علوم رایانش و فناوری اطلاعات
نشریه علمی انجمن کامپیوتر ایران
مجلد ۱۸، شماره ۲، ۱۳۹۹
صفحات ۷۷- ۹۳
مقاله عادی

مروری بر مشارکت مراکز داده توزیع‌شده در برنامه‌های پاسخ تقاضای شبکه هوشمند برق

منیره محبی مقدم[۱]، محمدحسین منشئی[۲*]

[*]محمدحسین منشئی، دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۸، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۷

[۱] دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر ، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

با افزایش روزافزون استفاده از خدمات رایانش ابری و سرویس‌های اینترنت، ارائه‌دهندگان این سرویس‌ها ترغیب می‌شوند تا مراکز داده بزرگتر و به تعداد بیشتر ایجاد نمایند. در سال‌های اخیر، میزان انرژی مصرفی این مراکز به طور چشمگیری افزایش یافته است که تاثیرات قابل توجهی نیز بر کارایی شبکه برق دارد. پاسخ تقاضای مراکز داده یکی از راه‌حل‌های موثر به منظور تشویق اپراتورهای مراکز داده برای تطبیق میزان مصرفشان با شرایط شبکه است. مشارکت موثر مراکز داده نه تنها می‌تواند بر کارایی شبکه برق تاثیر بگذارد، بلکه سبب کاهش هزینه‌های برق مصرفی سرویس‌دهندگان خواهد شد. اپراتورهای مراکز داده نه تنها امکان شیفت زمانی بارهای کاری خود را دارند، بلکه با بهره‌گیری از مراکز داده توزیع‌شده و همچنین از طریق همکاری با یکدیگر در قالب اتحادیه‌ها می‌توانند بارهای کاری خود را بصورت مکانی مهاجرت داده، تا از مزایای فراهم شده توسط برنامه‌های پاسخ تقاضای وابسته به مکان نیز بهره‌مند شوند. در این راستا، پژوهشگران راهکارهای گوناگونی را برای بهره‌گیری از انعطاف مراکز داده توزیع‌شده به منظور بهبود مشارکت آن‌ها در برنامه‌های پاسخ تقاضا ارائه کرده‌اند. این مقاله به مرور و دسته-بندی این روش‌ها می‌پردازد. در این راستا، در ابتدا، پیش‌زمینه‌ای در مورد مفاهیمی همچون شبکه هوشمند برق، برنامه‌های پاسخ تقاضا، تعامل مراکز داده با شبکه و اتحادیه‌های ابری بیان شده است. در ادامه به مرور و دسته‌بندی پژوهش‌های انجام شده در حوزه مورد بحث پرداخته شده است. در پایان نیز کاستی‌ها و مسیر پیش روی این حوزه بیان شده است.

کلمات کلیدی: مدیریت انرژی، مراکز داده توزیع‌شده، پاسخ تقاضا، شبکه هوشمند برق، اتحادیه ابری.

۱- مقدمه

شبکه هوشمند[۱] برق با هدف رفع مشکلات شبکه برق سنتی و به منظور مدیریت بهتر تقاضای انرژی مطرح شد. این سیستم نوین با بهره‌گیری از تکنولوژی ارتباطات، یک جریان دو طرفه اطلاعات را بین مشتریان، اپراتور شبکه و تولیدکنندگان فراهم می‌آورد تا انرژی در شیوه‌ای خودکار به مشتری تحویل داده شود [۱]. یکی از بخش‌های اصلی شبکه هوشمند، برنامه‌های پاسخ تقاضا[۲] هستند اپراتور شبکه برق که از طریق آنها مشتریان را ترغیب می‌نماید تا میزان مصرف خود را با شرایط شبکه تطبیق دهند که نه تنها برای شبکه برق، بلکه برای مشتریان نیز از جهت کاهش هزینه برق و دستیابی به سود مالی سودمند خواهد بود [۲].

یکی از انواع مشتریان پرمصرف شبکه برق، مراکز داده[۳] خصوصاً مراکز داده ارائه‌دهنده سرویس‌های رایانش ابری[۴] و همچنین سرویس‌های اینترنتی هستند [۳]. در رایانش ابری خدمات محاسباتی بر پایه مدل پرداخت به اندازه مصرف[۵] به مشتریانش ارائه می‌شود. در این تکنولوژی، همه چیز از زیرساخت‌های سخت‌افزاری گرفته تا نرم‌افزارهای مختلف، در قالب سرویس به مشتری ارائه می‌شود و کاربران می‌توانند به این خدمات در هر زمان و از هر جا از طریق اینترنت دسترسی داشته باشند. استفاده از این تکنولوژی به دلیل مزایای آن همچون سرویس‌دهی برحسب تقاضا[۶]، دسترسی فراگیر به شبکه، افزایش کارایی، دسترسی آسان از طریق اینترنت به منابع وسیع، و کاهش هزینه‌ها روزبه‌روز در حال افزایش است [۴].

بخش عمده رایانش ابری و سرویس‌های اینترنتی در حال حاضر مبتنی بر مراکز داده هستند که روز به روز بر تعداد آنها افزوده می شود و میزان برق مصرفی و هزینه ناشی از آن برای اپراتورها رقم قابل توجهی است. تعداد مراکز داده با مقیاس خیلی بزرگ[۷] از ۳۳۸ عدد در سال ۲۰۱۶ به ۴۳۰ عدد در سال ۲۰۱۸ رسیده است و پیش‌بینی می‌شود به ۶۲۸ عدد در سال ۲۰۲۱ خواهد رسید. همچنین پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۲۱، ۹۴ درصد از بارهای کاری و پردازش‌ها توسط مراکز داده متعلق به رایانش ابری پردازش شوند، و تنها ۶ درصد پردازش‌ها توسط مراکز داده سنتی پردازش شوند [۵] ,[۶]. این در حالی است که تعداد مراکز

داده در سایر مقیاس‌های بزرگ، متوسط و کوچک نیز رقم قابل توجهی است. مطالعات نشان می‌دهند مراکز داده ۱/۱ تا ۱/۵ درصد از کل برق مصرفی جهان را در سال ۲۰۱۰ به خود اختصاص داده‌اند [۷]. این میزان در ۲۰۱۶ به ۳ درصد، معادل ۴۱۶ تراوات ساعت رسیده است که تقریباً ۴۰ درصد بیشتر از کل مصرف برق انگلستان است و این میزان مصرف هر ۴ سال دو برابر می‌شود. آمارها نشان می‌دهند که میزان برق مصرفی مراکز داده موجود در آمریکا بیش از ۹۰ تراوات ساعت در سال است، که تامین این میزان انرژی، نیازمند فعالیت ۳۴ معدن زغال‌سنگ بسیار بزرگ (با حجم ۵۰۰ مگا وات) است [۵]. بعلاوه، میزان تقاضای زیاد این مراکز اثرات نامطلوبی بر اکوسیستم و پایداری[۸] محیط زیست دارد. آمارها نشان می‌دهند که ۲ درصد از کل دی اکسیدکربن تولیدی در جهان مربوط به تجهیزات آی‌تی است که ۱۴ درصد از آن، متعلق به مراکز داده است. ضمن این که سریع‌ترین میزان رشد انتشار کربن در این بخش نیز به این مراکز تعلق دارد [۸], [۹]. بطور نمونه، تامین انرژی مورد نیاز سرورهای گوگل سالانه سبب تولید ۱/۵ میلیون تن کربن می‌شود [۱۰].

مشارکت این دسته از مشتریان در برنامه‌های پاسخ تقاضا نه تنها بدلیل میزان مصرف زیاد انرژی، بلکه به جهت انعطافی که به همراه می‌آورند، حائز اهمیت است. مطالعات تجربی که توسط محققان آزمایشگاه ملی لارنس برکلی[۹] انجام گرفته است، حاکی از آن است که به ترتیب، ۵ و ۱۰ درصد از توان مصرفی این مراکز می‌تواند ظرف مدت ۵ و ۱۵ دقیقه کاهش داده شود. این میزان کاهش، بدون تغییر در نحوه سرویس‌دهی به درخواست‌ها و بارهای کاری[۱۰] دریافتی از سمت کاربران انجام می‌پذیرد [۱۱]. با استفاده از روش‌های مدیریت بار کاری می‌توان این میزان را افزایش داد. مراکز داده نه تنها می‌توانند بارهای مصرفی خود را از نظر زمانی شیفت دهند، بلکه می‌توانند انعطافی از نوع مهاجرت مکانی[۱۱] بارهای کاری فراهم آوردند که در نتیجه این مهاجرت، بارهای مصرفی در شبکه برق از یک مکان جغرافیایی به مکان دیگر منتقل خواهند شد و از این نظر یکی از منابع مهم و حائز اهمیت برای شرکت در برنامه‌های پاسخ تقاضا به شمار می‌روند [۳], [۱۲]. مطالعات انجام گرفته بر مزایای اقتصادی مهاجرت مکانی در مقایسه با مهاجرت زمانی بار مصرفی صحه می‌گذارد [۱۳].

علاوه بر آن، مراکز داده راه‌کاری موثر برای تجمیع انرژی‌های تجدیدپذیر[۱۲] در شبکه محسوب می‌شوند. یکی از ساده‌ترین راه‌حل‌ها برای این منظور، استفاده از ذخیره‌سازهای بزرگ مقیاس و با امکان شارژ سریع است که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. مراکز داده به عنوان بارهای قابل کنترل می‌توانند جایگزین خوبی برای ذخیره‌سازهای بزرگ در جهت تجمیع بهتر انرژی‌های نو باشند [۱۴]. ضمن این که اپراتورهای ابری می‌توانند با مسیریابی بارهای کاری به سمت مراکز خودمولد[۱۳] دارای منابع انرژی تجدیدپذیر یا نواحی دارای واحدهای تولید انرژی تجدیدپذیر تاثیرات نامطلوب زیست محیطی خود را کاهش دهد [۱۰]. از طرف دیگر این مشارکت می‌تواند با کاهش هزینه انرژی به سود اپراتورهای ابری[۱۴] نیز باشد. در حال حاضر، صورتحساب پرداختی برق دو شرکت گوگل و مایکروسافت سالانه به ترتیب بیش از ۶۷ و ۳۶ میلیون دلار است. با افزایش تعرفه برق و همچنین میزان مصرف، صورتحساب برق یک مرکز داده نوعی[۱۵] هر ۵ سال دو برابر می‌شود که بخش زیادی از هزینه‌ها را شامل می‌شود [۹], [۱۵]. بنابراین حضور در برنامه‌های پاسخ تقاضا به صورت بالقوه می‌تواند هزینه‌های این اپراتورها را کاهش دهد. بعلاوه، اپراتورها می‌توانند با حضور در برنامه‌هایی همانند برنامه‌های کاهش بار یا ارائه سرویس‌های جانبی[۱۶] کسب درآمد کنند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که حضور مراکز داده در برنامه‌های پاسخ تقاضا یک بازی برد-برد برای هر دو طرف خواهد بود.

اگرچه مشارکت مراکز داده در برنامه‌های پاسخ تقاضا اخیراً مورد توجه محققان قرار گرفته است، اما مدیریت انرژی مراکز داده از جمله مباحثی است که در دهه‌های اخیر بسیار به آن پرداخته شده است و پژوهش‌های گوناگون، راهکارهای مختلفی را برای این منظور ارائه داده‌اند. در میان راه‌کارهای پیشنهادی در این حوزه، یکی از مفاهیم نوظهور، مبحث اتحادیه ابری[۱۷] است. رویکرد اتحادیه ابری که بر تجمیع و همکاری بین سرویس‌دهندگان ابری تاکید و تمرکز دارد، در ابتدا به منظور رفع محدودیت‌های ساختار فعلی رایانش ابری و در جهت تحقق تبدیل این صنعت به یک صنعت همگانی ارائه شد. اتحادیه‌های ابری مزایای گوناگونی از جمله بهره‌وری بهتر منابع، افزایش سود اقتصادی، و بازیابی بهتر در زمان حوادث را به همراه خواهند داشت [۱۶]. اخیراً محققان به این نتیجه رسیده‌اند که این ساختار، علاوه بر موارد اشاره شده، می‌تواند از دیدگاه انرژی نیز سودمند باشد چرا که انعطاف بیشتری را در مباحث مدیریت انرژی نسبت به ساختار فعلی فراهم می‌آورد. از این رو، همکاری بین اپراتورهای مراکز داده در قالب اتحادیه‌ها، و از طریق مهاجرت بارهای کاری از یک مرکز داده به مراکز داده دیگر قرار گرفته در نواحی با تعرفه انرژی کمتر می‌تواند با کاهش هزینه انرژی مصرفی سبب افزایش سود اپراتورها گردد. ضمناً این مهاجرت می‌تواند به تعادل بهتر میان عرضه و تقاضای برق نیز کمک کند [۱۷].

تاکنون مطالعات زیادی در جهت تسهیل حضور مراکز داده در برنامه‌های پاسخ تقاضای شبکه هوشمند برق انجام گرفته است که هر کدام به نوعی تلاش کرده‌اند تا چالش‌های این حوزه را مخاطب قرار دهند و از انعطاف فراهم شده توسط این دسته از مشتریان به نفع هر دو طرف بهره گیرند. در این میان، پاره‌ای مطالعات به مشارکت مراکز داده توزیع‌شده در برنامه‌های پاسخ تقاضا پرداخته‌اند (برای مثال[۱۸]–[۲۱]) تا با بهره‌گیری از انعطاف ناشی از مسیریابی مجدد و مهاجرت بارهای کاری، از تنوع قیمت برق و میزان تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در نواحی مختلف جغرافیایی بهره ببرند. البته این نوع مشارکت به اپراتورهای بزرگ دارای مراکز داده توزیع‌شده محدود می‌شود و سایر اپراتورها از آن بی‌بهره خواهند بود. اما همکاری بین اپراتورها در قالب اتحادیه‌ها می‌تواند این محدودیت را تقلیل دهد. در این راستا، برخی پژوهش‌ها به چگونگی تعامل مراکز داده و شبکه هوشمند با در نظر گرفتن امکان همکاری بین اپراتورهای مراکز داده پرداخته‌اند. هدف از این مطالعات، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، یا افزایش سود سرویس‌دهندگان از طریق کاهش هزینه‌های انرژی مصرفی است [۱۸], [۲۲], [۲۳].

در مطالعات پیشین، مقالات مروری مختلفی وجود دارد که به جنبه‌های مختلف مدیریت انرژی مراکز داده و یا مشارکت آن‌ها در برنامه‌های پاسخ تقاضا پرداخته‌اند. [۱۱] با هدف درک بهتر فرصت‌های DR در مراکز داده و همچین ارزیابی استراتژی‌های DR در تجهیزات آی‌تی همانند سرورها و ذخیره‌سازها و همچنین سیستم خنک‌کنندگی در مطالعات و تست‌های میدانی ارائه شده است. [۱۲] به بررسی و مرور فرصت‌ها و چالش‌های پاسخ تقاضای مراکز داده پرداخته است. نویسندگان در [۳] مراکز داده اینترنتی[۱۸] را مخاطب قرار داده‌اند و مروری بر بخش‌های اصلی پاسخ تقاضا در این نوع مراکز، فرموله کردن مشخصه‌های بار کاری این مراکز، ملاحظات اقتصادی، نحوه مشارکت آن‌ها در برنامه‌های پاسخ تقاضا، و چالش‌های این حوزه انجام داده‌اند. در [۲۴] نیز مراکز داده اینترنتی توزیع‌شده متعلق به یک اپراتور مدنظر قرارگرفته است و تکنیک‌های مدیریت توان بکار گرفته شده در این مراکز بر مبنای اهداف استفاده از این تکنیک‌ها تقسیم‌بندی شده است که شامل ۱. تکنیک‌های آگاه از هزینه و قیمت برق، ۲. تکنیک‌های آگاه از ردپای کربن و انرژی تجدیدپذیر، ۳. تکنیک‌های آگاه از تاثیر بر شبکه برق، و ۴. تکنیک-های آگاه از احداث سایت در آینده است. [۲۵] پیشرفت‌های تحقیقاتی و نتایج حاصل از آن‌ها بر روی مراکز داده دارای ذخیره‌سازهای انرژی که در جهت تنظیم بهتر میزان توان مصرفی بکار گرفته می‌شود را خلاصه و دسته‌بندی نموده است و از دیدگاه مدل‌ها و الگوریتم پاسخ تقاضای موجود در شبکه برق نیز به بررسی مشارکت مراکز داده دارای این نوع ذخیره‌سازها در برنامه‌های پاسخ تقاضا پرداخته است. برخلاف این مطالعات، پژوهش [۲۶] مراکز داده کوچک و متوسط را مورد توجه قرار داده است و به بررسی شیوه‌های افزایش کارایی انرژی، و همچنین نحوه

مشارکت آن‌ها در DR و همکاری با شبکه برق به منظور افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های برق پرداخته است. [۲۷] به مراکز داده بزرگ مقیاس دارای منابع انرژی تجدیدپذیر پرداخته است و مساله مدیریت توان آگاه از انرژی‌های نو را مد نظر قرار داده است. در این راستا، این مقاله به مرور و دسته‌بندی مطالعاتی پرداخته است که مباحث مربوط به انرژی‌های تجدیدپذیر و انتشار کربن را مدنظر قرار داده‌اند. [۲۸] مراکز داده را به عنوان جزئی از سیستم‌های انرژی منطقه‌ای[۱۹] از دیدگاه تولیدکننده-مصرف‌کننده[۲۰] بررسی کرده، و ادغام تولید انرژی سبز بالادستی[۲۱] و استفاده مجدد از حرارت پسامد پایین‌دستی[۲۲] را لحاظ کرده است.

