# شهر هوشمند به‌مثابه یک هاب انرژی هوشمند: مروری کتاب‌شناختی، تحلیلی و ساختاری

**نوع مطالعه: پژوهشی**

مهدی نوذریان[1]، علیرضا فریدونیان[2]

[1] دانشجوی دکتری، محور شبکه‌های هوشمند انرژی، کریتک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، m.nozarian@email.kntu.ac.ir

[2] استادیار، محور شبکه‌های هوشمند انرژی، کریتک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، fereidunian@eetd.kntu.ac.ir

**چکیده: یکی از اصلی‌ترین چالش‌های بشر در قرن حاضر تامین انرژی می‌باشد. رشد جمعیت، افزایش تقاضای انرژی، کمبود سوخت‌های فسیلی و نگرانی‌های زیست محیطی، امنیت انرژی را به یک موضوع مهم برای همه کشورهای جهان تبدیل نموده است. شبکه‌های برق سنتی شامل تولید در حجم بالا با راندمان پایین، انتقال در مسیرهای طولانی با تلفات بالا و سپس تغذیه مصرف‌کنندگان از طریق یک سیستم پیچیده توزیع، خود با چالش‌های گوناگونی مواجه می‌باشد که صلاحیت این روش از تولید و تبادل انرژی را به‌عنوان سیستم امن انرژی آینده دچار تردید می‌نماید. امروزه هاب انرژی به‌عنوان چهارچوبی که در آن تولید، تبدیل، ذخیره و مصرف حامل‌های مختلف انرژی انجام می‌شود، به‌عنوان چشم‌انداز سیستم انرژی امن آینده مورد توجه بسیاری از محققان واقع شده است. این پژوهش به تحلیل و طبقه‌بندی آخرین دستاوردهای بدیع پژوهشی این حوزه پرداخته است. مرور پژوهش‌ها در حوزه برنامه‌ریزی بلندمدت هاب انرژی، بهینه‌سازی بهره‌برداری از این زیرساخت بدیع پیونددهنده حامل‌های انرژی و مفاهیم هاب انرژی خرد و کلان در این مقاله ارائه شده است. پیش‌از آن و با بررسی سیر پژوهش‌های حوزه هاب انرژی به بررسی کتاب‌شناختی این حوزه نیز پرداخته می‌شود. همچنین از اهداف اصلی این پژوهش تبیین مفهوم شهر هوشمند متشکل از هاب‌های انرژی هوشمند با استفاده از مرور تحقیقات اخیر پژوهشگران این حوزه می‌باشد.**

**واژه های کلیدی: هاب انرژی، شهر هوشمند، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری، هاب انرژی خرد و کلان**

**تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۱۱/۱۶**

**تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۹/۰۵/۲۸**

نام نویسنده‌ی مسئول : علیرضا فریدونیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول : تهران - خیابان شریعتی-ضلع جنوب شرقی پل سید خندان - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- دانشکده مهندسی برق- کدپستی۱۶۳۱۷۱۴۱۹۱

## ۱- مقدمه

انرژی یکی از اصلی‌ترین چالش‌های بشر در قرن حاضر می‌باشد. با رشد جمعیت، افزایش تقاضای جهانی انرژی، کمبود سوخت‌های فسیلی و نگرانی‌های زیست محیطی، امنیت انرژی به یک موضوع مهم برای همه کشورهای جهان تبدیل شده است. امنیت انرژی به‌معنای عادلانه فراهم‌نمودن خدمات انرژی می‌باشد. این خدمات عادلانه که از شاخصه‌های دسترسی آسان، مقرون به‌صرفه‌بودن، قابلیت‌اطمینان، کارآمدی، سازگاری با محیط‌زیست، برنامه‌ریزی شده با مدیریت اقتصادی و مقبولیت اجتماعی برخوردار می‌باشد، به‌طور غیرقابل توصیفی با برداشت‌های سنتی از امنیت ملی و مفاهیم نوظهور حقوق بشر و امنیت فردی پیوند خورده است. بنابراین دستیابی به سیستم‌های انرژی پایدار و امن در آینده به یکی از اصلی‌ترین چالش‌های کشورهای جهان تبدیل شده است[۱].

امروزه شبکه‌های برق سنتی در کشورها که شامل تولید در حجم بالا با راندمان پایین، انتقال در مسیرهای طولانی با تلفات بالا و سپس تغذیه مصرف‌کنندگان از طریق یک سیستم توزیع پیچیده می‌باشد، خود با چالش‌های گوناگونی از جمله تولید روزافزون آلاینده‌های زیست‌محیطی، کاهش منابع تامین سوخت فسیلی، هزینه‌های سرسام‌آور ایجاد واحدهای تولیدی، هزینه‌ها و تلفات شبکه انتقال و توزیع مواجه می‌باشد. بروز این چالش‌ها صلاحیت این روش از تولید و تبادل انرژی را به عنوان نامزد سیستم‌های امن انرژی آینده دچار تردید می‌نماید. از این‌رو، امروزه استقبال از منابع تولید تجدیدپذیر در سطح شبکه توزیع به‌صورت چشمگیری رو به افزایش است. ارزان‌بودن تولید انرژی به‌کمک این منابع، تاثیرات مثبت آن بر مسئله آلودگی هوا و حل مشکلاتی از قبیل نیاز به انتقال توان به مسیرهایی دور با تلفات بالا و همچنین پشتیبانی دولت‌ها، سرمایه‌گذاران را به استفاده هر چه بیشتر از منابع انرژی تجدیدپذیر در کنار استفاده بهینه از شبکه‌های موجود سوق می‌دهد. در مقابل، ماهیت تصادفی تولید این واحدها، باعث بروز تردید در استفاده از این منابع می‌شود[۳،۲]. از این‌رو، واحدهای تولید و ذخیره انرژی قابل‌کنترل مانند ذخیره‌سازها و واحدهای تولید همزمان برق و حرارت جهت پشتیبانی تولید منابع تجدیدپذیر به‌منظور اطمینان از تأمین انرژی امن و پایا و افزایش افزونگی در تامین تقاضای مصرف‌کنندگان استفاده می‌شود. از طرف دیگر، مدیریت تولید و برنامه‌ریزی توسعه هریک از سیستم‌های انرژی نام‌برده به‌طور جداگانه باوجود ادغام و تعامل اجتناب‌ناپذیر بین آن‌ها، قابل توجیه نمی‌باشد. به‌منظور بهره‌برداری و برنامه‌ریزی بهینه این سیستم متشکل از شبکه‌های موجود و واحدهای تولید پراکنده، نیاز به یک چهارچوب مدیریت یکپارچه وجود دارد که بتواند اجزای مختلف سیستم را به‌صورت بهینه مدیریت کند. مفهوم هاب انرژی گزینه‌ای امیدوارکننده برای مدیریت بهینه سیستم چندحاملی انرژی و دستیابی به یک الگوی جامع از برنامه‌ریزی انرژی پایدار، امن و اقتصادی می‌باشد[۴].

این پژوهش به تحلیل و طبقه‌بندی آخرین دستاوردهای پژوهشی این حوزه که با هدف ارائه مدل‌های نوآورانه جهت حل بهینه مسئله مربوط به هاب انرژی ارائه شده است، پرداخته است. مرور پژوهش‌ها در حوزه برنامه‌ریزی بلندمدت هاب انرژی، بهینه‌سازی بهره‌برداری از این زیرساخت بدیع پیونددهنده حامل‌های انرژی و مفاهیم هاب انرژی خرد و کلان در این مقاله ارائه شده است. پیش‌از آن و با بررسی سیر پژوهشی حوزه هاب انرژی در چند سال اخیر به بررسی کتاب‌شناختی این حوزه نیز پرداخته می‌شود. همچنین از اهداف اصلی این پژوهش که روند سلسله مراتبی پژوهش‌های حوزه هاب انرژی بدین منظور طی شد، تبیین مفهوم شهر هوشمند از دیدگاه انرژی و متشکل از هاب‌های انرژی هوشمند با استفاده از مرور تحقیقات اخیر پژوهشگران این حوزه می‌باشد.

بخش‌های مختلف این مقاله بدین شرح می‌باشد؛ پس از این مقدمه و در بخش (۲) به تبیین مفهوم هاب انرژی پرداخته می‌شود. بخش (۳) به تحلیل وقایع تاریخی شکل‌گیری هاب انرژی و مرور کتاب‌شناختی این حوزه می‌پردازد. مرور پژوهش‌ها از دیدگاه برنامه‌ریزی ساخت و بهره‌برداری هاب انرژی، در بخش (۴) مورد توجه قرار می‌گیرد. در دسته‌بندی دیگر و در بخش (۵) پژوهش‌هایی که با هدف ارائه مدل‌سازی مکان‌ها و محدوده‌های جغرافیایی مختلف در قالب هاب انرژی، با معرفی مفاهیم هاب‌های انرژی خرد و کلان ارائه شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از آن در بخش (۶) به مفهوم هاب انرژی هوشمند و شهر هوشمند پرداخته می‌شود. در پایان و در بخش (۷) نتایج حاصل از این پژوهش در چند جمله به‌صورت خلاصه بیان می‌گردد.

## ۲- مفهوم هاب انرژی

در سال‌های اخیر، سیستم‌های تولید همزمان برق حرارت و برودت در سیستم توزیع به‌طور گسترده‌ای به‌منظور تامین تقاضای مصرف‌کنندگان دارای مصرف چندگانه مورد استفاده قرار گرفته است. از سوی دیگر در سیستم انرژی مدرن، منابع تولید پراکنده نقش مهمی در ساختار انرژی بازی می‌کنند. استفاده از مزایای این منابع و مفاهیمی مانند شبکه هوشمند، ذخیره‌سازها و برنامه‌های مدیریت مصرف نیازمند چهارچوب مدل‌سازی و مدیریت یکپارچه می‌باشد.

هاب انرژی یک مفهوم کارآمد و جامع است که برای مدیریت سیستم‌های چندحاملی انرژی معرفی شده است. هاب انرژی به‌عنوان چهارچوبی که در آن تولید، تبدیل، ذخیره و مصرف انواع مختلف انرژی انجام می‌شود، امروزه مورد توجه بسیاری از محققان صنعت برق واقع شده است. هاب انرژی پتانسیل بالایی در مدل‌سازی و مدیریت سیستم‌های شامل حامل‌های انرژی چندگانه یا سیستم‌های انرژی یکپارچه دارد. امروزه تحقیقات گسترده‌ای در مفهوم هاب انرژی ثابت می‌کند که وجود حامل‌های مختلف انرژی در چهارچوب هاب می‌تواند به عملکرد بهتر نسبت به سیستم‌هایی که به‌طور مستقل برنامه‌ریزی

شده و کنترل می‌شوند، منجر شود. هاب انرژی محدودیتی در اندازه و وسعت مکان به‌منظور مدل‌سازی ندارد و شمول طیف وسیعی از جمله خانه‌های شخصی، مجتمع‌های مسکونی بزرگ، ساختمان‌های تجاری، مراکز خرید، بیمارستان‌ها، واحدهای صنعتی، گلخانه‌ها، سیستم‌های انرژی روستایی و حتی کل سیستم انرژی شهری و یا یک کشور دارد[۵].

عموما ساختاری که برای ارتباط ورودی وخروجی هاب انرژی درنظر می‌گیرند، طبق شکل (۱) می‌باشد. در شکل (۱) ، $L$ بردار بارهای مورد تامین هاب می‌باشد و $I$ با عنوان بردار حامل‌های انرژی ورودی به هاب معرفی می‌گردد. این دو گروه (بار و حامل‌های انرژی ورودی) توسط ماتریس $C$ به یکدیگر مرتبط می‌شوند. به‌عنوان مثال هاب انرژی می‌تواند شامل ترانسفورماتور، بویلر، واحد تولید همزمان برق و حرارت و ذخیره‌ساز حرارتی باشد که انرژی الکتریکی و گاز طبیعی را به‌عنوان ورودی دریافت نموده و مصارف انرژی الکتریکی و حرارتی را تأمین می‌نماید[۲، ۵].

به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی سیستم‌های مبتنی بر هاب انرژی می‌توان به این نکته اشاره کرد که؛ اجزای درون هاب قادرند اتصالات اضافی بین ورودی و خروجی برقرار نمایند. به‌عنوان مثال، بار الکتریکی متصل به هاب را می‌توان به‌طور کامل و مستقیم از برق وارد شده به هاب از شبکه سراسری تامین کرد یا می‌توان تمام یا بخشی از این بار الکتریکی را از طریق واحدهای تولید همزمان و به‌عبارتی از گاز طبیعی و یا حتی از منابع تجدیدپذیر محلی و ذخیره‌ساز متصل به آن تامین نمود. این افزونگی در تأمین انرژی منجر به دو مزیت مهم می‌شود که تنها بر مبنای هاب انرژی قابل دستیابی است. اول اینکه می‌توان در این بستر قابلیت اطمینان تأمین از دید بار را افزایش داد زیرا تامین تقاضا دیگر به‌طور کامل به یک شبکه واحد وابسته نیست. از طرف دیگر، قابلیت اطمینان زیرساخت‌های منفرد می‌تواند کاهش یابد (به‌عنوان مثال با کاهش تعمیر و نگهداری) در حالی که دسترس‌پذیری برای بار در سطح بالایی باقی می‌ماند. دوم، درجه آزادی موجود در تامین تقاضا در بستر هاب انرژی امکان بهینه‌سازی تامین هاب را فراهم می‌کند. بر این مبنا می‌توان حامل‌های انرژی ارائه شده در ورودی هاب را با توجه به هزینه، انتشار گازهای گلخانه‌ای، در دسترس‌بودن و سایر معیارها اولویت‌بندی نموده و پس از ارزیابی این کمیت‌ها ورودی‌ها می‌توانند به‌صورت بهینه توزیع گردند. از طرف دیگر، استفاده از مفهوم ذخیره انرژی درهاب، فرصتی برای افزایش بیش‌ازپیش عملکرد کلی سیستم است. اگر چه مشهودترین کاربرد فناوری ذخیره‌سازی انرژی می‌تواند در حضور منابع انرژی دارای تولید نامعین (به عنوان مثال واحدهای بادی و خورشیدی) در جهت پشتیبانی از انرژی دارای عدم قطعیت این واحدها باشد، با این‌حال، تحقیقات نشان داده است که می‌توان از ذخیره‌سازی به گونه‌ای استفاده کرد که به‌طور کلی بر تمام معیارهای عملکردی سیستم، به‌خصوص هنگام بررسی یک فضای آزاد بازاری[1]تأثیر بگذارد[۷،۶].

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{m1} & C_{m2} & \cdots & C_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_m \end{bmatrix}$$

**شکل (۱): مدل عمومی هاب انرژی [۲].**

## ۳- هاب انرژی از تولد تا تکامل؛ کاوشی در تاریخ، تحلیل کتاب‌شناختی

به اذعان بسیاری از محققان، هاب انرژی برای اولین بار در سال ۲۰۰۶ توسط یک تیم تحقیقاتی در آزمایشگاه سیستم‌های قدرت و فشار قوی دانشگاه ETH زوریخ در چهارچوب پروژه‌ای تحت عنوان "چشم انداز شبکه‌های انرژی آینده[2]" معرفی شده است. این پروژه با هدف ایجاد تصویری از سیستم‌های انرژی آینده، در افق بلند مدت (۳۰-۲۰ سال آینده) شکل گرفته است. موارد اصلی این پروژه را می‌توان به‌شرح زیر خلاصه نمود:

- حرکت به‌سوی سیستم‌های چند حاملی انرژی برای بهره‌مندی از مزایای هم‌افزایی و تعامل حامل‌های مختلف انرژی
- حرکت به‌سمت ساختارهای غیرسلسله مراتبی
- حرکت به‌سمت سیستم‌های انرژی یکپارچه و به‌هم‌پیوسته

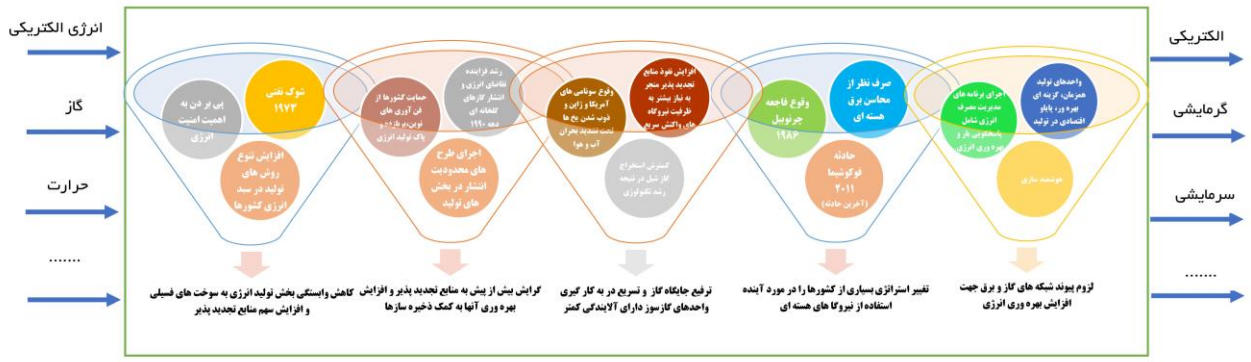
در این پروژه دو مفهوم اصلی برای دستیابی به موارد اشاره شده فوق، ارائه شده است.

