بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت

مدیریت انرژی مراکز داده اینترنت با در نظر گرفتن منابع تولید بادی و عدم قطعیت آنها در محیط تجدید ساختار

نگارنده

ناهید رجب زاده

استاد راهنما

دکتر محسن اصیلی

شهریور ۱۳۹۷

شماره: ۲۰۲۰/۳/۱۴۰
تاریخ: ۹۷/۶/۲۱

باسمه‌تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای **ناهید رجب زاده حصار** با شماره دانشجویی **۹۴۰۷۷۱۴** رشته مهندسی قدرت گرایش سیستم قدرت تحت عنوان : **مدیریت انرژی مراکز داده اینترنت با در نظر گرفتن منابع تولید بادی و عدم قطعیت آنها در محیط تجدید ساختار** که در تاریخ **۱۳۹۷/۰۶/۲۱** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: خیلی خوب) ☐ مردود ☐
نوع تحقیق: نظری ■ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استادراهنمای اول	دکتر حسن امینی	استادیار	[امضا]
۲- استادراهنمای دوم	—	—	—
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر یاسر دامچی	استادیار	[امضا]
۵- استاد ممتحن اول	دکتر مرتضی رحیمیان	دانشیار	[امضا]
۶ـ استاد ممتحن دوم	دکتر مهدی مشایخ	استادیار	[امضا]

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: علیرضا احمدی فرد

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: [امضا و مهر]

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

۳

تقدیم:

تقدیم به خانواده عزیزم که همیشه در تمام مراحل زندگی پشتیبان و مشوق من بودند و تمام تجربه‌های زیبای زندگیم مدیون حضور آنهاست.

تقدیر و تشکر:

محضر استاد گرامی جناب آقای دکتر اصیلی که من را در انجام و پیشبرد این پایان‌نامه راهنمایی و مساعدت کردند قدردانی می‌نمایم و همچنین از جناب آقای مهندس لاسمی بابت حمایت‌ها و همفکری‌های ایشان نهایت تقدیر تشکر را دارم.

تعهدنامه

اینجانب ناهید رجب زاده حصار دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **مدیریت انرژی مراکز داده اینترنت با در نظر گرفتن منابع تولید بادی و عدم قطعیت آنها در محیط تجدید ساختار** تحت راهنمائی جناب آقای دکتر محسن اصیلی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده فارسی

با افزایش تقاضا برای سرویس‌های اینترنت، توان مصرفی مراکز داده اینترنت هم افزایش یافته است، که این باعث شده تا متصدیان مراکز داده اینترنت به فکر راهی برای مدیریت مصرف انرژی مراکز داده باشند. در این پایان‌نامه، با در نظرگرفتن باتری و توربین‌بادی، توان مصرفی توسط مراکز داده اینترنت کاهش یافته است. با درنظرگرفتن توربین بادی، علاوه بر کاهش هزینه، توزیع بهتر حجم درخواست‌ها نیز صورت گرفته است. در این مطالعه، سه مرکز داده در مناطق مختلف جغرافیایی با بازارهای برق متفاوت که قیمت برق روز-قبل در دسترس است، بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با گذاشتن باتری حدود ۷٪ کاهش هزینه، و به همراه باتری و توربین بادی حدود ۳۰٪ کاهش هزینه توان مصرفی داشته است. در این پایان نامه عدم‌قطعیت توان تولیدی توربین بادی به روش Unscented Transformation مدلسازی شده است.

کلمات کلیدی: باتری، بازار برق، توربین‌بادی، عدم‌قطعیت، مدیریت مصرف انرژی، مرکز داده اینترنت.

فهرست مطالب

فصل اول: ۱

۱-۱ اهداف تحقیق ۲

۱-۲ روش‌های ارائه شده در پایان‌نامه ۳

۱-۳ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه ۳

فصل دوم: ۵

۲-۱ مقدمه ۶

۲-۲ مراکز داده ۶

۲-۲-۱ مراکز داده اینترنت ۶

۲-۲-۱-۱ مدیریت انرژی مراکز داده اینترنت در شبکه هوشمند و چالش‌ها ۸

۲-۳ مروری بر تحقیقات انجام شده ۱۰

۲-۳-۱ مدیریت هزینه توان مصرفی ۱۱

۲-۳-۲ مدیریت بافری انرژی ۱۳

۲-۳-۳ عدم قطعیت ۱۵

۲-۳-۳-۱ مقدمه ۱۵

۲-۳-۳-۲ انواع روشهای مدلسازی عدم قطعیت ۱۶

۲-۳-۳-۲-۱ روش UT ۱۸

فصل سوم: ۲۱

۳-۱ مقدمه ۲۲

۳-۲ بیان ریاضی مسئله ۲۳

۳-۳ حالت اول (فرمول‌بندی مساله کمینه سازی هزینه برق کلی) ۲۶

۳-۳-۱ مدلسازی قید حجم درخواست: ۲۷
۳-۳-۲ تعداد سرورهای فعال ۲۷
۳-۳-۳ مدلسازی قید تاخیر ۲۷
۳-۴ مرحله دوم (با استفاده از باتری) ۲۹
۳-۴-۱ مدل هزینه باتری ۲۹
۳-۴-۲ محدودیت مربوط به باتری ۲۹
۳-۴-۳ محدودیت تعادل توان ۳۰
۳-۴-۴ محدودیت باتری ۳۱
۳-۵ مرحله سوم (با استفاده ازتوربین بادی) ۳۳
۳-۵-۱ عدم قطعیت توربین باد با روش Unscented transformation (UT) : ۳۳
۳-۵-۱-۱ مزایای روش UT: ۳۵
۳-۵-۱-۲ معایب روش UT : ۳۵
۳-۵-۲ مدلسازی همبستگی و عدم‌قطعیت: ۳۶
۳-۵-۲-۱ ضریب همبستگی ۳۸
۳-۶ خلاصه فصل ۴۰
فصل چهارم: ۴۱
۴-۱ مقدمه ۴۲
۴-۲ اطلاعات سیستم ۴۳
۴-۲-۱ قیمت برق ۴۳
۴-۲-۲ مشخصات مراکز داده ۴۳
۴-۲-۳ پارامترهای باتری ۴۴
۴-۲-۴ پارامترهای توربین بادی ۴۵

۴-۲-۵ پارامترهای سرعت باد ٤٥
۴-۳ نتایج شبیه‌سازی ۴۹
۴-۳-۱ تعداد سرورهای فعال ٤٩
۴-۳-۲ توزیع حجم درخواستها بین مراکز داده ٥١
۴-۳-۳ مقدار توان شارژ و دشارژ شده در باتری ٥٦
۴-۳-۴ تولید توربین بادی ٥٩
۴-۳-۵ هزینه توان مصرفی ٦٠
۴-۴ خلاصه فصل ۶۴
فصل پنجم: ۶۵
۵-۱ نتیجه گیری ۶۶
۵-۲ کارهای آینده ۶۶
مراجع: ۶۷

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱: یک نمونه IDCهای چندگانه [۱] ۸

شکل ۲-۲: فلوچارت روش‌ها به طور خلاصه ۱۸

شکل ۳-۱: ساختار کلی سیستم ۲۵

شکل ۳-۲: قاعده کلی روش UT، گام ۳ [۳۶] ۳۵

شکل ۳-۳: فلوچارت روش عدم قطعیت ۳۹

شکل ۴-۱: قیمت برق در سه موقعیت مختلف ۴۳

شکل ۴-۲: تعداد سرورهای فعال ۴۹

شکل ۴-۳: نرخ انتقال حجم درخواست‌ها از سرورهای رابط به مرکز داده ($\lambda_{ji}(t)$)، الف) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط اول به سه مرکز داده، ب) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط دوم به سه مرکز داده، ج) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط سوم به سه مرکز داده، د) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط چهارم به سه مرکز داده، ه) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط پنجم به سه مرکز داده ۵۳

شکل ۴-۴: نرخ انتقال حجم درخواست‌ها از سرورهای رابط به مرکز داده ($\lambda_{ji}(t)$)، الف) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط اول به سه مرکز داده با وجود توربین بادی، ب) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط دوم به سه مرکز داده با وجود توربین بادی ، ج) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط سوم به سه مرکز داده با وجود توربین بادی، د) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط چهارم به سه مرکز داده با وجود توربین بادی، ه) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط پنجم به سه مرکز داده با وجود توربین بادی ۵۶

شکل ۴-۵: عملیات بافری سیستم های ذخیره ساز، الف) الگوی شارژ و دشارژ باتری در مرکز داده مونتین، ب) الگوی شارژ و دشارژ در مرکز داده هوستون، ج) سطح توان باتری ها ۵۸
شکل ۴-۶: توان تولیدی توربین بادی و انحراف معیارآن ۵۹
شکل ۴-۷: میانگین هزینه توان مصرفی مراکز داده با حضور باتری، با حضور باتری و توربین و بدون آنها ۶۰
شکل ۴-۸: انحراف معیار هزینه توان مصرفی مراکز داده با حضور باتری، با حضور باتری و توربین و بدون آنها ۶۱
شکل ۴-۹: میانگین توان مصرفی کل مراکز داده با حضور باتری، با حضور باتری و توربین و بدون آنها ، الف) میانگین توان مصرفی مرکز داده مونتین، ب) میانگین توان مصرفی مرکز داده هوستون................ ۶۲
شکل ۴-۱۰: انحراف معیار توان مصرفی کل مراکز داده با حضور باتری، با حضور باتری و توربین و بدون آنها ، الف) انحراف معیار توان مصرفی مرکز داده مونتین، ب) انحراف معیار توان مصرفی مرکز داده هوستون. ۶۳

فهرست جدول‌ها

جدول (۳-۱): علامت‌گذاری و تعریف‌ها ۲۳

جدول (۴-۱): پارامترهای سه مراکز داده ۴۴

جدول (۴-۲): پارامترهای پنج سرور رابط ۴۴

جدول(۴-۳): اطلاعات باتری ۴۴

جدول(۴-۴): اطلاعات توربین بادی ۴۵

جدول(۴-۵): اطلاعات توربین بادی اول ۴۶

جدول(۴-۶): اطلاعات توربین بادی دوم ۴۷

جدول(۴-۷): اطلاعات توربین بادی سوم ۴۸

فصل اول:

پیشگفتار

۱-۱ اهداف تحقیق

با افزایش انبوه حجم محاسبات و سرویس‌های آنلاین اینترنت، داده‌ها و محاسبات بسیار زیادی به مراکز داده توزیع شده اینترنت ارسال می‌شود، که این باعث شده تا متصدیان مراکز داده اینترنت با مشکلاتی از قبیل مصرف بالای انرژی و هزینه، و همچنین کربن‌زدایی مواجه شوند. برای غلبه بر این مشکلات به دنبال راهی برای مدیریت مصرف انرژی و هزینه انرژی و کاهش کربن‌زدایی شوند. عملکرد مراکز داده اینترنت به این صورت است که محاسبات و درخواست‌های ارسالی از سوی تمامی کاربران به سرورهای رابط ارسال می‌شوند و سپس سرورهای رابط این حجم درخواست‌ها را برای پردازش به مراکز داده اینترنت که در نقاط مختلف جغرافیایی واقع شده‌اند، ارسال می‌کند. اولویت ارسال حجم درخواست‌ها توسط سرورها قیمت برق پایین منطقه‌ای است که مرکز داده در آن قرار گرفته است.

در این پایان‌نامه سه مرکز داده که در سه ایالت مختف قرار دارند، بررسی شده است. قیمت برق دو ایالت متغیر با زمان است و ایالت سوم قیمت برق ثابتی دارد. قیمت برق روز-قبل این ایالت‌ها در دسترس است.

مدلسازی مساله در سه مرحله انجام شده است که در این پایان‌نامه در دو مرحله کاهش هزینه توان مصرفی صورت گرفته است. حالت اول با استفاده از باتری است. به این صورت که در دو ایالتی که قیمت برق متغیر با زمان است، در ساعت‌هایی که قیمت برق پایین است باتری شروع به شارژ شدن می‌کند و در ساعات گرانی و ساعات اوج مصرف برق، شروع به دشارژ شدن می‌کند، که این باعث شد تا هزینه مصرفی مراکز داده اینترنت کاهش یابد. حالت دوم علاوه بر باتری برای هر مرکز داده یک توربین بادی هم در نظر گرفته شده است که با بررسی نتایج دیده می‌شود که علاوه بر کاهش هزینه توان مصرفی باعث توزیع بهتر حجم درخواست‌های ارسالی از سوی سرورها به سمت مراکز داده اینترنت نیز شده است. عدم‌قطعیت توربین بادی با استفاده از روش Unscented Transformation مدلسازی شده است. استفاده از توربین بادی و در نظر گرفتن عدم قطعیت آن با روش ذکر شده نوآوری این پایان نامه است.

۱-۲ روش‌های ارائه شده در پایان‌نامه

با افزایش استفاده از سرویس‌های آنلاین اینترنت و افزایش توان مصرفی توسط مراکز داده اینترنت، هزینه برق مصرفی نیز افزایش یافته است. هدف در این پایان نامه کاهش هزینه توان مصرفی مراکز داده اینترنت است که امروزه چالش اصلی متصدیان مراکز داده اینترنت محسوب می‌شود. اطلاعات ارسالی توسط تمامی کاربران به سرورهای رابط صورت می‌گیرد که سرورهای رابط این حجم درخواست‌ها را به مراکزداده با قیمت برق پایین‌تر ارسال می‌کنند. در این پایان‌نامه برای هر مرکزداده یک بافری انرژی و یک توربین‌بادی در نظر گرفته شده است تا باعث کمینه‌سازی هزینه برق مصرفی گردد و همینطور توزیع بهینه حجم درخواست‌ها نیز صورت گیرد. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز انجام شده است.

