Modeling of the Internet of Energy (IOE) for Optimal Energy Management with an Interpretive Structural Modeling (ISM) Approach

Mir Hamid Taghavi
PhD Candidate in Science and Technology Policy-Making;
Iran University of Science and Technology; Tehran, Iran;
Email: Hamid_Taghavi@pgre.iust.ac.ir

Peyman Akhavan
PhD in Industrial Engineering; Professor; Malek Ashtar University of Technology; Tehran, Iran; Email: Akhavan@mut.ac.ir

Rohollah Ahmadi*
PhD in Mechanical Engineering; Associate Professor;
Iran University of Science and Technology; Tehran, Iran;
Email: Ahmadi@iust.ac.ir

Ali Bonyadi Naeini
PhD in Business Management; Assistant Professor; Iran University of Science and Technology; Tehran, Iran Email: Bonyadi@iust.ac.ir

Iranian Journal of Information Processing and Management

Received: 04, Apr. 2020 **Accepted: 24, Jan. 2021**

Iranian Research Institute for Information Science and Technology (IranDoc)
ISSN 2251-8223
eISSN 2251-8231
Indexed by SCOPUS, ISC, & LISTA
Vol. 36 | No. 4 | pp. 1049-1080
Summer 2021
https://doi.org/10.52547/jipm.36.4.1049

Abstract: Increasing demand for energy, pollution from fossil energy consumption and global warming are the key factors that have made optimal energy management necessary. The advent of information technology has led to the emergence of a new paradigm called the Internet of Energy (IOE). IOE is a new concept that provides the tools needed for optimal energy management. IOE has expanded dramatically with the advent of the Internet of Things (IOTs). So that the Internet of Energy moves towards energy management by integrating the features of smart grids and the Internet of Things. The present study is an applied research that aimed at conceptualizing of the Internet of Energy. In order to achieve the research objectives, a series of indicators of IOE were identified according to the previous studies and interviews with experts. The pattern of causal relations of these indices has been identified by the FUZZY DEMATEL technique. Then, these factors have been analyzed by Interpretive Structural Modeling (ISM) technique, and finally, the relationship and sequence of the indices have been obtained. Among the indicators, existence of powerful internet servers in the country,

* Corresponding Author

equipping consumable equipment with internet and online monitoring of each person's energy consumption are at the first level of the research model and the most basic variables in applying the concept of IOE. All of these elements ultimately depend on the availability of financial resources and the determination to apply IOE at the macro level. The insight that this model provides to the energy management at the macro level can be helpful in strategic planning for energy production, conversion, transmission, distribution and consumption in the country.

Keywords: Internet of Things (IOTs), Internet of Energy (IOE), Smart Grid, Sustainability, Interpretive Structural Modeling (ISM)

ارائهٔ مدل اینترنت انرژی برای مدیریت بهینهٔ انرژی با رویکرد ساختاری-تفسیری

میرحمید تقوی
دانشجوی دکتری سیاست‌گذاری علم و فناوری؛ دانشگاه علم و صنعت ایران؛ تهران، ایران؛
Hamid_Taghavi@pgre.iust.ac.ir

پیمان اخوان
دکتری مهندسی صنایع؛ استاد؛ دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ تهران، ایران Akhavan@mut.ac.ir

روح‌اله احمدی
دکتری مهندسی مکانیک؛ دانشیار؛ دانشگاه علم و صنعت ایران؛ تهران، ایران؛
پدیدآور رابط Ahmadi@iust.ac.ir

علی بنیادی نائینی
دکتری مدیریت بازرگانی؛ استادیار؛ دانشگاه علم و صنعت ایران؛ تهران، ایران Bonyadi@iust.ac.ir

پژوهش‌نامهٔ پردازش و مدیریت اطلاعات

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۶ | پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵ | مقاله برای اصلاح به مدت ۵ ماه نزد پدیدآوران بوده است.

چکیده: افزایش روزافزون تقاضا برای انرژی، آلودگی ناشی از مصرف انرژی فسیلی و گرمایش زمین عمده‌ترین عواملی هستند که مدیریت بهینهٔ انرژی را ضروری ساخته‌اند. به مدد پیشرفت فناوری اطلاعات، پارادایم جدیدی به نام اینترنت انرژی پدید آمده که ابزارهای لازم برای مدیریت بهینهٔ انرژی را فراهم کرده است. اینترنت انرژی با ظهور اینترنت اشیا گسترش چشمگیری داشته است، به‌طوری‌که اینترنت انرژی با تلفیق ویژگی‌های شبکه‌های هوشمند و اینترنت اشیا در جهت مدیریت انرژی حرکت می‌کند. مطالعهٔ حاضر، پژوهشی کاربردی است که با هدف ارائهٔ مدل اینترنت انرژی برای مدیریت بهینهٔ انرژی صورت گرفته است. برای دستیابی به اهداف پژوهش، نخست با توجه به مطالعات پیشین و مصاحبه با خبرگان، مجموعه‌ای از شاخص‌های کاربردی مفهوم اینترنت انرژی شناسایی شد، الگوی روابط علّی این شاخص‌ها با تکنیک «دیمتل» فازی مشخص گردید، و سپس، این عوامل با استفاده از تکنیک مدل‌سازی ساختاری-تفسیری، تجزیه و تحلیل و سرانجام، ارتباط و توالی شاخص‌ها به‌دست آمد. از میان شاخص‌ها، وجود سرورهای اینترنتی قدرتمند در کشور، تجهیز لوازم مصرفی به اینترنت، و نظارت برخط بر میزان مصرف انرژی هر فرد در سطح نخست مدل پژوهش قرار گرفته و پایه‌ای‌ترین

نشریهٔ علمی | رتبهٔ بین‌المللی
پژوهشگاه علوم و فناوری اطلاعات ایران (ایرانداک)
شاپا (چاپی) ۸۲۲۳-۲۲۵۱
شاپا (الکترونیکی) ۸۲۳۱-۲۲۵۱
نمایه در LISTA، ISC، و SCOPUS
jipm.irandoc.ac.ir
دورهٔ ۳۶ | شمارهٔ ٤ | ص‌ص ۱۰۴۹-۱۰۸۰
تابستان ۱۴۰۰
https://doi.org/10.52547/jipm.36.4.1049

شاخص‌ها جهت پیاده‌سازی مفهوم اینترنت انرژی هستند. وجود کلیهٔ این شاخص‌ها در نهایت، منوط به وجود منابع مالی لازم برای استفاده از اینترنت انرژی و عزم و ارادهٔ لازم برای به‌کارگیری اینترنت انرژی در سطح کلان هستند. بینشی که این مدل به مدیریت کلان انرژی در کشور ارائه می‌دهد، می‌تواند به آن‌ها در برنامه‌ریزی راهبردی انرژی جهت تولید، تبدیل، انتقال، توزیع و مصرف انرژی کمک کند.

کلیدواژه‌ها: اینترنت اشیا، اینترنت انرژی، شبکهٔ هوشمند، پایداری، مدل‌سازی ساختاری-تفسیری

۱. مقدمه

در قرن بیست‌ویکم، الگوهای استفاده از انرژی سوخت‌های فسیلی با چالش‌های بسیاری مانند آلودگی محیط زیست و بحران انرژی روبه‌روست (Hong et al. 2019). از طرفی مصرف انرژی توسط انسان‌ها نیز همه‌ساله روبه‌افزایش است. بر این اساس، سازمان‌های ارائه‌کنندهٔ خدمات همگانی با چالش افزایش ظرفیت برای پاسخگویی به تقاضا مواجه هستند و این مسئله‌ای است که فشار شدیدی بر ذخایر انرژی وارد خواهد آورد (Hittinger and Jaramillo 2018). به‌منظور حل این مسئله، دو راهکار پیشنهاد شده است: اول، توسعهٔ منابع تجدیدپذیر و دوم، بهینه‌سازی مصرف انرژی. بر اساس پیش‌بینی‌های «آژانس مدیریت انرژی»[1] تا سال ۲۰۵۰، پنجاه درصد از تقاضای جهانی انرژی توسط منابع انرژی تجدیدپذیر تأمین می‌شود (Nguyen et al. 2018). در چنین دوره‌ای، یک سیستم تأمین انرژی پایدار با راندمان بالای انرژی مورد نیاز است (Wang 2019). بنابراین، ایجاد یک سیستم انرژی یکپارچه برای هماهنگی بهینهٔ منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های مختلف انرژی ضروری است. اهمیت استفاده از راهبردهای ذخیرهٔ انرژی در مدیریت توجه بسیاری از پژوهشگران و متخصصان حوزه‌های صنعت و دانشگاه را به خود جلب کرده است (Umer et al. 2019).

تقاضای جهانی برای انرژی در سال ۲۰۱۸، به میزان ۲/۳ درصد در مقایسه با سال ۲۰۱۷، افزایش یافته است. بیشترین میزان این افزایش از سال ۲۰۱۰، به بعد بوده است. در نتیجهٔ آن، میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن[2] از بخش انرژی، به‌عنوان رکوردی جدید در سال ۲۰۱۸، ثبت شده است. افزایش دمای کرهٔ زمین در مقایسه با دمای قبل از دورهٔ

1. International Energy Agency (IEA) 2. CO_2

صنعتی‌شدن، به ۱/۵ درجهٔ سلسیوس رسیده و در صورت ادامهٔ این روند، گرمایش زمین از ۲ درجهٔ سلسیوس هم فراتر رفته و تأثیر ناگواری بر این سیاره و زندگی انسان‌ها خواهد داشت (Hossein Motlagh et al. 2020). نگرانی‌های زیست‌محیطی مانند گرمایش زمین و آلودگی هوا، تخریب لایهٔ اوزون، کمبود منابع آبی برای تولید برق حرارتی، و محدودیت مصرف منابع انرژی فسیلی نیاز ضروری به استفادهٔ کاراتر از انرژی و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را افزایش داده است. مطالعات گوناگون نشان داده است که انعطاف‌پذیری عملیاتی[1] از جمله استفاده از فناوری‌های ذخیرهٔ انرژی[2]، استفاده از مدیریت واکنشی تقاضا[3] و اتصال منابع انرژی‌های تجدیدپذیر دارای پراکندگی جغرافیایی در سطح کشور (Zakeri, Syri and Rinne 2015)، منطقه (Connolly, Lund and Mathiesen 2016) و یا جهانی (Grubler et al. 2018) تقریباً غیرممکن است. بر اساس اهداف توسعهٔ پایدارِ «سازمان ملل متحد»، کارایی انرژی[4] یکی از عوامل کلیدی توسعهٔ پایدار است (Tan, Ng & Low 2017). افزون بر آن، کارایی انرژی مزایای اقتصادی بلندمدت، همراه با کاهش هزینهٔ تأمین سوخت، تولید انرژی و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای از بخش انرژی را به‌همراه دارد (Tamilselvan and Thangaraj 2020).

برنامهٔ تأمین انرژی کشور در سال‌های اخیر، بدون در نظر گرفتن منافع ملی و ملاحظات مدیریت بهینهٔ انرژی و با توجه به سهولت دسترسی به حامل‌های فسیلی در کشور صورت گرفته است. انتخاب و اجرای این برنامه نه‌تنها صحیح و آینده‌نگرانه نبوده، بلکه با رشد و توسعهٔ اقتصاد ملی و منافع کشور نیز در تعارض است. ادامهٔ روند بی‌برنامگی در حوزهٔ انرژی و در نتیجه، مدیریت نادرست در تولید، توزیع و مصرف انرژی در کشور در آینده‌ای نزدیک کشور را با بحران جدی انرژی روبه‌رو خواهد کرد (حسینی ۱۳۸۷).

یکی از مهم‌ترین راهکارهای منطقی مقابله با این بحران، به‌کارگیری شبکه‌های هوشمند[5] و اینترنت انرژی[6] است. شبکه‌های نرم‌افزاری پارادایم جدیدی را در مدیریت تولید، توزیع و استفاده از انرژی پدید آورده‌اند که تحت عنوان کلی اینترنت انرژی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اینترنت انرژی یک شعار روز نیست، بلکه راهکار آیندهٔ استفاده

1. operational flexibility
2. energy storage technologies
3. demand-response management
4. energy efficiency
5. smart grids
6. internet of energy (IOE)

از انرژی است که اهداف پایداریِ توسعه را فراهم می‌آوَرَد. این راهکار به بسترهای نرم‌افزاری و سخت‌افزاری پیچیده‌ای نیازمند است. در حال حاضر، این بسترها فراهم بوده و نیازمند یک راهکار عملیاتی است (Qiu et al. 2019).

از پایان قرن بیستم، عوامل بسیاری سناریوهای تولید و مصرف انرژی را دستخوش تغییر کرده‌اند. پیش‌بینی کاهش منابع نفتی و ذخایر طبیعی موجب شده است که پژوهشگران به‌دنبال منابع جدید و تجدیدپذیر انرژی باشند. از سوی دیگر، افزایش تقاضا برای انرژی، جست‌وجوی راهکارهایی جهت مدیریت بهینهٔ انرژی را موجب شده است. مدیریت انرژی شامل تولید، توزیع و مصرف انرژی بوده و همسو با اهداف پایداری و مدیریت سبز است (Bui et al. 2012).

در حال حاضر، «انرژی» یک مفهوم کانونی و چالشی در حوزهٔ اقتصاد و توسعهٔ پایدار جهانی است. بر اساس اعلام «آژانس بین‌المللی انرژی»، میزان تقاضا برای مصرف انرژی تا پانزده سال آینده افزایش دو برابری خواهد داشت. از سوی دیگر، دانشمندان افزایش گرمایش جهانی را پیش‌بینی کرده‌اند. تضاد سه‌گانهٔ مصرف انرژی، اقتصاد، و محیط زیست وضعیت دشواری ایجاد کرده و یک مسئلهٔ بحرانی در جهان مدرن به‌وجود آورده است (Huang et al. 2011; Hannan et al. 2018). چنین افزایشی در میزان تقاضای انرژی، نیازمند یک بازنگری اساسی در زیرساخت‌های قدیمی مدیریت انرژی است. افزون بر آن، شبکه‌های انتقال نیرو و کیفیت انتقال باید مورد بازبینی قرار گیرند. شبکه‌های انتقال نیرو در حال حاضر، از ضعف کارایی، نظارت و خودکارسازی در رنج بوده و با مشکل عدم انعطاف‌پذیری بالا مواجه هستند. بنابراین، لازم است در زیرساخت‌های بهره‌گیری از انرژی تجدید نظر اساسی انجام گیرد (Jaradat et al. 2015).