- اتصال دهنده‌های انرژی: انتقال ترکیبی حامل‌های مختلف انرژی در مسافت‌های طولانی به‌وسیله یک ابزار انتقال واحد
- هاب انرژی: تبدیل و ذخیره حامل‌های مختلف انرژی در یک واحد یکپارچه [۶،۲].

برخی محققان تولد هاب انرژی را یکسال زودتر می‌دانند. آنان معتقدند ایده ادغام حامل‌های مختلف انرژی و همچنین تجهیزات و مبدل‌های رابط آن‌ها با یکدیگر در برنامه‌های بهره‌برداری و برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های انرژی، برای اولین بار در [۸] نمایان شد. ایده این پژوهش در واقع از تلاش‌هایی که برای توصیف سیستم انرژی آینده با نفوذ چشمگیر منابع تولید پراکنده و پیشرفت‌هایی که درنتیجه این نفوذ در سیستم قدرت شکل گرفته است، پرده برمی‌داشت. محققان معتقدند بعد از این پژوهش‌ها بود که به منظور دستیابی به اهداف مختلف، به تدریج مفهوم هاب انرژی در مطالعات بیشتر مورد بررسی قرار گرفت. در نگاهی جامع‌تر شکل (۲) سلسله فرآیندهایی که منجر

[1] Liberalized market environment

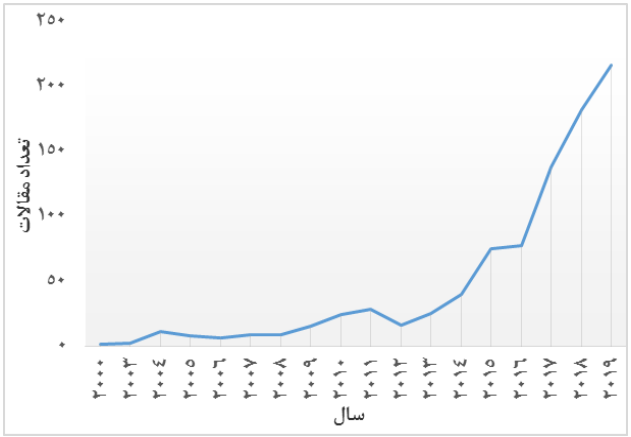
[2] VOFEN: Vision of future energy networks




**شکل (۲): چرا هاب انرژی؟**

به گرایش صنعت برق به لزوم همبستگی بیشتر سیستم‌های گاز و برق و استفاده از مفاهیم هاب انرژی شد را نشان می‌دهد. براین اساس، ایجاد بحران نفتی و لزوم ایجاد تنوع در سبد تولید انرژی در کشورها، تعویض واحدهای ذغال‌سنگ‌سوز با واحدهای گازسوز تحت محدودیت-های سختگیرانه زیست‌محیطی، لزوم افزایش ظرفیت واحدهای واکنش سریع در پاسخ به رشد سریع واحدهای تجدیدپذیر جهت پشتیبانی از تولید آن، حرکت ضدهسته‌ای برخی کشورهای توسعه یافته و نیاز روزافزون به مفاهیم بهره‌وری انرژی، همه می‌توانند به‌عنوان عوامل برجسته‌ترشدن نقش گاز در صنعت برق و هماهنگی بیش‌ازپیش رویکرهای بهره‌برداری و توسعه همزمان شبکه‌های برق و گاز بر مبنای هاب انرژی به‌شمار آیند[۹].

اگر چه همانطور که اشاره شد تولد هاب انرژی بعد از سال ۲۰۰۵ عنوان شده است، با این حال در سال پیش از آن نیز تعدادی از محققان از سیستم‌های چندحاملی انرژی نام برده بودند. طبق آنچه در شکل (۳) نشان داده شده است، همزمان با تولد هاب انرژی پژوهش‌های مرتبط با هاب انرژی و سیستم‌های چندحاملی انرژی به‌طور رسمی در گستره پژوهش‌های صنعت برق خودنمایی کردند.




**شکل (۳):روند تحقیقاتی هاب انرژی براساس اطلاعات پایگاه علمی Scopus**

پس از یک ثبات نسبی در تعداد پژوهش‌های سالانه مرتبط با این حوزه، سال ۲۰۱۴ را می‌توان نقطه عطفی در پیشبرد اهداف بدیع تحقیقاتی در حوزه هاب انرژی دانست. به‌عبارت دیگر پس از آن رشد فزآینده پژوهش‌های تحقیقاتی در این حوزه دنبال شد تا جایی که در سال ۲۰۱۹ تعداد پژوهش‌های معتبر در این حوزه به بیش از ۲۰۰ پژوهش در سال رسیده و در سال ۲۰۲۰ در همین ابتدای سال بیش از ۲۵ پژوهش بدیع در حوزه هاب انرژی به ثبت رسیده است. بر این اساس امروزه مسئله برنامه‌ریزی سیستم‌های چندحاملی انرژی یا هاب انرژی از طرفداران خاص خود برخوردار بوده و طی این سال‌ها به یکی از پربحث‌ترین موضوعات پژوهشی تبدیل شده است.

همزمان با تکامل مفاهیم مرتبط با هاب انرژی در قالب مقالات تحقیقاتی، نویسندگان مختلفی نیز بر طرح این موضوع در کتب تالیفی خود پرداخته‌اند. از تولد هاب انرژی تاکنون گرچه نویسندگانی که صرفا موضوع هاب انرژی را در کتاب‌های پژوهشی خود دنبال کرده‌باشد انگشت شمارند، با این حال پژوهشگران متعددی از دیدگاه‌های متفاوتی در فصل‌های کتب خود به بررسی ریزبینانه مسائل مرتبط با هاب انرژی همت گماشته‌اند. در این بین می‌توان به [۱۰-۱۷] اشاره نمود. در[۱۰] دکتر کاوه خلیل‌پور به‌عنوان دانشیار دانشگاه صنعتی سیدنی به بررسی هاب انرژی در کتابی با رویکرد بررسی هاب با رویکرد انرژی و شیمیایی[۱]پرداخته است. فصل ۱۵، از جمله فصل‌های این کتاب است که به‌طور خاص بر ارائه چهارچوب برنامه‌ریزی و بهره‌برداری هاب انرژی متمرکز شده است. این نویسنده ادعا دارد چهارچوب منحصربه‌فرد پیشنهادی او در این فصل[۲]یک ابزار موثر جهت پشتیبانی و تصمیم-گیری مبتنی بر روش‌های بهینه‌سازی است که از توسعه‌دهندگان هاب انرژی در جهت غربالگری، انتخاب نوع، اندازه‌یابی و برنامه‌ریزی سیستم-های تولید پراکنده بر اساس اهداف مختلف (کمینه‌سازی هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، کمینه‌سازی هزینه تولید انرژی، بیشینه‌سازی قابلیت‌اطمینان) در بستر هاب انرژی پشتیبانی می‌کند. این چهارچوب قادر است که هم با لحاظ محدودیت‌های شبکه و هم با نادیده‌گرفتن شبکه مورد استفاده واقع شود. مرجع [۱۱] نیز که در عنوان با هدف مدل‌سازی، بهینه‌سازی و بهره‌برداری از سیستم‌های تولید همزمان برق، حرارت و برودت ارائه شده است، در فصل ۴ عنوان کرده است که این سیستم‌ها همچنین قابلیت مدل‌سازی تحت عنوان هاب انرژی با بهره-

[۱] Polygeneration with polystorage for chemical and energy hubs
[۲] A DS4S (Screening, Selection, Sizing, and Scheduling) Framework

گیری از حامل‌های مختلف انرژی در پایانه‌های ورودی و خروجی خود را دارا می‌باشند. این مرجع همچنین ضمن اشاره به این مهم که هاب انرژی رابط بین زیرساخت‌های مختلف انرژی و بارهای متنوع است، در این فصل رویکرد مدل‌سازی ماتریسی را برای سیستم‌های تولید همزمان شرح می‌دهد. این روش شامل مدل‌سازی ماتریس کارایی اجزاء، تعاریف فاکتورهای توزیع حامل‌های انرژی و مدل‌سازی ماتریس تبدیل سیستم می‌باشد. همچنین از دیگر کتاب‌های برجسته این حوزه می‌توان به [۱۲] اشاره نمود. در این کتاب که باعنوان "از شبکه‌های هوشمند تا شهرهای هوشمند: چالش‌های جدید در بهینه‌سازی شبکه‌های انرژی" ارائه شده است، به‌طور خاص بر موضوع هوشمندسازی شبکه‌های انرژی متمرکز شده است. در فصل‌های ۴ ، ۵ و۷ این کتاب به‌طور خاص بر موضوع بدیع هاب انرژی پرداخته شده است. در فصل ۴ که با تمرکز بر "هاب انرژی و ریزشبکه‌های انرژی شهری: برنامه‌ریزی هوشمند انرژی برای شهرها" ارائه شده است، سیستم انرژی شهری را به‌عنوان شبکه‌ای از هاب‌های انرژی درنظرگرفته و با یک مرور کلی به نقد و بررسی نرم‌افزارهای بهینه‌سازی مرسوم در تجزیه و تحلیل و برنامه‌ریزی ریزشبکه شهری پرداخته است. در فصل ۷ که بر موضوع "پخش بار بهینه در سیستم‌های چند حاملی انرژی" متمرکز شده است، یک روش بهینه‌سازی اصلاح‌شده جدید برای حل مسائل پخش‌بار بهینه در سیستم‌های چندحاملی انرژی با تمرکز بر تعامل شبکه‌های گاز و برق ارائه شده است. در فصل ۵ این کتاب نیز "بهینه‌سازی سیستم‌های چند حاملی انرژی در مناطق شهری" در دستور کار قرار گرفته است. بر این مبنا این فصل با تاکید بر این موضوع تدوین شده است که بهینه‌ترین روش جهت دستیابی به یکپارچه‌سازی و هماهنگی زیرساخت‌های انرژی در یک شهر هوشمند، توسعه سیستم‌های چند حاملی انرژی می‌باشد که در آن منابع انرژی مختلف با استفاده از یک رویکرد جامع بهینه می‌شوند. این فصل بر ارائه مدلی از بهینه‌سازی بهره‌برداری و مدلی دیگر از مدیریت برنامه‌ریزی سیستم‌های چند حاملی انرژی متمرکز شده است. دکتر سرودی که استادیار گروه سیستم‌های قدرت کالج دانشگاهی ایرلند می‌باشد را می‌توان از برجسته‌ترین افراد در این شاخه پژوهشی نامید. ایشان علاوه‌بر تدوین فصلی از کتاب "تولید انرژی تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ[۱۳]" با عنوان "مدیریت هاب انرژی با حضور تولید غیرقابل اتکای واحدهای بادی" که به مطالعه یک مدل جامع چندهدفه به منظور کمینه‌سازی هزینه تامین انرژی و سطح ریسک ناشی از عدم‌قطعیت واحدهای تجدیدپذیر در هاب انرژی پرداخته است، در تالیف تعدادی دیگر از کتب پژوهشی در این حوزه نیز مشارکت داشته است. از جمله اینکه در فصلی از مرجع [۱۴] باعنوان "بررسی مدیریت هاب انرژی مبتنی بر ریسک با لحاظ وسایل نقلیه الکتریکی با استفاده ازتئوری تصمیم‌گیری مبتنی شکاف اطلاعاتی" یک مدل جامع مبتنی بر ریسک برای مدیریت هاب انرژی ارائه داده است. تمرکز این مدل نیز مانند مرجع قبل بر کمینه‌سازی هزینه‌های تأمین انرژی و ریسک‌های مالی در هاب انرژی است. دراین فصل عنوان شده است که به‌منظور کنترل اثرات نامطلوب ناشی از عدم‌قطعیت، از روش تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعات به‌عنوان ابزاری برای مدیریت ریسک استفاده می‌شود. همچنین ایشان در فصل آخر از یکی از مشهورترین آثارشان تحت عنوان"بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت در نرم افزار گمز[۱۵]" به‌طور خاص بر موضوع هاب انرژی متمرکز شده است. این فصل مدلی به‌منظور برنامه‌ریزی سیستم‌های یکپارچه انرژی در بستر نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز ارائه می‌دهد. در این فصل، هماهنگی بین سیستم‌های آب‌شیرین‌کن و سیستم برق، شبکه برق و شبکه گاز و در پایان مفهوم هاب انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. دکتر محمدی ایواتلو که از اعضای هیأت علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه تبریز می‌باشند نیز از دیگر پژوهشگران ایرانی می‌باشد که پژوهش‌های گسترده و بدیعی در موضوع هاب انرژی تدوین نموده‌اند. ایشان در کتابی با عنوان "بهره‌برداری، برنامه‌ریزی و تجزیه و تحلیل سیستم‌های ذخیره انرژی در هاب‌های انرژی هوشمند [۱۶]" به‌طور خاص در مورد طراحی و برنامه‌ریزی هاب‌های انرژی مسکونی، صنعتی و تجاری و ادغام آن با فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی و منابع انرژی تجدیدپذیر بحث می‌کند. در هر فصل مثال‌های نظری و مدل‌های کاربردی از سیستم‌های قدرت خاص شامل منابع انرژی خورشیدی، بادی، زمین گرمایی و غیره ارائه می‌شود. همچنین مطالعاتی شامل تحلیل جدیدترین روش‌ها در زمینه حل مسائل مربوط به ادغام انرژی الکتریکی و دیگر حامل های انرژی با توجه ویژه به جنبه‌های زیست محیطی و اقتصادی و سیستم‌های ذخیره انرژی، در اختیار مهندسین، محققان و دانشجویان قرار می‌گیرد. این کتاب را می‌توان از جمله کتاب هایی دانست که به‌صورت کاملا تخصصی، تنها به مسائل مربوط به هاب انرژی پرداخته است. در ادامه بررسی کتاب شناختی حوزه هاب انرژی ذکر این نکته حائز اهمیت می‌باشد که کتاب‌های دیگری نیز وجود دارند که هرچند به‌صورت مختصر اما مفید، فصل‌هایی از کتب خود را به این موضوع مهم تخصیص داده‌اند. از این جمله می‌توان به کتاب "رویکردهای کلاسیک و بدیع بهینه‌سازی سیستم قدرت [۱۷]" اشاره نمود که در فصل ۱۴ باعنوان "تأثیر بهینه‌سازی یکپارچه حامل‌های انرژی مستقل بر عملکرد سیستم‌های قدرت" به معرفی محیط سیستم‌های چند حاملی انرژی در بین روش‌های مختلف بهینه‌سازی سیستم قدرت پرداخته است. یک مسئله بهینه‌سازی نمونه از این مطالعات نیز در این فصل تدوین و شبیه‌سازی شده است. در بررسی کتاب شناختی حوزه هاب انرژی به ذکر مراجع فوق بسنده شده و در بخش‌های آینده به تحلیل و بررسی آخرین مقالات پژوهشی این حوزه پرداخته می‌شود.

## ۴- هاب انرژی، از برنامه‌ریزی توسعه تا بهره‌برداری

بسته به سطح امنیت و کفایت مطلوب سیستم جهت تامین پایا و اقتصادی مصرف‌کنندگان و همچنین افق برنامه‌ریزی، کلیه مطالعات برنامه‌ریزی سیستم قدرت را می‌توان به دو دسته اصلی مطالعات برنامه-

ریزی ساخت و توسعه و مطالعات برنامه‌ریزی بهره‌برداری تقسیم نمود. براین‌مبنا، پژوهش‌های مبتنی بر هاب انرژی نیز با توجه به شاخصه‌های فرآیند برنامه‌ریزی، که از بین آن‌ها طول افق برنامه‌ریزی برجسته است، می‌تواند در دوسته فوق گنجانده شود[۹]. لذا در این بخش به بررسی آخرین دستاوردهای حوزه هاب انرژی در دو دیدگاه کلی برنامه‌ریزی ساخت و توسعه (بلند مدت) و برنامه‌ریزی بهره‌برداری (کوتاه مدت) پرداخته می‌شود.

## ۴-۱- برنامه‌ریزی توسعه هاب انرژی (بلندمدت)

در سال‌های اخیر، تحقیق و پژوهش در حوزه برنامه‌ریزی ساخت و توسعه سیستم‌های چند حاملی انرژی بیش از گذشته مورد توجه واقع شده است. این مسئله عموما با هدف تعیین گزینه‌های سرمایه‌گذاری منابع تولید پراکنده مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر (اندازه، مکان و نوع آن-ها برای نصب) و مجموعه زیرساخت‌های جدیدی است که باید به سیستم قدرت موجود اضافه شود تا بتواند تقاضای انرژی را در افق برنامه‌ریزی تامین نماید. این پژوهش‌ها با اهداف مختلف، با روش‌های حل گوناگون و در قالب مدل‌سازی‌های متفاوتی ارائه شده‌اند. در میان روش‌های حل، محققان در سالیان اخیر بیش‌ازپیش تمایل به ارائه مدل‌های خطی [۱۸، ۱۹،۲۱] برای حل مسئله دارند. در عین حال هنوز پژوهش‌هایی وجود دارند که از روش‌های هوش مصنوعی و مبتنی‌بر جمعیت [۲۰] به‌منظور رسیدن به پاسخی بهینه در مدل مطالعاتی غیرخطی خود استفاده می‌نماید. علاوه‌براین، اهداف مختلفی از حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های مبتنی بر هاب انرژی دنبال می‌شود؛ از این جمله می‌توان به کاهش هزینه‌های مرتبط با سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، کاهش تولید آلاینده‌ها، افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه مربوط به تامین‌نشدن انرژی[۱۸،۲۰] اشاره نمود.

