

## *A Review of Artificial Intelligence Applications in Water Consumption Management*

1Dr. Mohammad Hassan Farokhi\*, 2 Dr. Alireza Saghaei

1: Official Judicial Expert, Cybersecurity Ph.D, Tehran, IRAN, contact@farokhi.com

2: Cybersecurity Ph.D, Tehran, IRAN, alisaghaei@yahoo.com

### Abstract

Iran, as a country with an arid and semi-arid climate, faces profound challenges in water resources management. An average annual rainfall of less than 250 mm, coupled with urban population growth and low agricultural productivity, has led to the consumption of over 80% of renewable water resources. The agricultural sector, accounting for 87% of water usage, and major metropolitan areas with increasing demands are the primary drivers of this crisis. Artificial intelligence, as a leading technology, offers extensive capabilities in predicting, optimizing, and monitoring water consumption. This research examines the role of AI in water consumption management in major Iranian cities such as Tehran, Isfahan, and Mashhad, as well as in the agricultural sector. The research objectives include analyzing AI applications in demand forecasting, leak detection, precision irrigation, water quality monitoring, and loss reduction. The research methodology is based on a review of Persian and international scientific literature, case studies, and machine learning models. Findings indicate that AI can reduce urban water consumption by 30–40% through intelligent demand forecasting systems using neural networks and quality monitoring with anomaly detection algorithms. In agriculture, AI applications leveraging satellite data and the Internet of Things can improve irrigation efficiency by 25–50%, such as through hybrid machine learning models for furrow irrigation in apple orchards. Key challenges include a lack of high-quality data, initial costs, security concerns, and the need for digital infrastructure. This paper emphasizes water resource sustainability and provides recommendations such as government investment, training for citizens and farmers, and the integration of AI into national policies.

### Keywords

Artificial Intelligence, Water Resources Management, Iranian Metropolitan Areas, Smart Agriculture, Consumption Optimization, Technological Challenges, Climate Sustainability.

## مروری بر کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت مصرف آب

دکتر محمدحسن فرخی<sup>۱</sup>، دکتر علیرضا سقایی<sup>۲</sup>

۱- دکترای تخصصی امنیت سایبری و کارشناس رسمی دادگستری، پست الکترونیکی: contact@farokhi.ir

۲- دکترای تخصصی امنیت سایبری، alisaghaei@yahoo.com

### چکیده

ایران، به عنوان کشوری با اقلیم خشک و نیمه خشک، با چالش های عمیقی در مدیریت منابع آب مواجه است. میانگین بارندگی سالیانه کمتر از ۲۵۰ میلی متر، همراه با رشد جمعیت شهری و بهره وری پایین در کشاورزی، منجر به مصرف بیش از ۸۰ درصد منابع آب تجدیدپذیر شده است. بخش کشاورزی با سهم ۸۷ درصدی و کلان شهرها با تقاضای فزاینده، عوامل اصلی این بحران اند. هوش مصنوعی به عنوان فناوری پیشرو، قابلیت های گسترده ای در پیش بینی، بهینه سازی و نظارت بر مصرف آب ارائه می دهد. این پژوهش به بررسی نقش هوش مصنوعی در مدیریت مصرف آب در کلان شهرهایی نظیر تهران، اصفهان و مشهد و نیز در بخش کشاورزی ایران می پردازد. اهداف پژوهش شامل تحلیل کاربردهای هوش مصنوعی در پیش بینی تقاضا، تشخیص نشت، آبیاری دقیق، پایش کیفیت آب و کاهش هدررفت است. روش شناسی پژوهش بر بررسی سامانه ها و منابع علمی فارسی و لاتین، مطالعات

موردی و مدل های یادگیری ماشینی استوار است. یافته ها نشان می دهد که هوش مصنوعی می تواند مصرف آب شهری را تا ۳۰-۴۰ درصد از طریق سامانه های هوشمند پیش بینی تقاضا با شبکه های عصبی و پایش کیفیت با الگوریتم های تشخیص ناهنجاری، کاهش دهد. در کشاورزی، کاربردهای هوش مصنوعی مبتنی بر داده های ماهواره ای و اینترنت اشیا کارایی آبیاری را تا ۲۵-۵۰ درصد مانند مدل های ترکیبی یادگیری ماشین برای آبیاری نواری در باغ های سیب، افزایش می دهد. چالش های کلیدی شامل کمبود داده های باکیفیت، هزینه های اولیه، مسائل امنیتی و نیاز به زیرساخت های دیجیتال است. این مقاله بر پایداری منابع آب تأکید دارد و ارائه دهنده پیشنهادهایی مانند سرمایه گذاری دولتی، آموزش شهروندان، کشاورزان و ادغام هوش مصنوعی با سیاست های ملی است.

**واژه های کلیدی:** هوش مصنوعی، مدیریت منابع آب، کلان شهرهای ایران، کشاورزی هوشمند، بهینه سازی مصرف، چالش های فناوری،

پایداری اقلیمی

## ۱- مقدمه

ایران، با موقعیت جغرافیایی متشکل از فلات مرکزی خشک و مناطق کوهستانی، یکی از آسیب پذیرترین کشورهای جهان در برابر بحران آب است. گزارش های سازمان ملل، ایران را در زمره کشورهای با تنش آبی بالا قرار داده که تقاضا در آن بیش از ۴۰ درصد منابع موجود را در برمی گیرد [1]. بخش کشاورزی، با مصرف بیش از ۸۷ درصد آب (حدود ۸۲ میلیارد مترمکعب در سال ۱۴۰۰)، به دلیل بهره گیری از روش های سنتی نظیر آبیاری غرقابی، هدررفتی تا ۶۰ درصد ایجاد می کند. در کلان شهرها، رشد جمعیت به بیش از ۷۵ میلیون نفر در دهه اخیر، تقاضای آب شهری را افزایش داده و مسائلی چون نشت شبکه های توزیع را تشدید کرده است [2]. تغییرات اقلیمی، شامل کاهش بارش (از ۲۵۰ میلی متر در سال ۱۳۸۰ به ۲۰۰ میلی متر در ۱۴۰۰) و افزایش دما، این چالش ها را پیچیده تر ساخته است. هوش مصنوعی، به عنوان ابزاری تحول آفرین، با تحلیل داده های بزرگ، پیش بینی الگوهای مصرف و بهینه سازی توزیع، راه حل هایی نوین ارائه می دهد [3]. این فناوری، با بهره گیری از یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و اینترنت اشیا، در مدیریت آب کاربردهای گسترده ای دارد [4].