برای حل مسئلهٔ مدیریت انرژی، راه حلی مبتنی بر استفاده از اینترنت پیشنهاد شده که به اینترنت انرژی موسوم است. اصطلاح اینترنت انرژی که اولین بار توسط Rifkin (2011) پیشنهاد داده شد، بر شبکهٔ هوشمند پایه‌گذاری مبتنی است. یک شبکهٔ هوشمند با استفاده از فناوری دیجیتال دوطرفه، انرژی را از تولیدکنندگان به مشتریان منتقل می‌کند تا با کنترل میزان مصرف وسایل خانگی مصرف‌کنندگان در استفاده از انرژی صرفه‌جویی شده، هزینه‌های آن کاهش یافته و قابلیت اطمینان و شفافیت افزایش یابد. این قبیل شبکه‌های الکتریکی مدرن از سوی بسیاری از دولت‌ها، به‌عنوان روشی برای مدیریت انرژی، مهار گرمایش جهانی و مسایل نوظهور دیگر دنبال می‌شود (Hannan et al. 2018).

ادغام شبکه‌های حسگر بی‌سیم[1]، سنجه‌های هوشمند[2] و سایر عناصر شبکهٔ توزیع انرژی با فناوری اطلاعات و ارتباطات تحت عنوان اینترنت انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. اینترنت انرژی جریان دوسویهٔ انرژی و اطلاعات را مبتنی بر شبکهٔ هوشمند برای افزایش کارایی و کاهش هزینه مورد استفاده قرار می‌دهد (Jaradat et al. 2015). پارادایم اینترنت انرژی با هدف مدیریت کارای توزیع و مصرف آن، آیندهٔ بازار انرژی را برای همهٔ فعالان این حوزه ترسیم می‌کند. عرضه‌کنندگان، توزیع‌کنندگان ثانویه، طراحان فناوری و همهٔ مصرف‌کنندگان از این پارادایم متأثر خواهند شد. اینترنت انرژی مبتنی بر مفهوم شبکهٔ هوشمند، منافع عمومی برای همه به‌ارمغان خواهد آورد (Bui et al. 2012).

بنابراین، به‌منظور ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضای انرژی، توسعهٔ پایدار و حل تمامی مسائل گفته‌شده، نیاز به ارائهٔ راهکار بیش از پیش احساس می‌شود. اینترنت انرژی به‌عنوان راهکار آینده برای مدیریت بهینهٔ تولید و مصرف انرژی از اهمیت بالایی برخوردار است. این در حالی است که مفهوم اینترنت انرژی با ابهامات زیادی همراه است و هنوز مطالعهٔ دقیق و مدونی در این حوزه در کشور انجام نشده است. هدف از این پژوهش، مفهوم‌سازی و شناسایی شاخص‌های زیربنایی اینترنت انرژی جهت به‌کارگیری آن در کشور است. شاخص‌های به‌کارگیری اینترنت انرژی می‌توانند در راستای اجرای برنامه‌ای جامع در حوزهٔ مدیریت انرژی راهگشا باشند. بنابراین، در مطالعهٔ حاضر، به ارائهٔ مدلی برای اینترنت انرژی در سطح کلان کشوری پرداخته می‌شود. در این مطالعه به پرسش‌های اساسی زیر پاسخ داده خواهد شد: مهم‌ترین شاخص‌های به‌کارگیری اینترنت انرژی کدام‌اند؟ و الگوی روابط شاخص‌های به‌کارگیری اینترنت انرژی چیست؟ جهت پاسخ به سؤالات پژوهش، ابتدا مروری بر ادبیات این حوزه و مطالعات کاربردی به‌عمل‌آمده ارائه شده، سپس، روش پژوهش، ابزارهای گردآوری داده‌ها و تکنیک‌های تجزیه و تحلیل داده‌ها مشخص می‌شود. در ادامه، با استفاده از تکنیک مدل‌سازی ساختاری-تفسیری، روابط و توالی شاخص‌ها تعیین شده و در پایان نیز پیشنهادات کاربردی بر اساس نتایج پژوهش ارائه می‌گردد.

1. wireless sensor networks (WSN) 2. smart metrics

۲. چارچوب نظری و ادبیات تحقیق

کمبود منابع انرژی و تقاضای روزافزون برای آن در سرتاسر دنیا موجب شده است که به‌دنبال منابع تجدیدپذیر انرژی باشیم. این تغییر رویکرد به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در حوزهٔ دولت، صنایع و مجامع آکادمیک مشهود است. توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر در کنار رشد فناوری اطلاعات و ارتباطات دو عنصر پیشران و کلیدی در زمینهٔ اینترنت انرژی هستند. بنابراین، اینترنت انرژی می‌تواند به‌عنوان یک نظام بهره‌برداری از انرژی در نظر گرفته شود که توزیع انرژی‌های پاک را از طریق فناوری اطلاعات و ارتباطات میسر ساخته و تحت عنوان شبکهٔ هوشمند مورد مطالعه قرار گیرد (Qiu et al. 2019; Qi and Wu 2018) به‌ویژه این‌که فناوری اطلاعات و ارتباطات یک راهکار همیشگی برای استفاده از توانمندی‌های شبکهٔ هوشمند فراهم ساخته و امکان توزیع انرژی برای دستیابی به اهداف زیربنایی اینترنت انرژی را به‌وجود می‌آورد. در حال حاضر، شبکهٔ هوشمند برای گردآوری و عملیاتی کردن اطلاعات دربارهٔ رفتار ارائه‌کنندگان و مصرف‌کنندگان انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد تا اهداف پایداری زیست‌محیطی و ماندگاری انرژی را محقق سازد (Vu, Le and Jang 2018; Lombardi et al. 2018).

اینترنت انرژی نسل جدیدی از انرژی با توان بالاتر، سازگاری بیشتر با محیط، و دارای بیشترین ویژگی‌های انرژی تجدیدپذیر است که نقش اساسی در توسعهٔ اجتماعی، اقتصادی و حتی موارد دیگر ایفا می‌کند. همچنین، اینترنت انرژی می‌تواند به‌عنوان یک محصول یکپارچهٔ دربرگیرندهٔ انرژی، اطلاعات و ارتباطات شبکه‌ای قلمداد شود (Ma et al. 2013). «مؤسسهٔ شبکهٔ جهانی انرژی»[1] در سال ۲۰۱۰، به مطالعه و پژوهش در زمینهٔ ارتباطات سطوح انرژی الکتریکی میان کشورها و اقلیم‌های مختلف جهان پرداخت. حاصل این مطالعات ایجاد مفهوم «سطوح انرژی جهانی به‌هم‌پیوسته»، با تأکید بر ارتباطات منطقه‌ای و منبع انرژی تجدیدپذیر سیّار است. «ریفکین»، در سال ۲۰۱۱، در کتاب خود با نام «انقلاب صنعتی سوم: چگونه انرژی حاشیه‌ای[2]، انرژی، اقتصاد و جهان را تغییر می‌دهد؟»، به اهمیت اینترنت انرژی پرداخته، همچنین به نقش اینترنت انرژی در کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، راهکار مدیریت بهینهٔ انرژی و مشکلات آلودگی‌های محیطی اشاره داشته است (Rifikin 2011). انقلاب صنعتی سوم و اینترنت انرژی نوین به‌سرعت توجه

1. Global Energy Network Institute (GENI)
2. lateral power

رهبران کشورهای جهان را جلب کرده و دولت چین سیاست‌هایی را برای توسعهٔ اینترنت انرژی پیشنهاد داده است. در این سیاست‌ها، اینترنت انرژی به‌عنوان الگویی برای توسعهٔ صنایع انرژی‌محور در نظر گرفته شده است که اینترنت را با سیستم انرژی تلفیق کرده، موجب بهبود در شبکه‌های تولید، انتقال و مصرف انرژی می‌شود. مهم‌ترین ویژگی‌های اینترنت انرژی، هوشمندی تجهیزات[1]، هماهنگی قوی[2]، تناسب اطلاعات[3]، پراکندگی عرضه و تقاضا[4]، مسطح‌بودن سیستم[5]، تجارت آزاد[6] و غیره عنوان شده است. اینترنت انرژی به‌عنوان راهبرد حیاتی انقلاب انرژی در کشور چین با افزایش یکپارچگی انرژی‌های تجدیدپذیر کارایی کل سیستم را بهبود بخشیده است (Yan and Hu 2018). در سال ۲۰۱۷، رئیس‌جمهور کشور چین، اینترنت انرژی را راهکار سبز تقاضای انرژی الکتریسیتهٔ جهانی معرفی نمود (Yang et al. 2014). در سال ۲۰۱۶، «سازمان هماهنگی و توسعهٔ یکپارچه‌سازی اینترنت جهانی»[7] در کشور چین، اینترنت انرژی را به‌عنوان یک انرژی نوین پایدار معرفی نمود. کشورهای اروپایی نیز در سال ۲۰۱۷، کنفرانس‌های زیادی به‌منظور بررسی جایگاه اینترنت انرژی برگزار کردند (Sani et al. 2019).

اینترنت انرژی دو مفهوم شبکهٔ هوشمند و اینترنت اشیا[8] را ترکیب می‌کند. اینترنت اشیا مفهومی است که در آن هر شیء از طریق بستر اینترنت و به‌وسیله یک آدرس اینترنتی[9]، قابلیت شناسایی، دسترسی و حتی کنترل از راه دور را خواهد داشت. این مفهوم مبتنی بر شبکه‌های هوشمند توسعه پیدا نموده و با نام «اینترنت انرژی» به مجامع علمی معرفی شده است (Bui et al. 2012; Hannan et al. 2018). استفاده از پارادایم اینترنت انرژی مجموعهٔ کاملی از مزایا را فراهم می‌آورد. اول از همه، با بهره‌گیری از اثر متوازن شبکه‌ای مبتنی بر آی‌پی، امکان هماهنگ‌سازی تعاملات با تعداد زیادی از امکانات فناوری اطلاعات و ارتباطات میسر می‌شود. همچنین، تعاملات ماشین با ماشین با ایجاد عدم تمرکز فرایند کنترل، موجب از بین رفتن شبکهٔ مرکزی ارتباطات می‌شود. در نهایت، ارتباطات تعاملی، کلید موفقیت در بازار آزاد جهانی انرژی محسوب می‌شود (Poyner and Sherratt 2018). مطالعات متعدد پیرامون تولید و توزیع انرژی در یک شهر سبز و هوشمند بر مفهوم اینترنت

1. equipment intelligence
2. pluripotent coordination
3. information symmetry
4. supply and demand dispersion
5. system flattening
6. trade open
7. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization (GEIDCO)
8. internet of things (IOT)
9. internet protocol (IP)

انرژی تمرکز کرده‌اند. اینترنت انرژی مفهومی است که اینترنت اشیا و مدیریت انرژی را با هدف توزیع و تسهیم انرژی درهم می‌آمیزد. همهٔ انواع انرژی شامل انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، و همهٔ مصرف‌کنندگان انرژی از طریق اینترنت انرژی با هم در تعامل خواهند بود. بر اساس این رویکرد، ارائه‌کنندگان و مصرف‌کنندگان انرژی به‌منظور تعدیل تولید، صرفه‌جویی مصرف، و توزیع بهینه در یک زمان واحد با هم در تعامل دوسویه قرار خواهند گرفت. هدف اینترنت انرژی بهبود بهره‌برداری از انرژی با تأکید بر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و توزیع صحیح انرژی جهت تأمین همهٔ نیازمندی‌ها به منابع انرژی است (Lin et al. 2018).

مفهوم اینترنت انرژی همچنین به‌عنوان یک بستر نرم‌افزاری برای کنترل، نظارت و مدیریت کل شبکهٔ هوشمند از طریق تعامل دوسویه بین تمامی منابع تولید و مصرف انرژی تعریف می‌شود (Sani et al. 2019). آیندهٔ نظام‌های مدیریت انرژی می‌تواند در دو بخش اصلی دسته‌بندی شود: جریان نیرو و جریان اطلاعات. مدیریت جریان نیرو و اطلاعات به‌صورت یکپارچه با عنوان اینترنت انرژی شناخته می‌شود. ابزارهای به‌کارگیری و تحقق اینترنت انرژی نیازمند ارتباط دقیق با یکدیگر و شبکه‌های مرکزی کنترل سیستم است. از این ارتباطات تحت عنوان ارتباطات ماشین با ماشین[1] یاد می‌شود. اینترنت انرژی یک معماری نوین جهت توسعهٔ سیستم‌های توزیع‌شده در شبکهٔ برق و انرژی فراهم می‌کند. به بیان دیگر، اینترنت انرژی یک واسط زمان-واقعی[2] بین شبکهٔ هوشمند و مجموعهٔ بزرگی از تجهیزات فراهم می‌کند. اینترنت انرژی به‌وسیلهٔ پردازش داده‌ها و اطلاعات، ظرفیت تولید و ذخیرهٔ بهینهٔ انرژی را فراهم کرده و بین تولید و مصرف انرژی در شبکهٔ هوشمند توازن ایجاد می‌کند (Town et al. 2018).

