Political Spatial Planning

7(1):59-88, Winter 2025

Tarbiat Modares University

DOI: https://dx.doi.org/10.48311/psp.7.1.59

Solutions for Creating a Revolution in Water Resources Data Collection and Processing Using Global Experiences

Javad Farhoudi[1*], Hossein Khalili Shayan[2]

1. Emeritus Professor, Irrigation and Reclamation Engineering Dept. Faculty of Agriculture, Colleges of Agriculture and Natural Resources, Univ. of Tehran, Karaj, Iran
2. Formerly, Ph.D. Student, Irrigation and Reclamation Engineering Dept. Faculty of Agriculture, Colleges of Agriculture and Natural Resources, Univ. of Tehran, Karaj, Iran

Received: 2024-12-16 Accepted: 2025-01-26

Extended Abstract

Introduction

Data and information play crucial roles in the transparency of water governance. However, the presence of contradictions in water resources data, inconsistent readings and narratives about water assets, outdated hardware, and, to some extent, insufficient software enhancements in the preparation and presentation of water resources information—compared to global advancements—necessitates a serious review of water resources data collection and processing systems. In this context, artificial intelligence methods, sensors, and remote sensing technologies are being considered for accurate water resources accounting.

Objectives

This study has two main goals: (1) to introduce international experiences related to modern hardware and software technologies for monitoring water cycle parameters and (2) to evaluate the technologies used in Iran for monitoring hydrological cycle components.

Methodology

This article is a systematic review of approximately 100 international articles that present the latest findings related to software and hardware equipment for monitoring hydrological cycle meta-indicators. These meta-indicators include

* Corresponding author, Email: jfarhoudi@ut.ac.ir

Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

precipitation, water depth, water level, flow velocity, river discharge, and groundwater level monitoring. In each case, while providing a list of the most important technologies, the application level of these technologies in monitoring surface and groundwater resources in Iran was evaluated.

Findings

The technologies identified for rainfall monitoring in this study include meteorological radar, meteorological satellites, rain gauge data loggers, radiosondes, automatic meteorological stations, meteorological buoys, automatic snow measurement stations, and global climate models. The technologies identified for groundwater monitoring include gravimetry, radar interferometry, point-to-point measurements of ground displacement, satellite altimetry, laser radar altimetry, airborne electromagnetic systems, and infrared/thermal evapotranspiration measurements as indicators of groundwater use. Additionally, twenty-six new software and hardware technologies for monitoring surface flows were identified in this paper. The studies conducted indicate the unfavorable application of modern software and hardware technologies in monitoring hydrological cycle meta-indicators in Iran. For instance, out of the twenty-six known hardware and software technologies related to surface flow measurements, only two technologies have been widely used in Iran; four technologies have reached the knowledge frontier and are in widespread production by domestic knowledge-based companies, while eleven technologies have not yet reached the knowledge frontier in Iran.

Conclusion

The use of smart water resource management can lead to efficient measures in obtaining and storing real-time, accurate, fast, reliable, and comprehensive information on the water cycle. The present study shows that the penetration rate of modern and intelligent technologies for monitoring water resource parameters in Iran is low, and domestic manufacturing companies are reluctant to invest in research and development in this sector. For example, out of the twenty-six hardware and software technologies related to hydrometric sampling, eleven technologies are not currently being studied for research and development and require further investigation to reach the knowledge frontier in the country. This paper presents suggestions to outline a path for developing new hardware and

software technologies for water cycle data collection and transformation in the modernization of Iran's water resources data collection and processing infrastructure.

Keywords: Water Cycle, Water Resources Management, Water Accounting, Smart Technologies, Artificial Intelligence, Remote Sensing..

فصلنامه آمایش سیاسی فضا
دوره ۷، شماره ۱، زمستان ۱۴۰۳
صفحه ۵۹-۸۸

راهکارهای ایجاد تحول در داده‌برداری و داده‌پردازی منابع آب با استفاده از تجارب جهانی

جواد فرهودی [۱*]، حسین خلیلی شایان [۲]

۱. استاد بازنشستهٔ گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، البرز، ایران.
۲.دانش‌آموختهٔ دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، البرز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷

چکیده

آمار و اطلاعات جایگاه ویژه‌ای در شفافیت حکمرانی آب دارد. از طرف دیگر، شاهد بودن تناقضات در آمار و اطلاعات منابع آب، یکسان نبودن قرائت‌ها و روایت‌ها درمورد دارایی‌های آبی، به‌روز نبودن تجهیزات سخت‌افزاری و تا اندازه‌ای نرم‌افزاری در تهیه و ارائهٔ اطلاعات منابع آب در مقایسه با پیشرفت‌های جهانی، بازنگری جدی در سامانه‌های داده‌برداری و داده‌پردازی منابع آب را الزام‌آور می‌سازد. در این راستا، روش‌های هوش مصنوعی، حسگرها و فناوری‌های سنجش از دور، در حسابداری دقیق منابع آب موردتوجه هستند. این مقاله مروری نظام‌مند از حدود صد مقالهٔ بین‌المللی است که آخرین یافته‌های مرتبط با تجهیزات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری پایش مؤلفه‌های چرخهٔ هیدرولوژیکی را ارائه میدهد. این مؤلفه‌ها شامل بارندگی، عمق آب/ سطح آب/سرعت و دبی جریان رودخانه‌ها و پایش تراز سطح آب‌های زیرزمینی است. در هر مورد ضمن ارائهٔ سرلیستی از مهم‌ترین فناوری‌ها، وضعیت کاربرد این فناوری‌ها در پایش منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی کشور، ارزیابی شد. بررسی‌های انجام‌شده وضعیت نامطلوب کاربرد فناوری‌های نوین نرم‌افزاری و سخت‌افزاری در پایش مؤلفه‌های چرخهٔ هیدرولوژیکی در کشور را اثبات می‌کند. برای نمونه، از مجموع ۲۶ فناوری سخت‌افزاری و نرم‌افزاری شناخته‌شده مرتبط با برداشت‌های جریان‌های سطحی، تنها دو فناوری به‌طور گسترده در کشور استفاده شده؛ چهار فناوری به مرز دانش و تولید گسترده توسط شرکت‌های دانش‌بنیان داخلی رسیده و همچنان رسیدن به مرز دانش یازده فناوری در کشور رخ نداده است. طی این مقاله پیشنهادهایی جهت ترسیم مسیر توسعهٔ فناوری‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری نوین جهت برداشت داده‌های چرخه‌های آبی و تحول در نوسازی زیرساخت‌های داده‌برداری و داده‌پردازی منابع آب کشور، ارائه شد.

کلمات کلیدی: چرخهٔ آب، مدیریت منابع آب، حسابداری آب، فناوری‌های هوشمند، هوش مصنوعی، سنجش از دور.

* نویسندهٔ مسئول مقاله: E-mail: jfarhoudi@ut.ac.ir

۱. مقدمه

وجود سامانه‌های حسابداری آب برای انجام فرایندهای شناسایی، تشخیص، کمی‌سازی، ارائهٔ گزارش و اطلاعات، شناسایی حقوق و سایر امور مرتبط با آب و تعهدات الزام‌آور از یک‌سو و به واقعیت رساندن اصل شفافیت در حکمرانی آب از سوی دیگر، می‌تواند در مدیریت بهینهٔ آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بسیار نقش‌آفرین باشد [۱]. چارچوب حسابداری منابع آب بر پایهٔ بیلان منابع آب تعریف می‌شود که جنبه‌های مختلفی از وضعیت هیدرولوژیکی، کشاورزی، محیط زیستی و زیست‌بومی در یک حوضهٔ آبریز را دربر می‌گیرد [۱]. ویژگی اصلی این روش این است که می‌توان داده‌های ورودی موردنیاز را از داده‌های ماهواره‌ای و زمینی، سامانه‌های هوشمند و مدل‌های هیدرولوژیکی، استخراج و دریافت کرد.

تاکنون پژوهش‌های کمّی زیادی در این زمینه انجام‌شده و تنها سامانهٔ حسابداری اقتصادی ـ محیط زیستی در چند مورد محدود، موردبررسی قرار گرفته است. از محدودیت‌های اصلی اجرای سامانهٔ حسابداری آب، نبود منابع جامع و کامل و مطمئن داده‌های آب و هواشناسی و هیدرولوژیکی حوضه‌ها و فراهم نبودن بانک اطلاعاتی کامل، به‌روز و واسنجی شدهٔ داده‌های سنجش از دور در حوضه‌های آبریز، به‌عنوان اصل مهم حکمرانی آب است که اندیشیدن به این مهم و ارائهٔ راهکارهای بهبود آن از ضرورت‌های اصلی مدیریت یکپارچه منابع آب به شمار می‌آید [۲].

از طرف دیگر، وجود تناقضات در آمار و اطلاعات منابع آب، یکسان نبودن قرائت‌ها و روایت‌ها درمورد دارایی‌های آبی قدیمی بودن و به‌روز نبودن تجهیزات سخت‌افزاری و تاندازه‌ای نرم‌افزاری در تهیه و ارائهٔ اطلاعات مربوط به منابع آب در مقایسه با یافته‌ها و پیشرفت‌های جهانی در فناوری‌های نو و هوشمند، و احساس نگرانی در طراحی و اجرای برنامه‌های توسعه و بهره‌برداری منابع آب، بازنگری جدی در سامانهٔ داده‌برداری و داده‌پردازی منابع آب را الزام‌آور می‌سازد. بنابراین، همکاری نهادهای مرتبط با آب در راستای ایجاد زیرساخت‌های سخت‌افزاری دریافت اطلاعات دقیق و مطمئن، تولید و ارسال آن‌ها در یک بستر الکترونیکی و استفاده از زیرساخت‌های نرم‌افزاری لازم جهت پردازش و ذخیره‌سازی آن‌ها در بانک‌های اطلاعاتی، از ضرورت‌های جدی کشور است.

در این مقاله ضمن اشارهٔ اجمالی به اجزای چرخهٔ آبی، با مرور بر تجربیات جهانی در رابطه با ابزارهای نوین سخت‌افزاری و نرم‌افزاری قابل‌استفاده در اندازه‌گیری و پایش مؤلفه‌های چرخهٔ آبی، تجربه‌های بین‌المللی در رابطه با به‌کارگیری فناوری‌های نوین در مدیریت منابع آب تشریح شده است. در ادامه وضعیت نسبی کشور در مقایسه با تجارب بین‌المللی اندازه‌گیری و پایش مؤلفه‌های چرخهٔ آبی (بارندگی‌ها، پیکره‌های آب سطحی و منابع آب زیرزمینی) در سه بخش سخت‌افزاری، نرم‌افزاری و تحلیل وضع موجود ارزیابی شده و توصیه‌های لازم برای برنامه‌ریزی، توسعهٔ فناوری‌ها و سرمایه‌گذاری در افق اجرایی الگوی پیشرفت اسلامی ایرانی ارائه شد.