با وجود مقالات مروری اشاره شده، پژوهشی که در آن بطور مشخص به مرور و دسته‌بندی مطالعات انجام گرفته در حوزه مشارکت مراکز داده توزیع‌شده در برنامه‌های DR پرداخته باشد، وجود ندارد. اگرچه برخی مقالات مروری مراکز داده توزیع‌شده را مدنظر قرار داده‌اند، اما مشارکت آن‌ها را در برنامه‌های DR بررسی نکرده‌اند، یا این که تنها به مراکز داده متعلق به یک اپراتور اکتفا کرده‌اند. بر این اساس، در این پژوهش مطالعات از دیدگاه تعداد اپراتورهای مدیریت‌کننده این مراکز به دو بخش تقسیم شده‌اند. بخش اول شامل مشارکت مراکز داده توزیع‌شده در برنامه‌های DR است که متعلق و در حوزه مدیریتی یک اپراتور هستند و این اپراتور مرکزی برای مهاجرت یا مسیریابی بارهای کاری تصمیم‌گیری می‌کند. عموماً این مراکز، مراکز داده بزرگ با مصرف توان بالا و عمدتاً از نوع مراکز داده اینترنتی و رایانش ابری هستند. دسته دوم مراکز داده توزیع‌شده متعلق به چندین اپراتور را در برمی‌گیرد. اپراتورها در این دسته، از طریق همکاری با یکدیگر، در DR شرکت می‌کنند تا از مزایای آن بهره‌مند گردند. مراکز داده در این دسته می‌توانند بزرگ یا متوسط باشند. . همکاری بین اپراتورها با آنچه در پژوهش‌های دسته اول در نظر گرفته شده است، متفاوت است؛ از این جهت که مراکز داده توزیع‌شده متعلق به یک اپراتور تحت دامنه مدیریتی واحدی اداره می شوند و اپراتور به عنوان موجودیت واحد با شبکه یا شبکه‌های برق در تعامل و ارتباط است. اما مراکز داده حاضر در اتحادیه‌ها به اپراتورهای مختلفی تعلق دارند. به عبارت دیگر، این مراکز توسط دامنه‌های مدیریتی و تصمیم‌گیرندگان مختلفی اداره می شوند. در این شرایط، زمانی اپراتورها به همکاری با یکدیگر خواهند پرداخت که از لحاظ اقتصادی برای آنها سودمند باشد.

ساختار مقاله بدین شرح است. در بخش ۲ به بیان پیش‌زمینه‌ای در حوزه شبکه هوشمند برق، برنامه های پاسخ تقاضا و همچنین مشارکت مراکز داده در این برنامه‌ها پرداخته شده است. در بخش ۳ به مرور مطالعات انجام گرفته در حوزه پاسخ تقاضای مراکز داده توزیع‌شده پرداخته شده است. این پژوهش‌ها در دو دسته پاسخ تقاضا مراکز داده توزیع شده متعلق به یک اپراتور، و مدیریت همکارانه انرژی در اتحادیه‌ها، در بخش های ۳-۱ و ۳-۲ بررسی شده‌اند. در پایان نیز جمع‌بندی و پیشنهاداتی برای روند آتی در این حوزه ارائه شده است.

۲- پیش‌زمینه

در این بخش به معرفی شبکه هوشمند برق، برنامه های پاسخ تقاضا، نقش و اهمیت مراکز داده در این برنامه‌ها و همچنین مصرف انرژی مراکز داده پرداخته شده است. در ادامه نیز اتحادیه های ابری، مزایای این تکنولوژی و همچنین مدیریت مصرف، و هزینه انرژی در آن‌ها مرور شده است.

۲-۱- شبکه هوشمند برق

شبکه هوشمند، یک شبکه برق پیشرفته است که با بهره‌گیری از تکنولوژی-های مختلف، اعم از تکنولوژی‌های اطلاعات و ارتباطات، و ذخیره انرژی، الکتریسیته را در شیوه‌ای کنترل‌شده و هوشمند از سمت تولید به مصرف هدایت می کند. این ساختار جدید، قابلیت اطمینان، راندمان انرژی، امنیت، پایداری، و کارایی شبکه ستنی برق را بهبود بخشیده است. هر دو گروه شرکت‌های برق و مشتریان از مزایای شبکه هوشمند بهره‌مند می‌شوند. از منظر شبکه برق، نیاز برای ساخت و ایجاد ژنراتورهای جدید، کاهش یافته/ یا به تعویق خواهد افتاد، ضمن این که اتلاف توان نیز کم خواهد شد. علاوه بر آن، به جهت بهبود کیفیت و پایداری توان، خسارات زیاد ناشی از قطعی برق نیز کاهش خواهد یافت. مشتری نیز الکتریسته‌ای با کیفیت و قابلیت اطمینان بالاتر، و با هزینه کمتر دریافت خواهد کرد [۲۹].

اکثر مزایای شبکه هوشمند، به دلیل قابلیت شبکه در بهبود مسئولیت‌پذیری کاربران در قبال میزان مصرفشان و همچنین تشویق کاربران و شرکت‌های برق به اتخاذ تصمیمات استراتژیک‌تر است. بر این اساس، مفهوم مدیریت سمت تقاضا[۲۳] به عنوان بخش جدایی ناپذیر شبکه هوشمند، شامل فعالیت‌هایی است که در سمت مشتری با هدف افزایش بهره‌وری انرژی و افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید انجام می شود تا عدم تطابق میان عرضه و تقاضای برق کاهش یابد. DSM تسهیل تجمیع منابع تولید توزیع شده، کاهش قطعی برق، کاهش هزینه‌های عملیاتی و کاهش تولید گازهای گلخانه ای را به همراه خواهد داشت [۱]. یکی از بخش‌های اصلی مدیریت سمت تقاضا، پاسخ تقاضاست که به تعرفه یا برنامه‌ای گفته می شود که هدف از ایجاد آن، تغییر در الگوی مصرف برق مشتریان نهایی است؛ که این امر در پاسخ به تغییرات قیمت، یا به دلیل وجود مشوق‌های مالی ارائه شده از سمت شبکه انجام می پذیرد. پیاده‌سازی DR به شیوه جدید در شبکه هوشمند نیازمند ارتباطات دوطرفه بین شرکت‌های برق و مشتریان است تا قیمت برق، پیشنهادهای تخفیف، و مشوق‌ها برای مشتریان ارسال شود و در مقابل، مشتریان سهم خود در کاهش بار یا میزان توان درخواستی را اعلام نمایند. روش-های متنوعی برای پیاده‌سازی پاسخ تقاضا می تواند طراحی و بکار گرفته شود؛ از انواع روش‌های متمرکز و توزیع‌شده، تا روش‌های مبتنی بر تغییرات قیمت[۲۴] یا مبتنی بر تشویق[۲۵] [۱] ,[۳۰].

صرفه‌نظر از نوع برنامه پاسخ تقاضا، در حالت کلی مشارکت مصرف‌کنندگان در این برنامه ها عموماً از طرق، کاهش میزان مصرف با اتخاذ استراتژی‌های قطع بار مصرفی، انواع جابجایی زمانی مصرف همانند شیفت یا تغییر زمانبندی مصرف، و استفاده از منابع انرژی داخلی و در نتیجه آن، کاهش میزان دریافت انرژی از شبکه برق انجام می‌پذیرد. علاوه بر موارد فوق الذکر، یکی دیگر از روش‌های ممکن برای کاهش میزان برق دریافتی از شبکه برق، مهاجرت مکانی بار مصرفی است. تبادل بار مصرفی از دو جهت حائز اهمیت است. از یک طرف اضافه توان در یک مکان ممکن است با کمبود توان در مکان دیگر خنثی شود. از طرف دیگر، برخی بازارهای برق می توانند این انعطاف را مقرون به صرفه‌تر یا با انتشار کربن کمتری فراهم آوردند. یک راهکار دیگر برای مهاجرت مکانی بار مصرفی، مهاجرت فعالیت-های انرژی‌بر بین مکان‌های مختلف است. پردازش واحدهای اطلاعاتی از جمله این فعالیت‌ها محسوب می شوند و مراکز داده از جمله مشتریانی هستند که به پردازش درخواست‌های کاربران می‌پردازند. از این رو، پتانسیل آن را دارند که از این انعطاف بهره ببرند [۱۳].

۲-۲- مصرف انرژی مراکز داده

مصرف انرژی مراکز داده می تواند در سه دسته کلی طبقه‌بندی شود: ۱. تجهیزات IT، ۲. زیرساخت‌های خنک کننده، و ۳. بارهای پیشتیبان همانند منابع تغذیه، ذخیره‌سازهای انرژی، و سایر زیرساخت‌های تولید و توزیع توان. تجهیزات آی‌تی شامل سرورهای مخصوص پردازش داده، ذخیره‌سازهای داده و تجهیزات شبکه برای ارتباط بین سرورهاست. این بخش مسئول پشتیبانی و خدمات‌رسانی به کاربردها و ارائه سرویس به کاربران است. دسته دوم، تجهیزات خنک‌کنندگی (که با عنوان سیستم‌های تهویه مطبوع[۲۶] شناخته می‌شوند)، گرمای تولیدی توسط تجهیزات آی‌تی را خارج کرده و دما و رطوبت داخل مراکز داده را کنترل می

نمایند. این دو دسته بیشترین مجموع میزان مصرف را به خود اختصاص داده‌اند . نرخ توان[۲۷] مصرفی این اجزاء متناسب با کارایی مصرف توان[۲۸] است که معادل کل مصرف توان مرکز داده تقسیم بر مصرف توان تجهیزات آی‌تی است. مقادیر کمتر PUE نشان‌دهنده کارایی بالاتر توان است چرا که بخش بزرگتری از توان در بخش‌های پردازشی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱], [۲۴], [۲۷], [۳۱], [۳۲].

مصرف توان تجهیزات IT (P_{IT}) شامل مجموع توان مصرف شده توسط تمامی سرورها و اجزا شبکه است:

$$P_{IT}(u) = P_{server}(u) + P_{network} \quad (۱)$$

توان مصرفی سرورها عموماً توسط یک مدل خطی بصورت زیر برآورد می شود:

$$P_{server}(u) = P_{idle} + (P_{full} - P_{idle}) * u \quad (۲)$$

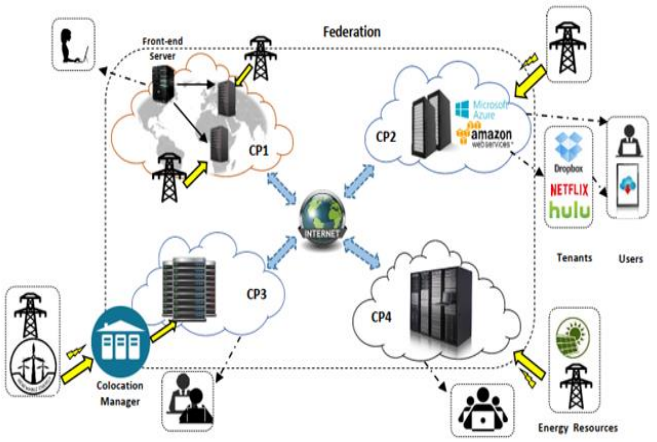
در این رابطه u میانگین بهره‌وری CPU در بین سرورها، P_{idle} و P_{full} توان مصرفی سرورها در وضعیت بیکار یا کاملا مشغول است. ثابت شده است که این مدل در عین سادگی تخمین کاربردی و دقیقی از توان مصرفی سرورها ارائه می دهد. مصرف توان تجهیزات شبکه می تواند به صورت یک انحراف ثابت تقریب زده شود که عموماً از ۱۰۰ درصد پیک توان سرورها کمتر است. به منظور مدلسازی توان مصرفی تجهیزات خنک‌کننده نیز مدل‌های مختلفی در مقالات مختلف ارائه شده است که از این بین، دو مدل در [۲۷] به عنوان مدل‌های پرکاربردتر معرفی شده اند. در یکی از این مدل‌ها، مصرف توان تجهیزات خنک‌کنندگی تابعی از دمای بیرون و داخل RAC و ضریب عملکرد واحد RAC است. در مدل دوم، توان مصرف واحدهای خنک‌کننده به عنوان تابعی از توان مصرفی تجهیزات IT و اختلاف دمای بیرون و داخل واحد RAC مدلسازی شده است [۲۷]. بر این اساس، عموماً توان مصرفی مراکز داده بصورت مجموع توان مصرفی این دو بخش در نظر گرفته می شود. یکی دیگر از رویکردهای متداول برای برآورد کل توان مصرفی یک مرکز داده که در بسیاری از مطالعات در این حوزه مورد استفاده قرار گرفته است، بهره گیری از توان مصرفی تجهیزات آی‌تی است که با ضریب PUE بصورت خطی بصورت زیر متناسب است [۲۷]:

$$P_{DC}(u) = P_{IT}(u) * PUE \quad (۳)$$

۲-۳- مراکز داده در شبکه هوشمند برق

چگونگی تعامل شبکه برق و اپراتورهای مراکز داده در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این شکل چهار ارائه‌دهنده مشاهده می شود که هر کدام کابران مختص خود را دارند. اپراتورها درخواست‌های کاربران را که با عنوان بارکاری از آن‌ها یاد می شود، از کاربر دریافت کرده و پردازش می نماید. هر مرکز داده برق مصرفی مراکز داده خود را از منابع انرژی نزدیک به خود تامین می نمایند. البته جریان برق لزوماً یکطرفه نیست. اپراتورهای مراکز داده می‌توانند با ژنراتورها و ذخیره‌سازهای بزرگ‌مقیاس تعبیه شده در داخل مراکز داده، به تبادل برق با شبکه بپردازند و از این طریق نه تنها نقش موثری در متعادل‌سازی بار مصرفی در شبکه ایفا کنند، بلکه به سود مالی دست یابند. ضمن این که مراکز داده نیز می توانند انرژی مصرفی خود را علاوه بر شبکه برق، از سایر تولیدکنندگان انرژی‌های تجدیدپذیر خریداری نمایند [۱۲]. CP4 در شکل یک اپراتور با یک مرکز داده را نشان می دهد که انرژی مورد نیاز خود را هم از شبکه برق و هم از منابع تولید انرژی های نو تامین می نماید.

اپراتورها ممکن است سرویس‌های خود را بر روی مجموعه‌ای از مراکز داده توزیع شده از نظر جغرافیایی به مشتریانشان عرضه می نماید. این مورد بیشتر برای اپراتورهای ابری و اینترنت صادق است [۳]. CP1 در شکل، این موضوع را نشان می دهد. شرکت گوگل با حدود ۱۰ مرکز داده بزرگ در آمریکا، ۳ عدد در آسیا، و ۵ عدد در اروپا در این دسته قرار دارد. هر مرکز داده در این حالت، همانطور که در شکل نشان داده شده است، با یک شرکت برق در ارتباط است. در این حالت عموماً در سمت اپراتور، یک کنترل‌کننده مرکزی یا تعدادی سرور نهایی[۲۹] وجود دارد که درخواست‌های مشتریان را دریافت کرده و آن‌ها را به سمت مراکز داده مختلف مسیریابی می‌نمایند. با مسیریابی صحیح درخواست‌ها و یا مهاجرت آن‌ها به سمت مراکز داده مناسب، نه تنها می‌توان از تاثیر منفی این دسته از مشتریان بر روی شبکه برق کاست، بلکه می توان از پتانسیل آن‌ها برای تعادل بار و افزایش قابلیت اطمینان شبکه نیز سود جست. ضمن اینکه به دلیل تنوع قیمت برق در مناطق مختلف جغرافیایی، قیمت تمام شده صورتحساب برق مصرفی مراکز داده نیز کاهش می‌یابد [۳۳]. گروهی از ارائه دهندگان رایانش ابری، منابع خود را در اختیار مستاجرین[۳۰] قرار می دهند. CP2 در شکل در این گروه قرار دارد. برای مثال Netflix و Hulu، که جزء معروفترین شرکت‌های ارائه دهنده ویدئو از طریق وب هستند، نمونه هایی از این مستاجرین هستند که سرویس‌های خود را از طریق رایانش ابری به مشتریانشان ارائه می دهند.



شکل ۱: نحوه تعامل مراکز داده و شبکه برق

گونه‌ای متفاوت اما قابل توجه از دیدگاه مباحث مدیریت انرژی، مراکز داده از نوع میزبانی سرور[۳۱] یا به اختصار Colo هستند. در مقایسه با اپراتورهای مستقل همانند گوگل که کنترل کاملی بر روی سرورهای خود دارند، Colo تجهیزات آی‌تی خود را به شرکت‌های دیگر اجاره می دهد و اپراتور آن، تنها مسئول برآوردن تقاضای توان، مباحث خنک‌کنندگی و دسترسی شبکه است. از جمله مشتریان این بازار، ارائه‌دهندگان رایانش ابری در مقیاس متوسط (مانند Salesforce)، وب-سایت‌هایی همچون ویکی پدیا، و حتی شرکت‌های بزرگی همچون آمازون را می توان نام برد. برآوردها نشان می دهد که بیش از ۴۴۶۰ مرکز داده از این نوع وجود دارد [۸]. CP3 در شکل، نمونه‌ای از یک اپراتور Colo است. علاوه بر آنچه بیان شد، اپراتورهای مراکز داده می‌توانند در قالب تشکیل اتحادیه‌ها به همکاری و مشارکت با یکدیگر بپردازند که در بخش بعد بیشتر به آن پرداخته شده است.