۱-۳ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

در فصل دوم ساختار مراکز داده اینترنت، اجزا و نحوه عملکرد آنها توضیح داده شده است و مقالاتی که بر کاهش هزینه توان مصرفی مراکز داده اینترنت مطالعه کرده‌اند، به طور مختصری بررسی شده‌اند. در ادامه مقالاتی که از بافری انرژی برای کاهش هزینه استفاده کرده‌اند آورده شده است. در انتها انواع مدل‌های عدم قطعیت تشریح شده است و خلاصه روش‌ها در فلوچارت رسم شده است. در ادامه این فصل مقالاتی که از روش مورد استفاده برای مدلسازی عدم‌قطعیت توربین بادی استفاده شده به طور مختصری شرح داده شده‌اند. در فصل سوم مدل ریاضی مسئله بهینه‌سازی بیان شده است. در ابتدا مساله به همراه قیود ذکر شده است. سپس مساله به همراه باتری و محدودیت‌های موجود فرمول‌بندی شده است. در مرحله سوم روش مورد استفاده برای مدلسازی عدم قطعیت توان توربین بادی به طور کامل بیان شده است، و مساله به طور کامل فرمول‌بندی و مدلسازی شد. در فصل چهارم نتایج حاصل از شبیه‌سازی تحلیل شده‌اند. نتایج هنگام ورود باتری رسم و تحلیل شدند. در

مرحله بعد به همراه توربین بادی در مساله، در حالت میانگین و انحراف معیار آن به طور کامل تحلیل شده‌اند. در فصل پنجم نتیجه‌گیری از شبیه‌سازی و کارهای آینده بیان می‌شود.

فصل دوم:

مرکز داده اینترنت و مروری بر تحقیقات انجام شده

۲-۱ مقدمه

همانطور که تقاضا برای سرویس‌های اینترنت در سال‌های اخیر افزایش یافته است، مصرف برق توسط مراکز داده اینترنت (IDCها[1]) نیز افزایش یافته است که مستقیما وابسته به تعداد سرورهای میزبان و حجم درخواست‌هایشان است. در این فصل ابتدا مراکز داده اینترنت بررسی شده‌است، در ادامه روش‌های کاهش هزینه توان مصرفی مراکز داده اینترنت بررسی می‌شوند. روش‌های متعددی برای کاهش هزینه توان مصرفی وجود دارد، در این فصل مدیریت هزینه توان مصرفی، مدیریت بافری انرژی و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر بررسی می‌شود [۱].

۲-۲ مراکز داده

در این قسمت پیش زمینه‌ای از مراکز داده اینترنت معرفی می‌شود. خصوصا تعاریف، مشخصه‌ها، اجزاء و معماری مراکز داده اینترنت با دقت شرح داده شده‌است. از وقتی که عملکرد مراکز داده اینترنت منجر به توان مصرفی زیاد، هزینه بالای انرژی و کربن‌زدایی شده است، اپراتورهای مراکز داده اینترنت نیاز به مدیریت راهی برای مصرف و تهیه انرژی دارند. سپس، درباره مدیریت انرژی مراکز داده اینترنت در شبکه هوشمند و بعضی چالش‌های موجود در مدیریت انرژی صحبت خواهد شد[۱].

۲-۲-۱ مراکز داده اینترنت

مرکز داده اینترنت (IDC) مقیاس بزرگ مرکز داده است، که شامل هزاران سرور می‌شود. نمونه‌هایی از اپراتورهای IDC شامل Google، Microsoft، Yahoo، eBay یا Amazon است. با گسترش انبوه محاسبات و سرویس‌های آنلاین اینترنت، محاسبات و داده‌های بیشتر و بیشتر به مراکز داده اینترنت انتقال یافت (IDCها) [۲]، که می‌تواند چندین سرویس را برای موسساتی (سرویس‌های فراهم کننده برنامه کاربردی)، مانند سرور میزبان یا اجاره دهنده، سرویس دسترسی اینترنت را فراهم

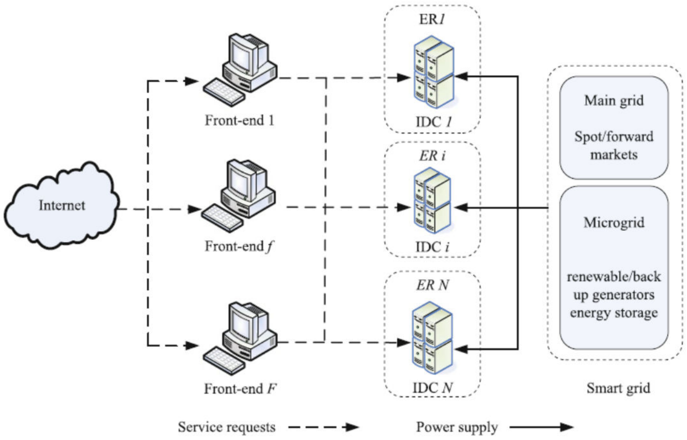
[1] Internet Data Centers

کند. IDC مزایای بسیاری از جمله قابلیت‌اطمینان داده، سهولت مدیریت برای کاربران نهایی، و کاهش هزینه خرابی مالکیت را ارائه می‌دهد. برای مثال، مراکز داده توزیع شده اینترنت از توزیع جغرافیایی و تکرار برای بهبود قابلیت اطمینان داده استفاده می‌کند.

یک نمونه معماری مرکز داده اینترنت چندگانه در محیط شبکه هوشمند در شکل (۲-۱) نشان داده شده است، که چندین مولفه آن مشخص شده است، مثل، سرور رابط و IDCها. سرورهای رابط به عنوان متعادل کننده بار عمل می‌کنند که درخواست های ورودی از اینترنت را دریافت می‌کنند و ارسال حجم درخواست به IDCهایی که در نقاط مختلف الکتریکی برای پردازش مطابق قانون تعادل بار طراحی شده، واقع شده‌اند. همچنین تمامی سرورها برای ارسال پیکربندی گروه سرورهای پویا مسئولیت پذیرند و مقیاس‌گذاری فرکانس CPU فرمان به سرورهای موجود در IDCهای مختلف برای بالا آوردن یا خاموش کردن سرورها و تنظیم کردن ولتاژ و فرکانس‌های عملکرد جریان سرورهای CPU است. برای رسیدن به عملکرد نرمال، IDCها مجبور به کشیدن توان کافی از شبکه هوشمند هستند. خصوصا، اپراتورهای IDC می‌توانند الکتریسیته را از بازار سلف[2] یا بازار لحظه‌ای[3] در شبکه اصلی بخرند و همچنین الکتریسیته را از ریز شبکه بخرند (منابع انرژی می‌توانند پشتیبان ژنراتورهای تولیدکننده، تجدیدپذیر، یا ذخیره انرژی باشند.) مطابق مطالعات اخیر، بسیاری از اپراتورهای IDC (برای مثال Microsoft یا Google) بیش از ۳۰ میلیون دلار برای هزینه برق سالیانه‌شان پرداخت می‌کنند. که در بخش بزرگی از هزینه‌های عملیاتی IDC شرکت می‌کنند [۳].

---

[2] Forward markets
[3] Spot market



شکل ۲-۱: یک نمونه IDCهای چندگانه [۱]

ضمنا، قیمت الکتریسیته به سرعت افزایش می‌یابد [۴]. علاوه بر این، اثرات زیست محیطی IDCها زیاد است، برای مثال، کربن‌زدایی مراکز داده ۰/۶٪ کربن‌زدایی جهانی در سال ۲۰۰۸ بود و نسبت مورد انتظار حدود ۲/۶٪ در سال ۲۰۲۰ است [۴]. به منظور مسئولیت‌پذیری اجتماعی اپراتورهای IDCها، آنها انتظار دارند که مشکلات بالا به طور همزمان کم شوند [۳].

۲-۱-۱ مدیریت انرژی مراکز داده اینترنت در شبکه هوشمند و چالش‌ها

برای کاهش مصرف، هزینه انرژی و یا کربن‌زدایی، اپراتورهای IDC باید برای مدیریت انرژی مصرفی و انرژی بدست آمده به طور موثری اقدام کنند. خصوصا، اپراتورهای IDC باید برای طرح تعادل بار بهینه، تعداد سرورهای فعال، مقدار توان بدست آمده از شبکه اصلی، مقدار توان کشیده شده از ژنراتور توزیع شده و ذخیره انرژی توزیع شده برای کمینه‌کردن هزینه، مصرف انرژی یا امواج کربن که فراهم‌کننده کیفیت خدمات (QOS[4]) برای درخواست‌های سرویس ورودی است، تصمیم بگیرند.

از سوی دیگر، سیستم قدرت الکتریکی در حال حرکت به سوی شبکه هوشمند است که برای توصیف یک سیستم برق نسل بعدی توصیف شده است. نمونه‌های افزایش استفاده از آن، فناوری اطلاعات و ارتباطات در تولید، ارسال، و مصرف انرژی الکتریکی است [۵]. به دلیل پتانسیل و کارآیی

---

[4] Quality Of Service

آن، بسیاری از کارها، IDCهای توزیع شده را در محیط شبکه هوشمند راه اندازی کرده‌اند [۶-۹]، همچنین شبکه هوشمند مزایای گوناگونی دارد، از جمله:

۱) شبکه هوشمند تکنولوژی است که (برای مثال، تولید توزیع شده و ذخیره انرژی توزیع شده) می‌تواند ذخیره موثر انرژی را در IDCها فراهم کند [۱۰].

۲) با دسترسی به حالت‌های زمان واقعی در شبکه هوشمند (برای مثال، قیمت توان، تقاضای توان، در دسترس بودن توان، کربن‌زدایی)، اختلافات زمانی و مکانی قیمت الکتریسیته و انرژی تجدیدپذیر باید برای کاهش هزینه انرژی بهره برداری شده عمل کند [۱۱].

۳) IDC با شرکت کردن در برنامه‌های پاسخ تقاضا با ارائه خدمات برای شبکه هوشمند می‌تواند سود ببرد [۱۱]. با توجه به مزایای شبکه هوشمند، مدیریت انرژی IDCها در شبکه هوشمند حائز اهمیت است، در این مطالعه، نهادهای مختلف به صورت زیر توصیف می‌شوند:

- **اپراتورهای** IDC : کاهش مصرف و هزینه انرژی با مدیریت موثر انرژی صورت می‌گیرد.
- **شبکه هوشمند:** بهبود قابلیت اطمینان شبکه هوشمند وقتی IDCها در پاسخ تقاضا درگیر شده‌اند.
- **جامعه:** کاهش کربن‌زدایی. برای مثال امریکا در نظر گرفته می‌شود، کاهش یک کیلووات ساعت الکتریسیته منجربه کاهش ۰/۵ کیلوگرم کربن‌زدایی می‌شود. بنابراین، اگر تمام مراکز داده در امریکا بتوانند ۰/۱ بیلیون کیلووات ساعت الکتریسیته را ذخیره کنند، ۰/۵ میلیون تن امواج CO_2 کم می‌شود، که در حل مشکلات محیطی مثل گرم شدن جهانی کمک می‌کند.

- **کشور:** فضای سبز بر تصویر یک ملت در جامعه بین المللی می تواند تاثیر بگذارد. بنابراین، کاهش کربن‌زدایی کشور را در بهبود بخشدن عقیده و وضعیت بین‌المللی می‌تواند کمک کند، برای مثال، افزایش امکان اجرا کردن بازی های المپیک.

در مدیریت مصرف انرژی و تامین انرژی، اپراتورهای IDC با چندین چالش مواجه می‌شوند، که در ادامه طبقه‌بندی شده‌اند: اولین چالش عدم قطعیت است. خصوصا، قیمت برق در آینده، حجم درخواست‌ها، خروجی انرژی تجدیدپذیر، کربن‌زدایی، و حالت شبکه قدرت (نرمال یا خاموشی) قابل پیش بینی نیستند. بنابراین به دلیل وجود چالش اول، متصدیان IDC باید در شرایط عدم قطعیت تصمیم بگیرند. چالش دوم در تضاد با اهداف عملکرد قرار دارد. مانند هزینه انرژی در مقابل کربن‌زدایی، هزینه انرژی در مقابل ریسک عملکرد، و هزینه انرژی در مقابل هزینه پهنای باند است. چگونگی دستیابی به توافق مطلوب میان آنها با توجه به اولویت‌های اپراتورهای IDC یک مشکل باز و چالش برانگیز باقی می‌ماند. سومین چالش، چگونگی فراهم کردن QOS تضمینی برای درخواست‌های ورودی موقع کمینه‌کردن هزینه انرژی است، که تنزل QOS ممکن است موجب مایوس شدن مشتری شود و منجر به رنج بالای نرخ تراکم و همچنین از دست دادن کسب و کار شود[۱].

۲-۳ مروری بر تحقیقات انجام شده

در این قسمت، به طور خلاصه مقالاتی که در زمینه مدیریت هزینه توان مصرفی مراکز داده اینترنت مطالعه کرده‌اند، بررسی می‌شود. و سپس به مقالاتی که از بافری انرژی جهت مدیریت هزینه استفاده شده، پرداخته می‌شود. و در انتها مقالاتی که از روش Unscented Transformation استفاده کرده‌اند، بررسی می‌شوند.