۲.اطلاعات و روش‌ها

۲ـ۱. مبانی نظری پژوهش

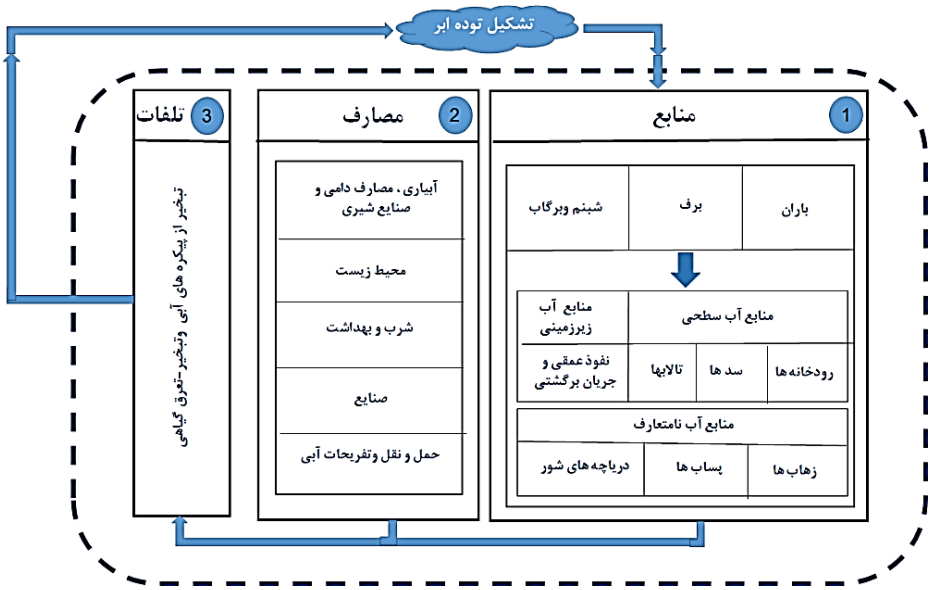
چرخهٔ آبی در طبیعت که چرخهٔ هیدرولوژیک نیز خوانده می‌شود، تأمین‌کنندهٔ ضروری‌ترین منبع حیاتی آب برای ادامهٔ زندگی موجودات روی زمین است که شکل زمینی آن دربرگیرندهٔ جو یا هوا سپهر (اتمسفر)، زمین و پیکره‌های آبی است. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، مؤلفه‌ها و فرایندهای فیزیکی متعددی همچون، تبخیر، تبخیر ـ تعرق، میعان، جابه‌جایی بخار آب، تصعید، بارش، رواناب، رطوبت خاک، نفوذ و نفوذ عمقی آب، جریان‌های زیرزمینی و جذب گیاهی عواملی هستند که به تعادل نهایی (یا عدم تعادل موضعی) در چرخهٔ آبی کمک می‌کنند [۳].

با در نظر گرفتن شکل ۱، می‌توان بیلان منابع آب در چرخهٔ آبی را به‌صورت کلی زیر تعریف کرد:

(۱)

$$P - \left(E + E_T\right) - I = R + \Delta S$$

که در آن P بارش (باران، آب معادل ذوب برف، شبنم و برگاب و رطوبت خاک)؛ E و E_T به ترتیب تبخیر و تبخیر ــ تعرق، I نفوذ، R رواناب و ΔS ذخیره است. این مؤلفه‌ها می‌توانند به‌طور همسان برحسب یکاهای طولی یا حجمی در معادله بیلان تعریف شوند. این مدل ساده، به‌هم‌تنیدگی مدیریت منابع آب با مؤلفه‌های چرخهٔ آبی و برهم‌کنش آن‌ها و اهمیت مشاهده، اندازه‌گیری و پایش دقیق هریک از آن‌ها در حسابداری آب را بیان می‌کند.



شکل ۱: اجزای چرخهٔ آبی به همراه مؤلفه‌های مصارف و اثرات انسان‌ساخت

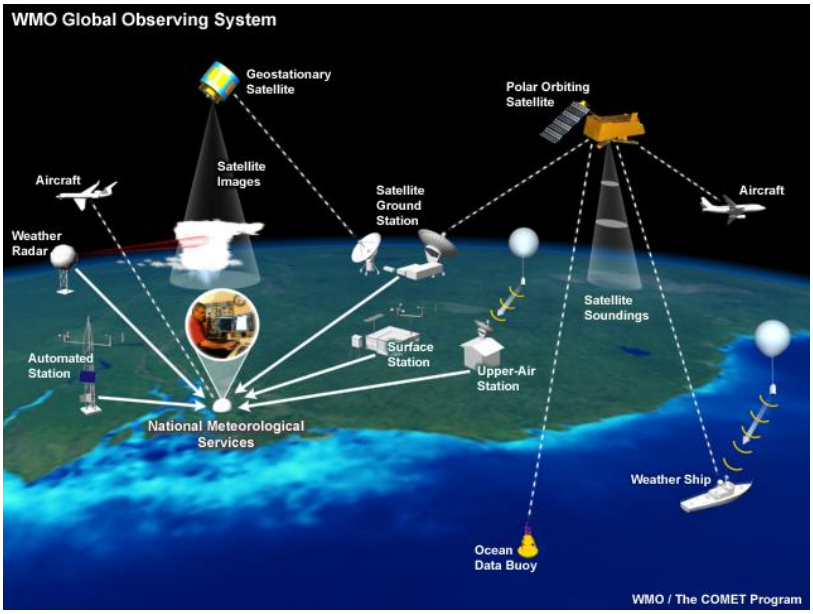
۲-۲. روش تحقیق

مقالهٔ حاضر خلاصه‌ای از یک گزارش پژوهشی با عنوان «نقش فناوری‌های نو و هوشمند در برداشت داده‌های منابع آب با استفاده از تجارب جهانی» و مروری سامان‌مند از حدود صد مقالهٔ بین‌المللی است که توسط نویسندگان و با حمایت مرکز الگوی اسلامی ـــ ایرانی پیشرفت، تهیه شده است. طی مقالهٔ حاضر و گزارش فوق، آخرین روش‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری پایش مؤلفه‌های چرخهٔ هیدرولوژیکی شامل بارندگی، عمق آب/ سطح آب/سرعت و دبی جریان رودخانه‌ها و پایش تراز سطح آب‌های زیرزمینی ارائه شده است. پس از دسته‌بندی مهم‌ترین فناوری‌ها، سطح کاربرد این روش‌ها در برداشت داده‌های منابع و مصارف آبی کشور ارزیابی شد. برای این منظور دستورالعمل‌ها، استانداردها، مشخصات فنی تجهیزات آب و هواشناسی مورداستفادهٔ وزارت نیرو و سازمان هواشناسی کشور از پایگاه‌های اطلاعاتی این سازمان‌ها استخراج شد. علاوه بر آن تهیهٔ پرسش‌نامه و دریافت اطلاعات از خبرگان و بازدید میدانی از شبکهٔ سنجش منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و تهیهٔ چک‌لیست از تجهیزات مورداستفاده در آن‌ها، مبنایی قرار گرفت.

۳. یافته‌های تحقیق

۳-۱. کاربرد فناوری‌های نوین سخت‌افزار در پایش مؤلفه‌های منابع آب در چرخهٔ آبی

دقت در شکل ۱، نشانگر آن است که مؤلفه‌های چرخهٔ آبی آمیزه‌ای از داده‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی (آب‌شناسی) و هیدرولیکی شامل بارندگی‌ها (باران، برف و...)، پیکره‌های آب‌های سطحی (رودخانه‌ها، تالاب‌ها و مخازن سدها)، سفره‌های آب‌های زیرزمینی (آب‌های نفوذی و برگشتی)، چرخهٔ مصارف (کشاورزی، شرب، صنعت و...) و تبخیر و تبخیر ـ تعرق هستند که پایش هر یک از آن‌ها دارای ویژگی خاص خود هستند که در این مقاله فقط منابع آب (بارندگی‌ها، پیکره‌های آب سطحی و آب زیرزمینی) پرداخته خواهد شد. به‌طور کلی، روش‌ها و فناوری‌های اندازه‌گیری، ایستگاه‌ها و ابزارهای اندازه‌گیری مورداستفاده متشکل از دو بخش: (۱) سنجش از دور (ماهواره‌ای یا فضایی) و (۲) سنجش میدانی یا زمینی (برجا) هستند که هریک، از مشخصه‌های خاص خود برخوردارند. سامانهٔ مشاهدهٔ جهانی چرخهٔ آبی، مطابق شکل ۲، از اجزای مختلفی به قرار زیر تشکیل شده است که هر یک از آن‌ها در یک زنجیرهٔ به‌هم‌پیوسته، وظیفهٔ خاصی را در داده‌برداری مربوط به بارش‌ها، عهده‌دارند [۴]: ماهوارهٔ زمین‌ایستا، ایستگاه زمینی ماهواره، هواپیماها، رادارهای هواشناسی، ماهوارهٔ جست‌وجوگر قطبی، ایستگاه هوایی فرازمینی (فوقانی)، ایستگاه زمینی، ایستگاه خودکار شده، ایستگاه خدمات هواشناسی در سطح ملی، کشتی‌های هواشناسی و شناورهای داده‌برداری اقیانوسی.



شکل ۲: سامانهٔ مشاهدهٔ جهانی چرخهٔ آبی (منبع: [۵])

۳ـ۲. ابزارهای سنجش از دور پایش مؤلفه‌های بارندگی‌ها

کشف سازوکارهای سنجش از دور، در غلبه بر چالش‌های مدیریت منابع آب و رسیدن به توسعهٔ پایدار، به‌ویژه در مناطقی که از شبکه‌های پایش پراکنده و کم‌تراکمی برخوردارند، برای پایش بارش‌ها کمک شایانی کرده است. ابداع خدمات ماهواره‌ای، علی‌رغم دغدغه‌های احتمالی در رابطه با صحت داده‌ها، نمونه‌برداری و به‌هم‌پیوستگی همراه با انبوه داده‌های جدید [۶]، خدمات بسیار ارزنده و شایانی را برای پایش چرخهٔ آبی فراهم آورده است که می‌تواند نقش مهمی در دستیابی به حسابداری آب ایفا کند. مطالعات نشان می‌دهند که رواج کاربرد سنجش از دور در فرایندهای مدیریت آبی در طول نوزده سال اخیر از افزایش میانگین سالانه ۱۶ درصد برخوردار بوده است [۷]. امروزه، بیشتر فعالیت‌های علمی در زمینه‌های مختلف، نظیر منابع آب، محیط‌زیست، زمین‌شناسی، بوم‌شناسی، مهندسی و کشاورزی به‌طور گسترده‌ای از سازوکارهای سنجش از دور بهره می‌گیرند.

از دههٔ ۱۹۶۰، فناوری سنجش از دور به‌عنوان یکی از فناوری‌های اندازه‌گیری بارش از فضا مورداستفاده قرار گرفته است [۸]. مجموعهٔ جامعی از اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای بارش در سال‌های اخیر منتشر شده است [۹] که مشاهدات ماهواره‌ای، روش‌های بازیافت داده‌ها، الگوریتم‌ها، حسگرها و برنامه‌های اعتبارسنجی در سطح جهان، به همراه ویژگی‌های فرایندهای مشاهدهٔ بارندگی‌ها را تشریح می‌کند.

