

The Role of Electricity in Technological Governance during the Fourth Industrial Revolution: The UAE as a Leading Model in the Persian Gulf

Bahador Zarei^{*۱}

Masoud Bakhti^۲

Mohammad Reza Vafae^۳

Extended Abstract

۱. Introduction

The Fourth Industrial Revolution (4IR) has fundamentally redefined the role of electricity, transitioning it from a conventional infrastructure input to a pivotal strategic variable in technological governance. The rapid proliferation of AI, 5G, and smart cities necessitates a paradigm shift in energy policy. This study focuses on the UAE, a pioneer in the Persian Gulf, to examine how a reliable clean energy mix and integrated policymaking create a technological competitive advantage. The primary objective is to elucidate the nexus between electricity production structures and the pillars of governance, including energy security and computational capacity.

۲. Theoretical Framework

The research is grounded in the concept of “Technological Governance,” where state power is increasingly derived from digital sovereignty and AI-driven economies. The framework integrates Energy Transition Theory with Industrial Policy, arguing that in the 4IR era, the reliability and “cleanliness” of the power grid serve as the bedrock for hosting massive computational workloads. This synergy forms a feedback loop where energy enables AI, and AI, in turn, optimizes energy systems through grid digitalization.

۳. Methodology

This study employs a descriptive-analytical methodology, utilizing documentary analysis of high-level strategic reports and international datasets spanning 2020 to 2025. By analyzing the UAE’s energy diversification and its correlation with digital infrastructure indices, the research identifies a scalable policy model for the broader region.

۴. Results & Discussion

Findings indicate that the UAE’s strategic shift maintaining natural gas as a baseload while aggressively integrating nuclear and solar capacities has significantly enhanced grid reliability. Key projects, such as the Hatta pumped-storage facility, provide the necessary stability for energy-intensive AI clusters. The results demonstrate that the UAE has successfully synchronized its “industrial-energy” policy with its “digital-AI” strategy. This dual-track approach not only meets surging demand but also improves system efficiency through smart grid implementations.

۵. Conclusions & Suggestions

The study concludes that “affordable, clean, and reliable electricity” is now the primary determinant for the localization of global computational clusters. The UAE serves as a successful model of how synchronized infrastructure can facilitate a total technological transition. It is suggested that regional policymakers adopt an

^۱ Associate Professor, Department of Political Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. (Corresponding Author)

Email: b.zarei@ut.ac.ir

^۲ MA Student in Political Geography, Geopolitics, University of Tehran, Tehran, Iran.

Email: Masoud.bakhti58@ut.ac.ir

^۳ MA Student in Political Geography, Geopolitics, University of Tehran, Tehran, Iran.

Email: mr.mrvafae@ut.ac.ir

integrated governance framework that aligns electricity supply with industrial and digital ambitions to ensure competitiveness in the 4IR landscape.

Keywords: Fourth Industrial Revolution (4IR), AI and Energy, Electricity Energy Mix, Technological Governance, United Arab Emirates (UAE).



نقش انرژی برق بر حکمرانی فناورانه در عصر انقلاب صنعتی چهارم (مطالعه موردی: امارات متحده عربی، مدلی پیشرو در منطقه خلیج فارس)

بهادر زارعی^{۱*}

مسعود بختی^۲

محمد رضا وفائی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۲

چکیده

انقلاب صنعتی چهارم با شتابدهی به هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، G^۵، خودروهای برقی و شهرهای هوشمند، نقش برق را از نهادهای زیرساختی به متغیری راهبردی در حکمرانی فناورانه ارتقاء داده است. این مقاله با تمرکز بر امارات متحده عربی به عنوان مطالعه موردی پیشرو در خلیج فارس، می‌کوشد نشان دهد چگونه ترکیب بهینه سبد برق پاک و قابل اتکا، زیرساخت‌های هوشمند و سیاست‌گذاری هم‌افزا، به مزیت رقابتی فناورانه تبدیل می‌شود. هدف پژوهش، تبیین پیوند ساختار تولید برق با مؤلفه‌های کلیدی حکمرانی فناورانه (امنیت انرژی، گذار پایدار، ظرفیت محاسباتی) و استخراج الگوی سیاستی قابل اقتباس برای منطقه است. روش تحقیق توصیفی-تحلیلی است و بر تحلیل اسنادی منابع معتبر بین‌المللی و داده‌های به‌روز ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ تکیه دارد. یافته‌ها نشان می‌دهد امارات با اتکای غالب به گاز و افزودن ظرفیت معنادار هسته‌ای و خورشیدی، همراه با ارتقای چشمگیر قابلیت اتکاپذیری شبکه و توسعه ذخیره‌سازی (از جمله پروژه تلمبه‌ای حثّا)، بستر میزبانی بارهای محاسباتی و اقتصاد هوش مصنوعی را فراهم کرده است. پیوند دو سویه انرژی و هوش مصنوعی نیز هم‌زمان تقاضا را افزایش و بهره‌وری سیستم را به واسطه هوشمندسازی شبکه بهبود می‌دهد. نتیجه آن که «برق پاک ارزان قابل اتکا» به شاخص کلیدی جایابی خوشه‌های محاسباتی و ارتقای حکمرانی فناورانه بدل می‌شود. نوآوری مقاله در ارائه چارچوب یکپارچه‌ای است که برق، سیاست صنعتی و زیرساخت‌های دیجیتال را برای گذار فناورانه هم‌راستا می‌سازد. **واژگان کلیدی:** انقلاب صنعتی چهارم، هوش مصنوعی و انرژی، سبد انرژی برق، حکمرانی فناورانه، امارات متحده عربی.

۱. دانشیار، گروه جغرافیای سیاسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. (نویسنده مسئول).

Email: b.zarei@ut.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، جغرافیای سیاسی، گرایش ژئوپلیتیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

Email: Masoud.bakhti58@ut.ac.ir

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، جغرافیای سیاسی، گرایش ژئوپلیتیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

Email: mr.mrvafaee@ut.ac.ir

مقدمه

در دهه اخیر، تحولات فناوریانه ناشی از انقلاب صنعتی چهارم، ساختار تولید، توزیع و مصرف انرژی را دگرگون ساخته و برق را به محور اصلی توسعه اقتصادی و حکمرانی فناوریانه تبدیل کرده است. رشد نمایی فناوری‌هایی چون هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، داده‌کاوی، وسایل نقلیه برقی و شهرهای هوشمند، نیاز به انرژی پایدار و قابل اتکا را به طرز بی‌سابقه افزایش داده است. در این شرایط، برق دیگر صرفاً یک نهاده زیربنایی نیست، بلکه به «متغیر راهبردی قدرت فناوریانه» بدل شده است؛ عنصری که کیفیت آن می‌تواند جهت و سرعت تحول در سایر حوزه‌های نوآورانه را تعیین کند.

در چارچوب نظری حکمرانی فناوریانه، توانایی دولت‌ها برای مدیریت هم‌افزایانه زیرساخت‌های فیزیکی و دیجیتال، تعیین‌کننده جایگاه آن‌ها در زنجیره ارزش فناوری جهانی است. از این منظر، بخش انرژی و به‌ویژه برق، پیوندی مستقیم با سه مؤلفه کلیدی حکمرانی فناوریانه دارد: امنیت انرژی، گذار به پایداری، و ظرفیت محاسباتی. هرچه تولید برق پایدارتر، پاک‌تر و تاب‌آورتر باشد، توان رقابتی کشورها در بهره‌گیری از فناوری‌های تحول‌آفرین نیز افزایش می‌یابد.