۲-۳-۱ مدیریت هزینه توان مصرفی

معمولا مراکز داده اینترنت برای بالا بردن قابلیت اطمینان و کاهش زمان تاخیر، به صورت چندگانه در مناطق مختلف ساخته می‌شوند. سرورهای رابط الگوی توزیع حجم درخواست‌ها را بین مراکز داده تحت بازارهای چندگانه برق مدیریت می‌کنند. حجم درخواست‌ها به IDCهایی که قیمت برق ارزان‌تری دارند، انتقال می‌یابند. البته این انتقال در صورتی انجام می‌گیرد که محدودیت‌ها از جمله محدودیت کیفیت سرویس‌دهی را رعایت کنند [۱۲]. حال مراجعی که از این روش برای کاهش هزینه توان مصرفی استفاده کرده اند، بررسی می‌شوند.

در مرجع‌های [۱۳، ۱۴] IDCها در موقعیت‌های مختلف جغرافیایی واقع شده اند که تحت بازارهای مختلف به صورت توزیع شده قرار دارند. در این مراجع ، توزیع حجم درخواست‌ها بر اساس قیمت اولویت‌بندی می‌شوند. سرورهای رابط ابتدا حجم درخواست‌ها را به مرکز داده‌ای که قیمت برق در آن منطقه پایین‌تر است انتقال می‌دهد و همینطور کیفیت سرویس‌دهی نیز رعایت می‌شود. تاخیر صف‌بندی با استفاده از مدل صف‌بندی M/M/n مدلسازی می‌شود. همچنین، مساله در قالب برنامه ریزی صحیح (MIP)[۵] مختلط فرمول‌بندی شده است و برای حل آن یک الگوریتم موثر پیشنهاد شده است. در نهایت هزینه توان مصرفی سیستم کلی به مقدار قابل ملاحظه‌ای نسبت به توزیع میانگین حجم درخواست‌ها کاهش می‌یابد.

در مرجع [۱۵]، مساله توزیع بهینه حجم بار بین مراکز داده توزیع شده با در نظر گرفتن تاخیر انتقال در قالب برنامه‌ریزی غیرخطی صحیح مختلط (MINLP)[۶] مدلسازی می‌شود. همچنین، یک الگوریتم شاخه و کران ابداعی با فیدبک (HBBF)[۷] جهت حل مساله پیشنهاد شده است.

---

[5] Mixed-Integer Programming
[6] Mixed-Integer Nonlinear Programming
[7] Heuristic based Branch and Bound with Feedback

در مرجع [۱۶]، به مسئله مدیریت انرژی برای مراکز داده ابری در میکروشبکه هوشمند رسیدگی کرده است. برنامه‌ریزی تصادفی بوسیله وابستگی قیود با تخصیص حجم درخواست‌ها، خرید و فروش برق، مدیریت باتری، ژنراتور پشتیبان، و تعادل توان فرمول‌بندی شد. برای حل مسئله برنامه‌ریزی تصادفی، الگوریتم آنلاین طراحی شد و عملکرد الگوریتمی تحلیل شد.

در مرجع [۱۷] یک راه مدیریت منابع آنلاین که EBud[۸] (بودجه ریزی انرژی) نامیده می‌شود، برای مراکز داده مجازی معرفی می‌شود. EBud تعیین‌کننده تعداد سرورها، مجموع منابع برای دستگاه‌های مجازی و توزیع حجم درخواست مشابه برای کمینه کردن هزینه عملیاتی مراکز داده است.

مرجع [۱۸] به کمینه کردن هزینه اپراتور مراکز داده با زمان‌بندی تمام حجم درخواست مراکز داده و شارژ EV در محدودیت توان رسیدگی کرده است. مسئله فرمول‌بندی شده یک مسئله بهینه سازی پیچیده مقیاس بزرگ با وابستگی تزویج و قید فاصله‌ای تزویج است که یک الگوریتم توزیع شده برای حل آن پیشنهاد شد.

مسئله مدیریت انرژی برای کمینه کردن هزینه انرژی IDCها در بازار برق قانون‌زدا[۹] توسط Luo و همکاران در مرجع [۱۹] مطالعه شده است. دو مرحله جدید طراحی و الگوریتم بهینه‌سازی هزینه انرژی برای بهره‌برداری از اختلاف زمانی قیمت برق و حجم درخواست زمان‌بندی شده برای اجرا کردن بر سرویس‌های IDC در صف بندی ورودی است.

در مرجع [۲۰] با استفاده از زمانبندی حجم درخواست خاص و زمانی برای کمینه کردن مصرف انرژی، هزینه برق، و یا کربن‌زدایی در مدیریت خودی مراکز داده است. از سه الگوریتم توزیع شده برای دستیابی به تعادل بار جغرافیایی بهینه نتیجه گرفت.

[8] Energy Budgeting
[9] deregulated electricity markets

۲-۳-۲ مدیریت بافری انرژی

با توجه به الگوی مصرف برق در هر موقعیت جغرافیایی، قیمت برق متناسب با آن تعیین می‌شود. به این صورت که در ساعات پیک مصرف برق، قیمت برق بالاترین مقدار را دارد و در ساعاتی که مصرف برق پایین است، قیمت برق نیز پایین است. بنابراین قیمت برق در یک روز متغیر است. یک روش برای کاهش هزینه برق و اصلاح الگوی مصرف مرکز داده، استفاده از بافری انرژی است. به این صورت که توان را در ساعات ارزانی برق در دستگاه ذخیره ساز انرژی ذخیره می‌کند و در ساعات گرانی و اوج مصرف برق، توان ذخیره شده را از ذخیره ساز تحویل می‌گیرد. این روش در صنایع بزرگ و تجهیزات هوشمند به کار گرفته می‌شود [۲۱]. با افزایش وابستگی تمام کاربران به وسایل هوشمند، سایز و تعداد مراکز داده اینترنت نیز افزایش یافته است. با این گسترش، مراکز داده اینترنت برای انجام دادن وظایف روزانه خود مقدار بسیار زیادی انرژی مصرف می‌کنند. گرچه انتشار کربن از این مراکز داده اینترنت ضررات زیست محیطی جهانی نیز دارد. برای حل این مشکل، یکپارچگی مراکز داده اینترنت با منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند به کاهش انتشار کربن کمک کند. در مرجع [۵۱] طرح مدیریت انرژی بر مبنای SDN[۱۰] برای مراکز داده اینترنت با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. الگوریتم زمانبندی بهره‌وری انرژی[۱۱] با استفاده از SDN پیشنهاد شده است، و همینطور طرح شارژ و دشارژ برای ورود وسایل الکتریکی (EVs)[۱۲] نیز برای مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر متناوب ارائه شده است.

در مرجع [۲۲] برای هر مرکز داده یک بافری انرژی در نظر گرفته شده است، که باعث کاهش هزینه توان مصرفی می‌شود. با مدیریت زمان‌های شارژ و دشارژ باتری، هزینه توان مصرفی کاهش می-یابد. در این مقاله از روش کنترل مبتنی بر مدل (MPC)[۱۳] استفاده شده است.

---

10 software-defined network
11 energy-efficient flow scheduling algorithm
12 electric vehicles
13 Model Predictive Control

در مرجع [۲۳]، برای کاهش هزینه توان مصرفی مراکز داده از UPS (سیستم‌های ذخیره‌ساز) استفاده شده است. به این صورت که پیک توان مصرفی مراکز داده به ساعت‌های کم‌باری انتقال یافته است. در این مقاله عمق دشارژ باتری هم در نظر گرفته شده است.

در مرجع [۲۴]، با استفاده از روش بهینه‌سازی لیاپانوف، الگوریتمی طراحی شده که تعادلی بین هزینه انرژی و هزینه باتری برقرار می‌کند. در این مقاله، مساله کمینه‌کردن هزینه انرژی مراکز داده اینترنت توزیع شده در شبکه هوشمند بررسی شده است. اپراتورهای مراکز داده اینترنت انتظار دارند که هزینه انرژی بلند مدت را با عدم‌قطعیت‌های قیمت برق، حجم درخواست‌ها، تولید انرژی تجدیدپذیر کمینه کنند.

برای حفاظت زیست محیطی و کاهش هزینه انرژی، مراکز داده اینترنت تمایل به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر دارند. در این مقاله، هزینه برق مرکز داده با روش هوشمند بهره‌برداری از انرژی سبز برای کاهش هزینه برق مراکز داده استفاده شده است [۲۵].

در مرجع [۲۶]، از انرژی خورشیدی و بافری انرژی برای کاهش مصرف هزینه و کاهش کربن-زدایی استفاده کرده است. در شرایط مختلف محیطی و حجم درخواست‌های متفاوت مساله ارزیابی شد. روش مورد استفاده بصورت آنلاین پیاده سازی شد.

در سال‌های اخیر با توجه به مصرف انرژی بالای مراکز داده اینترنت، بسیاری از مطالعات به این نتیجه رسیده‌اند که از منابع انرژی تجدیدپذیر برای توان‌دهی به مراکز داده اینترنت استفاده کنند. از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌توان به طور مستقیم در محل استفاده کرد. در مرجع [۵۲] روشی ارائه شده است که در دسترس بودن منابع انرژی تجدیدپذیر را برای کاهش نیاز به انرژی قهوه‌ای و کاهش هزینه در نظر گرفته است. روش پیشنهادی با فراهم کردن الگوریتم زمانبندی اگنوستیک زیرساختار الکترونیکی[14] از روش‌های موجود متفاوت است. در این مقاله، روش بر روی یک شبیه‌ساز مرکز داده

[14] Scheduling algorithm agnostic of the electrical infrastructure

پیاده‌سازی شد که توسط صفحات خورشیدی توان‌دهی می‌شود و به شبکه برق متصل است. نتایج نشان می‌دهد ۴۹٪ از مصرف انرژی قهوه‌ای کاهش و نیز هزینه ۵۱٪ کاهش داشته است، در مقایسه با حالتی که منابع انرژی تجدیدپذیر نباشد.

۲-۳-۳ عدم قطعیت

۲-۳-۳-۱ مقدمه

هر مسئله مهندسی با توجه به ماهیت تصادفی پدیده‌های طبیعی و یا نادرستی فرضیات مربوط به روش مدل‌سازی، دارای عدم‌قطعیت می‌باشد. روش‌های محاسباتی به مهندسین اجازه استفاده از راه‌حل‌هایی را می‌دهد که در عین حساسیت کمتر نسبت به تاثیرات محیطی، همزمان به هزینه کمتر و یا بهبود قابلیت اطمینان منجر شوند.

در تحلیل سیستم‌های قدرت، برای کنترل و کاهش خطرپذیری مربوط به طراحی و عملکرد سیستم نیاز به استفاده از روش‌هایی است که قابلیت درنظر گرفتن عدم‌قطعیت را دارند. منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین تجدیدساختار سیستم‌های قدرت، باعث به وجود آمدن عدم‌قطعیت‌های جدیدی در مراحل بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری شده است. در نتیجه یکی از مشخصه‌های برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم قدرت این است که مسائل تصمیم‌گیری با سطح قابل‌توجه‌ای از اطلاعات دارای عدم قطعیت مواجه می‌شوند. پارامترهای غیرقطعی یک سیستم قدرت به دو گروه تقسیم می‌شوند:

۱) پارامترهای فنی: این پارامترها به طور کلی به دو دسته اصلی پارامترهای مکانی و پارامترهای عملیاتی تقسیم می‌شوند. پارامترهای مکانی مربوط به توپولوژی شبکه مانند خرابی، خروج خطوط، ژنراتورها یا دستگاه‌های اندازه‌گیری و غیره است. پارامترهای عملیاتی به تصمیم‌های عملیاتی مانند مقادیر تقاضا یا تولید در سیستم‌های قدرت وابسته هستند.

۲) پارامترهای اقتصادی: پارامترهای تاثیرگذار بر شاخص‌های اقتصادی در این طبقه قرار می‌گیرند. اقتصاد خرد به تصمیمات بخش‌های تجاری کوچک‌تر مانند مشتری‌های صنعتی یا خانگی رسیدگی می‌کند، درحالی که اقتصاد کلان بر صنعت سیستم قدرت یکپارچه تمرکز

می‌کند. برای مثال، عدم‌قطعیت در منبع سوخت، هزینه‌های تولید، مالیات تجارت، نیروی انسانی و مواد خام در اقتصاد خرد تحلیل شده‌اند. از سوی دیگر، قانون‌مندی یا قانون‌زدایی، قوانین زیست‌محیطی، رشد اقتصادی، نرخ بیکاری، تولید ناخالص خانگی (GDP)[۱۵]، نرخ بهره در اقتصاد کلان تحلیل شده‌اند. همه این پارامترها دستخوش عدم قطعیت هستند و باید به درستی در مطالعات اقتصادی نشان داده شوند [۵۳].

۲-۳-۳-۲ انواع روش‌های مدلسازی عدم قطعیت

شیوه‌های مختلفی برای دست‌یابی به مسائل دارای عدم قطعیت وجود دارد. هدف اصلی این روش‌ها اندازه‌گیری تاثیر پارامترهای ورودی غیرقطعی بر پارامترهای خروجی سیستم است. اما تفاوت اصلی بین این روش‌ها استفاده از راه‌های متفاوت برای توصیف عدم قطعیت پارامترهای ورودی است. برای مثال، در روش‌های احتمالی از PDF[۱۶] استفاده شده است، درحالی که در روش فازی یک تابع عضویت MF[۱۷] برای مدل‌سازی پارامترهای غیرقطعی استفاده شده است. در ادامه به بررسی روش‌های مدل‌سازی عدم‌قطعیت می‌پردازیم [۵۴].

۱) روش احتمالی: در این روش فرض می‌شود که PDF متغیرهای ورودی معلوم باشد. یکی از اولین کارها در برنامه‌ریزی تصادفی در سال ۱۹۵۵ در [۵۵] انجام شده است.