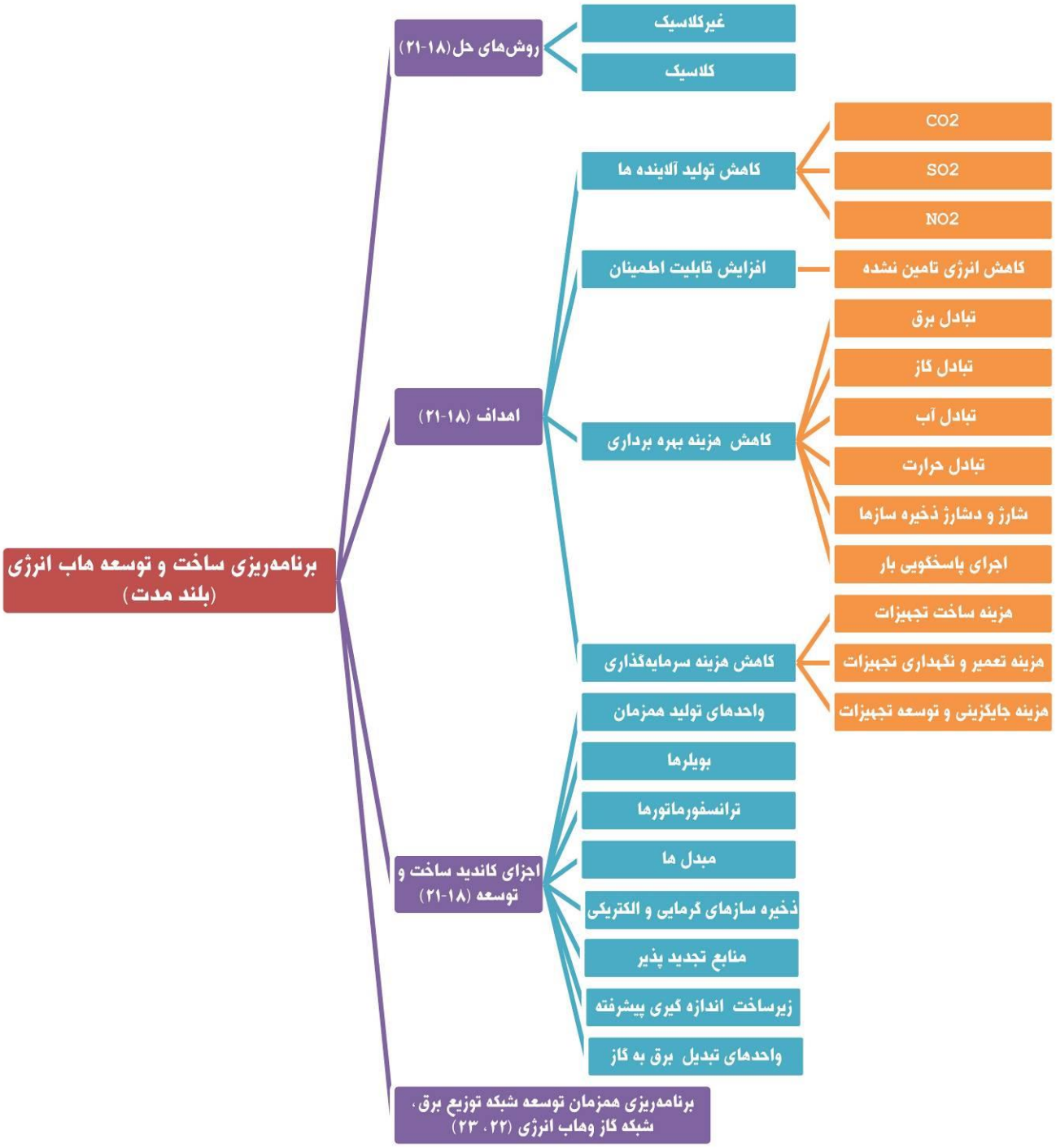
اجزای کاندید احداث نیز در پژوهش‌های مختلف بسته به شبکه مورد مطالعه می‌تواند از موارد مختلفی تشکیل شده باشد. این اجزا شامل تجهیزاتی مانند ترانسفورماتور، واحدهای تولید همزمان، دیگ بخار و ذخیره‌سازهای حرارتی [۱۸]، توربین‌های بادی، واحدهای تولید سنتی و دیزل ژنراتورها، توربین‌های گازی، ایستگاه های تبدیل انرژی الکتریکی به گاز [۲۰]، مبدل‌های الکتریکی[۲۱] و دیگر تجهیزات قابل استفاده در هاب می‌باشد. با مرور ادبیات انجام شده، مدل ارائه شده در مرجع [۱۸] را می‌توان یکی از جامع‌ترین مدل‌ها در مسئله برنامه‌ریزی ساخت و توسعه هاب انرژی دانست.

اکثر پژوهش‌های حوزه برنامه‌ریزی توسعه هاب انرژی از تدوین الگویی جامع به‌منظور برنامه‌ریزی توسعه سیستم چند حاملی انرژی که در آن شبکه توزیع فعال به‌عنوان بخشی از آن لحاظ شده باشد، خودداری نموده‌اند. با این‌حال [۲۲، ۲۳]، برای تدوین این نوع از دستورالعمل برنامه‌ریزی مدلی جدید از برنامه‌ریزی توسعه سیستم چند حاملی انرژی ارائه نموده‌اند. پژوهشگران در [۲۲]، برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های برق و گاز با لحاظ اینکه که منابع سمت تقاضا به سیستم-های چند حاملی انرژی متصل می‌شوند را ارائه داده‌اند. در این مدل فرض برآن است که بخشی از تقاضای مصرف‌کنندگان شامل برق، گاز و سرمایش از طریق هاب‌های انرژی قابل تحقق بوده و باقی‌مانده انرژی مورد نیاز نیز از طریق شبکه بالادست با جایگزینی حامل‌های مختلف انرژی تأمین می‌شود. پژوهشگران در [۲۳]، به ارائه مدلی جامع از برنامه‌ریزی توسعه سیستمی که متشکل از شبکه توزیع فعال، شبکه گاز و هاب انرژی می‌باشد، پرداخته‌اند. این مقاله به‌عنوان الگویی جامع از برنامه‌ریزی توسعه هاب انرژی، به‌تعیین بهینه نوع، محل و اندازه تجهیزات مختلف شامل فیدرها، منابع تولید پراکنده ، مدارشکن‌ها، جبران‌سازهای توان راکتیو، تنظیم‌کننده‌های ولتاژ، منابع ذخیره‌ساز انرژی، خطوط لوله گاز طبیعی، کمپرسورها و واحدهای ذخیره‌سازی گاز می‌پردازد. این پژوهش را می‌توان از جامع‌ترین پژوهش‌های ارائه شده در این باب در سال‌های اخیر دانست. شکل (۴) به مروری جامع از نوآوری‌ها و مدل‌های ارائه شده در پژوهش‌های این حوزه می‌پردازد.

## ۴-۲- برنامه‌ریزی بهره‌برداری از هاب انرژی (کوتاه‌مدت)

در مرور ادبیات پژوهشی حوزه بهره‌برداری هاب انرژی، محققان تحت شرایط بهره‌برداری مختلف، توابع هدف متفاوت و استفاده از روش‌های حل متعدد هاب انرژی را مورد بررسی قرار می‌دهند. پیوند مفاهیم تجدیدساختار، بازارهای انرژی الکتریکی و انواع روش‌های پاسخگویی بار با مفاهیم مبتنی بر هاب انرژی و در نتیجه دنبال‌کردن اهداف مختلف از حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری هاب انرژی، از جمله پرطرفدارترین موضوعات چندسال اخیر می‌باشد. محققان در [۲۴]، یک مدل بهینه توزیع اقتصادی بار از هاب انرژی مسکونی در بازار انرژی با درنظرگرفتن محصول دامنه انعطاف‌پذیر[۱] ارائه نموده‌اند. در این پژوهش فرض بر آن است که هاب انرژی نه تنها قادر به پیشنهاددهی در بازار انرژی جهت تامین تقاضا می‌باشد، بلکه قادر به ارائه این محصول به شبکه در جهت کسب سود نیز می‌باشد. مرجع [۲۵]، اقدام به معرفی یک مدل از سیستم هاب انرژی داری مصارف الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی درحضور برنامه‌های پاسخگویی بار الکتریکی و سرمایشی نموده است. همچنین [۲۶]، چهارچوبی تصادفی را به‌منظور نیل به اهداف خود در کاهش هزینه بهره‌برداری هاب انرژی، درحضور بازارهای انرژی

[۱] FRP: Flexible ramping product




**شکل (۴): مدل عمومی برنامه‌ریزی بلندمدت توسعه هاب انرژی**

الکتریکی و حرارتی و برنامه پاسخگویی بار الکتریکی و حرارتی معرفی می‌نماید. رویکرد مرجع [۲۷] بررسی تأثیر مقادیر مختلف پارامتری انحراف ریسک و برنامه پاسخگویی بار به‌عنوان راه حلی بهینه برای مواجهه با عدم قطعیت‌های برنامه‌ریزی هاب انرژی مبتنی بر پنل های خورشیدی می‌باشد. در [۲۸] برنامه‌ریزی بهینه هاب انرژی در بازار روز پیش با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها مدنظر قرار گرفته است. در این پژوهش اذعان شده است که در مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی به‌دلیل مهیاشدن شرایط استفاده حداکثری از پتانسیل تولید انرژی پاک با به‌کارگیری توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی و درنتیجه کاهش استفاده از واحدهای تولیدی گازسوز در افق برنامه‌ریزی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌طرز چشمگیری کاهش یافته است. در این مدل، واحدهای تولید همزمان برق، حرارت و برودت به‌عنوان واحدهای پشتیبان برای منابع تولید تجدیدپذیر دارای عدم‌قطعیت مورد استفاده قرار می‌گیرد تا از تأمین انرژی با حداقل قطعی اطمینان حاصل گردد. در [۲۹]، مسئله برنامه‌ریزی بهینه تولید در هاب انرژی به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی سه هدفه مدل شده است که در آن هزینه بهره‌برداری، انتشار آلاینده‌ها و انحراف مشخصات بار الکتریکی از مقدار مطلوب آن کمینه می‌گردد. در مدل پیشنهادی، سومین هدف با ارائه

یک استراتژی مدیریت تقاضا برای جابجایی بهینه بارهای قابل جابجایی بر اساس قیمت انرژی الکتریکی روزانه لحاظ شده است. پژوهشگران در [۳۰] نیز مدلی چندهدفه به‌منظور کاهش انتشار کربن و هزینه بهره‌برداری ارائه نموده‌اند. همچنین، در این مقاله از برنامه پاسخگویی بار زمان‌حقیقی به‌منظور بهبود انعطاف‌پذیری سیستم استفاده شده است. در [۳۱] به‌منظور بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی و کمینه‌سازی میزان انتشار کربن، یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه تدوین شده است. محققان در [۳۲] نیز در همین راستا، به ارائه یک مدل توزیع اقتصادی بار در یک هاب انرژی پرداخته‌اند که هدف آن کاهش هزینه کل هاب انرژی از جمله هزینه بهره‌برداری و هزینه انتشار کربن می‌باشد. علاوه‌براین، این مدل پیشنهادی، برنامه پاسخگویی بارهای الکتریکی و حرارتی را نیز شامل می‌گردد. نویسندگان مرجع [۳۳]، عملکرد استراتژیک هاب‌های انرژی در یک بازار برق رقابتی را مورد مطالعه قرارداده‌اند. هر هاب انرژی قصد دارد به‌طور مشترک هزینه بهره‌برداری و هزینه ناراحتی[1]ناشی از اصلاح پروفیل بار الکتریکی و حرارتی را کمینه نماید. دراین پژوهش استراتژی بهینه مورد استفاده هاب‌های انرژی شامل دو فرآیند قیمت‌گذاری زمان‌استفاده و قیمت‌گذاری پویا می‌باشد. در [۳۴] یک چهارچوب غیرمتمرکز برای حل مسئله توزیع اقتصادی بار در سیستم یکپارچه توزیع برق و گاز طبیعی[2] در هاب‌های انرژی به‌هم‌پیوسته ارائه شده است. اپراتور وظیفه توزیع اقتصادی بار در شرایط مقید به قیود شبکه را همزمان با حفظ حریم شخصی اطلاعاتی شرکت‌کنندگان و با هدف کاهش هزینه‌ها دارد. محققان در [۳۵] نیز کمینه‌سازی هزینه سوخت منابع تولیدی در هاب انرژی و هزینه تبادل انرژی با شبکه را در مدل بهره‌برداری هاب انرژی پیشنهادی دنبال می‌کنند. به‌دنبال بررسی مراجع از منظر اهداف، مرور مرجع [۳۶] نیز خالی از لطف نمی‌باشد. در این مرجع اشاره شده است که به‌منظور تأمین پایا و اقتصادی تقاضای سیستم‌های چند حاملی انرژی، مسئله انتخاب اجزای مختلف تشکیل‌دهنده هاب انرژی (یا به‌عبارتی طراحی هاب انرژی) و سپس بهره‌برداری بهینه آن، از اهمیت بالایی برخوردار است. بدین دلیل در این مقاله، یک مدل خطی جامع به‌منظور طراحی و بهره‌برداری بهینه هاب انرژی با لحاظ محدودیت‌های قابلیت اطمینانی ارائه شده است. شاخص‌های کفایت و احتمال از دست رفتن بار در حالت بروز تک حادثه در سیستم مورد بررسی واقع شده و محدودیت‌های قابلیت اطمینانی مختلف در فرآیند بهینه‌سازی به‌منظور حصول سطح مورد نیاز از قابلیت اطمینان برای انواع مختلف بار لحاظ می‌گردد. از جمله مهم‌ترین مزایای برجسته در اهداف برنامه‌ریزی سیستم‌های مبتنی بر هاب انرژی، امکان دستیابی به سطح پایین‌تر از انتشار آلاینده‌ها در بهره‌برداری از سیستم‌های انرژی می‌باشد.

به‌طورخاص برنامه‌ریزی بهره‌برداری از هاب انرژی به سمت اقتصاد کم‌کربن از موضوعات مورد مطالعه بسیاری از پژوهشگران می‌باشد. علاوه‌بر پژوهش‌های پیش از این مرور شده که کاهش آلاینده‌ها را جزئی از اهداف خود قرارداده‌اند [۳۲،۳۱،۲۹]، در پژوهش [۳۷] به‌طور ویژه به این مبحث پرداخته شده است. در این پژوهش اذعان شده است که وابستگی متقابل شکل‌های مختلف انرژی در سیستم‌های چندحاملی انرژی می‌تواند زمینه همکاری مناسبی را جهت کاهش انتشار کربن فراهم کند. با این حال، نیل به سطحی مناسب از هم‌افزایی و همکاری به‌منظور تحقق هدف کاهش انتشار آلاینده‌ها، بدون انگیزه‌های صحیح و مناسب قابل اجرا نیستند. از این رو در این پژوهش با هماهنگی با شبکه انتقال و توزیع از طریق قیمت‌های یکپارچه انرژی-کربن، عملکرد کم‌کربن سیستم‌های چند حاملی انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. قیمت انرژی بر مبنای قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی در سطح انتقال تعیین گردیده و در همان زمان، انتشار کربن سیستم‌های مختلف انرژی با استفاده از مدل جریان انتشار کربن[3]بر اساس سهم واقعی مصرف کنندگان از انتشار آلاینده‌ها با فرآیندی خاص به‌طور یکنواخت قیمت‌گذاری می‌شود.

علاوه‌بر مرور فوق در زمینه حل مسئله بهره‌برداری هاب انرژی با اهداف مختلف و با پیوند مفاهیم تجدیدساختار، از دیگر مباحث قابل بررسی در پژوهش‌های این حوزه مدل‌سازی اجزای هاب انرژی می‌باشد. شاخصه‌های عملکردی اصلی هاب انرژی شامل ورودی، تبدیل و ذخیره‌سازی و خروجی می‌باشد. به‌منظور مدل‌سازی هر یک از این ساختارها اجزای مختلفی در ادبیات درنظر گرفته شده است که در ادامه به بررسی آن پرداخته می‌شود.

### ۱-۲-۴- طبقه‌بندی بهره‌برداری از نظر منابع انرژی

ورودی هاب انرژی می‌تواند متشکل از انرژی الکتریکی شبکه سراسری [۲۴]، انرژی خورشیدی [۲۵]، انرژی بادی [۲۵]، گاز طبیعی [۲۴]، حرارت مستقیم [۲۶] و موارد دیگری از جمله آب [۱۸] و بیومس باشد. اغلب مقالات با لحاظ پشتیبانی شبکه سراسری از هاب و مدل‌سازی ورودی گاز طبیعی ارائه شده‌اند.