۲-۴- اتحادیه ابری

با وجود مزایای بسیار رایانش ابری و اقبال رو به افزایش کاربران برای استفاده از این صنعت، کماکان محدودیت‌هایی در ساختار فعلی وجود دارد که تحقق تبدیل این صنعت به یک صنعت همگانی را با چالش‌هایی مواجه کرده است. از آن جمله می توان به مساله وابستگی به فروشنده[۳۲] بدلیل وجود واسط‌های نامتجانس اشاره کرد. علاوه بر آن، صرفه‌نظر از سرویس‌دهندگان بزرگی همچون گوگل، که منابع کافی برای ارائه سرویس های موردنظر خود را دارا هستند، سایر اپراتورهای کوچک یا متوسط ممکن است با محدودیت منابع مواجه شوند [۱۶]. یکی از راه‌کارهایی که به منظور حل این مشکلات و موارد مشابه ارائه شده است، مبحث تعامل بین اپراتورهاست؛ که با عناوین گوناگونی همچون اتحادیه ابری از آن نام برده می شود که بر یکپارچه‌سازی انواع مختلف ارائه‌دهندگان سرویس و با اندازه‌های مختلف

تاکید دارند. تعامل و همکاری بیان اپراتورها نه تنها می تواند مشکل کمبود منابع را به میزان زیادی نقلیل دهد؛ بلکه می تواند مشکلات دیگری همچون بهره‌وری پایین منابع به دلیل استفاده از روش‌هایی همانند فراهم‌سازی بیش از حد منابع[۳۳] را نیز حذف نماید. نیاز برخی از اپراتورها به مراکز داده توزیع شده جغرافیایی، تخصیص همزمان چندین منبع موجود در مراکز داده مختلف برای فراهم نمودن قابلیت اطمینان بالاتر، و مسائلی از این دست، لزوم این همکاری را آشکارتر می سازد [۳۴]. اگرچه ایده همکاری بین سرویس‌دهندگان در قالب اتحادیه‌ها در ابتدا برای اپراتورهای رایانش ابری مطرح شد، اما این ایده قابل بسط به سایر اپراتورهای مراکز داده نیز است.

در کنار رفع محدودیت‌ها و بهره‌وری اقتصادی که این همکاری به همراه دارد، این رویکرد می تواند انعطاف بیشتری را در مباحث مدیریت انرژی از جهات زیر برای اپراتورها به همراه آورد. اولاً، دسترسی اپراتورهای مختلف به منابع انرژی تجدیدپذیر یکسان نیست. مراکز داده ممکن است خود دارای منابع تولید انرژی تجدیدپذیر باشند یا این که در نواحی قرار گرفته باشند که امکان تامین برق از تولیدکنندگان انرژی‌های تجدیدپذیر یا هسته‌ای فراهم باشد. دوماً، اپراتورهای مختلف ممکن است روش‌های مختلفی را برای مدیریت انرژی مراکز خود بکار گیرند یا منابع آن‌ها از نظر بازدهی انرژی با یکدیگر متفاوت باشند که این موضوع از نظر میزان مصرف انرژی حائز اهمیت خواهد بود. سوماً، مراکز داده ممکن است در نواحی با دمای محیطی متفاوتی قرار گرفته باشند که این امر بر میزان انرژی لازم برای خنک‌کنندگی تاثیرگذار خواهد بود. در نهایت، مراکز داده مختلف با بازارهای برق مختلف در ارتباطند، که در نتیجه آن قیمت برق برای آنها یکسان نیست. ضمن این که مراکز داده ممکن است در مناطق زمانی مختلفی قرار گرفته باشند، بدین معنی که یک مرکز داده قیمت برق خارج از اوج[۳۴] و دیگری اوج مصرف[۳۵] را تجربه کند. به عبارت دیگر قیمت برق وابسته به مکان و زمان تغییر می کنند و مراکز داده در قالب اتحادیه‌ها می‌توانند به خوبی از این تنوع بهره گیرند. البته بطور متقابل این همکاری بر قیمت برق و کارایی شبکه برق نیز تاثیر خواهد گذاشت. مزایای اشاره شده نه تنها برای اتحادیه‌ها، بلکه برای مراکز داده توزیع‌شده متعلق به یک اپراتور نیز برقرار خواهد بود. اگرچه همانطور که اشاره شد، همکاری می‌تواند سبب شود سایر اپراتورها بدون در اختیار داشتن مراکز داده توزیع‌شده نیز از این امکان بهره‌مند گردند [۳۵].

۳- پاسخ تقاضای مراکز داده توزیع شده

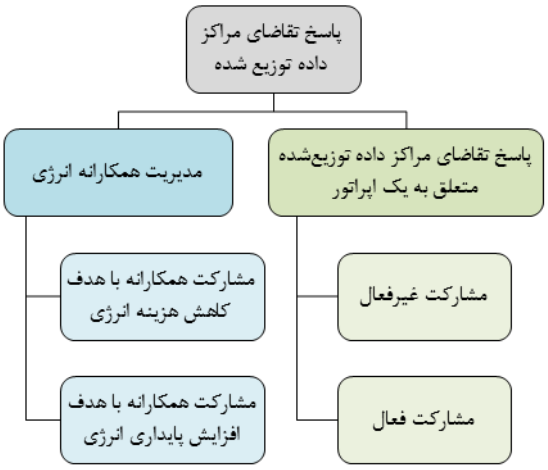
با توجه به مزایای روزافزون استفاده از مراکز داده و رایانش ابری و افزایش تعداد و مقیاس این مراکز، مطالعات گوناگونی به بررسی مزایا و چالش‌های این مشارکت، نحوه مشارکت این مراکز در برنامه‌های پاسخ تقاضا، تاثیر این مشارکت بر هزینه-های اپراتورها و همچنین برکارایی شبکه برق و چگونگی تعامل بین اپراتورهای مراکز داده و شبکه برق پرداخته‌اند. پاره‌ای از این تحقیقات مراکز داده توزیع‌شده را مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند تا از مزایای حضور چندین مراکز داده که در بخش قبل به آن اشاره شد، بهره گیرند. در این مقاله این پژوهش‌ها از حیث تعداد اپراتورهای درگیر در مشارکت به دو دسته تقسیم‌بندی شده‌اند. دسته اول تحقیقاتی را شامل می‌شود که به مطالعه پاسخ تقاضای چندین مرکز داده متعلق به یک اپراتور پرداخته‌اند و دسته دوم، مدیریت همکارانه اپراتورهای مستقل، بخصوص در قالب اتحادیه‌ها را مخاطب قرار داده‌اند.

تحقیقات صورت گرفته در حوزه اول را می‌توان از جنبه‌های مختلف طبقه‌بندی کرد. یک دسته‌بندی از دیدگاه نحوه مشارکت مراکز داده و تعامل آن‌ها با شبکه برق است. از این منظر می‌توان مطالعات را به دو دسته مشارکت غیرفعال[۳۶] و فعال[۳۷] و تقسیم نمود. مشارکت غیرفعال عموماً در پاسخ به قیمت‌گذاری هوشمند شبکه برق، و مشارکت فعال مراکز داده اغلب از طریق ارائه پیشنهاد انجام می‌پذیرد. ضمن این که دسته دوم، مشارکت در ارائه سرویس‌های جانبی و همچنین برنامه‌های کاهش یا تعادل بار و برنامه‌های اورژانسی را نیز در بر می‌گیرد. تقسیم‌بندی می‌تواند از دیدگاه هدف مساله نیز صورت بگیرد. در این راستا، محققان اهداف مختلفی را در مدلسازی مساله مشارکت مراکز داده توزیع-شده در اختیار یک اپراتور مدنظر قرار داده‌اند که در سمت مراکز داده و اپراتور ابری می‌توان به مواردی همچون بیشینه‌سازی سود اپراتور مراکز داده، و کمینه-سازی هزینه انرژی یا میزان مصرف یا ریسک اشاره کرد. در سمت شبکه برق نیز اهدافی همچون تعادل بار بین خطوط، بیشینه‌سازی سود شبکه برق، کاهش میزان انتشار کربن، و افزایش میزان استفاده از منابع تولید انرژی‌های تجدیدپذیر مدنظر قرار گرفته است. علاوه بر موارد اشاره شده، در پاره‌ای از پژوهش‌های انجام گرفته در این حوزه، محققان به مانیتور کردن شرایط و سیگنال‌های شبکه برق توسط اپراتور مرکز داده بسنده کرده‌اند تا از این طریق هزینه‌های انرژی خود را کاهش دهند، اما از تاثیر جابجایی مکانی بارهای کاری بین مراکز داده توزیع‌شده بر کارایی و سایر پارامترهای شبکه برق چشم‌پوشی کرده‌اند. اما در پاره‌ای دیگر از پژوهش‌ها، تاثیر این مشارکت بر پارامترهای شبکه برق نیز لحاظ شده است. بعلاوه، نوع بازار برق در نظر گرفته شده نیز در پژوهش‌ها متفاوت است و از بازار برق تنظیم شده[۳۸] و تنظیم نشده[۳۹] تا انواع بازارهای روز-پیش[۴۰]، بالادرنگ[۴۱]، و عمده‌فروشی[۴۲] را در برمی‌گیرد. برای مدلسازی مساله نیز از ابزارهای مختلفی استفاده شده است که می‌توان به انوع روش‌های بهینه‌سازی، مکانیزم‌های حراج[۴۳] و همچنین نظریه بازی اشاره کرد.

در این مقاله، مطالعات صورت گرفته در حوزه اول، از دید نوع مشارکت مراکز داده، به دو دسته اشاره شده، یعنی مشارکت غیرفعال و فعال تقسیم‌بندی شده‌اند. با این وجود به سایر جنبه‌های بیان شده، اعم از هدف مساله، نوع تاثیرگذاری بر شبکه برق و ... نیز اشاره شده است. علاوه بر آن، سایرویژگی‌های مهم لحاظ شده در مقالات از قبیل توجه به ریسک‌ها و عدم قطعیت‌ها در مدلسازی، در نظر گرفتن پارامترها و نیازمندی‌های کیفیت سرویس[۴۴] کاربران، لحاظ نمودن سایر هزینه‌ها علاوه بر هزینه‌های مرتبط با انرژی، و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر نیز ذکر شده است.

حوزه دوم همانطور که بیان شد، به مدیریت همکارانه انرژی چندین اپراتور مستقل پرداخته شده است که به نسبت دسته اول، تحقیقات کمتری در این حوزه انجام گرفته است. مزایای همکاری و استفاده از اتحادیه‌ها در مباحث انرژی را می-توان در دو بخش کاهش هزینه انرژی مصرفی، و پایداری انرژی تفکیک کرد که اولی به دلیل استفاده از منابع کاراتر از لحاظ انرژی یا اجرای بارهای کاری در مراکز داده قرار گرفته در نواحی با تعرفه انرژی پایین‌تر؛ و دومی ناشی از استفاده بیشتر و کاراتر از منابع انرژی تجدیدپذیر و در نتیجه کاهش میزان تولید گازهای گلخانه‌ای است. از این رو، در این مقاله پژوهش‌های انجام گرفته در این حوزه به این دو زیردسته تقسیم‌بندی شده‌اند. ضمن این که سایر جنبه‌ها همچون ابزار تحلیلی و مدلسازی مورد استفاده، و سایر ویژگی‌های مهم مقالات همچون لحاظ نمودن عدم قطعیت‌ها نیز ذکر شده است.

با توجه به آنچه توضیح داده شده، در شکل ۲ دسته‌بندی ارائه شده در این مقاله ترسیم شده است. ضمن این که برای هر دسته‌بندی، پژوهش‌های مرور شده در جدول ۱ نیز لیست شده‌اند. علاوه بر آن، خلاصه مطالعات مرور شده در حوزه مشارکت مراکز داده توزیع‌شده متعلق به یک اپراتور در دو بخش مشارکت غیرفعال و فعال به ترتیب در جداول ۳ و ۴، و خلاصه پژوهش‌های انجام شده در حوزه مشارکت همکارانه اتحادیه‌های ابری در جدول ۵ در پیوست آورده شده است. علاوه بر آن، پژوهش‌های پیشین از حیث هدف مساله و ابزار تحلیلی در جدول ۶ دسته-بندی شده اند. فهرست اختصارات بکار رفته در این مقاله به همراه شرح انگلیسی و فارسی آن‌ها نیز در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۲: دسته‌بندی ارائه شده برای مشارکت مراکز داده توزیع‌شده در برنامه‌های پاسخ تقاضای شبکه هوشمند برق

جدول ۱: روش‌های پیشنهادی ارائه شده به همراه لیست مراجع برای مشارکت مراکز داده توزیع‌شده در پاسخ تقاضای شبکه برق

نوع مشارکت	نوع مشارکت	مرجع
مراکز داده توزیع‌شده متعلق به یک اپراتور	غیرفعال	[۴], [۶۷-۳۵] [۲۱-۲۰], [۳۳]
	فعال	[۷۹-۶۸] [۱۳], [۱۹],
مشارکت همکارانه مراکز داده متعلق به چندین اپراتور	مشارکت با هدف کاهش میزان انرژی مصرفی	[۸۰-۲۳] [۱۸], [۲۲-۲۳], [۸۷
	مشارکت با هدف افزایش پایداری انرژی	[۹۰-۸۸]

جدول ۲: فهرست اختصارات به همراه شرح فارسی و انگلیسی

شرح فارسی	شرح انگلیسی	اختصار
برنامه پیشنهاددهی ظرفیت	Capacity Bidding Program	CBP
رایانش ابری	Cloud Computing	CC
اتحادیه ابری	Cloud Federation	CF
اپراتور ابری	Cloud provider	CD
میزبانی سرور	Colocation	Colo
فرایند تصمیم‌گیری مارکوف شرطی	Constrained Markov Decision Process	CMDP
مرکز داده	Data Center	DC
پاسخ تقاضا	Demand response	DC
مدیریت سمت تقاضا	Demand Side Management	DSM
مرکز داده اینترنتی	Internet Data Center	IDC
تعادل بار جغرافیایی	Geographic Load-Balancing	GLB
کارایی مصرف توان	Power Usage Effectiveness	PUE
تئوری دورنما	Prospect Theory	PT
کیفیت سرویس	Quality of Service	QoS
سیستم تهویه مطبوع	Room Air Conditioning	RAC
توافقنامه سطح سرویس	Service Level Agreement	SLA
شبکه هوشمند برق	Smart Grid	SG
نظریه سودمندی	Utility Theory	UT
ماشین مجازی	Virtual Machine	VM

۳-۱- پاسخ تقاضای مراکز داده توزیع‌شده یک اپراتور

در این بخش به مرور مطالعات انجام گرفته در حوزه مشارکت و حضور مراکز داده توزیع‌شده متعلق به یک اپراتور در برنامه‌های پاسخ تقاضا پرداخته شده است. همانطور که در بخش قبل اشاره شد، مقالات از حیث مشارکت به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی شده اند.

۳-۱-۱- مشارکت غیرفعال

در [۳۶] محسنیان راد و همکاران، مساله تعیین مکان مناسب برای ساخت یک مرکز داده و میزان بار کاری که باید به این مرکز داده جدید مسیریابی شود را بصورت چندین مساله بهینه‌سازی مدل کرده‌اند؛ که توابع هدف گوناگونی در سمت مراکز داده همچون کمینه کردن هزینه انرژی با در نظرگرفتن قیمت متغیر برق به اضافه هزینه پرداختی برای مالیات کربن، کمینه کردن ردپای کربن[۴۵] و نیز حداقل کردن میانگین تاخیر در سرویس‌دهی به مشتریان را مدنظر قرار داده‌اند. در [۳۳] مساله مسیریابی درخواست‌های رسیده به یک اپراتور ابری با مراکز داده توزیع‌شده به همراه آنالیز پخش بار[۴۶] درون شبکه برق به صورت یک مساله بهینه‌سازی مدلسازی شده است؛ تا از این طریق به تعادل بار و مقاوم بودن[۴۷] شبکه هوشمند کمک شود.

در [۳۷], [۳۸] از زمانبندی بارهای کاری بین مراکز به منظور کاهش مجموع هزینه انرژی تامین انرژی برق در شبکه برق، هزینه ناشی از نوسانات بار در شبکه، و همچنین پنالتی ناشی از کاهش کیفیت سرویس ارائه شده به کاربران مراکز داده بدلایلی همچون تاخیر در سرویس‌دهی استفاده شده است. مرجع [۳۹] نیز به توزیع بارهای کاری بین مراکز داده ابری توزیع‌شده با هدف کمینه‌سازی هزینه انرژی اپراتور پرداخته است. در الگوریتم‌های ارائه شده، نیازمندی‌های تاخیر سرویس‌های مختلف کاربران نیز مدنظر قرار گرفته شده است. در [۴۰] علاوه بر هزینه انرژی، هزینه شبکه برای تبادل بارهای کاری نیز لحاظ شده است. ضمن این که هدف از مساله، کمینه‌سازی هزینه انرژی در کنار بیشینه‌سازی گذردهی[۴۸] در تخصیص منصفانه بارهای کاری بین مراکز داده تعریف شده است. نویسندگان در [۴۱] و [۴۲] با استفاده از مکانیزم‌های قیمت‌گذاری پویا و با بهره‌گیری از انعطاف ناشی از توزیع جغرافیایی مراکز داده، یک چارچوب بهینه‌سازی برای تعادل میان عرضه و تقاضای برق ارائه کرده‌اند. در این مدل، یک کنترل‌کننده مرکزی، میزان مصرف فعلی مراکز داده را به شرکت برق ارسال می‌نماید و قیمت جدید انرژی را دریافت می‌کند و با توجه به آن، بارهای کاری را به نحوی بین مراکز داده توزیع می‌کند که هزینه انرژی مصرفی حداقل شود. شرکت برق نیز با توجه به میزان تفاوت بین عرضه و تقاضا، قیمت جدید را تعیین می‌نماید. در [۴۲] منابع انرژی تجدیدپذیر نیز لحاظ شده‌اند.