۲) روش امکانی: یک MF برای مدل‌سازی پارامترهای ورودی در این روش تعیین می‌شود. حساب فازی در مرجع [۵۶] معرفی شده است.

۳) روش‌های ترکیبی امکانی و احتمالی: هر دو نوع پارامترهای امکانی و تصادفی برای کنترل پارامترهای ورودی غیرقطعی استفاده می‌شوند.

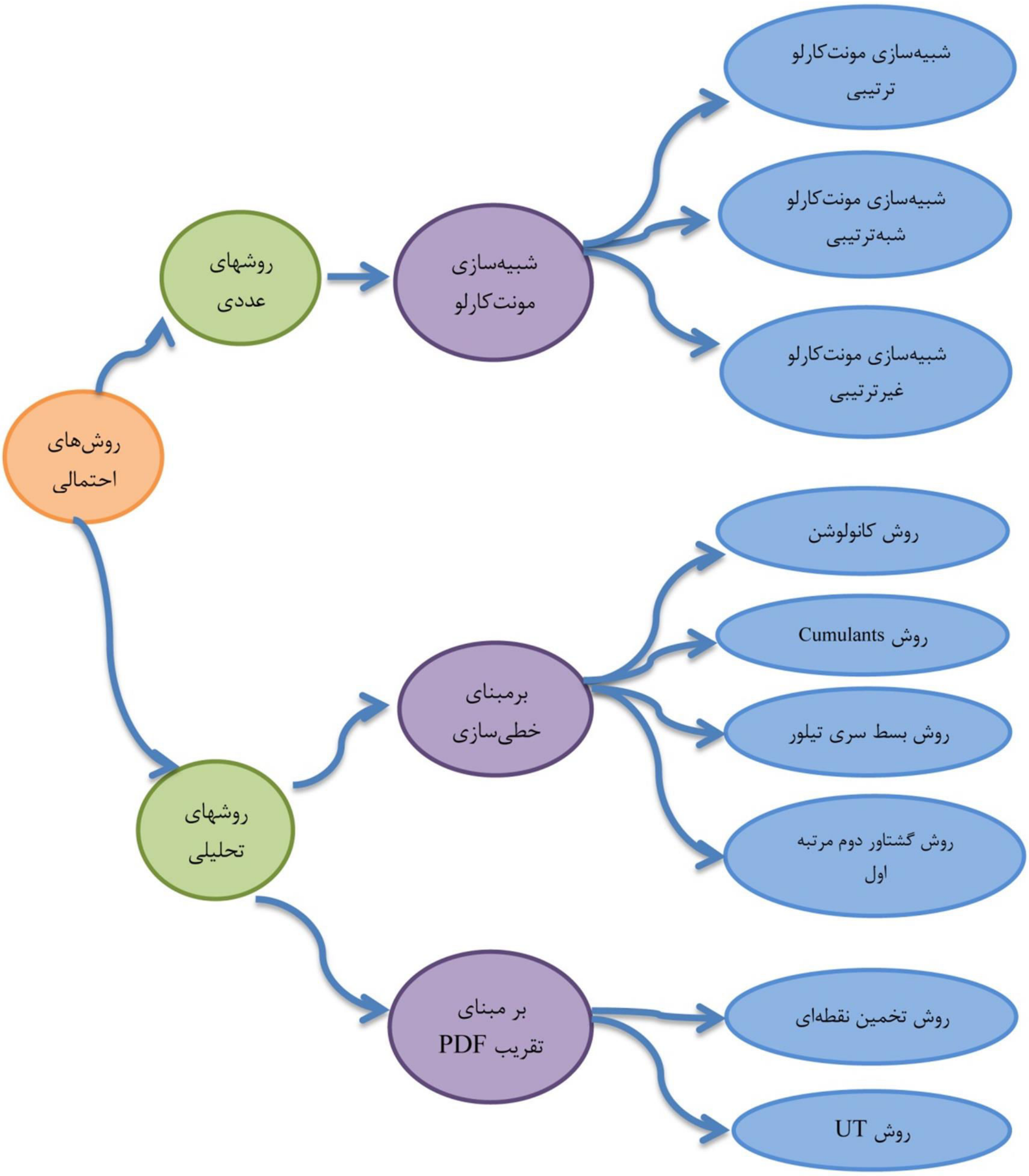
---
[15] Gross Domestic Product
[16] Probability Density Function
[17] Member Function

۴) IGDT: در مقایسه با تئوری‌های تصمیم احتمالی و امکانی، IGDT از PDF یا MF استفاده نمی‌کند، در واقع خطا یا همان تفاوت بین مقدار واقعی پارامترها و مقدار پیش‌بینی شده آن‌ها را اندازه می‌گیرد. برای اولین بار در [۵۷] مطرح شده است.

۵) بهینه‌سازی مقاوم: در اینجا مجموعه عدم قطعیت‌ها برای توصیف عدم قطعیت پارامترهای ورودی استفاده می‌شود. با استفاده از این روش، تصمیمات بدست آمده برای بدترین حالت نیز بهینه باقی می‌ماند. برای اولین بار در [۵۸] مطرح شده است.

۶) تجزیه و تحلیل بازه‌ای: در اینجا فرض می‌شود که پارامترهای غیرقطعی از یک بازه معلوم مقدار می‌گیرند، تا حدودی شبیه به مدل‌سازی احتمالی با یک PDF واحد می‌باشد. این روش محدوده متغیرهای خروجی را پیدا می‌کند.

تمامی روش‌های توضیح داده شده در بالا به طور خلاصه در شکل (۲-۲) آمده است.



شکل ۲-۲: فلوچارت روش‌ها به طور خلاصه [۵۹]

۲-۳-۳-۲-۱ روش *UT*[18]

در طبقه‌بندی تکنیک‌ها، سه راه حل مختلف برای مدلسازی عدم‌قطعیت وجود دارد:

۱) شبیه‌سازی مونت‌کارلو (MCS[19])

۲) روش‌های تحلیلی

---
[18] Unscented Transformation
[19] Monte carlo simulation

۳) روش‌های تقریبی

نقص بزرگ شبیه‌سازی مونت‌کارلو تعداد زیاد اجراهای مورد نیاز برای همگرایی است، و همینطور، روش‌های تحلیلی دارای محاسبات کارآمدی هستند اما کار کردن بر مبنای بعضی فرضیات ریاضی برای سادگی مسئله است. در گروه آخر، روش‌های تقریبی موجود بر ضعف روش‌های بالا غلبه کردند و بنابراین مفیدتر هستند. روش UT یکی از مشهورترین روش‌ها در میان روش‌های تقریبی است. این روش یک ابزار قدرتمندی برای مدلسازی عدم‌قطعیت در تبدیل خطی همبسته است که توسط محققان معرفی شد [۶۰]. از جمله مشخصات این تکنیک برنامه‌نویسی آسان و ساده، توانایی بالا در گرفتن عدم‌قطعیت، بار محاسباتی کم، و توانایی بالا برای مدلسازی عدم‌قطعیت در محیط همبسته است. تکنیک UT از این واقعیت استفاده می‌کند که تقریب یک تابع توزیع احتمال (PDF) نسبت به یک تابع غیرخطی دلخواه ساده‌تر است. توانایی بالای تکنیک UT در میان دیگر روش‌های مشهور در مرجع [۶۰] نشان داده شده است. برای درک بهتر این تکنیک می‌خواهیم عدم قطعیت مسئله تصادفی غیر خطی ($Y = f(X)$ را مدل کنیم ؛ که y بردار خروجی، f تابع غیرخطی، و x متغیرهای تصادفی ورودی است. اگر مسئله دارای تعداد n پارامتر غیرقطعی باشد، x بردار طول n با مقدار میانگین μ و کوواریانس P_{XX} است. واضح است که المان‌های متقارن P_{XX} واریانس متغیرهای غیرقطعی است و المان‌های نامتقارن کوواریانس پارامترهای نامعین مختلف است. روش UT مسئله را با n متغیر غیرقطعی، 2n+1 بار برای مدلسازی عدم‌قطعیت حل می‌کند [۶۱]. در ادامه روش‌هایی برای بررسی عدم‌قطعیت بیان می‌شود.

در مرجع [۲۷] مروری دارد بر تکنیک های احتمالی مورد استفاده برای مطالعه پخش توان بهینه احتمالی و روش UT[۲۰] را پیشنهاد داده است. روش پیشنهادی می‌تواند همبستگی بین متغیرهای غیرقطعی ورودی را در نظر بگیرد. برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، دو مطالعه موردی انجام

[20] Unscented Transformation

شد و نتایج بدست آمده با شبیه‌سازی مونت‌کارلو[21] و روش تخمین دونقطه‌ای[22] مقایسه شد. مقایسه نتایج کارایی روش پیشنهادی را نسبت به معیارهای دقت و زمان اجرا توجیه کرد.

روش‌های احتمالی زیادی برای مطالعه بر سیستم‌های قدرت غیرقطعی پیشنهاد شده است. این روش‌ها به دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند: روش‌های شبیه‌سازی و روش‌های تحلیلی. شبیه‌سازی مونت‌کارلو (MCS) بر مبنای روش شبیه‌سازی به طور گسترده استفاده می‌شود. MCS نتایج دقیقی دارد اما اجرایش به شدت زمان‌بر است. گرچه، تکنیک‌های کاهش سناریو برای کاهش زمان اجرای این روش استفاده می‌شود[۲۸].

در مرجع [۲۹] روش Gaussian Mixture برای پخش بار با در نظر گرفتن متغیرهای ورودی همبسته‌ی غیرگوسی ارائه شده است. که تعداد آزمایش‌ها به تعداد اجزاء گوسی بکار رفته برای مدلسازی هر متغیر تصادفی ورودی بستگی دارد.

در مرجع [۳۰] مدل پیشنهادی با استفاده از روش تخمین نقطه‌ای برای پخش‌بار احتمالاتی سیستم‌های قدرت ارائه شده است. که همبستگی بین متغیرهای تصادفی ورودی در نظر گرفته شده است.

در مرجع [۳۱] با استفاده از تکنیک پیشنهادی مسئله پخش بار احتمالی با منابع توان بادی همبسته و بارها با روش پیشنهادی حل شد.

21 Monte Carlo simulation
22 Two Point Estimation

فصل سوم:

مدلسازی مساله

۳-۱ مقدمه

با تسهیل ارتباطات و محاسبات پیشرفته، شبکه هوشمند فرصت‌هایی را برای کاربران فراهم می‌کند که نیاز به برق آنها با حداقل هزینه برطرف شود. که در اینجا مراکز داده اینترنت به عنوان مثال بیان شده‌اند. برای برطرف کردن تقاضای کاربران جهانی، مراکز داده اینترنت در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف واقع شده‌اند. هر مرکز داده شامل صدها یا حتی هزاران سرور است. که درخواست‌های ارسالی از سوی کاربران توسط سرورهای رابط به مراکز داده اینترنت ارسال می‌شوند، و مرکز داده‌ای را برای انتقال حجم درخواست‌ها در اولویت قرار می‌دهد که قیمت برق ارزان‌تری دارد. توان از شبکه هوشمند به مراکز داده توزیع شده تحویل داده می‌شود. به دلیل این‌که قطعی برق مراکز داده ضرر بسیار زیادی برای صاحبان شرکت دارد، بنابراین باید قابلیت اعتماد مرکز داده افزایش یابد. هر مرکز داده دارای ژنراتورهای دیزلی هستند تا در صورت قطعی برق، توان مورد نیاز مرکز داده را تأمین کنند. در حالی که در صورت قطعی برق و تا زمانی که ژنراتورهای پشتیبانی راه‌اندازی شود، فاصله زمانی کوتاهی وجود دارد؛ بنابراین برای توان‌دهی به مراکز داده در این زمان کوتاه از باتری‌های *UPS* استفاده می‌شود و توان ذخیره شده در باتری‌ها به مراکز داده تحویل داده می‌شود. حال می‌توان مراکز داده را به باتری‌هایی با ظرفیت بالا(چند برابر ظرفیت مورد نیاز برای مواقع اضطراری) مجهز کرد. بنابراین، از ظرفیت اضافی برای بافری انرژی جهت کاهش هزینه توان مصرفی استفاده می‌شود. به این صورت که باتری در ساعاتی که قیمت برق پایین است شارژ شود و در ساعات گرانی برق دشارژ شود. در مرحله دوم مراکز داده توزیع شده به همراه باتری مدلسازی می‌شود. در مرحله سوم برای هر مرکز داده علاوه بر باتری یک توربین بادی هم در نظر گرفته شده است که علاوه بر کاهش هزینه توان مصرفی مراکز داده، باعث توزیع بهتر حجم درخواست‌ها در مراکز داده نیز می‌شود [۳۲], [۲۲].

ابتدا در این فصل، مساله توزیع بهینه حجم درخواست‌ها بین مراکز داده توزیع شده تحت بازارهای برق مختلف مدلسازی می‌شود. سپس، در مرحله دوم، به هر مرکز داده یک سیستم ذخیره‌ساز جهت بافری انرژی اضافه شده و سیستم کلی با در نظر گرفتن تمام محدودیت‌ها، برای بهینه‌سازی هزینه

توان مصرفی مدلسازی می‌شود. در مرحله سوم، برای هر مرکز داده علاوه بر یک سیستم ذخیره‌ساز، یک توربین بادی هم در نظر گرفته شده است که عدم قطعیت آن با روش Unscented Transformation مدلسازی شده است. به این صورت که توربین بادی سبب بهینه سازی هزینه توان مصرفی مراکز داده و توزیع بهترحجم درخواست‌ها می‌شود.

۳-۲ بیان ریاضی مسئله

مساله بهینه‌سازی هزینه توان مصرفی در سه مرحله بهینه‌سازی می‌شود.

