

گازنامه انجمن علمی شبکه هوشمند انرژی ایران

شماره ۱۱ - خرداد ماه ۱۴۰۴

آنچه در این شماره می خوانیم:

❖ محیط های هوشمند انرژی (ESE) چگونه سامانه های هوشمند پراکنده را یکپارچه می کنند؟

❖ معماری کارکردی ESE

❖ چشم انداز ۲۰۴۰: محیط های هوشمند انرژی در مقیاس سیاره ای چیست؟





صاحب امتیاز: انجمن شبکه هوشمند انرژی ایران

مدیر مسئول: دکتر علیرضا فریدونیان

تیم اجرایی نشریه: سعید کنفش دوززاده - محمد اسلامی

❖ انرژی به عنوان پیونددهنده سامانه‌های هوشمند

در دو دهه گذشته، سامانه‌هایی مانند شبکه هوشمند، خانه هوشمند، شهر هوشمند، حمل‌ونقل هوشمند، کشاورزی هوشمند، پوشیدنی‌های هوشمند و ایمپلنت‌های هوشمند هر کدام در حوزه‌ای جداگانه توسعه یافته‌اند. این توسعه پراکنده، اگرچه دستاوردهای چشمگیری به همراه داشته، یک شکاف معرفت‌شناختی بنیادین پدید آورده است. هر سامانه به تنهایی کارآمد است، اما همکاری جمعی آن‌ها و بهره‌گیری از پتانسیل هم‌افزایی‌شان نیازمند چارچوبی یکپارچه‌ساز است. این گاهنامه آموزشی می‌کوشد مفهوم محیط‌های هوشمند انرژی (ESE) را به عنوان پاسخی به این شکاف معرفی کند؛ مفهومی که انرژی را نه فقط به عنوان یک ورودی فنی، بلکه به عنوان توانمندساز بنیادین و پیونددهنده میان زیرسامانه‌های ناهمگون به کار می‌گیرد.

❖ مفهوم و ضرورت یکپارچه‌سازی

انرژی، در نگاه رایج، فقط سوختی است که تجهیزات را به کار می‌اندازد. اما در چارچوب محیط‌های هوشمند انرژی، انرژی نقش بسیار گسترده‌تری ایفا می‌کند. زیرساخت را توان می‌بخشد، عملیات را پایدار نگه می‌دارد و تبادل داده را تسهیل می‌کند. به همین دلیل، انرژی محور طبیعی یکپارچه‌سازی میان سامانه‌های هوشمند

پراکنده است. با این‌همه، این نقش فرارشته‌ای انرژی اغلب نادیده گرفته می‌شود و همین غفلت، شکافی در هماهنگی راهبردی و طراحی کل‌نگر پدید می‌آورد. برای گشودن پتانسیل جمعی سامانه‌های هوشمند، یک بعد یکپارچه‌ساز فراتر از مرزهای هر حوزه لازم است.

مفهوم محیط هوشمند انرژی در قالب یک سیستم پیچیده تطبیقی از سیستم‌ها (CASoS) صورت‌بندی می‌شود. در این چارچوب، هوشمندی نه فقط در جریان بالارونده از تجهیزات میدانی به سطح مدیریت جسته می‌شود، بلکه جریان فرمان و کنترل رو به پایین را نیز در بر می‌گیرد. به این ترتیب، ساختارهایی از سامانه‌های هوشمند به هم پیوسته شکل می‌گیرد که انرژی و اطلاعات را به اشتراک می‌گذارند و در برابر تغییرات محیطی و نیازهای متغیر، پاسخ‌گو و تطبیقی می‌مانند.

مبنای فلسفی این نظریه، الگوی جعبه‌ابزار تکامل‌یابنده است. یک سامانه از سامانه‌های ناهمگون که پیمان‌های، باز و تطبیقی است و اجزای تشکیل‌دهنده آن همچون ابزارهای درون یک جعبه‌ابزار، پیوسته به‌روزرسانی و جایگزین می‌شوند. این گشودگی دوسویه است، باز در راس، به سوی اهداف راهبردی و نیازهای ذی‌نفعان در حال تحول و باز در قاعده، به سوی فناوری‌ها و قابلیت‌های عملیاتی نوظهور. چنین ساختاری اجازه می‌دهد تا سامانه، هم با تغییرات سطح کلان سیاست‌گذاری و انتظارات

اجتماعی همگام شود و هم از نوآوری‌های فنی در لبه‌های عملیاتی بهره‌برد.