گفتنی است که دلایل نیاز به اندازه‌گیری بارش از فضا، می‌تواند نشئت‌گرفته از ملاحظات و کاستی‌های زیر

باشد:

- پراکنش باران‌سنج‌ها در سطح زمین به‌صورت همسان نبوده و فقط بخشی از پهنه‌های اندازه‌گیری را پوشش می‌دهد، اگرچه شبکه‌های جهانی نظیر مرکز جهانی اقلیم‌شناسی بارش[1]، شبکهٔ جهانی داده‌های تاریخی اقلیم‌شناسی[2] و برآوردهای بارندگی در یک سامانهٔ شبکه‌بندی‌شده[3] قابل‌دسترس هستند.
- شبکه‌های راداری عموماً در استخدام کشورهای پیشرفته بوده و دادگان لازم برای مطالعات چرخهٔ آبی، فقط در نواحی و کشورهای محدودی قابل‌دسترس هستند [۱۰].
- صرف‌نظر از مشاهدات پراکندهٔ دریافت‌شده از عرشهٔ کشتی‌ها، شناورها و رادارهای مستقر در جزایر کوچک که از طریق دادگان جامع بین‌المللی اقیانوس ـــ جو[4] [۱۱] قابل‌دسترس هستند، سطح اقیانوس‌ها به‌صورت کامل پوشش داده نمی‌شوند.
- منظومهٔ راداری در جهان به‌سرعت در حال تکامل بوده و مأموریت آیندهٔ این نوع سامانه‌ها، دربرگیرندهٔ رادارهای ابرسنجی و باران‌سنجی نظیر EarthCARE خواهد بود [۱۲]. رادارهای هواشناسی (زمینی) C ـ band، S ـ band و X ـ band که مقدار بارندگی‌ها را با بهره‌گیری از محاسبهٔ توان بازگشتی امواج راداری تعیین می‌کنند و نیز رادارهای دوپلری که سرعت و جهت سقوط قطرات باران را مشخص می‌کنند، از تجهیزات نو و هوشمند دیگر مورداستفاده در پایش بارندگی‌ها به شمار می‌روند. ماهواره مأموریت (محور) اندازه‌گیری باران گرمسیری[5] و پروژهٔ اندازه‌گیری بارش جهانی[6] رویکردهای نو و هوشمند دیگری هستند که بر مبنای ترکیبی از اندازه‌گیری امواج رادیومتری و امواج ماکروویو، مقدار بارندگی را تعیین می‌کنند [۱۲].
- فناوری مبتنی بر پرتوهای گامای برتابیده از منبع پرانرژی کبالت ۶۰ (60Co γ rays ـــ)، برای سنجش آب معادل برف مورداستفاده قرار می‌گیرند [۱۲]. همچنین از تصاویر ماهواره‌های Terra/MODIS، Aqua/MODIS و Suiomi/VIIRS برای پایش سطح پوشش برفی استفاده می‌شوند.

۳-۳. پایش جریان‌های سطحی و پیکره‌های آبی

محاسبهٔ دبی جریان به‌عنوان مؤلفهٔ بسیار مهم در بیلان آبی و رقوم جریان برای درک کفایت سطح آب در مبادی

1. GPCC
2. GHCN
3. REGEN
4. ICOADS
5. TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission
6. GPM: Global Precipitation Measurement

تقسیم آب و نیز اعلام هشدار در طغیان‌ها و وقایع سیلاب‌ها و جلوگیری از مخاطرات احتمالی، ضروری خواهد بود. لذا برای پایش جریان‌های سطحی، نیاز به اندازه‌گیری سطح مقطع جریان، عمق جریان، سرعت جریان، و نهایتاً دبی جریان خواهد بود. اندازه‌گیری مجموعه عوامل فوق، ممکن است به‌صورت مستقیم (تماسی)، یا به‌صورت غیرمستقیم (غیرتماسی)، از طریق اندازه‌گیری مؤلفه‌های مرتبط در رودخانه‌ها و سایر پیکره‌های آبی انجام شود که ذیلاً به فناوری‌های مورداستفاده به‌اختصار اشاره می‌شود.

۳ـ۳ـ۱. فناوری‌های اندازه‌گیری و پایش اجزای جریان‌های سطحی و پیکره‌های آبی

کاربردی‌ترین فناوری‌های لندازه‌گیری و پایش جریان‌های سطحی و پیکره‌های آبی را بتوان به‌قرار زیر نام برد:

سطح‌سنج ثبات شفت انکودر، سطح‌سنج ثبات گازی، سطح‌سنج ترنسدیوسر (تراگذار) فشاری، سطح‌سنج استغراقی (ارشمیدسی)، سطح‌سنج غیرتماسی لیزری، سطح‌سنج غیرتماسی اولتراسونیک، سطح‌سنج غیرتماسی راداری، اکوساندر (آوانگار)، سرعت‌سنج پروانه‌ای، سرعت‌سنج فنجانی (مولینه)، سرعت‌سنج الکترومغناطیسی[۷]، سرعت‌سنج صوتی دوپلری[۸]، سرعت‌سنج دوپلری نمای جانبی[۹] ، سرعت‌سنج دوپلری صوتی افقی[۱۰] (H ــ)، سرعت‌سنج دوپلری فراصوتی کیولاینر[۱۱] ، سرعت‌سنج دوپلری صوتی[۱۲] ، سامانهٔ پرتونگار صوتی رودخانه‌ای[۱۳]، سرعت‌سنج صوتی زمان عبوری[۱۴]، سرعت‌سنج دوپلری اولتراسونیک[۱۵]، سرعت‌سنج تصویری ذرات در مقیاس بزرگ[۱۶]، سرعت‌سنج غیرتماسی با استفاده از پهپاد، سرعت‌سنج غیرتماسی راداری[۱۷]، سامانه‌های برآورد دبی با استفاده از ردیاب[۱۸] و پل‌های کابلی بدون سرنشین[۱۹] .

علاوه بر فناوری‌های فوق‌الذکر؛ فناوری‌های سنجش از راه دور، بر پایهٔ تصاویر دریافت‌شده از سامانه‌های ماهواره‌ای، نظیر شکل ۳ نقش مهمی در اندازه‌گیری و پایش جریان‌های سطحی ایفا می‌کنند. تعداد بی‌شماری از

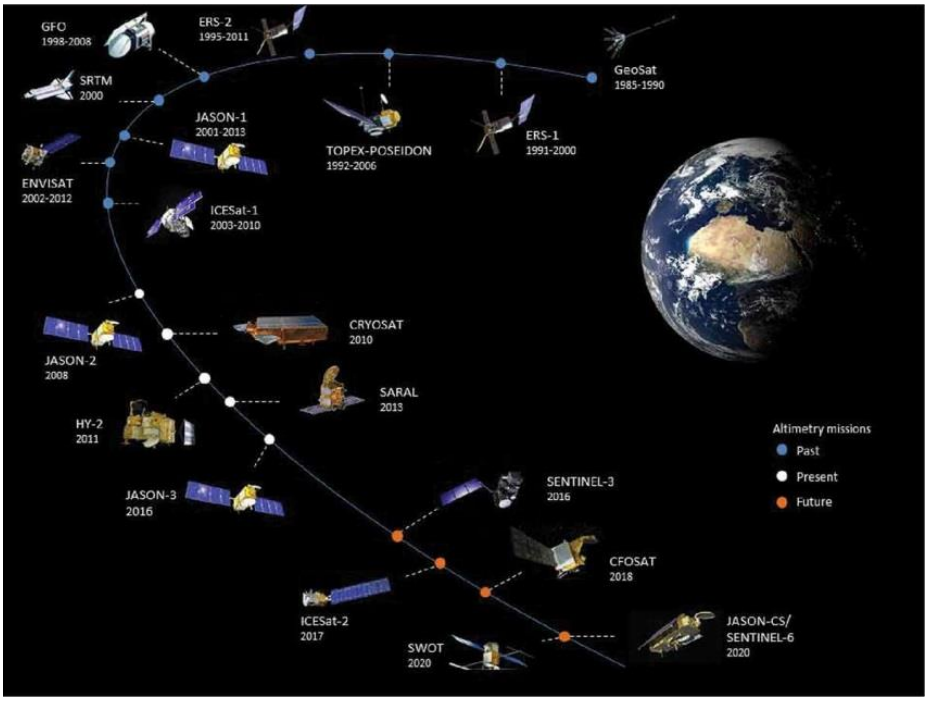
7. electromagnetic flow meter
8. Acoustic Doppler Velocimeter, ADV
9. Side Looking Doppler Sensor
10. ADCP: Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler
11. OTT Q _ liner
12. ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler
13. FATS: Fluvial Acoustic Tomography System
14. Transit Time
15. Pulsed Wave Doppler System
16. LSPIV
17. Surface Velocity Radar
18. Tracer Dilution method
19. Unmanned Cableways

روش‌های سنجش از دور نوری برای پایش پیکره‌های آب سطحی به‌صورت گسترده توسعه یافته‌اند [۱۳]. متداول‌ترین روش‌های سنجش از دور مورداستفاده در این رابطه عبارت است از تصاویر ماهواره‌ای ناسا و آژانس فضایی اروپا. درجهٔ وضوح مکانی تصاویر این ماهواره‌ها از ۵ متر با وضوح بالا، ۵ تا ۲۰۰ متر با وضوح متوسط و بیش از ۲۰۰ متر با وضوح پایین طبقه‌بندی می‌شوند [۱۴] که تصاویر با درجهٔ وضوح متوسط، قادر به کشف و پایش پیکره‌های آبی هستند. خروجی این‌گونه سنجش‌ها، اطلاعاتی بسیار مفیدی را در زمینهٔ منابع آبی ارائه می‌کنند.

پهپادها یا وسایل هوایی بدون سرنشین، در ترکیب با سامانه‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی[۲۰] می‌توانند برای جمع‌آوری اطلاعات هندسی از بستر عرضی رودخانه و سیلاب‌دشت، به‌کار روند. اطلاعات هندسی به‌دست‌آمده از روش‌های سنجش از دور در ترکیب با مدل‌های هیدرولیکی مانند معادلهٔ مانینگ، برای برآورد غیرمستقیم دبی رودخانه، مفید هستند. درنهایت و بدون نیاز به اندازه‌گیری‌های مستقیم، می‌توان برآوردی از آبگذری رودخانه به‌دست آورد. این روش در سیلاب‌های قابل‌توجه و مقاطع رودخانه‌ای فاقد ایستگاه می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین مطرح باشد. بااین‌حال، در برآورد دبی از این روش، عدم قطعیت‌های ناشی از فاصلهٔ زمانی برداشت بین تصاویر ماهواره، وضوح تصاویر ماهواره و مدل هیدرولیکی مورداستفاده وجود دارد که نیازمند بررسی است. از بررسی یافته‌های موجود در سابقهٔ مطالعاتی می‌توان نتیجه گرفت از ماهواره‌ها برای اندازه‌گیری سطح رودخانه‌های وسیع (بیش از ۱۰۰ متر) با دقت ۵ سانتی‌متر استفاده‌شده [۱۵] و می‌توانند تغییرات ارتفاع رودخانه را با دقت کم‌تر از ۱ سانتی‌متر اندازه‌گیری کنند. ارتفاعات سطح رودخانهٔ اندازه‌گیری‌شده به‌وسیلهٔ ماهواره را می‌توان با استفاده از معادلات هیدرولیکی مانند معادلهٔ مانینگ [۱۶] و معادلات هندسهٔ هیدرولیکی خاص مقطعی از یک رودخانه [۱۷]، به دبی جریان تبدیل کرد.