در منطقه خلیج فارس، وابستگی تاریخی به سوخت‌های فسیلی و الگوی متمرکز مصرف، چالشی مضاعف برای ورود به عصر دیجیتال ایجاد کرده است. با این حال، در سال‌های اخیر، امارات متحده عربی با اتخاذ سیاستی چندوجهی، کوشیده است میان امنیت انرژی، گذار سبز و الزامات اقتصاد دیجیتال توازن برقرار کند. توسعه نیروگاه هسته‌ای براکه، گسترش نیروگاه‌های خورشیدی نظیر «محمد بن راشد آل مکتوم» و «نور ابوظبی»، پروژه تلمبه‌ای حتّا، و برنامه‌های هوشمندسازی شبکه، نمونه‌هایی از این رویکرد به‌شمار می‌آیند. این تحولات، امارات را به یکی از نمونه‌های نادر در میان کشورهای نفت‌خیز تبدیل کرده که توانسته است برق پاک و قابل اتکا را به زیربنای حکمرانی فناوریانه بدل کند.

با وجود اهمیت فزاینده برق در اقتصاد دیجیتال، هنوز در بسیاری از کشورها رابطه میان ساختار تولید برق و الگوی حکمرانی فناوریانه به‌طور جامع تبیین نشده است. بیشتر مطالعات موجود، انرژی را از منظر زیست‌محیطی یا امنیت عرضه بررسی کرده‌اند، در حالی که بُعد فناوریانه و پیوند آن با زیرساخت‌های دیجیتال کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مسئله اصلی این پژوهش آن است که چگونه کیفیت و ساختار تولید برق (از حیث تنوع منابع، اتکاپذیری، و میزان پاکي) می‌تواند به عاملی تعیین‌کننده در شکل‌گیری حکمرانی فناوریانه تبدیل شود و چه الگوهایی از سیاست‌گذاری انرژی می‌تواند گذار از وابستگی سنتی به سوخت‌های فسیلی به سوی برق پایدار و فناوریانه را تسهیل کنند.

ضرورت انجام این پژوهش از دو جنبه قابل توضیح است: نخست، از منظر علمی، بررسی نقش برق در حکمرانی فناوریانه، می‌تواند به درک بهتر سازوکارهای پیوند میان انرژی و فناوری کمک کند؛ دوم، از منظر سیاستی، شناخت تجربه امارات برای سایر کشورهای منطقه که در مسیر دیجیتالی‌شدن و تنوع‌بخشی به سبد انرژی گام برداشته‌اند، واجد ارزش راهبردی است.

هدف اصلی این تحقیق، تحلیل رابطه میان ساختار تولید برق، راهبردهای گذار انرژی و شکل‌گیری حکمرانی فناوریانه در امارات است. بدین منظور، مطالعه با رویکرد توصیفی-تحلیلی انجام گرفته و از منابع رسمی بین‌المللی (نظیر JEA، IRENA، Ember و DEWA) و داده‌های به‌روز مربوط به سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ بهره گرفته شده است. با ترکیب تحلیل اسنادی و بررسی شاخص‌های عملکردی (از جمله ترکیب سبد انرژی، شدت کربن، قابلیت اتکاپذیری شبکه و ظرفیت ذخیره‌سازی)، تلاش شده است تصویری جامع از جایگاه برق در راهبرد توسعه فناوریانه امارات ارائه گردد.

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که موفقیت امارات در حکمرانی فناوریانه، بیش از هر چیز مرهون تلفیق واقع‌گرایانه سیاست انرژی با اهداف توسعه دیجیتال است. تجربه این کشور نشان می‌دهد که برق پاک و پایدار نه تنها پیش‌شرط کارکرد اقتصاد هوش مصنوعی است، بلکه خود می‌تواند به ابزاری برای ارتقای تاب‌آوری فناوریانه و رقابت‌پذیری ملی تبدیل شود.



فرض اصلی این پژوهش آن است که تنوع و اتکاپذیری سبد برق در کنار سیاست‌های فعال گذار انرژی، نقش مستقیمی در ارتقای حکمرانی فناورانه ایفا می‌کند. بر این اساس، هرچه سهم برق پاک، هوشمندسازی شبکه و انعطاف‌پذیری تولید و ذخیره‌سازی بیشتر باشد، ظرفیت یک کشور برای میزبانی زیرساخت‌های دیجیتال، توسعه اقتصاد داده و تثبیت موقعیت فناورانه‌اش در سطح منطقه‌ای و جهانی افزایش می‌یابد. مطالعه موردی امارات، در واقع آزمونی تجربی برای سنجش این فرضیه است. در مجموع، این مقاله می‌کوشد ضمن تحلیل تجربه امارات، الگویی تطبیقی برای سایر کشورهای منطقه در راستای گذار به حکمرانی فناورانه مبتنی بر برق پاک و قابل‌اتکا ارائه کند؛ الگویی که می‌تواند زمینه‌ساز شکل‌گیری همکاری‌های منطقه‌ای در حوزه انرژی، داده و فناوری‌های تحول‌آفرین در عصر انقلاب صنعتی چهارم باشد.

۲- چارچوب نظری - مفهومی

۲-۱- چارچوب نظری

۲-۱-۱- نظریه حکمرانی فناورانه

حکمرانی فناورانه حاصل تجمیع بحث‌های حکمرانی عمومی، سیاست علم و فناوری و مطالعات داده است و مانند برخی نظریه‌های کلاسیک به نام یک فرد مشخص منتسب نیست. ایده‌های مربوط به حکمرانی دیجیتال در آثار لوسیانو فلورییدی مسیر نظری این بحث را روشن کرده است (Floridi, 2018). مفهوم حکمرانی پیش‌بینانه در نوشته‌های دیوید گوستون نیز به آن سمت‌وسوی عملی داده است. سپس اصول هوش مصنوعی در سازمان همکاری و توسعه اقتصادی و مقررات اتحادیه اروپا این چارچوب را از سطح دانشگاهی به میدان سیاست‌گذاری روزمره آوردند. در این نگاه، فناوری صرفاً ابزار اجرا نیست و می‌تواند شیوه تعریف مسئله‌های عمومی و روند تصمیم‌سازی را دگرگون کند (Zuboff, 2019). همین ویژگی سبب می‌شود که قواعد سیاسی و اجتماعی نیز تغییر یابند و بازتعریف شوند. انقلاب صنعتی چهارم مصرف برق را به دلیل رشد مراکز داده، هوش مصنوعی، شبکه‌های 5G، اینترنت اشیاء و خودروهای برقی به‌طور محسوس بالا برده است (IEA, 2025). بنابراین حکمرانی فناورانه تنها زمانی پایدار و مقیاس‌پذیر می‌شود که برق پاک ارزان و قابل‌اتکا در دسترس باشد. این نیاز با یک سبد متنوع تأمین می‌شود که شامل: انرژی خورشیدی و بادی، گاز برای انعطاف‌پذیری و پوشش ساعات اوج، هسته‌ای برای تولید پیوسته، همراه با ذخیره‌سازی انرژی، مدیریت مصرف و تقویت اتصال میان شبکه‌ها.

۲-۱-۲- نظریه گذار ژئوپلیتیکی انرژی

این نظریه بر تحول ساختارهای قدرت جهانی در اثر گذار از منابع فسیلی به انرژی‌های تجدیدپذیر و هسته‌ای تمرکز دارد. گذار انرژی باعث تغییر در الگوهای وابستگی، کاهش مزیت استراتژیک تولیدکنندگان سستی نفت و افزایش نفوذ کشورهای با ظرفیت فناوری بالا می‌شود (Scholten, 2018). این نظریه ظهور بازیگران جدید در نظم ژئوپلیتیکی انرژی را پیش‌بینی می‌کند.