سیر تکاملی این حوزه‌ها نشان می‌دهد چگونه مسیرهای مجزا امروز به هم می‌رسند. اینترنت اشیاء از سال ۱۹۹۹ به‌عنوان زیرساخت اتصال اشیاء به شبکه معرفی شد. هوش محیطی از اواخر دهه ۱۹۹۰ با تمرکز بر طراحی انسان‌محور و پاسخ‌گویی رفتاری توسعه یافت. شبکه هوشمند، به‌ویژه پس از تصویب قوانین انرژی در سال ۲۰۰۷، به‌عنوان زیرساخت انرژی آینده توسعه یافت. هر یک از این مسیرها، بخشی از پازل را تکمیل کردند، اما تا پیش از طرح مفهوم محیط هوشمند انرژی، چارچوبی که آن‌ها را زیر یک رویکرد انرژی‌محور گرد هم آورد، وجود نداشت.

برای سنجش تجربی این ادعا که محیط هوشمند انرژی می‌تواند پلی میان حوزه‌های مختلف باشد، روند انتشارات علمی سه اصطلاح «شبکه هوشمند»، «محیط هوشمند» و «هوش محیطی» در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ بررسی شده است. نتیجه، رشد شتابان و پیوسته‌ای در انتشارات «شبکه هوشمند» را نشان می‌دهد، در حالی که «محیط هوشمند» رشدی تدریجی و «هوش محیطی» الگویی نامنظم‌تر دارد. تحلیل همبستگی میان این سه اصطلاح نیز نشان می‌دهد همبستگی میان «شبکه هوشمند» و «محیط هوشمند» به‌طور پیوسته قوی است؛ یافته‌ای که بیانگر بنیان‌های فناورانه مشترک و اهداف پژوهشی

هم‌پوشان این دو حوزه است. در مقابل، همبستگی میان «محیط هوشمند» و «هوش محیطی» متوسط و همبستگی میان «شبکه هوشمند» و «هوش محیطی» نسبتاً ضعیف است. این ساختار لایه‌ای نشان می‌دهد هوش محیطی، با تمرکز بر طراحی انسان‌محور و پاسخ‌گویی رفتاری، هنوز پیوند نظام‌مندی با پژوهش‌های زیرساخت‌محور شبکه هوشمند برقرار نکرده است. دقیقاً همین شکاف است که چارچوب محیط هوشمند انرژی می‌کوشد آن را با یک رویکرد یکپارچه انرژی‌محور پر کند.

بیشتر هوشمندهای شبکه هوشمند، خانه هوشمند، شهر هوشمند، حمل‌ونقل هوشمند، کشاورزی هوشمند، پوشیدنی‌های هوشمند تاکنون در زمینه مجزای خود توسعه یافته‌اند. برای بررسی این شکاف معرفت‌شناختی میان سامانه‌های هوشمند، مفهوم محیط‌های هوشمند انرژی به‌عنوان پاسخی به آن معرفی می‌گردد. این مفهوم در قالب یک سیستم پیچیده تطبیقی از سامانه‌ها معرفی می‌گردد که انرژی را پیوند دهنده میان سامانه‌های تشکیل‌دهنده به‌کار می‌گیرد.

استدلال اصلی مقاله این است که برای گشودن پتانسیل جمعی سامانه‌های هوشمند، یک بعد یکپارچه‌ساز فراتر از مرزهای هر حوزه لازم است. انرژی، به‌عنوان یک توانمندساز بنیادین، زیرساخت را برق می‌رساند، عملیات را پایدار نگه می‌دارد و تبادل داده را تسهیل می‌کند؛ به همین دلیل محور طبیعی یکپارچه‌سازی است. با این همه،



شکل ۱ الگوی مفهومی محیط هوشمند انرژی همچون چتری که همه هوشمندها (شبکه، خانه، شهر، حمل و نقل، کشاورزی و سلامت) را زیر یک سقف یکپارچه می‌کند.

