	296074.1	392880.9	240964.4
۲۰۰۰	250164.9	239229	266253.7	398427.1	269689.8
۲۰۱۰	230355.1	269099.9	281004.3	390908.7	252396.6
۲۰۲۰	224628.7	261238.9	279985.1	403142.7	254769.1

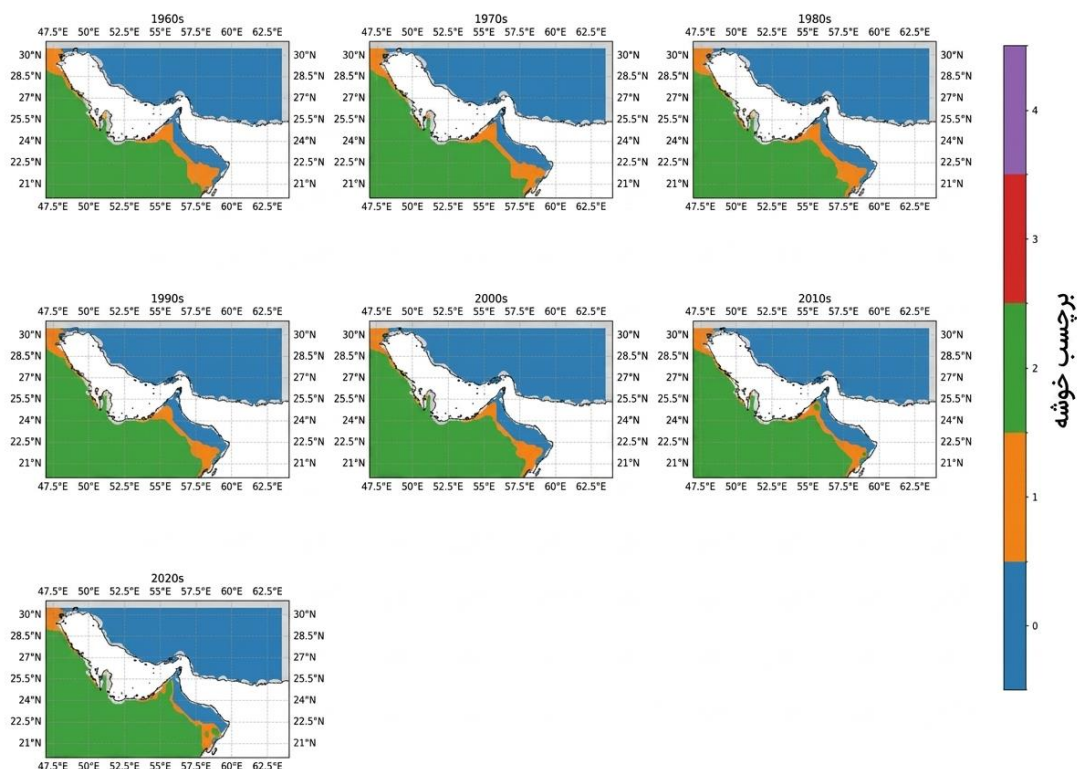


شکل ۱۰. تغییرات دهه‌ای گستره مکانی رژیم‌های اقلیمی شناسایی شده در نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان بر اساس مدل‌های مخلوط گاوسی (GMM)، دهه‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۰

۵-۵- تأثیرات تله کانکشن

تحلیل پس از خوشه‌بندی، روابط روشن و از نظر فیزیکی سازگاری را بین رژیم‌های شناسایی شده و محرک‌های اقلیمی در مقیاس بزرگ آشکار کرد. یادگیری ماشین همچنین برای بهبود مهارت پیش‌بینی رژیم در گردش میان‌عرض جغرافیایی، مانند بخش شمال اطلس-اروپا، به کاررفته است. [۲۷]

تدریجی این رژیم‌ها به پهنه آبی و تعدیل موقت دمای سطح آب در شرایط مرطوب زمستانی است. این تحلیل دهه‌ای چند الگوریتمی، پایداری نسبی رژیم‌های معتدل و گرمایی در تأثیرگذاری بلندمدت بر پهنه آبی خلیج فارس را در برابر تغییرات دهه‌ای رژیم‌های موسمی و مرطوب تأیید می‌کند و پایه‌ای محکم برای ارزیابی ریسک‌های حرارتی و اکوسیستمی تحت سناریوهای گرمایش آینده فراهم می‌آورد.