۲-۲- چارچوب مفهومی

انقلاب صنعتی چهارم: انقلاب صنعتی چهارم به دوره‌ای از تحولات فناورانه اطلاق می‌شود که با همگرایی فناوری‌های دیجیتال، فیزیکی و زیستی مانند هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء، چاپ سه‌بعدی، رباتیک و زیست‌فناوری مشخص می‌شود. این انقلاب مرزهای میان حوزه‌های فناوری را محو کرده و منجر به دگرگونی‌های ساختاری در صنایع، اقتصاد و جوامع شده است (Xu et al., 2018).

ژئوپلیتیک انرژی: ژئوپلیتیک انرژی به مطالعه چگونگی تأثیر، توزیع و کنترل منابع انرژی بر روابط بین‌الملل، ساختارهای قدرت، و امنیت جهانی می‌پردازد. این مفهوم نشان می‌دهد چگونه انرژی می‌تواند به‌عنوان ابزار نفوذ یا تهدید در سطح جهانی به‌کار رود (Conant, 1996).

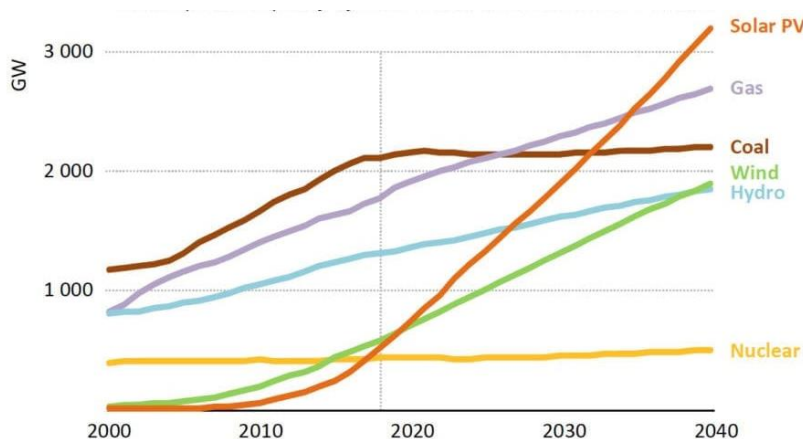
سبد انرژی برق: سبد انرژی برق به ترکیب منابع مختلف مورد استفاده برای تولید برق اطلاق می‌شود که شامل سوخت‌های فسیلی (نفت، گاز، زغال‌سنگ)، منابع تجدیدپذیر (خورشیدی، بادی، آبی) و انرژی هسته‌ای است. تنوع در این سبد می‌تواند ریسک‌های ژئوپلیتیکی و زیست‌محیطی را کاهش دهد (Our World in Data, 2019).

گذار انرژی: گذار انرژی به فرآیند برنامه‌ریزی‌شده انتقال از سیستم‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی به سمت سیستم‌های پایدار و کم‌کربن مانند انرژی‌های تجدیدپذیر و هسته‌ای گفته می‌شود. هدف این گذار، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی است (Cambridge Institute for Sustainability Leadership, 2024).

۳- یافته‌ها

۳-۱- سهم سوخت‌های فسیلی در تولید برق جهانی

بر اساس گزارش اندیشکده انرژی امبر (Ember, 2024)، در سال ۲۰۲۳ سوخت‌های فسیلی همچنان نقش غالب در تولید برق جهانی داشتند و در مجموع بیش از ۶۱ درصد از کل برق تولیدشده در جهان را به خود اختصاص دادند. در این میان، زغال‌سنگ با سهم ۳۵ درصد اصلی‌ترین منبع تولید برق فسیلی باقی مانده است؛ عاملی که به دلیل وفور ذخایر، هزینه پایین و زیرساخت‌های موجود در بسیاری از کشورهای صنعتی و درحال‌توسعه حفظ شده است. گاز طبیعی با سهم ۲۳ درصد در رتبه دوم قرار دارد و به دلیل آلودگی کمتر و انعطاف‌پذیری در پاسخ به تقاضا، به‌ویژه در اروپا، آمریکا و منطقه خاورمیانه نقش پررنگی ایفا می‌کند. نفت و سایر سوخت‌های فسیلی مایع نیز با سهم حدود ۳ درصد بیشتر در مناطق خاص یا شرایط اضطراری مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیاست‌های ملی برخی کشورها نیز در استمرار مصرف سوخت‌های فسیلی مؤثر بوده‌اند. در ایالات متحده، دولت دونالد ترامپ در دور دوم خود با اتخاذ رویکردی حمایتی از صنعت زغال‌سنگ، اقدام به لغو مقررات زیست‌محیطی، تمدید فعالیت نیروگاه‌های زغال‌سنگی و تسهیل مجوزهای استخراج کرد (AP News, 2025)؛ با این حال، فشار بازار و رقابت فناوری‌های نو موجب شد این اقدامات تأثیر پایدار نداشته باشند (Reuters, 2025). در مقابل، چین به‌عنوان بزرگ‌ترین تولیدکننده برق زغال‌سنگ در جهان، در سال ۲۰۲۳ حدود ۶۰ درصد از برق خود را از این منبع تأمین کرد و تنها در همان سال، مجوز احداث ۱۱۷ گیگاوات نیروگاه جدید صادر نمود (Carbon Brief, 2024). این وضعیت حاکی از چالش‌های ژرف در گذار انرژی در اقتصادهای روبه‌رشد است. اگرچه زغال‌سنگ، گاز و نفت به ترتیب در جایگاه‌های اول تا سوم منابع فسیلی تولید برق قرار دارند، اما روند جهانی با فشارهای اقلیمی و کاهش هزینه‌های فناوری‌های تجدیدپذیر، به سوی کاهش تدریجی وابستگی به این منابع و توسعه انرژی‌های پاک حرکت می‌کند.



شکل ۱. روند رشد انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق جهانی (۲۰۴۰-۲۰۰۰)

ظرفیت جهانی نیروگاه‌ها برحسب منبع انرژی در سناریوی سیاست‌های اعلام شده (۲۰۴۰-۲۰۰۰)

منبع: (International Energy Agency, 2019)



طی دو دهه گذشته، انرژی‌های تجدیدپذیر به‌طور پیوسته جایگاه خود را در نظام تولید برق جهانی تثبیت کرده‌اند. روند جهانی نشان می‌دهد که انرژی‌های تجدیدپذیر از یک منبع مکمل به یک ستون اساسی در نظام تأمین برق جهان تبدیل شده‌اند. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، سهم این منابع از تولید برق جهانی از حدود ۱۹ درصد در سال ۲۰۰۰ به ۳۰ درصد در سال ۲۰۲۲ افزایش یافته و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۴۰ به بیش از ۴۵ درصد برسد (IEA, 2020). این رشد عمدتاً حاصل گسترش سریع ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی و بادی، توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی و اصلاحات سیاستی در سطوح ملی و بین‌المللی است. طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر، ظرفیت نصب شده برق تجدیدپذیر از حدود ۹۰۰ گیگاوات در سال ۲۰۰۰ به بیش از ۳/۳۰۰ گیگاوات در سال ۲۰۲۲ رسیده است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۴۰ از مرز ۱۰/۰۰۰ گیگاوات عبور کند (IRENA, 2023; IEA, 2021). در سال ۲۰۲۳، انرژی خورشیدی و بادی به ترتیب با سهم‌های ۵ درصد و ۷ درصد از کل تولید برق، در صدر منابع تجدیدپذیر قرار گرفتند (Ember, 2024).