❖ پیوستگی کمی داده‌های انتشارات

برای سنجش تجربی این ادعا که ESE پلی میان حوزه‌های مختلف است، روند انتشارات علمی سه اصطلاح «شبکه هوشمند»، «محیط هوشمند» و «هوش محیطی» را در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ در دو پایگاه IEEE Xplore و ScienceDirect بررسی گردیده است. نتیجه، رشد شتابان و پیوسته‌ای در انتشارات «شبکه هوشمند» نشان می‌دهد، در حالی که «محیط هوشمند» رشدی تدریجی و «هوش محیطی» الگویی نامنظم‌تر دارد. در ادامه، تحلیل همبستگی پیرسون میان این سه اصطلاح نشان داد همبستگی میان «شبکه هوشمند» و «محیط هوشمند» به‌طور پیوسته قوی است (میان ۰٫۸۲ تا ۰٫۹۶ در دو پایگاه)، که بیانگر بنیان‌های فناورانه مشترک و اهداف پژوهشی هم‌پوشان این دو حوزه است.

این نقش فرارشته‌ای انرژی اغلب نادیده گرفته می‌شود و همین غفلت، شکافی معرفت‌شناختی در هماهنگی راهبردی و طراحی کل‌نگر پدید می‌آورد. ESE هوشمندی را نه فقط در جریان بالارونده از تجهیزات میدانی به سطح مدیریت، بلکه در جریان فرمان و کنترل رو به پایین نیز می‌جوید و به این ترتیب یک بوم‌سازگان تقویت‌شده سامانه‌های هوشمند به‌هم‌پیوسته را شکل می‌دهد که انرژی و اطلاعات را به اشتراک می‌گذارند.

مبنای فلسفی نظریه ESE، الگوی جعبه‌ابزار تکامل‌یابنده است. یک سامانه از سامانه‌های ناهمگون که پیمانه‌ای، باز و تطبیقی است و اجزای تشکیل‌دهنده آن همچون ابزارهای درون یک جعبه‌ابزار، پیوسته به‌روزرسانی و جایگزین می‌شوند. این گشودگی دوسویه است: باز در راس، به‌سوی اهداف راهبردی و نیازهای ذی‌نفعان در حال تحول؛ و باز در قاعده، به‌سوی فناوری‌ها و قابلیت‌های عملیاتی نوظهور. نویسندگان با مروری گسترده بر ادبیات اینترنت اشیاء از ۱۹۹۹، هوش محیطی از اواخر دهه ۱۹۹۰ و شبکه هوشمند به‌ویژه از تصویب قانون امنیت و استقلال انرژی آمریکا در سال ۲۰۰۷، سیر تکاملی این حوزه‌ها را ترسیم و نشان می‌دهند چگونه این مسیرهای مجزا امروز در قالب مفهوم ESE به هم می‌رسند.

حسگری میدانی است؛ و لایه سایبری که زیرساخت فناوری اطلاعات، پایگاه‌های داده محلی و مرکزی و سامانه‌های داده‌کاوی مرکزی را در بر می‌گیرد.

جریان اطلاعات در این معماری دوسویه است. داده‌های حسگری و پایشی از لایه فیزیکی به‌سوی لایه سایبری بالا می‌روند و در آنجا پردازش و تحلیل می‌شوند؛ در مقابل، فرمان‌های کنترل، تنظیم و مجوز از لایه سایبری به‌سوی کنش‌گرهای میدانی پایین می‌آیند. کنترلرهای محلی مبتنی بر هوش مصنوعی نیز میان این دو لایه، تصمیم‌گیری نیمه‌خودمختار را ممکن می‌سازند؛ ساختاری که با اصل تصمیم‌گیری غیرمتمرکز از طریق رایانش لبه، هم‌راستا است.

❖ ESE به‌عنوان اصطلاح چتری یکپارچه‌ساز

محیط‌های هوشمند یا آنچه نویسندگان آن را «هوشمند-ایکس»‌ها می‌نامند، اعم از شبکه هوشمند، خانه هوشمند، شهر هوشمند، حمل‌ونقل هوشمند، کشاورزی هوشمند، پوشیدنی‌ها و ایمپلنت‌های هوشمند، طیفی پیوسته از نوآوری در حوزه‌های گوناگون‌اند، اما توسعه پراکنده آن‌ها نیاز فوری به یک چارچوب یکپارچه‌ساز را آشکار می‌کند. مفهوم ESE با تلفیق هوش محیطی، محیط‌های هوشمند و سامانه‌های خودتغذیه مبتنی بر دروگری انرژی، زیر یک رویکرد انرژی‌محور به سیستم‌های سیستم‌ها، به این نیاز پاسخ می‌دهد. در این