شکل ۱۱. میانگین گستره مکانی دهه‌ای (کیلومترمربع) هر رژیم اقلیمی شناسایی شده در خلیج فارس بر اساس خوشه‌بندی (Fuzzy C-Means (FCM)، دهه‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۰

رژیم ناهنجاری زمستان مرطوب بالاترین فراوانی فصلی خود را در فازهای مثبت دوقطبی اقیانوس هند (IOD) نشان داد؛ زمانی که گرادیان‌های قوی‌تر دمای سطح دریا در عرض استوایی اقیانوس هند، انتقال رطوبت از دریای عرب به خلیج فارس را تقویت می‌کنند. [18] این رویدادها اغلب با افزایش پوشش ابر و کاهش دماهای روزانه همراه بودند؛ شرایطی که در حالت‌های خنثی انسو نیز می‌تواند رخ دهد، زمانی که هیچ سیگنال قوی اقیانوس آرام گردش منطقه‌ای را تعدیل نکند.

در مقابل، رژیم تأثیر حاشیه موسمی در سال‌های لانینا شایع‌تر بود که با تقویت و نفوذ شمالی موسمی جنوب غربی به جنوب شرقی خلیج فارس سازگار است [۱۲].

رژیم گرمای شدید شمال خلیج فارس همبستگی مستقیم اندکی با انسو نشان داد اما در

رویدادهای مثبت IOD به‌طور متوسط سرکوب شد که احتمالاً ناشی از خنک‌سازی تابشی ناشی از افزایش ابر است.

این نتایج حاکی از آن است که IOD تأثیر قوی‌تری بر تغییرات فصل سرد دارد، درحالی‌که انسو نفوذ موسمی تابستانی را تعدیل می‌کند. سلطه زمستانی IOD احتمالاً از کنترل آن بر گرادیان‌های دمای سطح دریا در دریای عرب ناشی می‌شود که مستقیماً انتقال رطوبت غربی در سطح پایین به خلیج فارس را در زمستان بورئال تقویت یا سرکوب می‌کند، فعالیت جبهه‌ای میان‌عرض جغرافیایی را افزایش می‌دهد و کارایی بارش را بالا می‌برد. این مکانیسم مستقل از جابه‌جایی‌های سلول واکر ناشی از اقیانوس آرام عمل می‌کند که مشخصه انسو است و سیگنال ضعیف‌تر انسو در زمستان را توضیح می‌دهد.

این تفاوت‌ها مسیرهای بالقوه‌ای برای

پیش‌بینی فصلی رژیم‌ها بر اساس شاخص‌های اقلیمی جهانی فراهم می‌کنند. در مجموع، الگوهای تله کانکشن نشان می‌دهند که چارچوب‌های پیش‌بینی برای خلیج فارس باید بین ناهنجاری‌های فصل سرد تحت سلطه IOD و نفوذهای موسمی تابستانی مرتبط با انسو تمایز قائل شوند و اقدامات مدیریتی را برای هر محرک فصلی تنظیم کنند.