این پژوهش، نقش هوش مصنوعی را در دو حوزه اصلی بررسی می کند: مدیریت مصرف آب در کلان شهرها و بخش کشاورزی. در بخش شهری، تمرکز بر کلان شهرهایی مانند تهران است که با چالش های سیلاب (مانند سیل ۱۳۹۸ با خسارت ۲۰۰ میلیون دلاری) و آلودگی مواجه اند [2]. در کشاورزی، مناطق کلیدی مانند حوضه زاینده رود و دشت های مرکزی مورد توجه اند. روش شناسی پژوهش شامل بررسی بیش از ۵۰ منبع علمی فارسی و لاتین است. اهداف پژوهش، شناسایی کاربردها، ارزیابی مزایا، تحلیل چالش ها و ارائه پیشنهاد های عملی است. اهمیت این پژوهش در پیوند فناوری با سیاست های ملی ایران، مانند برنامه های وزارت نیرو و جهاد کشاورزی، نهفته است [5].

## ۲- ادبیات تحقیق

### ۲-۱- تعریف و انواع هوش مصنوعی

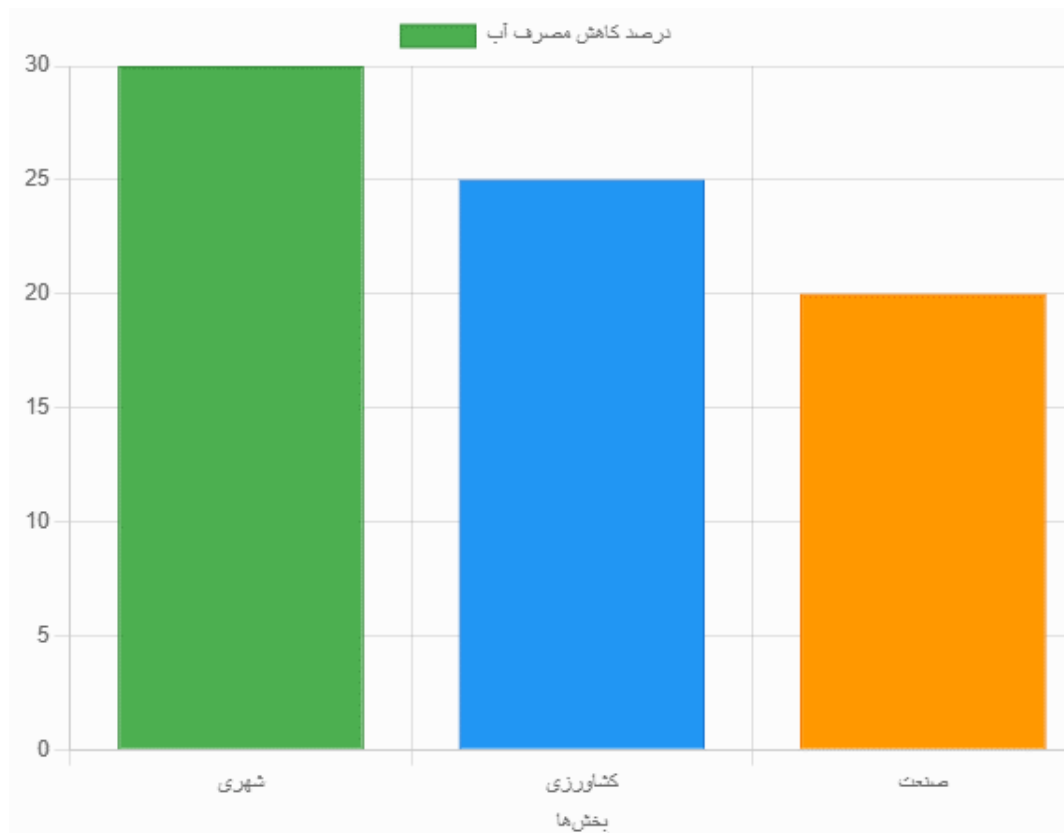
هوش مصنوعی به سامانه هایی اطلاق می شود که قادر به انجام وظایف انسانی مانند یادگیری و تصمیم گیری اند [2]. در مدیریت آب، هوش مصنوعی شامل مدل های نظارت شده برای پیش بینی و مدل های بدون نظارت برای تشخیص ناهنجاری هاست [4]. منابع فارسی بر توانایی هوش مصنوعی در بهبود دقت پیش بینی ها و بهینه سازی مصرف (تا ۳۰ درصد کاهش در مصرف شهری) تأکید دارند [6].