حالت اول

بهینه‌سازی توان مصرفی با استفاده از توزیع بهینه حجم درخواست‌ها بین مراکز داده بدون در نظر گرفتن باتری و توربین بادی

حالت دوم

بهینه‌سازی توان مصرفی با استفاده از توزیع بهینه حجم درخواست‌ها بین مراکز داده به همراه بافری انرژی

حالت سوم

بهینه‌سازی توان مصرفی با استفاده از توزیع بهینه حجم درخواست‌ها بین مراکز داده به همراه بافری انرژی و در نظر گرفتن توربین بادی.

ابتدا نشانه‌گذاری و تعاریف در جدول(۳-۱) آورده شده است [۳۲] . سپس فرمول بندی ارائه می‌شود:

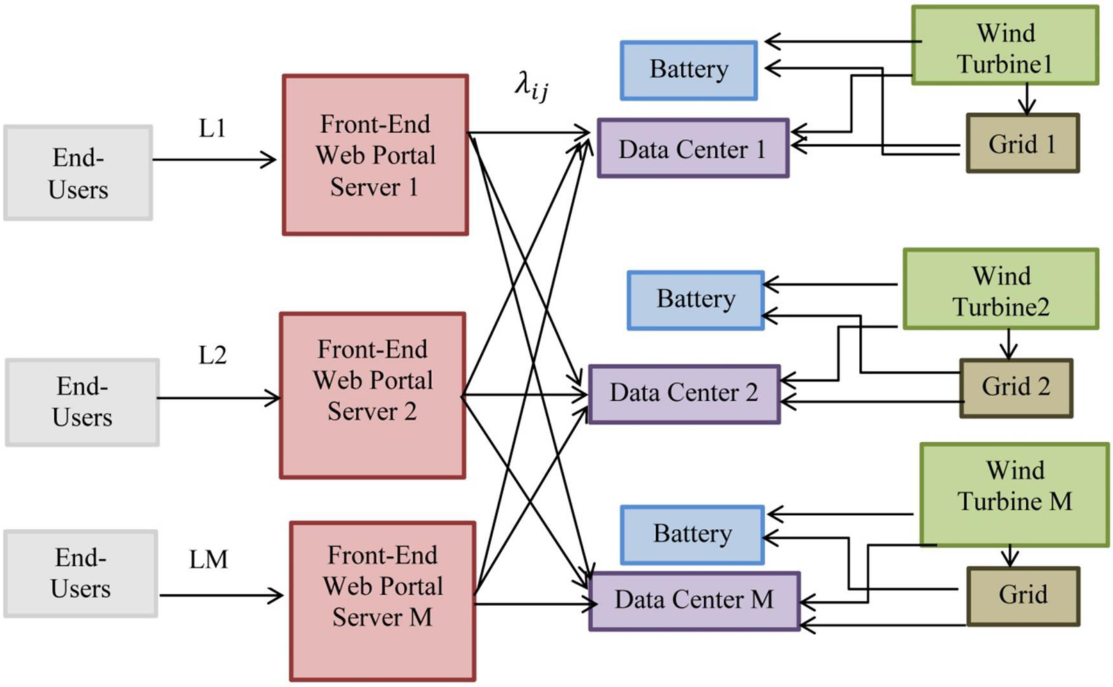
جدول ۳-۱: علامت‌گذاری و تعریف‌ها

I	موقعیت مراکز داده i
J	سرور رابط j
t	زمان t
N	تعداد کلی موقعیت‌های IDC

C	تعداد کلی سرورهای رابط
μ_i	نرخ سرویس‌دهی سرور j
D_i	محدودیت تاخیر i
L_j	توزیع درخواست‌ها از کاربران اینترنت به سرورهای رابط j
λ_{ji}	نرخ درخواست ها از j به i
$\Pr_i(t)$	قیمت لحظه‌ای برق در موقعیت i در لحظه t
U_i	حداکثر نرخ ذخیره توان
$u_i(t)$	مقدار توان شارژ شده در باتری در موقعیت i در زمان t
Q_i	حداکثر نرخ تخلیه توان
$q_i(t)$	مقدار توان دشارژ شده در باتری در موقعیت i در زمان t
$X_i(t)$	حالت شارژ باتری i در زمان t
θ	نرخ بازدهی شارژ شدن
Ce	سطح اضطراری باتری
C	ظرفیت باتری
M_i	تعداد کل سرورهای موجود در موقعیت i
$Pg_i(t)$	توانی که مرکز داده به همراه باتری از شبکه در موقعیت i در زمان t دریافت می‌کند.
m_i	تعداد سرورهای روشن در هر مرکز داده در موقعیت i
Po_i	توان مصرفی مرکز داده i
$Z\cos t(t)$	هزینه توان مصرفی هر مرکز داده در ساعت
$Pwtg_i(t)$	توان توربین بادی i در زمان t

سیستم کلی:

شکل کلی سیستم مورد نظر به صورت شکل (۳-۱) است که شامل i مرکز داده در موقعیت‌های مختلف تحت بازارهای برق متفاوت است. تعداد j سرور رابط وجود دارد که حجم درخواست‌ها را با نرخ L_j دریافت می‌کنند و این حجم بار را با نرخ λ_{ji} بین مراکز داده توزیع می‌کنند. و برای هر مرکز داده یک بافری انرژی و یک توربین بادی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳-۱: ساختار کلی سیستم

برای مدلسازی مساله به سه بخش تقسیم می‌گردد. ابتدا سیستم بدون در نظر گرفتن باتری و فقط مساله توزیع بهینه حجم درخواست‌ها مدلسازی می‌شود. در بخش دوم، باتری‌ها جهت بافری انرژی به سیستم اضافه شده و سیستم مدل می‌شود. در بخش سوم، توربین بادی با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت آن به سیستم اضافه می‌شود و سیستم مدلسازی می‌شود.

در این قسمت، جزئیات مدلسازی کمینه‌کردن هزینه برق کلی برای *IDC*ها در محیط بازار برق چندگانه آورده شده است. در ابتدا مدلسازی هزینه برق کلی، قید حجم کار و قید تاخیر به ترتیب آورده شده است.

۳-۳ حالت اول (فرمول‌بندی مساله کمینه سازی هزینه برق کلی)

هدف از این مرحله کمینه کردن هزینه برق مراکز داده توزیع شده تحت بازارهای مختلف با استفاده از انتقال بهینه بار است. در این قسمت برای سادگی مساله، دو فرض اساسی در نظر گرفته شده است. ۱) فرض می‌شود که پروفیل توان مصرفی برای هر سرور در هر موقعیت ثابت است. و معمولا زمانی صحیح است که هر مرکز داده از سرورهایی با پیکربندی همسان استفاده کند. مصرف توان واقعی هر سرور در یک مرکز داده در هر موقعیت i بر مبنای فرکانس سرور، f_i ، و مصرف CPU ، U_i تخمین زده می‌شود. بنابراین مصرف توان کلی Po_i در هر مرکز داده i با ضرب تعداد کلی سرورها در موقعیت i در مقدار توان مصرفی برای هر سرور بدست می‌آید. ۲) همچنین فرض می‌شود سرورهایی که در یک موقعیت قرار دارند نرخ ترافیک یکسانی را در حالت ماندگار دریافت می‌کنند. بنابراین هزینه برق کلی برای N موقعیت مرکز داده به صورت فرمول (۳-۱) داده شده است:

$$T_{total} = \sum_{i=1}^{N} m_i . \Pr_i(t) . Po_i \qquad (۳-۱)$$

که هدف مسئله مدیریت توان، کمینه کردن هزینه برق کلی T_{total} برای مراکز داده اینترنت در محیط بازار برق چندگانه است. در فرمول بالا m_i تعداد سرورهای فعال مرکز داده i در ساعت t، $\Pr_i(t)$ قیمت برق در موقعیت i و در زمان t است و $Po_i(t)$ توان مصرفی هر سرور در موقعیت i و در زمان t است. قیود شامل قید حجم درخواست و قید تاخیر است که در ادامه توضیح داده خواهد شد. نکته قابل توجه در رابطه بالا این است که مراکز داده تحت بازار روز-قبل هستند که قیمت برق در ساعات مختلف را برای برنامه ریزی روز آینده در اختیار دارند. که مساله بهینه‌سازی به صورت فرمول (۳-۲) خواهد شد:

$$T_{total} = \sum_{i=1}^{N} m_i \Pr_i(t) Po_i$$
$$subject\ \text{to}$$
$$\text{Delay constraint}, \quad \forall i=1,...,N,$$
$$\text{Workload constraint}, \quad \forall j=1,...,C, \qquad (۲-۳)$$
$$\text{Device constraint}, \quad \forall i=1,...,N.$$

۳-۳-۱ مدلسازی قید حجم درخواست:

در این قسمت قید حجم درخواست مدلسازی می‌شود. در ابتدا یک درخواست توسط سرورهای رابط نگهداری می‌شود، سپس به یک سرور در یک موقعیت خاص IDC برای پردازش ارسال می‌شود. درخواست تقاضا در هر سرور رابط j به صورت L_j ($\forall j=1,...,C$) در فرمول (۳-۳) نشان داده شده است. نرخ درخواست‌های ورودی از سرورهای رابط j به موقعیت i، λ_{ji} است.

$$\sum_{i=1}^{N} \lambda_{ji} = L_j, \quad \forall j=1,...,C \qquad (۳-۳)$$

۳-۳-۲ تعداد سرورهای فعال

در هر موقعیت یک مرکز داده، معمولا صدها یا حتی هزاران سرور وجود دارد که از عهده تعداد زیاد درخواست‌ها بر بیاد. اگرچه، محدودیت M_i بر روی تعداد سرورهای m_i در هر موقعیت i یک IDC وجود دارد. بنابراین، محدودیت زیر را در فومول (۳-۴) خواهیم داشت:

$$m_i \le M_i \quad \forall i=1,...,N \qquad (۴-۳)$$

که M_i تعداد کل سرورهای هر مرکز داده است.

۳-۳-۳ مدلسازی قید تاخیر

در این قسمت، از مدل صف‌بندی M/M/n برای مدل کردن هر سرور در مرکز داده استفاده شده است. در مدل صف‌بندی M/M/n ، میانگین تاخیر D، به صورت $(1)/(n\mu-\lambda)P_Q$ بیان شده است، که n تعداد سرورها، μ نرخ سرویس، λ نرخ ورود و احتمال انتظار در صف مشتری P_Q است. در یک مرکز

داده، می‌توان فرض کرد که سرورها همیشه مشغول هستند، به این معنی که همیشه درخواست انتظار در صف وجود دارد که P_Q برابر ۱ است.

در موقعیت i با تعداد m_i سرور، وقتی هر سرور نرخ سرویس μ_i را دارد و نرخ ورودی کلی $\sum_{j=1}^{C}\lambda_{ji}$ است، میانگین تاخیر D_i^{CPU} به صورت فرمول (۳-۵) است:

$$D_i^{CPU} = \frac{1}{m_i\mu_i - \sum_{j=1}^{C}\lambda_{ji}} \qquad (۳-۵)$$

به منظور برطرف کردن نیاز همه کاربران، قید تاخیر D_i برای میانگین تاخیر در هر موقعیت i به صورت فرمول (۳-۶) است:

$$\frac{1}{m_i\mu_i - \sum_{j=1}^{C}\lambda_{ji}} \le D_i, \quad \forall i=1,\ldots,N. \qquad (۳-۶)$$

بر اساس فرمول‌بندی‌ها و مدلسازی‌های گفته شده در بالا، مسئله به صورت فرمول (۳-۷) نوشته می-شود:

$$\begin{aligned}
&\min_{m_i,\lambda_{ji}} \sum_{i=1}^{N} m_i \Pr_i(t) Po_i \\
&\textit{subject to} \\
&\qquad \frac{1}{m_i\mu_i - \sum_{j=1}^{C}\lambda_{ji}} \le D_i, \quad \forall i=1,\ldots,N \\
&\qquad \sum_{i=1}^{N}\lambda_{ji} = L_j, \quad \forall j=1,\ldots,C \\
&\qquad m_i \le M_i, \quad \forall i=1,\ldots,N \\
&\qquad m_i \in N, \quad \forall i=1,\ldots,N.
\end{aligned} \qquad (۳-۷)$$

که در مدلسازی بالا متغیرهای مساله تعداد سرورهای فعال $m_i(t)$ و نرخ بار محاسباتی انتقال یافته از سرور وب نهایی i به مرکز داده j ($\lambda_{ji}(t)$) است [۳۲].

۳-۴ مرحله دوم (با استفاده از باتری)

در این قسمت، هدف کمینه کردن هزینه برق با استفاده از انتقال بهینه بار و بافری انرژی است. در این مساله برای هر مرکز داده یک باتری در نظر گرفته می‌شود که علاوه بر مساله قابلیت اعتماد، هزینه‌های برق مراکز داده را کمتر کند. به این صورت که در ساعاتی که قیمت برق ارزان است باتری شارژ و در ساعات اوج مصرف و گرانی برق، باتری دشارژ می‌شود که هم به مصرف بار در ساعات اوج کمک می‌کند و هم هزینه را کاهش می‌دهد که سود ارائه دهنده اینترنت را افزایش می‌دهد. همچنین در این مدلسازی قیمت برق نیز در نظر گرفته می‌شود[۴۵] .