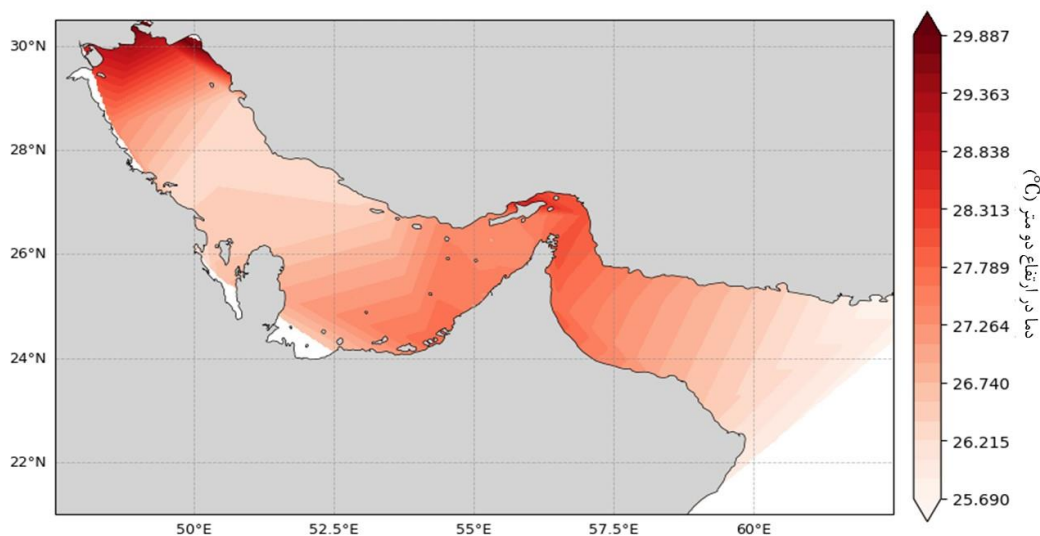
پیوندهای مشابهی در سایر دریا‌های نیمه محصور نیز مشاهده شده است، جایی که رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف به شدت با محرک‌های اقلیمی در مقیاس بزرگ، به‌ویژه دوقطبی اقیانوس هند (IOD) و نوسان جنوبی ال‌نینو (ENSO)، کوپل شده‌اند و جابه‌جایی‌های رژیم‌ها بر الگوهای حرارتی پهنه آبی تأثیر می‌گذارند [5, 12, 18]. برای مثال، فازهای مثبت IOD با افزایش فراوانی رژیم ناهنجاری زمستان مرطوب در نواحی جنوب غربی اطراف خلیج فارس همراه است که بارش و پوشش ابر بیشتری را به همراه دارد و دمای سطح آب را به‌طور موقت تعدیل می‌کند؛ درحالی‌که رویدادهای لانینا رژیم تأثیر حاشیه موسمی را در نواحی جنوب‌شرقی تقویت می‌نماید و نفوذ رطوبت موسمی را افزایش می‌دهد [16, 22]. این یافته‌ها اهمیت گسترده‌تر روابط رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف-تله کانکشن را در دریا‌های نیمه محصور تقویت می‌کنند و با نتایج حاضر هم‌خوانی دارند که نشان‌دهنده تأثیر معنادار این پیوندها بر پایداری حرارتی و ریسک‌های اکوسیستمی پهنه آبی خلیج فارس است [۶ و ۲۳].

هرچند این مطالعه طبقه‌بندی پایداری از رژیم‌های اقلیمی در نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان ارائه می‌دهد که تأثیرات متمایزی بر ویژگی‌های حرارتی پهنه آبی خلیج فارس (به‌ویژه دمای سطح آب) اعمال می‌کنند، چندین محدودیت روش‌شناختی باید مورد توجه قرار گیرد. انتخاب الگوریتم‌های خوشه‌بندی که هر

یک دارای فرضیات و نقاط قوت ذاتی هستند، ممکن است بر مرزبندی رژیم‌های شناسایی‌شده در نواحی اطراف تأثیر بگذارد، به‌ویژه در مناطق انتقالی که مرزهای بین رژیم‌ها کمتر متمایزند و انتقال تأثیرات به پهنه آبی پیچیده‌تر است. بااین‌حال، رویکرد چند الگوریتمی اجماعی با توافق بالا (میانگین $\approx 81\%$ ARI) این عدم قطعیت را به حداقل رسانده و پایداری نتایج را در تحلیل تأثیر رژیم‌های اطراف بر پهنه آبی خلیج فارس تضمین می‌کند.

