

Assessing Extreme Precipitation Vulnerability in Iranian Watersheds Using GPM-IMERG Satellite Data and Data-Driven Shannon Entropy Weighting

Abstract

Extreme precipitation events act as the primary catalysts for flash floods, profoundly escalating hydrologic risks across Iran's watersheds. This profound impact necessitates rigorous, targeted evaluation. The present study initially investigated the efficacy of GPM-IMERG satellite estimates (2001-2020) in capturing basin-scale spatial precipitation distributions. We then deployed Shannon entropy as a data-driven weighting framework to quantify the vulnerability of these basins to extreme precipitation. Dataset validation revealed a distinct spatial dichotomy. Across the Zagros slopes, GPM-IMERG products demonstrated robust correlation and high accuracy in replicating spatial precipitation structures, proving highly adept at monitoring extreme events. Conversely, systematic estimation errors plagued the data along the Caspian coastal strip and within arid inland basins. Analyzing a suite of extreme precipitation indices (Rx1day, R10mm, R20mm, and SDII) highlighted that western and southwestern mountainous catchment most notably Karkheh, Great Karun, and Jarahi-Zohreh concurrently endure peak intensity and frequency levels. The southern coastlines present a different dynamic altogether: abrupt surges in intensity indices occur alongside a relatively low frequency of occurrences. Ultimately, mapping vulnerability by applying Shannon entropy to the extreme indices matrix yielded clear territorial delineations. Low vulnerability zones encompass 46.5% of the country, while 30% falls into moderate categories and 23.5% faces high-risk conditions. A contiguous belt spanning the western Zagros foothills and southern shores concentrates 12.7% of Iran's area within the severe to extreme vulnerability classifications. By contrast, central and eastern basins exhibit the least spatial variability and lowest extreme magnitude, translating to the lowest-risk precipitation regime nationwide.

Keywords: Iran, Watershed vulnerability, Shannon entropy, Extreme precipitation, GPM-IMERG.

Extended Abstract

Evaluating the Vulnerability of Iranian Watersheds to Extreme Precipitation: An Application of Shannon Entropy to GPM-IMERG Data

Introduction

Anthropogenic climate warming has profoundly disrupted the Earth's climate system, driving unprecedented shifts across the global hydrological cycle. Perhaps the most striking manifestation of these disturbances is the escalating frequency, intensity, and duration of hydroclimatic extremes most notably, precipitation events. Classical paradigms long held that arid regions were destined for relentless desiccation. Yet, recent empirical observations contradict this assumption, revealing a sharp upward trajectory in daily precipitation extremes within these very environments. Such erratic climate behavior poses a severe threat to sustainable societal development. When these anomalous events strike, they often inflict irreversible damage upon ecological networks, public health frameworks, and critical economic infrastructure.

Encompassing a vast expanse of the Middle East's arid and semi-arid belt, Iranian watersheds harbor a hydrological that is exquisitely sensitive to climate perturbations. Driven by an accelerated water cycle and shifting rainfall patterns, these geographic zones now confront an escalating risk of catastrophic flooding. It is a fundamental tenet of hydro climatology that watersheds possess an inherent vulnerability to extreme, torrential downpours. However, systematically assessing this vulnerability across Iran is notoriously difficult. The country's vast territorial extent and formidable topographic complexity are further compounded by the absence of a dense, spatially continuous network of ground-based meteorological stations.

To navigate these structural uncertainties, the scientific community must pivot. Relying on subjective methodologies is no longer tenable; transitioning toward fully objective, data-driven frameworks has emerged as an absolute necessity. Motivated by this critical research gap, the present study seeks to elucidate the spatial patterns and magnitude of watershed vulnerability across Iran in response to extreme precipitation. We deployed the Shannon Entropy approach to operationalize this objective. By mathematically evaluating the internal dispersion and information content of the datasets, this technique eliminates subjective human judgment, thereby ensuring rigorous and entirely unbiased weighting. In this study, precipitation extremes were processed and modeled over a twenty-year (2001–2020) utilizing GPM-IMERG datasets. Ultimately, this approach yields a comprehensive, integrated spatial representation of watershed vulnerability, one that is firmly grounded in the actual physical behavior of regional climate systems.

Materials and Methods

In this study, a long-term two decades (2001–2020) was selected to analyze extreme precipitation events in Iranian watersheds, utilizing GPM-IMERG satellite data. The evaluation of satellite-derived datasets like GPM-IMERG critically depends on their consistency with a standardized ground-based monitoring network. The reference data employed comprises 128 synoptic meteorological stations distributed across Iran's catchment areas, ensuring comprehensive spatial coverage. The core aim of this research is to quantitatively and spatially assess the vulnerability of Iran's watersheds to extreme precipitation events, grounded within a

data-driven, multi-criteria framework. This approach encompasses three principal stages: (1) extraction and processing of precipitation extreme event indicators, (2) objective weighting of each indicator based on information theory, and (3) integration of these layers to generate a final vulnerability map. The spatial vulnerability analysis hinges predominantly on high-resolution precipitation data. Guided by recommendations from the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI), four key indices were selected. The first, Rx1day, measures the maximum daily precipitation within the period, reflecting the intensity of extreme precipitation events. The second, R10mm, counts the number of days with heavy precipitation (≥ 10 mm), while R20mm tallies days with very heavy precipitation (≥ 20 mm). Finally, the Simple Daily Intensity Index (SDII), calculated as the total precipitation on rainy days divided by the number of rainy days, indicates the average daily precipitation intensity during precipitation events.

Discussion

Between 2001-2020, the spatial distribution of annual precipitation across Iran exhibited a pronounced gradient, with values ranging dramatically from 58.9 to over 1100 mm. Such stark heterogeneity is primarily driven by the complex interplay of latitudinal positioning, orographic forcing, and proximity to moisture sources. The absolute precipitation maxima are heavily concentrated along the Caspian coastal belt. This humid zone encompasses the Talesh-Anzali Wetland, Haraz, and gharesoo basins, along with specific reaches of the Greater Sefidrud. Moving westward and into the southwest, a secondary moisture core emerges. Here, the Karkheh, Karun, and Lake Urmia basins consistently record annual totals between 400 and 650 mm. Within these western catchments specifically Urmia, Karkheh, and Karun satellite-derived GPM-IMERG estimates demonstrate robust alignment with ground-based observations. This statistical fidelity is evidenced by Willmott's index of agreement exceeding 0.8, and Kling-Gupta Efficiency (KGE) scores ranging from 0.66 to 0.92.

A defining hydrodynamic signature of Iran's western and southwestern margins is the compounding effect of frequent and highly intense extreme precipitation events. The epicenters of this spatial clustering are localized within the Karkheh, Karun, and Hendijan-Jarrahi watersheds. According to the GPM-IMERG dataset, these zones experience heavy (R10mm) and very heavy (R20mm) precipitation on 20 to 25 days and 8 to 12 days annually, respectively. Such elevated occurrence rates coincide with maxima in standard intensity metrics. For instance, maximum one-day precipitation (Rx1day) yields figures spanning 65 to 82.5mm while the Simple Daily Intensity Index (SDII) easily surpasses the 9 to 11.9 mm/day threshold. To rigorously assess catchment vulnerability to these hydro-climate extremes, Shannon entropy was applied to the GPM-IMERG data as an objective weighting operator. This approach yields a highly resolved delineation of regional risk profiles. Because Shannon entropy fundamentally roots its weight allocation in the spatial heterogeneity of extreme indices, it effectively models vulnerability as a continuously distributed spatial variable. Consequently, regions characterized by the steepest spatial gradients naturally receive the highest computational weights. Analytical outputs from this procedure indicate that low and moderate vulnerability classifications account for 46.5% and 30% of the national territory, respectively. Conversely, the most acute risk zones encompassing 23.5 % of Iran's total landmass are predominantly anchored along the western foothills and the southern coastal strips.

Conclusion

The results of this research resonate with the existing international literature across several distinct dimensions. When evaluating the fidelity of global precipitation datasets, the performance of GPM-IMERG within Iran strongly corroborates the findings of Herold et al. (2016) and Wang et al. (2021). Our observations confirm the acute sensitivity of precipitation intensity and duration metrics to the specific product utilized, its spatial resolution, and the localized physical dynamics of the passing weather systems. Shifting the focus to climate change impacts, we noted a marked intensification of single-day precipitation events across several of the country's more arid, southern basins. Such localized strengthening mirrors the broader conclusions drawn by Yao et al. (2020) and Breugem et al. (2020), who documented the escalation of extreme precipitation driven by global warming. Furthermore, an examination of the nexus between extreme precipitation and hydrological hazards reveals a striking spatial overlap between highly vulnerable zones and historical flood occurrences. This spatial coherence effectively replicates the paradigm introduced by Rodrigues et al. (2020) within the Iranian context. It underscores a crucial methodological takeaway: translating extreme climate indices into actionable risk metrics provides a formidable tool for engineering vulnerability reduction strategies at the basin scale. Ultimately, this analytical approach holds significant practical utility. When aligned with the framework that Keller et al. (2021) characterize as iterative and integrated climate risk management, our methodology can actively direct regional adaptation efforts. It establishes a robust foundation for advancing early warning systems, reassessing the design parameters of hydraulic infrastructure, and optimizing land-use planning across the nation's watersheds. By bridging the gap between theory and practice, the climatological insights derived from extreme event analysis can directly inform evidence-based policymaking, fostering both proactive hazard mitigation and the sustainable stewardship of water resources.

Keywords: Iran, Watershed vulnerability, Shannon entropy, Extreme precipitation, GPM-IMERG.

Author Contributions

Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Writing, Writing, review and editing: All authors have read and approved the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable requests from the authors

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی آسیب‌پذیری بارش‌های فرین در حوضه‌های آبخیز ایران با داده‌های ماهواره‌ای GPM-IMERG و وزن‌دهی داده‌محور آنروپی شانون

چکیده

بارش‌های فرین به‌عنوان محرک اصلی سیلاب‌های ناگهانی، ریسک هیدرولوژیک حوضه‌های آبخیز ایران را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند و نیازمند ارزیابی دقیق هستند. در این پژوهش ابتدا کارایی برآوردهای بارش ماهواره‌ای GPM-IMERG طی دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۰ در تخمین توزیع مکانی بارش در مقیاس حوضه‌ای بررسی و سپس با به‌کارگیری آنروپی شانون به‌عنوان یک چارچوب وزن‌دهی داده‌محور، آسیب‌پذیری حوضه‌ها در برابر بارش‌های فرین استخراج شد. درستی‌سنجی داده‌های بارش نشان داد که GPM-IMERG در دامنه‌های زاگرس همبستگی و کارایی بالایی در بازنمایی ساختار مکانی بارش دارد و برای پیش‌بینی فرین‌های بارشی بسیار کارآمد است. در مقابل، در نوار ساحلی خزر و حوضه‌های خشک با خطاهای سیستماتیک در برآورد بارش همراه است. در گام بعدی تحلیل شاخص‌های بارش فرین $Rx1day$ ، $R10mm$ و $R20mm$ و $SDII$ نشان داد که حوضه‌های کوهستانی غرب و جنوب‌غرب، به‌ویژه کرخه، کارون، نزرگ و جراحی-زهره، هم‌زمان بالاترین مقادیر فراوانی و شدت را تجربه می‌کنند؛ در حالی که در سواحل جنوبی، جهش ناگهانی در شاخص‌های شدت با فراوانی نسبتاً پایین رخداد همراه است. در نهایت، نتایج ارزیابی آسیب‌پذیری از طریق اعمال آنروپی شانون بر روی ماتریس شاخص‌های فرین نشان داد که ۴۶/۵٪ از مساحت کشور در طبقه آسیب‌پذیری کم، ۳۰٪ در طبقه متوسط و ۲۳/۵٪ در سطوح بالایی ریسک قرار دارد. کمربند پیوسته‌ای بر دامنه‌های غربی زاگرس و سواحل جنوبی، ۱۲/۱٪ از مساحت ایران را در کلاس‌های آسیب‌پذیری شدید و بسیار زیاد متمرکز کرده است، در حالی که حوضه‌های مرکزی و شرقی با کمترین تنوع فضایی و مقدار فرین‌ها، کم‌ریسک‌ترین رژیم بارشی فرین را نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: ایران، آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز، آنروپی شانون، بارش‌های فرین، GPM-IMERG.