در برخی پژوهش‌ها علاوه بر تجهیزات پردازشی و سرورها، سیستم‌های خنک‌کننده نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. اپراتورهای ابری با در اختیار داشتن مراکز داده توزیع‌شده و با اتخاذ سیاست‌های گوناگون جایگذاری[۴۹] و مهاجرت بارهای کاری سبب تغییر میزان بار پردازشی مراکز داده مختلف خواهند شد؛ که در نتیجه آن، سیستم خنک‌کنندگی[۵۰] و انرژی مصرفی توسط این بخش نیز تحت تاثیر قرار خواهد گرفت. از این رو، محققان در [۳۵] به بررسی تاثیر سیاست‌های جایگذاری بارکاری بر روی خنک‌کنندگی و همچنین حداکثر دمای مراکز داده ابری پرداخته‌اند. در ادامه، چندین سیاست توزیع و مهاجرت پویای آگاه از انرژی را با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های مربوط به انرژی (شامل هزینه انرژی مصرفی و هزینه توان حداکثری[۵۱]) با لحاظ کردن تاثیرات خنک‌کنندگی ارائه نموده‌اند. در [۴۳] رویکردهای مدیریت بار کاری مراکز داده توزیع‌شده در دو دسته تقسیم‌بندی شده است: دسته اول، روش‌هایی که با بهره‌گیری از تنوع قیمت برق و ارسال بارهای کاری به مناطق با تعرفه انرژی کمتر به حداقل سازی هزینه انرژی می‌پردازند. دسته دوم، روش‌هایی که با تخصیص بارها به سرورهای دارای راندمان

خنک‌کنندگی بالا، مصرف توان را کاهش می‌دهند. دسته اول بدلیل تخصیص تصادفی بارهای کاری بدون درنظرگرفتن سیستم خنک‌کنندگی، و گروه دوم بدلیل عدم توجه به قیمت برق ممکن است هزینه را افزایش دهند. در این راستا، در [۴۳] یک روش مدیریت بار کاری با ترکیب این دو رویکرد برای حداقل نمودن هزینه انرژی ارائه شده است.

در برخی دیگر از پژوهش‌های انجام شده در این حوزه، منابع انرژی تجدیدپذیر نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نویسندگان در [۴۴] سناریویی را مدل کرده‌اند که در آن، اپراتورهای ابری علاوه بر استفاده از تنوع مکانی تعرفه برق در مکان‌های مختلف، از منابع محلی تولید انرژی‌های تجدیدپذیر برای تامین انرژی خود استفاده می‌کنند و آن را در قالب یک مساله کمینه‌سازی هزینه انرژی مدل کرده‌اند. [۴۵] نیز از جمله مطالعاتی است که مراکز داده توزیع‌شده دارای منابع انرژی تجدیدپذیر را مدنظر قرار داده است و یک روش تخصیص منابع آگاه از انرژی را ارائه کرده است. در این روش، کنترل‌کننده ابری، بارهای کاری را به نحوی بین مراکز توزیع می‌نماید که انرژی مورد نیاز از منابع انرژی تجدیدپذیر تامین گردد. در صورتی که این میزان انرژی کفایت نکند، مازاد انرژی مورد نیاز را از شبکه‌های برق تامین می‌کند. بدین صورت که بارها را به سمت مناطق با تعرفه برق ارزان‌تر مسیریابی می‌نماید تا هزینه انرژی خود را کاهش دهد. برای مدلسازی مساله از نظریه بازی استفاده شده است. نویسندگان در [۲۰]، [۴۶] یک شبکه برق متشکل از منابع تولید انرژی خورشیدی و یک یا چند مرکز داده را در نظر گرفته‌اند و تلاش نموده‌اند تا با ارائه یک روش مناسب، تقاضای توان مراکز داده را بصورت پویا به نحوی تنظیم نمایند که کل توان تلف شده در شبکه برق بدلیل ماهیت غیرپایدار انرژی تجدیدپذیر کاهش یابد. ضمن این که تاثیر تاخیر عملکرد مراکز داده نیز مورد بررسی قرار گرفته است و به منظور کاهش این میزان تاخیر، در [۴۶] روشی برای پیش‌بینی میزان تولید انرژی‌های تجدیدپذیر ارائه شده است. محققان در [۴۷] نیز مراکز داده توزیع‌شده دارای منابع انرژی تجدیدپذیر را در نظرگرفته‌اند. در این مقاله، از مهاجرت بارهای کاری به عنوان یکی از راهکارهای کاهش هزینه انرژی استفاده شده است. در کنار این روش، و به منظور افزایش بهره‌برداری از انرژی‌های نو، نویسندگان تبادل انرژی تجدیدپذیر بین مراکز داده از طریق شبکه برق با یک هزینه مشخص را مد نظر قرار داده‌اند. در حالت کلی، تولیدکنندگان انرژی می‌توانند مازاد انرژی خود را به سایر مشترکان محلی بفروشند. در این مقاله، این تبادل انرژی بین مراکز داده متعلق به یک اپراتور انجام می‌شود، نه بین مراکز داده و سایر مشترکان. تنها در صورت وجود مازاد انرژی در مجموعه مراکز داده، انرژی به سایر مشترکان فروخته می‌شود. کمبود انرژی نیز از طریق شبکه برق تامین می‌گردد. در این کار با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه برق و شبکه ارتباطی، یک روش تخصیص و مهاجرت بار کاری بواسطه ایجاد یک مصالحه بین تبادل انرژی‌های نو و مهاجرت بار کاری بین مراکز، و با هدف کمینه‌سازی هزینه اپراتور ابری مدلسازی شده است.

همانطور که اشاره شده، اپراتور ابری می‌تواند انرژی تجدیدپذیر تولیدشده توسط منابع داخل مراکز داده یا خریداری شده از منابع تولیدی خارج از مرکز داده را بطور مستقیم مصرف کند، یا در ذخیره‌ساز انرژی ذخیره کند، یا برای کسب درآمد به شبکه برق بفروشد. محققان در [۴۸] با بیان دشواری تصمیم‌گیری در این حالت، بدلیل وجود انواع منابع انرژی، انواع مختلف درخواست‌ها، و تنوع قیمت برق، بر مدلسازی دو مساله بهینه‌سازی زیر تمرکز نموده‌اند: ۱) کمینه‌سازی هزینه انرژی، ۲) کمینه‌سازی میزان انتشار کربن. در [۴۹] سناریویی با بازار برق تنظیم شده مدل شده است که در آن چندین شرکت توزیع برق برای تامین برق مراکز داده توزیع‌شده با یکدیگر رقابت می‌کنند. هر مرکز داده می‌تواند یک شرکت را انتخاب کرده و یک قرارداد دوطرفه با آن برای تامین برق امضا نموده و بارهای کاری خود را به گونه‌ای مدیریت کند که هزینه‌اش کمینه شود. در عمل، مرکز داده شرکتی را انتخاب می‌کند که بهترین پیشنهاد را با توجه به نیازمندی‌هایش ارائه کند. مراکز داده به منابع تولید انرژی تجدیدپذیر و همچنین ذخیره‌ساز انرژی مجهز هستند. از آنجایی که قیمت‌گذاری بلادرنگ در نظر گرفته شده است، تصمیمات مراکز داده و انتخاب‌های شرکت‌های برق با یکدیگر مرتبط خواهند بود. علاوه بر پرداختی به شبکه برق، ریسک ناشی از عدم قطعیت در نرخ ورود بارهای کاری، و میزان تولید انرژی تجدیدپذیردر قالب هزینه در تابع هدف لحاظ شده است. پژوهشگران در [۵۰] برای حل مشکل عدم قطعیت در نرخ ورود بارهای کاری، و میزان تولید انرژی تجدیدپذیر، مساله را به شیوه متمرکز با کمک بهینه‌سازی محدب آنلاین حل نموده‌اند. در ادامه مقاله، یک الگوریتم توزیع‌شده برای کاهش پیچیدگی روش متمرکز ارائه شده است. به عبارت دیگر، نویسندگان مقاله را با ارائه این الگوریتم زمانبندی غیرمتمرکز بسط داده‌اند.

مبحث کاهش هزینه برق مصرفی برای مراکز داده اینترنتی که در چندین بازار برق در مناطق مختلف حضور دارند، در [۲۱][۵۱–۵۳] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقالات، با در نظر گرفتن تنوع مکانی و زمانی قیمت برق، نویسندگان سعی کرده‌اند ضمن تضمین نیازهای کیفیت سرویس کاربران، مدلی را ارائه کنند که به صورت همزمان به تعادل بار کاری میان مراکز داده و همچنین مدیریت توان مصرفی دست یابند. از آنجایی که مراکز داده تاثیر غیرقابل انکاری بر روی قیمت برق خواهند داشت، در [۲۱]، [۵۳] علاوه بر کمینه‌سازی هزینه انرژی این مراکز، مدلی برای منحنی عرضه ارائه شده است تا تغییرات قیمت را با توجه به میزان مصرف مراکز داده فرموله کند. به عبارتی دیگر، تلاش شده است تا قدرت مراکز داده اینترنتی در تغییر قیمت در بازار برق در مدلسازی لحاظ شود. در [۵۴] نیز با لحاظ نمودن این تاثیر، به کمینه‌سازی هزینه انرژی مراکز داده، با در نظر گرفتن انرژی مصرفی بخش‌های خنک‌کننده و تجهیزات شبکه پرداخته شده است. ضمن این که یک کران بالا برای صورتحساب ماهانه برق این مراکز اعمال شده است.

در [۵۵] نویسندگان ادعا کرده‌اند که بدست آوردن یک مدل تحلیلی برای قیمت برق بدلیل مشخصه‌های پویا و همچنین محدودیت‌های فیزیکی شبکه برق کار دشواری است. از این رو، یک روش تعادل بار جغرافیایی[۵۲] آگاه از حساسیت‌های قیمت با هدف کمینه‌سازی هزینه انرژی اپراتور مرکز داده ارائه نموده‌اند که در آن از طریق تبادل اطلاعات بین شبکه برق و مراکز داده، محدودیت‌هایی بر روی بار کاری تخصیص یافته به مراکز داده موجود در برخی مناطق اعمال می‌شود.

پژوهش‌های [۵۶]، [۵۷] نیز مراکز داده اینترنتی را مورد توجه قرار داده‌اند، با این تفاوت که هدف آن‌ها، حداقل کردن ریسک ناشی از عدم قطعیت در میزان بار کاری دریافتی و قیمت‌های متغیر برق است. البته نویسندگان در [۵۷] وابستگی بین قیمت لحظه‌ای برق و بارکاری را نیز لحاظ نموده‌اند. در [۵۸] محققان تلاش کرده‌اند تا جمع وزن‌دار هزینه انرژی و ریسک عملیاتی اپراتور مرکز داده را حداقل سازند. در این پژوهش، اپراتور مرکز داده بخشی از انرژی مورد نیاز خود را از طریق عقد قرارداد در بازار برق پیشرو[۵۳] پیش خرید می‌کند. بقیه انرژی مورد نیاز خود را در بازار برق لحظه‌ای[۵۴] خریداری کرده یا از محل تولید داخلی خود، برای مثال از یک ژنراتور دیزلی تامین می‌نماید. مرجع [۵۹] نیز به کمینه‌سازی هزینه انرژی مراکز داده اینترنتی که در بازار برق بلادرنگ و عمده‌فروشی روز-پیش مشارکت می‌کنند، پرداخته است. در این کار، علاوه بر هزینه خرید برق از شبکه، و هزینه تولید برق در داخل مرکز، هزینه انتشار کربن نیز لحاظ شده است.

مراجع [۴،۴۵][۶۰–۶۲] از جمله پژوهش‌هایی هستند که هر دو طرف؛ یعنی اپراتورهای مراکز داده و شبکه برق، را هدف قرار داده‌اند. مساله تعامل مراکز داده توزیع‌شده و شبکه برق در [۶۰] بصورت یک بازی ترتیبی دو مرحله‌ای مدل شده است که در آن، کنترل‌کننده شبکه برق، و کنترل‌کننده رایانش ابری، به ترتیب، قیمت برق و نحوه توزیع درخواست‌ها را مدیریت می‌کنند. هدف شبکه برق، بیشینه‌سازی سود و تعادل بار بین شین[۵۵]ها است، در حالی که هدف اپراتور ابری، حداکثرسازی سود خود است. در این پژوهش دو روش قیمت‌گذاری پویای وابسته

به مکان در نظر گرفته شده است. این تعامل در [۶۱] نیز مدل شده است با این تفاوت که مراکز داده به همراه سایر بارها در یک بازی غیرهمکارانه برای بیشینه‌سازی سود خود تلاش می‌کنند. نویسندگان مطالعات خود را در [۶۲] بسط داده‌اند به نحوی که یک ساختار واقعی برای شبکه برق در نظر گرفته‌اند. ضمن این که منابع تولید انرژی‌های تجدیدپذیر را نیز لحاظ نموده‌اند. نویسندگان در [۴۴], [۶۲] این تعامل را به صورت یک مساله بهینه‌سازی دو مرحله‌ای مدل کرده‌اند؛ که در مرحله اول، شبکه برق تلاش می‌کند مکانیزم‌های قیمت‌گذاری مناسبی را اتخاذ کند تا بار شبکه را در شین‌های توان متعادل کند، و در مرحله دوم، اپراتور ابری در پاسخ به استراتژی قیمت، با توزیع مناسب بارهای کاری، کل هزینه انرژی مصرفی خود را کمینه می‌نماید. در [۴۴] یک الگوریتم ابتکاری نیز برای کاهش پیچیدگی حل مساله ارائه شده است. ضمناً تاثیر خطای پیش‌بینی توان مصرفی بارهای غیر از مراکز داده نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

در [۶۳], [۶۴] علاوه بر تعامل و تاثیر هر شرکت برق با مرکز داده مرتبط با آن، تاثیرات شرکت‌های برق محلی بر روی یکدیگر نیز لحاظ شده است. از آنجایی که نوعی وابستگی بین قیمت اعلام شده توسط شرکت برق موجود در هر ناحیه و تصمیمات اخذ شده توسط اپراتور مرکزی رایانش ابری در توزیع بار کاری وجود دارد، قیمت تعیین شده توسط هر شرکت برق بر میزان تقاضای توان مراکز داده از سایر شبکه‌های برق تاثیرگذار است. در این حالت هر شرکت برق با در نظر گرفتن سایرین، در مرحله اول یک قیمت بلادرنگ را با هدف بیشینه‌سازی سود خود اعلام می‌نماید. در مرحله بعد، اپراتور مرکز داده یک الگوریتم توزیع‌شده را اجرا می‌کند تا هزینه انرژی را با استفاده از شیفت بار کاری و تامین پویای سرور[۵۶] کمینه نماید. پژوهشگران در [۶۵], [۶۶] نیز تاثیر متقابل و رقابت بین شرکت‌های برق محلی موجود در نواحی مختلف را لحاظ کرده‌اند. ضمن این که یک دادوستد دوجانبه‌ی[۵۷] برق بین شبکه‌های قدرت در هر ناحیه و مراکز داده توزیع شده را در نظر گرفته‌اند. مراکز داده مدلسازی شده از نوع آمیخته[۵۸] بوده (دارای منابع انرژی نو است)، که در نتیجه آن، نه تنها از شبکه انرژی دریافت می‌کند؛ بلکه مازاد انرژی تجدیدپذیر تولیدی در داخل مرکز را به شبکه می‌فروشد.

با توجه به نفوذ روزافزون خودروهای الکتریکی در بازار برق، در [۶۷] علاوه بر مراکز داده توزیع‌شده، به نقش شارژ خودروهای الکتریکی کارکنان آنها در محل کار نیز پرداخته شده است. برای این منظور، یک الگوریتم آنلاین برای حداقل نمودن هزینه، با در نظر گرفتن محدودیت‌های حداکثر توان مراکز داده و همچنین تاخیر شارژ خوردروها ارائه شده است. هزینه اپراتور در این حالت شامل صورتحساب برق مصرفی مراکز داده و خودروهای الکتریکی، زیان ناشی از تنزل کارایی، و خسارت ناشی از عدم تامین کامل شارژ خودروها است.

۳-۱-۲- مشارکت فعال

نویسندگان در [۱۳] به مهاجرت مکانی بار به معنای جابجایی مکانی فعالیت‌های مستقل از مکان و مصرف‌کننده توان همانند پردازش‌های داده‌ای انجام گرفته در مراکز داده پرداخته‌اند. در این راستا به تحلیل مزایای اقتصادی مهاجرت مکانی بارها با استفاده از مراکز داده توزیع‌شده در مقایسه با روش‌های شیفت زمانی بار[۵۹] و بارزدایی[۶۰] پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که این راهکار می‌تواند یک جایگزین مناسب و جالب توجه باشد. محققان در [۶۸] با اشاره به محدودیت‌های مطالعه انجام گرفته در [۱۳]، یک مدل مبتنی بر مراکز داده توزیع‌شده بسط داده‌اند که در مقیاس وسیع‌تری قابل اعمال باشد. برای این منظور روشی را ارائه داده‌اند تا بارهای متوازن توان[۶۱] با هم بصورت مجازی با کمک مهاجرت مکانی بارهای کاری از طریق مراکز داده توزیع‌شده متصل شوند تا توازن توان برقرار شود.