توزیع مکانی میانگین دمای هوای نزدیک سطح (۲ متری) در نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان (۱۲) به‌وضوح بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی را به‌عنوان نقطه داغ حرارتی پایدارتر نشان می‌دهد که با رژیم معتدل دریایی جنوبی و رژیم تأثیر حاشیه موسمی هم‌خوانی دارد و تأثیر این رژیم‌های نواحی اطراف بر افزایش دمای سطح آب در بخش‌های مربوطه پهنه آبی خلیج فارس را تقویت می‌کند. این الگوهای حرارتی بالا در نواحی جنوبی که اغلب با تابش خورشیدی شدید، رطوبت نسبی بالاتر و نفوذ حاشیه‌ای جریان‌های موسمی همراه هستند، روند صعودی مشاهده شده در فراوانی و گستره این رژیم‌ها را توضیح می‌دهد و بر ضرورت یکپارچه‌سازی پیش‌بینی‌های مبتنی بر رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف در استراتژی‌های مدیریت اکوسیستمی تأکید دارد؛ زیرا افزایش پایدار این نقاط داغ حرارتی می‌تواند ریسک سفید شدگی مرجان‌ها، هیپوکسی و اختلالات اکوسیستمی را در پهنه آبی خلیج فارس تشدید نماید و نیاز به اقدامات سازگاری هدفمند برای کاهش تأثیرات گرمایش مداوم را برجسته می‌سازد.

با یکپارچه‌سازی پیش‌بینی فراوانی رژیم‌های اقلیمی شناسایی‌شده در نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان با پیش‌بینی‌های فصلی شاخص‌های ENSO و IOD، امکان بهبود



شکل ۱۲. توزیع مکانی میانگین بلندمدت دمای هوای نزدیک سطح (۲ متری) در خلیج فارس و دریای عمان

پیش‌بینی تغییرات دمای سطح آب و ریسک‌های اکوسیستمی مرتبط در پهنه آبی خلیج فارس فراهم می‌شود.

در عمل، این قابلیت می‌تواند به پیش‌آگاهی زودهنگام رویدادهای حرارتی شدید (مانند افزایش فراوانی رژیم گرمای شدید شمالی در نواحی اطراف)، برنامه‌ریزی بهتر برای مدیریت منابع آب شیرین در شرایط خشک‌سالی پیش‌بینی‌شده و تقویت اقدامات حفاظتی اکوسیستم‌های دریایی (مانند نظارت بر سفید شدگی مرجان‌ها در سال‌های با دمای سطح آب بالاتر) منجر شود. چنین رویکرد پیش‌بینی رژیم‌محور، با توجه به حساسیت بالای پهنه آبی خلیج فارس به گرمایش مداوم و تأثیرات تله‌کانکشن‌ها، پایه‌ای محکم برای استراتژی‌های سازگاری و مدیریت تاب‌آور اقلیمی در جوامع ساحلی و اکوسیستم‌های دریایی آسیب‌پذیر فراهم می‌آورد.

۶- نتیجه‌گیری

این مطالعه برای نخستین بار چارچوبی چند الگوریتمی یادگیری ماشین بدون نظارت را برای

خوشه‌بندی رژیم‌های اقلیمی نواحی اطراف خلیج فارس و دریای عمان به کار گرفت و تأثیرات متمایز این رژیم‌ها بر ویژگی‌های حرارتی پهنه آبی خلیج فارس به‌ویژه دمای سطح آب (SST) را بررسی کرد. با یکپارچه‌سازی خروجی‌های شش الگوریتم مکمل (K-Means، DBSCAN، GMM، MiniBatchKMeans، Fuzzy C-Means و خوشه‌بندی اجماعی)، طبقه‌بندی پایداری با توافق بالا (میانگین $ARI \approx 0.81$) به دست آمد که پنج رژیم اقلیمی اصلی را شناسایی نمود: رژیم گرمای شدید شمالی، رژیم معتدل دریایی جنوبی، رژیم ناهنجاری زمستان مرطوب، رژیم تأثیر حاشیه موسمی و رژیم انتقالی. هر یک از این رژیم‌ها با ویژگی‌های جوی-اقیانوسی متمایز و کنترل‌های جغرافیایی نواحی اطراف مرتبط بودند و از طریق کوپلینگ هوا-دریا و فرآیندهای دینامیکی، تأثیرات معناداری بر گرادبان‌های حرارتی، اختلاط عمودی و پایداری اکوسیستمی پهنه آبی خلیج فارس اعمال می‌کنند.