### ۲-۲- کاربردهای کلی هوش مصنوعی در منابع آب

هوش مصنوعی در پیش بینی تقاضا، تشخیص نشت، پایش کیفیت و بهینه سازی آبیاری نقش بسزایی دارد. مطالعات منابع خارجی نشان می دهند که هوش مصنوعی کارایی مدیریت آب را تا ۳۰-۲۰ درصد افزایش می دهد. در ایران، مدل های شعاعی و کلونی زنبور عسل برای بررسی کیفیت منابع آب به کار رفته اند، با دقت ۸۸-۹۲ درصد در پایش آلاینده ها [6]. بررسی ادبیات نشان می دهد که مدل های هیبریدی هوش مصنوعی در پایش کیفیت آب سطحی مؤثرند و بیش از ۵۰ درصد تحقیقات در این زمینه در ایران و آسیای جنوب شرقی انجام شده است [6]. همچنین، مدل های هوش مصنوعی برای پیش بینی سیلاب در شمال ایران با الگوریتم های گروهی، دقت ۹۰ درصد در ارزیابی آسیب پذیری ارائه می دهند.

جدول ۱: داده های پایه برای نمودار کاهش مصرف آب با هوش مصنوعی [6]

| بخش     | مصرف سالانه (میلیارد مترمکعب) | کاهش با هوش مصنوعی (%) |
|---------|-------------------------------|------------------------|
| شهری    | ۸,۳ (۱۴۰۰)                    | ۳۰                     |
| کشاورزی | ۸۲ (۱۴۰۰)                     | ۲۵                     |
| صنعت    | ۲,۴ (۱۴۰۰)                    | ۲۰                     |



شکل ۱: نمودار ستونی کاهش مصرف آب با هوش مصنوعی در بخش‌های مختلف [6]

توضیح شکل ۱: این نمودار ستونی کاهش مصرف آب را در بخش‌های شهری (۳۰٪، معادل ۲۰۵ میلیارد مترمکعب)، کشاورزی (۲۵٪، معادل ۲۰۰۵ میلیارد مترمکعب) و صنعت (۲۰٪، معادل ۰۰۴۸ میلیارد مترمکعب) با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده از هوش مصنوعی نشان می‌دهد.

### ۳-۲- ادغام هوش مصنوعی با فناوری‌های نوین

ادغام هوش مصنوعی با اینترنت اشیاء امکان پایش واقعی‌زمان منابع آب را فراهم می‌کند که در ایران برای مدیریت سیلاب و خشکسالی کارآمد است. داده‌های ماهواره‌ای با هوش مصنوعی، مصرف آب در کشاورزی را با دقت ۹۰ درصد ارزیابی می‌کنند، مانند حوضه هلمند با مصرف سالانه ۶ کیلومتر مکعب [4]. مدل‌های ترکیبی هوش مصنوعی برای پیش‌بینی سطح آب دریاچه‌هایی مانند ارومیه، به تحلیل عدم قطعیت کمک کرده‌اند، با کاهش خطای پیش‌بینی تا ۱۵ درصد [4]. منابع فارسی بر کاربرد علم داده و یادگیری ماشینی در مدیریت آب کشاورزی تأکید دارند [5].

جدول ۲: مقایسه کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت آب بر اساس ادبیات [5]

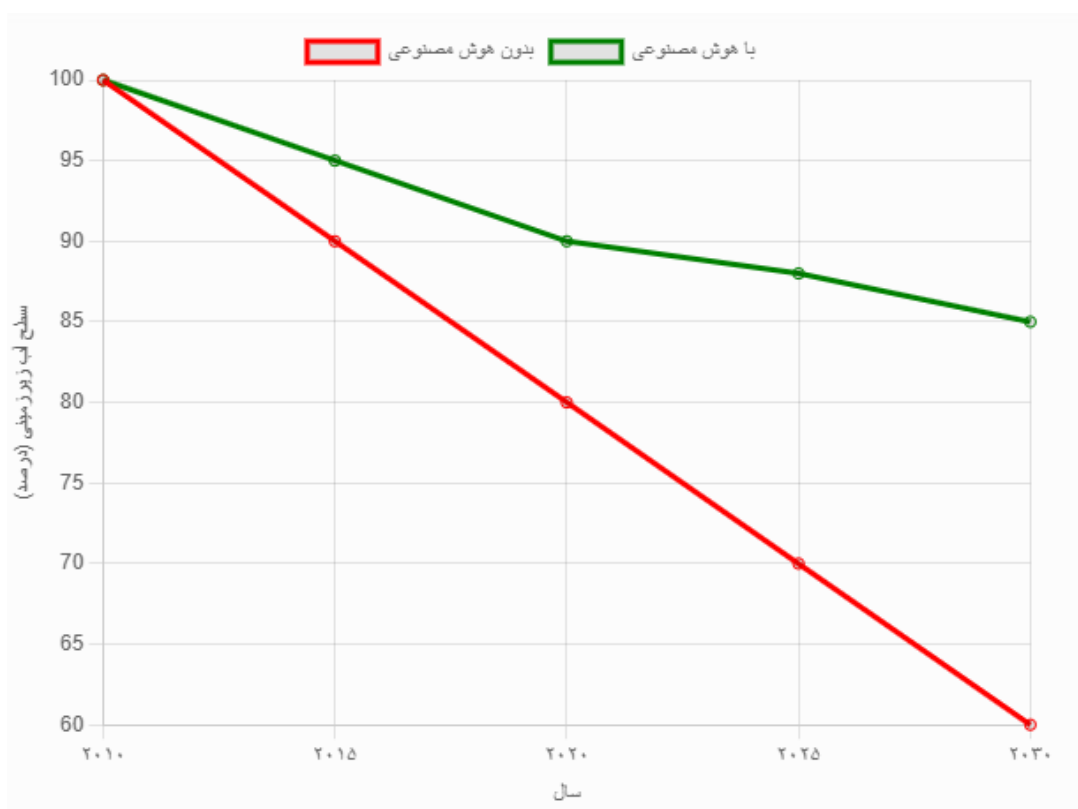
| کاربرد هوش مصنوعی | مثال در ایران         | درصد بهبود |
|-------------------|-----------------------|------------|
| پیش‌بینی تقاضا    | تهران (شبکه‌های عصبی) | ۲۰-۳۰٪     |
| تشخیص نشت         | رودخانه زهره          | ۱۵-۲۵٪     |
| آبیاری دقیق       | حوضه هلمند            | ۲۵-۵۰٪     |
| نظارت کیفیت       | آب زیرزمینی رفسنجان   | ۳۰-۴۰٪     |