تعادل بین میزان عرضه و تقاضا در بازار می‌تواند با تنظیم تولید یا مصرف انجام گیرد. اپراتور شبکه برق می‌تواند هزینه‌ای را که باید برای افزایش تولید صرف کند، به عنوان یک پاداش برای کاهش بار به مشترکانی که در این سرویس‌ها شرکت می‌کنند، پرداخت کند. برای این منظور، محققان در [۶۹] یک چارچوب بهینه‌سازی برای مراکز داده توزیع شده ارائه داده‌اند که در آن، مراکز داده به عنوان منابع قابل کنترل در شبکه حضور می‌یابند که نه تنها در زمان‌های اوج مصرف، بلکه در شرایط عدم تعادل بین میزان عرضه و تقاضای بار و همچنین قابلیت اطمینان کم شبکه برق نیز پاسخگو هستند. هدف از این مشارکت، بیشینه‌سازی سود مراکز داده، با در نظر گرفتن ریسک‌هایی همچون عدم قطعیت در مدت زمان مهاجرت به دلیل تغییرات پهنای باند در دسترس و همچنین عدم قطعیت در میزان سود دریافتی برای شرکت در پاسخ تقاضا است. محققان در [۷۰] با ارائه استراتژی‌های توزیع بار بین مراکز داده توزیع‌شده ابری، تلاش کرده‌اند تا هزینه انرژی مصرفی را کمینه کنند؛ ضمن این که استفاده از منابع تولید انرژی‌های نو را افزایش دهند. در این مقاله علاوه بر توافق‌نامه سطح سرویس[۶۲] کاربران، شرایط خنک‌کنندگی و همچنین تاثیر انتشار کربن، و تاثیر نامطلوب سوئیچینگ سرورها نیز مدنظر قرار گرفته است و به منظور کنترل نوسانات هزینه انرژی، به مساله تعیین استراتژی بهینه خرید برق در بازار پیشرو پرداخته شده است. پژوهشگران در [۷۱] پاسخ تقاضای مراکز داده توزیع‌شده اینترنتی را مخاطب قرار داده، و به تعیین ظرفیت بهینه پاسخ تقاضای این مراکز برای شرکت در بازار روز-پیش، با در نظر گرفتن عدم قطعیت در نرخ ورود بارهای کاری پرداخته‌اند. برای این منظور، مصالحه بین پرداختی اپراتور برای صورتحساب برق مصرفی و سود دریافتی برای مشارکت در برنامه کاهش بار را مدلسازی نموده‌اند. در این مدلسازی، علاوه بر انرژی مصرفی سرورها، هزینه ناشی از تجهیزات خنک‌کنندگی، مهاجرت و انتشار کربن نیز در نظر گرفته شده است.

نویسندگان در [۷۲] به بررسی تعامل بین GLB و زنجیره عرضه برق پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که از انجایی که که GLB سبب ایجاد عدم قطعیت در تقاضای محلی برق می‌گردد، شرکت‌های توزیع، قیمت برق را در بازار خرده‌فروشی افزایش می‌دهند تا بتوانند یک حاشیه سود[۶۳] را برای خود تضمین کنند. این امر سبب می‌شود اجرای GLB سود چندانی برای اپراتور ابری به همراه نداشته باشد. با این مقدمه، به اپراتور ابری این اجازه را می‌دهد که بطور مستقیم یا از طریق یک کارگزار[۶۴] در بازار عمده‌فروشی حضور یابد. در ادامه، بررسی می‌کند که اپراتور ابری چطور پیشنهاد[۶۵] خود را برای شرکت در بازار برق روز-پیش انتخاب کند تا بطور همزمان به GLB و حداقل‌سازی هزینه تامین انرژی دست یابند.

چگونگی پیشنهاددهی برای قیمت‌گذاری میزان مصرف ابر توزیع‌شده بر روی چندین مرکز داده مورد توجه محققان در [۱۹] قرار گرفته است. مکانیزم ارائه شده توسط این گروه، یک مکانیزم حراج است که تلاش می‌کند تعادلی بین راستگویی، بهره‌وری اقتصادی و کارایی محاسباتی[۶۶] فراهم آورد. الگوریتم ارائه شده، توزیع شده بوده و بر روی هر مرکز داده به منظور انتخاب مقدار پیشنهاد توان، از میان پیشنهادها ارائه شده توسط شرکت برق محلی، و همچنین به منظور مدیریت بار کاری اجرا می‌شود. نویسندگان در [۷۳] کار خود را با تبدیل نوع حراج توسعه داده‌اند تا توابع پیشنهاددهی محدب را بهتر پشتیبانی نماید.

علاوه بر مشارکت مستقیم مراکز داده در بازارهای عمده‌فروشی، این دسته از مشتریان می‌توانند بجای شرکت در یک بازار برق، از مزایای شرکت همزمان در دو بازار تنظیم‌شده بهره گیرند تا هزینه تامین انرژی را کاهش دهند. با در نظر گرفتن این موارد، نویسندگان در [۷۴] به چگونگی مشارکت مستقیم مراکز داده در دو بازار روز-پیش و بلادرنگ پرداخته‌اند و بطور توامان مساله تعیین نرخ سرویس‌دهی و نحوه پیشنهاددهی در این دو بازار را بررسی کرده‌اند. ضمن این که توافق‌نامه سطح سرویس کاربران و ریسک ناشی از مشخصه‌های آماری بار کاری و قیمت برق نیز مدنظر قرار گرفته است. محققان در [۷۴] نیز به مرکز داده توزیع شده پرداخته‌اند با این هدف که مجموع هزینه برق مصرفی و پهنای باند را کمینه کنند. بدین منظور به بهینه‌سازی توامان تهیه برق از دو بازار عمده فروشی، روز-پیش و بلادرنگ، و تعادل بار جغرافیایی پرداخته‌اند. ضمن این که در مقایسه با کارهای

پیشین، تنظیمات واقعی‌تری را درنظر گرفته‌اند، بدین صورت که فرض کرده‌اند تنها توزیعی از بار کاری و قیمت برق در زمان خرید برق در دسترس است و نه مقادیر دقیق پارامترها.

همانطور که پیش از این بیان شد، یکی از انواع مهم مراکز داده، مراکز داده از نوع میزبانی سرور به اختصار Colo هستند. از آنجایی که سرورهای این مراکز در اختیار اجاره‌کنندگان است، مشارکت این مراکز در برنامه‌های پاسخ تقاضا نسبت به انواع مستقل چالش‌برانگیزتر است چرا که اولاً استفاده از ژنراتورهای دیزلی نه تنها به صرفه نبوده، بلکه تاثیرات زیست محیطی نامطلوبی دارد. ثانیاً اپراتورهای Colo باید مشوق‌های لازم رابرای اجاره‌کنندگان فراهم آورند تا مستاجرین بارهای کاری خود را مدیریت نمایند. با این مقدمه، محققان در [۷۶]، [۷۷] به مبحث پاسخ تقاضای اورژانسی[۶۷] در مراکز داده توزیع‌شده از این نوع پرداخته‌اند. در [۷۷] یک الگوریتم مبتنی بر حراج معکوس با عنوان Truth-DR با هدف کمینه‌سازی هزینه جمعی (شامل هزینه کارایی اجاره‌کنندگان و هزینه اپراتور Colo) ارائه شده است. در [۷۶] نیز یک الگوریتم مبتنی بر حراج با عنوان BatchE-DR به همین منظور ارائه شده است. اگرچه هر دو الگوریتم مشترکان را ترغیب می‌کند تا بصورت داوطلبانه با دریافت پاداش مالی انرژی مصرفی خود را کاهش دهند، اما BatchE-DR یک الگوریتم آنلاین است که در آن، اجاره‌کنندگان با به تعویق انداختن بارهای کاری دسته‌ای[۶۸] با در نظر گرفتن کیفیت سرویس کاربران، میزان مصرف انرژی را کاهش می‌دهند.

در [۷۸] نویسندگان از انعطاف مراکز داده از نوع Colo برای افزایش استفاده از منابع تولید انرژی‌های نو استفاده نموده‌اند. در این مقاله شبکه برق با پیشنهاد تخفیف در هزینه انرژی (در قالب ارائه اعتبار انرژی[۶۹])، مشترکین Colo را ترغیب می‌نماید که بارهای کاری خود را به سمت مراکزی مهاجرت دهند که مازاد تولید انرژی تجدیدپذیر در آن منطقه وجود دارد. به منظور غلبه بر مشکل عدم هماهنگی بین اپراتور Colo و اجاره‌کنندگان، یک تعامل مستقیم بین اجاره‌کنندگان بزرگ (همانند ارائه‌دهندگان سرویس‌های ابری) و شبکه برق از طریق یک واسطه فراهم شده است. از آنجایی که عموماً این دسته از مشترکان بزرگ، سرورهای مختلفی را در چندین Colo در نواحی مختلف در اختیار دارند، با مهاجرت و توزیع مناسب بارهای کاری می‌تواند هزینه‌های خود را کاهش دهند. اگرچه هدف از این کار، بیشینه‌سازی سود اپراتورهای ابری بیان شده است، اما شبکه برق می‌تواند با تنظیم اعتبارهای انرژی، به تعادل بین عرضه و تقاضا، و تجمیع انرژی‌های نو دست یابد.

در پژوهش‌های اشاره شده، مراکز داده توزیع‌شده متعلق به یک اپراتور هستند. اما نویسندگان در [۷۹] در شیوه‌ای متفاوت به ارائه مدلی برای همکاری بین خریده‌فروش‌های برق[۷۰] و خوشه‌ای[۷۱] از مراکز داده توزیع‌شده متعلق به چندین اپراتور ابری پرداخته‌اند. این همکاری از طریق ارائه پیشنهادهای کاهش توان توسط اپراتورها در یک برنامه پاسخ تقاضای مبتنی بر تشویق به منظور حل مشکل عدم تطابق بین عرضه و تقاضای برق خرده‌فروش انجام می‌پذیرد. در یک بازار برق نوعی، خرده‌فروشان، الکتریسیته مورد نیاز خود را در بازار برق عمده‌فروشی خریداری کرده و به مشتریان خود می‌فروشند. در صورتی که الکتریسیته خریداری شده در بازار برق روز-پیش یا طولانی-مدت، با نیاز مشتریان همخوانی نداشته باشد، یکی از راهکارهای خرده‌فروش بجای خرید برق به قیمت بالاتر در بازار برق بلادرنگ، کمک گرفتن از اپراتورهای ابری از طریق برنامه‌های کاهش توان در قالب یک برنامه پاسخ تقاضاست. از این رو نویسندگان در این مقاله مدلی را برای همکاری بین این دو بخش ارائه کرده‌اند به نحوی که این همکاری به سود هر دو طرف باشد.

۳-۲- مدیریت همکارانه انرژی

در این بخش به مرور مطالعات انجام گرفته در حوزه مشارکت همکارانه چندین اپرتور مستقل مرکز داده، اغلب در قالب اتحایده‌ها پرداخته شده است. این مطالعات همانطور که بخش ۳ اشاره شد، از حیث هدف از مشارکت و همکاری، به دو دسته تقسیم شده است که شامل مشارکت با هدف کاهش هزینه‌های انرژی مصرفی یا در کل کاهش میزان مصرف انرژی، و همچنین مشارکت با هدف افزایش پایداری انرژی از طریق استفاده بیشتر از منابع انرژی تجدیدپذیر است.

۳-۲-۱- مشارکت همکارانه با هدف کاهش هزینه انرژی

مراجع [۱۸]، [۸۰] از جمله پژوهش‌هایی هستند که در حوزه مشارکت تجمیعی چندین اپراتور مستقل ابری در بازار برق انجام گرفته‌اند. محققان در [۸۰] به بررسی چگونگی کاهش هزینه انرژی مصرفی مراکز داده در زمان خرید برق از بازار برق عمده‌فروشی پرداخته‌اند. در این مقاله چندین مرکز داده متعلق به اپراتورهای مستقل در نظر گرفته شده است که در یک ناحیه جغرافیایی قرار دارند. به منظور کاهش ریسک ناشی از عدم قطعیت در میزان بارهای کاری و همین طور عدم قطعیت قیمت برق، اپراتورها میزان انرژی خود را بصورت تجمعی در بازار روز-پیش پیشنهاد می‌دهند. در این حالت این مراکز داده از یک سری موجودیت مستقل، به یک واحد هماهنگ تبدیل خواهند شد. در [۱۸] نیز این تجمیع بین اپراتورهای مستقل لحاظ شده است. با این تفاوت که مراکز داده در برنامه مناقصه ظرفیت[۷۲] شرکت می‌کنند و قراردادهایی را بدین منظور امضا می‌کنند. عدم قطعیت در ظرفیت کاهش بار هر مرکز داده در زمان این رخدادها بدلیل عدم قطعیت در بارهای کاری، انگیزه‌ای برای این همکاری است. در این حالت مراکز داده، قرارداد را بر اساس مجموع ظرفیت پاسخ تقاضای خود امضا می‌کنند. اگرچه این دو پژوهش بر همکاری مراکز داده تمرکز کرده‌اند، اما بدلیل قرارگیری این مراکز در یک ناحیه، قیمت برق برای آن‌ها یکسان بوده و نمی‌توانند از تنوع مکانی قیمت برق استفاده نمود. بعلاوه، بارهای کاری بین مراکز داده مهاجرت داده نمی‌شوند و هر مرکز مسئول پردازش بارهای خود است و تنها از تنوع آماری مشخصه‌های بار کاری مراکز داده مختلف برای تجمیع میزان درخواست، و همچنین میزان کاهش بار استفاده شده است.

پژوهشگران در [۸۱] با هدف کاهش کل انرژی مصرفی، یک مدل تحلیلی برای بررسی هزینه/سود ناشی از استفاده از استراتژی‌های مختلف مدیریت یک اتحادیه ابری ارائه کرده‌اند. در [۸۲] نیز چندین سیاست زمانبندی آگاه از انرژی[۷۳] بررسی شده است که می‌تواند در اتحادیه‌های ابری نوع تجاری، تحقیقاتی و همچنین برای اپراتورهایی با چندین مرکز داده مورد استفاده قرار گیرند. در ادامه یک سیاست زمانبندی جدید با هدف حداقل نمودن انرژی مصرفی اتحادیه ابری ارائه شده است.

مساله چگونگی تشکیل یک ائتلاف برای مجموعه‌ای از اپراتورهای ابری در قالب یک اتحادیه ابری سبز در [۸۳]، [۸۴] مورد بحث قرار گرفته است. نویسندگان در [۸۳]، مساله تصمیم‌گیری اپراتور ابری برای شرکت یا عدم شرکت در یک اتحادیه ابری، با هدف افزایش سود ناشی از کاهش هزینه انرژی مصرفی را مورد خطاب قرار داده‌اند و یک راه‌کار مبتنی بر نظریه بازی همکارانه برای این مساله ارائه کرده‌اند. مرجع [۲۲] نیز از جمله مقالاتی است که بر مبحث مدیریت همکارانه ماشین‌های مجازی[۷۴] در شبکه برق تمرکز کرده است. در این پژوهش، اپراتورهای ابری در زمان کمبود منابع، بارهای کاری خود را به سایر اپراتورهای ابری خصوصی و یا یک اپراتور ابری عمومی برون‌سپاری می‌کنند. قیمت‌گذاری برق به صورت بلادرنگ بوده و مقدار آن به اطلاع اپراتورها رسانده می‌شود.

در [۲۳،۸۴] نیز همکاری بین اپراتورهای ابری در قالب شکل‌گیری اتحادیه ابری در بستر شبکه برق مطرح شده است. نویسندگان در [۸۵] همانند [۸۳] مدیریت همکارانه بارهای کاری را با هدف افزایش سود اپراتورها از طریق کاهش هزینه‌های انرژی مصرفی مخاطب قرار داده‌اند. با این تفاوت که این مشارکت در بستر برنامه‌های پاسخ تقاضای مبتنی بر مکان[۷۵] صورت گرفته است و تاثیر این همکاری بر پارامترها و کارایی شبکه برق نیز بررسی شده است. در [۲۳] تعامل

چندین اپراتور ابری مستقل با شبکه برق نیز در نظر گرفته شده است، ضمن این که تاثیر استراتژی‌های انتخابی توسط دو طرف (اپراتورهای ابری و شبکه برق) بر سود دریافتی توسط طرف مقابل نیز لحاظ شده است. در مدلسازی انجام گرفته، هدف شبکه برق تعیین سیاست بهینه قیمت برق با هدف بیشینه‌سازی سود خود، و هدف اپراتورهای ابری تشکیل اتحادیه‌ها با هدف کمینه‌سازی هزینه انرژی مصرفی است. برای مدلسازی مساله از یک بازی ترتیبی دو مرحله‌ای تجمیع‌شده با یک بازی همکارانه استفاده شده است. همچنین یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر فرایند تصمیم مارکوف شرطی[۷۶] برای بدست آوردن سیاست بهینه در سمت شبکه برق مورد استفاده قرار گرفته است.