مجله علمی پژوهشی

مقدمه

گرمایش جهانی و تغییر اقلیم ناشی از فعالیت‌های انسانی، سامانه اقلیمی و چرخه هیدرولوژیک کره زمین را با تغییرات بی‌سابقه‌ای مواجه ساخته است (IPCC, 2013). یکی از بارزترین پیامدهای این تغییرات، تشدید فراوانی، شدت و طول دوره رخدادهای فرین اقلیمی، به‌ویژه بارش‌های سیل‌آسا است (Trenberth et al., 2015). اگرچه در پارادایم کلاسیک تصور می‌شد که مناطق خشک به سمت خشکی فزاینده پیش می‌روند (Held & Soden, 2006)، اما مشاهدات اخیر نشان می‌دهند که بارش‌های فرین روزانه روند افزایشی چشمگیری یافته‌اند (Donat et al., 2019). این رخدادهای فرین می‌توانند توسعه پایدار جوامع را با تهدیدات جدی مواجه ساخته و خسارات جبران‌ناپذیری بر سیستم‌های اکولوژیک، بهداشت عمومی و زیرساخت‌های اقتصادی وارد آورند (Zhang et al., 2015). از این رو، درک دقیق ویژگی‌های مکانی و زمانی بارش‌های فرین برای مدیریت ریسک بلایا و پیشبرد استراتژی‌های سازگاری اقلیمی یک ضرورت انکارناپذیر است.

با وجود اهمیت حیاتی پایش بارش، برآورد دقیق این متغیر به دلیل ناپیوستگی و تغییرپذیری شدید آن در زمان و مکان، همواره با چالش‌های علمی همراه بوده است (Herold et al., 2016). شبکه‌های باران‌سنجی زمینی، علی‌رغم دقت بالا در اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای، به شدت تحت تأثیر خطاهای اجرایی، اثر باد و توزیع به‌شدت ناهمگون مکانی قرار دارند که دستیابی به رکوردهای پیوسته بارشی را در مقیاس‌های وسیع ناممکن می‌سازند (Zhang et al., 2020). در مقابل، ظهور فناوری‌های سنجش از دور و محصولات ماهواره‌ای، تحولی در پایش جهانی چرخه هیدرولوژیک ایجاد کرده است (Tapiador et al., 2012). برای غلبه بر این محدودیت‌ها، محصولات ترکیبی نظیر GPM-IMERG توسعه یافته‌اند که قابلیت بالایی در ثبت بارش‌های فرین با تفکیک‌پذیری بالای مکانی و زمانی ارائه می‌دهند (Tang et al., 2020).

حوضه‌های آبخیز ایران، به عنوان بخش وسیعی از کمربند خشک و نیمه‌خشک خاورمیانه، دارای ساختار هیدرولوژیکی به‌شدت حساسی در برابر تغییر اقلیم است. تسریع چرخه آب و تغییر در الگوهای بارش سبب شده است تا این پهنه‌های جغرافیایی با خطر فزاینده سیلاب‌های ویرانگر مواجه شوند. بر مبنای یک اصل کلیدی در هیدرواقلیم، حوضه‌های آبخیز به‌طور ذاتی نسبت به بارش‌های فرین و سیل‌آسا آسیب‌پذیرند. با توجه به وسعت، پیچیدگی‌های توپوگرافیک و فقدان شبکه متراکم و پیوسته ایستگاه‌های زمینی در ایران، ارزیابی سیستماتیک این آسیب‌پذیری امری حیاتی است.

در مطالعات پیشین ارزیابی آسیب‌پذیری و مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)، بهره‌گیری از رویکردهای ذهنی نظیر فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) بسیار رایج بوده است. دخالت دادن قضاوت‌های فردی، مفروضات کارشناسی و انتخاب‌های ذهنی در تعیین وزن شاخص‌ها، مدیریت ریسک اقلیمی را با عدم قطعیت قابل توجهی مواجه می‌سازد. این وابستگی به پیش‌فرض‌های ذهنی، نه تنها ارزیابی‌های گسترده‌ای در نتایج ایجاد می‌کند، بلکه در مناطق دارای کمبود داده می‌تواند به برآوردهای غیرواقعی و گمراه‌کننده از مقدار آسیب‌پذیری منجر شود (Zhu et al., 2019). از آنجا که استراتژی‌های کاهش خطرپذیری نیازمند تصمیم‌گیری‌های مستدل و قطعی است، تداوم استفاده از این روش‌ها یک مانع بزرگ در مسیر توسعه تاب‌آور ارزیابی می‌شود (UN Climate Change Secretariat, 2017).

برای غلبه بر این چالش و عبور از محدودیت‌های ناشی از عدم قطعیت‌های ساختاری، گذار از روش‌های ذهنی به سوی رویکردهای کاملاً داده‌محور و عینی یک ضرورت انکارناپذیر علمی است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف تحقیقاتی، به دنبال پاسخگویی به این سوال کلیدی است که الگو و مقدار آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز ایران نسبت به بارش‌های فرین چگونه است. به منظور نیل به این هدف، از رویکرد عینی آنتروپی شانون (Shannon Entropy) استفاده شده است. این روش

¹ Multiple Criteria Decision Making (MCDM)

² Analytic Hierarchy Process (AHP)

با ارزیابی پراکندگی و محتوای اطلاعاتی خود داده‌ها و بدون دخالت قضاوت‌های انسانی، امکان وزن‌دهی دقیق و بدون ارزیابی داده محور و سوگیری شخص محور را فراهم می‌آورد. در این تحقیق، فرین‌های بارشی طی یک دوره تاریخی بیست‌ساله (۲۰۲۰-۲۰۰۱) بر اساس داده‌های^۱ GPM-IMERG مورد پردازش و مدل‌سازی قرار گرفت تا تصویری یکپارچه و مبتنی بر رفتار واقعی سیستم‌های اقلیمی از آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز ایران ارائه شود.

ارزیابی آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز نسبت به بارش‌های فرین و رخداد‌های سیل‌آسا، نیازمند درک عمیقی از اقلیم و کارایی مجموعه داده‌های بارش دقیق است؛ با این حال، این حوزه تحقیقاتی همواره با عدم قطعیت‌هایی همراه بوده است. در همین راستا، Herold et al. (۲۰۱۷) در بررسی خود بر روی مناطق حاره‌ای و جنب‌حاره‌ای دریافتند که اگرچه فرین‌های بارشی با شدت پایین حساسیت کمی به نوع محصول ماهواره‌ای و تفکیک افقی آن دارند، اما برآورد فرین‌هایی با شدت بالا به شدت تحت تأثیر این عوامل است و این عدم قطعیت‌ها می‌تواند کارایی مدل‌سازی را در مقیاس حوضه به شدت محدود سازد. برای غلبه بر چالش‌های پایه و با هدف کاهش اثرات مخرب سیلاب‌ها، Breugem et al (2020) شناخت جنبه‌های یکپارچه هواشناختی و سازوکارهای شکل‌گیری طوفان که تحت تأثیر گرمایش جهانی دچار تغییر رفتار شده‌اند، به عنوان نخستین و ضروری‌ترین گام علمی معرفی شد. با تکیه بر این درک فیزیکی و بهره‌گیری از داده‌های TRMM، تحقیقات مختلفی همانند Rodrigues et al (2020) توانستند گام‌های مؤثری در کمی‌سازی آسیب‌پذیری مکانی بردارند بطوریکه آن‌ها با برازش مدل‌های توزیع پارتو تعمیم‌یافته (GPD)، نشان دادند که توزیع فضایی سطوح بازگشت بارش‌های فرین تطابق بسیار بالایی با مناطق درگیر بلایای طبیعی دارد. با این وجود، چالش آسیب‌پذیری تنها محدود به رخداد‌های گذشته و حال نیست؛ بطوریکه Yao et al (2020) با کاربست CMIP5 نشان دادند که حتی در مناطق بسیار خشک نیز شدت بارش‌های فرین رابطه‌ای تقریباً خطی با نرخ گرمایش جهانی پیدا کرده است که این امر خطر وقوع سیلاب‌های ناگهانی را به موازات کمبود منابع آب به شدت تشدید می‌کند. در سال‌های اخیر، با افزایش نیاز به دقت بالاتر در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیک، تلاش‌ها برای به‌کارگیری محصولات مختلف بارش توسعه یافت چنانکه Xin et al (2021) دریافتند مجموعه داده‌های بازتحلیل نظیر ERA5 در شبیه‌سازی الگوهای بارشی در مناطقی با سطح شهرنشینی بالا و توپوگرافی پیچیده دچار خطای سیستماتیک هستند و به‌طور مشابه، Wang et al (2021) با بررسی حوضه رودخانه یانگ‌تسه ثابت کردند که با افزایش شدت بارش، توانایی محصولات چندمنبعی (به‌ویژه GLDAS) در ثبت رخداد‌های فرین به شدت افت کرده و ناهمگونی‌های فضایی-فضلی را به نمایش می‌گذارند.