یکی از دستاوردهای کلیدی پژوهش، آشکارسازی پیوندهای قوی بین رژیم‌های

شناسایی شده و تله کانکشن‌های جهانی بود. فازهای مثبت دوقطبی اقیانوس هند (IOD) با افزایش فراوانی رژیم ناهنجاری زمستان مرطوب همراه بودند که بارش و پوشش ابر را تقویت کرده و دمای سطح آب را به‌طور موقت تعدیل می‌نماید؛ درحالی که رویدادهای لانینا رژیم تأثیر حاشیه موسمی را در نواحی جنوب‌شرقی اطراف تشدید می‌کردند و نفوذ رطوبت تابستانی را افزایش می‌دادند. این روابط، پتانسیل پیش‌بینی رژیم‌محور تغییرات دمای سطح آب را بر اساس شاخص‌های جهانی ENSO و IOD برجسته می‌سازند و پایه‌ای محکم برای توسعه ابزارهای پیش‌آگاهی زود هنگام ریسک‌های حرارتی فراهم می‌آورند.

از منظر زیست‌محیطی، یافته‌ها بر حساسیت بالای پهنه آبی خلیج فارس به تشدید رژیم‌های گرمایی نواحی اطراف تأکید دارند که می‌تواند سفید شدگی مرجان‌ها، هیپوکسی و اختلالات اکوسیستمی را تحت روندهای گرمایش بلندمدت تسریع نماید. در مقابل، شناسایی رژیم‌های مرطوب و موسمی فرصت‌هایی برای مدیریت پیش‌گیرانه منابع و حفاظت اکوسیستم ارائه می‌دهد.

از دیدگاه روش‌شناختی، رویکرد چند الگوریتمی اجماعی ارائه‌شده پایداری و اعتبار نتایج را در برابر سوگیری‌های الگوریتمی افزایش داد و چارچوبی قابل‌انتقال به سایر دریاها و حوضه‌های نیمه محصور فراهم کرد. کارهای آینده می‌توانند این چارچوب را با داده‌های با وضوح بالاتر، شاخص‌های بیوژئوشیمیایی ماهواره‌ای و مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی گسترش دهند تا جابه‌جایی‌های رژیم تحت سناریوهای گرمایش آینده ارزیابی شود.

در مجموع، این پژوهش درک جامعی از چگونگی شکل‌گیری ویژگی‌های حرارتی پهنه آبی خلیج فارس تحت تأثیر رژیم‌های اقلیمی نواحی

اطراف ارائه می‌دهد و پایه‌ای علمی برای استراتژی‌های سازگاری هدفمند، مدیریت تاب‌آور اقلیمی و حفاظت از یکی از حساس‌ترین اکوسیستم‌های دریایی جهان فراهم می‌آورد.

۷- قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از جناب آقای دکتر حسین قربانی و سرکار خانم دکتر محبوبه مولوی عربشاهی برای نظرات و پیشنهادهای سازنده‌شان که موجب ارتقای کیفی این پژوهش شد، ابراز می‌دارند. همچنین از دست‌اندرکاران سرویس تغییر اقلیم کوپرنیک (C3S) برای فراهم‌سازی دسترسی آزاد به داده‌های باز تحلیل ERA5 از طریق پایگاه داده اقلیمی (CDS) کمال تشکر را دارند. افزون بر این، از سازمان‌های NOAA و JAMSTEC به دلیل در دسترس قرار دادن داده‌های شاخص‌های Niño 3.4 که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، قدردانی می‌شود.