با وجود این پیشرفت‌ها، روند گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر با موانع مهمی نیز روبه‌رو است. سه عامل کلیدی در تسریع رشد این منابع قابل تشخیص‌اند: کاهش چشمگیر هزینه‌های تولید برق خورشیدی (بیش از ۸۰ درصد از سال ۲۰۱۰ تاکنون)، تقویت تعهدات اقلیمی در چارچوب توافق‌نامه پاریس (UNFCCC, 2015)، و توسعه فناوری‌هایی مانند ذخیره‌سازی انرژی و شبکه‌های برق هوشمند (IEA, 2021). با این حال، چالش‌هایی همچون ناپایداری تولید به دلیل وابستگی به شرایط اقلیمی، ضعف زیرساخت‌های شبکه انتقال و توزیع در بسیاری از کشورها، و موانع مالی و مقرراتی در مسیر اجرای پروژه‌های جدید همچنان باقی است (World Bank, 2022; 21REN, 2023). بنابراین، علی‌رغم روند صعودی سهم تجدیدپذیرها، دستیابی به اهداف جهانی کربن‌زدایی نیازمند رفع این گلوگاه‌ها از طریق سیاست‌گذاری هوشمندانه و سرمایه‌گذاری پایدار خواهد بود.

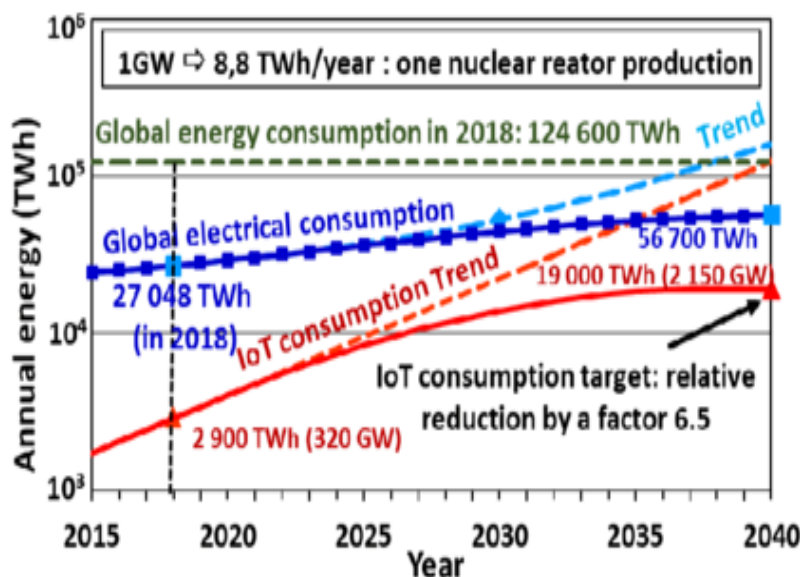
۳-۲- روند استفاده از انرژی هسته‌ای در تولید برق جهانی (۲۰۰۰-۲۰۴۰)

انرژی هسته‌ای طی دهه‌های اخیر به‌عنوان یکی از منابع کم‌کربن تولید برق مطرح بوده است، اما سهم آن در سبد جهانی برق کاهش یافته است. طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، سهم انرژی هسته‌ای از تولید برق جهانی از حدود ۱۷ درصد در سال ۲۰۰۰ به ۹/۲ درصد در سال ۲۰۲۲ تنزل یافته است؛ کاهشی که عمدتاً ناشی از رشد پرشتاب انرژی‌های تجدیدپذیر و موانع اجرایی در توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای بوده است (Ember, 2023). با این حال، چشم‌اندازها نشان می‌دهند که این روند نزولی ممکن است معکوس شود؛ طبق سناریوی سیاست‌های اعلام شده در گزارش چشم‌انداز انرژی جهانی، ظرفیت جهانی انرژی هسته‌ای از ۳۹۰ گیگاوات در سال ۲۰۲۰ به حدود ۷۴۸ گیگاوات تا سال ۲۰۴۰ خواهد رسید، رشدی که عمدتاً در کشورهای در حال توسعه مانند چین و هند متمرکز خواهد بود (IEA, 2024).

سه عامل اصلی به‌عنوان پیشران این رشد شناسایی شده‌اند: نخست، نقش کلیدی انرژی هسته‌ای در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تحقق اهداف توافق‌نامه پاریس (UNFCCC, 2015)؛ دوم، توانایی این منبع برای افزایش امنیت انرژی در برابر نوسانات بازار سوخت‌های فسیلی (IEA, 2021)؛ و سوم، پیشرفت‌های فناوریانه از جمله توسعه راکتورهای مدولار کوچک (SMRs) که هزینه و زمان ساخت را کاهش می‌دهند (World Nuclear Association, 2023).

اگرچه سهم انرژی هسته‌ای در تولید برق جهانی در دو دهه گذشته کاهش یافته است، اما با توجه به نیاز روزافزون به برق پاک و پایدار، این منبع انرژی می‌تواند نقش مهمی در آینده ایفا کند. پیشرفت‌های فناوری، افزایش امنیت انرژی و تعهدات زیست‌محیطی از جمله عواملی هستند که می‌توانند به احیای انرژی هسته‌ای کمک کنند.

شکل ۲. روند مصرف برق توسط فناوری‌های نمادین انقلاب صنعتی چهارم (۲۰۱۵-۲۰۴۰)



منبع: (Coroama, V. C., & Hilty, L. M. 2021)

روند فزاینده توسعه فناوری‌های کلیدی انقلاب صنعتی چهارم، تقاضای جهانی برای برق را به طرز بی‌سابقه افزایش داده است. هوش مصنوعی، به‌ویژه در قالب مدل‌های زبانی بزرگ و مراکز داده مرتبط، یکی از مهم‌ترین عوامل این جهش است. بر اساس پیش‌بینی آژانس بین‌المللی انرژی، مصرف برق این مراکز ممکن است تا سال ۲۰۳۰ به ۹۴۵ تراوات/ساعت در سال برسد، رقمی معادل سه برابر مصرف برق بریتانیا در سال ۲۰۲۳ (IEA, 2025). هم‌زمان، گسترش خودروهای الکتریکی نیز نیاز به برق را به‌شدت افزایش داده است؛ به‌گونه‌ای که در ایالات متحده، تنها تا سال ۲۰۲۷ مصرف برق ناشی از این خودروها ممکن است با مصرف کل ایالت کالیفرنیا برابری کند (Bloomberg NEF, 2024).

در کنار این موارد، روند توسعه شهرهای هوشمند نیز محرک قابل توجهی در افزایش مصرف انرژی برق محسوب می‌شود. پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که بازار جهانی شهرهای هوشمند از ۸۳/۹ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۹ به ۴۶۳/۹ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۷ خواهد رسید (Science Direct, 2022). فناوری‌هایی مانند شبکه‌های G5 که با زیرساخت‌های مترکم‌تر و توان عملیاتی بالاتر همراه‌اند، نیز نیاز به مصرف برق را به‌مراتب بیشتر از نسل‌های قبلی کرده‌اند (MDPI, 2021). همچنین، انفجار در تعداد دستگاه‌های متصل به اینترنت اشیاء که از ۵ میلیارد در سال ۲۰۱۵ به پیش‌بینی ۷۵ میلیارد دستگاه در سال ۲۰۲۵ می‌رسد، بیانگر افزایش گسترده مصرف انرژی برای پشتیبانی از این زیرساخت است (Science Direct, 2024). مجموعه این تحولات نشان می‌دهد که نوآوری‌های فناورانه اگرچه با هدف ارتقاء بهره‌وری و کاهش آلاینده‌گی توسعه یافته‌اند، اما در عمل موجب رشد چشمگیر مصرف برق شده‌اند و این واقعیت، برنامه‌ریزی دقیق‌تری را در حوزه تولید و توزیع پایدار انرژی ایجاب می‌کند.