### ۲-۲-۴- طبقه‌بندی بهره‌برداری از نظر ذخیره‌ساز و مبدل‌های انرژی

ذخیره‌سازهای انرژی به‌عنوان سیستم‌هایی که قادر به جذب انرژی اضافی تولیدی در زمان کم‌باری و تزریق آن به شبکه در مواقع نیاز می‌باشد، می‌تواند مزایایی از جمله افزایش بهره‌وری، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی را برای سیستم به ارمغان آورد. انواع مختلف ذخیره‌سازها تاکنون در مدل‌های ارائه‌شده برای سیستم‌های چندحاملی انرژی ارائه و مورد استفاده قرار گرفته است. ذخیره‌سازهای گرمایی [۲۴]، ذخیره‌سازهای الکتریکی و باتری‌ها [۲۵]، مخازن هیدروژن [۳۸]، مخازن گاز [۳۹] و خودروهای الکتریکی [۳۸] از مهمترین ذخیره‌سازهای مدل شده در پژوهش‌های اخیر می‌باشد. انتخاب و بهره‌گیری از هرکدام از انواع این ذخیره‌سازها بسته به ویژگی‌هایی نظیر هزینه سرمایه‌گذاری، ظرفیت، بهره‌وری، طول عمر،

[1] Discomfort cost

[2] IDGS: Integrated power distribution and natural gas system

[3] CEF: Carbon emission flow

سرعت پاسخ، زمان شارژ، تلفات و متناسب با شرایط، اهداف و نیازهای مختلف محلی، متفاوت می‌باشد. ذخیره‌سازها در سیستم‌های مختلف انرژی با اهداف منحصربه‌فردی ازجمله بهبود پایایی، تسهیل ادغام منابع تجدیدپذیردر شبکه، افزایش تاب‌آوری، بهبود عملکرد سیستم، تسهیل روند هوشمندسازی و نیل به اهداف بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هاب انرژی هوشمند نیز که امروزه به‌عنوان یکی از مفاهیم بدیع شبکه هوشمند مورد توجه پژوهشگران واقع شده از مزایای چشمگیر به‌کارگیری ذخیره‌سازها بی‌بهره نمانده است. تحقق سیستم انرژی هوشمند به‌عنوان چشم‌انداز بهره‌وری انرژی جز با به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند به‌منظور نیل به سیستم‌های انرژی پایدار میسر نمی‌باشد. بهره‌گیری از انواع مختلف سیستم‌های ذخیره‌ساز محلی در سمت تقاضا مانند خودروهای الکتریکی قابل اتصال به شبکه به‌عنوان یکی از مهمترین ارکان این فناوری‌های هوشمند و به‌منظور تحقق برنامه‌های مدیریت مصرف، امروزه مورد توجه بسیاری از محققان این حوزه واقع شده است. از دیگر مفاهیم بدیع ذخیره‌سازی در هاب انرژی هوشمند بهره‌گیری از فناوری تبدیل برق به گاز است. تبدیل برق به گاز به‌عنوان یک مفهوم جدید که می‌تواند در بازگرداندن مؤثر تولید برق مازاد واحدهای تجدیدپذیر از طریق فرآیند الکترولیز آب کمک کند، فرآیند ذخیره‌سازی در هاب انرژی هوشمند را به نحوی متحول نموده است. این مفهوم که پیشنهاد می‌کند از برق مازاد برای تولید هیدروژن و گاز طبیعی استفاده شود، در میان تمام فن‌آوری‌های ذخیره‌سازی انرژی در دارای بالاترین چگالی ذخیره انرژی بوده و منتج به انواع مختلف روش‌های ذخیره‌سازی مانند گاز فشرده و هیدروژن مایع در مخازن ذخیره‌سازی به‌مدت طولانی و همچنین ذخیره‌سازی در زیرساخت‌های گاز طبیعی می‌شود. بهره‌گیری از زیرساخت‌های موجود به‌صورت کارآمد به‌منظور ذخیره‌سازی و توزیع حامل‌های انرژی و بهبود کارآیی اقتصادی سیستم از جمله دیگر محاسن این فناوری می‌باشد. علاوه‌براین، به‌کارگیری این تکنولوژی در ساختار هاب‌های انرژی هوشمند علاوه‌بر کمک به کاهش کربن و تهیه سوخت پاک هیدروژنی وسایل نقلیه، در یک کلام تحقق "اقتصاد هیدروژن" به‌معنای اقتصاد ایده‌آل بدون سوخت فسیلی را بیش‌ازپیش تسهیل می‌نماید. به‌طورخلاصه نقش بی‌بدیل به‌کارگیری ذخیره‌سازها در هاب‌های انرژی هوشمند در اجرای موفق برنامه‌های مدیریت مصرف، افزایش بهره‌وری و نیل به اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و پایایی غیرقابل انکار است[۲،۱۶، ۳۸].

علاوه‌براین، ذکر این نکته جالب توجه می‌باشد که اتصال مستقیم بین منابع ورودی و خروجی هاب انرژی معمولاً برای انتقال یک حامل انرژی به خروجی بدون تبدیل یا تغییر در کیفیت آن استفاده می‌شود. برای اصلاح حامل‌های ورودی و مناسب‌سازی کیفیت، کمیت و حالت متناسب با نیاز سمت مصرف، از مبدل‌ها استفاده می‌شود. توربین‌های گازی، موتورهای احتراق داخلی، پیل‌های سوختی، مبدل‌های ترموالکتریکی، پمپ‌ها، ترانسفورماتورها، اینورترها و مبدل‌های حرارتی و تجهیزاتی از این قبیل ازجمله این مبدل‌ها می‌باشد[۲]. در [۳۸] مدل ارائه شده شامل منابع تولید پراکنده، خودروهای الکتریکی قابل اتصال به‌شبکه، وسایل نقلیه مبتنی بر پیل سوختی، پیل سوختی، الکترولایزر، مخزن هیدروژن، دیگ بخار، اینورتر، یکسوکننده و سیستم ذخیره‌سازی گرما می‌باشد. در [۲۹] معماری مبتنی بر هاب انرژی هوشمند پیشنهاد شده است. این مدل از اجزای مختلف شامل بهره‌بردار سیستم، دیزل ژنراتور، واحدهای تولید هم‌زمان برق و حرارت، واحدهای خورشیدی و توربین‌های بادی تشکیل شده است. شبکه اصلی برق، شبکه اصلی حرارتی، شبکه گاز طبیعی، واحدهای دیگ بخار و کنتورهای هوشمند از دیگر اجزایی می‌باشد که در مدل‌سازی این پژوهش به‌عنوان نوآوری قلمداد می‌شود. مدل پیشنهادی [۳۱] نیز شامل منابع انرژی تجدیدپذیر، واحدهای تولید همزمان برق و حرارت می‌باشد. نوآوری این پژوهش ارائه مدل واحدهای تبدیل انرژی به گاز، در جهت مدل‌سازی وابستگی متقابل و بیش‌ازپیش زیرساخت‌ها، به‌منظور تأمین نیازهای الکتریکی، گرمایشی و گازی است. در [۳۵] نیز، مدل هاب انرژی پیشنهادی متشکل از واحد تبدیل انرژی الکتریکی به گاز، ذخیره‌ساز انرژی و واحدهای تولید همزمان برق، حرارت و برودت می‌باشد. همچنین در مدل هاب انرژی پیشنهادی پژوهش [۳۲]، واحدهای تولید همزمان برق و حرارت، دیگ بخار، واحد ذخیره‌ساز گرما، پنل‌های خورشیدی، توربین بادی و خودروهای الکتریکی گنجانده شده است .

**۳-۲-۴- طبقه‌بندی بهره‌برداری از نظر مصرف‌کنندگان**

حامل‌های مختلف انرژی، در چهارچوب هاب انرژی، برای ارائه خدمات متعدد ترکیب می‌شوند. این خدمات متعدد شامل انواع مختلف انرژی می‌باشد که توسط مصرف‌کنندگان نهایی مصرف می‌شود. اکثر مدل‌های پیشنهادی بر تأمین نیازهای برق و گرما [۲۴] متمرکز شده‌اند و توجه کمتری به سایر نیازهای سیستم‌های انرژی کرده‌اند. با این‌حال علاوه‌بر تامین بارهای الکتریکی و حرارتی، تامین بارهای سرمایشی[۲۵]، هیدروژنی و وسایل نقلیه مبتنی بر پیل سوختی [۳۸]، گاز [۲۹] و حتی آب [۲۴] نیز در مدل‌سازی برخی مقالات به‌چشم می‌خورد.

روش‌های مختلفی نیز به منظور حل هرچه بهینه‌تر مسائل مبتنی بر بهینه‌سازی بهره‌برداری هاب انرژی و یافتن پاسخی بهینه‌تر ارائه شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های کلاسیک که معروف‌ترین آن برنامه‌ریزی خطی[۲۵،۲۶،۳۰] می‌باشد، اشاره نمود. با این وجود بسیاری از پژوهش‌ها اقدام به حل مسائل با کمک روش‌های غیرکلاسیک یا هوش مصنوعی نموده‌اند. از این جمله می‌توان به روش مبتنی بر شبکه‌های عصبی [۲۴]، شاخه و کران [۲۸]، الگوریتم ژنتیک [۳۱] و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات [۳۵] اشاره نمود.

لحاظ عدم‌قطعیت‌های موجود و برنامه‌ریزی تصادفی بهره‌برداری از هاب انرژی از دیگر موضوعات مورد علاقه پژوهشگران می‌باشد. این مهم در مطالعه [۲۵] بر اساس ایجاد سناریو در مدل‌سازی عدم‌اطمینان تقاضای الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی، سرعت باد، تابش خورشید و قیمت حامل‌های انرژی از جمله برق و گاز طبیعی فراهم آمده است. در

[۳۸] یک مدل جدید به‌منظور تخمین عدم اطمینان مرتبط با مصرف برق خودروهای الکتریکی قابل اتصال به شبکه در طول سفر با استفاده از تئوری تصمیم‌گیری شکاف اطلاعات[۱] تحت استراتژی‌های ریسک-پذیری تدوین شده است. در [۲۶] لحاظ عدم قطعیت‌های تقاضای حرارتی و الکتریکی، قیمت گرما و سرعت باد از طریق روش برنامه‌ریزی تصادفی و به‌کمک توزیع ویبول برای سرعت باد و توزیع نرمال برای تقاضای الکتریکی و حرارتی و قیمت حرارت شکل یافته است. در [۲۷] به لحاظ پارامترهای نامعین مختلف در مسئله برنامه‌ریزی بهینه هاب انرژی مسکونی هوشمند پرداخته شده و عدم‌قطعیت قیمت بازار، تقاضای الکتریکی و حرارتی و تابش خورشید از طریق مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای محدود شده با ریسک لحاظ می‌شود. در عین حال در پژوهش [۳۱] تنها عدم قطعیت تابش خورشید و وزش باد مورد بررسی قرار گرفته است. در [۳۲] نیز عدم قطعیت خودروهای الکتریکی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو مدل‌سازی می‌شود. در این پژوهش یک روش بهینه‌سازی مقاوم نیز برای مقابله با عدم قطعیت‌های قیمت برق در آینده اتخاذ شده است. همچنین در [۴۰] مدل‌سازی عدم-قطعیت تقاضای برق و حرارت و عدم قطعیت‌های تولید برق منابع تجدیدپذیر به‌کمک یک مدل تولید سناریو انجام شده است. در پژوهش [۴۱] با لحظ مدل خطای پیش‌بینی توان تولیدی پنل‌های خورشیدی، یک مدل بهینه‌سازی مقاوم به‌منظور بهره‌برداری بهینه هاب انرژی با سیستم ذخیره انرژی پیشنهاد می‌گردد. در این پژوهش یک فرآیند دو مرحله‌ای بدین منظور اتخاذ شده است. در مرحله اول هزینه بهره-برداری از هاب انرژی بهینه شده و در مرحله دوم پس از تحقق عدم قطعیت خروجی واحدهای خورشیدی، توزیع توان در زمان حقیقی پیاده‌سازی می‌گردد. در [۳۵] تنها به لحاظ عدم قطعیت تولید واحدهای بادی بسنده شده است. شکل ۵ در یک نگاه مدل عمومی برنامه‌ریزی بهره‌برداری هاب انرژی را نشان می‌دهد.

## ۵- طیف وسیع گستره معنایی هاب انرژی

هاب انرژی محدودیتی در مدل‌سازی ندارد. به‌عبارت دیگر می‌توان یک سیستم انرژی خانگی یا کل سیستم انرژی شهری را درقالب هاب انرژی مدل‌سازی نمود. هاب انرژی با توجه به بخش مصرف می‌تواند به چهار گروه اصلی تقسیم شود: هاب انرژی مسکونی، تجاری، صنعتی و کشاورزی. سیستم‌های انرژی در هر یک از این بخش‌ها می‌توانند به-عنوان یک هاب انرژی خرد[۲]قلمداد شوند. با ادغام هاب‌های انرژی خرد، مفهومی به نام هاب انرژی کلان[۳]ایجاد می‌شود که در آن می‌توان مجموعه‌ای از هاب‌های انرژی خرد را کنترل و برنامه‌ریزی نمود. مجتمع‌های مسکونی، یک منطقه شهری، ساختمان‌های تجاری، یک شهرک صنعتی، یک دهکده و یا حتی کل شهر می‌تواند تحت عنوان هاب انرژی کلان مورد بررسی قرار گیرد. در هر سیستم انرژی، هدف مشتریان کمینه‌سازی هزینه‌های تامین انرژی‌شان می‌باشد، درحالی‌که شرکت‌ها تنها نگران کمینه‌سازی هزینه‌های خود نیستند، بلکه شکل پروفیل بار، تامین پیک بار و کیفیت خدمات نیز برای آن‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. ازاین‌رو، اگرچه در سطوح پایین‌تر مانند هاب انرژی خرد، هدف، بهینه‌سازی مصرف انرژی از دید مصرف کننده است، در یک هاب انرژی کلان، هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی در کل سیستم از دیدگاه کنترل‌کننده است[۴۲].

### ۵-۱- هاب انژی خرد

همانطور که اشاره شد هاب انرژی خرد با توجه به بخش مصرف می-تواند به چهار گروه اصلی تقسیم شود: هاب انرژی مسکونی، تجاری، صنعتی و کشاورزی. پژوهش‌های حوزه هاب انرژی در انواع مدل‌سازی مسکونی، تجاری، صنعتی و کشاورزی به‌عبارتی زیرمجموعه‌ای از پژوهش‌های عمومی در حوزه هاب انرژی می‌باشد که پیش از این به مرور ادبیات آن در در دوقالب برنامه‌ریزی توسعه و بهره‌برداری پرداخته شد. در حوزه برنامه‌ریزی بلندمدت، تعیین نوع و شاخص‌های بهینه تجهیزات هاب انرژی مورد مطالعه در هر یک از چهار گروه نام‌برده شده مدنظر بسیاری از پژوهشگران واقع شده است. در حوزه بهره‌برداری نیز مانند آنچه پیش از این ذکر شد، استفاده از روش‌های حل مختلف، استفاده از اجزای متنوع در مدل‌سازی، مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها، پیوند با مباحث بازار برق و مدیریت مصرف و سرانجام دنبال‌کردن اهداف مختلف از بهینه‌سازی بهره‌برداری هاب انرژی از جمله مهمترین نوآوری پژوهش‌ها در این حوزه می‌باشد. در ادامه به‌عنوان نمونه به مرور چند مورد از آخرین دستاوردهای پژوهشی که بر هاب‌های انرژی خرد چهارگانه متمرکز شده است، پرداخته می‌شود.