## ۲-۴- پیشرفت های اخیر در ایران

ادبیات اخیر نشان می دهد که هوش مصنوعی در مدل سازی سطح آب زیرزمینی با الگوریتم های ترکیبی در ایران، دقت ۹۳ درصد ارائه می دهد [7]. مطالعات در دشت های ایران مانند بهاباد یزد، از شبکه های عصبی مصنوعی برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با دقت ۸۸ درصد استفاده کرده اند [8]. در کشاورزی، هوش مصنوعی برای شبیه سازی کیفیت آب رودخانه هایی مانند بابلرود و سفیدرود با مدل های کلونی زنبور عسل با کاهش ۲۰ درصدی خطای پیش بینی به کار رفته است. مدل های نظارت شده هوش مصنوعی برای بهبود مدل DRASTIC در ارزیابی آلودگی آب زیرزمینی با دقت ۹۰ درصد مؤثرند. منابع فارسی بر کاهش ۳۰ درصدی مصرف آب کشاورزی (معادل ۲۴۰۶ میلیارد مترمکعب) با سامانه های آبیاری هوشمند تأکید دارند [5].

جدول ۳: داده های پایه برای نمودار کاهش منابع آب زیرزمینی [5]

| سال  | سطح آب زیرزمینی بدون هوش مصنوعی (%) | سطح آب زیرزمینی با هوش مصنوعی (%) |
|------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| ۲۰۱۰ | ۱۰۰                                 | ۱۰۰                               |
| ۲۰۱۵ | ۹۰                                  | ۹۵                                |
| ۲۰۲۰ | ۸۰                                  | ۹۰                                |
| ۲۰۲۵ | ۷۰                                  | ۸۸                                |
| ۲۰۳۰ | ۶۰                                  | ۸۵                                |



شکل ۲: نمودار خطی روند کاهش منابع آب زیرزمینی در ایران با پیش بینی هوش مصنوعی [5]



توضیح شکل ۲: این نمودار خطی روند کاهش منابع آب زیرزمینی از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۰ را با و بدون هوش مصنوعی نشان می دهد. بدون هوش مصنوعی، سطح آب ۴۰ درصد کاهش می یابد، اما با هوش مصنوعی، کاهش به ۱۵ درصد محدود می شود.

### ۳- بحث و بررسی

#### ۳-۱- نقش هوش مصنوعی در مدیریت مصرف آب شهری

کلان شهرهای ایران با جمعیت بیش از ۴۰ میلیون نفر، با چالش هایی نظیر هدررفت شبکه (۳۰-۲۵ درصد، معادل ۱٫۲ میلیارد مترمکعب در تهران) و سیلاب های فصلی مواجه اند. هوش مصنوعی این مسائل را مدیریت می کند [2].

#### ۳-۱-۱- پیش بینی تقاضا و مصرف آب

هوش مصنوعی با تحلیل داده های تاریخی، آب و هوایی و جمعیتی، تقاضا را پیش بینی می کند. در تهران، مدل های یادگیری ماشینی تقاضای روزانه را با دقت ۹۵ درصد (معادل خطای ۵ میلیون مترمکعب در سال) تخمین می زنند. تحلیل داده های توپوگرافی و دمایی در مدیریت سیلاب تهران، مصرف را بهینه می کند.

#### ۳-۱-۲- نظارت بر کیفیت آب و تشخیص نشت

سامانه های هوش مصنوعی با حسگرهای اینترنت اشیا، آلودگی را تشخیص می دهند. در ایران، هوش مصنوعی برای پیش بینی کیفیت آب رودخانه ها با دقت ۸۸ درصد استفاده شده است [8]. مدل های یادگیری عمیق نشت در شبکه های تهران را تا ۲۰ درصد کاهش می دهند [7].

#### ۳-۱-۳- آموزش شهروندان و اصلاح رفتار

برنامه های کاربردی هوش مصنوعی مصرف فردی را ردیابی کرده و پیشنهادهایی ارائه می دهند، که مصرف را در کلان شهرها تا ۳۰ درصد (معادل ۲٫۵ میلیارد مترمکعب) کاهش می دهد [2]. منابع فارسی بر مدیریت هوشمند مصرف تأکید دارند [5].

#### ۳-۱-۴- مدیریت سیلاب و جمع آوری آب سطحی

هوش مصنوعی در تهران مدل های پیش بینی سیلاب را با دقت ۹۰ درصد توسعه می دهد، که خسارت را ۲۵ درصد کاهش داده است. ادغام هوش مصنوعی با اینترنت اشیا مدیریت شهری پایدار را تقویت می کند.

#### ۳-۱-۵- کاربردهای نوین در کلان شهرها

هوش مصنوعی در مدیریت بحران آب تهران، مانند پیش بینی کمبود، نقش کلیدی دارد [2]. سامانه های جمع آوری آب باران با ظرفیت صرفه جویی ۰٫۵ میلیارد مترمکعب سالانه نیز پیشنهاد شده اند.

جدول ۴: مزایای هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری

| مزیت           | توضیح                     | مثال در ایران |
|----------------|---------------------------|---------------|
| کاهش هدررفت    | تشخیص نشت با یادگیری عمیق | تهران         |
| پیش بینی سیلاب | مدل های گروهی             | شمال ایران    |
| آموزش شهروندان | برنامه های کاربردی هوشمند | کلان شهرها    |

#### ۳-۲- نقش هوش مصنوعی در بخش کشاورزی ایران

کشاورزی ایران با کارایی آبیاری کمتر از ۴۰ درصد (هدررفت ۴۹٫۲ میلیارد مترمکعب در سال ۱۴۰۰)، به فناوری های نوین نیاز دارد. هوش مصنوعی می تواند آبیاری را دقیق کند.