یکپارچه‌سازی داده‌های حاصل از روش‌های اندازه‌گیری تراز سطح آب، با استفاده از سطح‌سنجی ماهواره‌ای و اندازه‌گیری‌های سرعت از حسگرهای چند طیفی ماکروویو نوری و چند طیفی جهت برآورد دبی رودخانه در مکان‌های فاقد ایستگاه اندازه‌گیری و برآورد سیلاب‌های قابل‌توجه، بسیار مفید خواهد بود [۱۸]. تخمین سرعت جریان رودخانه، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، با به‌کارگیری تفاوت بین مقادیر بازتاب‌شده از پیکسل‌های داخل جریان رودخانه و پیکسل‌های سطح زمین در باند فرو قرمز نزدیک، امکان‌پذیر خواهد بود [۱۹]. بررسی‌ها نشان داده است که تحلیل زمانی نسبت پیکسل‌های خشک به پیکسل‌های مرطوب، می‌تواند بیانگر تغییرات سرعت جریان و درنتیجه دبی رودخانه باشد [۲۰]. لذا، دبی رودخانه با استفادهٔ مشترک از سنجنده‌های چند طیفی MODIS، MERIS و OLCI جهت سنجش سرعت جریان و سری‌های زمانی سطح آب به‌دست‌آمده از ادغام داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، قابل‌دسترس خواهند بود [۲۱].

20. GNSS: Global Navigation Satellite Systems



شکل ۳: متداول‌ترین سنجنده‌های رقومی ماهواره‌ای جهت پایش رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مخازن آب (منبع: [۱۳])

۲-۳-۳. ابزارهای نرم‌افزاری و روش‌های هوش مصنوعی جهت پایش جریان‌های سطحی و پیکره‌های آبی

همان‌گونه که در بخش پیشین اشاره شد، پیش‌بینی دقیق رابطهٔ بین رواناب حاصل از بارندگی در یک حوضهٔ آبریز، جریان‌های رودخانه‌ای و تغییرپذیری آن‌ها، در مدیریت منابع آب و جلوگیری از خطرات سیل مورداستفاده قرار می‌گیرد. با توجه به این مسئله، پیش‌بینی‌های صحیح جریان و ویژگی‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی حوضهٔ آبریز رودخانه وابسته به درک بهتر نیازمندی‌ها و خواسته‌ها خواهد بود. برآوردها ممکن است برای دوره‌های کوتاه، مثلاً یک دورهٔ رگبار، یا دوره‌های بلندمدت ماهانه، سالانه، یا بیشتر انجام شود، اما تغییرپذیری ویژگی‌های محلی و منطقه‌ای، تعیین رابطهٔ بین بارش و جریان را با مشکل مواجه می‌سازد. مدل‌ها در درجهٔ اول، تخمینی از متغیرهای موردنظر را با استفاده از شرایط فیزیکی حاکم، فراهم می‌سازند که می‌تواند برای آزمون فرضیه‌ها یا گزینه‌هایی که در آن مشاهدات ناکافی هستند، بسیار ارزشمند باشند. به‌طور کلی، مدل‌ها چارچوبی برای پر کردن شکاف‌های موجود در اندازه‌گیری‌ها را فراهم می‌سازند که می‌تواند در به دست آوردن نتایج بهتر از نظر نمونه‌برداری، دقت، یا صحت، همراه با مشاهدات صورت‌گرفته، مورد بهره‌برداری قرار گیرد. برای پیش‌بینی جریان در مقیاس‌های زمانی

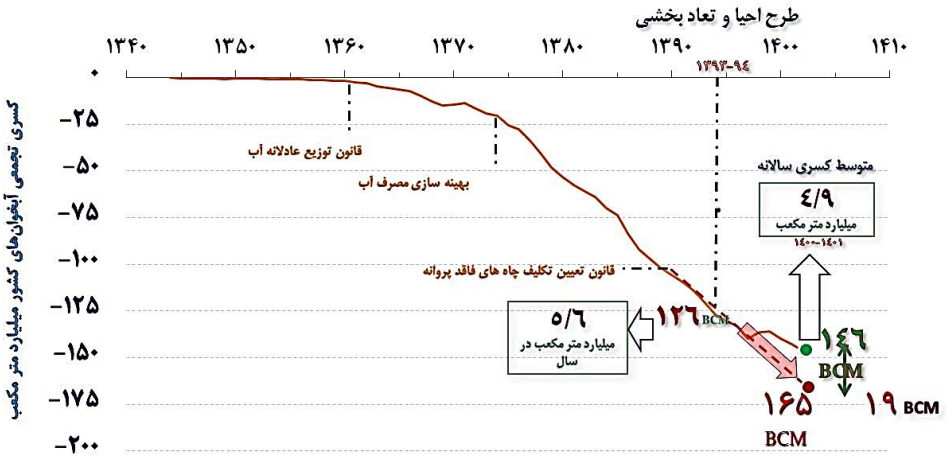
بلندمدت، اســتفاده از مدل‌های ریاضـــی و نرم‌افزارهای خاص برای تعیین و برقراری روابط قابل‌اعتماد بین بارش و جریان کمک بسیار شایانی می‌کند که تعدادی از این نرم‌افزارها و روش‌های هوش مصنوعی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: نرم‌افزارها و روش‌های هوش مصنوعی مورداستفاده در تحلیل داده‌های جریان‌های سطحی

ردیف	عنوان فارسی	عنوان لاتین
۱	شبکه‌های عصبی مصنوعی ANN	Artificial Neural Networks
۲	سامانهٔ استنتاج عصبی فازی تطبیقی	Fuzzy Inference _Adaptive Neuro System(ANFIS)
۳	مدل‌های هیدرولوژیکی مبتنی بر داده	driven hydrological models_Data
۴	روش‌های رگرسیونی چندخطی	Multiple Linear Regression(MLR)
۵	رگرسیون خودکار	Regressive(AR)_Auto
۶	میانگین متحرک رگرسیون خودکار	Regressive Moving _Auto Average(ARMA)
۷	میانگین متحرک رگرسیون خودکار یکپارچه	Regressive Integrated Moving _Auto AverageARIMA
۸	میانگین متحرک رگرسیون خودکار با ورودی‌های برون‌زا	Regressive Moving Average _Auto with Exogenous Inputs(ARMAX)
۹	شبکهٔ عصبی پیش‌خورANFIS	Feed Forward Neural Network(FFNN)
	برنامه‌ریزی ژنتیک (Genetic Programming)	
۱۰	درخت رگرسیونی	Regression Tree(RT)
۱۱	رگرسیون بردار پشتیبان حداقل مربعات	Least Square Support Vector ، Regression(LSSVR)
۱۲	برنامه‌ریزی ژنتیک چندژنی با شبکهٔ عصبی مصنوعی	_ gene Genetic Programming _Multi Generalized Reduced GRG)_Gradient(MGGP
۱۳	روش‌های الگوریتمی تکاملی	EA Evolutionary Algorithm

۳-٤. پایش آب‌های زیرزمینی

آب زیرزمینی یکی از مفیدترین و مهم‌ترین ذخایر آب شیرین است. براساس اطلاعات منتشره از آماربرداری سراسری منابع و مصارف آب کشور، سالانه حدود ۵۲/۱ درصد از برداشت‌های آب موردنیاز از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود. حدود ۶۳ درصد آب شرب روستایی و شهری، ۴۵/۴ درصد آب صنعت و خدمات و ۵۱ درصد آب کشاورزی از این منابع تأمین می‌شود [۲۲]. منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های مهم چرخهٔ هیدرولوژی در تضمین تولید غذا و تأمین آب شیرین برای شرب ایفای نقش می‌کند و به‌طور مستقیم با امنیت غذایی، تغییر اقلیم و تضمین انرژی پیوند تنگاتنگ دارد. از سوی دیگر، تخلیهٔ منابع آب زیرزمینی کشور در دهه‌های اخیر، یک مسئلهٔ جدی است. آمار و ارقام منتشرشده توسط وزارت نیرو (شکل ۴)، نشان می‌دهد تا سال ۱۴۰۲، میزان کسری تجمعی آبخوان‌های کشور حدود ۱۴۶ میلیارد متر مکعب است. این میزان بیشتر از کل آب تجدیدپذیر سالانهٔ کشور و حدود ۴۹ درصد منابع آب استراتژیک و ذخایر راهبردی کشور است. ملاحظه می‌شود طی ۱۵ سال گذشته حدود ۵۴ میلیارد مترمکعب و تنها طی ۷ سال گذشته حدود ۱۵/۸ میلیارد مترمکعب از ذخایر آب‌های زیرزمینی کشور برداشت شده است. از شکل ۴، حداکثر کسری مخزن سالیانهٔ آبخوان‌های کشور معادل ۱۰/۱ میلیارد مترمکعب مربوط به سال ۱۳۸۶ و متوسط کسری مخزن سالیانه طی ده سال اخیر حدود ۳/۲ میلیارد مترمکعب است. متوسط کسری مخزن سالانه نیز تا سال ۱۴۰۲ حدود ۴/۹ میلیارد مترمکعب است که این میزان حدود ۲۴ برابر حجم مخزن سد کرج است. [۲۲ و ۲۳].

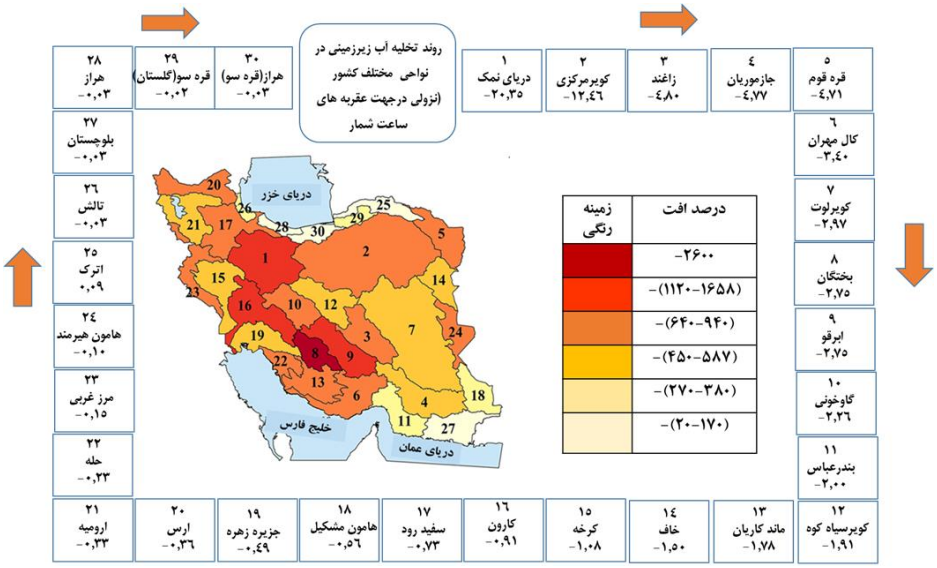


شکل ٤: روند تغییرات حجم کسری مخزن سفرهٔ آب‌های زیرزمینی کشور (منبع: [۲۲ و ۲۳])

در مطالعه‌ای که اخیراً صورت گرفته است، نقشهٔ توزیع ناحیه‌ای تخلیهٔ منابع آب زیرزمینی در طول سال‌های

۱۳۸۱ تا ۱۳۹۴ در حوضه‌های مهم ایران انجام شده است، مطابق شکل ۵، حجم کل تخلیهٔ ذخیرهٔ سفرهٔ آب زیرزمینی را برحسب میلیارد مترمکعب به‌صورت نزولی در نواحی مختلف کشور نشان می‌دهد و نشانگر آن است که افت حجم کل سفره‌های آب زیرزمینی کشور، در این بازهٔ زمانی برابر با ۷۳/۷ میلیارد مترمکعب بوده است [۲۴]. لذا، آگاهی از قابل دسترس بودن منابع آب زیرزمینی، به‌عنوان مؤلفهٔ کلیدی در چرخهٔ آبی، در تصمیم‌سازی‌های مدیریت منابع آب از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود.