توسعهٔ اینترنت از طریق فناوری‌های بی‌سیم امکان کنترل و مدیریت روزانهٔ عملکرد ابزارها و تجهیزات پیرامون ما را فراهم آورده است. در عصر جدید فناوری اطلاعات به‌منظور پشتیبانی و بهبود استانداردهای زندگی انسان تکامل یافته‌اند. توانمندی‌هایی که اینترنت در اختیار ما قرار داده، امکان بهره‌برداری بهتر از ابزارها و تجهیزات را فراهم کرده است. این توانمندی‌ها باعث هوشمندی محیط کاری و زندگی افراد شده‌اند. اینترنت اشیا به‌عنوان عنصر زیربنایی هوشمندسازی، از طریق سنسورهای اینترنتی ارتباط متقابل بین

1. machine-to-machine (M2M)
2. real time

اشـیا را فراهـم سـاخته اسـت (Jia et al. 2019). کاربـران اینترنـت اشـیا کارهـای روزانـهٔ خـود را به‌صورتـی کارا و اثربخـش، حتـی از طریـق کنتـرل از راه دور انجـام می‌دهنـد (Umer et al. 2019). مفهـوم اینترنـت انـرژی به‌صـورت معنـاداری امنیـت شـبکهٔ هوشـمند را بهبـود بخشـیده و به‌عنـوان یـک حـوزهٔ ترکیبـی از فنـاوری و توزیـع انـرژی، سـازوکارهایی بـرای بهبـود اسـتفاده از توانمندی‌هـای مبتنـی بـر شـبکهٔ هوشـمند فراهـم آورده اسـت. در حـوزهٔ اینترنـت انـرژی از فنـاوری اینترنـت اشـیا به‌منظـور گـردآوری و تحلیـل داده‌هـا در زمـان واقعـی[1] جهـت مدیریـت هوشـمند انـرژی اسـتفاده می‌شـود. اینترنـت انـرژی تضمیـن می‌کنـد کـه بخش‌هـای مختلـف حـوزهٔ انـرژی شـامل تولیـد، تبدیـل، توزیـع، عملیـات، خدمت‌رسـانی، بازارهـا، واسـطه‌ها و مصرف‌کننـدگان نهایـی، به‌صـورت یکپارچـه مدیریـت می‌شـوند. ایـن مفهـوم رونـد تدریجـی انتقـال از منابـع انـرژی تجدیدناپذیـر بـه منابـع انـرژی تجدیدپذیـر را فراهـم سـاخته و در نهایـت، بـا کاهـش هزینه‌هـا مصـرف انـرژی را اثربخـش و اقتصـادی می‌سـازد (Sani et al. 2019). بـر اسـاس ادبیـات پژوهـش می‌تـوان مهم‌تریـن عناصـر زیربنایـی اینترنـت انـرژی را شناسـایی کـرد. مهم‌تریـن شـاخص‌های به‌کارگیـری اینترنـت انـرژی بـر اسـاس مطالعـات انجام‌شـدهٔ پیشـین در جـدول ۱، ارائـه شـده اسـت.

جدول ۱. مهم‌ترین شاخص‌های به‌کارگیری اینترنت انرژی

شاخص‌های به‌کارگیری اینترنت انرژی	منبع
وجود سرورهای اینترنتی قدرتمند در کشور	Qiu et al. (2019); Sani et al. (2019); Bui et al. (2012); Huang et al. (2011); Jaradat et al. (2015); Town et al. (2018); Lin et al. (2018)
دسترسی آزاد مصرف‌کنندگان نهایی به اینترنت	Lombardi et al. (2018); Zhou, Wang and Ma (2015); Sani et al. (2019); Bui et al. (2012); Huang et al. (2011)
دسترسی به امکانات و تجهیزات سخت‌افزاری مدرن	Town et al. (2018); Lin et al. (2018); Hannan et al. (2018); Qi and Wu (2018); Vu et al. (2018)
تجهیز لوازم مصرفی به اینترنت	Qiu et al. (2019); Lombardi et al. (2018); Zhou, Wang and Ma (2015); Vu et al. (2018); Nguyen et al. (2018)
وجود زیرساخت‌های نرم‌افزاری مناسب	Umer et al. (2019); Sani et al. (2019); Town et al. (2018); Lin et al. (2018); Hannan et al. (2018); Qi and Wu (2018); Vu et al. (2018)
بهینه‌سازی زیرساخت‌های تولید انرژی	Sani et al. (2019); Bui et al. (2012); Huang et al. (2011); Hong et al. (2019); Town et al. (2018); Lin et al. (2018); Hannan et al. (2018)

1. real-time

شاخص‌های به‌کارگیری اینترنت انرژی	منبع
بهینه‌سازی سازوکارهای تبدیل انرژی	Qiu et al. (2019); Lin et al. (2018); Qi and Wu (2018); Vu et al. (2018); Hong et al. (2019)
فرایندهای نظام‌مند برای توزیع انرژی	Jaradat et al. (2015); Bui et al. (2012); Huang et al. (2011); Town et al. (2018); Lin et al. (2018); Wang (2019)
برقراری ارتباط میان زنجیرهٔ تأمین و مصرف انرژی	Sani et al. (2019); Bui et al. (2012); Lombardi et al. (2018); Zhou et al. (2015); Qi and Wu (2018); Vu et al. (2018)
امکان ذخیره‌سازی داده‌های مربوط به تولید و مصرف انرژی	Qiu et al. (2019); Umer et al. (2019); Sani et al. (2019); Bui et al. (2012); Huang et al. (2011); Wang (2019)
نظارت برخط بر میزان مصرف انرژی هر فرد	Lombardi et al. (2018); Town et al. (2018); Lin et al. (2018); Hannan et al. (2018); Vu et al. (2018)
شفاف‌سازی اطلاعات مربوط به مصرف انرژی	Vu et al. (2018); Lombardi et al. (2018); Zhou et al. (2015); Hannan et al. (2018); Qi and Wu. (2018); Nguyen et al. (2018)
اشتراک‌گذاری اطلاعات موجود در واحدهای تحت پوشش مصرف انرژی	Umer et al. (2019); Jaradat et al. (2015); Qi and Wu. (2018); Bui et al. (2012); Huang et al. (2011); Zhou et al. (2015)
منابع مالی لازم برای استفاده از اینترنت انرژی	Huang et al. (2011); Jaradat et al. (2015); Town et al. (2018); Lin et al. (2018); Hannan et al. (2018); Qi and Wu 2018)
عزم و ارادهٔ لازم برای به‌کارگیری اینترنت انرژی در سطح کلان	Lombardi et al. (2018); Zhou et al. (2015); Sani et al. (2019); Bui et al. (2012); Huang et al. (2011); Jaradat et al. (2015); Town et al. (2018); Lin et al. (2018); Vu et al. (2018)

بنابراین، مهم‌ترین شاخص‌های به‌کارگیری اینترنت انرژی عبارت‌اند از: وجود سرورهای اینترنتی قدرتمند در کشور، دسترسی آزاد مصرف‌کنندگان نهایی به اینترنت، دسترسی به امکانات و تجهیزات سخت‌افزاری مدرن، تجهیز لوازم مصرفی به اینترنت، وجود زیرساخت‌های نرم‌افزاری مناسب، بهینه‌سازی زیرساخت‌های تولید انرژی، بهینه‌سازی سازوکارهای تبدیل انرژی، فرایندهای نظام‌مند برای توزیع انرژی، برقرای ارتباط میان زنجیرهٔ تأمین و مصرف انرژی، امکان ذخیره‌سازی داده‌های مربوط به تولید و مصرف انرژی، نظارت برخط بر میزان مصرف انرژی هر فرد، شفاف‌سازی اطلاعات مربوط به مصرف انرژی، اشتراک‌گذاری اطلاعات موجود در واحدهای تحت پوشش مصرف انرژی، منابع مالی لازم برای استفاده از اینترنت انرژی، و عزم و ارادهٔ لازم برای به‌کارگیری اینترنت انرژی در سطح کلان. در مرحلهٔ تحلیل داده‌ها هر یک از این شاخص‌ها با اندیس D_{01} تا D_{15} نمایش داده خواهد شد.

۳. روش تحقیق

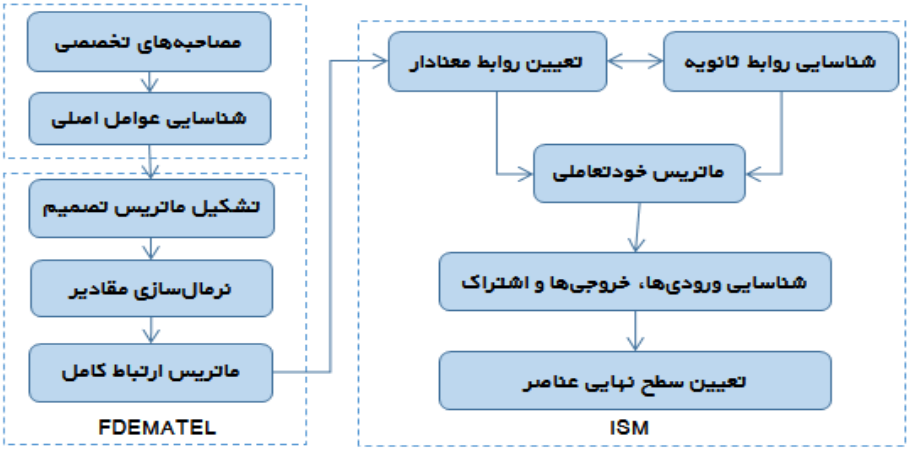
پژوهش حاضر از نظر هدف کاربردی بوده و در آن به مدل‌سازی اینترنت انرژی به‌منظور مدیریت بهینهٔ انرژی پرداخته شده است. مدیریت بهینهٔ انرژی، شناسایی مزایای اینترنت انرژی، همچنین پیشرفت و تسهیل اینترنت انرژی در مدیریت بحران انرژی از جمله کاربردهایی است که می‌توان برای این پژوهش متصور بود. جامعهٔ مورد بررسی در مطالعهٔ حاضر را خبرگان حوزهٔ مدیریت انرژی تشکیل می‌دهند. در این مطالعه با روش نمونه‌گیری گلوله‌برفی و به‌صورت هدفمند، از دیدگاه ۱۱ نفر از افراد صاحب‌نظر در حوزهٔ مدیریت انرژی استفاده شده است.

ملاک انتخاب خبرگان در مطالعهٔ حاضر، دو ویژگی تحصیلات و سابقهٔ کار بوده است. افرادی به‌عنوان خبره در نمونهٔ مورد مطالعهٔ حاضر شرکت داشتند که حداقل مدرک تحصیلی کارشناسی ارشد در حوزه‌های مهندسی فناوری اطلاعات، مدیریت انرژی و سیاست‌گذاری علم و فناوری داشته و دارای حداقل ۱۰ سال سابقهٔ کار در زمینه‌های مرتبط با مدیریت انرژی باشند. اطلاعات مربوط به خبرگان در جدول ۲، آمده است:

جدول ۲. ویژگی‌های دموگرافیک خبرگان

متغیر	طبقه	فراوانی	درصد
سطح تحصیلات	دکتری	۹	۸۱/۸۱
	کارشناسی ارشد	۲	۱۸/۱۸
سابقهٔ کار	۱۰ تا ۱۵ سال	۲	۱۸/۱۸
	۱۵ تا ۲۰ سال	۵	۴۵/۴۵
	۲۰ تا ۲۵ سال	۳	۲۷/۲۷
	بیش از ۲۵ سال	۱	۹/۰۹
رشتهٔ تحصیلی	مدیریت انرژی	۵	۴۵/۴۵
	مهندسی فناوری اطلاعات	۴	۳۶/۳۶
	سیاست‌گذاری علم و فناوری	۲	۱۸/۱۸
کل		۱۱	۱۰۰

از آنجا که روش‌های کمّی به‌تنهایی نمی‌توانند پیچیدگی‌های مسایل و عناصر تشکیل‌دهندهٔ نظام‌های تولید کالا و خدمات را به‌طور واقع‌گرا مورد مطالعه قرار دهند، ترکیب این روش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش از رویکرد ترکیبی تکنیک «دیمتل» و مدل‌سازی ساختاری-تفسیری[1] استفاده شده است. رویکرد ترکیبی «دیمتل-آی‌اس‌ام» در مطالعات مختلفی به‌کار گرفته شده است (Zhou, Ling and Li 2006; Yin et al. 2012). لازم به توضیح است که اگرچه افراد خبره از شایستگی‌ها و توانایی‌های ذهنی خود برای انجام مقایسه استفاده می‌کنند، اما باید به این نکته توجه داشت که فرایند سنتی کمّی‌سازی دیدگاه افراد، امکان انعکاس سبک تفکر انسانی را به‌طور کامل ندارد. به‌عبارت دیگر، استفاده از مجموعه‌های فازی، سازگاری بیشتری با عبارات کلامی و در برخی موارد مبهم انسانی دارد. بنابراین، بهتر است با استفاده از مجموعه‌های فازی (به‌کارگیری اعداد فازی) به پیش‌بینی بلندمدت و تصمیم‌گیری در دنیای واقعی پرداخته شود (Kahraman 2009). الگوی کلی رویکرد ترکیبی پژوهش حاضر در شکل ۱، ارائه شده است. هر یک از مراحل اجرای پژوهش نیز در ادامه تشریح می‌شود.



شکل ۱. چارچوب پیشنهادی با روش پژوهش آمیخته و رویکرد ترکیبی «آی‌اسام-دیمتل»

1. interpretive structural modelling (ISM)

۳-۱. تکنیک «دیمتل»

در مطالعهٔ حاضر، الگوی روابط علّی میان شاخص‌های اینترنت انرژی با تکنیک «دیمتل» فازی شناسایی شده است. تکنیک «دیمتل» با هدف شناسایی الگوی روابط علّی میان متغیرها، توسط «مرکز تحقیقاتی جنوا»[1] ارائه شده است (Fontela and Gabus 1974). بدین‌ترتیب، خبرگان می‌توانند با تسلط بیشتر به بیان پیشنهادات خود در رابطه با جهت و شدت اثرات میان معیارها بپردازند. لازم به ذکر است که ماتریس به‌دست‌آمده از تکنیک «دیمتل» (ماتریس ارتباطات داخلی)، هم رابطهٔ علّی و معلولی بین عوامل و هم اثرپذیری و اثرگذاری متغیرها را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱، مشاهده می‌شود، از خروجی تکنیک «دیمتل» به‌عنوان ماتریس دستیابی اولیه در تکنیک «آی‌اس‌ام» استفاده خواهد شد. نرم‌افزار کاربردی در این روش، «دیمتل سولور»[2] نام دارد. گام‌های اجرای تکنیک «دیمتل» فازی در ادامه تبیین می‌شود.