در [۸۶] مراکز داده کوچک[۷۷] دارای منابع انرژی تجدیدپذیر مخاطب قرار گرفته‌اند. بدلیل هزینه زیاد ذخیره‌سازی مازاد انرژی تجدیدپذیر در ذخیره‌سازها، نویسندگان پیشنهاد ایجاد اتحادیه بین این مراکز را مطرح نموده‌اند. در مدل پیشنهادی یک زمانبند مرکزی وجود دارد که بارها را بین مراکز به نحوی توزیع می‌کند که هزینه استفاده از انرژی‌های غیرتجدیدپذیر حداقل گردد. در [۸۷] نیز یک سری تکنیک‌های بهینه‌سازی برای بهره‌گیری از انعطاف انرژی الکتریکی و حرارتی و همچنین انعطاف حاصل از شیفت زمانی و جابجایی مکانی بارهای کاری مراکز داده ارائه شده است. مراکز داده در این مطالعه شامل بخش‌های آی‌تی، سیستم‌های خنک کنندگی، ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی، و دستگاه‌های ذخیره انرژی الکتریکی هستند. هدف از بهینه‌سازی، تطبیق تقاضای انرژی مراکز داده است به نحوی که منحنی مصرف مراکز داده تا حد امکان به منحنی پاسخ تقاضای شبکه برق نزدیک باشد. یک بازار انرژی نیز برای انجام تبادلات با هدف بهبود پایداری شبکه برق و برای کمک به اهداف هوشمندسازی در سطح شهر تعریف شده است. یک سری سناریوی تجاری نیز ارائه شده است که تشریح می کند مراکز داده به چه نحو می توانند از این تکنیک‌ها استفاده کنند. سناریوها شامل حالت حضور یک مرکز داده در شبکه برق، حضور چندین مرکز داده حاضر در اتحادیه مبتنی بر بار کاری، مبتنی بر انرژی، و مبتنی بر انرژی و بار کاری است.

۳-۲-۲- مشارکت همکارانه با هدف افزایش پایداری انرژی

همانطور که بیان شد، علاوه بر کاهش هزینه انرژی و صورتحساب برق، اتحادیه‌ها می‌توانند به منظور پایداری بیشتر انرژی با بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر تشکیل شوند. پژوهشگران در [۸۸] به بررسی این مساله در اتحادیه‌های ابری پرداخته‌اند. محققان در [۸۹] نیز الگوریتمی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در اکوسیستم اتحادیه ابری پیشنهاد داده‌اند. روش پیشنهادی، این امکان را برای اپراتورها فراهم می‌آورد که مقصد بهینه برای مهاجرت بارهای کاری را با هدف کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای کل اتحادیه بیابند. در [۹۰] نیز با دو هدف کاهش انرژی مصرفی یا کاهش میزان انتشار کربن، یک چارچوب منعطف و آگاه از انرژی برای تخصیص (مجدد) بارهای کاری ارائه شده است که چارچوب جایگذاری بهینه ماشین‌های مجازی را با توجه به نیازهای SLA مشخص می‌نماید.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

پاسخ تقاضای مراکز داده به عنوان راهکاری برای کاهش تاثیرات منفی میزان مصرف زیاد انرژی این گروه از مشتریان شبکه هوشمند بر کارای شبکه برق، و بهره‌گیری موثر از انعطاف این دسته از مشترکان، به عنوان یکی از چالش‌ها و مسایل باز تحقیقاتی در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است؛ و محققان راهکارهای متنوعی را برای مشارکت هر چه بهتر مراکز داده در انواع برنامه‌های پاسخ تقاضا و با اهداف گوناگون از کاهش هزینه برق اپراتورها، بهبود تعادل بار و افزایش قابلیت اطمینان شبکه، تا بهبود و تسریع تجمیع انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش میزان انتشار کربن ارائه کرده‌اند. در این بین مراکز داده توزیع‌شده به جهت گستره جغرافیایی و امکان بهره‌گیری از برنامه‌های وابسته به مکان، و همچنین دسترسی بهتر به منابع انرژی تجدیدپذیر، انعطاف بالاتری را فراهم می‌نمایند و از این جهت اخیراً بیشتر مورد اقبال و بررسی قرار گرفته‌اند. اگرچه تعداد اپراتورهای دارای مراکز داده توزیع‌شده محدود است و به سرویس-دهندگان بزرگی همچون گوگل یا مایکروسافت محدود می‌شود، اما همکاری بین اپراتورها می‌تواند دسترسی به این توزیع جغرافیایی را برای آن‌ها تسهیل نماید. در این راستا در این مقاله، راهکارها و شیوه‌های ارائه شده برای مشارکت موثرتر مراکز داده توزیع‌شده در پاسخ تقاضای شبکه برق مورد بررسی قرار گرفت و پژوهش‌های پیشین در این حوزه در دو دسته، مشارکت مراکز داده توزیع‌شده متعلق به یک اپراتور و مشارکت همکارانه اپراتورهای مراکز داده در برنامه‌های پاسخ تقاضا دسته-بندی و مرور شد.

اگرچه پژوهش‌های زیادی خصوصا در سال‌های اخیر در حوزه مورد بحث انجام پذیرفته است، اما بیشتر این تحقیقات به مراکز داده متعلق به یک اپراتور پرداخته-اند و مبحث همکاری بین اپراتورها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ضمن این که تحقیقات صورت گرفته در این زمینه نیز اکثراً از تاثیرات این همکاری بر شبکه برق چشم‌پوشی کرده‌اند. در این راستا تشکیل اتحادیه‌ها به منظور افزایش سود اپراتورها از یک طرف، و کاهش تاثیرات نامطلوب آن‌ها بر شبکه برق، و بهره‌گیری از مزایای حاصل از انعطاف مراکز داده و همکاری بین اپراتورها از طرف دیگر، نیازمند بررسی بیشتر است. از این رو به عنوان یکی از مسیرهای آتی در این حوزه می‌توان به بررسی مشارکت همکارانه مراکز داده در برنامه‌های فعلی پاسخ تقاضا همانند برنامه های کاهش بار داوطلبانه، برنامه‌های اورژانسی، سرویس‌های جانبی، و سایر برنامه-های قیمت‌گذاری برق، و همچنین ارائه برنامه‌های پاسخ تقاضای متناسب با نیازهای مراکز داده و با در نظرگرفتن همکاری بین آن ها اشاره کرد. ضمن این که باید نقش و تاثیر این همکاری بر پارامترهای شبکه برق نیز بررسی و مورد توجه قرار گیرد. از طرف دیگر، از آنجایی که برای شکل‌گیری همکاری بین اپراتورها و تشکیل اتحادیه‌ها، مسائل دیگری از جمله امنیت، حریم خصوصی، کارایی و ... نیز حائز اهمیت هستند، بنابراین مدلسازی تشکیل اتحادیه‌ها با در نظر گرفتن توامان این پارامترها در کنار مسائل مرتبط با مصرف انرژی نیز می‌تواند یکی از مسیرهای آتی در این حوزه باشد.

از جنبه دیگر، معدود پژوهش‌هایی در حوزه مدیریت همکارانه مراکز داده مجهز به منابع انرژی تجدیدپذیر انجام گرفته است. با توجه به نفوذ روزافزون این منابع انرژی در شبکه برق این موضوع نیز می‌توان به عنوان یک مسیر برای تحقیقات آتی مدنظر قرار گیرد. ضمن این که اکثر پژوهش‌های انجام گرفته با هدف کاهش هزینه انرژی اپراتورها صورت گرفته است و اهداف مرتبط به پایداری و کاهش انتشار کربن کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است.

از طرف دیگر، تحقیقات انجام گرفته عموماً یکی از راهکارهای مهاجرت مکانی یا شیفت زمانی بارهای کاری را بکار گرفته‌اند در صورتی که ترکیب این روش‌ها می‌تواند انعطاف بیشتری به همراه داشته باشد. بعلاوه، در اکثر پژوهش‌ها به انرژی مصرفی تجهیزات آی‌تی اکتفا شده است و از انرژی مصرفی سایر تجهیزات؛ همانند سیستم‌های خنک‌کنندگی یا انرژی مصرفی لازم برای تبادل بارهای کاری بین مراکز داده توزیع‌شده چشم‌پوشی شده است.

از دیدگاه دیگر، در پژوهش‌های انجام گرفته در حوزه شکل‌گیری اتحادیه‌ها، به منظور مدلسازی سودمندی اپراتورها از تئوری سودمندی[۷۸] استفاده شده است. اگرچه در واقعیت زمانی که افراد در شرایطی قرار گیرند که انتخاب های آنها با عدم قطعیت مواجه است به شیوه ای متفاوت عمل می کنند. در مساله همکاری بین اپراتورها نیز آن‌ها با عدم قطعیت در نرخ ورود بارهای کاری یا میزان تولید انرژی-های تجدیدپذیر مواجه هستند. از این رو، برای مدلسازی این شرایط می توان از تکنیک‌های دیگر همانند تئوری دورنما[۷۹] استفاده کرد. در این حالت مقدار دقیق سودمندی مد نظر نیست، بلکه سود و زیان مورد توجه قرار می گیرد.

از طرف دیگر، اکثر مطالعات انجام گرفته به مراکز داده بزرگ مقیاس همانند مراکز داده ابری و اینترنتی محدود شده‌اند و از نقش، تاثیر، و اهمیت مراکز داده در مقیاس‌های کوچک و متوسط چشم‌پوشی کرده‌اند. ضمن این که مراکز داده از نوع Colo نیز کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند و با توجه به تعداد روزافزون این دسته از مراکز داده، در آینده شاهد تحقیقات بیشتری در این حوزه خواهیم بود. از جنبه دیگر، در اکثر تحقیقات انجام گرفته از تاثیر سیاست‌های اتخاذ شده توسط اپراتور مراکز داده در کاهش انرژی یا هزینه‌های انرژی بر روی پارامترهای کیفیت سرویس و کارایی ارائه شده به کاربران سرویس‌های ابری چشم‌پوشی شده است. این مساله بخصوص برای مشتریان مراکز داه Colo بسار حائز اهمیت است. ضمن این که مشارکت مراکز داده بدلیل وجود پاره‌ای عدم قعطیت‌ها و ریسک‌های موجود به نسبت سایر مشترکان دشوارتر خواهد بود. بنابراین، ارائه سیاست‌های که ضمن کاهش میزان انرژی مصرفی/ هزینه انرژی، عدم قطعیت‌ها را لحاظ کنند، کارایی بالایی داشته باشد، کیفیت سرویس کاربران را برآورده کنند و از منابع انرژی تجدیدپذیر نیز بیشترین میزان استفاده را داشته باشند، یکی از چالش‌های موجود است و نیازمند پژوهش‌های بیشتری خواهد بود.

بعلاوه، در اکثر مطالعات، مراکز داده به عنوان مصرف‌کننده انرژی در نظر گرفته شده‌اند و معدود پژوهش‌هایی به دادوستد دوجانبه انرژی بین مراکز داده و شبکه برق پرداخته‌اند. این جنبه نیز می‌تواند به عنوان یکی از مسیرهای آتی مورد توجه قرار گیرد.

۵- مراجع

[1] J. S. Vardakas, N. Zorba, and C. V. Verikoukis, "A Survey on Demand Response Programs in Smart Grids: Pricing Methods and Optimization Algorithms," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 152–178, 2015.

[2] P. Siano, "Demand response and smart grids-A survey," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 461–478, 2013.

[3] M. Chen, C. Gao, M. Song, S. Chen, D. Li, and Q. Liu, "Internet data centers participating in demand response: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 117, no. 2, 2020.

[4] Y. Wang, X. Lin, and M. Pedram, "A stackelberg game-based optimization framework of the smart grid with distributed PV power generations and data centers," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 4, pp. 978–987, 2014.

[5] Cisco Global Cloud, "Forecast and Methodology, 2016–2021," *White paper, Cisco public*, vol. 6, 2017.

[6] M. Smolakes, "Synergy: Number of hyperscale data centers reached 430 in 2018." https://www.datacenterdynamics.com.

[7] J. Koomey, "Growth in Data Center Electricity use 2005 to 2010," *A report by Analytical Press, completed at the request of The New York Times*, vol. 9, no. 2011, 2011.

[8] M. Avgerinou, P. Bertoldi, and L. Castellazzi, "Trends in Data Centre Energy Consumption under the European Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency," *Energies*, vol. 10, no. 10, 2017.

[9] W. Deng, F. Liu, H. Jin, and C. Wu, "SmartDPSS: Cost-minimizing multi-source power supply for datacenters with arbitrary demand," in *Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems*, 2013, pp. 420–429.

[10] A. Vafamehr and M. E. Khodayar, "Energy-aware cloud computing," *Electr. J.*, vol. 31, no. 2, pp. 40–49, 2018.

[11] G. Ghatikar, V. Ganti, and N. Matson, "Demand Response Opportunities and Enabling Technologies for Data Centers : Findings from Field Studies," 2012.

[12] A. Wierman, Z. Liu, I. Liu, and H. Mohsenian-Rad, "Opportunities and challenges for data center demand response," *2014 Int. Green Comput. Conf. (IGCC)*, 2015.

[13] G. Fridgen, R. Keller, M. Thimmel, and L. Wederhake, "Shifting load through space–The economics of spatial demand side management using distributed data centers," *Energy Policy*, vol. 109, pp. 400–413, 2017.

[14] Z. Liu, I. Liu, S. Low, and A. Wierman, "Pricing data center demand response," *Perform. Eval. Rev.*, vol. 42, no. 1, pp. 111–123, 2014.

[15] H. Chen, Y. Zhang, M. C. Caramanis, and A. K. Coskun, "EnergyQARE: QoS-aware data center participation in smart grid regulation service reserve provision," *ACM Trans. Model. Perform. Eval. Comput. Syst.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–31, 2019.

[16] A. Kertesz, "Characterizing Cloud Federation Approaches," in *Cloud Computing*, 2014, pp. 277–296.

[17] M. Giacobbe, A. Celesti, M. Fazio, M. Villari, and A. Puliafito, "Towards energy management in Cloud federation: A survey in the perspective of future sustainable and cost-saving strategies," *Comput. Networks*, vol. 91, pp. 438–452, 2015.

[18] L. Niu and Y. Guo, "Enabling reliable data center demand response via aggregation," in *Proceedings of the 7th International Conference on Future Energy Systems, e-Energy 2016*, 2016, pp. 235–245.

[19] Z. Zhou, F. Liu, Z. Li, and H. Jin, "When smart grid meets geo-distributed cloud: An auction approach to datacenter demand response," in *Proceedings of 2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 2015, vol. 26, pp. 2650–2658.

[20] P. Luo, X. Wang, H. Jin, Y. Li, and X. Yang, "Load management for multiple datacenters towards demand response in the smart grid integrating renewable energy," in *ACM International Conference Proceeding Series*, 2018, pp. 140–144.

[21] P. Wang, L. Rao, X. Liu, and Y. Qi, "Dynamic power management of distributed internet data centers in smart grid environment," *In IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), 2011*, pp. 1-5.

[22] R. Kaewpuang, S. Chaisiri, D. Niyato, B. S. Lee, and P. Wang, "Cooperative virtual machine management in smart grid environment," *IEEE Trans. Serv. Comput.*, vol. 7, no. 4, pp. 545–560, 2014.

[23] M. M. Moghaddam, M. H. Manshaei, M. N. Soorki, W. Saad, M. Goudarzi, and D. Niyato, "On coordination of smart grid and cooperative cloud providers," *IEEE Systems Journal*. vol. 15, no. 1, pp. 1–12, 2021.

[24] A. Rahman, X. Liu, and F. Kong, "A survey on geographic load balancing based data center power management in the smart grid environment," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 16, no. 1, pp. 214–233, 2014.

[25] M. Zhao and X. Wang, "A Survey of Research on Datacenters Using Energy Storage Devices to Participate in Smart Grid Demand Response," in *Proceedings of IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems, ICPICS*, 2020, pp. 22–26.

[26] T. L. Vasques, P. Moura, and A. de Almeida, "A review on energy efficiency and demand response with focus on small and medium data centers," *Energy Effic.*, vol. 12, no. 5, pp. 1399–1428, 2019.

[27] F. Kong and X. Liu, "A survey on green-energy-aware power management for datacenters," *ACM Comput. Surv.*, vol. 47, no. 2, pp. 1–38, 2014.

[28] P. Huang *et al.*, "A review of data centers as prosumers in district energy systems: Renewable energy integration and waste heat reuse for district heating," *Appl. Energy*, vol. 258, no. 114109, 2020.

[29] Y. Allahvirdizadeh, M. P. Moghaddam, and H. Shayanfar, "A survey on cloud computing in energy management of the smart grids," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 29, no. 10, pp. 1–22, 2019.

[30] N. Good, K. A. Ellis, and P. Mancarella, "Review and classification of barriers and enablers of demand response in the smart grid," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, pp. 57–72, 2017.

[31] M. Dayarathna, Y. Wen, and R. Fan, "Data center energy consumption modeling: A survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 732–794, 2016.

[32] T. Mastelic, A. Oleksiak, H. Claussen, I. Brandic, J. M. Pierson, and A. V. Vasilakos, "Cloud computing: Survey on energy efficiency," *ACM Comput. Surv.*, vol. 47, no. 2, pp. 1–36, 2015.

[33] A.-H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia, "Coordination of Cloud Computing and Smart Power Grids," In *First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 2010, pp. 368–372.

[34] A. N. Toosi, R. N. Calheiros, and R. Buyya, "Interconnected cloud computing environments: Challenges, taxonomy, and survey," *ACM Comput. Surv.*, vol. 47, no. 1, pp. 1–47, 2014.