۳-۳- پیوند هوش مصنوعی و انرژی (AI-Energy Nexus):

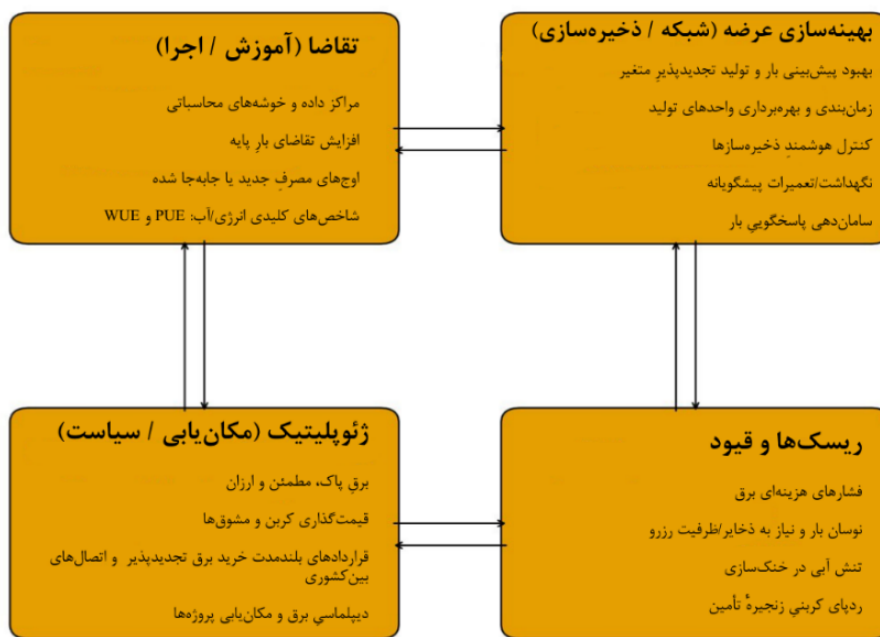
پیوند میان هوش مصنوعی و انرژی رابطه‌ای دوسویه و تقویتی است. از یک‌سو، گسترش مدل‌های بزرگ و خدمات مبتنی بر هوش مصنوعی با رشد سریع ظرفیت مراکز داده و خوشه‌های شتاب‌دهنده محاسباتی، تقاضای برق را افزایش می‌دهد و منحنی بار شبکه را دگرگون می‌کند؛ در مرحله «آموزش» بارهای کوتاه‌مدت اما بسیار

پرشدهت شکل می‌گیرد که می‌تواند اوج‌های مصرف تازه‌ای ایجاد کند، در حالی که در مرحله «اجرا» بار پایداری و جغرافیامحورتر توزیع می‌شود. پیامد مستقیم این روندها افزایش تقاضای پایه برق در مقیاس شهری و ملی، حساسیت بیشتر به کیفیت زیرساخت انتقال و قابلیت اطمینان، و ارتقای اهمیت شاخص‌های بهره‌وری انرژی و آب در مراکز داده (مانند PUE و WUE) برای مکان‌یابی و سیاست‌گذاری است (IEA, 2024; Masanet et al., 2020; Uptime Institute, 2024; The Green Grid, 2011). از سوی دیگر، هوش مصنوعی در سمت عرضه، با خلق نوعی وات مجازی، کار شبکه را منظم‌تر و کم‌هزینه‌تر می‌کند. با پیش‌بینی دقیق‌تر بار و تولید تجدیدپذیر، زمان‌بندی واحدهای تولید بهتر انجام می‌شود، ذخیره‌سازها به موقع وارد عمل می‌شوند و پیک بار شبکه تعدیل گردیده و گلوگاه‌های شبکه هم کم‌تر می‌شود. نگهداشت پیشگویانه خرابی‌ها را از پیش هشدار می‌دهد و از قطعی‌های ناخواسته می‌کاهد، و مدیریت «پاسخگویی بار» مصرف صنایع و ساختمان‌ها را با وضعیت لحظه‌ای شبکه هماهنگ می‌کند. حاصل این مجموعه، پذیرش سهم بیشتر برق خورشیدی و بادی، کاهش شدت کربن و پایین‌آمدن هزینه کل سیستم است (IEA, 2022; IRENA, 2022; NREL, 2023; Stoll et al., 2021). برآیند این دو مسیر، پیامدهای ژئوپلیتیکی مهمی دارد؛ مزیت رقابتی کشورها در اقتصاد هوش مصنوعی به صرف تراشه و شبکه ارتباطی محدود نمی‌شود، بلکه دسترسی پایدار به «برق پاک ارزان قابل‌اتکا» به شاخص کلیدی مکان‌یابی خوشه‌های محاسباتی بدل شده است؛ از این‌رو دولت‌ها با ابزارهایی مانند قیمت‌گذاری کربن، معافیت یا تعرفه ترجیحی انرژی برای مراکز داده، قراردادهای خرید برق بلندمدت (PPA) و اتصال‌های فرامرزی می‌کوشند سرمایه محاسباتی را جذب و تجارت خدمات دیجیتال را توسعه دهند (OECD, 2023; European Commission, 2023; Cities & Arup, 2021: 40). در عین حال، ریسک‌ها و قیود نیز برجسته‌اند، اگر توسعه تولید، انتقال و ذخیره‌سازی همگام با رشد بارهای محاسباتی پیش نرود، هزینه نهایی برق برای صنایع و خانوارها می‌تواند افزایش یابد؛ نوسان بارهای آموزش نیاز به ظرفیت رزرو و انعطاف‌پذیری شبکه را تشدید می‌کند؛ فشار بر منابع آب برای خنک‌سازی در اقلیم‌های خشک، کنترل بار سرمایه‌های مستلزم پایبندی به استانداردهای کارایی مصرف آب است؛ و در نهایت، ردپای کربن زنجیره تأمین سخت‌افزار (از تراشه تا سرور) باید در ارزیابی‌های چرخه عمر به‌طور شفاف لحاظ شود (Shehabi et al., 2016; ASHRAE, 2021; Patterson et al., 2021; Malmödin & Lundén, 2018).

در سطح سیاست‌گذاری، چند پیامد راهبردی برجسته است: نخست، تعریف «سبد برق متناسب با اقتصاد هوش مصنوعی» با تأکید بر ظرفیت‌های پاک، ذخیره‌سازی و اتکاپذیری؛ دوم، طراحی مشوق‌های مکان‌یابی مراکز داده به شرط پایبندی به حداکثرهای مجاز مصرف انرژی و آب مراکز داده و نیز انعقاد قراردادهای بلندمدت خرید برق پاک؛ سوم، سرمایه‌گذاری در هوشمندسازی شبکه (پیش‌بینی بار و تولید، مدیریت پاسخگویی بار، نگهداشت پیشگویانه) که معمولاً کم‌هزینه‌ترین مسیر خلق ظرفیت افزوده است و چهارم، شفاف‌سازی داده‌های مربوط به مصرف و شدت کربن مراکز داده همراه با انتشار برخاط این شاخص‌ها برای تنظیم‌گری مبتنی بر شواهد (IEA, 2022, 2024; European Commission, 2023; OECD, 2023).

پیوند هوش مصنوعی-انرژی به‌طور هم‌زمان از سمت تقاضا و عرضه عمل می‌کند و با بازترسیم جغرافیای محاسبات، بر مزیت‌های ملی اثر می‌گذارد. کشورهایی که بتوانند ترکیب «برق پاک ارزان قابل‌اتکا»، «ظرفیت محاسبات» و «حکمرانی داده» را هم‌افزا سازند، در رقابت هوش مصنوعی دست بالاتر خواهند داشت (IEA, 2024; OECD, 2023).