ارزیابی دقیق میزان آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز در برابر رخداد‌های بارش فرین، مستلزم تبیین الگوهای توزیع مکانی و زمانی این پدیده‌هاست. در مناطقی با توپوگرافی پیچیده مانند ایران، بهره‌گیری از محصولات ماهواره‌ای GPM-IMERG به دلیل پوشش گسترده و تفکیک‌پذیری بالا، راهکاری کارآمد جهت غلبه بر محدودیت‌های پایش زمینی و تحلیل دقیق مخاطرات هیدرولوژیکی محسوب می‌شود. با این وجود، مرور پژوهش‌های پیشین در کشور نشان می‌دهد که دقت GPM-IMERG به شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی و ناهمواری‌های محلی است. در حالی که مطالعاتی نظیر بی‌همتا و همکاران (۱۳۹۷) و اردوئی و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت خوبی در سنجش‌های نظیر RMSE و CSI برای داده‌های روزانه و نیم‌ساعته بارش GPM-IMERG در حوضه‌هایی مانند تهران و گرگانرود گزارش کرده‌اند، تحقیقات دیگر نشانگر چالش‌های جدی در مناطق کوهستانی است. برای مثال صادقی و همکاران (۱۳۹۹) نشان دادند که برآوردهای روزانه بارش GPM-IMERG در غرب ایران با عدم قطعیت بالایی همراه است. در همین راستا، مطالعات جدیدتر در کشور نیز ضمن تأیید برتری GPM-IMERG در بررسی رخداد‌های فرین نسبت به سایر محصولات بارشی، بر وابستگی شدید فضایی خطاها تأکید داشته‌اند. به‌طوری‌که خطای برآورد بارش با حرکت به سمت مناطق شرقی و نوار ساحلی خزر افزایش چشمگیری می‌یابد (رسول‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱). بنابراین، اگرچه مطالعات ارزشمند متعددی در سال‌های اخیر

¹ Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement (GPM-IMERG)

² Generalized Pareto distribution (GPD)

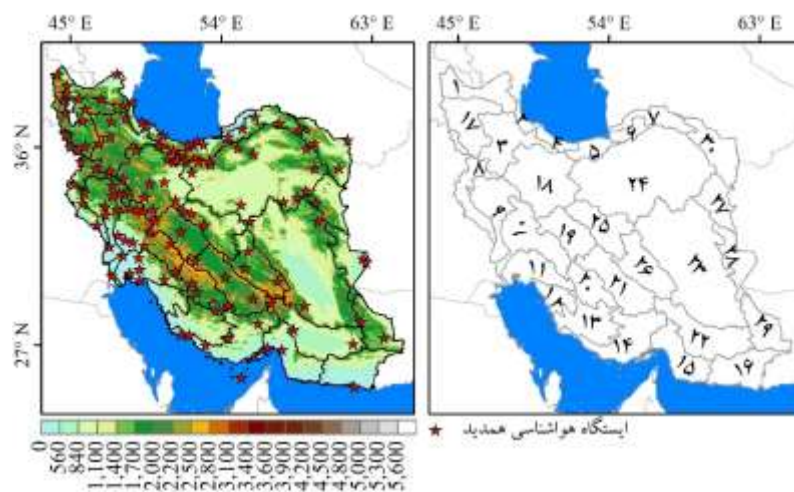
به ارزیابی این محصولات پرداخته‌اند، اما پاسخ الگوریتم‌های برآورد بارش GPM-IMERG در اقلیم‌های مختلف ایران نشان می‌دهد که درستی سنجی این داده‌ها یک پیش‌نیاز قطعی است؛ چرا که بدون کمی‌سازی دقیق خطاهای موجود، هرگونه مدلسازی و استنتاج نهایی در خصوص آسیب‌پذیری اقلیمی حوضه‌ها در برابر فرین‌های بارشی با عدم قطعیت زیادی همراه خواهد بود.

پژوهش‌های مختلفی در ایران انجام شده است که به طور مشخص آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز را بررسی کردند که می‌توان به تحقیق آروند و همکاران (۱۴۰۱) اشاره کرد؛ در این پژوهش با مدل تصمیم‌گیری بهترین-بدترین (BWM)، آسیب‌پذیری کالبدی و اجتماعی حوضه آبخیز تجن را در برابر سیلاب‌های مخرب بررسی و نشان داده شد که مؤلفه‌های اقتصادی با کسب بالاترین وزن، نقشی کلیدی در تشدید آسیب‌پذیری جوامع محلی ایفا می‌کنند. در همین راستا خان‌سالاری و همکاران (۱۴۰۲) رفتار فرین‌های بارشی را در استان مرکزی بررسی کرده و دریافتند که سهم قابل‌توجهی از بارش‌های سالانه به رخدادهای فراتر از آستانه بارش فرین اختصاص دارد. همگام با این یافته‌ها، بیاتانی و همکاران (۱۴۰۲) در بررسی فضایی حوضه آبخیز درودزن نشان دادند که اگرچه شاخص آسیب‌پذیری اقلیمی منطقه در آستانه برگشت‌پذیری قرار دارد، اما با شدت یافتن تغییر اقلیم نیازمند اتخاذ تدابیر پیشگیرانه است. در نهایت، فرجام و همکاران (۱۴۰۴) با استفاده از چارچوب تلفیقی DPSIR-PLS در حوضه کارون بزرگ اثبات کردند که ضعف در پاسخ‌های نهادی و حکمرانی آب، اثرات مخرب محرک‌های اقلیمی و انسانی را به شدت تشدید کرده و چرخه‌ای پایدار از آسیب‌پذیری را در برابر مخاطرات محیطی شکل می‌دهد. مرور منابع نشان می‌دهد که ارزیابی آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز نسبت به بارش‌های فرین، از تحلیل‌های صرفاً مکان‌محور و شدت‌سنجی رخدادهای، به سوی رهیافت‌های جامع مبتنی بر حکمرانی تاب‌آوری تغییر کرده است. در حالی که پژوهش‌های گذشته عمدتاً بر شناسایی کانون‌های خطر و بررسی رفتار فیزیکی پدیده‌ها متمرکز بوده‌اند، مطالعات اخیر اثبات کرده‌اند که چالش اصلی تنها در ماهیت مخرب بارش‌های سیل‌آسا و بررسی صرف آن‌ها به شکل منفرد خلاصه نمی‌شود. بر این اساس، پژوهش حاضر، با بررسی دقیق آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز ایران در برابر فرین‌های بارشی، مدلی یکپارچه برای ارتقای ظرفیت برگشت‌پذیری حوضه‌های آبخیز ارائه خواهد داد.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

قلمرو این پژوهش، کشور ایران است که در غرب آسیا و بر روی کمربند خشک و نیمه‌خشک نیمکره شمالی قرار گرفته است. از منظر اقلیمی، ایران طیفی کاملاً متضاد از رژیم‌های رطوبتی را در خود جای داده است؛ به نحوی که کرانه‌های دریای خزر شرایط بسیار مرطوب را تجربه می‌کنند، درحالی‌که دشت‌های مرکزی تحت حاکمیت اقلیم خشک قرار دارند. به‌منظور انجام تحلیل‌های هیدرولوژیک، پهنه کشور به ۳۰ حوضه آبخیز اصلی (حوضه‌های درجه ۲) تفکیک شده است (مظاهری، ۱۴۰۲) که در این پژوهش به‌عنوان واحدهای تحلیلی مستقل در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۱-الف). این حوضه‌ها از منظر مساحت، رژیم‌های هیدرولوژیک، کاربری اراضی و پراکنش جمعیتی دارای تفاوت‌های ماهوی هستند؛ ویژگی که امکان ارزیابی مقایسه‌ای و جامع آسیب‌پذیری آن‌ها را در برابر بارش‌های سیل‌آسا و فرین فراهم می‌سازد.



شماره	نام حوضه	شماره	نام حوضه	شماره	نام حوضه
۱	ارس	۱۱	هندیجان - جراحی	۲۱	ابر قو - سیرجان
۲	تالش - تالاب انزلی	۱۲	حله	۲۲	هامون جازموریان
۳	سفید رود بزرگ	۱۳	مند	۲۳	کویز لوت
۴	رودخانه‌های بین سفید رود و هراز	۱۴	کل - مهران	۲۴	کویز مرکزی
۵	هراز و قره‌سو	۱۵	بندرعباس - مدیج	۲۵	کویز سیاه کوه
۶	قره سو و گرگانرود	۱۶	بلوچستان جنوبی	۲۶	کویز درانجیر
۷	اترک	۱۷	دریاچه ارومیه	۲۷	ننکزار خواف
۸	مرزی غرب	۱۸	دریاچه نمک	۲۸	هامون هیرمند
۹	کرخه	۱۹	گاوخونی	۲۹	هامون مشکیل
۱۰	کارون بزرگ	۲۰	طشک - بختگان و مهارلو	۳۰	قره قوم

(ب)

(الف)

شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه. الف) موقعیت ۳۰ حوضه آبخیز مورد بررسی در ایران و ب) مدل رقومی ارتفاعی و پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی همدید

داده‌های مورد استفاده

مشخصات فنی و پیگر بندی GPM-IMERG

برآورد دقیق بارش در مقیاس سیاره‌ای، مستلزم هم‌افزایی رکوردهای تاریخی و مشاهدات سنجنش از دور است. مجموعه داده ترکیبی IMERG^۱ با ایجاد یک رکورد پیوسته زمانی، امکان تحلیل روند بارش دو دهه اخیر را فراهم می‌آورد. پیوند ناموریت^۲ TRMM (محدوده زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۵) با مشاهدات مستمر ماهواره GPM (۲۰۱۴ تاکنون)، بستر محاسباتی قدرتمندی برای مدل‌سازی‌های اقلیمی و تحلیل رخدادهای فرین شکل داده است. پروژه مشترک ناسا (NASA)^۳ و آژانس هوافضای ژاپن (JAXA)^۴ از ۲۰۱۴، محصولی ترکیبی با تفکیک افقی ۰/۱ درجه قوسی و گام زمانی ۳۰ دقیقه‌ای تولید می‌کند. ساختار GPM مجهز به دو سنجنده کلیدی است. تصویربردار مایکروویو (GMI)^۵ با بهره‌گیری از ۱۳ کانال فرکانسی متمایز در طیف ۱۰ تا ۱۸۳ گیگاهرتز، ابعاد، شدت و نوع رخدادهای بارشی را پایش می‌کند. در مقابل رادار بارش دوفرکانسه (DPR)^۶ شامل باندهای Ku (۱۳/۶ گیگاهرتز) و Ka

^۱ Integrated Multi-satellitE Retrievals (IMERG)

^۲ Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

^۳ National Aeronautics and Space Administration (NASA)

^۴ Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

^۵ GPM Microwave Imager (GMI)

^۶ Dual-frequency Precipitation Radar (DPR)

(۳۵/۵ گیگاهرتز)، ساختار درونی سیستم‌های طوفانی را در درون و زیر توده‌های ابری پایش می‌کند (Hou et al., 2014). کارایی برآوردهای ماهواره‌ای متکی بر واسنجی با داده‌های مشاهداتی سطح زمین است. ساختار محاسباتی این پژوهش بر پایه خروجی نهایی محصول (IMERG Final run) نسخه ۷ استوار است که ماهیت یک الگوریتم چندماهواره‌ای سطح ۳ را دارد. این روش، برآوردهای ناپیوسته سنجنده‌های میکروویو (MW) ماهواره را با مشاهدات فرسرخ (IR) ماهواره‌های زمین‌آهنگ ادغام می‌کند. داده‌های مشاهداتی با داده‌گذاری ایستگاه‌های دیده‌بانی سطح زمین از طریق مجموعه داده بارش ماهانه مرکز اقلیم‌شناسی بارش جهانی (GPCP) تأمین می‌شود (Huffman et al., 2015). مجموعه داده GPCP به سیستم ارتباطات جهانی (GTS) متکی است که از داده‌های حدود ۷۰۰۰ ایستگاه هواشناسی در سطح جهانی تولید می‌شود. داده‌گذاری این داده‌های ایستگاهی با الگوریتم IMERG، خطاهای سیستماتیک برآورد بارش را در مناطق فاقد داده‌های زمینی، از جمله اقیانوس‌ها و حوضه‌های آبخیز دورافتاده، تعدیل می‌نماید. در این تحقیق یک دوره آماری بلندمدت ۲۰ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۰) برای بررسی فرین‌های بارشی حوضه‌های آبخیز ایران انتخاب شد.

داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید

در مدل‌سازی و ارزیابی آسیب‌پذیری، بهره‌گیری از داده‌های بارش ماهواره‌ای نظیر GPM-IMERG مستلزم درک عدم قطعیت‌های مکانی و زمانی این محصولات است. با توجه به یافته‌های مطالعات پیشین در زمینه ارزیابی محصولات ماهواره‌ای در ایران (بی‌همتا و همکاران، ۱۳۹۷؛ اردونی و همکاران، ۱۳۹۹؛ صادقی و همکاران، ۱۳۹۹؛ رسول‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱)، درستی سنجی این داده‌ها در پژوهش حاضر نه به عنوان یک هدف مستقل، بلکه به عنوان یک پیش‌نیاز روش‌شناختی ضروری جهت بررسی خطاهای سیستماتیک و افزایش قطعیت مدل‌سازی نهایی آسیب‌پذیری انجام شده است. از آنجا که دقت الگوریتم‌های بارش در GPM-IMERG وابستگی معناداری به پیچیدگی‌های توپوگرافیک و رژیم‌های اقلیمی محلی دارد، درستی سنجی این داده‌ها بر پایه داده‌های مشاهداتی ایستگاهی متشکل از ۱۲۸ ایستگاه هواشناسی همدید انجام شد. این شبکه ایستگاهی با پوشش یک گرادیان ارتفاعی بسیار گسترده، از پهنه‌های پست ساحلی نظیر ایستگاه بندرانزلی با ارتفاع ۲۳/۶- متر تا مناطق مرتفع کوهستانی همچون ایستگاه آبدلی با ارتفاع ۲۴۶۴/۲ متر، امکان بررسی دقیق برآورد بارش‌های فرین را در اقلیم‌های ناهمگن فراهم می‌آورد.

روش تحقیق

درستی سنجی مجموعه داده GPM-IMERG

شاخص توافق (d) یک سنج استاندارد بدون بعد برای ارزیابی خطای پیش‌بینی مدل است که توسط Willmott (1981) توسعه یافت. دامنه تغییرات این شاخص بین صفر تا یک متغیر است؛ مقدار ۱ تطابق کامل و مقدار صفر فقدان هرگونه توافق بین داده‌های GPM-IMERG و ایستگاهی را نشان می‌دهد. سنج d بر این شاخص به صورت زیر است.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (1)$$

در این رابطه، N تعداد داده‌ها، O_i و S_i به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و \bar{O} میانگین مشاهدات است. این سنج قابلیت بالایی در تشخیص تفاوت‌های افزایشی و نسبی در میانگین‌ها و واریانس‌ها دارد.

¹ Microwave (MW)

² Infrared radiation (IR)

³ Global Precipitation Climatology Centre (GPCP)

⁴ Global Telecommunication System (GTS)

سنجه KGE نسخه تفكيك شده و دقيق تر كارايي نش-ساتكليف (NSE) است تا نشان دهد خطاي مدل دقيقاً از كجا نشأت مي گيرد و تحليل اهميت نسبي سنجه هاي سه گانه همبستگي، اريبي و تغييرپذيري را تسهيل مي كند (Gupta et al., 2009). دامنه اين سنجه از $-\infty$ تا ۱ نوسان دارد. مقادير KGE بزرگتر از -0.41 بيانگر آن است كه مدل در پيش بيني، از يك معيار پايه (يعني استفاده از ميانگين بلندمدت براي تمام روزها) بهتر عمل مي كند (Knoben et al., 2019). الگوريتم اصلي محاسبه KGE بر پايه فاصله اقليدسي (ED) به شكل زير است.

$$KGE = 1 - ED \quad (2)$$

$$ED = \sqrt{(s_1 \times (r - 1))^2 + (s_2 \times (vr - 1))^2 + (s_3 \times (\beta - 1))^2} \quad (3)$$

مؤلفه هاي اين رابطه عبارتند از r كه ضريب همبستگي گشتاور-حاصل ضرب پيرسون است. مؤلفه β نسبت ميانگين مقادير شبیه سازی شده به مشاهدات ($\beta = \mu_s / \mu_o$) و vr نسبت تغييرپذيري است. بسته به روش انتخابي، vr به سه شكل روش ۲۰۰۹، روش ۲۰۱۲ و روش ۲۰۲۱ محاسبه مي شود. در اين تحقيق از روش ۲۰۲۱ استفاده شد. در روش ۲۰۲۱ استفاده از آلفا براي تغييرپذيري است، در حالي كه اريبي به صورت تفاوت ميانگينها تقسيم بر انحراف معيار مشاهدات تعريف مي شود تا از مقادير بي هنجاري در زمان نزديك بودن ميانگين به صفر جلوگیری شود (Tang et al., 2021).

ارزيابي آسيب پذيري حوضه هاي آبخيز ايران نسبت به بارش هاي فرين

پژوهش حاضر با هدف ارزيابي كمی و مكاني آسيب پذيري حوضه هاي آبخيز ايران در برابر بارش هاي فرين، بر يك چارچوب روش شناختي داده محور و چندمعياره استوار است. اين فرآيند شامل سه گام اصلي است: ۱) استخراج و پردازش شاخص هاي فرين بارش، ۲) وزن دهی عینی به هر شاخص بر پایه نظريه اطلاعات و ۳) تلفيق لايه ها به منظور توليد نقشه نهايي آسيب پذيري.

استخراج و پردازش شاخص هاي فرين بارش

پايه ي تحليل آسيب پذيري مكاني در اين پژوهش، بر داده هاي بارش با تفكيك افقي بالا استوار است. بر مبنای توصیه هاي تيم تخصصی كشف و شاخص سازی تغيير اقليم (ETCCDI)، چهار شاخص كليدی بيشينه بارش يك روزه (Rx1day) كه بيانگر بيشينه بارش ثبت شده در يك شبانه روز طی يك دوره مشخص كه معرف شدت رخدادهاي فرين است؛ تعداد روزهاي همراه با بارش سنگين (R10mm) و خيلي سنگين (R20mm) كه شمار روزهايي كه مجموع بارش روزانه آنها برابر يا بيشتر از ۱۰ و ۲۰ ميلي متر است و شاخص شدت بارش روزانه (SDII) كه حاصل تقسيم مجموع بارش در روزهاي باراني بر تعداد روزهاي باراني كه متوسط شدت بارش روزانه را نشان مي دهد (Zhang et al., 2011) استفاده شده است.

وزن دهی عینی شاخص ها با بهره گیری از آنتروپی شانون

روش هاي تصميم گيري چندمعياره (MCDM) مانند فرآيند تحليل سلسله مراتبي (AHP)، با وجود توانمندی بالا در استفاده از دانش كارشناسي، مي توانند با عدم قطعيت و سوگيري هاي ذهني همراه باشند. براي کاهش اين اثرات، مي توان از رويكردهاي داده محور نظير آنتروپی شانون بهره برد كه در نظريه اطلاعات، معياري براي سنجش محتوای اطلاعاتی داده ها است (Shannon, 1948). اگرچه روش آنتروپی به دليل نادیده گرفتن اهميت كیفی و ماهوی معيارها از دیدگاه خبرگان دارای محدوديت است، اما در اين تحقيق به دليل نياز به ارزيابي كاملاً عینی و مبتنی بر پراكندگی داده هاي موجود، به عنوان روشی كارآمد مورد استفاده قرار گرفته است. در چارچوب تحليل فضايی، هرچه مقادير يك شاخص در گستره ي منطقه مورد مطالعه از پراكندگی و ناهمگونی بيشتری

¹ Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)

² Simple Daily Intensity Index (SDII)

برخوردار باشد، آن شاخص نشان دهنده اطلاعات متمایزتری بوده و در فرآیند ارزیابی نهایی، وزن تأثیرگذارتری به خود اختصاص می‌دهد. فرآیند استخراج وزن‌ها برای ماتریس داده‌های فضایی، که شامل m شبکه معتبر و n شاخص بارش فرین است. در گام نخست مقادیر هر شاخص ابتدا بر اساس سهم هر نقطه شبکه از مجموع کل مقادیر آن شاخص در پهنه مطالعاتی، استانداردسازی شد تا ماتریس احتمال مکانی (P_{ij}) تشکیل شود (رابطه ۴).

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (4)$$

که در آن x_{ij} مقدار شاخص j در نقطه شبکه i و m تعداد کل نقطه شبکه‌های معتبر (۱۵۵۶۰ نقطه شبکه) در نقشه است. در گام دوم مقدار آنتروپی (E_j) برای هر شاخص فرین بارش به صورت رابطه (۵) محاسبه شد.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (5)$$

در این رابطه، k یک ثابت نرمال‌سازی معادل $k = \frac{1}{\ln(m)}$ است که تضمین می‌کند مقدار E_j همواره در بازه $[0, 1]$ قرار گیرد. در گام سوم، درجه انحراف (d_j)، که بیانگر مقدار تضاد اطلاعاتی نهفته در هر شاخص است، از طریق رابطه $d_j = 1 - E_j$ به دست آمد. مقادیر E_j نزدیک به ۱ نشان‌دهنده توزیع فضایی همگن و در نتیجه، اهمیت اطلاعاتی کمتر است (Shannon, 1948). در نهایت، وزن عینی (W_j) هر شاخص از طریق نرمال‌سازی درجه انحراف آن محاسبه شد (رابطه ۶).