۸- منابع

- رنجبر، فیروز، ذاکری خطیر، هادی، خزایی، مهدی و بخشی، فریماه. (۱۴۰۳). تحلیل اثرات تغییر اقلیم جهانی بر شاخص‌های امنیت غذایی (با تأکید بر ایران). مدیریت بحران. ۱۳ (۴). ۱-۲۰.
- اسکندری، محمد، دارابی، مسعود، صالحی، محمدرضا و سهامی، حبیب‌الله. (۱۴۰۴). سنجش و پایش بحران خشک‌سالی با استفاده از داده‌کاوی مکانی با تأکید بر حوضه آبریز دریاچه ارومیه. مدیریت بحران. ۱۴ (۲). ۱۸-۱.
- دالوند، فاطمه، حسینی، سید ابوالفضل، طهماسبی، پیمان و بهمنی، امید. (۱۴۰۴). بررسی گستره سیلاب با اعمال روش آستانه‌گذاری خودکار اوتسو بر روی تصاویر سار (مطالعه موردی: سیلاب فروردین‌ماه ۱۴۰۳ استان سیستان و بلوچستان). مدیریت بحران، ۱۴ (۴)، ۱-۱۵.
- محمدی، محمد. (۱۴۰۴). اینترنت اشیا؛ ابزاری نوین در مقابله با مخاطرات اقلیمی. مدیریت بحران،

13. Hamzeh, M. A., Naderi Beni, A., Lahijani, H. A. K., Mehdiinia, A., Aghadadashi, V., & Koochaknejad, E. (2024). Reconstruction of the sedimentary environment of Nayband Bay during the last 1600 years: Implications for relative sea level and climate change in the northern Persian Gulf. *Marine Micropaleontology*, 186, 102321. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2023.102321>
14. Kelemen, F. D., Primo, C., Feldmann, H., & Ahrens, B. (2019). Added value of atmosphere-ocean coupling in a century-long regional climate simulation. *Atmosphere*, 10(9), 537. <https://doi.org/10.3390/atmos10090537>
15. Kumar, D., Bezdek, J. C., Palaniswami, M., Rajasegarar, S., Leckie, C., & Havens, T. C. (2016). A hybrid approach to clustering in big data. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 46(10), 2372-2385. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2015.2477416>
16. Liu, F., Liu, Z., Liu, X., et al. (2025). Scalable hybrid framework for real time and non real time task scheduling in fog computing using federated reinforcement learning and PSO GA. *Scientific Reports*, 15, 38356. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-22218-5>
17. Ma, S., Cheng, J., Li, J., Liu, Y., Wan, R., & Tian, Y. (2019). Interannual to decadal variability in the catches of small pelagic fishes from China Seas and its responses to climatic regime shifts. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 159, 112-129. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.10.005>
18. Mandal, T., Das, J., & Rahman, A. T. M. S. (2025). Understanding the teleconnections of ENSO and IOD with rainfall variation in India. *Environmental Modeling & Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10666-025-10065-7>
19. Momtazi, F., Maghsoudlou, A., & Saeedi, H. (2025). Uncovering the hidden amphipod biodiversity and its drivers in the Persian Gulf. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 220, 105463. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2025.105463>
20. Panahi, S., Kong, L.-W., Moradi, M., Zhai, Z.-M., Glaz, B., Haile, M., & Lai, Y.-C. (2024). Machine learning prediction of tipping in complex dynamical systems. *Physical Review Research*, 6(4), 043194. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.6.043194>
5. Ahmadi, M., Kamangar, M., Salimi, S., et al. (2022). A new approach in evaluation impacts of teleconnection indices on temperature and precipitation in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 150, 15-33. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04138-w>
6. Burt, J. A., Paparella, F., Al-Mansoori, N., et al. (2019). Causes and consequences of the 2017 coral bleaching event in the southern Persian/Arabian Gulf. *Coral Reefs*, 38, 567-589. <https://doi.org/10.1007/s00338-019-01767-y>
7. Camps-Valls, G., Fernández-Torres, M. Á., Cohrs, K. H., et al. (2025). Artificial intelligence for modeling and understanding extreme weather and climate events. *Nature Communications*, 16, 1919. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56573-8>
8. Chaudhry, M., Shafi, I., Mahnoor, M., Ramírez Vargas, D. L., Bautista Thompson, E., & Ashraf, I. (2023). A systematic literature review on identifying patterns using unsupervised clustering algorithms: A data mining perspective. *Symmetry*, 15(9), 1679. <https://doi.org/10.3390/sym15091679>
9. Chen, L., Han, B., Wang, X., Zhao, J., Yang, W., & Yang, Z. (2023). Machine learning methods in weather and climate applications: A survey. *Applied Sciences*, 13(21), 12019. <https://doi.org/10.3390/app132112019>
10. Chicco, D., Campagner, A., Spagnolo, A., Ciucci, D., & Jurman, G. (2025). The Silhouette coefficient and the Davies-Bouldin index are more informative than Dunn index, Calinski-Harabasz index, Shannon entropy, and Gap statistic for unsupervised clustering internal evaluation of two convex clusters. *PeerJ Computer Science*, 11, e3309. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.3309>
11. Doan, Q.-V., Amagasa, T., Pham, T.-H., Sato, T., Chen, F., & Kusaka, H. (2023). Structural k-means (S k-means) and clustering uncertainty evaluation framework (CUEF) for mining climate data. *Geoscientific Model Development*, 16, 2215-2236. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-2215-2023>
12. Fan, Y., et al. (2024). Understanding the interdecadal changes in the teleconnection pattern of the East Asian summer monsoon precipitation with concurrent ENSO. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2024GL111723>