شکل ۳. مدل مفهومی پیوند هوش مصنوعی و انرژی



منبع: نگارندگان

۳-۴- سیاست‌های انرژی و فناوری امارات متحده عربی در عصر انقلاب صنعتی چهارم

۳-۴-۱- برنامه‌های امارات در خصوص استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر با تمرکز بر تولید برق

امارات متحده عربی با درک اهمیت تنوع‌بخشی به منابع انرژی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، سرمایه‌گذاری‌های گسترده‌ای در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر انجام داده است. از جمله پروژه‌های شاخص می‌توان به مجتمع خورشیدی محمد بن راشد آل مکتوم در دبی اشاره کرد که با ظرفیت نهایی ۵۰۰۰ مگاوات، یکی از بزرگ‌ترین پروژه‌های خورشیدی جهان محسوب می‌شود (DEWA, 2023). همچنین، پروژه نور ابوظبی با ظرفیت ۱۱۷۷ مگاوات به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین نیروگاه‌های خورشیدی تک‌سایت در جهان شناخته می‌شود (Masdar, 2022).

۳-۴-۲- برنامه‌های امارات در استفاده از انرژی هسته‌ای با تمرکز بر تولید برق

در راستای تأمین برق پایدار و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، امارات پروژه نیروگاه هسته‌ای براکه را با همکاری شرکت کره‌ای KEPCO راه‌اندازی کرده است. این نیروگاه شامل چهار راکتور APR-1400 است که هر کدام ظرفیت تولید ۱۴۰۰ مگاوات برق را دارند. با بهره‌برداری کامل از این نیروگاه، انتظار می‌رود که حدود ۲۵ درصد از نیاز برق کشور تأمین شود (ENEC, 2023).

۳-۴-۳- میزان تولید برق توسط امارات از منابع سوخت‌های فسیلی

با وجود تلاش‌ها برای توسعه انرژی‌های پاک، بخش عمده‌ای از برق امارات همچنان از منابع فسیلی تأمین می‌شود. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، در سال ۲۰۲۲ حدود ۹۰ درصد از برق تولیدی امارات از گاز طبیعی و نفت تأمین شده است (IEA, 2022). با این حال، روند کاهشی در سهم سوخت‌های فسیلی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده حرکت به سوی منابع انرژی پایدارتر است.

۳-۴-۴- جمع‌بندی برنامه‌های امارات برای افزایش و جهش در تولید برق

امارات با هدف پاسخگویی به تقاضای روبه‌رشد برق در نتیجه توسعه فناوری‌های نوین و شهرهای هوشمند، برنامه‌ریزی جامعی برای افزایش ظرفیت تولید برق دارد. این برنامه‌ها شامل توسعه پروژه‌های خورشیدی و بادی، بهره‌برداری کامل از



نیروگاه هسته‌ای براکه و بهینه‌سازی نیروگاه‌های فسیلی موجود است. هدف نهایی این است که تا سال ۲۰۵۰، ۵۰ درصد از برق کشور از منابع پاک تأمین شود (UAE Energy Strategy, 2050).

۳-۴-۵- برنامه‌های امارات برای میزبانی از شرکت‌های غول فناوری هوش مصنوعی

امارات با راه‌اندازی برنامه‌هایی مانند «استراتژی ملی هوش مصنوعی ۲۰۳۱» و ایجاد مراکز نوآوری، تلاش دارد به قطب منطقه‌ای در حوزه هوش مصنوعی تبدیل شود. شهر دبی با تأسیس منطقه آزاد «دبی اینترنت سیتی» و جذب شرکت‌های بین‌المللی مانند IBM، Microsoft و Google، به مرکز فناوری اطلاعات و هوش مصنوعی در منطقه بدل شده است (Smart Dubai, 2023).

۳-۴-۶- برنامه‌های امارات برای هوشمندسازی شهرهای خود

امارات با اجرای پروژه‌هایی مانند «شهر هوشمند دبی» و «ابوظبی هوشمند»، به دنبال ارتقاء کیفیت زندگی شهروندان از طریق استفاده از فناوری‌های نوین است. این پروژه‌ها شامل توسعه زیرساخت‌های دیجیتال، حمل‌ونقل هوشمند، مدیریت انرژی و آب و ارائه خدمات دولتی الکترونیکی می‌شوند (Smart Dubai, 2023).

۳-۴-۷- بررسی سیاست‌های امارات برای نقش‌آفرینی در زنجیره فناوری دنیا مانند حضور در طرح جاده ابریشم دیجیتال

امارات با مشارکت فعال در طرح‌هایی مانند «جاده ابریشم دیجیتال» چین، تلاش دارد نقش کلیدی در زنجیره تأمین فناوری جهانی ایفا کند. این کشور با سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مخابراتی، مراکز داده و پروژه‌های فناوری اطلاعات، به دنبال تقویت موقعیت خود به‌عنوان دروازه دیجیتال بین شرق و غرب است (UAE Ministry of Economy, 2023).

۳-۴-۸- شاخص‌های عملکرد کلیدی امارات

برای سنجش آمادگی برقی امارات در پیوند با اقتصاد هوش مصنوعی، پنج سنجه ساده اما گویا را دنبال می‌کنیم: ترکیب تولید برق، شدت کربن برق، ظرفیت ذخیره‌سازی، قابلیت اتکاپذیری شبکه، و مقیاس مراکز داده. این پنج‌گانه نشان می‌دهد کشور تا چه حد در مسیر «برق پاک ارزان قابل‌اتکا» حرکت می‌کند و آیا می‌تواند بارهای محاسباتی بزرگ را با ریسک پایین میزبانی کند (Ember, 2025; IEA, 2024).

جدول ۱. شاخص‌های عملکرد کلیدی برق در امارات

شاخص	تعریف / واحد	سال داده	مقدار	منبع
سهم گاز در تولید برق	درصد از کل تولید	۲۰۲۳	٪۷۲	Ember (کشور امارات)؛ Low Carbon Power
سهم هسته‌ای در تولید برق	درصد از کل تولید	۲۰۲۳	٪۲۰	Ember (کشور امارات)
سهم خورشیدی/بادی در تولید برق	درصد از کل تولید	۲۰۲۳	٪۸/۴	Ember (کشور امارات)
شدت کربن تولید برق	gCO ₂ e/ kWh	۲۰۲۳	۳۵۹	Low Carbon Power؛ همسنجی با OWID/ Ember
ذخیره‌سازی نصب شده (باتری)	MWh	۲۰۲۳	۸/۶۱	DEWA (گزارش/اطلاعیه)
ذخیره‌سازی در دست احداث (تلمبه‌ای «حتا»)	MW/ MWh	۲۰۲۵	۲۵۰/۱۵۰۰	Water Power Magazine; DEWA
قابلیت اتکاپذیری شبکه (دوبی)	دقیقه قطع به‌ازای هر مشترک / سال (CML)	۲۰۲۳	۱/۰۶ دقیقه	DEWA (اطلاعیه رسمی؛ دفترچه آمار ۲۰۲۳)
ظرفیت مراکز داده (برنامه Khazna)	MW (IT load)	۲۰۲۳	۲۰۰	Khazna
پروژه «خورشیدی+باتری ۷/۲۴» ابوظبی	PV (GWdc)/ BESS (GWh)	۲۰۲۵	۵,۲/۱۹	Masdar؛ Power-Technology؛ Energy-Storage.news

منبع: نویسندگان

ترکیب تولید ۲۰۲۳ نشان می‌دهد اتکای اصلی هنوز با گاز است، اما برق هسته‌ای و خورشیدی سهم معناداری گرفته‌اند و در نتیجه شدت کربن برق پایین‌تر آمده و ظرفیت کاهش بیشتر هم دارد (Ember, 2025). از نظر اتکاپذیری، کارنامه دویی با میانگین قطع بسیار اندک، سطحی از قابلیت اطمینان را نشان می‌دهد که برای میزبانی بارهای محاسباتی حساس مزیت راهبردی است (DEWA, 2024). در بعد انعطاف‌پذیری، مقدار موجودی ذخیره‌سازی باتری امروز کم است، اما تکمیل نیروگاه تلمبه‌ای «حتّا»، جهش معناداری ایجاد می‌کند و به کاهش پیک‌های مصرف و پذیرش سهم بالاتر انرژی خورشیدی کمک خواهد کرد (DEWA, 2024). در سمت تقاضای دیجیتال، برنامه توسعه Khazna و پروژه «خورشیدی + باتری ۷/۲۴» ابوظبی نشانه هم‌راستایی سیاست برق با رشد مراکز داده است؛ این هم‌راستایی اگر با قراردادهای بلندمدت خرید برق پاک و انتشار دوره‌ای داده‌های مصرف و شدت کربن همراه شود، مزیت «برق پاک قابل‌اتکا» را برای اقتصاد هوش مصنوعی تثبیت می‌کند (Masdar, 2025; OECD, 2023).