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (6)$$

که در این پژوهش با توجه به چهار شاخص منتخب، $n = 4$ است و مجموع وزن‌های نهایی نیز الزاماً برابر با یک خواهد بود ($\sum_{j=1}^n W_j = 1$). شاخص‌های منتخب دارای واحدهای متفاوتی هستند (مانند میلی‌متر برای Rx1day در مقابل تعداد روز برای R10mm و R20mm). این ناهمگونی، تلفیق مستقیم آن‌ها را غیرممکن می‌کند. به منظور همگن‌سازی و حذف اثر واحدها، تمامی لایه‌های اطلاعاتی میانگین با استفاده از روش مقیاس‌بندی کمینه-بیشینه به یک بازه بی‌بعد $[0, 1]$ نرمال‌سازی شدند (رابطه ۷).

$$N_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (7)$$

در این رابطه، N_{ij} مقدار نرمال‌شده‌ی شاخص j در شبکه‌ی i است و $\max(x_j)$ و $\min(x_j)$ به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار مکانی آن شاخص در کل نقطه شبکه‌ها می‌باشند. در گام نهایی، نقشه جامع آسیب‌پذیری (V_i) از طریق ترکیب خطی وزن‌دار (Weighted Linear Combination) (Malczewski, 2000) لایه‌های نرمال‌شده و وزن‌های عینی استخراج‌شده از آنتروپی، برای هر نقطه شبکه محاسبه شد (رابطه ۸). این مدل، سهم هر شاخص را بر اساس اهمیت اطلاعاتی آن در تعیین سطح آسیب‌پذیری هر منطقه لحاظ می‌کند.

$$V_i = \sum_{j=1}^n W_j \times N_{ij} \quad (8)$$

مقدار نهایی V_i در هر نقطه شبکه، شاخصی از سطح آسیب‌پذیری آن نقطه شبکه نسبت به مجموعه‌ای از فرین‌های بارشی است.

نتایج و بحث

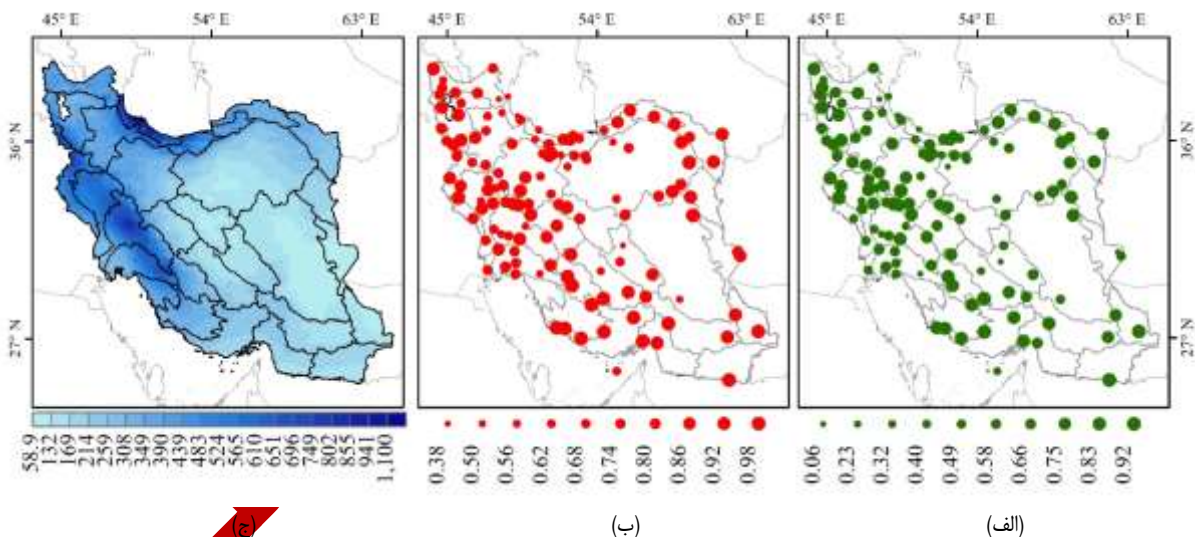
ارزیابی کارایی برآوردهای ماهواره‌ای GPM-IMERG در شبیه‌سازی توزیع مکانی بارش ایران

توزیع مکانی بارش سالانه در ایران طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ تابع یک گرادیان فضایی شدید با نوسان مقادیر از ۵۸/۹ تا بیش از ۱۱۰۰ میلی‌متر است (شکل ۲-ج). این ساختار ناهمگن مستقیماً توسط برهمکنش عرض جغرافیایی، واداشت کوهساری و دسترسی به منابع رطوبتی کنترل می‌شود. بی‌شینه مطلق بارش کشور در امتداد نوار ساحلی خزر، شامل حوضه‌های تالش-تالاب انزلی، هراز

و قره‌سو و بخش‌هایی از سفیدرود بزرگ تمرکز یافته است. هسته ثانویه بارش در غرب و جنوب غرب، متمرکز بر حوضه‌های کرخه، کارون بزرگ و دریاچه ارومیه، مقادیر ۴۰۰ تا ۶۵۰ میلی‌متری را ثبت کرده است. اثر سایه بارش زاگرس و البرز، کمینه‌های بارشی ۵۸ تا حدود ۱۵۰ میلی‌متری را در حوضه‌های کویر مرکزی، لوت و هامون هیرمند نشان داده است (شکل ۲-ج).

تطابق بالایی بین داده‌های مشاهداتی و برآوردهای ماهواره‌ای GPM-IMERG در حوضه‌های ارومیه، کرخه و کارون با سنجه توافق ویلموت بزرگتر از ۰/۸ (شکل ۲-ب) و کارایی کلینگ-گوپتا (بین ۰/۶۶ تا ۰/۹۲) (شکل ۲-الف) وجود دارد. سنجنده‌های مایکروویو غیرفعال (PMW) و مادون قرمز ماهواره GPM در شناسایی ابرهای ضخیم و دارای فاز یخ کارایی بسیار دقیقی دارند. مقادیر بالای سنجه KGE اثبات می‌کند که محصول GPM-IMERG روند تغییرات، مقدار کل و واریانس بارش را در دامنه‌های غربی زاگرس به درستی شبیه‌سازی می‌کند. قابلیت اتکای این داده‌ها برای مدل‌سازی هیدرولوژیک سیلاب‌ها و استخراج مقادیر بیشینه بارش یک‌روزه ($Rx1day$) و شاخص شدت بارش روزانه ($SDII$) در این حوضه‌ها در بالاترین سطح قرار دارد.

کارایی الگوریتم‌های ماهواره‌ای بارش GPM-IMERG در نوار ساحلی خزر و مناطق خشک مرکزی با افت قابل توجهی مواجه است. بررسی شاخص‌های درستی‌سنجی در برابر بارش‌ترین حوضه‌های کشور نشان می‌دهد که مقادیر ضریب توافق بین ۰/۳۸ تا ۰/۶ (شکل ۲-ب) و سنجه KGE بین ۰/۰۶ تا ۰/۳۲ (شکل ۲-الف) ثبت شده است. در حوضه‌های بیابانی شرق و مرکز نظیر لوت، کویر مرکزی و جازموریان نیز کاهش کارایی برآوردهای بارش نسبت به داده‌های مشاهداتی دیده می‌شود؛ با این وجود، توزیع مکانی سنجه‌های ارزیابی در نواحی مرکزی ناهمگنی بالایی دارد، به طوری که ایستگاه‌هایی با توافق بالا در مجاورت ایستگاه‌هایی با توافق پایین قرار گرفته‌اند.



شکل ۲. توزیع مکانی میانگین بارش سالانه ایران (۲۰۲۰-۲۰۰۱) و ارزیابی فضایی کارایی محصول ماهواره‌ای GPM-IMERG. الف) سنجه کارایی کلینگ-گوپتا (KGE) برای ۱۲۸ ایستگاه هواشناسی همدید در برابر داده‌های GPM-IMERG، ب) شاخص‌های توافق ویلموت، ج) میانگین سالانه بارش (واحد: میلی‌متر)

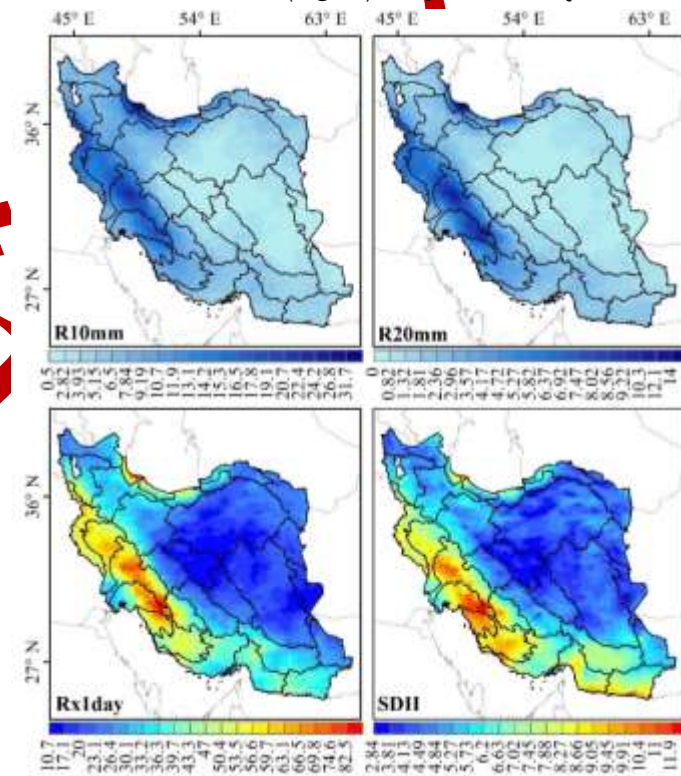
اقلیم‌شناسی فرین‌های بارشی فراوانی و شدت در حوضه‌های آبخیز ایران با داده‌های GPM-IMERG

هم‌افزایی فراوانی و شدت بارش‌های فرین، الگوی هیدرودینامیکی غالب در نوار غربی و جنوب غربی ایران است. حوضه‌های کرخه، کارون بزرگ و هندیجان-جراحی هسته اصلی این تمرکز فضایی را تشکیل می‌دهند. داده‌های GPM-IMERG نشان می‌دهد که فراوانی روزهای همراه با بارش سنگین ($R10mm$) و بسیار سنگین ($R20mm$) در این پهنه به ترتیب به ۲۰ تا ۲۵ روز و ۸ تا ۱۲ روز در مقیاس سالانه می‌رسد. این فراوانی بالا با بیشینه کشوری در شاخص‌های شدت همراه شده است. به طوری که بیشینه بارش یک‌روزه ($Rx1day$) ارقامی بین ۶۵ تا ۸۲/۵ میلی‌متر را ثبت کرده و شاخص شدت بارش ($SDII$) از ۹ تا ۱۱/۹ میلی‌متر بر روز

فراتر می‌رود (شکل ۳). واداشت کوهساری ناشی از برخورد سامانه‌های چرخندی مدیترانه‌ای و سودانی با سد توپوگرافیک زاگرس، عامل کلیدی این رفتار است. تغذیه رطوبتی مداوم توسط رودخانه‌های جوی بستر ترمودینامیکی لازم برای شکل‌گیری سلول‌های همرفتی عمیق درون توده‌های ابر پوششی را فراهم می‌آورد. این سازوکار ترکیبی، ظرفیت تولید رواناب‌های ویرانگر و سیلاب‌های ناگهانی را در این حوضه‌ها به شدت افزایش می‌دهد.