استفاده از فناوری‌های نو و هوشمند نظیر، فناوری سنجش از دور، جهت پایش تغییرات و نوسانات مخازن آب زیرزمینی یا آبخوان‌ها می‌تواند از مزیت فوق‌العاده‌ای در تصمیم‌سازی‌ها و سیاست‌گذاری‌های منابع آب برخوردار باشد. همان‌گونه که قبلاً هم اشاره شد، مشاهدات ماهواره‌ای و هوا زاد (یا هوابرد) در فهم و درک دسترسی به منابع آب در مقیاس محلی و منطقه‌ای، نهضت جدیدی در تهیهٔ آمار و اطلاعات زمان واقعی پدیده‌های طبیعی آب، ازجمله منابع آب زیرزمینی، ایجاد کرده است. ماهواره‌های مشاهدات زمینی و سامانه‌های هوا زاد (یا هوابرد) می‌توانند تصویر گسترده‌ای از پوشش مکانی، و بسیار دقیق، تغییر مخزن آب زیرزمینی و ساختار آبخوان را در یک گسترهٔ بزرگ فراهم سازند. این رویداد بزرگ در سنجش داده‌ها می‌تواند در بهینه‌سازی مدل‌های آب زیرزمینی و آگاهی دادن به تصمیم‌گیران، مدیران منابع آب و ذینفعان بسیار نقش‌آفرین باشد [۲۵]. با توجه به توضیحات فوق و اهمیت سنجش و پایش زمان واقعی حجم و تغییرات سفره‌های آب زیرزمینی، فناوری‌های نو و هوشمند مورداستفاده در این زمینه به‌صورت اختصار بیان می‌شود.



شکل ۵: نقشهٔ توزیع ناحیه‌ای افت حجمی آب زیرزمینی بین سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۴ (منبع: [۲۴])

۱-٤-۳. روش‌های نو و هوشمند سخت‌افزاری مورداستفاده در پایش آب‌های زیرزمینی

برای اندازه‌گیری و پایش مداوم منابع آب زیرزمینی، روش‌های هوشمند متعددی به‌قرار زیر: گرانش‌سنجی به‌وسیلهٔ Gravity Recovery and Climate Experiment (GRASE)و یا Gravity Recovery and Climate Experiment Follow on (GRASE FO) [۲۶]، تداخل‌سنجی راداری امواج Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)[۲۷]، اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای جابه‌جایی سطح زمین به‌وسیلهٔ Global Navigation Satellite System (GNSS)[۲۸]، ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای [۲۹]، اندازه‌گیری با رادارهای ارتفاع‌سنجی مجهز به لیزر (Lidar) [۳۰]، سامانه‌های الکترومغناطیسی هوا زاد (یا هوابرد) Airborne Electromagnetic AEM[۳۱] و اندازه‌گیری‌های فرو قرمز/گرمایی تبخیر ـــــ تعرق به‌عنوان نشانه‌ای از مصرف آب زیرزمینی [۳۲] مورداستفاده هستند که برای استفادهٔ تشریحی و ساختاری تفصیلی، می‌توان از منابع ارجاع‌شده استفاده کرد.

۲-٤-۳. چگونگی بهره‌برداری از داده‌های سنجش از دور در پایش آب‌های زیرزمینی

روش‌های فناورانهٔ موردبحث در بالا، از نظر مکانی و زمانی متغیر بوده و هرکدام دریک محدودهٔ زمانی ـــــ مکانی معین قابل استفاده هستند. لذا، تجمیع رویکردهای مختلف سنجش از دور تسهیل‌کنندهٔ کاربردپذیری روش‌های ارائه‌شده خواهد بود. به‌طور خاص، ترکیب کردن داده‌های تغییرات سطحی زمین با رویکردهای دیگر، وسیله‌ای برای درک واکنش‌های زمین‌شناختی حاصل از تغییرات آب زیرزمینی را فراهم خواهد کرد که به کمی‌سازی عدم اطمینان کمک می‌کند. برای مثال در بررسی‌های انجام‌شده در سنترال ولی کالیفرنیا [۳۳ و ۳۴]، درحالی‌که روش‌های گرانشی و تغییرات سطحی به‌خوبی با داده‌ها و کشش سنج‌ها اعتبارسنجی شدند، ولی در نتایج بزرگ‌مقیاس GRACE/GRACE ـــ FO ناهمگونی زمین‌شناختی پیچیده که باعث ایجاد واکنش غیرخطی زمین می‌شوند، استفاده از یک روش خاص را محدود می‌سازد که رفع این مشکلات نیاز به بررسی و انجام کار پژوهشی ویژه خواهد داشت. تحقیقات جدید نشان می‌دهد [۳۵] که یکپارچه‌سازی داده‌های مختلف سنجش از دور قادر به تخمین و پایش بهتر و موفقیت‌آمیز تغییرات حجم آب زیرزمینی، نسبت به GRACE، خواهد بود. استفاده از روش‌های یکپارچه‌سازی داده‌ها، فهم روابط پویایی زمانی ـــ مکانی بین حجم آب زیرزمینی و واکنش کشسان/غیرکشسان زمین‌شناختی را امکان‌پذیر می‌سازند [۳۵].

۳-٤-۳. فناوری‌های نرم‌افزاری و مدل کردن آب‌های زیرزمینی

همان‌گونه که در بخش اندازه‌گیری و پایش اجزای جریان‌های سطحی و پیکره‌های آبی بیان شد، مدل‌های عددی می‌توانند به‌عنوان یک ابزار مهم و توانمند در ارتباط دادن مشاهدات سنجش از دور به ویژگی‌های کمی و کیفی آب زیرزمینی یا شرایط موردنظر و تخمین بلندمدت آن‌ها ایفای نقش کنند [۳۶]. برای مثال،InSAR وGNSS دسته داده‌هایی را برای تخمین تغییرات سطحی فراهم می‌کنند که اساساً تابعی از تغییر فشار منفذی در بین تشکیلات زمین‌شناختی آبخوان‌ها، به‌ویژه رس‌هاست. با اینکه این امر رابطهٔ بین جریان آب زیرزمینی در آبخوان را معین می‌کند ولی رابطهٔ به‌دست‌آمده، به‌ویژه به هنگام تغییر غیرکشسان، پیچیده و غیرخطی خواهد بود. به این دلیل، ارتباط دادن تجربی اندازه‌گیری‌های تغییر شکل به سامانه‌های آبی، غالباً مشکل است. در این حالت‌ها، مدل کردن سازوکارهای فیزیکی برای تعیین تغییر شکل سطحی، می‌تواند دریافت اطلاعات بیشتری درمورد واکنش سامانهٔ آبخوان جهت برآورد برداشت یا تغذیهٔ آب زیرزمینی را فراهم سازد. به‌طور مشابه، اگرچه داده‌های GRACE، برآوردی از تغییر حجم کل آب زیرزمینی را ممکن می‌سازد، اما نوعاً نیاز به یک مدل عددی قوی دارد تا بتوان مؤلفه‌های آب زیرزمینی، رطوبت خاک، آب معادل برفاب و آب سطحی را از هم تفکیک کرد، یا برای دقت بیشتر، مقیاس‌های کوچک‌تری را به‌کار گرفت. مدل‌هایی که توانایی یکپارچه‌سازی داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های مختلف سنجش از دور و نیز داده‌های محلی، در مقیاس‌های مناسب دارا هستند، در استفادهٔ داده‌های سنجش از دور برای ارزیابی آب زیرزمینی اهمیت خواهند داشت.

امروزه، مدل‌های عددی شبیه‌سازی حجم و جریان آب زیرزمینی با زمینه‌ها و دقت‌های مختلف، برای دستیابی به اهداف متنوع قابل‌دسترس هستند. با توجه به اینکه یک مدل، ارائه‌ای تفکیک‌شده و آرمانی از واقعیت‌هاست، تصمیم‌گیری در رابطه با واقعیت‌گرایی و پیچیدگی فرایندهای هیدرولوژیکی شبیه‌سازی‌شده، بستگی به کاربرد و فراهم بودن زیرساخت‌های رایانه‌ای و همچنین قابل‌دسترس بودن سری‌های زمانی و مکانی داده‌ها و مؤلفه‌های هیدرودینامیکی دارد.

مدل‌های موجود می‌توانند فیزیک خاک، مثلاً فشار حاصل از جریان عرضی و قائم درون ستونی از خاک با شرایط اشباع متغیر، در مقیاس محلی مناسب با مدیریت آب را با استفاده از معادلهٔ ریچاردز، بیان کنند. این مدل‌ها برای دست‌یابی به فیزیک مناسب، نیاز به دقت تفکیک بیشتر دارند. با توجه به اینکه این نوع مدل‌ها در حوضه‌های کوچک‌تر بهره‌برداری می‌شوند، نوعاً برای مشاهدات بزرگ‌مقیاس (نظیر شبکه‌های گرانشی فضا ـــ زاد یاGNSS) مناسب نیستند و بیشتر برای مشاهدات در مقیاس محلی، نظیر مشاهدات چاه‌ها و InSAR مناسب هستند. بنابراین، داده‌های محلی مثل مؤلفه‌های مربوط به چاه‌ها، اغلب برای واسنجی مدل‌های آب زیرزمینی مورداستفاده قرارمی

گیرند، برای مثال، در مدل ParFlow [۳۷] برای جریان اشباع متغیر زیرسطحی سه‌بعدی از معادلهٔ ریچاردز و برای جریان سطحی از معادلات جریان کم‌عمق استفاده می‌شود. این مدل بودجهٔ کل انرژی، فرایندهای پوشش گیاهی و برف را ارائه کرده و از حلگرهای قوی غیرخطی و حلگرهای چند شبکه‌ای خطی بهره‌مند است و اجرای هم‌زمان رویکردها و ساختارهای متنوع را ممکن می‌سازد. اگرچه، ParFlow از مزیت یکپارچه‌سازی مدل‌های آب سطحی و زیرزمینی برخوردار است، اما قادر به شبیه‌سازی تغییر سطح زمین نیست که کاربرد آن را برای یکپارچه‌سازی دسته داده‌های InSAR یا GNSS محدود می‌سازد.MODFLOW و نسخهٔ جدید آن GMS مجموعه‌ای از بسته‌های نرم‌افزاری هستند که شبیه‌سازی ریاضی جریان و کیفیت آب‌های زیرزمینی را با استفاده از روش تفاضل ـ محدود انجام می‌دهند. این بستهٔ نرم‌افزاری برای آبخوان‌های کوچک‌مقیاس، یا منطقه‌ای، مناسب است و بسته‌های مختلف، مثل SEAWAT برای جریان با چگالی متغیر و شبیه‌سازی مناطق ساحلی، MT3D برای شبیه‌سازی حمل مواد و نسخهٔ اصلاح‌شده MODFLOW ـــ OHWM برای استفاده در سامانهٔ پیوستهٔ آب سطحی و آب زیرزمینی کاربرد دارند. علاوه بر این مدل‌ها،FEFLOW،SUTRA و HydroGeoSphere، انواع مدل‌های مختلف شناخته‌شدهٔ دیگری هستند که برای بررسی جریان و آلودگی آب‌های زیرزمینی و شبیه‌سازی محیط‌های اشباع و غیراشباع مورداستفاده قرار می‌گیرند [۳۸].