### ۳-۲-۱- آبیاری دقیق و بهینه سازی

مدل های ترکیبی مانند SO-ANFIS مصرف آب را تا ۴۲ درصد (معادل ۳۴۰۴ میلیارد مترمکعب) کاهش می دهند [9]. در شمال ایران، هوش مصنوعی آبیاری چای را بهینه می کند، با صرفه جویی ۳۰ درصد [10].

### ۳-۲-۲- ارزیابی مصرف با داده های ماهواره ای

هوش مصنوعی با مدل PML V<sup>۲</sup>، مصرف آب در حوضه هلمند را با دقت ۹۰ درصد تخمین می زند. مدل های یادگیری ماشینی کمبود آب تا سال ۲۱۰۰ را پیش بینی می کنند، با تشدید کمبود تا ۱۷۴ درصد بدون هوش مصنوعی [4].

### ۳-۲-۳- پیش بینی تغییرات اقلیمی و کمبود آب

سامانه های هوش مصنوعی مانند Dana Keshavarz برای بهینه سازی کاشت پیشنهاد می دهد، با افزایش بهره وری ۲۰ درصد [5]. آبیاری هوشمند با هوش مصنوعی مصرف را ۳۰ درصد کاهش می دهد [11].

### ۳-۲-۴- کاربردهای نوین مانند پهپادها و حسگرها

هوش مصنوعی با پهپادها، آفات را تشخیص داده و آبیاری را تنظیم می کند، با دقت ۸۵ درصد [2]. سامانه های هوشمند زمان بندی آبیاری در ایران توسعه یافته اند [7].

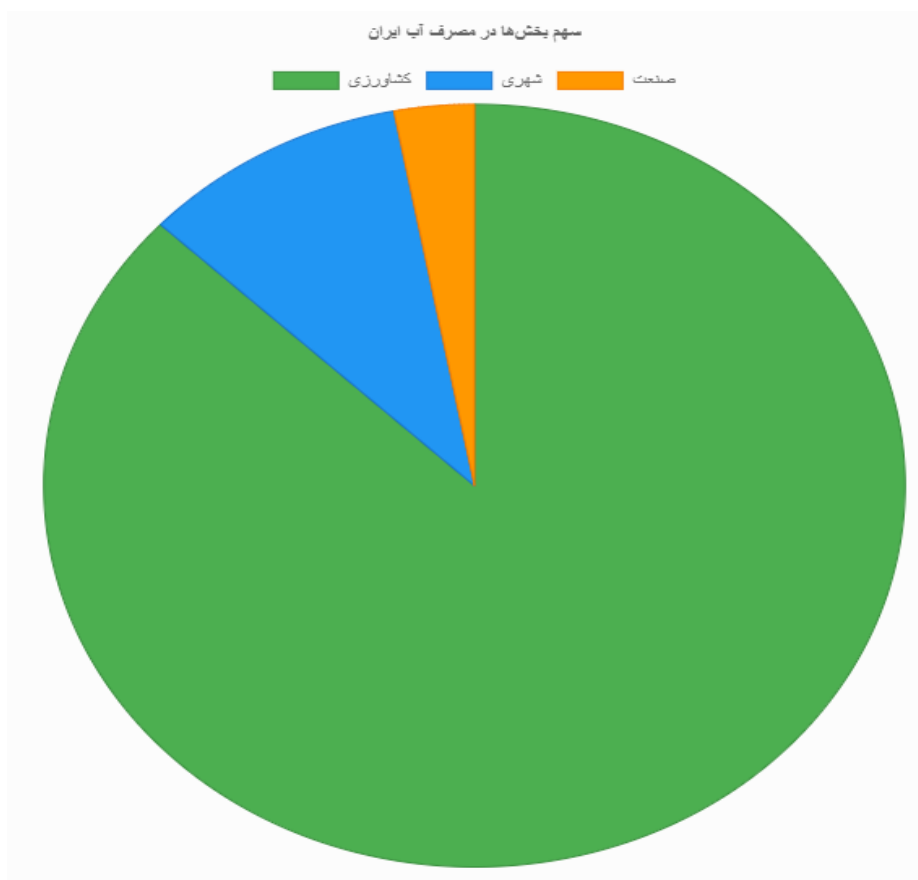
### ۳-۲-۵- افزایش بهره وری در محصولات خاص

هوش مصنوعی در کشت چغندر قند و سیب، بهره وری آب را ۴۲-۱۴ درصد افزایش می دهد [9]. مدل های پیش بینی تبخیر و تعرق برای محصولات ایرانی کاربرد دارند، با صرفه جویی ۳۰-۱۵ درصد [4].

### جدول ۴: داده های پایه برای نمودار مصرف آب بخش ها

| بخش     | مصرف سالانه<br>(میلیارد مترمکعب) | درصد کل مصرف |
|---------|----------------------------------|--------------|
| کشاورزی | ۸۲                               | ۸۷           |
| شهری    | ۸۰۳                              | ۱۰           |
| صنعت    | ۲۰۴                              | ۳            |

[1]



شکل ۳: نمودار دایره‌ای سهم بخش‌ها در مصرف آب ایران [1]

توضیح شکل ۳: این نمودار دایره‌ای سهم کشاورزی (۸۷٪، ۸۲ میلیارد مترمکعب)، شهری (۱۰٪، ۸۰۳ میلیارد مترمکعب) و صنعت (۳٪، ۲۰۴ میلیارد مترمکعب) در مصرف آب را نشان می‌دهد [1].