#### ۵-۱-۱- مسکونی

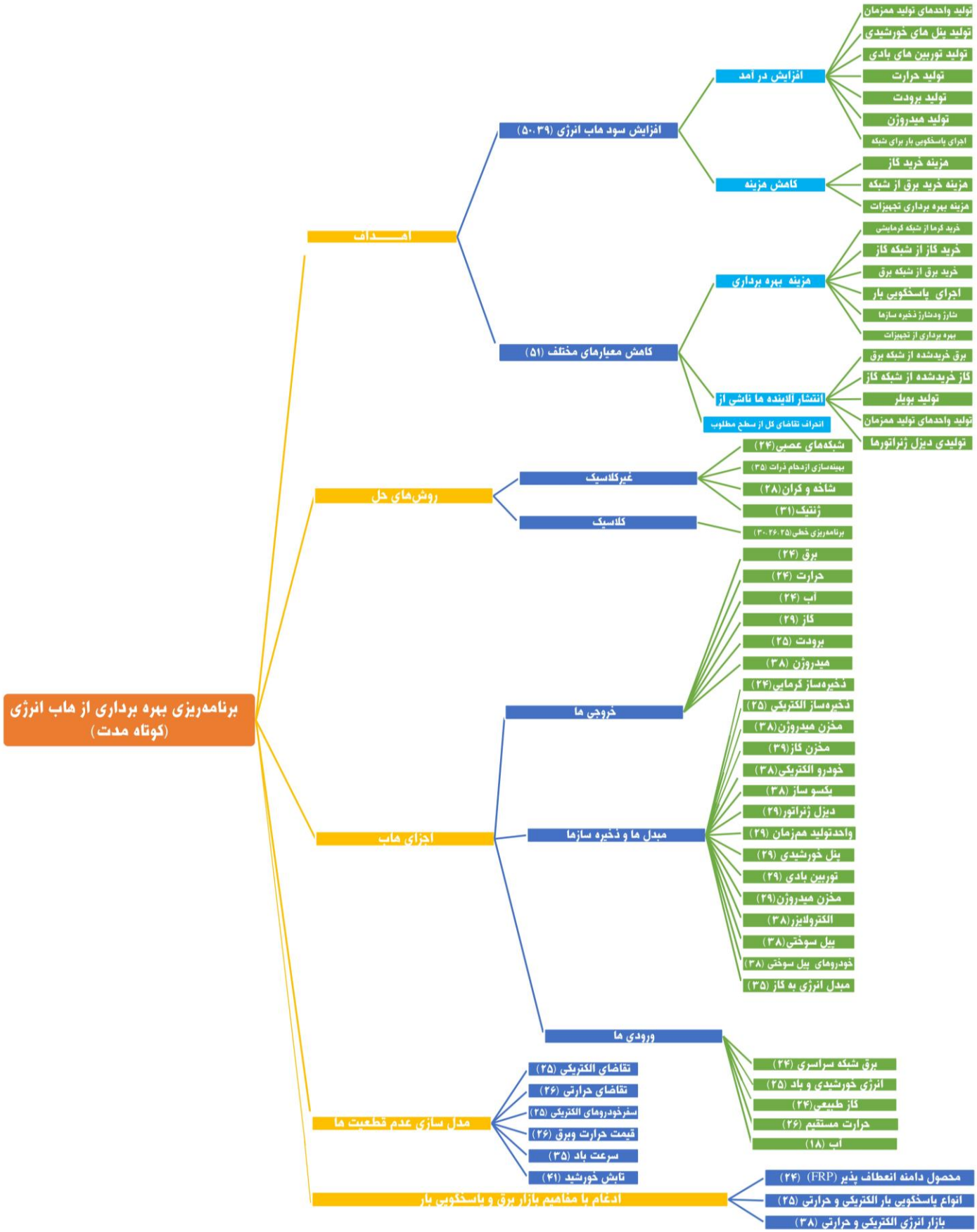
اخیراً، بسیاری از مطالعات بر اندازه‌یابی ساختاری هاب انرژی مسکونی متمرکز شده‌اند. بیشتر این پژوهش‌ها سعی در تعیین ظرفیت بهینه اجزای هاب انرژی مسکونی شامل واحدهای تولید همزمان [۴۳،۴۶]، منابع انرژی تجدیدپذیر [۴۴]، دیگ بخار [۴۶،۴۵] و سیستم‌های ذخیره‌ساز [۴۵] دارند. هدف اصلی اغلب این پژوهش‌ها کمینه‌سازی هزینه مشتری از جمله هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری برای مصرف‌کننده مسکونی در یک بازه زمانی معین است [۴۵]. علاوه‌براین، اهداف دیگری نیز از حل مسئله بهینه‌سازی برنامه‌ریزی هاب انرژی مسکونی دنبال می‌گردد. هزینه قابلیت اطمینان، هزینه تامین‌نشدن انرژی، هزینه مجازات افت ولتاژ [۴۳]، انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه احتمالی ناشی از تولید متناوب منابع تجدیدپذیر که به‌عبارتی همان انرژی تامین نشده می‌باشد [۴۶]، نیز می‌تواند در مجموعه اهداف بلند مدت گنجانده شود.

---

[۱] IGDT: Information gap decision theory

[۲] Micro energy hub

[۳] Macro energy hub




**شکل (۵): مدل عمومی برنامه‌ریزی بهره‌برداری هاب انرژی**

در اندازه‌یابی ساختاری هاب انرژی مسکونی پژوهش [۴۵] علاوه‌بر مدل‌سازی مدیریت سمت تقاضا در مسئله پیشنهادی، از روش شبیه-سازی مونت کارلو برای مدل‌سازی عدم قطعیت تولید واحدهای خورشیدی استفاده نموده است. در [۴۶] یک مدل برنامه‌ریزی پویا احتمالاتی به‌منظور بهینه‌سازی تصمیمات در مورد نصب پنل‌های خورشیدی برای یک هاب انرژی مسکونی پیشنهاد شده است. در مدل این هاب انرژی مسکونی علاوه‌بر پنل‌های خورشیدی، واحدهای تولید همزمان برق و حرارت و دیگ‌های بخار گازی برای تأمین تقاضای الکتریکی و حرارتی ادغام می‌شوند. در مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی این پژوهش علاوه‌بر مدل‌سازی پاسخگویی بارهای حرارتی و الکتریکی به-عنوان انعطاف‌پذیری اضافی به‌منظور استفاده حداکثری از مزایای انرژی خورشیدی، عدم‌اطمینان تولید واحدهای خورشیدی نیز با روش تخمین دو مرحله‌ای مدل‌سازی شده است. پژوهشگران در [۴۷] روشی به‌منظور بهره‌برداری از هاب انرژی مسکونی در قالب یک خانه هوشمند به‌عنوان نوعی خاص از هاب انرژی خرد در یک شبکه هوشمند با درنظرگرفتن پمپ آبی حرارتی و با هدف کاهش هزینه‌ها و انتشار کربن ارائه نموده-اند. در این مطالعه در بخش اول عملکرد واحد تولید همزمان برق و حرارت، واحدهای خورشیدی و سیستم‌های ذخیره‌ساز تحت قیمت-گذاری پویا بهینه می‌شود. از آنجا که مدیریت بار مسکونی نقش اساسی در تحقق برنامه‌های پاسخگویی به تقاضا در یک شبکه هوشمند دارد، مدیریت بهینه بار در مدل پیشنهادی هاب انرژی مسکونی نیز در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. برای دستیابی به این هدف از ابزار بخاری پمپ آبی-حرارتی استفاده شده است.

**۲-۱-۵- تجاری**

مشابه آنچه از پژوهش‌های معطوف بر موضوع هاب انرژی مسکونی مرور شد، پژوهش‌های موجود در سایر حوزه‌های سه گانه دیگر نیز بر همین مبنا یعنی بهینه‌سازی ساختاری اجزا و بهره‌برداری بهینه آن استوار می‌باشد. پژوهشگران در [۴۸] قصد دارند تا با تحلیل‌های خود ساختمان‌های تجاری و اداری در تهران را به استفاده از سیستم‌های تولید همزمان برق، حرارت و برودت تشویق و یاری کنند. به‌منظور دست‌یافتن به این هدف، به بررسی یکی از مهمترین پارامترهای عملکردی واحدهای تولید همزمان که انتخاب ظرفیت تجهیزات است، پرداخته شده است. در همین راستا، سه سناریوی متفاوت جهت انتخاب ظرفیت مناسب واحد تولیدی برای ساختمان معرفی شده و یک مطالعه اقتصادی در هر سناریو به‌منظور تعیین ظرفیت بهینه واحد تولیدی برای ساختمان انجام شده است. سرانجام، کاهش انتشار آلاینده‌ها درنتیجه استفاده از واحدهای تولید همزمان برای این ساختمان‌های تجاری و اداری مورد بررسی قرار گرفته است. محققان در [۴۹] به ارائه یک مدل مدیریت انرژی برای یک ناوگان از خودروهای الکتریکی مبتنی بر پیل سوختی قابل اتصال به شبکه و یک ساختمان تجاری و اداری متوسط که با یک هاب انرژی پاک در ارتباط است، ارائه نموده-اند. این رویکرد به منظور الگوبرداری از معماری و کارکرد روزانه هر خودروی شخصی در ناوگان حمل‌ونقل جهت برنامه‌ریزی بهینه کل سیستم می‌باشد. براین اساس عملکرد روزانه خودروها به دو دوره تقسیم می‌شود: شارژ و مسافرت. در طول مدت شارژ، وسیله نقلیه باتری‌های خود را شارژ کرده و مخازن هیدروژن فشرده شده خود را دوباره پر می‌کند. در طول مدت سفر، وسیله نقلیه باتری و مخازن هیدروژن را بر اساس مسافت طی شده تخلیه می‌کند. مسافت سفر روزانه توسط یک مدل تصادفی مدل‌سازی می‌شود. در این مطالعه اذعان شده است که در مطالعات قبلی در بستر هاب انرژی از پروفیل-های بار فرضی برای تجزیه و تحلیل عملکرد هاب انرژی استفاده شده است. این پروفیل‌های بار از آنجایی که تقاضای انرژی را به‌معنای واقعی توصیف نمی‌کنند، مناسب نیستند. از این رو در این مقاله یک مدل انعطاف‌پذیر برای پیش‌بینی تقاضای انرژی یک ناوگان از وسایل نقلیه قابل اتصال به شبکه ارائه شده است. از این مدل برای بررسی تعامل بین ناوگان و یک هاب انرژی پاک استفاده می‌شود.

**۳-۱-۵- صنعتی**

نویسندگان [۵۰] به ارائه یک مدل مدیریت بهینه بارهای صنعتی[۱] پرداخته‌اند. این مدل می‌تواند به راحتی در سیستم مدیریت هاب انرژی صنعتی در تعامل با شرکت‌های توزیع محلی برای برنامه‌ریزی خودکار و بهینه بهره‌برداری آن ادغام گردد. مدل ریاضی پیشنهادی با هدف کمینه‌سازی کل هزینه تامین تقاضا مشتریان صنعتی مقید به مجموعه-ای از محدودیت‌های برابری و نابرابری شامل محدودیت‌های فرآیندهای صنعتی، واحدهای ذخیره‌سازی، اجزای سیستم توزیع، الزامات بهره-برداری و سایر محدودیت‌های مربوطه ارائه شده است. اثربخشی مدل پیشنهادی درباره دو مشتری صنعتی نوعی از جمله یک کارخانه آرد و یک تأسیسات پمپاژ آب بررسی شده است. نتایج این پژوهش بیانگر کارایی مدل پیشنهادی درعملکرد بهینه اقتصادی سیستم مدیریت هاب‌های انرژی صنعتی در شبکه‌های هوشمند می‌باشد. در [۵۱] علاوه‌بر ارزیابی اقتصادی، کاهش انتشار آلاینده‌ها نیز جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در عملکرد مصرف‌کننده صنعتی مورد توجه واقع شده است. در این پژوهش از سیستم هاب انرژی جهت تأمین انرژی حرارتی و الکتریکی مصرف‌کننده صنعتی استفاده شده است. در این مقاله یک الگوی دو هدفه برای عملکرد مبتنی بر هزینه-انتشار مصرف‌کنندگان صنعتی با حضور برنامه مدیریت پیک بار پیشنهاد شده است. علاوه‌براین، روش تصمیم‌گیری فازی برای انتخاب پاسخ مناسب و متعادل از مجموعه پیشانی پارتو ارائه شده است. سرانجام، برنامه مدیریت پیک بار برای صاف‌کردن پروفیل بار به منظور کاهش هزینه بهره‌برداری و انتشار استفاده می‌شود. مدل ارائه شده تحت عنوان برنامه‌ریزی خطی ارائه شده است.

[۱] OILM: Optimal industrial load management

**۴-۱-۵- کشاورزی**

از انرژی خورشیدی برای تولید برق، گرمایش، سرمایش و خشک‌کردن محصولات کشاورزی، تقویت خاک و آبیاری استفاده می‌شود. از زیست-توده در مزرعه که به‌صورت پسماندهای کشاورزی هستند به‌منظور تامین سوخت واحدهای تولید همزمان یا به‌عنوان سوخت زیستی برای اهداف حمل و نقل استفاده می‌شود. همچنین از انرژی زمین‌گرمایی در مصارف کشاورزی به‌منظور گرمایش گلخانه‌ها، تنظیم دمای استخرهای پرورش آبزیان، خشک‌کردن محصولات زراعی و گرمایش خاک استفاده می‌گردد. علاوه‌بر پمپ‌های گرمایشی برای گرمایش و سرمایش، امروزه واحدهای خورشیدی و توربین‌های بادی جهت تأمین تقاضای الکتریکی از قبیل روشنایی، پمپاژ آب و آبیاری نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. همه این موارد نیاز بخش کشاورزی به مدیریت حامل‌های مختلف انرژی مورد استفاده در نیل به بهینه‌ترین عملکرد درقالب هاب انرژی را بیان می‌دارد. اگر چه تحقیقاتی که به وضوح در حوزه هاب انرژی کشاورزی عنوان شده باشد اندک است، با این حال بهره‌برداری موارد فوق الذکر در کناریکدیگر و مدیریت یکپارچه منابع انرژی بخش کشاورزی به نوعی مفهومی از هاب انرژی را تداعی می‌سازد. درواقع در پژوهش‌ها اذعان شده است که به‌منظور حصول کشاورزی پایدار، باید سه چالش اساسی؛ بهره‌وری مصرف انرژی، هزینه‌های تولید و تاثیرات زیست‌محیطی بخش کشاورزی مورد توجه بیشتر واقع شود [۴۲]. هاب انرژی می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای‌مناسب در جهت حل این چالش‌ها نقش بی‌بدیل خود را ایفا نماید. در [۵۲] اذعان شده است سیستم‌های کشاورزی هم به‌عنوان مصرف کننده انرژی زیستی و هم به‌نوعی تأمین-کننده انرژی، در اقتصاد و امنیت غذایی جهانی نقش اساسی دارند. مقدار زیادی انرژی از منابع مختلف در این بخش مورد استفاده قرار می‌گیرد در حالی که محققانی که جریان انرژی تولید محصولات زراعی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه را بررسی کرده‌اند، از ناکارآمدی بالای این حوزه در بخش انرژی خبر داده‌اند. در این پژوهش اشاره شده است که لازم است برای مدیریت مدرن سیستم‌های کشت، کلیه عوامل (اقتصاد، انرژی و محیط‌زیست) در فرآیند تصمیم‌گیری به‌طور همزمان لحاظ شود. بر این اساس، در این مقاله از الگوریتم ژنتیک چندهدفه جهت یافتن بهترین ترکیب از حامل‌های ورودی به یک مجموعه کشاورزی استفاده شده است. این روش می‌تواند میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را کمینه نموده و انرژی خروجی و نسبت سود به هزینه را بیشینه‌سازی نماید. محققان در [۵۳] بر اندازه‌گیری بهره‌وری انرژی جهت برنامه‌ریزی صحیح و دقیق سیاست‌های کاهش مصرف انرژی تاکید دارند. از این رو به ارائه روشی جهت اندازه‌گیری بهره‌وری انرژی مزارع بر اساس رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها[۱] پرداخته‌اند. این پژوهش از مدل بهره‌وری انرژی جهت تعیین ترکیب بهینه منابع ورودی جهت حفظ تامین انرژی و خروجی‌های فعلی و به‌عبارتی تامین مصرف با حداقل مصرف حامل‌های انرژی استفاده می‌کند. از مرور پژوهش‌های هاب انرژی خرد به همین تعداد بسنده شده و در بخش بعد به مرور پژوهش‌های حوزه هاب انرژی کلان که حاصل پیوند هاب‌های انرژی خرد می‌باشد، پرداخته می‌شود.

## ۲-۵- هاب انژی کلان

یکی از موضوعات پژوهشی پرطرفدار در چند سال اخیر اتصال هاب-های انرژی به یکدیگر و اداره آن توسط یک بهره‌بردار می‌باشد. همانطور که پیش از این اشاره شد در سطوح پایین‌تر مانند هاب انرژی خرد، هدف، بهینه‌سازی مصرف انرژی از دیدگاه مصرف‌کننده است. بااین‌حال، در یک هاب انرژی کلان، هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی در کل سیستم از دیدگاه کنترل‌کننده است. ادغام هاب‌های انرژی خرد، مفهومی به نام هاب انرژی کلان ایجاد می‌کند که در آن می‌توان مجموعه‌ای از هاب‌های انرژی را با هم کنترل و برنامه‌ریزی نمود.