[35] K. Le, J. Zhang, J. Meng, R. Bianchini, Y. Jaluria, and T. D. Nguyen, "Reducing electricity cost through virtual machine placement in high performance computing clouds," *In Proceedings of 2011 International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, 2011, pp. 1-12.

[36] A.-H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia, "Energy-information transmission tradeoff in green cloud computing," *Carbon N. Y.*, vol. 100, 2010.

[37] H. Hu, Y. Wen, L. Yin, and L. Qiu, "Towards cost-efficient workload scheduling for a Tango between geo-distributed data center and

[60] Y. Wang, X. Lir, and M. Pedram, "A sequential game perspective and optimization of the smart grid with distributed data centers," in *2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2013*, 2013, pp. 1–6.
[61] Y. Wang, X. Lin, and M. Pedram, "Coordination of the smart grid and distributed data centers: A nested game-based optimization framework," in *2014 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2014*, 2014, pp. 1–5.
[62] H. Wang, J. Huang, X. Lin, and H. Mohsenian-Rad, "Exploring smart grid and data center interactions for electric power load balancing," in *Performance Evaluation Review*, vol. 41, no. 3, pp. 89–94, 2014.
[63] N. H. Tran, D. H. Tran, S. Ren, Z. Han, E. N. Huh, and C. S. Hong, "How Geo-Distributed Data Centers Do Demand Response: A Game-Theoretic Approach," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 937–947, 2016.
[64] N. H. Tran, S. Ren, Z. Han, S. M. Jang, S. Il Moon, and C. S. Hong, "Demand response of data centers: A real-time pricing game between utilities in smart grid," *In 9th International Workshop on Feedback Computing (Feedback Computing 14)*, 2014.
[65] Z. Zhou, F. Liu, and Z. Li, "Pricing bilateral electricity trade between smart grids and hybrid green datacenters," *Perform. Eval. Rev.*, vol. 43, no. 1, pp. 443–444, 2015.
[66] Z. Zhou, F. Liu, and Z. Li, "Bilateral Electricity Trade between Smart Grids and Green Datacenters: Pricing Models and Performance Evaluation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 12, pp. 3993–4007, 2016.
[67] L. Yu, Y. Zou, and K. Wang, "Online energy management for data centers and electric vehicles in smart grid environment," in *Proceedings of Industrial Electronics Conference, IECON*, 2016, pp. 5415–5419.
[68] M. Thimmel, G. Fridgen, R. Keller, and P. Roevekamp, "Compensating balancing demand by spatial load migration – The case of geographically distributed data centers," *Energy Policy*, vol. 132, pp. 1130–1142, 2019.
[69] R. Wang, N. Kandasamy, C. Nwankpa, and D. R. Kaeli, "Datacenters as controllable load resources in the electricity market," in *Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems*, 2013, pp. 176–185.
[70] D. Paul, W. De Zhong, and S. K. Bose, "Energy efficiency aware load distribution and electricity cost volatility control for cloud service providers," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 59, pp. 185–197, 2016.
[71] Z. Chen, L. Wu, and Z. Li, "Electric demand response management for distributed large-scale internet data centers," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 651–661, 2014.
[72] J. Camacho, Y. Zhang, M. Chen, and D. M. Chiu, "Balance your bids before your bits: The economics of geographic load-balancing," in *e-Energy 2014 of Proceedings of the 5th ACM International Conference on Future Energy Systems*, 2014, pp. 75–85.
[73] Z. Zhou, F. Liu, S. Chen, and Z. Li, "A Truthful and Efficient Incentive Mechanism for Demand Response in Green Datacenters," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 1–15, Jan. 2020.
[74] M. Ghamkhari, H. Mohsenian-Rad, and A. Wierman, "Optimal risk-aware power procurement for data centers in day-ahead and real-time electricity markets," in *2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2014, pp. 610–615.
[75] Y. Zhang, L. Deng, M. Chen, and P. Wang, "Joint Bidding and Geographical Load Balancing for Datacenters: Is Uncertainty a Blessing or a Curse?," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 26, no. 3, pp. 1049–1062, 2018.
[76] Q. Sun, S. Ren, C. Wu, and Z. Li, "An Online Incentive Mechanism for Emergency Demand Response in Geo-Distributed Colocation Data Centers," *In Proceedings of the seventh international conference on future energy systems*, 2016, pp. 1-13.
[77] L. Zhang, S. Ren, C. Wu, and Z. Li, "A truthful incentive mechanism for emergency demand response in geo-distributed colocation data centers," *ACM Trans. Model. Perform. Eval. Comput. Syst.*, vol. 1, no. 4, 2016.
[78] A. Abada and M. St-Hilaire, "Renewable Energy Curtailment via Incentivized Inter-datacenter Workload Migration," in *11th International Conference on Cloud Computing (CLOUD)*, 2018, vol. 10967 LNCS, pp. 143–157.
[79] P. Zhang, K. Li, F. Wang, Z. Mi, H. Chen, and S. Chang, "A Cooperation Model of Data Center Cluster and Electricity Retailer Base on Demand Response," in *IEEE/IAS 56th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, 2020, pp. 1–10.
[80] Z. Yu, Y. Guo, and M. Pan, "Coalitional datacenter energy cost power grid," in *2016 IEEE International Conference on Communications, ICC*, 2016, pp. 1–7.
[38] H. Hu, Y. Wen, L. Yin, L. Qiu, and D. Niyato, "Coordinating Workload Scheduling of Geo-Distributed Data Centers and Electricity Generation of Smart Grid," *IEEE Trans. Serv. Comput.*, vol. 14, no. 8, 2017.
[39] Y. Fan, Y. Xia, Y. Liu, and X. Yuan, "Electricity Cost Management for Cloud Data Centers under Diverse Delay Constraints," in *3rd IEEE International Conference on Cyber Security and Cloud Computing, CSCloud 2016 and 2nd IEEE International Conference of Scalable and Smart Cloud, SSC 2016*, 2016, pp. 12–19.
[40] Z. Xu and W. Liang, "Minimizing the operational cost of data centers via geographical electricity price diversity," in *IEEE International Conference on Cloud Computing, CLOUD*, 2013, pp. 99–106.
[41] Y. Li *et al.*, "Towards dynamic pricing-based collaborative optimizations for green data centers," in *Proceedings of International Conference on Data Engineering*, 2013, pp. 272–278.
[42] H. Wang and Z. Ye, "Renewable energy-aware demand response for distributed data centers in smart grid," In *IEEE Green Energy and Systems Conference (IGSEC)*, 2016, pp. 1-8.
[43] Z. Guo, Z. Duan, Y. Xu, and H. J. Chao, "JET: Electricity cost-aware dynamic workload management in geographically distributed datacenters," *Comput. Commun.*, vol. 50, pp. 162–174, 2014.
[44] H. Wang, J. Huang, X. Lin, and H. Mohsenian-Rad, "Proactive Demand Response for Data Centers: A Win-Win Solution," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1584–1596, 2016.
[45] G. S. Aujla, M. Singh, N. Kumar, and A. Y. Zomaya, "Stackelberg Game for Energy-Aware Resource Allocation to Sustain Data Centers Using RES," *IEEE Trans. Cloud Comput.*, vol. 7, no. 4, pp. 1109–1123, 2019.
[46] P. Luo, X. Wang, H. Jin, Y. Li, and X. Yang, "Smart-grid-aware load regulation of multiple datacenters towards the variable generation of renewable energy," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 3, 2019.
[47] B. Camus, A. Blavette, F. Dufosse, and A. C. Orgerie, "Self-Consumption Optimization of Renewable Energy Production in Distributed Clouds," in *Proceedings of IEEE International Conference on Cluster Computing, ICCC*, 2018, pp. 370–380.
[48] C. Gu, L. Fan, W. Wu, H. Huang, and X. Jia, "Greening cloud data centers in an economical way by energy trading with power grid," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 78, pp. 89–101, 2018.
[49] S. Bahrami, V. W. S. Wong, and J. Huang, "Data Center Demand Response in Deregulated Electricity Markets," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2820–2832, 2019.
[50] S. Bahrami, Y. C. Chen, and V. W. S. Wong, "An Online Algorithm for Data Center Demand Response," *In 53rd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, pp. 1-6., 2019.
[51] L. Rao, X. Liu, L. Xie, and W. Liu, "Minimizing electricity cost: Optimization of distributed internet data centers in a multi-electricity-market environment," in *Proceedings of 29th IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 2010, pp. 1–9.
[52] L. Rao, X. Liu, L. Xie, and W. Liu, "Coordinated energy cost management of distributed internet data centers in smart grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 50–58, 2012.
[53] P. Wang, L. Rao, X. Liu, and Y. Qi, "D-Pro: Dynamic data center operations with demand-responsive electricity prices in smart grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1743–1754, 2012.
[54] Y. Zhang, Y. Wang, and X. Wang, "Electricity bill capping for cloud-scale data centers that impact the power markets," in *Proceedings of the International Conference on Parallel Processing*, 2012, pp. 440–449.
[55] L. Yu, T. Jiang, and Y. Zou, "Price-sensitivity aware load balancing for geographically distributed internet data centers in smart grid environment," *IEEE Trans. Cloud Comput.*, vol. 6, no. 4, pp. 1125–1135, 2018.
[56] L. Rao, X. Liu, L. Xie, and Z. Pang, "Hedging against uncertainty: A tale of Internet data center operations under smart grid environment," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 3, pp. 555–563, 2011.
[57] L. Yu, T. Jiang, Y. Cao, S. Yang, and Z. Wang, "Risk management in Internet Data Center operations under smart grid environment," in *2012 IEEE 3rd International Conference on Smart Grid Communications, SmartGridComm 2012*, 2012, pp. 384–388.
[58] L. Yu, T. Jiang, Y. Cao, and J. Wu, "Risk-constrained operation for internet data centers under smart grid environment," 2013.
[59] W. Qi and J. Li, "Towards optimal coordinated operation of distributed internet data center microgrids," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2016, pp. 1–5.

optimization in electricity markets," in *Proceedings of the 8th International Conference on Future Energy Systems, e-Energy 2017*, 2017, pp. 191–202.
[81] D. Bruneo, F. Longo, and A. Puliafito, "Evaluating energy consumption in a cloud infrastructure," *In 2011 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, 2011, pp. 1-6.
[82] G. Kecskemeti, A. Kertesz, A. C. Marosi, and Z. Nemeth, "Strategies for Increased Energy Awareness in Cloud Federations," in *High-Performance Computing on Complex Environments*, 2014, pp. 365–382.
[83] M. Guazzone, C. Anglano, and M. Sereno, "A game-theoretic approach to coalition formation in green cloud federations," in *Proceedings - 14th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud, and Grid Computing, CCGrid 2014*, 2014, pp. 618–625.
[84] M. M. Hassan, M. Abdullah-Al-Wadud, A. Almogren, B. Song, and A. Alamri, "Energy-Aware Resource and Revenue Management in Federated Cloud: A Game-Theoretic Approach," *IEEE Syst. J.*, vol. 11, no. 2, pp. 951–961, 2017.
[85] M. M. Moghaddam, M. H. Manshaei, W. Saad, and M. Goudarzi, "On data center demand response: A cloud federation approach," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 101829–101843, 2019.
[86] G. Neglia, M. Sereno, and G. Bianchi, "Geographical Load Balancing across green datacenters: A mean field analysis," *Perform. Eval. Rev.*, vol. 44, no. 2, pp. 64–69, 2016.
[87] T. Cioara *et al.*, "Exploiting data centres energy flexibility in smart cities: Business scenarios," *Inf. Sci. (Ny).*, vol. 476, pp. 392–412, 2019.
[88] A. Celesti, A. Puliafito, F. Tusa, and M. Villari, "Energy sustainability in cooperating clouds," in *CLOSER 2013 - Proceedings of the 3rd International Conference on Cloud Computing and Services Science*, 2013, pp. 83–89.
[89] M. Giacobbe, A. Celesti, M. Fazio, M. Villari, and A. Puliafito, "An approach to reduce energy costs through virtual machine migrations in cloud federation," in *Proceedings of IEEE Symposium on Computers and Communications*, 2016, pp. 782–787.
[90] C. Dupont, G. Giuliani, F. Hermenier, T. Schulze, and A. Somov, "An energy aware framework for virtual machine placement in cloud federated data centres," *In proceddings of Third International Conference on Future Systems: Where Energy, Computing and Communication Meet (e-Energy)*, 2012, pp. 1-10.

منیره محبی مقدم دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را به ترتیب در دانشگاه شهید باهنر کرمان، و دانشگاه صنعتی شریف در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۱ به پایان رسانید. ایشان مقطع دکتری خود را در آزمایشگاه تحقیقاتی نظریه بازی و طراحی مکانیزم (GTMD) در دانشگاه صنعتی اصفهان گذراندند و در سال ۱۳۹۸ فارغ التحصیل شدند. علایق پژوهشی ایشان، رایانش سبز، رایانش ابری، شبکه هوشمند برق، و نظریه بازی و طراحی مکانیزم است. آدرس پست الکترونیکی ایشان عبارت است از:

monireh.mohebbi@ec.iut.ac.ir

محمد حسین منشئی دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی اصفهان هستند. مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی برق (در سال ۱۳۷۶) و مدرک کارشناسی ارشد خود را در مهندسی برق- مخابرات (در سال ۱۳۷۹) از دانشگاه صنعتی اصفهان دریافت نمودند. ایشان در سال۱۳۸۱ مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته علوم کامپیوتر و در سال ۱۳۸۴ مدرک دکترای خود را در رشته علوم کامپیوتر و سیستم‌های توزیع شده از دانشگاه Nice Sophia Antipolis فرانسه اخذ نمودند. از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۰ به عنوان مدرس و پژوهشگر ارشد در دانشگاه EPFL سوئیس مشغول به کار بودند. ایشان در حال حاضر دانشیار دانشگاه صنعت اصفهان هستند. زمینه‌های تحقیقاتی ایشان، شبکه‌های بیسیم، امنیت و حریم خصوصی، محاسبات زیستی و نظریه بازی است. آدرس پست الکترونیکی ایشان عبارت است از:

manshaei@iut.ac.ir

---

[1] Smart Grid (SG)
[2] Demand Response (DR)
[3] Data Center (DC)
[4] Cloud Computing (CC)
[5] Pay-as-you-go
[6] On Demand
[7] HyperScale
[8] Sustainability
[9] Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)
[10] Workload
[11] Spatial Migration
[12] Renewable Energy
[13] Self-generation
[14] Cloud Provider (CP)
[15] Typical
[16] Ancillary Service
[17] Cloud Federation (CF)
[18] Internet Data Center (IDC)
[19] District
[20] Prosumer
[21] Upstream
[22] Downstream
[23] Demand Side Management (DSM)
[24] Price-based DR
[25] Incentive-based DR
[26] Room Air Conditioning (RAC)
[27] Power Ratio
[28] Power Usage Effectiveness (PUE)
[29] Front-end Server
[30] Tenants
[31] Colocation (Colo)
[32] Vendor Lock-in
[33] Over-provisioning
[34] Off-peak
[35] On-peak
[36] Passive
[37] Active
[38] Regulated
[39] Deregulated
[40] Day-ahead
[41] Real-time
[42] Wholesale Market
[43] Auction
[44] Quality of Service (QoS)
[45] Carbon Footprint
[46] Power Flow
[47] Robustness
[48] Throughput
[49] Placement
[50] Cooling
[51] Peak Power
[52] Geographic Load-Balancing (GLB)
[53] Forward
[54] Spot
[55] Bus
[56] Dynamic Server Provisioning
[57] Bilateral
[58] Hybrid
[59] Load Shifting
[60] Load Shedding
[61] Balancing Power Market
[62] Service Level Agreement (SLA)
[63] Profit
[64] Broker
[65] Bid

[66] Computational Efficency
[67] Emergency
[68] Batch
[69] Energy Credit
[70] Electricity Retailer
[71] Cluster
[72] Capacity Bidding Program (CBP)
[73] Energy-awaerness

[74] Virtual Machine (VM)
[75] Location-dependent
[76] Constrained Markov Decision Process (CMDP)
[77] Micro-datacenter
[78] Utility Theory (UT)
[79] Prospect Theory (PT)

۶- پیوست

جدول ۳: مقایسه پژوهش‌های انجام گرفته در حوزه مشارکت غیرفعال مرکز داده توزیع‌شده در برنامه‌های پاسخ تقاضا (بخش ۳-۱-۱)