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتیجه‌گیری

تحلیل انجام شده نشان می‌دهد که در عصر انقلاب صنعتی چهارم، انرژی برق به یکی از محورهای اصلی حکمرانی فناورانه تبدیل شده است. رشد سریع فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی، شبکه‌های داده، وسایل برقی و شهرهای هوشمند، موجب افزایش تقاضای مداوم و پرنوسان برق شده است. در نتیجه، مدیریت برق دیگر صرفاً یک مسئله فنی نیست، بلکه عنصری راهبردی در توانمندی فناورانه کشورها به‌شمار می‌آید.

تحولات اخیر در ترکیب منابع تولید برق نیز نشان می‌دهد که مرکز ثقل رقابت انرژی از منابع هیدروکربنی به سمت ترکیب بهینه‌ی برق پاک، پایدار و قابل‌اتکا در حال جابه‌جایی است. کشورهایی که بتوانند میان پایداری زیست‌محیطی و امنیت عرضه توازن برقرار کنند، برندگان اصلی در اقتصاد دیجیتال آینده خواهند بود.

در این میان، امارات با تکیه بر سبدهای متنوع از گاز، انرژی هسته‌ای و خورشیدی و با دستیابی به شاخص بالای قابلیت اتکاپذیری شبکه، توانسته است الگویی از گذار موفق به سمت حکمرانی فناورانه ارائه دهد. ارتقای ظرفیت تولید و ذخیره‌سازی برق، همراه با برنامه‌ریزی بلندمدت برای توسعه مراکز داده و زیرساخت‌های هوشمند، موقعیت این کشور را به‌عنوان الگوی پیشرو خلیج فارس تثبیت کرده است.

از سوی دیگر، پیوند فزاینده میان هوش مصنوعی و انرژی برق، دو سویه است: از یک سو بار مصرفی را افزایش می‌دهد و از سوی دیگر، از طریق پیش‌بینی هوشمند و بهینه‌سازی مصرف، امکان بهره‌وری بالاتر را فراهم می‌سازد. در این شرایط، کشورهای منطقه‌ای که فاقد سیاست جامع در زمینه برق پاک، ذخیره‌سازی و شبکه هوشمند هستند، با خطر عقب‌ماندگی فناورانه و کاهش جذابیت سرمایه‌گذاری در بخش‌های دیجیتال روبه‌رو خواهند شد.

پیشنهادات

۱- تدوین و اجرای راهبرد ملی برق پاک و قابل‌اتکا: کشورهای منطقه باید به‌صورت تدریجی اما پیوسته، سهم منابع تجدیدپذیر را در ترکیب انرژی افزایش دهند و همزمان با توسعه زیرساخت‌های گازی و هسته‌ای، قابلیت اتکاپذیری شبکه را تقویت کنند. این اقدام باید با برنامه‌های واقع‌گرایانه برای ذخیره‌سازی انرژی و ارتقای شبکه انتقال همراه باشد تا توازن میان پایداری و امنیت انرژی برقرار شود.

۲- حرکت به‌سوی شبکه‌های هوشمند و تاب‌آور: استفاده از فناوری‌های نوین در مدیریت سمت تقاضا، نگهداشت پیش‌گویانه و پاسخگویی بار، ظرفیت پنهان شبکه را فعال می‌کند و امکان میزبانی بارهای فناورانه، از جمله مراکز داده و



زیرساخت‌های محاسباتی را فراهم می‌سازد. این رویکرد هزینه کمتری نسبت به توسعه ظرفیت تولید جدید دارد و در عین حال بهره‌وری کلی سیستم را افزایش می‌دهد.

۳- طراحی چارچوب یکپارچه برای توسعه زیرساخت‌های فناوریانه: ضروری است مکان‌یابی و طراحی مراکز داده و خوشه‌های فناوریانه با سیاست‌های انرژی هماهنگ شود. معیارهایی چون کارایی انرژی، شدت کربن برق تحویلی، و دسترسی به برق پاک باید در اعطای مجوزها و تعرفه‌ها لحاظ شود. چنین هماهنگی‌ای موجب می‌شود حکمرانی فناوریانه با زیرساخت انرژی هم‌افزا شود و توسعه دیجیتال از تنگناهای برقی آسیب نبیند.

۴- توجه به اقلیم و منابع آب در سیاست‌های انرژی و فناوری: در اقلیم‌های گرم و خشک، برنامه‌ریزی انرژی باید هم‌زمان با راهکارهای مدیریت آب انجام گیرد. استفاده از فناوری‌های خنک‌سازی کم‌آب یا بی‌آب، بازیافت پساب و هم‌افزایی میان بخش آب و برق، از پیش‌شرط‌های اصلی پایداری زیرساخت‌های فناوریانه است.

۵- تقویت همکاری‌های منطقه‌ای در حوزه برق و فناوری: کشورهای خلیج فارس می‌توانند از طریق ایجاد شبکه‌های تبادل برق، پروژه‌های مشترک انرژی تجدیدپذیر و تدوین استانداردهای مشترک برای زیرساخت‌های فناوریانه، هزینه‌ها را کاهش داده و تاب‌آوری سیستم‌های خود را افزایش دهند. این همکاری‌ها ضمن جلوگیری از واگرایی فناوریانه، امکان شکل‌گیری یک بازار برق و فناوری منسجم را فراهم می‌کند.

۶- پیوند سیاست صنعتی با حکمرانی فناوریانه: توسعه صنایع بومی در زنجیره ارزش انرژی‌های تجدیدپذیر، ذخیره‌سازی و تجهیزات شبکه هوشمند، باید بخشی از راهبرد کلان حکمرانی فناوریانه باشد. این امر موجب می‌شود گذار به برق پاک نه تنها به پایداری زیست‌محیطی بلکه به ایجاد اشتغال دانشی و تقویت توان فناوریانه داخلی بینجامد.