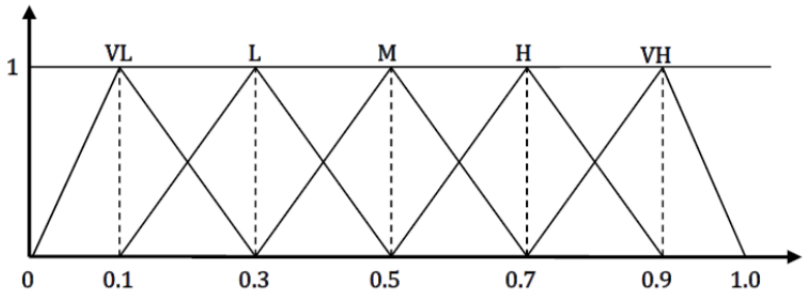
گام ۱. محاسبهٔ ماتریس ارتباط مستقیم ($\tilde{X}$)

نخست، دیدگاه خبرگان گردآوری شده و با طیف فازی جدول ۳، فازی‌سازی شده است.

جدول ۳. طیف فازی و تکنیک «دیمتل» (حبیبی، ایزدیار و سرافرازی ۱۳۹۳)

متغیر زبانی	معادل فازی
بدون تأثیر	(۰/۳، ۰/۱، ۰/۰)
تأثیر کم	(۰/۵، ۰/۳، ۰/۱)
تأثیر متوسط	(۰/۷، ۰/۵، ۰/۳)
تأثیر زیاد	(۰/۷، ۰/۷، ۰/۵)
تأثیر خیلی زیاد	(۱/۰، ۰/۹، ۰/۷)

1. Genova Research Institute
2. Dematel Solver



شکل ۲. طیف فازی مورد استفاده در تکنیک «دیمتل» فازی

اگر روابط n معیار توسط k خبره مورد بررسی قرار گرفته باشد، ماتریس اولیهٔ بررسی روابط n معیار از دیدگاه خبرهٔ kام به‌صورت رابطهٔ (۱) خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} 0 & \tilde{X}_{12}^{(k)} & \cdots & \tilde{X}_{1n}^{(k)} \\ \tilde{X}_{21}^{(k)} & 0 & \cdots & \tilde{X}_{2n}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{X}_{n1}^{(k)} & \tilde{X}_{n2}^{(k)} & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

رابطهٔ (۱)

به‌طوری‌که هر درایهٔ این ماتریس اولیه، عددی فازی مثلثی به‌صورت رابطهٔ (۲) خواهد بود:

$$\tilde{X}_{ij}^{(k)} = \left(\tilde{l}_{ij}^{(k)}, \tilde{m}_{ij}^{(k)}, \tilde{u}_{ij}^{(k)}\right)$$

رابطهٔ (۲)

زمانی که از دیدگاه چند کارشناس استفاده می‌شود، از میانگین حسابی سادهٔ نظرات استفاده شده و ماتریس ارتباط مستقیم فازی یا $\tilde{X}$ تشکیل می‌شود. میانگین فازی n عدد فازی مثلثی به‌صورت رابطهٔ (۳) محاسبه خواهد شد:

$$F_{AVE} = \frac{\sum l}{n}, \frac{\sum m}{n}, \frac{\sum u}{n}$$

رابطهٔ (۳)

گام ۲. محاسبهٔ ماتریس ارتباط مستقیم نرمال

برای نرمال‌سازی مقادیر باید مقادیر $\tilde{a}_i^{(k)}$ و $\tilde{b}^{(k)}$ محاسبه شود (روابط ۴ و ۵). با تقسیم درایه‌های ماتریس $\tilde{X}$ بر بیشینهٔ مقادیر $\sum u_{ij}$، ماتریس نرمال فازی $\tilde{N}$ به‌دست خواهد آمد:

$$\tilde{a}_i^{(k)} = \sum \tilde{X}_{ij}^{(k)} = \left(\sum_{j=1}^{n} \tilde{l}_{ij}^{(k)}, \sum_{j=1}^{n} \tilde{m}_{ij}^{(k)}, \sum_{j=1}^{n} \tilde{u}_{ij}^{(k)}\right)$$

رابطهٔ (٤)

$$\tilde{b}^{(k)} = max\left(\sum_{j=1}^{n} \mathrm{u}_{ij}^{(k)}\right); 1 \le i \le n$$ **رابطهٔ (۵)**

بنابراین، ماتریس نرمال‌شده به‌صورت رابطهٔ (۶) خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} \widetilde{\mathrm{N}}_{11}^{(\mathrm{k})} & \widetilde{\mathrm{N}}_{12}^{(\mathrm{k})} & \cdots & \widetilde{\mathrm{N}}_{1\mathrm{n}}^{(\mathrm{k})} \\ \widetilde{\mathrm{N}}_{21}^{(\mathrm{k})} & \widetilde{\mathrm{N}}_{22}^{(\mathrm{k})} & \cdots & \widetilde{\mathrm{N}}_{2\mathrm{n}}^{(\mathrm{k})} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \widetilde{\mathrm{N}}_{\mathrm{n}1}^{(\mathrm{k})} & \widetilde{\mathrm{N}}_{\mathrm{n}2}^{(\mathrm{k})} & \cdots & \widetilde{\mathrm{N}}_{\mathrm{nn}}^{(\mathrm{k})} \end{bmatrix}$$ **رابطهٔ (۶)**

به‌طوری که هر درایهٔ ماتریس نرمال به‌صورت رابطهٔ (۷) خواهد بود:

$$\widetilde{N}_{ij}^{(k)} = \left(\tilde{X}_{ij}^{(j)}\right) \Big/ \tilde{b}^{(k)} = \left(\frac{\tilde{l}_{ij}^{(k)}}{\tilde{b}^{(k)}}, \frac{\tilde{m}_{ij}^{(k)}}{\tilde{b}^{(k)}}, \frac{\tilde{u}_{ij}^{(k)}}{\tilde{b}^{(k)}}\right)$$ **رابطهٔ (۷)**

گام ۳. محاسبهٔ ماتریس ارتباط کامل

برای محاسبهٔ ماتریس ارتباط کامل از رابطهٔ $\mathrm{N} \times (I-N)^{-1}$ استفاده می‌شود. در روش «دیمتل» فازی، ماتریس نرمال فازی به سه ماتریس قطعی زیر افراز می‌شود:

$$N_l = \begin{bmatrix} 0 & l_{12} & \dots & l_{1n} \\ l_{21} & 0 & \dots & l_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad N_m = \begin{bmatrix} 0 & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & 0 & \dots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad N_u = \begin{bmatrix} 0 & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & 0 & \dots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

سپس، ماتریس همانی I_{n*n} تشکیل و عملیات زیر انجام می‌شود (رابطهٔ ۸):

$$T_l = N_l \times (I - N_l)^{-1}$$

$$T_m = N_m \times (I - N_m)^{-1}$$

$$T_u = N_u \times (I - N_u)^{-1}$$ **رابطهٔ (۸)**

$$\tilde{t}_{ij} = \left(t_{ij}^{l}, t_{ij}^{m}, t_{ij}^{u}\right)$$

پس از محاسبهٔ ماتریس ارتباط کامل، می‌توان اقدام به فازی‌زدایی مقادیر کرد. ماتریس به‌دست‌آمده، همان ماتریس ارتباط کامل قطعی‌شده است و برای محاسبهٔ الگوی روابط علّی می‌توان از آن استفاده کرد. برای فازی‌زدایی راهکارهای متعددی وجود دارد که در این مطالعه از روش مرکز سطح به‌صورت رابطهٔ (۹) استفاده می‌شود (Tzeng and Tzeng 1993):

$$DF_{ij} = \frac{\left[\left(u_{ij} - l_{ij}\right) + \left(m_{ij} - l_{ij}\right)\right]}{3} + l_{ij}$$ **رابطهٔ (۹)**

۳-۲. مدل‌سازی ساختاری-تفسیری

برای خوشه‌بندی شاخص‌های اینترنت انرژی از رویکرد مدل‌سازی ساختاری-تفسیری استفاده شده است. «سیج»[1]، مدل‌سازی ساختاری-تفسیری را در سال ۱۹۷۷ ارائه کرد. روش «آی‌اس‌ام» یک روش ساختاری-تفسیری است که در سال ۲۰۰۶، توسط «آگاروال»[2] مطرح گردید و در سال ۲۰۰۷، توسط «کانان»[3] در مقاله‌ای ارائه شد. در این روش، نخست به شناسایی عوامل مؤثر و اساسی پرداخته و سپس، با استفاده از روش ارائه‌شده، روابط بین این عوامل و راه دستیابی به پیشرفت توسط این عوامل ارائه شده است. روش «آی‌اس‌ام» با تجزیهٔ معیارها در چند سطح مختلف به تحلیل ارتباط بین شاخص‌ها می‌پردازد و قادر است ارتباط بین شاخص‌ها را که به‌صورت تکی یا گروهی به یکدیگر وابسته‌اند، تعیین نماید (Kanan 2009). روش «آی‌اس‌ام» می‌تواند برای تجزیه و تحلیل ارتباط بین ویژگی‌های چند متغیر که برای یک مسئله تعریف شده، به‌کار رود (کرباسیان و همکاران ۱۳۹۰). مدل‌سازی ساختاری-تفسیری روشی برای ایجاد و فهم روابط میان عناصر یک نظام پیچیده است. به‌عبارت دیگر، مدل‌سازی ساختاری-تفسیری یک فرایند تعاملی است که در آن مجموعه‌ای از عناصر مختلف و مرتبط با هم، در یک مدل نظام‌یافتهٔ جامع ساختاربندی می‌شوند. روش «آی‌اس‌ام» به برقراری نظم در روابط پیچیده میان عناصر یک نظام کمک کرده و تشخیص روابط درونی متغیرها را ممکن می‌سازد. این روش همچنین، اقدام به اولویت‌بندی و تعیین سطح عناصر یک نظام کرده و به مدیران برای اجرای بهتر مدل طراحی‌شده کمک می‌کند (آذر و همکاران، ۱۳۸۹).

در این مدل، پس از شناسایی ابعاد و شاخص‌های مطالعه، روابط بین آن‌ها با استفاده از رابطهٔ مفهومی «منجر به» تحلیل می‌شوند. حالت‌ها و علائم مورد استفاده دراین رابطهٔ مفهومی مطابق جدول ۴، است.

جدول ٤. علائم مورد استفاده در طراحی مدل ساختاری-تفسیری

V	A	X	O
متغیر i بر j تأثیر دارد	متغیر j بر i تأثیر دارد	رابطه دوسویه	نبودِ رابطه

1. Sage
2. Aagarwal
3. Kanan

٤. تجزیه و تحلیل داده‌ها

٤-١. شناسایی و تعیین روابط شاخص‌های اینترنت انرژی

برای انعکاس روابط درونی شاخص‌های پژوهش از تکنیک «دیمتل» فازی استفاده شده است. نخست، دیدگاه خبرگان گردآوری و سپس، با طیف فازی جدول ۳، فازی‌سازی شده است. به‌دلیل استفاده از دیدگاه چند کارشناس، ماتریس ارتباط مستقیم فازی یا $\tilde{X}$ با استفاده از رابطهٔ (۲) تشکیل شده است.

جدول ۵. محاسبهٔ ماتریس ارتباط مستقیم فازی

$\tilde{X}$	D_{01}	D_{02}	D_{03}	D_{04}	...	D_{15}
D_{01}	(۰/۳ ,۰/۱ ,۰)	(۰/۵۶ ,۰/۳۷ ,۰/۲۱)	(۰/۶۴ ,۰/۴۵ ,۰/۲۷)	(۰/۷۵ ,۰/۵۵ ,۰/۳۶)	...	(۰/۴۸ ,۰/۲۸ ,۰/۱۳)...
D_{02}	(۰/۶۴ ,۰/۴۵ ,۰/۲۵)	(۰/۳ ,۰/۱ ,۰)	(۰/۸۵ ,۰/۶۸ ,۰/۴۸)	(۰/۸۵ ,۰/۶۶ ,۰/۴۶)	...	(۰/۴۸ ,۰/۲۸ ,۰/۱۳)...
D_{03}	(۰/۵ ,۰/۳ ,۰/۱۵)	(۰/۶۳ ,۰/۴۳ ,۰/۲۴)	(۰/۳ ,۰/۱ ,۰)	(۰/۷۸ ,۰/۵۹ ,۰/۳۹)	...	(۰/۶۳ ,۰/۴۳ ,۰/۲۵)...
D_{04}	(۰/۵ ,۰/۳ ,۰/۱۵)	(۰/۳۵ ,۰/۱۵ ,۰/۰۴)	(۰/۷۲ ,۰/۵۲ ,۰/۳۳)	(۰/۳ ,۰/۱ ,۰)	...	(۰/۴۶ ,۰/۲۶ ,۰/۱۳)...
D_{05}	(۰/۴۵ ,۰/۲۶ ,۰/۱۱)	(۰/۵۲ ,۰/۳۲ ,۰/۱۶)	(۰/۵۵ ,۰/۳۵ ,۰/۲)	(۰/۸ ,۰/۶۱ ,۰/۴۱)	...	(۰/۵۵ ,۰/۳۵ ,۰/۱۸)...
D_{06}	(۰/۴۶ ,۰/۲۶ ,۰/۱۴)	(۰/۳۵ ,۰/۱۵ ,۰/۰۴)	(۰/۶۱ ,۰/۴۱ ,۰/۲۴)	(۰/۹۴ ,۰/۷۷ ,۰/۵۷)	...	(۰/۴۵ ,۰/۲۵ ,۰/۱) ...
D_{07}	(۰/۴۸ ,۰/۲۸ ,۰/۱۵)	(۰/۳۹ ,۰/۱۹ ,۰/۰۶)	(۰/۶۵ ,۰/۴۶ ,۰/۲۹)	(۰/۸۱ ,۰/۶۳ ,۰/۴۴)	...	(۰/۵۶ ,۰/۳۷ ,۰/۲۱)...
D_{08}	(۰/۶۳ ,۰/۴۳ ,۰/۲۷)	(۰/۷۵ ,۰/۵۵ ,۰/۳۶)	(۰/۶۱ ,۰/۴۱ ,۰/۲۳)	(۰/۸۱ ,۰/۶۳ ,۰/۴۴)	...	(۰/۶۹ ,۰/۵ ,۰/۳۱) ...
D_{09}	(۰/۶۱ ,۰/۴۱ ,۰/۲۵)	(۰/۵۷ ,۰/۳۷ ,۰/۱۹)	(۰/۵۵ ,۰/۳۵ ,۰/۱۷)	(۰/۷۳ ,۰/۵۴ ,۰/۳۵)	...	(۰/۶ ,۰/۴۱ ,۰/۲۴) ...
D_{10}	(۰/۴۶ ,۰/۲۶ ,۰/۱۲)	(۰/۰,۴۶/۲۶ ,۰/۱۲)	(۰/۶۲ ,۰/۴۳ ,۰/۲۶)	(۰/۸۸ ,۰/۷۲ ,۰/۵۲)	...	(۰/۶۵ ,۰/۴۶ ,۰/۲۸)...
D_{11}	(۰/۴۵ ,۰/۲۵ ,۰/۱۱)	(۰/۳۹ ,۰/۱۹ ,۰/۰۵)	(۰/۵۸ ,۰/۳۹ ,۰/۲۲)	(۰/۸۷ ,۰/۷۲ ,۰/۵۲)	...	(۰/۶۴ ,۰/۴۵ ,۰/۲۷)...
D_{12}	(۰/۳۹ ,۰/۰,۱۹/۰۷)	(۰/۶۴ ,۰/۴۵ ,۰/۲۷)	(۰/۶۶ ,۰/۴۶ ,۰/۲۹)	(۰/۷۴ ,۰/۵۴ ,۰/۳۵)	...	(۰/۵۲ ,۰/۳۲ ,۰/۱۵)...
D_{13}	(۰/۵۶ ,۰/۳۷ ,۰/۲۱)	(۰/۵ ,۰/۳ ,۰/۱۵)	(۰/۶۴ ,۰/۴۵ ,۰/۲۷)	(۰/۸۹ ,۰/۷۲ ,۰/۵۲)	...	(۰/۵۵ ,۰/۳۵ ,۰/۱۹)...
D_{14}	(۰/۴۱ ,۰/۲۱ ,۰/۰۸)	(۰/۴۱ ,۰/۲۱ ,۰/۰۷)	(۰/۵۶ ,۰/۳۷ ,۰/۲۱)	(۰/۷۳ ,۰/۵۴ ,۰/۳۴)	...	(۰/۵ ,۰/۳ ,۰/۱۵) ...
D_{15}	(۰/۷۹ ,۰/۶۳ ,۰/۴۴)	(۰/۷۷ ,۰/۵۹ ,۰/۳۹)	(۰/۵۸ ,۰/۳۹ ,۰/۲۲)	(۰/۷۸ ,۰/۵۹ ,۰/۳۹)	...	(۰/۳ ,۰/۱ ,۰) ...