مدل‌های سامانهٔ زمینی، به‌دلیل برقرار بودن پیوند بین فرایندهای آب و انرژی در زیر سطح زمین، روی زمین و هوا سپهر پایین، از توجه خاصی برخوردارند. اندازه‌گیری‌های تغییر شکل سطحی، اگرچه اطلاعات هیدرولوژیکی بسیار مفیدی را فراهم می‌سازند، اما به‌علت داشتن رابطهٔ غیرخطی بین سطوح آب زیرزمینی و تغییر شکل زمین، در برقرار کردن رابطهٔ بین پویایی آبخوان با چالش مواجه هستند. تاکنون، تعدادی از مدل‌های ارتباط‌دهندهٔ تغییر شکل زمین با سطح آب، با استفاده از داده‌های کشش‌سنجی، GNSS وInSAR موردبررسی و اجرا قرار گرفته‌اند [۳۹ و ۴۰]. ترکیب مدل‌های هیدرولوژیکی با مدل‌های تغییر شکل سطح زمین از موضوعات موردتوجه در دهه‌های پیش رو خواهد بود تا بتوان اندازه‌گیری‌های تغییرات هیدرولوژیکی حاصل از GRACE و چاه‌های مشاهده‌ای را، با اندازه‌گیری‌های تغییر شکل سطح زمین حاصل از InSAR یا GNSS، در یک ساختار عددی ترکیب کرد [۴۰]. چنین ترکیب‌های هم‌زمان داده‌های مستقل چندگانه، می‌توانند دید بهتری از تغییر بین فرایندهای آب زیرزمینی را فراهم آورند.

٤. تجزیه و تحلیل

طی این بخش، مروری تحلیلی بر سطح کاربرد فناوری‌های نوین نرم‌افزاری و سخت‌افزاری پیش اشاره‌شده در

پایش مؤلفه‌های چرخهٔ هیدرولوژیکی کشور ارائه می‌شود. تجزیه‌وتحلیل ارائه‌شده در این بخش بر مبنای جمع‌آوری دستورالعمل‌ها، استانداردها و مشخصات فنی ادوات و تجهیزات مورداستفادهٔ وزارت نیرو و سازمان هواشناسی کشور به‌عنوان مراجع اصلی پایش داده‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی، تهیهٔ پرسش‌نامه از خبرگان و بازدید از ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی و چاه‌های مشاهده‌ای، استوار است.

۱-٤. تحلیل وضـــعیت کاربرد فناوری‌های نوین در اندازه‌گیری و پایش بارندگی‌ها و پیکره‌های آبی

بررسی‌های انجام‌شده و اطلاعات دریافتی از سازمان‌های مسئول مدیریت آب کشور گویای آن است که به استثنای تعدادی از فناوری‌های پایش و اندازه‌گیری بارندگی‌ها و استفاده از تعداد محدودی از ابزار آب‌سنجی نظیر سطح‌سنج ثبات شـــفت انکودر و ســـرعت‌ســـنج پروانه‌ای، فنجانی (مولینه)، دیتالاگرها در اندازه‌گیری آب‌های زیرزمینی، بقیهٔ فناوری‌های بیان‌شـــده در بخش‌های فوق در پایش بارندگی‌ها، جریان رودخانه‌ای و پیکره‌های آبی، اندازه‌گیری مشخصات هیدرولیکی جریان‌های سطحی و منابع آب زیرزمینی قابل‌دسترس نیستند. در این بررسی‌ها اشاره شده اســـت که تعدادی از فناوری‌ها و تجهیزات نوین را می‌توان از طریق تحقیق و توســـعه یا اســـتفاده از ظرفیت‌های شرکت‌های دانش‌بنیان و پارک‌های علم و فناوری و بومی‌سازی آن‌ها در کشور تولید کرد. برای این امر لازم است در افق الگوی پیشرفت اسلامی ایرانی، ضمن جهت‌گیری‌های آموزشی و پژوهشی شایسته در سطوح مختلف نظام آموزشی، برای بهره‌گیری از استعدادها و تلاش‌های نسل جوان و اندوخته‌های علمی و تجربی استادان دانشگاه‌ها و خبرگان جامعه، برنامه‌های توسعه‌ای دقیق، طراحی و اجرا شوند تا با سرمایه‌گذاری کافی بتوان به جایگاه مطلوب در عرصهٔ استفادهٔ فناوری‌های نو و هوشمند مدیریت منابع آب دست یافت.

لازم به تأکید است که اطلاعات ارائه‌شده نشان‌دهندهٔ وضعیت کشور در مقایسه با وضع کنونی جهانی است که با شتابی دوچندان برای توسعهٔ فناوری‌های نو در حال برنامه‌ریزی و پیشرفت است که توجه به این نکته، تأکید بر داشتن سرعتی و شتاب دوچندان در این زمینه خواهد داشت. برای آگاهی از وضع موجود و رسیدن به شرایط مطلوب وضعیت کاربرد فناوری‌های نو و هوشمند در اندازه‌گیری و پایش مؤلفه‌های منابع آب در چرخهٔ هیدرولوژیکی، ارزیابی وضـعیت کاربرد فناوری‌های نوین سـخت‌افزاری و نرم‌افزاری برداشـت داده‌های بارندگی‌ها و جریان‌های سـطحی، همراه با ارائهٔ راهکارهای تحقیق و توســعه و امکان تولید داخلی و بومی‌ســازی توســط شــرک‌های دانش‌بنیان و پارک‌های علم و فناوری، به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. از جدول ۳ ملاحظه می‌شود از مجموع ۲۶ فناوری سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مرتبط با برداشت‌های هیدرومتری که طی این مقاله شناخته شده است، ۴ فناوری

به‌طور گسترده در عملیات هیدرومتری کشور استفاده می‌شود، ۹ فناوری در کشور به مرز دانش و بسط توسط شرکت‌های دانش‌بنیان داخلی رسیده است و ۱۵ فناوری در مرحلهٔ تحقیق و توسعه در کشور است. سه دسته فناوری نرم‌افزاری شناخته‌شده شامل روش سرعت مشخصه، روش‌های هوشمند مصنوعی و سنجش از دور نیز گرچه موردتوجه محققان قرار دارد، اما برای بسط و رسیدن به مرز دانش نیاز به توجه بیشتری دارد.

جدول ۲: ارزیابی وضعیت کاربرد فناوری‌های نوین سخت‌افزاری و نرم‌افزاری برداشت بارندگی‌ها در کشور

طبقه‌بندی فناوری	نوع فناوری	وضعیت برداشت داده‌های بارندگی کشور	امکان تحقیق و توسعه در کشور	رسیدن به مرز دانش و بسط فناوری توسط شرکت‌های دانش‌بنیان داخلی
فناوری‌های نوین سخت‌افزاری	رادار هواشناسی، ایستگاه‌های سنجش خودکار برف برای ارتفاع	+ (داده‌برداری محدود)	+	-
	ماهوارهٔ هواشناسی، بالشتک اندازه‌گیری برف	-	√	-
	دیتالاگر باران‌سنجی، دستگاه رادیوسوند، ایستگاه خودکار هواشناسی، بویه‌های هواشناسی (ایستگاه‌های خودکار مستقر روی دریا)، گراف باران‌نگار، باران‌نگار صفحه مایل	√	√	-
	توضیح: ۱- در حال حاضر فناوری ساخت هیچ‌کدام از ابزار فوق که قابل‌مقایسه با کشورهای پیشرو باشد، در ایران وجود ندارد. ابزارهای معدود ارائه‌شده توسط شرکت‌های داخلی از دقت و کیفیت پایین برخوردارند و بنا به اطلاعات دریافت‌شده، در سازمان هواشناسی کشور مورداستفاده قرار نمی‌گیرند. ۲- تولید همهٔ ابزار هواشناسی در کشور در مراحل تحقیق و توسعه است و نیازمند سرمایه‌گذاری کلان برای دستیابی به فناوری ساخت است. ۳- در مورد رادارها، قبلاً تحقیقاتی در مرکز فضایی ایران انجام شد و کار تا ۶۰ درصد پیش رفت ولی بعداً رها شد. در حال حاضر ۱۰ رادار c ـــــ band ساخت خارج در کشور وجود دارد. در برخی نواحی پیچیده ازنظر برجسته نگاری، مثل مناطق کوهستانی البرز و زاگرس به رادار x ـ band نیاز است. ٤- درمورد رادیوسوند قبلاً یک شرکت داخلی توانست مطابق با استانداردهای جهانی آن را تولید کند (تا ۱۰۰۰ عدد در سال) ولی به تولید انبوه نرسید و الآن از خارج کشور وارد می‌شود. لازم برای موفقیت پیش‌بینی‌های جوی استفاده از رادیوسوندها بسیار حیاتی و مهم هستند که نیاز به سرمایه‌گذاری و استفاده از ظرفیت‌های پژوهشی و شرکت‌های دانش‌بنیان و پارک‌های علم و فناوری خواهد بود.			

طبقه‌بندی فناوری	نوع فناوری	وضعیت برداشت داده‌های بارندگی کشور	امکان تحقیق و توسعه در کشور	رسیدن به مرز دانش و بسط فناوری توسط شرکت‌های دانش‌بنیان داخلی
فناوری‌های نوین نرم‌افزاری	مدل اقلیم جهانی (Global Climate Model)، داده‌گواری (Data Assimilation)، تحلیل و پردازش سینوپتیکی داده‌های هواشناسی	-	√ (تخصص و تجربهٔ کافی در کشور وجود دارد، ولی وابسته به خارج هستیم)	√

جدول ۳: ارزیابی وضعیت کاربرد فناوری‌های نوین سخت‌افزاری و نرم‌افزاری برداشت پیکره‌های آب سطحی کشور

طبقه‌بندی فناوری	نوع فناوری	توسعهٔ تحقیق در سطح کشور	رسیدن به مرز دانش و بسط توسط شرکت‌های دانش‌بنیان	استفادهٔ گسترده در برداشت داده‌های جریان سطحی کشور
فناوری‌های نوین سخت‌افزاری	سطح‌سنج الکترونیکی شفت انکودر	√	√	√
	سطح‌سنج گازی	-	-	-
	سطح‌سنج ترنسدیوسر فشاری	√	√	-
	سطح‌سنج وزنی	√	√	-
	سطح‌سنج غیرتماسی لیزری	√	√	√
	سطح‌سنج غیر تماسی التراسونیک	√	√	√
	سطح‌سنج غیر تماسی راداری	√	√	-
	اکوساندر (آوانگار)	√	-	-
	سرعت‌سنج پروانه‌ای، فنجانی (مولینه)	√	√	√
	سرعت‌سنج الکترومغناطیسی (Electromagnetic flow meter)	-	-	-
	سرعت‌سنج صوتی دوپلری (Acoustic Doppler Velocimeter, ADV)	-	-	-