۳-۴-۱ مدل هزینه باتری

در این مطالعه باتری‌های لیتیومی استفاده شده است. عملکرد این باتری‌ها بدین صورت است که ظرفیت آنها تا زمانی که حداکثر ظرفیت دشارژ شدن باتری به کمتر از ۸۰ درصد برسد، به تدریج کاهش می‌یابد [۳۳]. در تابع هدف به جای استفاده از قیمت باتری، از هزینه انرژی بافری در باتری استفاده می‌کنیم که با استفاده از فرمول (۳-۸) محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{Pr}\,battery\,(t) = \frac{P1}{DoD.nt.C} \qquad (۳-۸)$$

$P1$ قیمت باتری، nt تعداد شارژ و دشارژها در طول عمر باتری و C حداکثر ظرفیت باتری است. DOD میانگین عمق دشارژ است.

۳-۴-۲ محدودیت مربوط به باتری

- **قید نرخ شارژ و دشارژ شدن باتری**

حداکثر نرخ شارژ شدن و حداکثر نرخ دشارژ شدن باتری با فرمول‌های (۳-۹) و (۳-۱۰) نشان داده شده است:

$$0 \le u_i(t) \le U_i \quad (۹-۳)$$

$$0 \le q_i(t) \le Q_i \quad (۱۰-۳)$$

در رابطه (۳-۹)، $u_i(t)$ مقدار انرژی شارژ شده در باتری در موقعیت i و زمان t و U_i حداکثر نرخ شارژ شدن است. در رابطه (۳-۱۰)، $q_i(t)$ مقدار انرژی شارژ شده در باتری در موقعیت i و زمان t و Q_i نرخ دشارژ شدن باتری است.

- **قید سطح توان باتری**

هر باتری دارای حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی است و با دشارژ شدن سطح توان باتری تغییر می‌کند. رابطه (۳-۱۱) تغییر سطح توان باتری را نشان می‌دهد:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + u_i(t) - q_i(t) \quad (۱۱-۳)$$

که در رابطه بالا، $X_i(t)$ سطح توان باتری در ساعت t ام است. رابطه بالا به این معنی است که سطح توان در ساعت $t+1$ام برابر است با سطح توان در ساعت tام به علاوه مقدار توانی که در ساعت t ام در باتری ذخیره شد منهای مقدار توانی که در ساعت tام دشارژ شد.

همانطور که گفته شد این باتری برای قابلیت اطمینان برق رسانی به مرکز داده مورد استفاده قرار می‌گیرد. محدودیت سطح توان باتری به صورت فرمول (۳-۱۲) تعریف می‌شود:

$$Ce \le X_i(t) \le C \quad (۱۲-۳)$$

در رابطه بالا، Ce مقدار توان لازم برای مواقع اضطراری است و C ظرفیت باتری است.

۳-۴-۳ محدودیت تعادل توان

در این مساله باید بین توان جذب شده از شبکه توسط مرکز داده و توان مصرفی مرکز داده و توانی که مرکز داده از باتری می‌گیرد تعادل برقرار شود:

$$Ps_i(t) = m_i(t) Po_i \quad (۱۳-۳)$$

$$Pt_i(t) = Ps_i(t) - q_i(t) \quad (۱۴-۳)$$

که $Ps_i(t)$ توان مصرفی مرکز داده i در زمان t است و $Pt_i(t)$ توانی است که مرکز داده i در زمان t از شبکه برق دریافت می‌کند.

۳-۴-۴ محدودیت باتری

رابطه (۳-۱۵) به این معنی است که باتری توانایی شارژ و دشارژ هم زمان را ندارد.

$$u_i(t).q_i(t) = 0 \qquad (۳\text{-}۱۵)$$

با توجه به رابطه (۳-۱۵) باتری در یک زمان نمی‌تواند هم شارژ و هم دشارژ شود. ولی به دلیل اینکه هم u و هم q جزء متغیرهای مساله هستند که در هم ضرب می‌شوند، قید مورد نظر غیرخطی است. به دلیل اینکه نرم‌افزار گمز در حالت غیرخطی نقطه جواب بهینه سراسری را پیدا نمی‌کند، بنابراین برای حل این مساله باید قید مورد نظر خطی‌سازی شود. برای خطی‌سازی، ابتدا یک متغیر باینری به نام a تعریف می‌شود. سپس قید بالا به صورت فرمول (۳-۱۶) و (۳-۱۷) خطی‌سازی می‌شود:

$$u_i(t) \le U_i.a_i(t) \qquad (۳\text{-}۱۶)$$

$$q_i(t) \le (1 - a_i(t)).Q_i \qquad (۳\text{-}۱۷)$$

در فرمول بالا، a یک متغیر باینری است که می‌تواند $\{۱،۰\}$ باشد.

از آنجایی که $u_i(t)$ و $q_i(t)$ همواره بزرگتر از صفر هستند، بنابراین در صورتی که a =۱ باشد، u می‌تواند کمتر از U باشد، یعنی هم می‌تواند U و هم می‌تواند صفر باشد ولی q همواره صفر است و در صورتی که a =۰ باشد، u همواره صفر است ولی q می‌تواند هم صفر و هم مساوی با Q باشد [۲۲].

حال با توجه به آنچه گفته شد، مساله به صورت کامل نوشته می‌شود:

$$\underset{u_i(t),q_i(t),\lambda_{ji}(t),m_i(t)}{Min} \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}(\Pr_i(t)pt_i(t)+\Pr_i(t)\frac{ut}{\theta}+\Pr b_j(t)qt)$$

$$s.t.$$

$$\frac{1}{m_i(t)\mu_i(t)-\sum_{j=1}^{c}\lambda ij(t)} \le D_i \quad , \qquad i=1,...,N$$

$$\sum_{i=1}^{N}\lambda ij(t)=L_j(t), \qquad \text{j=1,...,C}$$

$$0 \le m_i(t) \le M_i, \qquad \text{i=1,...,N}$$

$$m_i(t)\mu_i(t) > \sum_{j=1}^{c}\lambda ij(t), \qquad \text{i=1,...,N} \qquad (۱۸\text{-}۳)$$

$$ut \in \{0\ ,\text{Ut}\}$$

$$qt \in \{0\ ,\text{Qt}\}$$

$$u_i(t) \le U_i.\alpha_i(t)$$

$$q_i(t) \le (1-\alpha_i(t)).Q_i$$

$$Pt_i = \text{Ps}_i(t)-qt$$

$$\text{Ps}=m_i(t).Po_i$$

$$X_i(t+1)=X_i(t)+u_i(t)-q_i(t)$$

$$C_e \le X_t \le C$$

در مدلسازی بالا، متغیرهای مساله عبارتند از:

- تعداد سرورهای فعال در مرکز داده i در ساعت t، $m_i(t)$
- نرخ انتقال حجم درخواست‌ها از سرور وب نهایی j به مرکز داده i ، $\lambda ij(t)$
- مقدار توان شارژ شده در باتری i در ساعت t، $u_i(t)$ بر حسب kwh
- مقدار توان دشارژ شده در باتری i در ساعت t، $q_i(t)$ بر حسب kwh

با توجه به فرمول (۳-۱۸) تابع هدف شامل سه قسمت است. قسمت اول هزینه برقی که مرکز داده از شبکه می‌گیرد که برابر است با $\Pr_i(t)$ (قیمت برق در ساعت t و در موقعیت i)، ضرب در $pt_i(t)$ (توانی که شبکه به مرکز داده می‌دهد). قسمت دوم مقدار توانی که باتری از شبکه در هر ساعت می‌گیرد ضرب در قیمت برق در آن ساعت که برابر با هزینه برق برای شارژ باتری می‌شود. قسمت

سوم هزینه توان دشارژ شده است که $\Pr b_j(t)$ هزینه توان دشارژ شده باتری است و qt مقدار توان دشارژ شده است [۴۵].

۳-۵ مرحله سوم (با استفاده از توربین بادی)

در این قسمت، هدف کمینه‌کردن هزینه برق با استفاده از انتقال بهینه بار و بافری انرژی به همراه توربین بادی است. در این مساله برای هر مرکز داده یک باتری به همراه توربین‌بادی در نظر گرفته شده است که علاوه بر مساله قابلیت اعتماد، هزینه‌های برق مراکز داده را کمتر کند. که هم به مصرف بار در ساعات اوج کمک می‌کند و هم هزینه را کاهش می‌دهد که سود ارائه دهنده اینترنت را افزایش می‌دهد، و همینطور وجود توربین بادی باعث توزیع بهینه حجم درخواست‌ها می‌شود. در این مدلسازی قیمت برق نیز در نظر گرفته می‌شود. در این قسمت عدم قطعیت توربین بادی در نظر گرفته می‌شود.

۳-۵-۱ عدم قطعیت توربین باد با روش Unscented transformation (UT):

روش UT برای غلبه بر کاستی‌های وابسته به روش‌های احتمالات سنتی که از فرآیند غیرخطی استفاده می‌کنند، گسترش یافت. یک روش قابل‌اطمینان برای محاسبه آماری متغیرهای تصادفی خروجی که متحمل مجموعه‌ای از تبدیل‌های غیرخطی است، می‌باشد. در حقیقت تقریب توزیع احتمالات نسبت به تابع غیرخطی دلخواه پایه‌اش آسان‌تر است [۳۴]. روش UT برای بدست آوردن میانگین و کوواریانس متغیرهای خروجی، $\bar{Y}$ و P_{YY} در گام های ساده زیر استفاده می‌شود:

$$Y = f(X) \tag{۳-۱۹}$$

گام اول: بدست آوردن نمونه‌های 2n+1 یا نقاط سیگمای متغیرهای ورودی در (۳-۲۰) – (۳-۲۲).

$$X^0=m \qquad (۳-۲۰)$$

$$X^k=m+\left(\sqrt{\frac{n}{1-W^0}P_{XX}}\right)_K,\quad k=1,2,...,n \qquad (۳-۲۱)$$

$$X^{k+n}=m-\left(\sqrt{\frac{n}{1-W^0}P_{XX}}\right)_K,\quad k=1,2,...,n \qquad (۳-۲۲)$$

گام دوم: محاسبه وزن وابسته به هر نمونه با استفاده از (۳-۲۳)- (۳-۲۵).

$$W^0=W^0 \qquad (۳-۲۳)$$

$$W^k=\frac{1-W^0}{2n},\quad k=1,2,...,n \qquad (۳-۲۴)$$

$$W^{k+n}=\frac{1-W^0}{2n},\quad k+n=n+1,...,2n \qquad (۳-۲۵)$$

توجه شود که وزن وابسته باید شرایط فرمول (۳-۲۶) را داشته باشد:

$$\sum_{k=0}^{2n}W^k=1 \qquad (۳-۲۶)$$

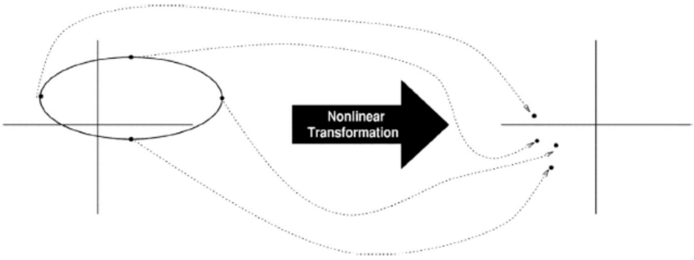
در (۳-۲۱) و (۳-۲۲)، $\left(\sqrt{\frac{n}{1-W^0}P_{XX}}\right)_K$، K امین سطر یا ستون ماتریس جذر $((n)/(1-W^0))P_{XX}$ است. ماتریس جذر مثبت معین ماتریس P به این معنی است که یک ماتریس $A=\sqrt{P}$ وجود دارد که $P=AA^T$ است [۳۵].

اینجا W^0 وزن اختصاص داده شده به نقطه $\bar{X}=m$ است، و به عنوان نقطه صفرم نام‌گذاری شده است. موقعیت دیگر نقاط اطراف میانگین مقدار X را کنترل می‌کند [۳۵].

گام سوم: حال مقدار تابع غیرخطی برای نمونه‌ها به صورت فرمول (۳-۲۷) بدست می‌آید:

$$Y^k=f(X^k) \qquad (۳-۲۷)$$

تایید می‌شود که در روش UT، تابع غیرخطی به عنوان جعبه سیاه در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین، هیچ ساده‌سازی یا خطی‌سازی نیاز نیست. شکل (۳-۲) این فرآیند را به تصویر کشیده است.



شکل ۳-۲: قاعده کلی روش UT، گام ۳ [۳۶].

گام چهارم: محاسبه میانگین و کوواریانس متغییر خروجی Y با استفاده از (۳-۲۸) و (۳-۲۹) است.

$$\bar{Y} = \sum_{k=0}^{2n} W^k Y^k \qquad (۲۸-۳)$$

$$P_{YY} = \sum_{K=0}^{2n} W^k (Y^k - \bar{Y})(Y^k - \bar{Y})^T \qquad (۲۹-۳)$$

واضح است که الگوریتم UT پایه به کار بردنش خیلی ساده و آسان است [۱۳].

۳-۵-۱-۱ مزایای روش UT:

۱) دارای بهره وری زمانی است.

۲) زمانیکه تعداد متغیرهای تصادفی زیاد شود، دقت کاهش نمی‌یابد.

۳) برای مسائل با همبستگی پارامترهای ورودی غیرقطعی چندگانه امکان‌پذیر است.

۴) انجام دادن آن آسان است.

۳-۵-۱-۲ معایب روش UT :

۱) زمان اجرا وابسته به تعداد متغیرهای غیرقطعی است.

۲) تنها در مسائلی با متغیرهای ورودی که PDF آنها بیان شده است، کاربردی است [۵۰].