برای نرمال‌سازی مقادیر باید مقادیر $\tilde{a}_i^{(k)}$ (رابطهٔ ۳) و $\tilde{b}^{(k)}$ (رابطهٔ ۴) محاسبه شوند. با تقسیم درایه‌های ماتریس $\tilde{X}$ بر بیشینهٔ مقادیر $\sum u_{ij}$، ماتریس نرمال فازی $\tilde{N}$ به‌دست آمده است:

$$\tilde{b}^{(k)} = 10.33; \quad \tilde{N} = \frac{1}{10.33} * \tilde{X}$$

رابطهٔ (۱۰)

جدول ٦. محاسبه ماتریس ارتباط مستقیم نرمال فازی $\widetilde{N}$

$\widetilde{N}$	D_{01}	D_{02}	D_{03}	D_{04}	...	D_{15}
D_{01}	(۰/۰۳ ,۰/۰۱ ,۰)	(۰/۰۵ ,۰/۰۴ ,۰/۰۲)	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۳)	(۰/۰۷ ,۰/۰۵ ,۰/۰۴)	...	(۰/۰۵ ,۰/۰۳ ,۰/۰۱)...
D_{02}	(۰/۰۳ ,۰/۰۱ ,۰)	(۰/۰۳ ,۰/۰۱ ,۰)	(۰/۰۸ ,۰/۰۷ ,۰/۰۵)	(۰/۰۸ ,۰/۰۶ ,۰/۰۴)	...	(۰/۰۵ ,۰/۰۳ ,۰/۰۱)...
D_{03}	(۰/۰۳ ,۰/۰۱ ,۰)	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۲)	(۰/۰۳ ,۰/۰۱ ,۰)	(۰/۰۸ ,۰/۰۶ ,۰/۰۴)	...	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۲)...
D_{04}	(۰/۰۳ ,۰/۰۱ ,۰)	(۰/۰۳ ,۰/۰۱ ,۰)	(۰/۰۷ ,۰/۰۵ ,۰/۰۳)	(۰/۰۳ ,۰/۰۱ ,۰)	...	(۰/۰۴ ,۰/۰۳ ,۰/۰۱)...
D_{05}	(۰/۰۴ ,۰/۰۳ ,۰/۰۱)	(۰/۰۵ ,۰/۰۳ ,۰/۰۲)	(۰/۰۵ ,۰/۰۳ ,۰/۰۲)	(۰/۰۸ ,۰/۰۶ ,۰/۰۴)	...	(۰/۰۵ ,۰/۰۳ ,۰/۰۲)...
D_{06}	(۰/۰۴ ,۰/۰۳ ,۰/۰۱)	(۰/۰۳ ,۰/۰۱ ,۰)	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۲)	(۰/۰۹ ,۰/۰۷ ,۰/۰۶)	...	(۰/۰۴ ,۰/۰۲ ,۰/۰۱)...
D_{07}	(۰/۰۵ ,۰/۰۳ ,۰/۰۱)	(۰/۰۴ ,۰/۰۲ ,۰/۰۱)	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۳)	(۰/۰۸ ,۰/۰۶ ,۰/۰۴)	...	(۰/۰۵ ,۰/۰۴ ,۰/۰۲)...
D_{08}	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۳)	(۰/۰۷ ,۰/۰۵ ,۰/۰۴)	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۲)	(۰/۰۸ ,۰/۰۶ ,۰/۰۴)	...	(۰/۰۷ ,۰/۰۵ ,۰/۰۳)...
D_{09}	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۲)	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۲)	(۰/۰۵ ,۰/۰۳ ,۰/۰۲)	(۰/۰۷ ,۰/۰۵ ,۰/۰۳)	...	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۲)...
D_{10}	(۰/۰۴ ,۰/۰۳ ,۰/۰۱)	(۰/۰,۰۴/۰۳ ,۰/۰۱)	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۳)	(۰/۰۹ ,۰/۰۷ ,۰/۰۵)	...	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۳)...
D_{11}	(۰/۰۴ ,۰/۰۲ ,۰/۰۱)	(۰/۰۴ ,۰/۰۲ ,۰/۰۱)	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۲)	(۰/۰۸ ,۰/۰۷ ,۰/۰۵)	...	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۳)...
D_{12}	(۰/۰۴ ,۰/۰,۰۲/۰۱)	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۳)	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۳)	(۰/۰۷ ,۰/۰۵ ,۰/۰۳)	...	(۰/۰۵ ,۰/۰۳ ,۰/۰۱)...
D_{13}	(۰/۰۵ ,۰/۰۴ ,۰/۰۲)	(۰/۰۵ ,۰/۰۳ ,۰/۰۱)	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۳)	(۰/۰۹ ,۰/۰۷ ,۰/۰۵)	...	(۰/۰۵ ,۰/۰۳ ,۰/۰۲)...
D_{14}	(۰/۰۴ ,۰/۰۲ ,۰/۰۱)	(۰/۰۴ ,۰/۰۲ ,۰/۰۱)	(۰/۰۵ ,۰/۰۴ ,۰/۰۲)	(۰/۰۷ ,۰/۰۵ ,۰/۰۳)	...	(۰/۰۵ ,۰/۰۳ ,۰/۰۱)...
D_{15}	(۰/۰۸ ,۰/۰۶ ,۰/۰۴)	(۰/۰۷ ,۰/۰۶ ,۰/۰۴)	(۰/۰۶ ,۰/۰۴ ,۰/۰۲)	(۰/۰۸ ,۰/۰۶ ,۰/۰۴)	...	(۰/۰۳ ,۰/۰۱ ,۰)

برای محاسبهٔ ماتریس ارتباط کامل از رابطهٔ $\mathrm{N} \times (I - N)^{-1}$ استفاده شده است.

جدول ۷. ماتریس ارتباط کامل (T) معیارهای اصلی

$\widetilde{T}$	D01	D02	D03	D04	...	D15
D_{01}	(۰/۴۳ ,۰/۰۶ ,۰/۰۱)	(۰/۴۵ ,۰/۰۸ ,۰/۰۳)	(۰/۵۵ ,۰/۱۱ ,۰/۰۴)	(۰/۶۹ ,۰/۱۴ ,۰/۰۶)	...	(۰/۴۸ ,۰/۰۸ ,۰/۰۲)...
D_{02}	(۰/۴۸ ,۰/۰۹ ,۰/۰۳)	(۰/۴۵ ,۰/۰۶ ,۰/۰۱)	(۰/۵۹ ,۰/۱۳ ,۰/۰۶)	(۰/۷۳ ,۰/۱۶ ,۰/۰۷)	...	(۰/۵ ,۰/۰۸ ,۰/۰۲) ...
D_{03}	(۰/۴۶ ,۰/۰۸ ,۰/۰۲)	(۰/۴۷ ,۰/۰۹ ,۰/۰۳)	(۰/۵۳ ,۰/۰۷ ,۰/۰۱)	(۰/۷۱ ,۰/۱۵ ,۰/۰۶)	...	(۰/۵ ,۰/۰۹ ,۰/۰۳) ...
D_{04}	(۰/۴۴ ,۰/۰۷ ,۰/۰۲)	(۰/۴۲ ,۰/۰۶ ,۰/۰۱)	(۰/۵۴ ,۰/۱۱ ,۰/۰۴)	(۰/۶۳ ,۰/۱ ,۰/۰۲)	...	(۰/۴۶ ,۰/۰۷ ,۰/۰۲)...
D_{05}	(۰/۴۵ ,۰/۰۷ ,۰/۰۲)	(۰/۴۵ ,۰/۰۷ ,۰/۰۲)	(۰/۵۵ ,۰/۱ ,۰/۰۳)	(۰/۷ ,۰/۱۵ ,۰/۰۶)	...	(۰/۴۹ ,۰/۰۹ ,۰/۰۳)...
D_{06}	(۰/۴۴ ,۰/۰۷ ,۰/۰۲)	(۰/۴۳ ,۰/۰۶ ,۰/۰۱)	(۰/۵۴ ,۰/۱ ,۰/۰۴)	(۰/۷ ,۰/۱۶ ,۰/۰۸)	...	(۰/۴۷ ,۰/۰۷ ,۰/۰۲)...
D_{07}	(۰/۴۶ ,۰/۰۸ ,۰/۰۲)	(۰/۴۵ ,۰/۰۶ ,۰/۰۱)	(۰/۵۷ ,۰/۱۱ ,۰/۰۴)	(۰/۷۲ ,۰/۱۵ ,۰/۰۷)	...	(۰/۵ ,۰/۰۹ ,۰/۰۳) ...
D_{08}	(۰/۵۲ ,۰/۱ ,۰/۰۴)	(۰/۵۲ ,۰/۱۱ ,۰/۰۴)	(۰/۶۲ ,۰/۱۲ ,۰/۰۴)	(۰/۷۸ ,۰/۱۷ ,۰/۰۷)	...	(۰/۵۶ ,۰/۱۱ ,۰/۰۴)...
D_{09}	(۰/۴۸ ,۰/۰۹ ,۰/۰۳)	(۰/۴۷ ,۰/۰۸ ,۰/۰۳)	(۰/۵۶ ,۰/۱ ,۰/۰۳)	(۰/۷۲ ,۰/۱۵ ,۰/۰۶)	...	(۰/۵۱ ,۰/۰۹ ,۰/۰۳)...
D_{10}	(۰/۴۷ ,۰/۰۷ ,۰/۰۲)	(۰/۰,۴۶/۰۷ ,۰/۰۲)	(۰/۵۷ ,۰/۱۱ ,۰/۰۴)	(۰/۷۳ ,۰/۱۶ ,۰/۰۷)	...	(۰/۵۱ ,۰/۱ ,۰/۰۴) ...
D_{11}	(۰/۴۵ ,۰/۰۷ ,۰/۰۲)	(۰/۴۴ ,۰/۰۶ ,۰/۰۱)	(۰/۵۵ ,۰/۱ ,۰/۰۴)	(۰/۷۲ ,۰/۱۶ ,۰/۰۷)	...	(۰/۵ ,۰/۱ ,۰/۰۴) ...

$\tilde{T}$	D01	D02	D03	D04 ...	D15
D_{12}	(۰/۴۳ ,۰/۰,۰۶/۰۲)	(۰/۴۵ ,۰/۰۸ ,۰/۰۳)	(۰/۵۴ ,۰/۱ ,۰/۰۴)	(۰/۰۵ ,۰/۱۴ ,۰/۶۸)...	(۰/۰۲ ,۰/۰۸ ,۰/۴۷)...
D_{13}	(۰/۴۶ ,۰/۰۸ ,۰/۰۳)	(۰/۴۵ ,۰/۰۷ ,۰/۰۲)	(۰/۵۶ ,۰/۱۱ ,۰/۰۴)	(۰/۰۷ ,۰/۱۶ ,۰/۷۲)...	(۰/۰۳ ,۰/۰۹ ,۰/۴۹)...
D_{14}	(۰/۴ ,۰/۰۶ ,۰/۰۱)	(۰/۴ ,۰/۰۶ ,۰/۰۱)	(۰/۴۹ ,۰/۰۹ ,۰/۰۳)	(۰/۰۵ ,۰/۱۳ ,۰/۶۳)...	(۰/۰۲ ,۰/۰۷ ,۰/۴۳)...
D_{15}	(۰/۵۳ ,۰/۱۱ ,۰/۰۵)	(۰/۵۲ ,۰/۱۱ ,۰/۰۵)	(۰/۶۱ ,۰/۱۱ ,۰/۰۴)	(۰/۰۷ ,۰/۱۶ ,۰/۷۷)...	(۰/۰۱ ,۰/۰۷ ,۰/۵۱)...