طبقه‌بندی فناوری	نوع فناوری	توسعهٔ تحقیق در سطح کشور	رسیدن به مرز دانش و بسط توسط شرکت‌های دانش‌بنیان	استفادهٔ گسترده در برداشت داده‌های جریان سطحی کشور
	سرعت‌سنج دوپلری نگاه جانبی (Side Looking Doppler Sensor)	-	-	-
	سرعت‌سنج موج صوتی دوپلری افقی گرا (ADCP: Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler ـ H)	-	-	-
	سرعت‌سنج فراصوتی داپلر کیولاینر (OTT Qliner)	-	-	-
	سرعت‌سنج موج صوتی دوپلری (ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler)	√	-	-
	تیکه نگار صوتی رودخانه‌ای (FATS: Fluvial Acoustic Tomography System)	√	√	-
	سرعت‌سنج صوتی زمان عبوری (Transit Time)	-	-	-
	سرعت‌سنج موج التراسونیک از نوع داپلر (Pulsed Wave Doppler System)	-	-	-
	سرعت‌سنج تصویری ذرات در مقیاس بزرگ (LSPIV)	√	-	-
	سرعت‌سنج غیرتماسی با استفاده از پهپاد	-	-	-
	سرعت‌سنج غیرتماسی راداری (Surface Velocity Radar)	-	-	-
	سیستم برآورد دبی با استفاده از ردیاب (Tracer Dilution method)	-	-	-
	پل‌های کابلی بدون سرنشین (Unmanned Cableways)	√	√	-
فناوری‌های نوین نرم‌افزاری	محاسبهٔ دبی از روش سرعت مشخصه (Index Velocity)	√	-	-
	دبی‌سنجی بر مبنای روش‌های هوشمند مصنوعی	√	-	-
	دبی‌سنجی بر مبنای روش‌های سنجش از دور	√	-	-

٤-٢. تحلیل وضعیت کاربرد فناوری‌های نو و هوشمند در برداشت داده‌های آب‌های زیرزمینی در کشور

مطالعه و پایش آب‌های زیرزمینی کشور معمولاً به‌صورت میدانی و محلی و به‌صورت ناکافی از طریق تکمیل مطالعات ژئوفیزیک دشت‌ها؛ حفر چاه‌های اکتشافی؛ آزمایش پمپاژ؛ و تکمیل شبکهٔ پایش زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی و کیفیت آب، صورت می‌گیرد و بیشتر مطالعات به‌صورت تکراری و فقط با استفاده از داده‌های تراز سطح آب زیرزمینی انجام می‌شود. به‌عبارت دیگر یا شناخت دقیقی از هندسهٔ آبخوان، مرزهای سفره‌های آب زیرزمینی، ضرایب هیدرودینامیکی سفره‌ها، رفتارسنجی آبخوان نسبت به تنش‌های وارده، میزان تجدیدپذیری، بیلان آب‌های زیرزمینی، روند کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی در مقیاس‌های مکانی و زمانی، وجود ندارد. به‌عبارت دیگر، موجودیت یا قابل دسترس بودن آب زیرزمینی دشت‌های کشور که اساس و مبنای برنامه‌ریزی و مدیریت آب زیرزمینی است، هنوز ناشناخته است. علت این عدم موفقیت را می‌توان به عوامل همچون عدم تجهیز تمام چاه‌های بهره‌برداری به کنتور هوشمند؛ عدم استفاده از تجهیزات و فناوری‌های نو و هوشمند (دفتری و میدانی)؛ عدم به‌روزرسانی روش‌های محاسباتی بیلان آب و آب تجدیدپذیر؛ عدم استفاده از ردیاب‌ها به‌منظور شناخت مرزها، ورودی و خروجی آبخوان و به‌طورکلی حوضهٔ آبخوان[21] به‌ویژه در دشت‌ها با سازند کربناته، نسبت داد.

٥. نتیجه‌گیری

در مطالعهٔ حاضر، تلاش شد تا آخرین فناوری‌های توسعه‌یافتهٔ نرم‌افزاری و سخت‌افزاری در اندازه‌گیری یا برآورد مؤلفه‌های چرخهٔ هیدرولوژی را، براساس تجربیات جهانی و آخرین نتایج پژوهشی انتشاریافته، جمع‌بندی کرد و یک ارزیابی کلی از فاصلهٔ وضعیت کنونی کشور با استقرار فناوری‌های مورداستفاده در جهان را ارائه داد. بررسی نشان می‌دهد که ظهور فناوری‌های نو و هوشمند و هوش مصنوعی و استفاده از آن‌ها تحول شگرفی در میدان‌های اقتصادی، اجتماعی و سیاسی جهان به وجود آورده است و بدون شک، سیاست‌گذاری‌ها، پایش و حسابداری منابع آب، در مقیاس‌های زمانی و مکانی کوچک و بزرگ نیز، متأثر از این پیشرفت‌های شتابدار خواهد بود. به‌عبارت دیگر، استفاده از مدیریت هوشمند منابع آب می‌تواند به اقدامات کارآمد در فرایند دریافت و ذخیرهٔ اطلاعات زمان واقعی، دقیق، سریع، مطمئن و جامع در چرخهٔ آبی منجر شود و به‌عنوان یاریگری پرتوان، نقش مهمی در سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های مدیریت جامع منابع آب، و نهایتاً در حکمرانی آب، ایفا کند. به نظر می‌رسد ضریب نفوذ به‌کارگیری فناوری‌های نوین و هوشمند پایش مؤلفه‌های منابع آب در مدیریت بخش آب کشور لندک بوده و

21. aquifer basin

شرکت‌های تولیدکنندهٔ داخلی نیز رغبتی به سرمایه‌گذاری بخش تحقیق و توسعه در این بخش ندارند. برای نمونه مقالهٔ حاضر نشان داد از مجموع ۲۶ فناوری سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مرتبط با برداشت‌های هیدرومتری، تعداد ۱۱ فناوری موردبررسی برای تحقیق و توسعه نیست و برای رسیدن به مرز دانش در کشور نیازمند مطالعهٔ بیشتر است. با توجه به فاصلهٔ بسیار معنی‌دار کشور از سطح قابل‌قبول بین‌المللی در بهره‌برداری و به‌کارگیری فناوری‌های نو و هوشمند، هوش مصنوعی، حسگرها و فناوری‌های سنجش از دور، برای دریافت بازده بالا و حسابداری دقیق منابع آب، تحقق اصل شفافیت در حکمرانی آب، توجه جدی به جبران این فاصله در افق اجرایی الگوی پیشرفت اسلامی ـ ایرانی، مورد تأکید و الزام‌آور خواهد بود.

٦. پیشنهادات

با توجه به تجربه‌های بین‌المللی، در رابطه با توسعهٔ بسیار پویا و پرشتاب در استفادهٔ گسترده از فناوری‌های نو و هوشمند سخت‌افزاری و نرم‌افزاری در مدیریت منابع آب، بایستی با تجربه‌آموزی از گذشته، با دوراندیشی، سیاست‌گذاری و تدوین برنامه‌های اجرایی، اقدامات مؤثر و پرشتابی در افق اجرایی الگوی پیشرفت اسلامی ایرانی صورت گیرد. در این راستا، پیشنهاد می‌شود تا طی مطالعه‌ای جامع، در قالب یک نقشهٔ راه توانمند، موارد زیر موردتوجه قرار گیرد و به‌عنوان یک سند بالادستی در مسیر توسعهٔ فناوری‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری نو و هوشمند جهت برداشت و تحلیل داده‌های چرخه‌های آبی، در یک زنجیرهٔ به‌هم‌پیوسته و دستیابی به مرز دانش موردتوجه قرار گیرد و تحول چشمگیر در نوسازی زیرساخت‌های داده‌برداری و داده‌پردازی منابع آب صورت گیرد. برای انجام این امر مهم توصیه‌های زیر پیشنهاد می‌شوند:

۱. آسیب‌شناسی تجهیزات و رویکردهای مورداستفادهٔ کنونی در کشور جهت اندازه‌گیری و پایش مؤلفه‌های چرخهٔ آبی؛

۲. ارزیابی فاصلهٔ تجهیزات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری کنونی اندازه‌گیری و سنجش مؤلفه‌های چرخهٔ آبی در کشور با نمونه‌های مطلوب جهانی؛

۳. اولویت‌بندی نیازهای داخلی به توسعهٔ فناوری‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری نو و هوشمند جهت سنجش مؤلفه‌های چرخهٔ آبی با توجه به عواملی نظیر سطح عدم قطعیت رویکردهای جاری کشور در اندازه‌گیری و پایش آن‌ها، درجهٔ تأثیر مؤلفه‌ها و میزان اثربخشی فناوری‌های جدید برای بهبودبخشی دقت اندازه‌گیری مؤلفه‌های چرخهٔ آبی نسبت به رویکردهای جاری در کشور؛

۴. جهت‌گیری‌های آموزشی و پژوهشی شایسته در سطوح مختلف نظام آموزشی کشور برای بهره‌گیری از

استعدادها و تلاش‌های نسل جوان و اندوخته‌های علمی و تجربی استادان دانشگاه‌ها و خبرگان جامعه، تدوین برنامه‌های دقیق و اجرایی جهت دستیابی به جایگاه مطلوب در عرصهٔ علمی برای استفاده از فناوری‌های نو و هوشمند مدیریت منابع آب؛

۵. تدوین و اجرای برنامه‌های ترویجی برای کاربران و ذینفعان منابع آب در سطوح مختلف؛

۶. امکان‌سنجی توسعهٔ فناوری‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری اندازه‌گیری و پایش مؤلفه‌های چرخهٔ آبی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت با توجه به سطح دانش شرکت‌های دانش‌بنیان داخلی؛

۷. فعال کردن پارک‌های علم و فناوری برای استفاده از ظرفیت‌های علمی و فنی موجود در بخش‌های خصوصی و عمومی جامعه برای رفع نیازهای فناوری‌های نو و هوشمند اندازه‌گیری و پایش مؤلفه‌های چرخهٔ آبی در کشور؛

۸. پیش‌بینی، تخصیص و پایدار کردن منابع مالی لازم برای مطالعه، پژوهش، برنامه‌ریزی، بومی‌سازی، و تهیه و ساخت تجهیزات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری هوشمند موردنیاز، رقابت‌پذیر با دنیا، جهت اندازه‌گیری و پایش مؤلفه‌های چرخهٔ آبی؛

۹. فراهم ساختن زمینه‌های همکاری بین نهادهای مرتبط با مدیریت آب، در راستای ایجاد زیرساخت‌های سخت‌افزاری توانمند جهت دریافت اطلاعات، تولید و ارسال داده در یک بستر الکترونیکی و نیز زیرساخت‌های نرم‌افزاری کارآمد جهت پردازش و ذخیره‌سازی داده‌ها در یک بانک‌های اطلاعاتی؛

۱۰. بازتعریف چرخهٔ برداشت، تحلیل، ذخیره و ارائهٔ شفاف و قابل‌دسترس اطلاعات منابع آب در کشور. در این رابطه می‌توان از تجربیات کشورهای فعال در این زمینه نظیر France– (SIE) فرانسه، (AWRIS) استرالیا، India WRIS هندوستان و (USGS) ایالات‌متحده و ... استفاده کرد؛

۱۱. تنظیم «برنامهٔ راهبردی هوشمندسازی پایش منابع و مصارف آب کشور» و ایجاد «سازمان متولی».