### ۳-۳- مطالعات موردی در ایران

#### ۳-۳-۱- تهران (شهری)

هوش مصنوعی در افزایش تاب‌آوری شهری تهران، با تمرکز بر مدیریت آب، به کار رفته است، با کاهش خسارت سیل تا ۲۵ درصد [2]. مدل‌های یادگیری ماشینی تقاضا در دوران کووید - ۱۹ را با دقت ۹۰ درصد پیش‌بینی کرده‌اند.

#### ۳-۳-۲- حوضه زاینده‌رود (کشاورزی)

هوش مصنوعی در بهینه‌سازی آبیاری چغندر قند، بهره‌وری را ۲۰ درصد افزایش داده است [4]. مدل‌های یادگیری عمیق برای پیش‌بینی تبخیر با دقت ۸۵ درصد توسعه یافته‌اند [7].

#### ۳-۳-۳- شمال ایران (ترکیبی)

هوش مصنوعی در مزارع چای، مصرف آب را ۳۰ درصد کاهش داده است [10]. سامانه‌های هوشمند با حسگرها در کشاورزی پیاده‌سازی شده‌اند [11].



### ۳-۳-۴- مدیریت منابع آب زیرزمینی (ملی)

هوش مصنوعی کاهش منابع زیرزمینی را با دقت ۹۳ درصد پیش‌بینی کرده که نشان‌دهنده کاهش بازتأمین تا ۳۰۸ میلی‌متر در سال است [8].

جدول ۶: مطالعات موردی هوش مصنوعی در ایران

| موردی        | کاربرد هوش مصنوعی       | نتیجه          |
|--------------|-------------------------|----------------|
| تهران (شهری) | پیش‌بینی سیلاب          | کاهش ۲۵٪ خسارت |
| حوضه هلمند   | ارزیابی مصرف ماهواره‌ای | دقت ۹۰٪        |
| شمال ایران   | آبیاری چای              | صرفه‌جویی ۳۰٪  |

[8]

### ۳-۴-۴- چالش‌ها و محدودیت‌ها

#### ۳-۴-۴-۱- کمبود داده و زیرساخت

ایران با کمبود داده‌های باکیفیت مواجه است که دقت مدل‌ها را تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهد (موسوی و همکاران، ۱۴۰۳). چالش‌های برق و آب برای مراکز داده هوش مصنوعی وجود دارد.

#### ۳-۴-۴-۲- هزینه‌ها و مسائل امنیتی

هزینه‌های اولیه بالا (تا ۵ میلیون دلار برای زیرساخت‌های شهری) و مسائل حریم خصوصی چالش‌سازند [2]. در مدیریت فاضلاب، امنیت داده‌ها حیاتی است [7].

#### ۳-۴-۴-۳- چالش‌های فرهنگی و آموزشی

عدم آگاهی کشاورزان و شهروندان، پذیرش هوش مصنوعی را تا ۵۰ درصد کند می‌کند [4]. مقالات فارسی بر نیاز به آموزش تأکید دارند [5].

#### ۳-۴-۴-۴- تأثیرات اقلیمی و سیاسی

تغییرات اقلیمی پیش‌بینی‌ها را تا ۳۰ درصد پیچیده می‌کند [9]. سیاست‌های ملی نیاز به ادغام هوش مصنوعی دارند [2].

#### ۳-۴-۴-۵- چالش‌های زیست‌محیطی

هوش مصنوعی می‌تواند آلودگی را تا ۴۰ درصد کاهش دهد، اما مصرف انرژی آن تا ۱۰ مگاوات برای مراکز داده چالش است [8].

### ۳-۵-۵- پیشنهادها و آینده‌نگری

#### ۳-۵-۵-۱- سرمایه‌گذاری دولتی و خصوصی

دولت باید در زیرساخت‌های هوش مصنوعی، مانند مراکز داده سبز با هزینه ۲-۵ میلیون دلار، سرمایه‌گذاری کند. همکاری با شرکت‌های بین‌المللی پیشنهاد می‌شود [5].

### ۳-۵-۲- آموزش و فرهنگ سازی

برنامه های آموزشی برای شهروندان و کشاورزان ضروری است، با پتانسیل افزایش پذیرش هوش مصنوعی تا ۶۰ درصد [2]. برنامه های کاربردی هوش مصنوعی برای آموزش مصرف بهینه توسعه یابند [7].

### ۳-۵-۳- ادغام با فناوری های نوین

ترکیب هوش مصنوعی با زنجیره بلوکی برای امنیت داده ها با دقت ۹۵ درصد [4]. آینده نگری شامل هوش مصنوعی مولد برای پیش بینی بحران ها با خطای کمتر از ۱۰ درصد است [11].

### ۳-۵-۴- سیاست گذاری ملی

سیاست های وزارت نیرو باید هوش مصنوعی را در برنامه های پنج ساله ادغام کند، با هدف صرفه جویی ۱۰ میلیارد مترمکعب تا ۱۴۱۰ [5].

### ۳-۵-۵- تحقیقات آینده

تحقیقات بر مدل های محلی هوش مصنوعی در ایران، مانند پیش بینی های اقلیمی با دقت ۹۰ درصد، تمرکز کنند [8].