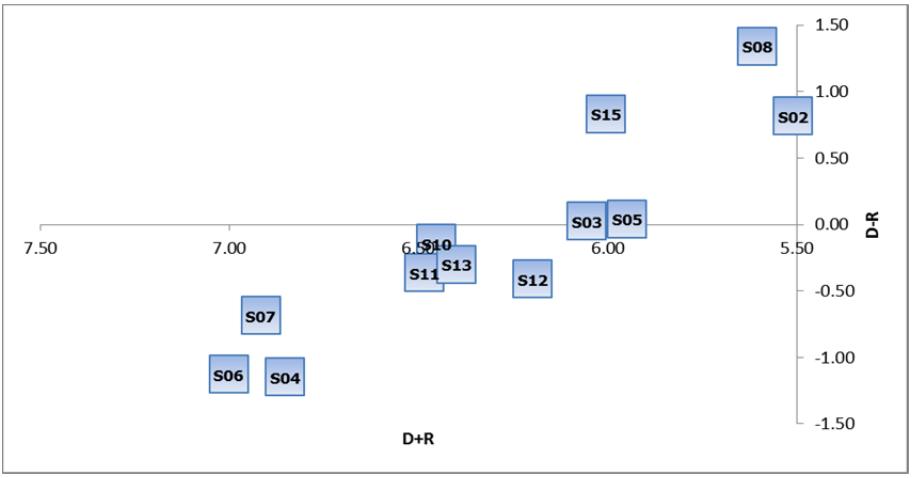
برای فازی‌زدایی از روش مرکز سطح (رابطهٔ ۹) استفاده شده است. نتایج حاصل از قطعی‌سازی ماتریس ارتباطات کامل به‌صورت جدول ۸ خلاصه شده است:

جدول ۸. الگوی تأثیرگذاری و تأثیرپذیری معیارهای اصلی

شاخص‌ها و نماد مورد استفاده	D	R	D+R	D-R
D_{01} وجود سرورهای اینترنتی قدرتمند در کشور	۲/۹۸	۲/۴۰	۵/۳۸	۰/۵۸
D_{02} دسترسی آزاد مصرف‌کنندگان نهایی به اینترنت	۳/۱۶	۲/۳۵	۵/۵۱	۰/۸۱
D_{03} دسترسی به امکانات و تجهیزات سخت‌افزاری مدرن	۳/۰۴	۳/۰۲	۶/۰۶	۰/۰۲
D_{04} تجهیز لوازم مصرفی به اینترنت	۲/۸۵	۴/۰۰	۶/۸۵	−۱/۱۵
D_{05} وجود زیرساخت‌های نرم‌افزاری مناسب	۲/۹۹	۲/۹۵	۵/۹۵	۰/۰۴
D_{06} بهینه‌سازی زیرساخت‌های تولید انرژی	۲/۹۴	۴/۰۷	۷/۰۰	−۱/۱۳
D_{07} بهینه‌سازی سازوکارهای تبدیل انرژی	۳/۱۱	۳/۸۰	۶/۹۲	−۰/۶۹
D_{08} فرایندهای نظام‌مند برای توزیع انرژی	۳/۴۷	۲/۱۳	۵/۶۰	۱/۳۴
D_{09} برقرای ارتباط میان زنجیرهٔ تأمین و مصرف انرژی	۳/۱۲	۲/۳۰	۵/۴۳	۰/۸۲
D_{10} امکان ذخیره‌سازی داده‌های مربوط به تولید و مصرف انرژی	۳/۱۵	۳/۳۰	۶/۴۵	−۰/۱۴
D_{11} نظارت برخط بر میزان مصرف انرژی هر فرد	۳/۰۶	۳/۴۳	۶/۴۸	−۰/۳۷
D_{12} شفاف‌سازی اطلاعات مربوط به مصرف انرژی	۲/۸۹	۳/۳۱	۶/۲۰	−۰/۴۱
D_{13} اشتراک‌گذاری اطلاعات موجود در واحدهای تحت پوشش مصرف انرژی	۳/۰۵	۳/۳۵	۶/۴۰	−۰/۳۰
D_{14} منابع مالی لازم برای استفاده از اینترنت انرژی	۳/۲۱	۲/۸۶	۶/۰۷	۰/۳۵
D_{15} عزم و ارادهٔ لازم برای به‌کارگیری اینترنت انرژی در سطح کلان	۳/۴۲	۲/۵۹	۶/۰۰	۰/۸۳

در ماتریس ارتباطات کامل، جمع عناصر هر سطر (D) نشانگر میزان تأثیرگذاری آن عامل بر سایر عامل‌های سیستم است. بر این اساس، «فرایندهای نظام‌مند برای توزیع انرژی» و «عزم و ارادهٔ لازم برای به‌کارگیری اینترنت انرژی در سطح کلان»، بیشترین

تأثیرگذاری را دارند. جمع عناصر ستون (R) برای هر عامل نشانگر میزان تأثیرپذیری آن عامل است. نتایج نشان می‌دهد که «بهینه‌سازی زیرساخت‌های تولید انرژی» و «تجهیز لوازم مصرفی به اینترنت»، بیشترین تأثیرپذیری از سایر عوامل را دارند. همچنین، در شکل ۳، بردار افقی (D+R)، میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری عامل مورد نظر در نظام است. بردار عمودی (D-R)، قدرت تأثیرگذاری هر عامل را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، اگر (D-R) مثبت باشد، متغیر یک متغیر علّی محسوب می‌شود و اگر منفی باشد، معلول به حساب می‌آید.



شکل ۳. نمودار مختصات دکارتی برونداد «دیمتل» برای معیارهای اصلی

٤-۲. نقشهٔ روابط معنادار و تشکیل ماتریس خودتعاملی ساختاری[1]

برای تعیین نقشهٔ روابط شبکهٔ «ان‌آرام»[2]، باید ارزش آستانه محاسبه شود. با این روش می‌توان از روابط جزئی صرف نظر کرده و شبکهٔ روابط قابل اعتنا را ترسیم نمود. تنها روابطی که مقادیر آن‌ها در ماتریس T از مقدار آستانه بزرگ‌تر باشند، در «ان‌آرام» نمایش داده خواهند شد. برای محاسبهٔ مقدار آستانهٔ روابط کافی است که میانگین مقادیر ماتریس T محاسبه شود. بعد از آنکه شدت آستانه تعیین شد، تمامی مقادیر ماتریس T که کوچک‌تر از آستانه باشد، صفر شده، یعنی آن رابطهٔ علّی در نظر گرفته نمی‌شود. در

1. Structural Self-Interaction Matrix (SSIM)
2. network relation map (NRM)

این مطالعه ارزش آستانه برابر ۰/۲۰۴ به‌دست آمده است. بنابراین، الگوی روابط معنادار به‌صورت زیر است:

مقادیر روابط معنادار خروجی نهایی تکنیک «دیمتل» (ارائه‌شده در ماتریس T) اگر بر اساس آستانهٔ تحمل استخراج شود، می‌تواند یک ماتریس قابل اتکا به‌عنوان ورودی تکنیک «آی‌اس‌ام» محسوب شود. مقادیری که از آستانهٔ تحمل کوچک‌تر است (روابط بی‌معنا) صفر، و مقادیری که از آستانهٔ تحمل بزرگ‌تر است (روابط معنادار) یک، در نظر گرفته می‌شوند (Zhou, Ling Li 2006; Yin et al. 2012). ماتریس خودتعاملی ساختاری، از ابعاد و شاخص‌های مطالعه و مقایسهٔ آن‌ها با یکدیگر بر اساس چهار حالت روابط مفهومی (جدول ۴) تشکیل می‌شود. اطلاعات حاصله بر اساس روش مدل‌سازی ساختاری-تفسیری جمع‌بندی و ماتریس خودتعاملی ساختاری نهایی تشکیل می‌شود (آذر و بیات ۱۳۸۷). ماتریس دستیابی[1] نیز از تبدیل ماتریس خودتعاملی ساختاری به یک ماتریس دو-ارزشی صفر و یک به‌دست می‌آید. در ماتریس دستیابی درایه‌های قطر اصلی برابر یک قرار می‌گیرند. ماتریس حاصل، ماتریس دستیابی اولیه است. در این پژوهش، خروجی تکنیک «دیمتل» با ملاحظهٔ آستانهٔ تحمل به‌عنوان ماتریس دستیابی اولیه در تکنیک «آی‌اس‌ام» استفاده شده است. آستانهٔ تحمل ذکرشده پس از تحلیل نظرات خبرگان و متخصصان در نرم‌افزار «دیمتل سولور» به‌دست آمده است.

جهت حصول اطمینان و سازگاری در یک ماتریس دستیابی اولیه، می‌بایست روابط ثانویه کنترل شده و ماتریس دستیابی نهایی[2] شکل گیرد؛ به این معنا که اگر A منجر به B شود و B منجر به C شود، در این صورت، باید A منجر به C شود. خروجی ماتریس دستیابی نهایی تکنیک «آی‌اس‌ام» در جدول ۹، ارائه شده است.

ماتریس حاصل (ماتریس ارتباطات داخلی)، هم رابطهٔ علّت و معلولی بین عوامل و هم اثرپذیری و اثرگذاری متغیرها را نمایش می‌دهد. در این مطالعه، پس از شناسایی ابعاد و شاخص‌های مطالعه، روابط بین ابعاد و شاخص‌های شناسایی‌شده با استفاده از رابطهٔ مفهومی «منجر به» تحلیل شده است.

1. reachability matrix
2. final reachability matrix

٤-۳. تعیین روابط و سطح بندی ابعاد و شاخص‌ها

برای تعیین روابط و سطح‌بندی معیارها باید مجموعهٔ دستیابی[1] (خروجی) و مجموعهٔ پیش‌نیاز[2] (ورودی) برای هر معیار از ماتریس دستیابی استخراج شود. مجموعهٔ دستیابی (خروجی) شامل خود معیار و معیارهایی است که از آن تأثیر می‌پذیرند. مجموعهٔ پیش‌نیاز (ورودی) شامل خود معیار و معیارهایی است که بر آن تأثیر می‌گذارند. به‌عبارت دیگر، مجموعهٔ دستیابی برابر با سطر مقابل هر معیار و مجموعهٔ پیش‌نیاز برابر با ستون مقابل هر معیار است (جدول ۱۰).

جدول ۹. ماتریس دستیابی تکنیک «آی‌اس‌ام»

T	D_{01}	D_{02}	D_{03}	D_{04}	D_{05}	D_{06}	D_{07}	D_{08}	D_{09}	D_{10}	D_{11}	D_{12}	D_{13}	D_{14}	D_{15}
D_{01}	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱
D_{02}	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
D_{03}	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
D_{04}	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱
D_{05}	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
D_{06}	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱
D_{07}	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
D_{08}	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
D_{09}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱
D_{10}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱
D_{11}	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
D_{12}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱
D_{13}	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
D_{14}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
D_{15}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱

1. reachability set
2. antecedent set

جدول ۱۰. مجموعهٔ ورودی‌ها و خروجی‌ها برای تعیین سطح

	پیش‌نیاز (ورودی‌ها)	دستیابی (خروجی‌ها)	مجموعهٔ اشتراک	سطح
D_{01}	$D_{01}D_{02}D_{03}D_{05}D_{07}D_{08}$ $D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	D_{01}	D_{01}	1
D_{02}	$D_{02}D_{05}D_{07}D_{08}D_{13}$	$D_{01}D_{02}D_{13}$	$D_{02}D_{13}$	
D_{03}	$D_{03}D_{05}D_{06}D_{08}D_{10}D_{11}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{01}D_{03}D_{08}D_{11}D_{13}$	$D_{03}D_{08}D_{11}D_{13}$	
D_{04}	$D_{04}D_{05}D_{07}D_{08}D_{10}D_{12}$ $D_{13}D_{14}D_{15}$	D_{04}	D_{04}	1
D_{05}	$D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}D_{09}D_{10}$ $D_{11}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{01}D_{02}D_{03}D_{04}D_{05}$ $D_{06}D_{07}D_{08}D_{11}D_{13}$	$D_{05}D_{06}D_{07}$ $D_{08}D_{11}D_{13}$	
D_{06}	$D_{05}D_{06}D_{08}D_{09}D_{10}D_{12}$ $D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{03}D_{05}D_{06}D_{08}$	$D_{05}D_{06}D_{08}$	
D_{07}	$D_{05}D_{07}D_{08}D_{09}D_{10}D_{11}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{01}D_{02}D_{04}D_{05}D_{07}$ $D_{08}D_{11}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{07}D_{08}D_{11}$ $D_{13}D_{14}D_{15}$	
D_{08}	$D_{03}D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}D_{09}$ $D_{10}D_{11}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{01}D_{02}D_{03}D_{04}D_{05}D_{06}D_{07}$ $D_{08}D_{11}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{03}D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}$ $D_{11}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	
D_{09}	$D_{09}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}D_{09}D_{11}D_{12}$	D_{09}	
D_{10}	$D_{10}D_{14}D_{15}$	$D_{01}D_{03}D_{04}D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}$ $D_{10}D_{11}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{10}D_{14}D_{15}$	
D_{11}	$D_{03}D_{05}D_{07}D_{08}D_{09}D_{10}$ $D_{11}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{03}D_{05}D_{07}D_{08}$ $D_{11}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{03}D_{05}D_{07}D_{08}$ $D_{11}D_{13}D_{14}D_{15}$	1
D_{12}	$D_{08}D_{09}D_{10}D_{12}$ $D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{01}D_{03}D_{04}D_{05}D_{06}D_{07}$ $D_{08}D_{11}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{08}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	
D_{13}	$D_{02}D_{03}D_{05}D_{07}D_{08}D_{10}$ $D_{11}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{01}D_{02}D_{03}D_{04}D_{05}D_{06}D_{07}$ $D_{08}D_{11}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{02}D_{03}D_{05}D_{07}D_{08}$ $D_{11}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	
D_{14}	$D_{07}D_{08}D_{10}D_{11}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{01}D_{03}D_{04}D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}$ $D_{09}D_{10}D_{11}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{07}D_{08}D_{10}D_{11}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	
D_{15}	$D_{07}D_{08}D_{10}D_{11}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{01}D_{03}D_{04}D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}$ $D_{09}D_{10}D_{11}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{07}D_{08}D_{10}D_{11}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	