مدل هاب انرژی کلان می‌تواند موارد بسیاری از جمله مجتمع مسکونی، یک منطقه شهری، ساختمان‌های تجاری، یک شهرک صنعتی، یک دهکده و یا حتی کل شهر را دربرگیرد. کنترل و مدیریت یکپارچه هاب‌های انرژی مزایایی نیز برای سیستم به همراه دارد. ساختمان‌های مسکونی و تجاری که دارای الگوی مصرفی متنوع هستند را می‌توان با هم کنترل نمود و از منابع‌تولید پراکنده موجود در هر یک از این هاب‌ها جهت پوشش کمبود ظرفیت در یک بخش یا هاب دیگر استفاده نمود. می‌توان گفت که از آن‌جا که معمولاً اوج تقاضا در این بخش‌ها همزمان رخ نمی‌دهد، منابع و ذخیره‌سازهای یک بخش می-تواند بخشی از اوج تقاضا را در بخش دیگر تأمین کند. در بخش صنعت، گرمای تولید شده با درجه پایین می‌تواند در شبکه حرارتی هاب انرژی کلان به‌منظور گرم‌کردن ساختمان‌های مجاور استفاده شود. علاوه‌براین، از زباله‌های آلی در کشاورزی می‌توان برای تولید سوخت‌های زیستی استفاده کرد. همه این موارد زمینه‌های همکاری و تعامل هاب‌های انرژی خرد در جهت رسیدن به برنامه‌ریزی بهینه را نشان می‌دهد [۴۲]. در [۵۴] اذعان شده است که برنامه‌ریزی بهره‌برداری یک هاب انرژی با ترکیب چندین منبع انرژی برای کل یک سال، می‌تواند از دیدگاه محاسباتی با چالش‌هایی مواجه باشد. در واقع حل یک مسئله متشکل از اعداد صحیح، با افزایش تعداد متغیرهای عدد صحیح تلاش-های محاسباتی دوچندانی را می‌طلبد. از این رو این پژوهش به ارائه یک روش بهینه‌سازی بهره‌برداری هاب انرژی کلان متشکل از هاب‌های مختلف با تمرکز بر کاهش زمان محاسبات می‌پردازد. در [۵۵] یک سیستم مدیریت انرژی سلسله مراتبی[۲] به‌منظور مدیریت بهینه عملکرد هاب‌های مختلف انرژی مسکونی در شبکه محلی[۳] ارائه شده است. اهداف اصلی این برنامه بیشینه‌سازی سود مالی و پیک‌سایی شبکه بالادست می‌باشد. بدین ترتیب، مدل پیشنهادی مدیریت تولید و ذخیره

[۱] DEA: Data envelopment analysis

[۲] HEMS: Hierarchical energy management system

[۳] MHEHNG: Multiple home energy hubs in the neighborhood grid

انرژی و همچنین خریدوفروش انرژی هر هاب انرژی خانگی را در دو سطح از جمله سطح پایین و سطح بالا مدیریت می‌کند. سطح پایین وظیفه تأمین بار داخلی و کاهش هزینه تامین انرژی در هر هاب خانگی را بر عهده دارد. سطح بالاتر، شامل سیستم مدیریت انرژی مرکزی است که بر مبنای تشکیل ائتلاف بین هاب‌های محلی به‌دنبال تجارت بیشتر انرژی در شبکه با کمترین قیمت ممکن می‌باشد. پژوهش [۵۶] نیز به ارائه یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی از برنامه‌ریزی بهینه روزانه یک سیستم توزیع فعال که قادر به بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر، واحدهای تولید پراکنده، وسایل نقلیه الکتریکی و واحدهای ذخیره انرژی بوده و برق مازاد خود را به بازار برق روز پیش می‌فروشد، پرداخته است. سیستم توزیع فعال این پژوهش به تبادل انرژی با چند هاب انرژی در پایین دست خود که مجهز به تجهیزات سرمایشی، گرمایشی و نیروگاهی هستند می‌پردازد. بر این مبنا بهره‌بردار هر هاب انرژی برنامه‌ریزی روزانه خود را بهینه نموده و پیشنهاد خود را به بهره-بردار سیستم توزیع بالادست، ارسال می‌نماید. پس از آن، بهره‌بردار سیستم توزیع، با بررسی پیشنهاد هاب‌های انرژی، برنامه‌ریزی تولید منابع انرژی سیستم خود را برای روز آینده بهینه می‌نماید. علاوه‌براین، این بهره‌بردار از یک برنامه جایگزین پاسخگویی بار مانند برنامه‌های زمان‌استفاده و کنترل مستقیم بار به‌منظور افزایش بهره‌وری هاب‌های انرژی پایین‌دست خود بهره می‌برد. در [۵۷] محققان اذعان نموده‌اند که با توسعه سریع فناوری‌های اطلاعات و تولید انرژی، سیستم یکپارچه انرژی چند سطحی[۱] که متشکل از منابع تامین انرژی متعدد و مصرف-کنندگان متعدد می‌باشد به شدت در سطح جهان مورد استقبال قرار گرفته است. در این مطالعه، برنامه‌ریزی انرژی یک سیستم سه‌سطحه با استفاده از روش بازی سلسله مراتبی استاکلبرگ[۲] بررسی شده است. مدل پیشنهادی این پژوهش از یک شرکت برق و یک شرکت گاز طبیعی (سطح بالایی) ، چندین هاب انرژی هوشمند با ساختار یکسان که قابلیت تولید همزمان برق و گرما را دارند (سطح میانی) و چندین مصرف‌کننده نهایی (سطح پایین) تشکیل شده است. پژوهش [۵۸] نوآوری خود را با این جملات معرفی می‌نماید؛ حصول مستقیم نتایج از مدل بهره‌برداری سیستم‌های چندحاملی انرژی به‌دلیل مشخصه‌های چند بعدی و غیرخطی اجزای موجود در آن بسیار دشوار است. برای حل این چالش، در روش پیشنهادی این مقاله، روش‌های تقریبی خطی تک‌بعدی و چندبعدی برای ساده‌سازی تابع انتقال گازطبیعی غیرمحدب، تابع هزینه ژنراتور و عملکرد کمپرسور اتخاذ شده است. علاوه‌براین، یک روش خطی‌سازی چندمرحله‌ای بر هاب انرژی اعمال می‌شود. بر این اساس، کل سیستم می‌تواند در قالب یک مسئله برنامه-ریزی خطی آمیخته عدد صحیح مدل‌سازی شود. با اعمال این روش بر بستر یک سیستم به‌هم‌پیوسته شامل سه هاب انرژی، نتایج گواه بر این می‌باشد که با وجود همه پیچیدگی نهفته در بهینه‌سازی بهره‌برداری هاب انرژی، مدل خطی ارائه شده در مقایسه با مدل سنتی به‌دلیل استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی پیشرفته موجود، بی دردسر اجرا شده و موجب حصول نتایج بهینه‌تری با تلاش‌های محاسباتی کمتری می‌گردد. در [۵۹] گروهی از خانه‌های مسکونی به‌عنوان یک سیستم هاب انرژی به‌هم‌پیوسته با هدف کاهش هزینه روزانه کل هاب انرژی مورد بهره‌برداری واقع می‌شوند. در مدل پیشنهادی این پژوهش با توجه به لحاظ تابع هزینه عمر باتری، مسئله بهینه‌سازی به‌عنوان یک مسئله غیرمحدب تدوین می‌گردد. از این رو از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات جهت حل بهینه مسئله استفاده می‌شود. پژوهشگران در [۶۰] یک مدل برنامه‌ریزی بهینه مبتنی بر قابلیت اطمینان به‌منظور اتصال هاب‌های انرژی به‌وسیله زیرساخت‌های چندگانه حامل انرژی ارائه داده‌اند. مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی کم هزینه‌ترین شبکه از خطوط انتقال برق و خطوط لوله گاز طبیعی به‌منظور اتصال هاب‌های انرژی از مجموعه مشخصی از مسیرهای کاندید را به‌گونه‌ای انتخاب می‌کند که معیارهای قابلیت‌اطمینان را برآورده نماید. محققان در [۶۱] برنامه‌ریزی تولید انرژی در شبکه هوشمند انرژی متشکل از پنج نمونه هاب انرژی را با هدف کمینه‌سازی هزینه تامین انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، تحت سناریوهای مختلف در یک جامعه کانادایی بررسی کرده‌اند. مجموعه هاب‌های انرژی شامل ساختمان‌های مسکونی، دبستان، رستوران، ساختمان اداری و مرکز خرید می‌باشند. هاب‌های انرژی توسط شبکه حرارتی و برق به‌هم پیوسته‌اند و به‌منظور تامین تقاضا، انرژی تولیدی محلی خود را به اشتراک می‌گذارند. در این پژوهش یک مدل بهینه-سازی نسبتا پیچیده جهت کمینه‌سازی هزینه مصرف انرژی و تأثیرات زیست محیطی آن ارائه شده است. نتایج این پژوهش هم مانند سایر پژوهش‌های مرور شده در این بخش گواه بر این است که ادغام هاب-های مبتنی‌بر مراکز مختلف در شبکه انرژی هوشمند امکان اشتراک انرژی در بین آن‌ها، افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای را فراهم می‌آورد. شکل ۶ مدل عمومی برنامه‌ریزی بهره‌برداری هاب انرژی کلان متشکل ازهاب‌های انرژی خرد را نشان می‌دهد.

## ۶- شهر هوشمند به‌مثابه هاب انرژی هوشمند

### ۶-۱- هاب انرژی هوشمند، چشم‌انداز بهره‌وری انرژی

امروزه شبکه‌های قدرت به سمت سیستم‌های هوشمند و کارکردهای خودکار در حال حرکت هستند که در این زمینه مفهوم شبکه هوشمند معرفی می‌گردد.

شبکه هوشمند یک شبکه الکتریکی مدرن به‌منظور افزایش بهره‌وری و قابلیت اطمینان از طریق کنترل خودکار به‌کمک فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات و زیرساخت‌های مدیریت انرژی می‌باشد. شبکه هوشمند به‌دنبال پیوند فناوری‌های مختلف با هدف ایجاد یک شبکه خود ترمیم با قابلیت اطمینان بیشتر می‌باشد. هوشمندسازی شبکه منجر به

[۱] Integrated energy system
[۲] Hierarchical stackelberg game approach

**شکل (۶): مرور پژوهشی آخرین دستاوردها در حوزه برنامه‌ریزی توسعه و بهره‌برداری هاب انرژی خرد و کلان**

افزایش راندمان تأمین، استفاده بهینه از زیرساخت‌های موجود، کاهش نیاز به گسترش سیستم‌ها و تسهیل ادغام منابع انرژی به‌خصوص منابع تولید پراکنده در سمت مصرف می‌شود[۴۲]. به‌دنبال گسترش مفهوم شبکه هوشمند، مفهوم هاب انرژی هوشمند نیز مشابه تعریف شبکه هوشمند و دارای همان شاخص‌ها، درعین‌حال برجسته در در دوشاخه به‌کارگیری منابع تولید پراکنده و استفاده از مفاهیم مدیریت سمت مصرف مطرح می‌شود. امروزه تحقیقات متعدد و پژوهش‌های نوآورانه مختلفی در زمینه ارائه طرح‌های بدیع خود در موضوع هاب انرژی با بهره‌گیری از مبانی هوشمندسازی تلاش کرده‌اند. اگر چه بخشی از مفاهیم مرور شده در بخش‌های قبل بی ارتباط با مفهوم هوشمندسازی در هاب انرژی نبود، با این‌حال به‌دلیل اهمیت موضوع به‌طور خاص در این بخش نیز به مرور چند نمونه از فعالیت های پژوهشی اخیر که بر مفهوم هاب هوشمند تمرکز داشته‌اند، پرداخته می‌شود.

در پژوهش[۶۲] اذعان شده است که ادغام مباحث مرتبط با مدیریت مصرف با مفهوم هاب انرژی امروزه نقشی اساسی در فرآیند بهبود بهره-وری و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت ایفا می‌کند. از این‌رو در این

پژوهش به مطالعه یک سیستم انرژی چند حاملی انرژی هوشمند پرداخته می‌شود که در آن کاربران مجهز به وسایل ذخیره‌سازی و تبدیل انرژی هستند (به‌عبارتی به‌واسطه یک هاب انرژی تغذیه می‌شوند). در این پژوهش کاربران قصد دارند با جابجایی مصرف انرژی به ساعات خارج از ساعات اوج بار و جابجایی بین حامل‌های مختلف انرژی، میزان پرداختی ناشی از تامین انرژی خود را کاهش دهند. به‌عبارتی این روش پیشنهادی هر دو نوع کاربر با بارهای قابل انتقال از ساعات پیک و بارهای غیرقابل انتقال را قادر می‌سازد تا بتوانند نقش خود را در برنامه‌های مدیریت مصرف ایفا نمایند. در [۶۳] مدل بهینه‌سازی برنامه-ریزی ریسک-مقید یک هاب انرژی هوشمند یکپارچه با انرژی بادی ارائه شده و عملکرد آن را در ترکیب با سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده[۱] برنامه پاسخگویی بار الکتریکی و حرارتی ارزیابی می‌شود. مدل پیشنهادی از واحدهای تولید همزمان برق و حرارت، یک سیستم ذخیره هوای فشرده، یک سیستم ذخیره‌ساز حرارتی، واحدهای دیگ بخار و یک سیستم پمپ حرارتی الکتریکی تشکیل شده است. در این مقاله ادعا شده است که استفاده از تولید توربین‌های بادی و سیستم ذخیره هوای فشرده منجربه ایجاد شرایطی پایا در بهره‌برداری هاب انرژی هوشمند می‌گردد. همچنین در این پژوهش ضمن لحاظ عدم-قطعیت تولید توربین‌های بادی و تقاضای الکتریکی و حرارتی مسئله به‌عنوان یک مسئله تصادفی مبتنی بر سناریو با استفاده از روش شبیه-سازی مونت کارلو مدل‌سازی شده است. پژوهش [۶۴] نیز به ارائه یک روش مدل‌سازی و بهینه‌سازی هوشمند برای تنظیم و تطبیق مدل هاب انرژی هوشمند برای سیستم‌های چندحاملی انرژی و بهینه‌سازی خودکار عملکرد مدل هاب انرژی مرتبط با آن سیستم پرداخته است. پژوهشگران در [۶۵] با لحاظ پارامترهای تصادفی مختلف، به ارائه مدل برنامه‌ریزی بهره‌برداری از هاب انرژی مسکونی هوشمند می‌پردازند. اثر عدم‌قطعیت پارامترهایی مانند قیمت‌های تسویه بازار، تقاضاها و تابش خورشید بر مسئله برنامه‌ریزی از طریق ارائه یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای ریسک-مقید لحاظ می‌شود. هدف مدل پیشنهادی نیز کمینه‌سازی هزینه تامین تقاضای سرمایشی، حرارتی و الکتریکی بیان‌شده است. پژوهش[۶۶] نیز مدل‌سازی عدم‌قطعیت را به‌عنوان یکی از مباحث نوآورانه مطرح شده در روش پیشنهادی خود دنبال می‌کند. در این پژوهش، یک چهارچوب بهینه‌سازی جدید مبتنی بر روش تئوری تصمیم‌گیری مبتنی‌بر سناریو/ فاصله/ گپ اطلاعاتی[۲] به‌منظور بررسی عملکرد بهینه هاب انرژی هوشمند با لحاظ اهداف اقتصادی، محدودیت‌های فنی شبکه توزیع و عدم‌قطعیت ارائه شده است. در این پژوهش از مفاهیم هاب‌های انرژی هوشمند که قادر به اجرای برنامه-های مدیریت تقاضا از جمله برنامه‌های پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت و مبتنی بر تشویق هستند به‌منظور ایجاد تغییر در الگوی مصرف مصرف-کنندگان با هدف تحقق اولویت‌های اقتصادی هاب انرژی بهره گرفته شده است. در توجیه ارائه طرح نوآورانه پیشنهادی پژوهش [۶۷]، این نکته ذکر شده است که اگر چه ریزشبکه‌های ترکیبی AC/DC سازگاری بهتری با منابع تولید تجدیدپذیر، ذخیره‌سازهای انرژی و بارهای مختلف دارند، با این‌وجود سیستم شبکه هوشمند در همان حالت تک بعدی AC و به نوعی معمولی در حال ساخت بوده و به-منظور تحقق شبکه ترکیبی به طراحی سیستم سفارشی نیاز دارد که پرهزینه و وقت‌گیر است. بدین دلیل در این پژوهش، هاب انرژی هوشمند، که به‌نوعی طرحی از یک ریزشبکه کوچک می‌باشد، به‌منظور ساده‌سازی استقرار سیستم هوشمند ترکیبی ارائه شده است. باهدف تحقق فرآیند کنترل سلسله مراتبی سه‌سطحی و به‌منظور اطمینان از سرعت و دقت پاسخ سیستم، سیستم‌های فرعی[۳] مختلفی طراحی و ساخته شده‌اند. در این پژوهش، عملکرد چندحالته مبدل‌های الکتریکی توان، سیستم را قادر می‌سازد تا در سناریوهای مختلف مورد بهره-برداری واقع شود. مدیریت منابع[۴] نیز به کنترل رله‌های هوشمند به-منظور تسهیل پیاده‌سازی اسکادا[۵] و افزایش سرعت پاسخگویی می-پردازد. سیستم بهره‌برداری ریزشبکه نیز به‌منظور هماهنگی تمام بخش‌های عملکردی باهدف تحقق زنجیره سوم از طرح کنترل سلسله مراتبی عمل‌می‌نماید. سهم عمده پژوهش [۶۸] ارائه روشی به‌منظور مدیریت بهینه انرژی در سیستم انرژی متشکل از هاب انرژی هوشمند می‌باشد. در این پژوهش ابتدا، مدل اصلی هاب انرژی هوشمند و مصرف‌کنندگان آن با لحاظ پاسخگویی بار و تأثیر ضریب توزیع گاز هاب انرژی هوشمند بر سود آن معرفی می‌شود. پس از آن یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر بازی استاکلبرگ طراحی شده است که در آن هاب انرژی هوشمند به عنوان رهبر و مصرف‌کننده به‌عنوان دنبال‌کننده نقش‌آفرینی می‌کنند. کسب حداکثر سود ممکن برای طرفین، هدف این مدل بیان شده و بازی تا حصول پاسخ متعادل متوقف نمی‌شود. همچنین در حوزه برنامه‌ریزی ساختاری هاب انرژی هوشمند باید توجه داشت با وجود تنوع ساختاری و مشخصه‌ای مبدل‌ها و ذخیره‌سازهای انرژی موجود در بازار، نحوه انتخاب نوع و ظرفیت این تجهیزات و به-دنبال آن نحوه اتصال و مدیریت تجهیزات منتخب از چالش‌های اصلی حوزه طراحی ساختاری سیستم‌های چند حاملی انرژی می‌باشد. براین اساس پژوهش [۶۹] بر ارائه یک مدل نوآورانه از برنامه‌ریزی ساخت و توسعه سیستم‌های چند حاملی انرژی هوشمند معطوف شده است. این چهارچوب قادر است تنظیمات بهینه ساختاری اجزا و استراتژی مدیریت انرژی هاب انرژی هوشمند را در قالب یک مدل خطی حاصل نماید. روش مدل‌سازی پژوهش [۷۰] نیز گواه بر ارائه مدلی بدیع از یک هاب انرژی هوشمند برمبنای مفهوم تاب‌آوری با عنوان نانوشبکه هوشمند می‌باشد. مدل پیشنهادی این پژوهش شامل منابع تولید پراکنده، ذخیره‌ساز و خودرو برقی، و نیز وسایل مصرف‌کننده انرژی می-باشدکه با هدف بهبود آسایش ساکنین ارائه شده است.