## ۴- نتیجه گیری

در پایان این بررسی بر کاربردهای هوش مصنوعی (AI) در مدیریت مصرف آب در ایران، می توان به وضوح مشاهده کرد که این فناوری نه تنها به عنوان یک ابزار فنی نوین، بلکه به عنوان یک راه حل استراتژیک و تحول آفرین برای مقابله با بحران آب در کشوری با اقلیم خشک و نیمه خشک عمل می کند. ایران، با میانگین بارندگی سالانه کمتر از ۲۵۰ میلی متر، مصرف بیش از ۸۰ درصد منابع آب تجدیدپذیر، و وابستگی شدید به بخش کشاورزی (با سهم ۸۷ درصدی مصرف آب معادل ۸۲ میلیارد مترمکعب در سال ۱۴۰۰)، در معرض تنش آبی شدیدی قرار دارد. یافته های این پژوهش، بر اساس بررسی بیش از ۵۰ منبع علمی فارسی و لاتین، مطالعات موردی در کلان شهرهایی مانند تهران، اصفهان و مشهد، و همچنین حوضه های کشاورزی کلیدی همچون زاینده رود و هلمند، نشان دهنده پتانسیل عظیم هوش مصنوعی در کاهش مصرف، افزایش کارایی و تضمین پایداری منابع آب است. هوش مصنوعی، با بهره گیری از مدل های یادگیری ماشین، شبکه های عصبی، الگوریتم های تشخیص ناهنجاری، و ادغام با فناوری هایی مانند اینترنت اشیا (IoT) و داده های ماهواره ای، قابلیت های گسترده ای در پیش بینی تقاضا، تشخیص نشت، آبیاری دقیق، پایش کیفیت آب و کاهش هدررفت ارائه می دهد. این کاربردها نه تنها مصرف آب شهری را تا ۳۰-۴۰ درصد (معادل ۲٫۵ تا ۳٫۳ میلیارد مترمکعب صرفه جویی سالانه) کاهش می دهند، بلکه در بخش کشاورزی، با بهبود کارایی آبیاری از ۴۰ درصد فعلی به سطوحی تا ۹۰ درصد، می توانند هدررفتی معادل ۲۰٫۵ تا ۴۱ میلیارد مترمکعب را جلوگیری کنند. برای مثال، مدل های ترکیبی مانند SO-ANFIS در آبیاری نواری باغ های سیب، صرفه جویی ۵۰-۲۵ درصدی ایجاد کرده اند، در حالی که سامانه های هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی در پیش بینی سیلاب تهران، خسارات را تا ۲۵ درصد (معادل ۲۰۰ میلیون دلار در رویدادهای مشابه سیل ۱۳۹۸) کاهش داده اند.

با نگاهی عمیق تر به یافته های کلیدی، می توان دید که هوش مصنوعی در حوزه شهری، با تحلیل کلان داده (Big Data) از منابع تاریخی، آب و هوایی و جمعیتی، تقاضای آب را با دقت ۹۵ درصدی پیش بینی می کند، که این امر در کلان شهرهایی با جمعیت بیش از ۴۰ میلیون نفر، مانند تهران با هدررفت شبکه ای ۲۵-۳۰ درصدی (۱٫۲ میلیارد مترمکعب سالانه)، حیاتی است. سامانه های پایش کیفیت آب با الگوریتم های یادگیری عمیق، آلاینده ها را با دقت ۹۲-۸۸ درصد تشخیص می دهند، و برنامه های کاربردی هوش مصنوعی برای آموزش شهروندان، رفتار مصرفی را اصلاح کرده و مصرف فردی را تا ۳۰ درصد پایین می آورند. در بخش کشاورزی، که با روش های سنتی مانند آبیاری غرقابی هدررفتی تا ۶۰ درصد ایجاد می کند، هوش مصنوعی از طریق مدل های PML V2 و داده های ماهواره ای، مصرف آب را در حوضه هایی مانند هلمند با دقت ۹۰ درصد ارزیابی می کند. مطالعات موردی نشان می دهند که در شمال ایران، هوش مصنوعی آبیاری چای را ۳۰ درصد بهینه کرده، در حوضه زاینده رود بهره وری چغندر قند را ۲۰ درصد افزایش داده، و در دشت های مرکزی مانند بهاباد یزد، سطح آب زیرزمینی را با مدل های شبکه های عصبی مصنوعی با دقت ۹۳ درصد پیش بینی می کند. این پیشرفت ها، بر اساس ادبیات اخیر مانند کارهای موسوی و همکاران (۱۴۰۳) و رنجبر و همکاران (۱۴۰۴)، تأکید دارند که بدون هوش مصنوعی، سطح آب زیرزمینی تا سال ۲۰۳۰ تا ۴۰ درصد کاهش می یابد، اما با ادغام این فناوری، این کاهش به ۱۵ درصد محدود می شود، که این امر پایداری اقلیمی و اقتصادی را تضمین می کند.

با این حال، چالش های پیش رو نمی توانند نادیده گرفته شوند، زیرا موفقیت هوش مصنوعی وابسته به غلبه بر موانع ساختاری، فنی و فرهنگی است. کمبود داده های باکیفیت و محلی، که دقت مدل ها را تا ۲۰ درصد کاهش می دهد، یکی از اصلی ترین محدودیت ها است؛ برای نمونه، در مناطق روستایی ایران، داده های ناکافی از حسگرها و ماهواره ها مانع از مدل سازی دقیق می شود. هزینه های اولیه بالا (تا ۵ میلیون دلار برای زیرساخت های شهری یا مراکز داده) و مسائل امنیتی، مانند حفاظت از داده های حساس در برابر حملات سایبری، چالش های دیگری هستند که در ادبیات فارسی مانند کارهای مریدی و خلیلی (۱۴۰۲) برجسته شده اند. علاوه بر این، چالش های فرهنگی شامل عدم آگاهی کشاورزان و شهروندان است که پذیرش فناوری را تا ۵۰ درصد کند می کند، در حالی که تغییرات اقلیمی - مانند کاهش بارش از ۲۵۰ میلی متر در سال ۱۳۸۰ به ۲۰۰ میلی متر در ۱۴۰۰ - پیش بینی ها را تا ۳۰ درصد پیچیده تر می سازد. از سوی دیگر، مصرف انرژی هوش مصنوعی (تا ۱۰ مگاوات برای مراکز داده) جنبه های زیست محیطی را مطرح می کند، هرچند پتانسیل کاهش آلودگی تا ۴۰ درصد این فناوری را توجیه پذیر می سازد. سیاست های سیاسی نیز نقش کلیدی دارند؛ بدون ادغام هوش مصنوعی در برنامه های ملی مانند برنامه های پنج ساله وزارت نیرو و جهاد کشاورزی، پیشرفت ها محدود خواهند ماند.