دینامیک متفاوت بارش در نوار ساحلی دریای خزر، یک رژیم بارشی مداوم اما با شدت کنترل‌شده را ایجاد می‌کند. حوضه‌های تالش-تالاب انزلی، سفیدرود بزرگ و هراز-قره‌سو بالاترین تداوم رخدادهای $R10mm$ و $R20mm$ را در سطح کشور تجربه می‌کنند. ارزیابی مقادیر $SDII$ و $Rx1day$ در این پهنه نشان‌دهنده قرارگیری در محدوده میانی توزیع فضایی شدت بارش است که تضاد آشکاری با مقادیر ثبت‌شده در زاگرس دارد (شکل ۳). شارش رطوبت روی سطح آب‌های گرم خزر و همگرایی متعاقب آن در رشته کوه البرز، صرفاً به شکل‌گیری ابرهای پوششی با پایه پایین می‌انجامد. لذا با وجود فراوانی بالای روزهای بارانی، بیشینه بارش روزانه به ندرت به مقادیر بیشینه می‌رسد.

غلبه شرایط خشک و نیمه‌خشک در حوضه‌های جنوبی، رفتار متفاوتی از فرین‌های بارشی را بر پایه ناپایداری گرمایی شدید (Queralt et al., 2007) ایجاد می‌کند. حوضه‌های کل-مهران، بندرعباس-سدیج و بلوچستان جنوبی فراوانی بسیار پایینی از رخدادهای بارش سنگین را ثبت کرده‌اند، به طوری که شاخص‌های $R10mm$ و $R20mm$ در این حوضه‌ها غالباً کمتر از ۵ روز در سال است. یک جهش ناگهانی در مقادیر $Rx1day$ و $SDII$ در همین نواحی مشاهده می‌شود که بیانگر رخداد بارش‌های فرین اما با شدت بسیار زیاد است. میانگین بالای شدت در روزهای بارانی، ریسک رخداد سیلاب‌های برق‌آسا را در این مناطق با دوره بازگشت طولانی اما شدت مخرب، به بالاترین سطح ممکن ارتقا می‌دهد. ظرفیت تولید بارش‌های فرین در پهنه‌های داخلی و شرقی کشور حداقل ممکن است. حوضه‌های کویر مرکزی، کویر لوت، هامون، جازموریان و هامون هیرمند، کمترین مقادیر مطلق را در هر چهار شاخص $SDII$ و $R20mm$, $R10mm$, $Rx1day$ ثبت کرده‌اند (شکل ۳).



پایانه

شکل ۳. توزیع مکانی بیشینه بارش یک‌روزه ($Rx1day$) (واحد: میلی‌متر)، تعداد روزهای همراه با بارش سنگین ($R10mm$) (واحد: روز)، و بسیار سنگین ($R20mm$) (واحد: روز) و شاخص شدت بارش روزانه ($SDII$) (واحد: میلی‌متر/روز) یا برآوردهای ماهواره‌ای GPM-IMERG.

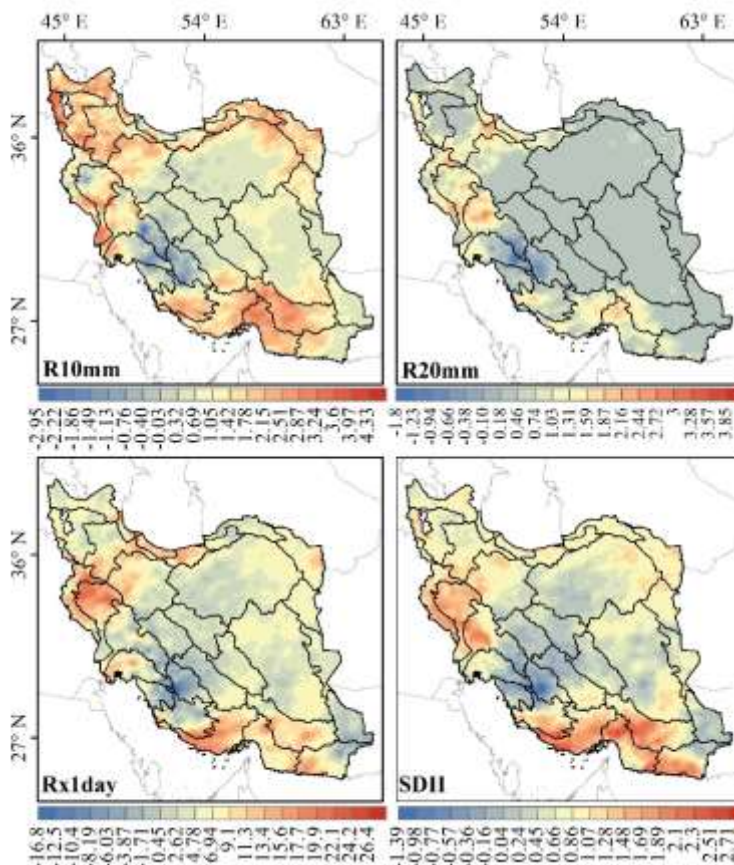
تحلیل روند فرین‌های بارشی فراوانی و شدت در حوضه‌های آبخیز ایران

تحلیل توامان روند شاخص‌های فراوانی و شدت بارش نشان‌دهنده تغییرات ساختاری و ناهمگن در رژیم هیدرولوژیک حوضه‌های آبخیز ایران است. حوضه‌های غرب و جنوب‌غربی شامل حوضه‌های کرخه، کارون و جراحی-زهره، یک روند سیستماتیک کاهشی را در تمامی فرین‌های بارشی نشان دادند. روند کاهشی همگام شاخص‌های فراوانی ($R10mm$ و $R20mm$) با کاهش شدید شاخص‌های شدت، منجر به ثبت روند کاهشی قابل توجه در حداکثر بارش یک‌روزه به مقدار 16 - میلی‌متر/دهه شده است (شکل ۴). این روند کاهشی، نمایی از یک تغییر مقیاس کلان در سیستم‌های گردش جوی است. تطبیق فضایی نقشه‌های روند بارش‌های فرین (شکل ۴) با نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز (شکل ۵)، پاسخی روشن به پرسش اصلی تحقیق ارائه می‌دهد؛ به طوری که مناطقی که شدیدترین روند کاهشی را در فرین‌های بارشی تجربه کرده‌اند (حوضه‌های غرب و جنوب‌غربی)، دقیقاً منطبق بر پهنه‌هایی با آسیب‌پذیری بسیار زیاد و آسیب‌پذیری شدید هستند. این تقارن نشان می‌دهد که کاهش سیستماتیک ورودی‌های جوی در این حوضه‌های استراتژیک، ظرفیت تاب‌آوری آن‌ها را به شدت کاهش داده است.

نوار ساحلی جنوب و جنوب‌شرق شامل حوضه‌های کل-مهران-بندرعباس-سدیج و بلوچستان جنوبی، در تضاد با حوضه‌های زاگرس، تشدید ترمودینامیکی را تجربه می‌کنند. بطوریکه افزایش در متغیرهای شدت بارش به شکل معناداری از شاخص‌های فراوانی پیشی گرفته است. در این حوضه‌ها بیشینه بارش یک‌روزه افزایش $4/4$ میلی‌متری و شاخص شدت بارش روزانه $2/712$ میلی‌متر/روز/دهه افزایش داشته است (شکل ۴). این الگوی نامتقارن، پاسخی مستقیم به رابطه کلازیوس-کلاپیرون است.

توزیع آماری رخدادهای بارش در حوضه‌های سواحل جنوبی دریای خزر و شمال‌غرب شامل ارس، ارومیه، تالش، سفیدرود و هراز، الگوی تغییرات کاملاً و اگر را نشان دادند. فراوانی روزهای همراه با بارش سنگین ($R10mm$) افزایشی معادل $1/5$ تا 3 روز/دهه را تجربه می‌کند. در حالی که شاخص $R20mm$ از نظر آماری روند قابل توجهی را تجربه نکرده است و شاخص‌های شدت ($Rx1day$ و $SDII$) در بخش‌هایی از سواحل غربی خزر نظیر تالش و غرب سفیدرود، روند کاهشی دارند. حساسیت در حوضه‌های خشک مرکزی و شرقی شامل کویر مرکزی، لوت، جازموریان و هیرمند به مراتب بیش‌تر از سایر حوضه‌ها است. در این حوضه‌ها شاخص‌های شدت، روند افزایشی را نشان دادند بطوریکه شاخص $SDII$ ، به ازای هر دهه $0/5$ میلی‌متر/روز روند افزایشی داشته است (شکل ۴).

در مناطق فاقد پوشش گیاهی متراکم و با نفوذپذیری بسیار پایین خاک، افزایش اندک در شدت بارش همانند چیزی که برای حوضه‌های داخلی ایران دیده شد، سازوکار بارش-رواناب را به شکل اساسی تغییر می‌دهد. افزایش شدت بارش روزانه، رخدادهای جوی را مستقیماً به سیلاب‌های برق‌آسا با سرعت برشی بالا تبدیل می‌کند. کاهش شدید زمان تمرکز حوضه و افت زمان ماندگاری آب سطحی، سازوکار تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی را مختل کرده و صرفاً بر فرسایش مکانیکی خاک می‌افزاید. بطور کلی تلفیق نقشه‌های روند تغییرات (شکل ۴) و نقشه آسیب‌پذیری حوضه‌ها (شکل ۵) اثبات می‌کند که تغییر اقلیم در ایران اثری دوگانه بر آسیب‌پذیری دارد؛ از یک سو کاهش فرین‌های بارشی در زاگرس منجر به آسیب‌پذیری شدید در تأمین منابع آب شده و از سوی دیگر، افزایش شدت بارش‌ها در مناطق خشک مرکزی و شرقی، آسیب‌پذیری اکولوژیک را از طریق تشدید فرسایش و سیلاب‌های مخرب افزایش داده است.



شماره

شکل ۴. روند بیشینه بارش یک‌روزه ($Rx1day$) (واحد: میلی‌متر/روز)، تعداد روزهای همراه با بارش سنگین ($R10mm$) (واحد: روز/دهه)، و بسیار سنگین ($R20mm$) (واحد: روز/دهه) و شاخص شدت بارش روزانه ($SDII$) (واحد: میلی‌متر/روز/دهه) با برآوردهای ماهواره‌ای GPM-IMERG.

آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز ایران در برابر بارش‌های فرین با استفاده از روش وزن‌دهی آنتروپی شانون

کاربست آنتروپی شانون به عنوان یک عملگر وزن‌دهی عینی بر روی داده‌های GPM-IMERG، تمکیک دقیقی از پتانسیل آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز ایران در برابر بارش‌های فرین ارائه می‌دهد. ناهمگونی فضایی شاخص‌های فرین، پایه اصلی تخصیص وزن در آنتروپی شانون است. تخصیص بالاترین وزن‌ها به مناطقی با شدیدترین گرادیان‌های مکانی آسیب‌پذیری را به عنوان یک کمیت توزیع‌یافته فضایی مدل‌سازی می‌کند. نتایج این پردازش نشان می‌دهد که ۴۶/۵ درصد از مساحت کشور در طبقه آسیب‌پذیری کم و ۳۰ درصد در پهنه متوسط قرار دارند. تمرکز اصلی ریسک با پوشش ۲۳/۵ درصد از مساحت کل، در دامنه‌های غربی و خطوط ساحلی جنوب مستقر است (شکل ۵). این توزیع نامتقارن، بازتابی مستقیم از حاکمیت دو رژیم متفاوت دینامیکی و ترمودینامیکی بر هیدروکلیماتولوژی بارش‌های فرین در پهنه سرزمینی است.