در مقابل، همبستگی میان «محیط هوشمند» و «هوش محیطی» متوسط (میان ۰.۱۳ تا ۰.۳۷) و همبستگی میان «شبکه هوشمند» و «هوش محیطی» نسبتاً ضعیف (حدود ۰.۲۶) گزارش شده است؛ یافته‌ای که نشان می‌دهد هوش محیطی، با تمرکز بر طراحی انسان‌محور و پاسخ‌گویی رفتاری، هنوز پیوند نظام‌مندی با پژوهش‌های زیرساخت‌محور شبکه هوشمند برقرار نکرده است. این ساختار لایه‌ای هسته منسجم شبکه هوشمند و محیط هوشمند، در برابر جایگاه محیطی‌تر هوش محیطی دقیقاً همان شکافی را آشکار می‌کند که چارچوب ESE می‌کوشد آن را با یک رویکرد یکپارچه انرژی‌محور پر کند.

❖ معماری کارکردی ESE

مقاله مرجع این گاهنامه، مفهوم محیط هوشمند انرژی را بر پایه سامانه‌های خودتأمین (Self-Powered Systems) و دروگری انرژی (Energy Harvesting) بنا می‌نهد؛ یعنی توان تجهیزات کم‌مصرف را از منابع محیطی پیزوالکتریک، تریبوالکتریک، ترموالکتریک، خورشیدی، امواج رادیویی و زیست‌انرژی بدون نیاز به باتری یا سیم‌کشی سنتی تأمین کردن. این رویکرد به‌ویژه برای حسگرهای دورافتاده، ایمپلنت‌های زیست‌پزشکی و شبکه‌های اینترنت اشیای توزیع‌شده اهمیت دارد. بر این پایه، معماری کارکردی ESE سامانه را در دو لایه به‌هم‌پیوسته صورت‌بندی می‌کند. لایه فیزیکی که شامل تأمین انرژی، دروگری انرژی محیطی، کنش‌گری و

تاکنون بیش از پنج هزار مخاطب دارد و یک پادکست ترکیبی انسان هوش مصنوعی.

❖ تعامل پذیری قابل سنجش: چند مصداق عملی

مقاله چند نمونه مشخص از تعامل پذیری قابل اندازه گیری میان زیرسامانه های هوشمند ارائه می کند. نخست، تعامل خانه هوشمند و شهر هوشمند، داده های مصرف انرژی در سطح خانوار، وقتی تجمیع و به مراکز کنترل انرژی شهری منتقل شوند، تصمیم گیری آگاهانه برای پیش بینی تقاضا و بهینه سازی بی درنگ منابع انرژی توزیع شده را ممکن می سازند. دوم، یکپارچگی زیرساخت پیشرفته اندازه گیری (AMI) با سامانه های مدیریت قطعی شهر هوشمند: کنتورهای هوشمند به طور پیوسته مصرف را ثبت و سیگنال قطعی را تشخیص می دهند و در زمان خاموشی، داده های خطا را خودکار به سامانه مدیریت داده های کنتور می فرستند؛ این داده ها روی نقشه شبکه نمایش داده می شوند و اپراتور را از وابستگی به گزارش کاربران بی نیاز می کنند.

سومین مصداق، وضع آگاهی انرژی خرد-کلان است. در سطح خرد، خانه های هوشمند بینش هایی از مصرف ایجاد می کنند که برای فهم الگوهای رفتاری و کارایی انرژی تحلیل می شوند؛ این بینش ها به نوبه خود به راهبردهای مدیریت انرژی در سطح کلان تغذیه می شوند و مدل سازی پیش بینانه مشارکت کاربران در برنامه های

چارچوب، برای نمونه، داده های مصرف انرژی خانه های هوشمند می توانند سیاست گذاری انرژی در شهر هوشمند را آگاه کنند، در حالی که سیگنال های قطعی کنتورهای هوشمند می توانند واکنش خودکار در مراکز کنترل شبکه هوشمند را برانگیزند؛ نمونه ای ملموس از آنکه چگونه تعامل پذیری، سامانه های مجزا را به ساختارهایی تطبیقی و همکار بدل می کند.