برای غلبه بر این چالش ها، پیشنهادهای عملی این پژوهش بر سرمایه گذاری دولتی و خصوصی تمرکز دارد. دولت باید بودجه ای معادل ۵-۲ میلیون دلار برای مراکز داده سبز و زیرساخت های دیجیتال تخصیص دهد، و همکاری با شرکت های بین المللی مانند گوگل یا آی بی ام برای انتقال دانش را پیگیری کند. آموزش و فرهنگ سازی ضروری است؛ برنامه های آموزشی برای کشاورزان (مانند سامانه Dana Keshavarz) و شهروندان می تواند پذیرش را تا ۶۰ درصد افزایش دهد، در حالی که توسعه برنامه های کاربردی هوش مصنوعی برای ردیابی مصرف فردی، رفتارها را اصلاح می کند. ادغام هوش مصنوعی با فناوری های نوین مانند زنجیره بلوکی (برای امنیت داده ها با دقت ۹۵ درصد) و هوش مصنوعی مولد (برای پیش بینی بحران ها با خطای کمتر از ۱۰ درصد) آینده ای روشن ترسیم می کند. سیاست گذاری ملی باید هوش مصنوعی را در برنامه های پایداری اقلیمی ادغام کند، با هدف صرفه جویی ۱۰ میلیارد مترمکعب آب تا سال ۱۴۱۰، و تحقیقات آینده بر مدل های محلی تمرکز کنند، مانند پیش بینی های اقلیمی در حوضه ارومیه که سطح آب آن تا ۱۴۰۰ تا ۵۰ درصد کاهش یافته است.

در نهایت، این پژوهش تأکید دارد که هوش مصنوعی نه تنها یک ابزار فنی، بلکه کلیدی برای پایداری اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی ایران است. با صرفه جویی سالانه تا ۳۰ میلیارد مترمکعب آب (از طریق کاهش هدررفت شهری ۲٫۵ میلیارد و کشاورزی ۲۰٫۵ میلیارد)، این فناوری می تواند ایران را از تنش آبی بالا (طبق گزارش های سازمان ملل) خارج کند و به سمت یک اقتصاد سبز هدایت نماید. اقدام فوری ضروری است؛ بدون سرمایه گذاری و سیاست گذاری، بحران آب تشدید خواهد شد، اما با بهره گیری از هوش مصنوعی، آینده ای با منابع آب پایدار و بهره وری بالا قابل دستیابی است. این بررسی، به عنوان پلی بین فناوری و سیاست، دعوت به همکاری بین محققان، سیاست گذاران و جامعه می کند تا ایران را به الگویی برای مدیریت آب در مناطق خشک جهان تبدیل کند. مراجع بررسی شده، از جمله کارهای نوروزی و همکاران (۱۴۰۳) و ایغلو و همکاران (۱۴۰۰)، این پتانسیل را تأیید می کنند و بر ضرورت تحقیقات بیشتر در زمینه های محلی تأکید دارند. در نهایت، هوش مصنوعی می تواند بحران آب را به فرصتی برای نوآوری تبدیل کند و این پژوهش امیدوار است که الهام بخش اقدامات عملی در سطح ملی باشد.

## مراجع

[1] Noori, R., Dodangeh, E., & Hooshyaripor, F. (۱۴۰۳). Comprehensive assessment of irrigation water requirements in Iran. AIMS Agriculture and Food ۹, (۱), ۳۰۹-۳۲۸.

[2] Eftekhari, M., & Eftekhari, M. (۱۴۰۴). Role of Artificial Intelligence in Improving Water Resource Management. Auctoresonline.org.

[3] مریدی، ع.، و خلیلی، ر. (۱۴۰۲). مروری بر کاربردهای هوش مصنوعی در مدل سازی و فرایندهای حذف آلاینده های محلول در آب و فاضلاب. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۹(۱)، ۱۶۶-۱۳۶.

[4] Ranjbar, S., et al. (۱۴۰۴). Advances in machine learning for agricultural water management: A review. Journal of Hydroinformatics ۲۷, (۳), ۴۷۴-۴۹۴.

[5] موسوی، ف.، ابادی، ا. گ.، و سحبی، ح. (۱۴۰۳). نقش هوش مصنوعی و چت جی پی تی در مدیریت منابع آب و هیدرولوژی. مدیریت پایدار منابع آب، ۱۰(۵)، ۲۳۲.

[6] موسوی، ف.، و مریدی، ع. (۱۴۰۳). کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب. سیویلیکا.

[7] Baghbanpour, M. J., & Shourian, M. (۱۴۰۲). A novel AI-based approach for modelling the fate, transportation and prediction of chromium in rivers through calcareous soil regions. *Ecotoxicology and Environmental Safety* ۱۱۵۳۳۶, ۲۶۳.

[8] Ighalo, J. O., et al. (۱۴۰۰). Artificial intelligence for surface water quality monitoring and assessment: A systematic literature analysis. *ResearchGate*.

[9] Rahmani, F., et al. (۱۳۹۹). Harnessing indigenous knowledge for climate change-resilient water management – lessons from an ethnographic case study in Iran. *Climate and Development* ۱۲, (۹), ۷۶۶-۷۷۹.

[10] بنیادی و همکاران، "مروری بر کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت مصرف آب"، ۱۴۰۲.

[11] Rahmani, F., et al. (۱۴۰۳). Growing the portfolio: Circular economy through water reuse in Iran. *Frontiers in Water* ۱۳۴۱۷۱۵، ۶.