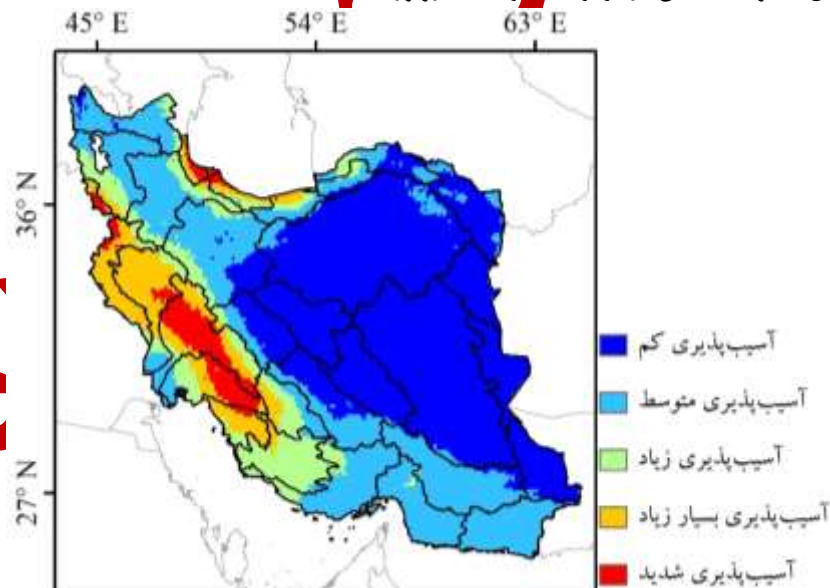
هسته مرکزی ریسک، شامل کلاس‌های آسیب‌پذیری شدید و بسیار زیاد (مجموعاً ۱۲/۷ درصد از مساحت کشور)، یک کمربند پیوسته بر روی دامنه‌های غربی و جنوب‌غربی رشته‌کوه زاگرس تشکیل می‌دهد. حوضه‌های آبخیز راهبردی کرخه، کارون بزرگ، جراحی-زهره و بخش‌های کوهستانی حوضه کل-مهران کانون این پهنه هستند. مقادیر پایه هر چهار شاخص $R10mm$ ، $Rx1day$ ، $R20mm$ و $SDII$ از کانون‌های بیشینه کشوری است. تطابق مکانی این پهنه با کانون‌های رخداد سیلاب‌های ویرانگر منطقه‌ای،

از جمله رخدادهای سال ۱۳۹۸ و بهار ۱۴۰۳، خروجی‌های مدل آنتروپی را در شناسایی هم‌افزایی تاریخچه اقلیمی و پیچیدگی توپوگرافیک تأیید می‌کند.

بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی کشور، نماینده یک آسیب‌پذیری ترمودینامیکی با وسعت ۱۰/۸ درصد (کلاس آسیب‌پذیری زیاد) هستند. حوضه‌های ساحلی نظیر بندرعباس-سدیج و بلوچستان جنوبی در این پهنه مستقرند (شکل ۵). برهم‌کنش بی‌هنجاری‌های مثبت دمای سطح آب در حوضه‌های ساحلی و تشدید پدیده‌های همرفتی، روندهای افزایشی را در شاخص‌های شدت، به ویژه $Rx1day$ و $SDII$ ، ایجاد کرده است. ثبت سیلاب‌های مخرب با منشأ رگبارهای همرفتی در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۴۰۰ در این مناطق، نشان‌دهنده تغییر فاز ریسک از فراوانی بارش به شدت بارش‌های کوتاه‌مدت است.

نوار انتقالی کشور با آسیب‌پذیری متوسط، ۳۰ درصد از مساحت کشور را اشغال کرده است. حوضه‌های ارس و ارومیه در شمال غرب، به همراه دامنه‌های شمالی البرز شامل حوضه‌های تالش، سفیدرود و هراز، دارای مقادیر حد واسط در شاخص‌های فرین هستند. فراوانی بارش‌های سنگین نظیر $R10mm$ در مناطق ساحلی خزر بالا ارزیابی می‌شود، اما شدت فرین $Rx1day$ در محدوده متوسط قرار دارد (شکل ۵). این تعادل نسبی میان شاخص‌ها، آنتروپی فضایی را در سطح میانی نگه داشته و مانع از تمرکز وزن‌های بالا در این حوضه‌ها شده است. رخدادهای سیلابی در این نوار، از جمله سیلاب‌های پراکنده بهار ۱۴۰۳، عمدتاً ماهیت موضعی و محدود دارند.

سلطه سامانه‌های پرفشار جنب‌حاره‌ای و اثر سایه بارشی زاگرس و البرز، وسیع‌ترین پهنه کشور (۴۶/۵ درصد) را در کلاس آسیب‌پذیری کم قرار داده است. حوضه‌های مرکزی و شرقی شامل کویر مرکزی، کویر لوت، جازموریان و هیرمند، کمترین مقادیر مطلق و پایین‌ترین تنوع فضایی را در رخدادهای بارش فرین تجربه می‌کنند. همگنی فضایی شاخص‌های $R10mm$ و $SDII$ در این گستره خشک، درجه انحراف را در مدل شانون به حداقل رسانده است (شکل ۵). پتانسیل رخداد بارش‌های فرین در این حوضه‌ها ذاتاً پایین ارزیابی می‌شود، اما ثبت رخدادهای استثنایی نظیر سیلاب تابستان ۱۴۰۱، گویای این واقعیت علمی است که مقادیر پایین شاخص آسیب‌پذیری معادل مصونیت مطلق در برابر مخاطرات هیدرولوژیک نیست.



شکل ۵. مدل سازی فضایی آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز ایران در برابر بارش‌های فرین مبتنی بر روش آنتروپی شانون. طیف رنگی نشان‌دهنده کلاس‌های آسیب‌پذیری وزنی‌دهی شده از شاخص‌های شدت و فراوانی بارش فرین است.

نتیجه گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز ایران در برابر بارش‌های فرین، یک چارچوب تحلیلی مبتنی بر برآوردهای ماهواره‌ای GPM-IMERG و شاخص آنتروپی شانون را توسعه داد. نتایج تحقیق نشان داد که کارایی محصول بارش ترکیبی GPM-IMERG در سراسر کشور یکسان نیست؛ درحالی‌که این داده‌ها با ضریب کارایی کلینگ-گوپتا (KGE) بین ۰/۶۶ تا ۰/۹۲ در شبیه‌سازی بارش‌های جبهه‌ای دامنه‌های غربی زاگرس کارایی قابل قبولی دارند، در شناسایی بارش‌های کم‌عمق و گرم نوار ساحلی خزر و رگبارهای همرفتی کوتاه‌مدت مناطق خشک مرکزی، با کم‌برآوردی و بیش‌برآوردی سیستماتیک مواجه هستند. این ناهمگونی فضایی در برآورد بارش، یافته‌های مطالعات پیشین نظیر Wang et al (2021) را که بر خطای مکانی و فصلی برآوردهای بارش در حوضه یانگ‌تسه تأکید داشتند، تأیید می‌کند.

تحلیل اقلیم‌شناسی فرین‌ها، سه رژیم هیدروکلیماتولوژیک متمایز را در ایران آشکار ساخت. حوضه‌های غربی و جنوب‌غربی (کرخه و کارون بزرگ) با فراوانی و شدت بالای هم‌زمان بارش‌های فرین (Rx1day تا ۸۲/۵ میلی‌متر) مشخص می‌شوند که محصول واداشت کوهساری سامانه‌های مدیترانه‌ای است. در مقابل، سواحل جنوبی (بندرعباس-سدیج و بلوچستان جنوبی) با فراوانی پایین اما شدت انفجاری رخدادها (Rx1day و SDII بسیار بالا)، تحت تأثیر سازوکارهای ترمودینامیکی و نفوذ رطوبت مونسونی قرار دارند. این الگوهای متضاد با روند تغییرات نیز تقویت می‌شوند بطوریکه کاهش معنادار شدت و فراوانی بارش در پهنه زاگرس با نرخ کاهش Rx1day تا ۱۶ میلی‌متر بر دهه، در تضاد کامل با تشدید ترمودینامیکی در جنوب کشور با افزایش Rx1day تا ۲۶/۴ میلی‌متر بر دهه قرار دارد. این تشدید مبتنی بر دما، انطباق مستقیمی با رابطه فیزیکی کلایوس-کلاپیرون داشته و نتایج جهانی مبنی بر تقویت بارش‌های فرین در مناطق گرم‌تر، همان‌گونه که توسط Yao et al (2020) در آسیای مرکزی و Breugem et al (2020) به صورت نظری تبیین شد را در مقیاس منطقه‌ای اثبات می‌کند.

مدل‌سازی آسیب‌پذیری با روش آنتروپی شانون، این الگوهای پیچیده فضایی و زمانی را به یک نقشه ریسک کمی تبدیل کرد. نتایج به‌طور مشخص دو کریدور اصلی آسیب‌پذیری را در ایران شناسایی نمود: یک پهنه دینامیکی در امتداد دامنه‌های غربی زاگرس و یک پهنه ترمودینامیکی در خط ساحلی جنوب و جنوب‌شرق که مجموعاً ۲۳/۵ درصد از مساحت کشور را پوشش می‌دهند. تمرکز کلاس‌های آسیب‌پذیری شدید و بسیار زیاد بر حوضه‌هایی مانند کرخه و کارون، با سوابق تاریخی رخداد سیلاب‌های ویرانگر منطقه‌ای کاملاً منطبق است. این قابلیت در تعیین دقیق کانون‌های خطر، مشابه رویکرد Rodrigues et al (2020) در برزیل که سطوح بازگشت بارش را به فراوانی بلایای طبیعی مرتبط ساخت؛ می‌باشد.

به‌طور کلی، نتایج این تحقیق در چند سطح با ادبیات بین‌المللی هم‌خوانی دارد. نخست، از منظر درستی محصولات بارش جهانی، رفتار GPM-IMERG در ایران با یافته‌های Herold et al (2016) و Wang et al (2021) در ارتباط با حساسیت بالای شدت و تداوم بارش به نوع محصول، تفکیک مکانی و شرایط محلی فیزیکی سامانه بارشی همسو است. دوم، از منظر تغییر اقلیم، تقویت شدت بارش‌های یک‌روزه در بخشی از حوضه‌های جنوبی و خشک‌تر کشور، با استنتاج‌های Yao et al (2020) و Breugem et al (2020) درباره تشدید فرین‌های بارشی تحت گرمایش جهانی سازگار است. سوم، از منظر برهم‌کنش میان فرین‌های بارشی و مخاطرات هیدرولوژیک، تطابق مکانی پهنه‌هایی با آسیب‌پذیری بالا و رخداد‌های سیل، پارادایم ارائه‌شده توسط Rodrigues et al (2020) را در ایران بازتولید می‌کند و نشان می‌دهد که نگاشت شاخص‌های فرین به شاخص‌های ریسک، ابزار قدرتمندی برای طراحی سازوکارهای کاهش آسیب‌پذیری در سطح حوضه‌ای فراهم می‌آورد. رویکرد مورد بررسی با چارچوبی که Keller et al (2021) آن را مدیریت ریسک اقلیمی تکرار‌شونده و یکپارچه می‌نامند، می‌تواند مسیر توسعه سامانه‌های هشدار پیش‌هنگام، بازنگری طراحی سازه‌های آبی و برنامه‌ریزی کاربری اراضی را در مقیاس حوضه‌های آبخیز کشور هدایت کند؛ به‌گونه‌ای که نتایج اقلیمی حاصل از تحلیل فرین‌ها، به‌طور مستقیم در خدمت تصمیم‌سازی برای کاهش خطر و مدیریت پایدار منابع آب قرار گیرد.