چنانچه اشتراکات مجموعهٔ دستیابی (خروجی‌ها) و مجموعهٔ پیش‌نیاز (ورودی‌ها) برابر با مجموعهٔ دستیابی (خروجی‌ها) باشد، متغیر/ متغیرهای مربوط در سلسله‌مراتب ماتریس «آی‌اس‌ام» در بالاترین سطح قرار می‌گیرند. عناصر سطح اول بیشترین تأثیرپذیری را در مدل خواهند داشت (جوانمردی و همکاران ۱۳۹۰). پس از تعیین سطح اول، معیار/ معیارهای تعیین سطح‌شده را از ماتریس حذف کرده و فرایند قبلی تکرار می‌شود. چنانچه بار دیگر

ماتریس دستیابی به‌ترتیب سطوح مرتب شود، ماتریس جدید «ماتریس مخروطی»[1] نامیده می‌شود، مجموعهٔ ورودی‌ها و خروجی‌ها تشکیل می‌شود و بدین‌ترتیب، فرایند تا قرار گرفتن تمامی متغیرها در سطح خود ادامه می‌یابد (Thakkara et al. 2007). بنابراین، «D_1» و «D_4» و «D_{11}» متغیرهای سطح اول هستند. پس از شناسایی متغیرهای سطح اول، این متغیرها حذف شده و مجموعهٔ ورودی‌ها و خروجی‌ها بدون در نظر گرفتن متغیرهای سطح اول محاسبه می‌شود. مجموعهٔ مشترک شناسایی و متغیرهایی که اشتراک آن‌ها برابر مجموعهٔ ورودی‌ها باشند، به‌عنوان متغیرهای سطح دوم انتخاب می‌شوند. خروجی تعیین عناصر سطح دوم در سلسله‌مراتب «آی‌اس‌ام» در جدول ۱۱، ارائه شده است:

جدول ۱۱. خروجی تعیین عناصر سطح دوم در سلسله‌مراتب «آی‌اس‌ام»

	پیش‌نیاز (ورودی‌ها)	دستیابی (خروجی‌ها)	مجموعهٔ اشتراک	سطح
D_{02}	$D_{02}D_{05}D_{07}D_{08}D_{13}$	$D_{02}D_{13}$	$D_{02}D_{13}$	2
D_{03}	$D_{03}D_{05}D_{06}D_{08}D_{10}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{03}D_{08}D_{13}$	$D_{03}D_{08}D_{13}$	2
D_{05}	$D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}D_{09}$ $D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{02}D_{03}D_{05}D_{06}$ $D_{07}D_{08}D_{13}$	$D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}D_{13}$	
D_{06}	$D_{05}D_{06}D_{08}D_{09}D_{10}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{03}D_{05}D_{06}D_{08}$	$D_{05}D_{06}D_{08}$	
D_{07}	$D_{05}D_{07}D_{08}D_{09}D_{10}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{02}D_{05}D_{07}D_{08}$ $D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{07}D_{08}D_{13}D_{14}D_{15}$	
D_{08}	$D_{03}D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}D_{09}$ $D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{02}D_{03}D_{05}D_{06}D_{07}$ $D_{08}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{03}D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	
D_{09}	$D_{09}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}D_{09}D_{12}$	D_{09}	
D_{10}	$D_{10}D_{14}D_{15}$	$D_{03}D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}$ $D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{10}D_{14}D_{15}$	
D_{12}	$D_{08}D_{09}D_{10}D_{12}$ $D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{03}D_{05}D_{06}D_{07}$ $D_{08}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{08}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	
D_{13}	$D_{02}D_{03}D_{05}D_{07}D_{08}$ $D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{02}D_{03}D_{05}D_{06}D_{07}$ $D_{08}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{02}D_{03}D_{05}D_{07}D_{08}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	
D_{14}	$D_{07}D_{08}D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{03}D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}D_{09}$ $D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{07}D_{08}D_{10}D_{12}$ $D_{13}D_{14}D_{15}$	
D_{15}	$D_{07}D_{08}D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{03}D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}D_{09}$ $D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{07}D_{08}D_{10}D_{12}$ $D_{13}D_{14}D_{15}$	

1. conical matrix

با توجه به خروجی تعیین عناصر سطح دوم در سلسله‌مراتب «آی‌اس‌ام»، متغیرهای «D_2» و «D_3» متغیرهای سطح دوم هستند. برای تعیین عناصر سطح سوم، متغیرهای سطح دوم حذف شده و بار دیگر، مجموعهٔ ورودی‌ها و خروجی‌ها بدون در نظر گرفتن متغیرهای سطح دوم محاسبه می‌شود. بر اساس جدول ۱۲، مجموعهٔ مشترک شناسایی و متغیرهایی که اشتراک آن‌ها برابر مجموعهٔ ورودی‌ها باشد، به‌عنوان متغیرهای سطح سوم انتخاب می‌شوند. با توجه به خروجی تعیین عناصر سطح سوم در سلسله‌مراتب «آی‌اس‌ام»، متغیرهای «D_{05}» تا «D_{08}» متغیرهای سطح سوم هستند.

جدول ۱۲. خروجی تعیین عناصر سطح سوم در سلسله‌مراتب «آی‌اس‌ام»

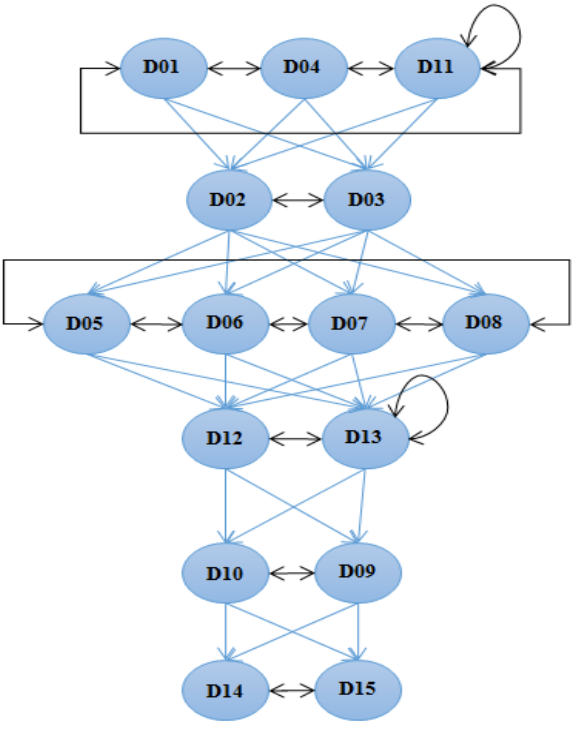
	پیش‌نیاز (ورودی‌ها)	دستیابی (خروجی‌ها)	مجموعهٔ اشتراک	سطح
D_{05}	$D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}D_{09}$ $D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}D_{13}$	$D_{05}D_{06}D_{07}$ $D_{08}D_{13}$	3
D_{06}	$D_{05}D_{06}D_{08}D_{09}D_{10}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{06}D_{08}$	$D_{05}D_{06}D_{08}$	3
D_{07}	$D_{05}D_{07}D_{08}D_{09}D_{10}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{07}D_{08}$ $D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{07}D_{08}$ $D_{13}D_{14}D_{15}$	3
D_{08}	$D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}D_{09}$ $D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	3
D_{09}	$D_{09}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{06}D_{07}$ $D_{08}D_{09}D_{12}$	D_{09}	
D_{10}	$D_{10}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}D_{10}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{10}D_{14}D_{15}$	
D_{12}	$D_{08}D_{09}D_{10}D_{12}$ $D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{08}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	
D_{13}	$D_{05}D_{07}D_{08}D_{10}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}$ $D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{07}D_{08}D_{12}$ $D_{13}D_{14}D_{15}$	
D_{14}	$D_{07}D_{08}D_{10}D_{12}$ $D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}D_{09}$ $D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{07}D_{08}D_{10}D_{12}$ $D_{13}D_{14}D_{15}$	
D_{15}	$D_{07}D_{08}D_{10}D_{12}$ $D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{05}D_{06}D_{07}D_{08}D_{09}$ $D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{07}D_{08}D_{10}D_{12}$ $D_{13}D_{14}D_{15}$	

برای تعیین عناصر سطح چهارم، متغیرهای سطح سوم حذف شده و بر اساس مجموعهٔ ورودی‌ها و خروجی‌های جدید، متغیرهای «D_{12}» و «D_{13}» به‌عنوان عناصر سطح چهارم انتخاب شده‌اند (جدول ۱۳).

جدول ۱۳. خروجی تعیین عناصر سطح چهارم در سلسله‌مراتب «آی‌اس‌ام»

	پیش‌نیاز (ورودی‌ها)	دستیابی (خروجی‌ها)	مجموعه اشتراک	سطح
D_{09}	$D_{09}D_{14}D_{15}$	$D_{09}D_{12}$	D_{09}	
D_{10}	$D_{10}D_{14}D_{15}$	$D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{10}D_{14}D_{15}$	
D_{12}	$D_{09}D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	4
D_{13}	$D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	4
D_{14}	$D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{09}D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	
D_{15}	$D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{09}D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	$D_{10}D_{12}D_{13}D_{14}D_{15}$	

برای تعیین عناصر سطح پنجم، متغیرهای شناسایی‌شدهٔ سطح چهارم حذف شده و بدین‌ترتیب، دو متغیر D_{09} و D_{10} به‌عنوان عناصر سطح پنجم انتخاب شده‌اند. در پایان، دو متغیر D_{14} و D_{15} نیز به‌عنوان عناصر سطح ششم معرفی شدند. الگوی نهایی سطوح متغیرهای شناسایی‌شده در شکل ۴، نمایش داده شده است.



شکل ٤. مدل پایه‌ای توسعه داده‌شده با روش «آی‌اس‌ام» (نویسندهٔ مقاله)

مطابق مدل، عناصر (D_{01}; D_{04}; D_{11}) یعنی «وجود سرورهای اینترنتی قدرتمند در کشور»، «تجهیز لوازم مصرفی به اینترنت» و «نظارت برخط بر میزان مصرف انرژی هر فرد»، در سطح نخست قرار داشته و پایه‌ای‌ترین متغیرها جهت به‌کارگیری اینترنت انرژی هستند. این عناصر با اطلاع‌رسانی و هماهنگی در سراسر زنجیرهٔ تأمین مدیریت انرژی، از طریق دسترسی آزاد مصرف‌کنندگان نهایی به اینترنت و دسترسی به امکانات و تجهیزات سخت‌افزاری مدرن (D_{02}; D_{03}) در ارتباط مستقیم هستند. با تابعیت از این روابط، متغیرهای «وجود زیرساخت‌های نرم‌افزاری مناسب»، «بهینه‌سازی زیرساخت‌های تولید انرژی»، «بهینه‌سازی سازوکارهای تبدیل انرژی»، «فرایندهای نظام‌مند برای توزیع انرژی» ($D_{05} - D_{08}$) تحت تأثیر شاخص‌های سطوح بعد قرار می‌گیرند. شاخص‌های «شفاف‌سازی اطلاعات مربوط به مصرف انرژی» و «اشتراک‌گذاری اطلاعات موجود در واحدهای تحت پوشش مصرف انرژی» (D_{12} ; D_{13})، «برقراری ارتباط میان زنجیرهٔ تأمین و مصرف انرژی» و «امکان ذخیره‌سازی داده‌های مربوط به تولید و مصرف انرژی» (D_{09} ; D_{10}) در سطوح بعدی قرار دارند. این امر موجب صرفه‌جویی اقتصادی و کاهش هزینهٔ مصرف انرژی خواهد شد. وجود همهٔ این شاخص‌ها در نهایت، منوط به «وجود منابع مالی لازم برای استفاده از اینترنت انرژی» و «عزم و ارادهٔ لازم برای به‌کارگیری اینترنت انرژی در سطح کلان» (D_{09} ; D_{10}) است.

۵. نتیجه‌گیری و ارائهٔ پیشنهادات کاربردی

سطح مصرف انرژی کشور به شکل قابل توجهی بالا بوده و میزان اتلاف آن بسیار زیاد است. امروزه، مدیریت مصرف انرژی در جهان ضرورتی آشکار است، در حالی که این مسئله در کشور ما نادیده گرفته شده و به یک بحران واقعی تبدیل شده است. یکی از اساسی‌ترین راهکارهای خروج از این بحران، استقبال از فناوری‌ها و امکانات جدیدی است که فناوری اطلاعات و ارتباطات تحت عنوان «اینترنت انرژی» فراهم کرده است و این راهکاری است که محققانی همچون Elma and selamo (2017); Qi and Wu (2018); Lombardi et al. (2018); Yan and Hu (2018); Qiu and et al. (2019); Omer and et al. (2019); and Sun (2019) به آن اذعان داشته‌اند. اینترنت انرژی به‌عنوان زیرساخت شبکه‌ای پویا تعریف شده است که منابع مختلف انرژی را از طریق اینترنت به هم متصل می‌کند. بدین‌ترتیب، امکان انتقال داده‌های مرتبط با انرژی (که به‌صورت محلی ایجاد، ذخیره و

ارسال شده‌اند) در هر زمان و به هر مکان میسر است. اینترنت انرژی در شهرهای هوشمند کاربردهای بسیاری، همچون استفاده در هوشمندی ساختمان‌ها و تأسیسات دارد.

اینترنت انرژی به‌عنوان یک شبکهٔ پویا امکان خرید، فروش و به اشتراک‌گذاری یکپارچهٔ انرژی را برای کاربران خود فراهم می‌کند. چیزی مشابه با نحوه‌ای که اطلاعات در اینترنت جابه‌جا می‌شود. با اضافه‌کردن هوش مصنوعی و نرم‌افزارهای پیچیده‌تر به این نظام، می‌توان واحدهای بسیار کوچک انرژی را مدیریت کرده و به‌طور هوشمند از نیازهای انرژی مطلع شد. از سوی دیگر، با استفاده از این فناوری، ماشین‌ها، وسایل برقی و سایر دستگاه‌ها به‌گونه‌ای تنظیم می‌شوند که انرژی بسیار کمتری مصرف کنند. اتومبیل‌های صرفه‌جویِ خودکار[1] گرفته تا تراشه‌های مبتنی بر محاسبات عصبی، نمونه‌های کاربردی از فناوری اینترنت انرژی هستند که در پژوهش‌های متعددی مانند Town et al. (2018); Nguyen et al. (2018); Sani et al. (2019); Wang (2019); Omer et al. (2019); Tamilselvan and Thangaraj (2020) نیز به آن‌ها اشاره شده است.