مرجع	هدف مساله	بازار برق	ابزار تحلیلی	سایر ویژگی ها
[۳۶]	مکان یابی ساخت مراکز داده جدید با اهداف مختلف	بازار برق تنظیم شده و غیرتنظیم شده	بهینه‌سازی	لحاظ نمودن پارامترهای مختلف شامل ردپای کربن، هزینه انرژی، هزینه پهنای باند و تاخیر سرویس‌دهی
[۲۱][۵۲]–[۵۴][۵۷]	کمینه‌سازی ریسک ناشی از عدم قطعیت در میزان بار کاری و قیمت برق	بازار برق تنظیم شده	برنامه‌نویسی دو سطحی	لحاظ نمودن وابستگی بین قیمت برق و توان مصرفی مراکز داده در[۲۱], [۵۳]
[۳۳]	تعادل بار بین شین‌های شبکه	--	بهینه‌سازی	مسیریابی درخواست‌های رسیده به یک اپراتور توأم با آنالیز پخش بار شبکه برق
[۲۰], [۴۶]	کمینه‌سازی اتلاف توان در شبکه برق	---	بهینه‌سازی	بررسی تاثیر تاخیر عملکرد مراکز داده و ارائه روشی برای پیش‌بینی میزا ن تولید انرژی تجدیدپذیر در[۴۶]
[۳۵]	ارائه سیاست‌های جایگذاری و مهاجرت با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های انرژی اپراتور ابری	قیمت‌گذاری پیک توان	---	در نظر گرفتن تاثیرات سیستم خنک‌کنندگی و QoSکاربران
[۳۹]	کمینه‌سازی هزینه انرژی اپراتور ابری	---	--	در نظر گرفتن نیازمندی‌های تاخیر سرویس‌های متفاوت کاربران
[۵۵]	کمینه‌سازی هزینه انرژی اپراتور مرکز داده	بازار برق تنظیم شده	بهینه‌سازی	در نظر گرفتن تاثیر GLB بر قیمت برق
[۵۶]	کمینه‌سازی هزینه انرژی اپراتور ابری	بازار برق تنظیم شده	بهینه‌سازی	تضمین QoS کاربران همراه با تعادل بار بین مراکز
[۴۳]	کمینه‌سازی هزینه انرژی اپراتور ابری	--	بهینه‌سازی	مدلسازی توامان هزینه برق سیستم خنک‌کنندگی و سرورهای فعال با در نظرگرفتن کیفیت سرویس کاربران
[۴۱], [۴۲]	کمینه‌سازی هزینه انرژی	قیمت‌گذاری پویا	بهینه‌سازی	استفاده از منابع محلی تولید انرژی تجدیدپذیر علاوه بر شبکه برق در[۴۲]
[۴۷]	کمینه‌سازی هزینه انرژی	--	--	تبادل مجازی انرژی تجدیدپذیر بین مراکز داده از طریق شبکه برق
[۴۰]	کمینه‌سازی هزینه انرژی مصرفی و هزینه شبکه، بیشینه‌سازی بازده عملیاتی اپراتور ابری	بازار برق تنظیم شده	بهینه‌سازی	تضمین QoS کاربران
[۳۷], [۳۸]	کمینه‌سازی مجموع هزینه انرژی تامین برق و هزینه ناشی از نوسانات بار در شبکه برق و هزینه پنالتی ناشی از کیفیت سرویس در مراکز داده	--	بهینه‌سازی	در نظر گرفتن بارهای کاری دسته‌ای و تعاملی
[۵۹]	کمینه‌سازی هزینه انرژی اپراتور مرکز داده اینترنتی شامل هزینه‌های خرید برق از شبکه، تولید داخل مرکز، و انتشار کربن	بازار برق بلادرنگ و عمده فروشی روز-پیش	بهینه‌سازی	لحاظ کردن بارهای کاری تعاملی و دسته‌ای
[۴۸]	۱. کمینه‌سازی هزینه انرژی ۲.کمینه‌سازی انتشار کربن در یک بودجه مشخص برای انرژی	--	بهینه‌سازی	در نظر گرفتن تغییرات قیمت، نوسانات عرضه برق، دینامیک درخواست‌های ورودی
[۵۸]	کمینه‌سازی جمع وزن‌دارهزینه انرژی و ریسک اپراتور مرکز داده	بازار پیشرو و لحظه‌ای	برنامه‌نویسی دو سطحی	در نظر گرفتن مراکز داده خودمولد
[۵۴]	کمینه‌سازی هزینه انرژی و اعمال حداکثر بودجه برای صورتحساب ماهانه	قیمت‌گذاری پویا	بهینه‌سازی	لحاظ نمودن انرژی مصرفی تجهیزات خنک‌کنندگی و شبکه
[۴۹]	کمینه‌سازی مجموع پرداختی به شبکه برق و هزینه ریسک	قیمت‌گذاری بلادرنگ در بازار برق تنظیم شده	نظریه بازی	لحاظ نمودن ریسک ناشی از عدم قطعیت در نرخ ورود درخواست‌ها، و میزان تولید انرژی‌های نو
[۵۰]	کمینه‌سازی مجموع پرداختی به شبکه برق و هزینه ریسک	قیمت‌گذاری بلادرنگ در بازار برق تنظیم شده	نظریه بازی	حل مشکل عدم قطعیت در نرخ ورود درخواست‌ها، و میزان تولید انرژی‌های نو با ارائه یک الگوریتم متمرکز محدب
[۴۴], [۶۲]	کمینه‌سازی هزینه انرژی اپراتور ابری، و تعادل بار در شبکه برق	قیمت‌گذاری پویا	بهینه‌سازی دومرحله‌ای	بررسی تاثیر خطای پیش‌بینی توان مصرفی بارهای غیر از مراکز داده در[۴۴]
[۴], [۶۰], [۶۱]	بیشینه‌سازی سود اپراتور ابری، و بیشینه‌سازی سود شبکه برق به همراه تعادل بار بین خطوط	قیمت‌گذاری پویای وابسته به مکان	نظریه بازی	منابع تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در[۴]
[۶۳], [۶۴]	کمینه‌سازی هزینه انرژی اپراتور ابری، و بیشینه‌سازی سود شبکه‌های برق محلی	قیمت‌گذاری بلادرنگ	نظریه بازی	شیفت مکانی بارهای کاری به همراه تامین پویای سرورها
[۶۵], [۶۶]	کمینه‌سازی هزینه انرژی اپراتور ابری، و بیشینه‌سازی سود شبکه‌های برق محلی	قیمت‌گذاری بلادرنگ	نظریه بازی	دادوستد دوجانبه انرژی

[۴۵]	کمینه‌سازی انرژی دریافتی از شبکه برق، و تامین حداکثر انرژی از منابع تجدیدپذیر، بیشینه‌سازی سود کاربران و شبکه برق	--	نظریه بازی	تضممین QoS و SLA کاربران
[۶۷]	کمینه‌سازی هزینه مراکز داده و خودروهای الکتریکی کارکنان	--	بهینه‌سازی	در نظر گرفتن محدودیت‌های حداکثر توان مراکز داده و تاخیر شارژ خوردروها

جدول ۴: مقایسه پژوهش‌های انجام گرفته در حوزه مشارکت فعال مرکز داده توزیع‌شده در برنامه‌های پاسخ تقاضا (بخش ۳-۱-۲)

مرجع	هدف مساله	بازار برق	ابزار تحلیلی	سایر ویژگی ها
[۶۹]	بیشینه‌سازی سود مراکز داده	پاسخ تقاضای بلادرنگ و اورژانسی در بازار برق عمده‌فروشی	بهینه‌سازی	در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدت زمان مهاجرت، وعدم قطعیت در میزان سود دریافتی از شرکت در پاسخ تقاضا
[۱۹], [۷۳]	بیشینه‌سازی سود اپراتور ابری	پیشنهاددهی	مکانیزم حراج	ایجاد تعادل بین راستگویی، بهره‌وری اقتصادی و کارایی محاسباتی
[۷۴]	بیشینه‌سازی سود اپراتور ابری	پیشنهاددهی در بازار برق عمده‌فروشی، روز-پیش و بلادرنگ	بهینه‌سازی	لحاظ نمودن SLA کاربران و ریسک ناشی از مشخصه‌های آماری بار کاری و قیمت برق
[۷۵]	کمینه‌سازی مجموع هزینه برق و پهنای باند اپراتور ابری	پیشنهاددهی در بازار برق عمده‌فروشی	مکانیزم حراج	در نظرگرفتن یک توزیع، و نه مقادیر دقیق، بار کاری و قیمت برق
[۷۲]	کمینه‌سازی هزینه انرژی و هزینه تعادل بار اپراتور ابری	پیشنهاددهی در بازار برق روز-پیش عمده‌فروشی	مکانیزم حراج	بررسی تعامل GLB و زنجیره برق
[۷۰]	کمینه‌کردن هزینه اپراتور ابری شامل انتشار کربن، زمان پاسخ، سوییچینگ، و مهاجرت	بازار برق عمده‌فروشی پیشرو	بهینه‌سازی	--
[۷۱]	تعیین بهینه ظرفیت کاهش انرژی مراکز داده با توجه به عدم قطعیت در نرخ ورود بار کاری و پرداختی برای صورتحساب برق	بازار روز-پیش	بهینه‌سازی	در نظر گرفتن هزینه خنک‌کنندگی، مهاجرت، و انتشار کربن؛ لحاظ کردن انواع بارهای دسته‌ای و تعاملی
[۷۹]	کمینه‌سازی هزینه خرده‌فروش برق و کاهش هزینه برق مصرفی اپراتورهای ابری	پیشنهاددهی کاهش توان در برنامه پاسخ تقاضای تشویقی در بازار برق روز-پیش، طولانی یا میان-مدت	بهینه‌سازی	ارائه یک مدل برای همکاری بین خرده‌فروشان برق و کلاستری از مراکز داده توزیع‌شده متعلق به اپراتورهای ابری مختلف
[۷۶], [۷۷]	کمینه‌سازی هزینه جمعی اپراتور Colo و اجاره‌کنندگان	پاسخ تقاضای اورژانسی	مکانیزم حراج	ارائه یک الگوریتم آنلاین در[۷۶] با در نظر گرفتن QoS کاربران
[۷۸]	بیشینه‌سازی سود مشترکان مرکز Colo	پیشنهاددهی در قالب اعتبار انرژی	بهینه‌سازی	استفاده از منابع انرژی نو

جدول ۵: مقایسه پژوهش‌های انجام گرفته در حوزه مدیریت همکارانه انرژی مراکز داده متعلق به چندین اپراتور مستقل (بخش ۳-۲)

مرجع	هدف مساله	ابزار تحلیلی	سایر ویژگی ها
[۹۰]	تخصیص منابع با دو هدف کمینه‌سازی انرژی یا انتشار کربن	برنامه‌نویسی شرطی	لحاظ نمودن SLA کاربران، و مشخصه‌های مراکز داده
[۸۹]	کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای	--	--
[۸۸]	تشکیل اتحادیه ابری با هدف افزایش پایداری	--	لحاظ کردن سیاست‌های انرژی و دمایی
[۸۶]	کمینه‌سازی هزینه استفاده از منابع انرژی غیرتجدیدپذیر	زنجیره مارکوف	--
[۸۳]	تشکیل اتحادیه‌های ابری با هدف بیشینه‌سازی سود هر اپراتور	نظریه بازی	ارائه یک الگوریتم توزیع‌شده
[۸۵]	تشکیل اتحادیه‌های ابری در بستر برنامه‌های پاسخ تقاضای شبکه برق با هدف بیشینه‌سازی سود هر اپراتور	نظریه بازی	ارائه یک الگوریتم توزیع‌شده، بررسی تاثیر همکاری بین اپراتورها بر کارایی شبکه برق
[۸۴]	تشکیل اتحادیه‌های ابری با هدف بیشینه‌سازی سود جمعی اپراتورها	نظریه بازی	اجرای الگوریتم از طریق یک کارگزار
[۸۲]	ارائه یک سیاست زمانبندی برای کمینه‌سازی انرژی اتحادیه ضمن حفظ کارایی	--	بررسی سیاست‌های آگاه از انرژی برای مدیریت اتحادیه‌های ابری از نوع تجاری و دانشگاهی
[۱۸]	کمینه‌سازی هزینه انرژی اپراتورهای ابری	نظریه بازی	کاهش ریسک ناشی از عدم قطعیت در مشخصه‌های بار کاری
[۸۰]	کمینه‌سازی هزینه انرژی اپراتورهای ابری	نظریه بازی	کاهش ریسک ناشی از عدم قطعیت در مشخصه‌های بار کاری و قیمت برق و در نتیجه کاهش احتمال جریمه شدن
[۸۱]	کاهش کل انرژی مصرفی اتحادیه ابری	--	ارائه یک مدل تحلیلی برای بررسی هزینه/سود استراتژی‌های مختلف مدیریت اتحادیه ابری
[۲۲]	ارائه چارچوبی برای مدیریت همکارانه بار کاری با هدف کمینه‌سازی توان مصرفی	بهینه‌سازی	در نظر گرفتن عدم قطعیت در منابع انرژی تجدیدپذر، قیمت برق، و تقاضای کاربران

[۸۷]	کمینه‌سازی تفاضل انرژی مصرفی مراکز داده و میزان مطلوب شبکه برق	بهینه‌سازی	در نظر گرفتن انعطاف حاصل از شیفت زمانی و جابجایی مکانی بارهای کاری، لحاظ نمودن سیستم خنک‌کنندگی، ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی و الکتریکی
[۲۳]	کمینه‌سازی هزینه انرژی اپراتورهای ابری و بیشینه‌سازی سود شبکه برق	نظریه بازی	تشکیل اتحادیه ابری بین اپراتورهای ابری

جدول ۶: مقایسه پژوهش‌های انجام گرفته از حیث هدف مساله و ابزار تحلیلی مورد استفاده.

هدف مساله/ ابزار تحلیلی	برنامه‌نویسی دو سطحی	بهینه‌سازی	نظریه بازی	مکانیزم حراج	سایر روش‌ها
کمینه‌سازی هزینه استفاده از منابع انرژی غیرتجدیدپذیر		[۴۸]			[۸۶]
تامین حداکثر میزان انرژی از منابع تجدیدپذیر/ کمینه‌سازی انرژی دریافتی از شبکه برق			[۴۵]		
کمینه‌سازی تولید گازهای گلخانه‌ای/ انتشار کربن					[۸۹]، [۹۰]
کمینه‌سازی هزینه انرژی اپراتور ابری/ اپرانور مرکز داده/ اتحادیه ابری	[۵۸]	[۸۱]، [۸۲] [۴۴]، [۶۲] [۵۴] [۷۹][۴۰]، [۴۱]، [۴۳] [۴۲]، [۴۸]، [۵۵]، [۵۶]	[۱۸]، [۸۰] [۲۳][۴۹]، [۵۰] [۶۳]–[۶۶] [۷۶] , [۷۷]		[۳۵]، [۳۹]، [۴۷] [۸۰ ,۷۹]
کمینه‌سازی هزینه انرژی + سایر هزینه‌ها، همچون انتشار کربن، زمان پاسخ، پهنای باند، تعادل بار، مهاجرت، خودروهای الکتریکی کارکنان		[۵۹]، [۶۷][۷۰]		[۷۲]، [۷۵]	
کمینه‌سازی توان/ انرژی مصرفی اپرتور ابری/ مرکز داده/ اتحادیه ابری		[۲۲]			[۹۰]
کمینه‌سازی پنالتی ناشی از کاهش کیفیت QoS کاربران		[۳۸]، [۳۷]			
بیشینه‌سازی سود هر اپراتور بطور مجزا یا در اتحادیه ابری		[۶۹]، [۷۴]	[۴]، [۶۰]، [۶۱] [۸۳]، [۸۵]	[۱۹]، [۷۳]	
بیشینه‌سازی سود جمعی اپراتورها در اتحادیه ابری				[۸۴]	
بیشینه‌سازی بازده عملیاتی اپراتور ابری		[۴۰]			
بیشینه‌سازی سود کاربران			[۴۵]		
بیشینه‌سازی سود/کمینه‌سازی هزینه مشترکان/ اجاره‌کنندگان مراکز داده		[۷۸]	[۷۶]، [۷۷]		
افزایش پایداری در اتحادیه ابری					[۸۸]
مکان یابی ساخت مراکز داده جدید		[۳۶]			
تعیین بهینه ظرفیت کاهش انرژی مراکز داده		[۷۱]			
کمینه‌سازی ریسک/ هزینه ریسک اپراتور مرکز داده ناشی از مواردی همچون عدم قطعیت در میزان بار کاری و قیمت برق	[۵۸,۵۷] [۲۱][۵۱-۵۳]		[۴۹]، [۵۰]		
کمینه‌سازی تفاضل انرژی مراکز داده و میزان مطلوب شبکه برق		[۸۷]			
بیشینه‌سازی سود شبکه برق			[۴]، [۶۰]، [۶۱] [۲۳] [۴۵]		
کمینه‌سازی هزینه تولید برق در شبکه		[۷۹] [۳۸]، [۳۷]			
کمینه‌سازی هزینه ناشی از نوسانات بار در شبکه برق		[۳۸]، [۳۷]			
تعادل بار بین شین‌های شبکه		[۳۳]	[۴]، [۶۰]، [۶۱]		
کمینه‌سازی اتلاف توان در شبکه برق		[۲۰]، [۴۶]			

The CSI Journal on Computing Science and Information Technology

The CSI Journal on
Computing Science and
Information Technology
Vol. 18, No.2, 2021

A survey on distributed data center participating in the smart grid's demand response programs

Monireh Mohebbi Moghaddam[1], Mohammad Hossein Manshaei[2]

[1,2] Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract

With the increasing use of cloud computing and Internet services, providers of these services are encouraged to create more extensive data centers. In recent years, the amount of energy consumption of data centers has increased significantly, which has an undeniable high effect on the smart grid. Datacenter demand response is a promising solution to incentivize the providers to adapt their consumption to the power grid conditions. These policies mitigate the operational stability issues of the smart grid and potentially decrease the electricity bill of providers. Datacenter operators can shift their workload temporarily. Moreover, they can migrate their workload spatially by leveraging geographically distributed data centers and cooperation in the form of federations to utilize the advantages provided by location-dependent demand response programs. In this way, researchers have proposed various approaches to take advantage of the flexibility of distributed data centers to improve their participation in demand response programs. This article surveys and classifies the state-of-art studies around this field. Hence, we first provide some basic knowledge on smart grid, demand response, and the cloud federation. Then, we summarize and categorize existing research works. Finally, we discuss the challenges and future research.

Keywords: Power management; Distributed data centers; Demand response; Smart grid; Cloud federation.