Reference

- AP News. (2025). Trump signs executive orders to boost coal, a reliable but polluting energy source.
<https://apnews.com/article/693e2604785c07ff790d9afd2e06d543>
- AP News. (2025). Trump's push to save the fading coal industry gets a warm embrace in West Virginia.
<https://apnews.com/article/۹۳e۶d۷۰۲۸f۸۲de۹۴۴۱c۹dbb۰۵۹c۱۶۲۶f>
- ASHRAE (2021). Thermal guidelines for data processing environments (4th ed.). ASHRAE TC 9.9.
- Bloomberg NEF. (2024). What 2040 will look like: Predictions for the future.
<https://quantumzeitgeist.com/what-2040-will-look-like-predictions-for-the-future>
- C40 Cities, & Arup. (2021). Data centres and climate action: Policy options for cities. C40 Cities.
- Cambridge Institute for Sustainability Leadership. (2024). What is the energy transition?
<https://www.cisl.cam.ac.uk/news/blog/what-energy-transition>
- Carbon Brief. (2024). China's construction of new coal-power plants reached 10-year high in 2024.
<https://www.carbonbrief.org/chinas-construction-of-new-coal-power-plants-reached10-year-high-in-2024>
- Clean Energy Ministerial. (2023). About CEM.
<https://www.cleanenergyministerial.org>
- Climate Home News. (2021). Glasgow statement ends international public finance for fossil fuels.
<https://www.climatechangenews.com>
- Conant, M. (1996). Geopolitics of energy. International Journal, 14(3), 305–320.
<https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/014459879601400304>
- COP28 UAE. (2023). Global renewables and energy efficiency pledge.
<https://www.cop28.com/en/global-renewables-and-energy-efficiency-pledge>
- Coroama, V. C., & Hilty, L. M. (2021). Energy consumption of the Internet of Things and its relation to overall global electricity demand: Scenarios for 2040. Journal of Cleaner Production, 282, 124555.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124555>
- DEWA. (۲۰۲۳). Annual statistics booklet 2023.
<https://www.dewa.gov.ae>
- DEWA. (2024). DEWA records the world's lowest electricity customer minutes lost (CML) in 2023.
<https://www.dewa.gov.ae>
- DEWA. (۲۰۲۴). Hydroelectric power plant in Hatta- 250 MW/ 1,500 MWh (completion Q2 2025).
<https://www.dewa.gov.ae>
- Ember. (۲۰۲۳). Global electricity review 2023.
<https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023>



- Ember. (٢٠٢٤). Global electricity review 2024.
<https://ember-energy.org/latestinsights/globalelectricityreview2024/globalelectricitytrends>
- Ember. (٢٠٢٥). United Arab Emirates- Country profile.
<https://ember-energy.org>
- Emirates Nuclear Energy Corporation (ENEC). (2023). Barakah nuclear energy plant.
<https://www.enec.gov.ae/barakah-npp>
- Energy-Storage.news. (2025). Masdar–EWEC launch world-biggest 24/7 solar + battery project.
<https://www.energy-storage.news>
- European Commission. (2023). Recommendation on energy-efficient, sustainable and circular data centres. Publications Office of the European Union.
- Floridi, L. (2018). Soft ethics and the governance of the digital. *Philosophy & Technology*, 31(1), 1–8.
- Frontex. (2015). Smart borders pilot project: Technical report on the technical feasibility of biometric border checks at air borders. Publications Office of the EU.
- Fossil Fuel Non-Proliferation Treaty Initiative. (2023). About the treaty.
<https://fossilfueltreaty.org>
- Giuli, M. (2015). Negotiating energy diplomacy and its relationship with foreign policy. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 5(2), 1–1٠.
<https://pdfs.semanticscholar.org/b422/c0b17bf07d64a04e5f17be57ba6ff2d46a0e.pdf>
- IEA. (٢٠١٤). Energy security: Definitions, dimensions and indexes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 1–10.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008892>
- IEA. (٢٠٢٠). World energy outlook 2020.
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- IEA. (2021). Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector.
<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- IEA. (2022). Digital demand-driven electricity systems: How digitalisation reshapes power system flexibility. International Energy Agency.
- IEA. (2023a). COP28 tripling renewable capacity pledge – Analysis.
<https://www.iea.org>
- IEA. (2024). World energy outlook 2024.
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- IEA. (2024). Data centres and artificial intelligence – Tracking clean energy progress. International Energy Agency.
- IEA. (2025). Energy and AI.
<https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
- International Atomic Energy Agency. (2023). Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050.
https://www.pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-1-44_web.pdf
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2018). Global energy transformation: A roadmap to 2050.

<https://www.irena.org/publications/2018/Apr/Global-Energy-Transformation>

- IRENA. (2022). Innovation landscape for a renewable-powered future. International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2023). Renewable capacity statistics 2023.
<https://www.irena.org/publications/2023/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2023>
- Khazna Data Centers. (n.d.). Mega-scale Khazna data centers to provide 200 megawatts.
<https://khaznadatacenters.com>
- LowCarbonPower. (n.d.). United Arab Emirates – Electricity generation mix, 2023.
<https://lowcarbonpower.org>
- Masdar. (2022). Noor Abu Dhabi solar plant.
<https://masdar.ae/en/masdar-clean-energy/projects/noor-abu-dhabi>
- Masdar. (2025). World's first 24/7 solar PV + battery storage project (5.2 GWdc + 19 GWh) launched in Abu Dhabi.
<https://masdar.ae>
- Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., & Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. Science, 367(6481), 984–986.
<https://doi.org/10.1126/science.aba3758>
- MDPI. (2021). The role of 5G technologies in a smart city: The case for intelligent transport systems. Sustainability, 13(9), 5188.
<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/9/5188>
- Malmmodin, J., & Lundén, D. (2018). The energy and carbon footprint of the ICT and E&M sector in Sweden 1990–2015. Sustainability, 10(9), 3027.
<https://doi.org/10.3390/su10093027>
- NREL. (2023). Grid flexibility and energy storage: State of the art. National Renewable Energy Laboratory.
- OECD. (2023). Data centres, cloud computing and international trade in services. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Our World in Data. (2019). Electricity mix.
<https://ourworldindata.org/electricity-mix>
- Patterson, M., et al. (2021). Data center liquid cooling: Opportunities and challenges. ASHRAE Journal, 63(7), 18–28.
- Power-Technology. (2025, January 15). UAE launches first 24/7 solar PV + battery storage gigascale project.
<https://www.power-technology.com>
- REN21. (2023). Renewables global status report 2023.
<https://www.ren21.net/reports/global-status-report>
- Rest of World. (2025). The invisible backbone of the UAE's AI superpower dreams.
<https://restofworld.org>
- Reuters. (2024). China's cut to coal power share is a rare but key climate win.
<https://www.reuters.com/business/energy/chinas-cut-coal-powershareisrarekeyclimate-win-maguire-2024-11-27>



- Reuters. (2025). In Trump's first 100 days, US energy dominance plans roiled by trade uncertainty.
<https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/trumps-first-100daysusenergy-dominance-plans-roiled-by-trade-uncertainty-2025-04-30>
- Scholten, D. (Ed.). (2018). The geopolitics of renewables. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-67800-9>
- Science Direct. (2022). Emerging smart city, transport and energy trends in urban settings.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162522004371>
- ScienceDirect. (2024). IoT implementation for energy system sustainability: The role of smart cities.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178724000626>
- Shehabi, A., et al. (2016). United States data center energy usage report (LBNL-1005770). Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Smart Dubai. (2023). Smart Dubai initiatives.
<https://www.smartdubai.ae/initiatives>
- The Green Grid. (2011). Water usage effectiveness (WUE): A Green Grid data center sustainability metric. The Green Grid.
- UAE Ministry of Economy. (2023). Digital silk road initiative.
<https://www.economy.gov.ae/english/initiatives/digital-silk-road>
- UAE Ministry of Energy and Infrastructure. (2023). UAE energy strategy 2050.
<https://www.moei.gov.ae/en/strategic-initiatives/uae-energy-strategy-2050.aspx>
- UNFCCC. (1998). Kyoto protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.
<https://unfccc.int>
- UNFCCC. (2015). Paris agreement.
<https://unfccc.int>
- Uptime Institute. (2024). Global data center survey 2024. Uptime Institute Intelligence.
- World Bank. (2022). Electricity access and network integration.
<https://www.worldbank.org/en/topic/energy/overview>
- World Nuclear Association. (2023). World nuclear performance report 2023.
<https://worldnuclear.org/informationlibrary/currentandfuturegeneration/worldnuclear-performance-report.aspx>
- Xu, M., David, J. M., & Kim, S. H. (2018). The Fourth Industrial Revolution: Opportunities and challenges. International Journal of Financial Research, 9(2), 90–90.
<https://doi.org/10.5430/ijfr.v9n2p90>
- Zuboff, S. (2019). The age of surveillance capitalism: The fight for a human future at the new frontier of power. PublicAffairs.