21. Sun, R., Kang, X., Wang, Z., Zhang, H., & Yin, H. (2026). Wind-driven variability in phytoplankton dynamics in a semi-enclosed sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 329, 109667. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2025.109667>
22. Saidenberg, E., Murty, S. A., Huguen, K. A., & Gillikin, D. P. (2022, December). *Past variability of Red Sea hydrology and overturning circulation through reconstructions of temperature and salinity using coral proxies* [Conference presentation]. AGU Fall Meeting 2022, Chicago, IL, United States.
23. Sharifinia, M., Daliri, M., Kamrani, E., Mahmoudi, P., & Shakeri, M. (2019). Estuaries and coastal zones in the Northern Persian Gulf (Iran): Status, challenges, and management strategies. In *Coastal Zone Management* (pp. 269-304). Elsevier.
24. Walz, M. A., Befort, D. J., Kirchner-Bossi, N. O., Ulbrich, U., & Leckebusch, G. C. (2018). Modelling serial clustering and inter-annual variability of European winter windstorms based on large-scale drivers. *International Journal of Climatology*, 38(7), 3044-3057. <https://doi.org/10.1002/joc.5481>
25. Wernberg, T., Smale, D. A., Tuya, F., Thomsen, M. S., Langlois, T. J., de Bettignies, T., & Rousseaux, C. S. (2018). An extreme climatic event alters marine ecosystem structure in a global biodiversity hotspot. *Nature Climate Change*, 8(1), 78-84.
26. Yao, B., Teng, S., Lai, R., Xu, X., Yin, Y., Shi, C., & Liu, C. (2020). Can atmospheric reanalyses (CRA and ERA5) represent cloud spatiotemporal characteristics? *Atmospheric Research*, 244, 105091. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105091>
27. Yousif, M. Z. G., Yu, L., Hoyas, S., Vinuesa, R., & Lim, H. (2022). A deep-learning approach for reconstructing 3D turbulent flows from 2D observation data. *Scientific Reports*, *13*, Article 25282.