همچنین برای گذر از شرایط نامطلوب پایش و حفاظت از منابع آب‌های زیرزمینی کشور، انجام موارد زیر مورد تأکید هستند:

- هوشمند سازی سامانه مدیریت آب‌های زیرزمینی جهت سهولت مشاهده و دریافت برخط آخرین وضعیت آبخوان‌ها،
- استفاده از فناوری‌های نو و هوشمند در مدیریت آب‌های زیرزمینی (بخش مطالعات آب زیرزمینی)؛
- استفادهٔ گسترده از هوش مصنوعی، برای پیش‌بینی روند تغییر تراز سطح آب زیرزمینی و پایش کیفیت آن؛
- استفاده از روش‌ها و فناوری‌های سنجش از دور. همان‌گونه که در بخش‌های بالا بیان شد، بخشی از این

فناوری‌ها، نظیر InSAR و AEM قابل بومی‌سازی توسط مؤسسات پژوهشی و شرکت‌های دانش‌بنیان در کشور هستند و در موارد دیگر ناگزیر باید از امکانات و تجهیزات فعال در دنیا بهره‌مند شد؛

- استفاده از ردیاب‌ها برای شناسایی سفره‌های آب‌های زیرزمینی. در حال حاضر آنالیز ایزوتوپ پایدار در کشور صورت می‌گیرد و می‌توان از این فرصت برای ردیابی منابع آب زیرزمینی و شناخت مرزهای ورودی و خروجی و حریم حوضهٔ آبخوان استفاده کرد. گفتنی است که استفاده از ایزوتوپ پایدار و هیدروژئوشیمی و حرارت، به‌عنوان ردیاب، نیز می‌تواند به شناخت پیکره‌های آب زیرزمینی کمک کند.

در پایان مجدداً تأکید می شود که در عرصهٔ دنیای مجهز به ابزار هوشمند، فناورانه و توسعهٔ شتابدار و شگفت‌انگیز آن‌ها در این عرصه، توصیه‌های جدی برای برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری در راستای تجهیز فناورانهٔ زنجیرهٔ اندازه‌گیری و پایش چرخهٔ آبی کشور در افق اجرایی الگوی پیشرفت اسلامی ـــــ ایرانی الزام‌آور بوده و پیش‌بینی راهکارها مورد تأکید خواهد بود.

تشکر و قدردانی: مقالهٔ حاضر با حمایت مرکز الگوی اسلامی ـــــ ایرانی پیشرفت، تهیه شده است. بدین‌وسیله نویسندگان از حمایت‌های معنوی و مادی مرکز الگوی اسلامی ـ ایرانی پیشرفت، قدردانی می‌کنند.

تأییدیه‌های اخلاقی، تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان: نویسندهٔ اول ۸۰ درصد و نویسنده دوم ۲۰ درصد.

منابع مالی/حمایت‌ها: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

References

1. Akhmouch, A, Nunes Correia, F, The 12 OECD Principles on Water Governance–When Science Meets Policy, *Util. Policy*, 2016; 43: 14–20.
2. Araral, E, Wang, Y, Water Governance 2.0: A Review and Second Generation Research Agenda. *Water Resour. Manag*, 2013; 27 (11): 3945–3957.
3. Schneider, U, Finger, P, Meyer ـ Christoffer, A, Rustemeier, E, Ziese, M, Becker, A, Evaluating the Hydrological Cycle Over Land Using the Newly ـ Corrected Precipitation Climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). *Atmosphere*, 2017; 8: 52.
4. Groisman, PY, Knight, RW, Karl, TR, Easterling, DR, Sun, B, Lawrimore, JH, Contemporary Changes of the Hydrological Cycle Over the Contiguous United States: Trends Derived from In Situ Observations. *Hydrometeorol*, 5, 2004; 64–

85.

5. WMO Global Telecommunication System, http://www.wmo.int/pages/prog/www/TEM/GTS/index_en.html.
6. Sheffield, J, Wood, EF, Pan, M, Beck, H, Coccia, G, Serrat ـ Capdevila, A, Verbist, K, Satellite Remote Sensing for Water Resources Management: Potential for Supporting Sustainable Development in Data ـ Poor Regions. *Water Resour. Res*, 2018; 54; 9724–9758.
7. Cui, X, et al, Application of Remote Sensing to Water Environmental Processes under a Changing Climate. *J. Hydrol*, 574; 2019: 892–902.
8. Vincenzo, L, Elsa C, Satellite Remote Sensing of Precipitation and the Terrestrial Water Cycle in a Changing Climate, *Journal of Remote Sensing*, 2019, https://doi.org/10.3390/rs11192301.
9. Levizzani, V, Kidd, C, Kirschbaum, DB, Kummerow, CD, Nakamura, K, Turk, FJ, (Eds.), Satellite Precipitation Measurement; *Springer Nature: Dordrecht*, The Netherlands, 2019.
10. Zhang, J, Howard, K, Langston, C, Kaney, B, Qi, Y, Tang, L, Grams, H, Wang, Y, Cocks, S, Martinaitis, S, et al., Multi ـ Radar Multi ـ Sensor (MRMS) Quantitative Precipitation Estimation: Initial Operating Capabilities. Bull. Am. *Meteorol. Soc*, 2016: 97, 621–638.
11. Freeman, E, Woodruff, S.D, Worley, S.J, Lubker, S.J, Kent, E.C, Angel, W.E, Berry, D.I, Brohan, P, Eastman, R, Gates, L. et al., ICOADS Release 3.0: A Major Update to the Historical Marine Climate Record. *Int. J. Climatol*, 2017; 37: 2211–2237.
12. Illingworth, AJ, Barker, HW, Beljaars, A, Ceccaldi, M, Chepfer, H, Clerbaux, N, Cole, J, Delanoë, J, Domenech, C. Donovan, D.P. et al., The EarthCARE Satellite: The Next Step Forward in Global Measurements of Clouds, Aerosols, Precipitation, and Radiation.Bull. Am.*Meteorol.Soc*, 2015; 96: 1311–1332.
13. Nhat Quang, D, et al., Remote Sensing Applications for Reservoir Water Level monitoring, sustainable water surface management, and environmental risks in Quang Nam Province, Vietnam, *Journal of Water and Climate Change*, 2021;12 (7): 3045–3063.
14. Pipitone, C, et al., Monitoring Water Surface and Level of a Reservoir Using Different Remote Sensing Approaches and Comparison with Dam Displacements Evaluated via GNSS, *Journal of Remote sensing*, 2018.

15. Tarpanelli, A, et al., Coupling MODIS and Radar Altimetry Data for Discharge Estimation in Poorly Gauged River Basins. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015; 8 (1): 141–148.
16. Zlinszky, A, Boergens, E, Glira, P, Pfeifer N, Airborne laser scanning for calibration and validation of inshore satellite altimetry—A proof of concept: *Remote Sensing of Environment*, 2017;197: 35–42.
17. Bjerklie, DJ, Birkett, CM, Jones, JW, Carabajal, C, Rover, J, Fulton, JW, Pierre ـــ André, G, Satellite remote sensing estimation of river discharge—Application to the Yukon River, Alaska: *Journal of Hydrology*, 2018; 561: 1,000–1,018.
18. Gleason, CJ, Smith, LC, Toward global mapping of river discharge using satellite images and at ـــ many ـــ stations hydraulic geometry: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014;111 (13): 4788–4791.
19. Tarpanelli, A, et al., Toward the Estimation of River Discharge Variations Using MODIS Data in Ungauged Basins. *Remote Sensing of Environment*, 136, 47–55. 2013.
20. Van Dijk, AIJM, et al., River Gauging at Global Scale Using Optical and Passive Microwave Remote Sensing. *Water Resources Research*, 2016; 52 (8): 6404–6418.
21. Tourian, MJ, Schwatke, C, Sneeuw, N, River Discharge Estimation at Daily Resolution from Satellite Altimetry over an Entire River Basin. *Journal of Hydrology*, 2017; 546: 230–247.
22. Office of Water Information and Data, Iran Water Resources Management Company, Ministry of Energy, Tehran, Iran, 2022 [In Persian].
23. Asadi, M, Abdolmanafi, N, Intensification of the Crisis of Groundwater Resources and the Necessity of Managing Consumption, Research Center, Islamic Consultative Assembly, Report No. 25018465. Tehran, Iran, 2022 [In Persian].Ashraf, Samaneh, et al, Anthropogenic Drought Dominates Groundwater Depletion in Iran,*Scientific Reports*, 2021.
24. Berg, S J, Illman, W, A, Capturing Aquifer Heterogeneity: Comparison of Approaches Through Controlled Sandbox Experiments. *Water Resources Research*, 2011; 47(9): 1 ـ 17.
25. Famiglietti, JS, et al., Satellites Measure Recent Rates of Groundwater Depletion in California's Central Valley. *Geophysical Research Letters*, 2011;

38(3): 2010GL046442.

26. Farr, T G, Liu, Z, Monitoring Subsidence Associated with Groundwater Dynamics in the Central Valley of California using Interferometric Radar. *Remote Sensing of the Terrestrial Water Cycle*, 2015; 206: 397–406.
27. Enzminger, TL, et al., Subsurface Water Dominates Sierra Nevada Seasonal Hydrologic Storage. *Geophysical Research Letters*, 2019; 46(21): 11993–12001.
28. Hwang, C, et al., Time ـ Varying Land Subsidence Detected by Radar Altimetry: California, Taiwan and North China. *Scientific Reports*, 2016; 6(1): 1–12.
29. An, K, *Investigating the Relationship between Land Subsidence and Groundwater Depletion in the North China Plain using GRACE and ICESat* (Doctoral Dissertation) UCLA. 2015.
30. Mukherjee, D, et al., Geoelectrical Constraints on Radar Probing of Shallow Water ـ Saturated Zones within Karstified Carbonates in Semi ـ arid Environments. *Journal of Applied Geophysics*, 2010; 70(3): 181–191..
31. Maxwell, R M, Chow, F K, Kollet, S J, The Groundwater–Land ـ Surface–Atmosphere Connection: Soil Moisture Effects on the Atmospheric Boundary Layer in Fully ـ Coupled Simulations. *Advances in Water Resources*, 2007; 30(12): 2447–2466. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.05.018
32. Faunt, C C, Groundwater Availability of the Central Valley Aquifer, California. U. S. Geological Survey Professional Paper, 1766. 2009.
33. Faunt, C C, Hanson, R T, Belitz, K, Schmid, W, Predmore, S P, Rewis, D L, McPherson, K, Groundwater Availability of the Central Valley Aquifer, California. U. S. Geological Survey Professional Paper, 2009; 1776: 225.
34. Ahamed, A, Knight, R, Alam, S, Pauloo, R, Melton, F, Assessing the Utility of Remote Sensing Data to Accurately Estimate Changes in Groundwater Storage. *Science of the Total Environment*, 2022; 807: 150635.
35. Kholghi, M, et al., Guide to Preparing a Mathematical Model of Groundwater, Ministry of Energy, Publication, 2017; 174. Tehran, Iran, [In Persian].
36. Kollet, S J, Maxwell, R M, Integrated Surface–Groundwater Flow Modeling: A Free ـ Surface overland Flow Boundary Condition in a Parallel Groundwater Flow Model. *Advances in Water Resources*, 2006; 29(7): 945–958.
37. Kyra, H, Adams, et al., Remote Sensing of Groundwater: Current Capabilities

and Future Directions, *Water Resources Research*, 2022; 58(10): 1 ـ 27.

38. Li, Z, et al., Time ـ series InSAR Ground Deformation Monitoring: Atmospheric Delay Modeling and Estimating. *Earth ـ Science Reviews*, 2019;192: 258–284.

39. Smith, R, Li, J, Modeling Elastic and Inelastic Pumping ـ Induced Deformation with Incomplete Water Level Records in Parowan Valley, Utah. *Journal of Hydrology*, 2021; 601: 126654.