۳-۵-۲ مدلسازی همبستگی و عدم‌قطعیت:

اختلاف زمانی و مکانی سرعت باد و عدم‌قطعیت آن توسط تابع توزیع ویبول مدل می‌شود [۳۵]. عدم قطعیت توان خروجی تولیدی توربین بادی (WTGs)[۲۳] به طور خلاصه به صورت زیر مدلسازی می‌شود:

گام ۱: سرعت باد بوسیله PDF[۲۴] مناسب خودش مانند ویبول به صورت فرمول (۳-۳۰) ارائه می‌شود:

$$f(v) = \frac{\beta w}{\alpha w}\left(\frac{v}{\alpha w}\right)^{\beta w-1}\exp\left[-\left(\frac{v}{\alpha w}\right)^{\beta w}\right] \qquad (۳-۳۰)$$

v سرعت باد بر حسب (m/s)، αw و βw به ترتیب پارامتر مقیاس ویبول بر حسب (m/s) و پارامتر شکل ویبول هستند.

توزیع‌های آماری متعددی از جمله ویبول[۲۵]، رایلی[۲۶]، جانسون[۲۷]، پیرسون[۲۸]، مربع کاری[۲۹]، لوگ نرمال[۳۰]، گاوسی معکوس[۳۱]، جهت تعیین پتانسیل انرژی بادی وجود دارد که محققان بسیاری از توزیع ویبول به دلایل مختلفی استفاده می‌کنند [۳۷]. دلایل زیر را می‌توان برای برتری توزیع ویبول در تجزیه و تحلیل پتانسیل انرژی باد برشمرد [۳۸]:

۱. توزیع سرعت باد دارای چولگی است که در این توزیع به خوبی مشخص می‌شود.

۲. در مناطقی که قدرت باد حداکثر است، داده‌های سرعت باد دارای بیشترین میانگین و کمترین مقدار پارامتر شکل است.

و همچنین مزایایی برای استفاده از این توزیع قابل ذکر است:

۱. توزیع ویبول برای داده‌های سرعت باد دارای خطای کمتر نسبت به توزیع نرمال ریشه دوم است.

---

23 Wind turbine generator’s
24 probability density function
25 Weibull
26 Rayleigh
27 Johnson
28 Pearson
29 Chi-2
30 Lognormal
31 Inverse Gausian

۲. با تغییر موقعیت ارتفاع بادسنج، همچنان امکان تخمین پارامترهای توزیع ویبول وجود دارد.

۳. سهولت انجام محاسبات نسبت به سایر توزیع‌ها نظیر توزیع نرمال دو متغیره به دلیل اینکه این توزیع تنها دو پارامتر دارد.

تحقیقات متعددی در خصوص توصیف رفتار باد بر اساس آمار هواشناسی انجام گرفته است. در مطالعه‌ای از طریق توزیع ویبول، سرعت و جهت باد شبیه‌سازی شده و این نتیجه حاصل شده که با توجه به هیستوگرام باد، توزیع نرمال توزیعی مناسب برای داده‌های سرعت باد نبوده و توزیع ویبول گسترده‌ترین مدل قابل استفاده در زمینه سرعت باد می‌باشد [۳۹],[۴۰].

برای تعیین βw و αw از روابط تحلیلی یا نیمه تجربی جاستاس با استفاده از فرمول های (۳-۳۱) و (۳-۳۲) استفاده شده است [۴۱].

$$\beta w = \left(\frac{\sigma_U}{\overline{U}}\right)^{-1.086} \tag{۳-۳۱}$$

$$\frac{\alpha w}{\overline{U}} = \frac{\beta w^{\,2.6674}}{0.184 + 0.816 \beta w^{\,2.73855}} \tag{۳-۳۲}$$

که در آن σ_U، انحراف معیار استاندارد و $\overline{U}$ ، سرعت متوسط داده‌ها است.

گام ۲: برای مدلسازی عدم‌قطعیت توان خروجی WTG ، نمونه‌های سرعت باد در هر ارزیابی با یک روش مناسب تولید شدند.

گام ۳: نمونه‌های سرعت باد تولید شده به توان خروجی توربین بادی با استفاده از منحنی سرعت-توان باد تبدیل می‌شوند که به صورت فرمول (۳-۳۳) است:

$$\begin{aligned} P_{WTG} &= 0 \quad \text{if} \quad \mathrm{v} \le \mathrm{V}_i \ \text{ or } \ \mathrm{v} \ge \mathrm{V}_o \\ P_{WTG} &= p_{rw} \frac{\mathrm{v} - \mathrm{V}_i}{\mathrm{V}_r - \mathrm{V}_i} \quad \text{if} \quad \mathrm{V}_i < \mathrm{v} < \mathrm{V}_r \\ P_{WTG} &= p_{rw} \quad \text{if} \quad \mathrm{V}_r \le \mathrm{v} < \mathrm{V}_o \end{aligned} \tag{۳-۳۳}$$

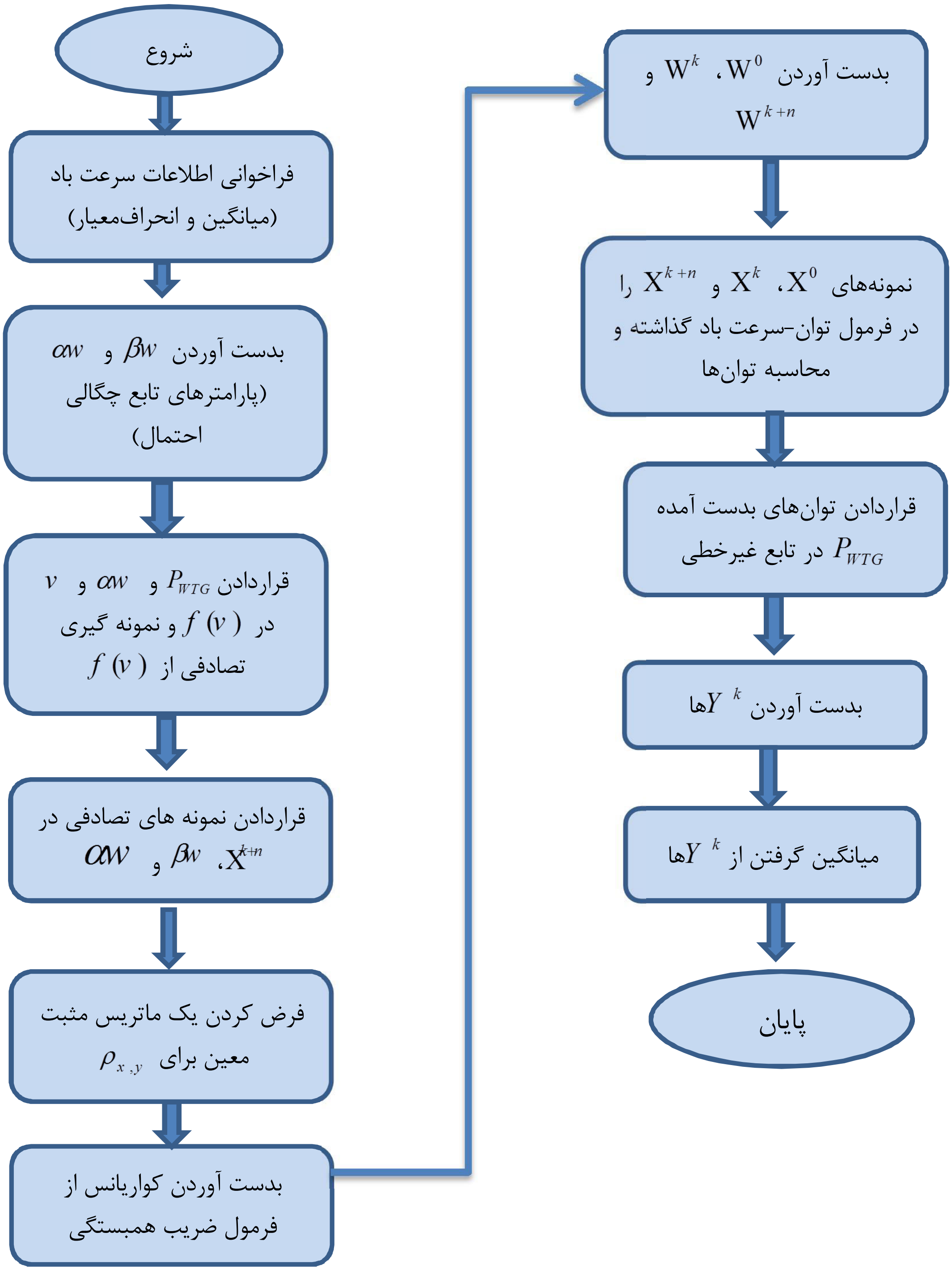
۳-۲-۵-۱ ضریب همبستگی

متغیرهای غیرقطعی سیستم ممکن است به یکدیگر وابسته باشند یا به یکدیگر وابسته نباشند. وقتی که متغیرها به یکدیگر وابسته باشند، تغییر یک متغیر بر دیگر متغیرها نیز تاثیر می‌گذارد. اندازه و جهت این ضریب‌ها تابع این وابستگی‌ها است. که این مطلب در ماتریس ضریب همبستگی یا کواریانس است. ضریب همبستگی به صورت فرمول (۳-۳۴) بدست می‌آید:

$$\rho_{x,y} = \frac{\mathrm{cov}(x,y)}{\delta_x \delta y} = \frac{E[(\chi - \mu_x)(\gamma - \mu_y)]}{\delta_x \delta y} \quad x,y=1,2,...,n. \qquad (۳۴-۳)$$

در مواردی که ضریب همبستگی ۱+ است، رابطه خطی مثبت کامل است، و در مواردگی که ۱- است، رابطه خطی منفی کامل است، و دیگر مقادیر در محدوده [۱+,۱-] قرار دارند، که نشان دهنده درجه وابستگی خطی بین متغیرهاست[۴۲] .

به منظور تشریح کامل مدل عدم‌قطعیت، روش بیان شده در فلوچارت شکل (۳-۳) بیان شده است. تعداد نمونه‌ها، سرعت باد ۲۴ ساعت در سه منطقه است که در مجموع ۷۲ تا نمونه می‌شود. بدین ترتیب X^0 شامل یک ماتریس 72×1 است که از نمونه‌گیری تصادفی از تابع چگالی احتمال سرعت باد بدست آمده است. ماتریس کواریانس P_{XX} یک ماتریس 72×72 می‌باشد. X^k و X^{k+n} شامل ۷۲ عدد ماتریس 72×1 می‌باشد، بنابراین ۱۴۵ عدد ماتریس 72×1 موجود از جنس سرعت هستند، ماتریس در فرمول (۳-۳۳)، معادله سرعت-توان توربین بادی قرار می‌گیرد و ۱۴۵ عدد ماتریس توان 72×1 بدست می‌آید. بنابراین ماتریس توان بدست آمده در تابع غیرخطی قرار می‌گیرند و ۱۴۵ عدد خروجی از تابع غیرخطی بدست می‌آید و سپس میانگین این ۱۴۵ عدد خروجی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۳: فلوچارت روش عدم قطعیت

حال در مدلسازی مساله، توان‌های بدست آمده از روش UT را هم در مساله اضافه می‌کنیم، که مساله به صورت کامل به صورت فرمول (۳-۳۵) نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned}
&\underset{u_i(t),q_i(t),\lambda_{ji}(t),m_i(t)}{Min} \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N} (\Pr_i(t)pt_i(t) + \Pr_i(t)\frac{ut}{\theta} + \Pr b_j(t)qt) \\
&s.t. \\
&\frac{1}{m_i(t)\mu_i(t) - \sum_{j=1}^{c}\lambda ij(t)} \le D_i \quad , \qquad i=1,...,N \\
&\sum_{i=1}^{N}\lambda ij(t) = L_j(t), \qquad \text{j=1,...,C} \\
&0 \le m_i(t) \le M_i, \qquad \text{i=1,...,N} \\
&m_i(t)\mu_i(t) > \sum_{j=1}^{c}\lambda ij(t), \qquad \text{i=1,...,N} \\
&ut \in \{0\ ,\text{Ut}\} \\
&qt \in \{0\ ,\text{Qt}\} \\
&u_i(t) \le U_i.\alpha_i(t) \\
&q_i(t) \le (1-\alpha_i(t)).Q_i \\
&Pt_i = \text{Ps}_i(t) - qt - P_{WTG} \\
&\text{Ps} = m_i(t).Po_i \\
&X_i(t+1) = X_i(t) + u_i(t) - q_i(t) \\
&C_e \le X_t \le C
\end{aligned} \qquad (۳-۳۵)$$

همانطور که دیده می‌شود توان توربین بادی P_{WTG} در قسمت قید تعادل توان اضافه شده است. به این صورت که باید بین توان جذب شده از شبکه توسط مرکز داده و توان مصرفی مرکز داده و توانی که مرکز داده از باتری می‌گیرد و توانی که از توربین گرفته می‌شود، تعادل برقرار باشد. $\text{Ps}_i(t)$ توان مصرفی مرکز داده i در زمان t است و Pt_i توانی است که مرکز داده i در زمان t از شبکه برق دریافت می‌کند. P_{WTG} توان تولیدی توربین بادی است.

۳-۶ خلاصه فصل

در این فصل، مساله بهینه‌سازی توان مصرفی مرکز داده مدلسازی شد. در مرحله اول، مراکز داده به صورت توزیع شده در نظر گرفته شدند. در مرحله دوم، باتری با در نظر گرفتن تمام محدودیت‌های فنی و اقتصادی به مدل اضافه شد. در مرحله سوم، توربین بادی با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت آن به مساله اضافه شد.