---

[۱] Compressed air energy storage

[۲] Scenario-based/interval/information gap decision theory

[۳] Sub-systems

[۴] Resource manager

[۵] SCADA: Supervisory control and data acquisition

## ۲-۶- هاب انرژی هوشمند به وسعت یک شهر هوشمند

همانطور که پیش از این اشاره شد، ادغام هاب‌های انرژی خرد، مفهومی به نام هاب انرژی کلان ایجاد می‌کند که در آن می‌توان مجموعه‌ای از هاب‌های انرژی را با هم کنترل و برنامه‌ریزی نمود. مدل هاب انرژی کلان می‌تواند در قالب یک شهر معرفی شود. با استفاده از مفهوم هاب-های انرژی هوشمند متشکل از برنامه‌های پاسخگویی بار و منابع تولید پراکنده که در بخش قبل معرفی شد ادغام این هاب‌های انرژی هوشمند می‌تواند منجر به شکل گیری شهر هوشمند از دیدگاه انرژی شود. لذا در این بخش شهر هوشمند به عنوان یک هاب کلان متشکل از هاب‌های انرژی هوشمند، بررسی می گردد.

شهر هوشمند با کمک مدیریت انعطاف‌پذیر زیرساخت‌های انرژی، تامین کارآمد و موثر انرژی را حاصل می‌نماید. در یک شهر هوشمند، مفهوم هاب انرژی می‌تواند حامل‌های مختلف انرژی را هماهنگ ساخته و زمینه تامین مصرف انرژی را به‌صورت بهینه فراهم سازد. هاب‌های انرژی می‌توانند انعطاف‌پذیری سیستم انرژی را افزایش داده و از ظرفیت استفاده نشده حامل‌های مختلف انرژی بهره ببرند. در پژوهش-های اخیر از مفهوم هاب انرژی در بسیاری از مسائل برنامه‌ریزی و بهره-برداری سیستم‌های انرژی در شهرهای انرژی هوشمند، مانند پاسخگویی بار، بهره‌برداری از سیستم و پخش بار بهینه انرژی بهره گرفته شده است. به‌عبارتی ساختمان‌ها یا مجتمع‌های موجود در شهر هوشمند هر کدام قادرند به‌مثابه هاب‌های انرژی رفتار کنند؛ ازاین‌رو می‌توان با تنظیم بهینه جریان انرژی بین آن‌ها هزینه‌های توزیع و بهره‌برداری از زیرساخت‌های انرژی را کمینه‌سازی نمود و به عبارتی و هزینه‌های مرتبط با تامین انرژی یک شهر هوشمند را کاهش داد[۷۱]. در پژوهش[۷۱] اذعان شده است که هاب انرژی بستری غنی در مورد چگونگی حصول، تبدیل و توزیع منابع انرژی در شهر هوشمند در اختیار بهره‌بردار قرار می‌دهد. با این حال، عدم قطعیت‌هایی مانند تولید منابع تجدیدپذیر، چالش‌هایی را در بهینه‌سازی مسائل حوزه هاب انرژی به وجود می‌آورد. به اذعان محققان این پژوهش، با استفاده از انعطاف‌پذیری منابع انرژی در بستر پخش بار بهینه هاب‌های انرژی مجاور، چالش مرتبط با عدم قطعیت تولید منابع تجدیدپذیر در شهر هوشمند، مرتفع می‌گردد. این مدل نوآورانه با کمک محدودیت‌های مبتنی بر شانس، شارش انرژی الکتریکی و گاز بین هاب‌ها را مدل‌سازی می‌نماید. محققان این مقاله ادعا دارند که این مدل چالش اضافه بار موقت در شبکه‌های انرژی واقعی را با تعامل بین هاب‌های مختلف حل می‌کند. از این رو این نوآوری نه‌تنها امنیت سیستم را تضمین می‌کند بلکه به کاهش یا تعویق سرمایه‌گذاری در شبکه نیز کمک می‌نماید. براین اساس به‌کمک مدل ارائه‌شده، بهره‌بردار شهر هوشمند می‌تواند با بهره‌گیری از هاب‌های انرژی، هدف بیشنه‌سازی نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر با کمترین هزینه را دنبال نماید. در [۷۲] نیز تاکید شده است که شهرها محوری‌ترین چالش توسعه پایدار هستند. رشد شهرنشینی، افزایش روزافزون استفاده از منابع انرژی تجدیدناپذیر و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از آن منجر به ایجاد انگیزه‌ای بالا در دولت‌ها برای اقدامات چاره اندیشانه می‌گردد. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ بخش مهمی از استراتژی آن‌ها در مقابله با چالش‌های ذکرشده است. در این پژوهش یک طرح کلی از یک شبکه انرژی ترکیبی ارائه شده است. براین‌مبنا از روش‌های بهینه‌سازی به-منظور ایجاد هماهنگی بین شبکه برق، شبکه گاز، منابع تولیدی دارای عدم‌قطعیت و تقاضای الکتریکی و حرارتی با لحاظ فن‌آوری تبدیل و ذخیره انرژی و با هدف اثبات مزایای ادغام زیرساخت‌های انرژی الکتریکی، حرارتی و گازی استفاده می‌شود. این مدل با هدف معرفی یک سیستم انرژی یکپارچه در چشم‌انداز شهری در حوزه بهره‌برداری و ایجاد مبنایی برای گسترش در قالب برنامه‌ریزی بلندمدت معرفی شده است. محققان در پژوهش[۷۳] به‌منظور تجزیه و تحلیل سریع سیستم-های چند حاملی انرژی پیشتر بر توسعه کلاسی از هاب‌های انرژی متمرکز شده‌اند که می‌تواند با توصیف مختصر سیستم در یک چهارچوب بهینه‌سازی محاسباتی کارآمد سیستم را مدل‌سازی نماید. سپس ضمن معرفی مدل‌های توسعه‌یافته هاب انرژی که در ابزار تجزیه و تحلیل سیستم چند حاملی انرژی (Hubert) تعبیه شده‌اند، مسئله توزیع اقتصادی بار برای یک طیف گسترده از سیستم‌های هاب انرژی حل می‌گردد. به‌طور خاص، در این مقاله پیشرفت‌های اخیر توسعه‌یافته در مدل‌سازی توسط Hubert، از جمله استفاده از مدل‌سازی تکه‌ای خطی در مقابل مدل غیرخطی تابع بهره‌وری مبدل، محدودیت در خروجی‌های هاب انرژی به‌منظور انعکاس محدودیت‌های فیزیکی مبدل‌ها و محدودیت انتشار هاب نیز مورد بررسی واقع شده است. بر-این‌اساس در این مقاله ادعا شده است که این پیشرفت‌ها در مدل‌سازی امکان مدل‌سازی مناسب ریزشبکه‌ها و شبکه‌های شهری مبتنی بر سیستم‌های چندحاملی انرژی را امکان پذیر می‌نماید. لذا این پژوهش به‌عنوان نمونه به ارائه یک مدل چند حاملی انرژی از پردیس دانشگاهی ورمونت تحت سناریوهای مختلف برنامه‌ریزی سرمایه گذاری و مفروضات مدل‌سازی پرداخته است. همچنین در این مقاله به‌منظور مقایسه مدل سنتی و مدل جدید توسعه یافته، نشان داده شده است که استفاده از مدل‌های هاب انرژی سنتی در مقایسه با فرمولاسیون دقیق-تر خطی هاب انرژی می‌تواند منجر به تخمین اندازه ذخیره‌سازهای انرژی کمتر از حد واقعی شود که منجر به نتایج ناصحیح از برنامه‌ریزی ساخت و توسعه هاب انرژی می‌گردد. در [۷۴] محققان یک روش برنامه‌ریزی خطی از مسئله پخش بار بهینه در یک سیستم چند حاملی انرژی ارائه داده‌اند. براین اساس در این پژوهش یک مدل هاب انرژی خطی مبتنی بر متغیر حالت توسعه داده شده است، که از معرفی متغیرهای توزیع[۱] که به‌طور معمول در مسئله پخش بار بهینه به-کارگرفته می‌شود، جلوگیری می‌کند. همچنین روش تقریب تکه‌ای خطی چندبعدی به‌منظور مدل‌سازی محدودیت‌های غیرمحدب انتقال گاز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در مقایسه با مدل‌های

[۱] Dispatch factor variables

غیرخطی، مدل پیشنهادی می‌تواند با سرعت نسبتا بالایی در محاسبات یک پاسخ بهینه از مسئله پخش بار بهینه فراهم سازد که براین مبنا می‌تواند در سیستم‌های هاب بزرگ با دقت کافی اعمال شود. نتایج این پژوهش همچنین بیانگر این نکته است که روش پیشنهادی نسبت به روش‌های خطی موجود در زمان محاسبه به‌ویژه در کاربردهای هاب‌ها در مقیاس بزرگتر بسیار موثرتر عمل می‌کند. اگر چه در این مقاله از شهر هوشمند صحبتی به میان نیامده اما به هر حال اعمال مدل پیشنهادی بر سیستم ۱۱۸ شینه که از ۵ هاب تشکیل شده و سیستم ۶ شینه که ۲ هاب را شامل می‌شود می‌تواند به عنوان مصداقی از مدل شهر هوشمند به شمار آید. در [۷۵] به بهبود برنامه‌های پاسخگویی بار مرسوم در شبکه هوشمند به‌منظور حصول یک برنامه پاسخگویی بار یکپارچه[۱] برای حامل‌های چندگانه ورودی یک هاب انرژی در شبکه هوشمند، پرداخته شده است. در مدل پیشنهادی این پژوهش برنامه پاسخگویی بار یکپارچه برای شبکه‌های برق و گاز طبیعی تدوین شده است. تعامل بین هاب‌های انرژی هوشمند به‌عنوان یک بازی بالقوه نظم با تعادل نش منحصر به‌فرد مدل‌سازی شده است. شالوده این پژوهش براین مبنا می‌باشد که مشتریان در هاب های انرژی هوشمند علاوه‌بر جابجایی زمانی مصرف، می‌توانند با تعویض منابع انرژی (به عنوان مثال، از برق به گاز طبیعی) در ساعات پیک در برنامه پاسخگویی بار یکپارچه شرکت کنند. علاوه‌براین، اجرای این برنامه می‌تواند سود روزانه هاب انرژی هوشمند و سود روزانه شرکت‌های برق را افزایش دهد. اگر چه در این مقاله نیز به شهر هوشمند اشاره‌ای نشده است اما مدل جامع پیشنهادی این پژوهش از سیستم شبکه هوشمند متشکل از یک شرکت برق، یک شرکت گاز طبیعی، تعدای هاب انرژی هوشمند، خطوط برق، خطوط لوله گاز طبیعی و پیوندهای ارتباطی بین هاب‌ها، مصرف‌کنندگان و شرکت‌ها می‌تواند به‌نوعی مفهوم شهر هوشمند را نیز تداعی نماید. پژوهشگران در [۷۶] اذعان نموده‌اند که در سالیان اخیر، اتحادیه اروپا فعالانه به تشویق ساختمان‌های مسکونی در جهت بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر و واحدهای تولید همزمان به‌منظور تامین برق‌شان پرداخته است. در این پژوهش ادعا شده است که یکپارچه‌سازی ساختمان‌های تجاری، اداری و مسکونی یا به عبارتی ترکیب چندین نوع پروفیل بار تا حد آستانه ده‌ها کیلو ولت، می‌تواند نصب واحدهای انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های تولید همزمان برق وحرارت یا سیستم‌های تولید همزمان برق، حرارت و برودت را تسهیل نموده و بر موانع فنی و اقتصادی پیش‌روی استفاده از این منابع غلبه کند. در این پژوهش همچنین اشاره شده است که سیستم توزیع فعلی شامل مشتریان ولتاژ پایین برای تحقق این هدف ناکافی به‌نظر می‌رسد. از این‌رو در این مقاله نویسندگان به طراحی یک ریزسیستم انرژی پایدار[۲] به‌منظور ادغام زیر سیستم‌های مختلف و در حال حاضر مستقل، ازجمله ساختمان‌ها، منابع تولید پراکنده شامل واحدهای تجدیدپذیر و واحدهای تولید همزمان و زیر سیستم‌های حمل و نقل شهری شامل مترو، تراموا و وسایل نقلیه هیبریدی و برقی پرداخته‌اند. در این پژوهش ادغام این زیرساخت‌ها در بستر مفهوم "شهر هوشمند" با مدیریت بهینه و یکپارچه خدمات مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. براین اساس ساختمان‌های یکپارچه شده در "هاب انرژی" ضمن ترکیب با منابع تولید پراکنده و سیستم حمل و نقل شهری، "جزایر انرژی" شبکه هوشمند آینده را تشکیل می‌دهند.

## ۷- نتیجه‌گیری

این پژوهش به مرور آخرین دستاوردهای تحقیقاتی محققان در حوزه هاب انرژی پرداخته است. براین‌اساس از منظرهای متنوعی به بررسی نوآوری تحقیقات این حوزه پرداخته شده است. ابتدا از دیدگاه افق زمانی مطالعه پژوهش‌های شاخه تحقیقاتی هاب انرژی در دو دسته با افق بلندمدت برنامه‌ریزی توسعه و با افق کوتاه‌مدت برنامه‌ریزی بهره‌برداری، مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از آن با دیدگاه مدل‌سازی نواحی جغرافیایی متنوع با مختصات مختلف مکانی، مطالعات هاب انرژی در دو دسته هاب انرژی خرد و هاب انرژی کلان مورد بازبینی قرار می‌گیرد. در آخرین بخش نیز به‌دلیل اهمیت بیش‌ازپیش مفاهیم هوشمندسازی، تحقیقات حوزه هاب انرژی هوشمند در بستر شهر هوشمند به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین اهداف ارائه این پژوهش، مورد مطالعه و ارزیابی واقع شده است. علاوه‌بر این ضمن بررسی سیر پژوهشی حوزه هاب انرژی، به بررسی کتاب شناختی این حوزه نیز پرداخته می‌شود. به‌طور خلاصه به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی سیستم‌های مبتنی بر هاب انرژی می‌توان به این نکته اشاره کرد که؛ اجزای درون هاب قادرند اتصالات اضافی بین ورودی و خروجی برقرار نمایند. این افزونگی در تأمین انرژی منجر به دو مزیت مهم می‌شود که تنها بر مبنای مفهوم هاب انرژی قابل دستیابی است. اول اینکه می‌توان در این بستر قابلیت اطمینان تأمین از دید بار را افزایش داد زیرا تامین تقاضا دیگر به‌طور کامل به یک شبکه واحد وابسته نیست. دوم، درجه اضافی آزادی موجود در انتخاب حامل‌های تامین تقاضا در بستر هاب انرژی امکان بهینه‌سازی تامین هاب را فراهم می‌کند. این دو مفهوم از اصلی‌ترین عوامل ایجاد انگیزه در محققان در جهت پژوهش در مفهوم هاب انرژی می‌باشد. ورود مفاهیم هوشمندسازی به این حوزه نیز به مزایای استفاده از بستر هاب انرژی بیش‌ازپیش می‌افزاید. بر این اساس می‌توان بیان داشت که بر اساس آنچه در بخش مقدمه از امنیت انرژی به عنوان یکی از چالش‌های عصر حاضر برای کشورهای مختلف جهان یاد شد، جز با حضور شهرهای انرژی هوشمند تحقق نمی‌یابد.

## مراجع

[۱] IDR: Integrated demand response

[۲] SEM: Sustainable energy microsystem

[1] Sovacool, B.K., Valentine, S.V., Bambawale, M.J., Brown, M.A., de Fátima Cardoso, T., Nurbek, S., Suleimenova, G., Li, J., Xu, Y., Jain, A. and Alhajji, A.F., 2012. Exploring propositions about perceptions of energy security: An international survey. *Environmental science & policy*, *16*, pp.44-64.