منابع

- اردونی، معصومه؛ معماریان، هادی؛ اکبری، مرتضی؛ پوررضا، محسن (۱۳۹۹). صحت سنجی داده های بارش ماهواره GPM-IMERG در مقیاس های زمانی نیم ساعته و روزانه (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود). مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۷(۴)، ۱۴۹-۱۶۶. آوند، محمدتقی؛ مرادی، حمید رضا؛ رمضان زاده لسبویی؛ مهدی (۱۴۰۱). ارزیابی آسیب پذیری حوزه آبخیز تجن از نظر سیلاب با استفاده از روش BWM، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۳(۲۶)، ۲۰-۱۰.
- بی همتا، آرش؛ گهرنژاد، حمید؛ معظمی، صابر (۱۳۹۷). بررسی داده های بارش ماهواره های GPM و TRMM در مقیاس های روزانه، ماهیانه و فصلی در شهر تهران. نشریه سنجش از دور و GIS ایران، ۱۰(۲)، ۴۵-۶۰.
- بیاتانی، فاطمه؛ بیات زاده، مهدی؛ فتوحی فیروزآباد، فرزانه؛ فتح زاده، علی؛ کرمی ایوب (۱۴۰۲). بررسی مکانی درجه آسیب پذیری حوزه آبخیز با رویکرد اقلیمی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز درودزن، استان فارس) پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز ۱۴(۲۸)، ۸۸-۷۸.
- خان سالاری، سکینه؛ امید، محمود؛ فلاح زاده، مژگان (۱۴۰۲). ویژگی های بارش زراعی و فرین های آن در استان مرکزی در دوره آماری ۱۳۷۰-۱۳۷۱ تا ۱۴۰۰-۱۳۹۹. آب و خاک، ۵(۵)، ۸۰۹-۸۲۸.
- رسول زاده، علی؛ محمودی بابلان، سجاد؛ نسترئی عموقین، سعید (۱۴۰۱). ارزیابی مکانی-زمانی محصولات بارش ماهواره ای در مناطق شمال غرب ایران. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۹)، ۲۱۴۱-۲۱۶۰.
- صادقی، حمیدرضا؛ معصوم پور سماکوش، جعفر؛ میری، مرتضی (۱۳۹۸). ارزیابی داده های بارش دور سنجی GPM در مقابل داده های مشاهده ای (مورد مطالعه: غرب میانه ایران). نشریه سنجش از دور و GIS ایران، ۱۱(۲)، ۱۱۵-۱۲۴.
- فرجام، مهین؛ کلانتری، خلیل؛ اسدی، علی؛ براتی، علی اکبر (۱۴۰۴). ارزیابی تاثیر آسیب پذیری نظام حکمرانی آب در برابر مخاطرات محیطی (مطالعه حوضه آبریز کارون بزرگ در استان خوزستان). تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶(۸)، ۲۱۹۹-۲۲۲۳.
- مظاهری، مهدی. (۱۴۰۲). بررسی کلی بیابان آب در کشور: وضعیت و چالش ها. ماهنامه گزارش های کارشناسی مرکز پژوهش های مجلس شورای اسلامی، ۳۱(۳)، ۱۸۹۹۴e.
- Avand M, Moradi H, Ramazanzadeh Lasbue M. (2022). Vulnerability Assessment of Tajan Watershed in Terms of Flood using BWM Method. J Watershed Manage Res. 13(26), 10-20. [In Persian]
- Bayatani F, Hayatzadeh M, Fotouhi Firozabad F, Fathzadeh A, Karami A. (2023). Spatial Assessment of Watershed Vulnerability Based on Climatic Approach (Case study: Doroodzan Watershed. Fars Province). J Watershed Manage Res. 14(28), 78-88. [In Persian]
- Bihamta, A., Goharnejad, H., and moazami, S. (2018). Study of Precipitation Data of GPM and TRMM Satellites in Daily, Monthly and Seasonal Scales at Tehran. Iranian Journal of Remote Sensing and GIS, 10(2), 45-60. [In Persian]
- Breugem, A. J., Wesseling, J. G., Oostindie, K., & Ritsema, C. J. (2020). Meteorological aspects of heavy precipitation in relation to floods – An overview. Earth-Science Reviews, 204, 1-46.
- Donat, M. G., Angéil, O., & Ukkola, A. M. (2019). Intensification of precipitation extremes in the world's humid and water-limited regions. Environmental Research Letters, 14(6), 065003.
- Farjam, M., Kalantari, K., Asadi, A. and Barati, A. A. (2025). Assessment of the Impact of Water Governance System Vulnerability to Environmental Hazards (A Case Study of the Karun-e Bozorg Basin in Khuzestan Province). Iranian Journal of Soil and Water Research, 56(8), 2199-2223. [In Persian]
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. Journal of Hydrology, 377(1-2), 80-91.
- Held, I. M., & Soden, B. J. (2006). Robust responses of the hydrological cycle to global warming. Journal of Climate, 19(21), 5686–5699.
- Herold, N., A. Behrangi, and L. V. Alexander (2017), Large uncertainties in observed daily precipitation extremes over land, J. Geophys. Res. Atmos., 122, 668–681.

- Herold, N., Alexander, L. V., Donat, M. G., Contractor, S., & Becker, A. (2016). How much does it rain over land? *Geophysical Research Letters*, 43(1), 341–348.
- Hou, A., Kakar, R., & Neeck, S. (2014). The global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), 701–722.
- Huffman, G., Bolvin, D., & Neklin, E. (2015). Integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG) technical documentation. NASA/GSFC Code, 015.
- Keller, K., Helgeson, C., & Srikrishnan, V. (2021). Climate risk management. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49, 95–116.
- Khansalari, S., Omidi, M. and Fallahzadeh, M. (2023). Analysis of Crop Precipitation and Its Extreme Events in Markazi Province During the Statistical Period of 1991-1992 to 2020-2021. *Water and Soil*, 37(5), 809-828. [In Persian]
- Knoben, W. J., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323-4331.
- Malczewski, J. (2000). On the use of weighted linear combination method in GIS: Common and best practice approaches. *Transactions in GIS*, 4(1), 5-22.
- Mazaheri, Mehdi. (1402). A general review of the country's water balance: Status and challenges. *Monthly Expert Reports of the Islamic Parliament Research Center*, 31(3), e18994 [In Persian]
- Ordouni, M., Memarian, H., Akbari, M. and Pourreza, M. (2020). Accuracy assessment of GPM-IMERG satellite precipitation data on half-hourly and daily time scales (Case study: Gorganroud Basin). *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(4), 149-166. [In Persian]
- Queralt, S., Hernandez, E., Gallego, D., & Iturrioz, I. (2007). Atmospheric instability analysis and its relationship to precipitation patterns over the western Iberian Peninsula. *Advances in Geosciences*, 10, 39-44.
- Rasoulzadeh, A., Mahmoudi Babolan, S. and Nastarani Amoghini, S. (2022). Spatio-temporal Evaluation of Satellite Precipitation Products in Northwestern Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(9), 2141-2160. [In Persian]
- Rodrigues, D. T., Gonçalves, W. A., Spyrides, M. H. C., Santos e Silva, C. M., & de Souza, D. O. (2020). Spatial distribution of the level of return of extreme precipitation events in Northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, 40(14), 5913-5928.
- Sadeghi, H. R., masoompour, J. and nairi, M. (2019). The Evaluation of GPM Precipitation Remote Sensing Data with Observed Data (Case Study: Mid-West of Iran). *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 11(2), 115-124. [In Persian]
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423.
- Tang, G., Clark, M. P. & Papalexiou, S. M. (2021). SC-earth: a station-based serially complete earth dataset from 1950 to 2019. *Journal of Climate*, 34(16), 6493-6511.
- Tang, G., Clark, M. P., Papalexiou, S. M., Ma, Z., & Hong, Y. (2020). Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111697.
- Tapiador, F. J., Turk, F. J., Petersen, W., Hou, A. Y., García-Ortega, E., Machado, L. A. T., ... & de Castro, M. (2012). Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications. *Atmospheric Research*, 104–105, 70–97.
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Shepherd, T. G. (2015). Attribution of climate extreme events. *Nature Climate Change*, 5(8), 725–730.
- UN Climate Change Secretariat. (2017). Opportunities and options for integrating climate change adaptation with the Sustainable Development Goals and the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030.
- Wang, W., Lin, H., Chen, N., & Chen, Z. (2021). Evaluation of multi-source precipitation products over the Yangtze River Basin. *Atmospheric Research*, 249, 1-12.

- Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2, 184–194.
- Xin, Y., Lu, N., Jiang, H., Liu, Y., & Yao, L. (2021). Performance of ERA5 reanalysis precipitation products in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater Bay Area, China. *Journal of Hydrology*, 602, Article 126791.
- Yao, J., Chen, Y., Chen, J., Zhao, Y., Tuoliewubieke, D., Li, J., Yang, L., & Mao, W. (2020). Intensification of extreme precipitation in arid Central Asia. *Journal of Hydrology*. 1-15.
- Zhang, L., Li, X., Cao, Y., Nan, Z., Wang, W., Ge, Y., ... & Yu, W. (2020). Evaluation and integration of the top-down and bottom-up satellite precipitation products over mainland China. *Journal of Hydrology*, 581, 124456.
- Zhang, X., L. Alexander, G. C. Hegerl, P. Jones, A. K. Tank, T. C. Peterson, B. Trewin, and F. W. Zwiers (2011), Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data, *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*, 2(6), 851–870.
- Zhang, Y., Hong, Y., Wang, X., Gourley, J. J., Xue, X., Saharia, M., ... & Tang, G. (2015). Hydrometeorological analysis and remote sensing of extremes: Was the July 2012 Beijing flood event detectable and predictable by global satellite observing and global weather modeling systems? *Journal of Hydrometeorology*, 16, 381–395.
- Zhu, Q., Gao, X., Xu, Y.-P., & Tian, Y. (2019). Merging multi-source precipitation products or merging their simulated hydrological flows to improve streamflow simulation. *Hydrological Sciences Journal*, 64(8), 910–920.

پښتانه