❖ از پژوهش تا کلاس درس: مسیر آموزشی ESE

یکی از جنبه های برجسته این پژوهش، تبدیل چارچوب نظری ESE به یک واحد آموزشی مستقل است. درس کارشناسی «محیط هوشمند انرژی» توسط دکتر علیرضا فریدونیان برای دانشجویان سال سوم مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی طراحی شده و اکنون در سطح گروه قدرت و دانشکده مهندسی برق تصویب شده و در حال طی مراحل نهایی تصویب در سطح دانشگاه است. محور این درس، همگرایی دروگری انرژی، پایش و کنترل، زیرساخت دیجیتال و تحلیل داده محور مبتنی بر هوش مصنوعی در قالب یک معماری سایبرفیزیکی است؛ همان معماری ای که در این جستار ترسیم شد.

در کنار درس دانشگاهی، موضوع محیط هوشمند انرژی از طریق یک نشریه الکترونیکی عمومی نیز توسط ایشان و انجمن شبکه هوشمند انرژی ایران دنبال می شود که

این مقاله در نهایت، ESE را نه یک محصول یا فناوری، بلکه در حال ظهور یک رشته دانشگاهی مستقل معرفی می‌کند که یکپارچه‌ساز، غیرمتمرکز، تعامل‌پذیر و نوظهور است. مسیر همزمان پژوهش، آموزش دانشگاهی و ترویج عمومی (نشریه و پادکست) که در این کار روایت شده، نمونه‌ای است از چگونگی تبدیل یک ایده نظری به یک زیست‌بوم آموزشی و پژوهشی زنده، مسیری که اعضای انجمن علمی شبکه هوشمند انرژی ایران نیز از نزدیک با آن همراه بوده‌اند و می‌توانند در توسعه آینده آن سهیم باشند.

مراجع:

- [1] Fereidunian, A., Alimoradi, Z., Hajizadeh, A., Sebt, M. A., & Khaki-Sedigh, A. (2026). Energy Smart Environments: Emergence and Interoperability beyond the Constituent Smart Systems Unified as Complex Adaptive Systems of Systems.

پاسخ تقاضا را ممکن می‌سازند. نویسندگان همچنین اصطلاح ابداعی همبست پایاتابی (RELISILITY) را برای توصیف موقعیت‌هایی به کار می‌برند که پایایی و تاب‌آوری هم‌زمان و به‌عنوان اهداف مشترک دنبال می‌شوند به‌ویژه در بافت‌هایی که نوظهوری میان کارکردی آشکار است و آن را نمونه‌ای از نوظهوری میان سامانه‌ها و درون سامانه‌های سامانه‌ها می‌دانند.

❖ چشم‌انداز ۲۰۴۰: محیط‌های هوشمند انرژی در مقیاس سیاره‌ای

در بخش پایانی، نویسندگان چشم‌اندازی جسورانه برای افق ۲۰۴۰ ترسیم می‌کنند. یک سیستم پیچیده تطبیقی از سامانه‌ها در مقیاس سیاره‌ای، با الهام از نظریه گایا که زمین را همچون ارگانیسمی خودتنظیم‌گر می‌بیند که در طی میلیاردها سال شرایط زیست‌پذیر را حفظ کرده است. در این نگاه، ESE نقش چسب هستی‌شناختی را ایفا می‌کند که سامانه‌های هوشمند ناهمگون از شبکه‌های هوشمند و سامانه‌های سایبرفیزیکی تا پایش زیست‌محیطی و پلتفرم‌های اجتماعی انرژی را در یک بوم‌سازگان یکپارچه سیاره‌ای به هم می‌پیوندد. با این‌همه، نویسندگان صادقانه به چالش‌های این چشم‌انداز نیز اشاره می‌کنند. مقیاس‌پذیری و مدیریت کلان‌داده، حکمرانی اخلاقی داده و آسیب‌پذیری‌های امنیت سایبری که تعامل‌پذیری گسترده به‌ناچار با خود به همراه می‌آورد.



گاهنامه انجمن علمی شبکه هوشمند انرژی ایران از تمامی دانشجویان، فارغ التحصیلان و صنعتگران مرتبط با حوزه شبکه های هوشمند دعوت به عمل می آورد تا با ارسال مقالات خود به این گاهنامه موجبات غنای علمی، بیشتر این گاهنامه را فراهم آورند.