[2] Mohammadi, M., Noorollahi, Y., Mohammadi-Ivatloo, B. and Yousefi, H., 2017. Energy hub: from a model to a concept–a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *80*, pp.1512-1527.

[۳] مهدی نوذریان، علیرضا فریدونیان محیطی هاب " ارزیابی اقتصادی و زیست انرژی با سیستم توزیع ترکیبی و انرژی خورشیدی"، پنجمین کنفرانس بین المللی فن آوری و مدیریت انرژی، تهران، ایران، زمستان ۱۳۹۷.

[4] Daneshvar, M., Mohammadi-Ivatloo, B., Asadi, S., Zare, K. and Anvari-Moghaddam, A., 2019, September. Optimal Day-Ahead Scheduling of the Renewable Based Energy Hubs Considering Demand Side Energy Management. In *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)* (pp. 1-6). IEEE.

[۵] مهدی نوذریان، علیرضا فریدونیان " بهره‌برداری بهینه ریزشبکه‌های شامل هاب های انرژی به‌هم‌پیوسته با حضور پاسخگویی بار و منابع تولید پراکنده"، کنفرانس شبکه های هوشمند انرژی ۹۸، تهران، ایران، آذرماه ۱۳۹۸.

[6] Geidl, M., Koeppel, G., Favre-Perrod, P., Klockl, B., Andersson, G. and Frohlich, K., 2006. Energy hubs for the future. *IEEE power and energy magazine*, *5*(1), pp.24-30.

[7] Geidl, M., Koeppel, G., Favre-Perrod, P., Klöckl, B., Andersson, G. and Fröhlich, K., 2007, March. The Energy Hub–A powerful concept for future energy systems. In *Third annual Carnegie mellon conference on the electricity industry* (Vol. 13, p. 14).

[8] Favre-Perrod, P., 2005, July. A vision of future energy networks. In *2005 IEEE power engineering society inaugural conference and exposition in Africa* (pp. 13-17). IEEE.

[9] Sadeghi, H., Rashidinejad, M., Moeini-Aghtaie, M. and Abdollahi, A., 2019. The energy hub: An extensive survey on the state-of-the-art. *Applied Thermal Engineering*, p.114071.

[10] Khalilpour, K.R. ed., 2018. *Polygeneration with Polystorage: For Chemical and Energy Hubs*. Academic Press.

[11] Shi, Y., Liu, M. and Fang, F., 2017. *Combined Cooling, Heating, and Power Systems: Modeling, Optimization, and Operation*. John Wiley & Sons.

[12] La Scala, M., Bruno, S., Nucci, C.A., Lamonaca, S. and Stecchi, U. eds., 2017. *From smart grids to smart cities: new challenges in optimizing energy grids*. John Wiley & Sons.

[13] Mahmud, A., 2014. Large scale renewable power generation.

[14] Rajakaruna, S., Shahnia, F. and Ghosh, A., 2016. *Plug in electric vehicles in smart grids*. Springer Verlag, Singapor.

[15] Soroudi, A., 2017. *Power system optimization modeling in GAMS* (Vol. 78). Switzerland: Springer.

[16] Mohammadi-Ivatloo, B. and Jabari, F. eds., 2018. *Operation, planning, and analysis of energy storage systems in smart energy hubs*. Springer.

[17] Zobaa, A.F., Aleem, S.H.A. and Abdelaziz, A.Y. eds., 2018. *Classical and Recent Aspects of Power System Optimization*. Academic Press.

[18] Pazouki, S. and Haghifam, M.R., 2016. Optimal planning and scheduling of energy hub in presence of wind, storage and demand response under uncertainty. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 80, pp.219-239.

[19] Wang, Y., Zhang, N., Zhuo, Z., Kang, C. and Kirschen, D., 2018. Mixed-integer linear programming-based optimal configuration planning for energy hub: Starting from scratch. *Applied energy*, *210*, pp.1141-1150.

[20] Yang, F., Yuan, X., Bai, H., Yin, S. and Liu, H., 2018, September. Collaborative Planning of Integrated Natural Gas and Power Supply System Considering P2G Technique. In *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)* (pp. 2216-2220). IEEE.

[21] Huang, W., Zhang, N., Yang, J., Wang, Y. and Kang, C., 2017. Optimal configuration planning of multi-energy systems considering distributed renewable energy. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *10*(2), pp.1452-1464.

[22] Ghasemi, H., Aghaei, J., Gharehpetian, G.B. and Haeri, H., 2019, September. Effect of Smart Multiple Hub Planning on Distribution Networks Integrated Expansion. In *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)* (pp. 1-6). IEEE.

[23] Wang, J., Hu, Z. and Xie, S., 2019. Expansion planning model of multi-energy system with the integration of active distribution network. *Applied Energy*, *253*, p.113517.

[24] Zhu, X., Zeng, B., Dong, H. and Liu, J., 2019. An interval-prediction based robust optimization approach for energy-hub operation scheduling considering flexible ramping products. *Energy*, p.116821.

[25] Rakipour, D. and Barati, H., 2019. Probabilistic optimization in operation of energy hub with participation of renewable energy resources and demand response. *Energy*, *173*, pp.384-399.

[26] Jamalzadeh, F., Mirzahosseini, A.H., Faghihi, F. and Panahi, M., 2019. Optimal operation of energy hub system using hybrid stochastic-interval optimization approach. *Sustainable Cities and Society*, p.101998.

[27] Jadidbonab, M., Dolatabadi, A., Mohammadi-Ivatloo, B., Abapour, M. and Asadi, S., 2019. Risk-constrained energy management of PV integrated smart energy hub in the presence of demand response program and compressed air energy storage. *IET Renewable Power Generation*, *13*(6), pp.998-1008.

[28] Daneshvar, M., Mohammadi-Ivatloo, B., Asadi, S., Zare, K. and Anvari-Moghaddam, A., 2019, September. Optimal Day-Ahead Scheduling of the Renewable Based Energy Hubs Considering Demand Side Energy Management. In *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)* (pp. 1-6). IEEE.

[29] Chamandoust, H., Derakhshan, G., Hakimi, S.M. and Bahramara, S., 2019. Tri-objective optimal scheduling of smart energy hub system with schedulable loads. *Journal of Cleaner Production*, *236*, p.117584.

[30] Cao, Y., Wang, Q., Du, J., Nojavan, S., Jermsittiparsert, K. and Ghadimi, N., 2019. Optimal operation of CCHP and renewable generation-based energy hub considering environmental perspective: An epsilon constraint and fuzzy methods. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, *20*, p.100274.

[31] Eladl, A.A., El-Afifi, M.I., Saeed, M.A. and El-Saadawi, M.M., 2020. Optimal operation of energy hubs integrated with renewable energy sources and storage devices considering CO2 emissions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *117*, p.105719.

[32] Lu, X., Liu, Z., Ma, L., Wang, L., Zhou, K. and Feng, N., 2019. A robust optimization approach for optimal load dispatch of community energy hub. *Applied Energy*, p.114195.

[33] Kamyab, F. and Bahrami, S., 2016. Efficient operation of energy hubs in time-of-use and dynamic pricing electricity markets. *Energy*, *106*, pp.343-355.

[34] Li, Y., Li, Z., Wen, F. and Shahidehpour, M., 2018. Privacy-Preserving Optimal Dispatch for an Integrated Power Distribution and Natural Gas System in Networked Energy Hubs. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *10*(4), pp.2028-2038.

[35] Ma, R., Deng, J., Li, H. and Qin, J., 2017, November. Improved particle swarm optimization algorithm to multi-objective optimization energy hub model with P2G and energy storage. In *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)* (pp. 1-6). IEEE.

[36] Shahmohammadi, A., Moradi-Dalvand, M., Ghasemi, H. and Ghazizadeh, M.S., 2014. Optimal design of multicarrier energy systems considering reliability constraints. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *30*(2), pp.878-886.

[37] Cheng, Y., Zhang, N., Zhang, B., Kang, C., Xi, W. and Feng, M., 2019. Low-Carbon Operation of Multiple Energy Systems Based on Energy-Carbon Integrated Prices. *IEEE Transactions on Smart Grid*.

[38] Moghaddas-Tafreshi, S.M., Jafari, M., Mohseni, S. and Kelly, S., 2019. Optimal operation of an energy hub considering the

uncertainty associated with the power consumption of plug-in hybrid electric vehicles using information gap decision theory. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *112*, pp.92-108.
[39] Pazouki, S. and Haghifam, M.R., 2014, December. Impact of energy storage technologies on multi carrier energy networks. In *2014 Smart Grid Conference (SGC)* (pp. 1-6). IEEE.
[40] Javadi, M.S., Branch, S., Anvari-Moghaddam, A., Guerrero, J.M., Nezhad, A.E., Lotfi, M. and Catalão, J.P., 2019. Optimal Operation of an Energy Hub in the Presence of Uncertainties. In *19th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 2019)* (pp. 1-4). IEEE Press.
[41] Zhao, P., Gu, C., Huo, D., Shen, Y. and Hernando-Gil, I., 2019. Two-Stage Distributionally Robust Optimization for Energy Hub Systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*.
[42] Mohammadi, M., Noorollahi, Y., Mohammadi-ivatloo, B., Hosseinzadeh, M., Yousefi, H. and Khorasani, S.T., 2018. Optimal management of energy hubs and smart energy hubs–a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *89*, pp.33-50
[43] Pazouki, S., Mohsenzadeh, A., Ardalan, S. and Haghifam, M.R., 2016. Optimal place, size, and operation of combined heat and power in multi carrier energy networks considering network reliability, power loss, and voltage profile. IET Generation, Transmission & Distribution, 10(7), pp.1615-1621.
[44] Homayouni, F., Roshandel, R. and Hamidi, A.A., 2017. Sizing and performance analysis of standalone hybrid photovoltaic/battery/hydrogen storage technology power generation systems based on the energy hub concept. *International journal of green energy*, *14*(2), pp.121-134.
[45] Senemar, S., Rastegar, M., Dabbaghjamanesh, M. and Hatziargyriou, N.D., 2019. Dynamic Structural Sizing of Residential Energy Hubs. IEEE Transactions on Sustainable Energy.
[46] Senemar, S., Seifi, A.R., Rastegar, M. and Parvania, M., 2019. Probabilistic optimal dynamic planning of onsite solar generation for residential energy hubs. *IEEE Systems Journal*.
[47] Setlhaolo, D., Sichilalu, S. and Zhang, J., 2017. Residential load management in an energy hub with heat pump water heater. *Applied energy*, *208*, pp.551-560.
[48] Hanafizadeh, P., Eshraghi, J., Ahmadi, P. and Sattari, A., 2016. Evaluation and sizing of a CCHP system for a commercial and office [1] buildings. *Journal of Building Engineering*, *5*, pp.67-78.
[49] Syed, F., Fowler, M., Wan, D. and Maniyali, Y., 2010. An energy demand model for a fleet of plug-in fuel cell vehicles and commercial building interfaced with a clean energy hub. *International Journal of Hydrogen Energy*, *35*(10), pp.5154-5163.
[50] Paudyal, S., Cañizares, C.A. and Bhattacharya, K., 2014. Optimal operation of industrial energy hubs in smart grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *6*(2), pp.684-694.
[51] Khodaei, H., Hajiali, M., Darvishan, A., Sepehr, M. and Ghadimi, N., 2018. Fuzzy-based heat and power hub models for cost-emission operation of an industrial consumer using compromise programming. *Applied Thermal Engineering*, *137*, pp.395-405.
[52] Shamshirband, S., Khoshnevisan, B., Yousefi, M., Bolandnazar, E., Anuar, N.B., Wahab, A.W.A. and Khan, S.U.R., 2015. A multi-objective evolutionary algorithm for energy management of agricultural systems—a case study in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *44*, pp.457-465.
[53] Blancard, S. and Martin, E., 2014. Energy efficiency measurement in agriculture with imprecise energy content information. *Energy Policy*, *66*, pp.198-208.
[54] Marquant, J.F., Evins, R. and Carmeliet, J., 2015. Reducing computation time with a rolling horizon approach applied to a MILP formulation of multiple urban energy hub system. *Procedia Computer Science*, *51*, pp.2137-2146.
[55] Gholinejad, H.R., Loni, A., Adabi, J. and Marzband, M., 2020. A hierarchical energy management system for multiple home energy hubs in neighborhood grids. *Journal of Building Engineering*, *28*, p.101028.
[56] Bostan, A., Nazar, M.S., Shafie-khah, M. and Catalão, J.P., 2019. Optimal scheduling of distribution systems considering multiple downward energy hubs and demand response programs. *Energy*, p.116349.
[57] Luo, X., Liu, Y., Liu, J. and Liu, X., 2020. Energy scheduling for a three-level integrated energy system based on energy hub models: A hierarchical Stackelberg game approach. *Sustainable Cities and Society*, *52*, p.101814.
[58] Liu, T., Zhang, D. and Wu, T., 2020. Optimal operation of interconnected energy hubs by using decomposed hybrid particle swarm and interior-point approach. *Energy conversion and management*, *Volume 205, 1 February 2020, 112410.*
[59] Huo, D., Le Blond, S., Gu, C., Wei, W. and Yu, D., 2018. Optimal operation of interconnected energy hubs by using decomposed hybrid particle swarm and interior-point approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *95*, pp.36-46.
[60] Zhang, X., Che, L., Shahidehpour, M., Alabdulwahab, A.S. and Abusorrah, A., 2015. Reliability-based optimal planning of electricity and natural gas interconnections for multiple energy hubs. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *8*(4), pp.1658-1667.
[61] Ghorab, M., 2019. Energy hubs optimization for smart energy network system to minimize economic and environmental impact at Canadian community. *Applied Thermal Engineering*, *151*, pp.214-230.
[62] Sobhani, S.O., Sheykhha, S., Azimi, M.R. and Madlener, R., 2019. Two-Level Distributed Demand-Side Management Using the Smart Energy Hub Concept. *Energy Procedia*, *158*, pp.3052-3063.
[63] Jadidbonab, M., Babaei, E. and Mohammadi-ivatloo, B., 2019. CVaR-constrained scheduling strategy for smart multi carrier energy hub considering demand response and compressed air energy storage. *Energy*, *174*, pp.1238-1250.
[64] Liu, T., Zhang, D., Dai, H. and Wu, T., 2019. Intelligent Modeling and Optimization for Smart Energy Hub. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
[65] Jadidbonab, M., Dolatabadi, A., Mohammadi-Ivatloo, B., Abapour, M. and Asadi, S., 2019. Risk-constrained energy management of PV integrated smart energy hub in the presence of demand response program and compressed air energy storage. *IET Renewable Power Generation*, *13*(6), pp.998-1008.
[66] Majidi, M. and Zare, K., 2018. Integration of smart energy hubs in distribution networks under uncertainties and demand response concept. *IEEE Transactions on Power Systems*, *34*(1), pp.566-574.
[67] Xiao, J., Zhao, T., Hai, K.L. and Wang, P., 2017, November. Smart energy hub—Modularized hybrid AC/DC microgrid: System design and deployment. In *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)* (pp. 1-6). IEEE.
[68] Zhou, L., Liu, N. and Zhang, Y., 2018, October. Energy Management for Smart Energy Hub Considering Gas Dispatch Factor and Demand Response. In *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)* (pp. 1-6). IEEE.
[69] Ma, T., Wu, J., Hao, L., Lee, W.J., Yan, H. and Li, D., 2018. The optimal structure planning and energy management strategies of smart multi energy systems. *Energy*, *160*, pp.122-141.
[۷۰] سعید باقری، حسین طالبی و علیرضا فریدونیان "بهره‌برداری تاب‌آور، رفاهی و اقتصادی نانوشبکه هوشمند" مجله کنترل، جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷.
[71] Huo, D., Gu, C., Ma, K., Wei, W., Xiang, Y. and Le Blond, S., 2018. Chance-constrained optimization for multienergy hub systems in a smart city. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *66*(2), pp.1402-1412.
[72] Van Beuzekom, I., Mazairac, L.A.J., Gibescu, M. and Slootweg, J.G., 2016, April. Optimal design and operation of an integrated multi-energy system for smart cities. In *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)* (pp. 1-7). IEEE.
[73] Almassalkhi, M.R. and Towle, A., 2016, June. Enabling city-scale multi-energy optimal dispatch with energy hubs. In *2016 Power Systems Computation Conference (PSCC)* (pp. 1-7). IEEE.
[74] Shao, C., Wang, X., Shahidehpour, M., Wang, X. and Wang, B., 2016. An MILP-based optimal power flow in multicarrier energy systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *8*(1), pp.239-248.
[75] Bahrami, S. and Sheikhi, A., 2015. From demand response in smart grid toward integrated demand response in smart energy hub. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *7*(2), pp.650-658.

[76] Brenna, M., Falvo, M.C., Foiadelli, F., Martirano, L., Massaro, F., Poli, D. and Vaccaro, A., 2012, September. Challenges in energy systems for the smart-cities of the future. In *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON)* (pp. 755-762). IEEE.