برای پاسخ به سؤالات پژوهش، مهم‌ترین شاخص‌های به‌کارگیری اینترنت انرژی شناسایی شده و الگوی روابط بین شاخص‌ها و سطح‌بندی هر یک از آن‌ها در مدل پژوهش مشخص شد. برای این کار از رویکرد ترکیبی تکنیک «دیمتل» و مدل‌سازی ساختاری-تفسیری استفاده شده است. از میان شاخص‌ها، «وجود سرورهای اینترنتی قدرتمند در کشور»، «تجهیز لوازم مصرفی به اینترنت» و «نظارت برخط بر میزان مصرف انرژی هر فرد» به‌عنوان شاخص‌های سطح نخست و بنیادی‌ترین متغیرها در به‌کارگیری اینترنت انرژی معرفی شدند. نتایج به‌دست‌آمده با پژوهش‌های Nguyen et al. (2018); Town et al. (2018); Sani et al. (2019); Lombardi et al. (2018); Lin et al. (2018); Qiu et al. (2019) مطابقت دارد. پس از آن، شاخص‌های «دسترسی آزاد مصرف‌کنندگان نهایی به اینترنت» و «دسترسی به امکانات و تجهیزات سخت‌افزاری مدرن» در سطح دوم، «وجود زیرساخت‌های نرم‌افزاری مناسب»، «بهینه‌سازی زیرساخت‌های تولید انرژی»، «بهینه‌سازی سازوکارهای تبدیل انرژی»، «فرایندهای نظام‌مند برای توزیع انرژی» در سطح سوم، «شفاف‌سازی اطلاعات مربوط به مصرف انرژی» و «اشتراک‌گذاری اطلاعات موجود در واحدهای تحت پوشش مصرف انرژی» در سطح چهارم، «برقراری ارتباط میان زنجیرهٔ

1. auto saving cars

تأمین و مصرف انرژی» و «امکان ذخیره‌سازی داده‌های مربوط به تولید و مصرف انرژی» در سطح پنجم، و سرانجام، «شاخص‌های منابع مالی لازم برای استفاده از اینترنت انرژی» و «عزم و ارادهٔ لازم برای به‌کارگیری اینترنت انرژی در سطح کلان» در سطح ششم قرار گرفتند. شکل ۴، نیز الگوی روابط بین متغیرها و سطح‌بندی هر یک از آن‌ها را به‌وضوح نشان می‌دهد.

پژوهش حاضر نخستین کوشش رسمی و سازمان‌یافته در زمینهٔ اینترنت انرژی در مطالعات داخلی است. از این رو، محدودیت‌های بسیاری پیش روی پژوهشگران وجود داشت. رفع این محدودیت‌ها، مسیر انجام مطالعات جدید را هموارتر خواهد ساخت. در این راستا پیشنهاد می‌شود: ۱) با جرح و تعدیل شاخص‌های شناسایی‌شده در این مطالعه مدل کامل‌تری از مفهوم اینترنت انرژی ارائه شود؛ ۲) میزان اهمیت عناصر را شناسایی کرده، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مشخص شده، از مفهوم اینترنت انرژی که با مفاهیم پایدار ارتباط تنگاتنگی دارد در حوزه‌های دیگر مانند هوشمندسازی شهرها یا ساختمان‌های با مصرف انرژی صفر[1] استفاده کرد؛ و ۳) از منظر فنی نیز به توسعهٔ زیرساخت‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری اینترنت انرژی با تکیه بر شبکه‌های هوشمند پرداخت.

فهرست منابع

آذر، عادل، و کریم بیات. ۱۳۸۷. طراحی مدل فرایندمحوری کسب‌وکار با رویکرد مدل‌سازی ساختاری-تفسیری (ISM). *مدیریت فناوری اطلاعات* ۱ (۱): ۳-۱۸.

آذر، عادل، علی تیزرو، عباس مقبل، و علی‌اصغر انواری رستمی. ۱۳۸۹. طراحی مدل چابکی زنجیرهٔ تأمین با رویکرد مدل‌سازی تفسیری-ساختاری، *پژوهش‌های مدیریت در ایران* (۱۴): ۴ (پیاپی ۶۹): ۱-۲۵.

حبیبی، آرش، صدیقه ایزدیار، و اعظم سرافرازی. ۱۳۹۳. *تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی*. رشت: انتشارات کتیبه گیل .

حسینی، مازیار. ۱۳۸۷. *مدیریت بحران*. تهران: مؤسسهٔ نشر شهر.

کرباسیان، مهدی، محمد جوانمردی، اعظم خبوشانی، و محمود زنجیرچی. ۱۳۹۰. کاربرد مدل (ISM) جهت سطح‌بندی شاخص‌های انتخاب تأمین‌کنندگان چابک و رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان با استفاده از روش TOPSIS-AHP فازی. *مدیریت تولید و عملیات* ۲ (۱): ۱۰۷-۱۳۴.

1. Zero-energy building

References

Bui, N., A. P. Castellani, P. Casari, & M. Zorzi. 2012. The internet of energy: a web-enabled smart grid system. *IEEE Network* 26 (4): 39-45.

Connolly, D., H. Lund, & B. V. Mathiesen. 2016. Smart Energy Europe: The technical and economic impact of one potential 100% renewable energy scenario for the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60: 1634-1653.

Fontela, E., & A. Gabus. 1974. DEMATEL, Innovative Methods, Report No. 2 Structural Analysis of the World Problematique. Battelle Geneva: Research Institute.

Grubler, A., C. Wilson, N. Bento, B. Boza-Kiss, V. Krey, D. L. McCollum,& J. Cullen. 2018. A low energy demand scenario for meeting the 1.5 C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nature energy* 3 (6): 515-527.

Hannan, M. A., M. Faisal, P. J. Ker, L. H. Mun, K. Parvin, T. M. I. Mahlia, & F. Blaabjerg. 2018. A review of internet of energy based building energy management systems: Issues and recommendations. *IEEE Access* 6: 38997-39014.

Hittinger, E., & P. Jaramillo. 2018. Internet of Things: Energy boon or bane? *Science* 364 (6438): 326-328.

Hong, Z., Y. Feng, L. Zhiwu, Y. Wong, & H. Zheng. 2019. An integrated approach for multi-objective optimisation and MCDM of energy internet under uncertainty. *Future Generation Computer Systems* 18: 1-20.

Hossein Motlagh, N., M. Mohammadrezaei, J. Hunt, & B. Zakeri. 2020. Internet of Things (IoT) and the energy sector. *Energies* 13 (2): 494.

Huang, A. Q., M. L. Crow, G. T. Heydt, J. P. Zheng, & S. J. Dale. 2011. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet. *Proceedings of the IEEE* 99 (1): 133-148.

Jaradat, M., M. Jarrah, A. Bousselham, Y. Jararweh, & M. Al-Ayyoub. 2015. The internet of energy: smart sensor networks and big data management for smart grid. *Procedia Computer Science* 56: 592-597.

Jia, M., A. Komeily, Y. Wang, & R. S. Srinivasan. 2019. Adopting Internet of Things for the development of smart buildings: A review of enabling technologies and applications. *Automation in Construction* 101: 111-126.

Kahraman, Cengiz. 2009. Fuzzy Multi-Criteria Decision Making: Theory and Applications with Recent Developments Front Cover. *Springer optimization and its applications* 16, ISSN 1931-6828.

Kanan F. T. 2009. Toward interpretation of complex structural modeling. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernet* 4 (5): 32-36.

Lin, C. C., D. J. Deng, C. C., Kuo, &Y. L. Liang. 2018. Optimal charging control of energy storage and electric vehicle of an individual in the internet of energy with energy trading. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14 (6): 2570-2578.

Lombardi, F., L. Aniello, S. De Angelis, A. Margheri, & V. Sassone. 2018. A blockchain-based infrastructure for reliable and cost-effective IoT-aided smart grids. *In Proceedings of the Living in the Internet of Things: Cybersecurity of the IoT.* London, UK.

Ma, R, H. H, Chen, Y. R. Huang, & w. Meng. 2013. Smart grid communication: its challenges and opportunities. IEEE Transactions 4. Pp: 36-46.

Nguyen, V., T. Vu, N. Le, & Y. Ang. 2018. An Overview of Internet of Energy (IoE) Based Building Energy Management System. *IEEE Xplore Digital Library*

Poyner, I. K., & R. S. Sherratt. 2018. Privacy and security of consumer IoT devices for the pervasive monitoring of vulnerable people. *In Proceedings of the Living in the Internet of Things: Cybersecurity*

of the IoT—London, UK, 28–29 March 2018; PP. 1–5.

Qi, J., & D. Wu. 2018. Green energy management of the energy Internet based on service composition quality. *IEEE Access* 6: 15723-15732.

Qiu, C., S. Cui, H. Yao, F. Xu, F. R. Yu, & C. Zhao. 2019. A novel QoS-enabled load scheduling algorithm based on reinforcement learning in software-defined energy internet. *Future Generation Computer Systems* 92: 43-51.

Rifkin, J. 2011. *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power is transforming Energy, the Economy, and the World*. New York: Palgrave MacMillan.

Sage, A. P. 1977. *Interpretive structural modeling: Methodology for large-scale systems*. New York, NY: McGraw-Hil.

Sani, A. S., D. Yuan, J. Jin, L. Gao, S. Yu, & Z. Y. Dong. 2019. Cyber security framework for Internet of Things-based Energy Internet. *Future Generation Computer Systems* 93: 849-859.

Tamilselvan, K., & P. Thangaraj. 2020. Pods–A novel intelligent energy efficient and dynamic frequency scalings for multi-core embedded architectures in an IoT environment. *Microprocessors and Microsystems* 72: 102907.

Tan, Y. S., Y. T. Ng, J. S. C. & Low. 2017. Internet-of-things enabled real-time monitoring of energy efficiency on manufacturing shop floors. *Procedia CIRP* 61: 376-381.

Thakkar, J., S. G. Deshmukh, A. D. Gupta, & R. Shankar. 2007. Development of a balanced scorecard. An integrated approach of Interpretive Structural Modeling (ISM) and Analytic Network Process (ANP). *International Journal of Productivity and Performance Management* 56 (1): 25-59.

Town, G. E., K. Mahmud, S. Morsalin, & M. J. Hossain. 2018. Integration of electric vehicles and management in the internet of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82: 4179-4203.

Tzeng, G.-H., & J.-Y. Teng. 1993. Transportation investment project selection with fuzzy multi-objectives. *Transportation Planning and Technology* 17 (2): 91–112.

Umer, T., M. H. Rehmani, A. E. Kamal, & L. Mihaylova. 2019. Information and resource management systems for Internet of Things: Energy management, communication protocols and future applications, *Future Generation Computer Systems*

Wang, Z. 2019. Entropy theory of distributed energy for Internet of Things. *Nano Energy* 19: 1-11.

Yan, Z. & Hu, J. 2018. Energy Internet in the Yangtze River Delta: Opportunities, challenges and suggestions. *Frontiers in Energy* 12 (4): PP. 484-492.

Yang, X., Zhou, P., Zhang, X., Lin, J. and Yu, W., (2017). Toward a Gaussian-mixture model-based detection scheme against data integrity attacks in the smart grid. IEEE Internet of Things Journal 4(1), PP. 147-161.

Yin, Shih-Hsi, Ching-Cheng Wang, Liang-Yuan Teng, and Yulam Magnolla Hsing. 2012. Application of DEMATEL, ISM, and ANP for key success factor (KSF) complexity analysis in R&D alliance. *Scientific Research and Essays* 7 (19): 1872-1890.

Zakeri, B., S. Syri, & S. Rinne. 2015. Higher renewable energy integration into the existing energy system of Finland–Is there any maximum limit? *Energy* 92: 244-259.

Zhou D. Q., Z. L. Ling, H. W. Li. 2006. A Study of the System's Hierarchical Structure through Integration of DEMATEL and ISM. *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Dalian, China.

Zhou, X., F. Wang, & Y. Ma. 2015. An overview on energy internet. *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)* (pp. 126-131). IEEE. Beijing, China.

میرحمید تقوی

متولد سال ۱۳۶۴، دانشجوی دکتری در رشتهٔ سیاست‌گذاری علم و فناوری از دانشگاه علم و صنعت ایران است.

مدیریت فناوری و نوآوری، آینده‌پژوهی و بازی‌پردازی از جمله علایق پژوهشی ایشان است.

پیمان اخوان

متولد سال ۱۳۵۲، دارای مدرک تحصیلی دکتری در رشتهٔ مهندسی صنایع از دانشگاه علم و صنعت ایران است. ایشان هم‌اکنون استاد دانشگاه صنعتی مالک اشتر و رئیس انجمن علمی مدیریت دانش ایران است.

مدیریت دانش، کارآفرینی و فناوری‌های نوین از جمله بلاکچین و کریپتوکارنسی از علایق پژوهشی ایشان است.

روح‌اله احمدی

متولد سال ۱۳۵۹، دارای مدرک تحصیلی دکتری در رشتهٔ مهندسی مکانیک از دانشگاه اوساکا ژاپن است. ایشان هم‌اکنون دانشیار دانشکدهٔ فناوری‌های نوین دانشگاه علم و صنعت ایران است.

بهینه‌سازی (اگزرژی - اقتصادی - محیط زیستی) سیستم‌های انرژی، ذخیره‌سازی انرژی و سبد انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله علایق پژوهشی ایشان است.

علی بنیادی نائینی

متولد سال ۱۳۵۷، دارای مدرک تحصیلی دکتری در رشته مدیریت بازرگانی، از دانشگاه شهید بهشتی است. ایشان هم‌اکنون استادیار گروه مدیریت و مهندسی کسب‌وکار دانشگاه علم و صنعت ایران است.

علم‌سنجی و آینده‌پژوهی، مدیریت نوآوری و بازاریابی عصبی از جمله علایق پژوهشی ایشان است.