فصل چهارم:

شبیه‌سازی

۴-۱ مقدمه

در این قسمت سه مرکز داده که در ایالات مونتین[32] ، آتلانتا [33] و هوستون [34] واقع شده‌اند، در نظر گرفته می‌شود. همچنین پنج سرور رابط در نظر گرفته می‌شود. حجم درخواست‌ها با نرخ‌های مشخصی به این مراکز داده می‌رسند. همچنین مراکز داده تحت بازارهای چندگانه برق واقع شده‌اند. قیمت برق در هر سه ایالت از روز قبل در اختیار مرکز داده قرار می‌گیرد. برای کاهش هزینه توان مصرفی، سرورهای رابط طوری برنامه ریزی می‌شوند که انتقال حجم درخواست‌ها را به مرکز داده‌ای که قیمت برق پایین‌تر است، در اولویت قرار دهند [۳۲].

قیمت برق در دو ایالت مونتین و هوستون متغیر با زمان است. سیاست قیمت‌گذاری برق در هر منطقه بر اساس الگوی مصرف آن منطقه است؛ بنابراین کاهش توان در ساعت اوج به سود شبکه برق است و احتمال قطعی برق کاهش می‌یابد.

بنابراین برای تغییر الگوی مصرف و کاهش مصرف پیک در ساعات اوج مصرف، از بافری انرژی استفاده می‌شود. به این صورت که یک باتری با ظرفیت بالا برای این دو مرکز داده انتخاب می‌گردد. سیستم ذخیره ساز انرژی طوری برنامه ریزی می‌شود تا در ساعات اوج مصرف و گرانی برق، شروع به شارژ شدن می‌کنند و در ساعات اوج مصرف و گرانی برق توان ذخیره شده را به مرکز داده تحویل دهند تا به این ترتیب، هم هزینه برق مصرفی مراکز داده را کاهش دهند و هم الگوی مصرف مراکز داده در هر ایالت را تغییر دهند، و همینطور برای تغییر الگوی مصرف و کاهش مصرف پیک در ساعات اوج مصرف، در مرحله بعدی از توربین بادی استفاده می‌شود. به این صورت که یک توربین باد برای هر سه مرکز داده در نظر گرفته می‌شود که علاوه بر کاهش هزینه مصرفی باعث توزیع بهینه حجم درخواست‌ها نیز می‌شود. عدم‌قطعیت توربین بادی با توجه به معادلات داده شده در فصل مدلسازی محاسبه شد.

---

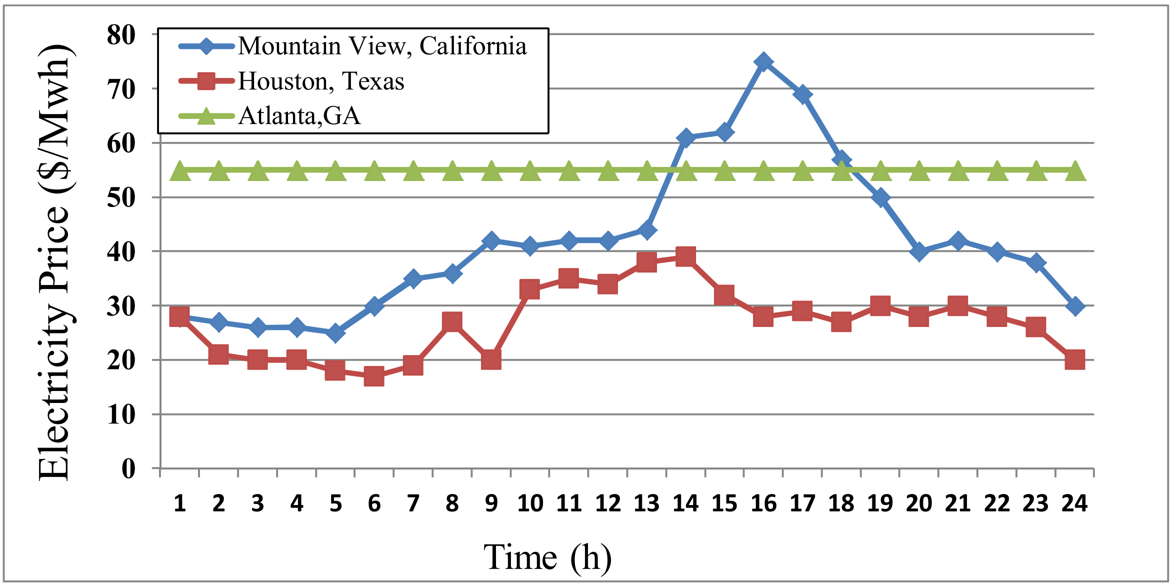
[32] Mountain View
[33] Atlanta, GA
[34] Houston, Texas

۴-۲ اطلاعات سیستم

در ادامه این بخش پارامترهای مربوط به مراکز داده، قیمت برق هر منطقه، اطلاعات مربوط به باتری و توربین بادی ارائه می‌شود.

۴-۲-۱ قیمت برق

هر ایالت الگوی قیمت برق متفاوتی دارد؛ بنابراین قیمت برق وابسته به موقعیت و متغیر با زمان است. قیمت برق به صورت واقعی برای سه ایالت مونتین، هوستون و آتلانتا در شکل (۴-۱) نشان داده شده است [۴۳]، [۴۴].



شکل ۴-۱: قیمت برق در سه موقعیت مختلف

همانطور که در شکل (۴-۱) مشاهده می‌شود، قیمت برق در ایالت‌های مونتین و هوستون متغیر با زمان است، در حالی که در ایالت آتلانتا قیمت در ساعات مختلف ثابت است.

۴-۲-۲ مشخصات مراکز داده

برای ارزیابی توان مصرفی سرور مراکز داده، حجم درخواست کلی از پنج سرور رابط به سه مرکز داده $(C=۵,\ N=۳)$ برابر $(request/\sec)$ 10^5 ، قید تاخیر برابر ۱ ms است، هر سرور در ۱۲۰ w

عمل می‌کند. سرعت پردازش برای هر سرور در سه موقعیت به ترتیب برابر ($request/\sec$) ۲، ($request/\sec$) ۱/۲۵ و ($request/\sec$) ۱/۷۵ است. و دیگر پارامترها در جدول (۴-۱) و (۴-۲) مشخصات مربوط به هر سه مرکز داده و پنج سرور رابط را نشان می‌دهد. پارامترهایی که در جدول آورده شده است عبارتند از: تعداد سرورهای هر مرکز داده، تاخیر هر مرکز داده، فرکانس عملکردی هر سرور و ثابت‌های توان مصرفی آن‌ها.

جدول ۴-۱: پارامترهای سه مراکز داده [۳۲]

i	μ_i	Po_i	M_i	D_i
۱	۲	۱۲۰	۳۰۰۰۰	۰/۰۰۱
۲	۱/۲۵	۱۲۰	۶۰۰۰۰	۰/۰۰۱
۳	۱/۷۵	۱۲۰	۲۵۰۰۰	۰/۰۰۱

جدول ۴-۲: پارامترهای پنج سرور رابط [۳۲]

j	۱	۲	۳	۴	۵
L_j	۳۰۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰

۴-۲-۳ پارامترهای باتری

جدول(۴-۳) اطلاعات مربوط به باتری استفاده شده را نشان می‌دهد:

جدول۴-۳: اطلاعات باتری

قیمت باتری ($P1$)	۱۶۰۰۰۰
w نرخ شارژ شدن (U)	۲۰۰۰۰
w نرخ دشارژ شدن (Q)	۲۰۰۰۰
نرخ بازدهی (θ)	۰/۹۸
تعداد شارژ و دشارژ در یک دوره طول عمر (nt)	۲۰۰۰
ظرفیت (C)	۱۶۰۰۰۰

۴-۲-۴ پارامترهای توربین بادی

جدول(۴-۴) اطلاعات مربوط به توربین بادی استفاده شده را نشان می‌دهد:

جدول۴-۴: اطلاعات توربین بادی [۴۶]

$P_r[kw]$	۱۰۰
$V_r(m/\sec)$	۱۲/۵
$V_{ci}(m/\sec)$	۳
$V_{co}(m/\sec)$	۲۵

۴-۲-۵ پارامترهای سرعت باد

جدول‌های (۴-۵)، (۴-۶) و (۴-۷) اطلاعات سرعت باد ۲۴ ساعت را برای سه توربین بادی واقع در سه مرکز داده نشان می‌دهد. در این قسمت انحراف معیار برابر ۰/۵۲ میانگین در نظر گرفته شده است. و مقدار $W^0=0.5$ در نظر گرفته شده است.

جدول۴-۵: اطلاعات توربین بادی اول [۴۷]

ساعت‌های روز	سرعت میانگین(m/s)
۱	۴/۶۹
۲	۴/۴۲
۳	۴/۶۴
۴	۴/۵۹
۵	۴/۱۵
۶	۴/۲۱
۷	۴/۱۶
۸	۴/۲۱
۹	۴/۵۶
۱۰	۴/۹۶
۱۱	۵/۲۴
۱۲	۵/۲۹
۱۳	۵/۵۴
۱۴	۵/۶۵
۱۵	۵/۷۹
۱۶	۵/۷۱
۱۷	۵/۴۴
۱۸	۵/۲۳
۱۹	۴/۸۳
۲۰	۴/۷۲
۲۱	۴/۷۸
۲۲	۴/۸۱
۲۳	۴/۹۶
۲۴	۴/۹۱

جدول۴-۶: اطلاعات توربین بادی دوم [۴۸]

ساعت‌های روز	سرعت میانگین(m/s)
۱	۴/۷۶
۲	۴/۷۸
۳	۴/۷۵
۴	۴/۶۳
۵	۴/۶
۶	۴/۴۹
۷	۴/۲۹
۸	۴/۴۵
۹	۴/۶
۱۰	۴/۷۸
۱۱	۴/۹۷
۱۲	۵/۱۵
۱۳	۵/۳۲
۱۴	۵/۴۱
۱۵	۵/۴۱
۱۶	۵/۲۹
۱۷	۵/۳۸
۱۸	۵/۰۳
۱۹	۴/۸۲
۲۰	۴/۸۲
۲۱	۴/۸۳
۲۲	۴/۸
۲۳	۴/۸۴
۲۴	۴/۸

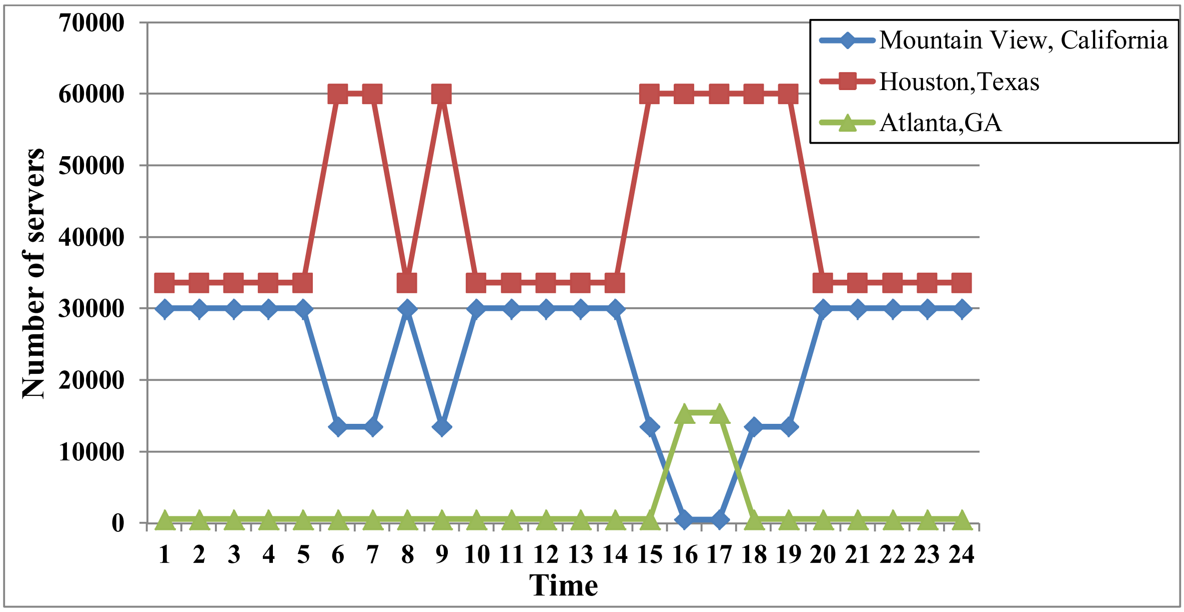
جدول۴-۷: اطلاعات توربین بادی سوم [۴۹]

ساعت‌های روز	سرعت میانگین(m/s)
۱	۵/۹۲
۲	۵/۷
۳	۵/۶۶
۴	۵/۵۸
۵	۵/۷۲
۶	۵/۸۴
۷	۵/۶۴
۸	۵/۶۹
۹	۵/۸۶
۱۰	۶/۰۱
۱۱	۶/۱
۱۲	۶/۲۱
۱۳	۶/۱۹
۱۴	۶/۲۱
۱۵	۶/۱۴
۱۶	۶/۱
۱۷	۶/۱
۱۸	۶/۲
۱۹	۶/۲۱
۲۰	۶/۰۹
۲۱	۶/۰۶
۲۲	۵/۹۵
۲۳	۵/۷۷
۲۴	۵/۸۶

۴-۳ نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی را بررسی می‌کنیم. متغیرهای مسئله تعداد سرورهای فعال ($m_i(t)$)، نرخ انتقال حجم درخواست‌ها از سرورهای رابط به مراکز داده ($\lambda_{ji}(t)$)، و مقدار توان شارژ شده ($u_i(t)$) و دشارژ شده ($q_i(t)$) در باتری است.

تعداد سرورهای فعال در هر مرکز داده رابطه مستقیمی با هزینه توان مصرفی دارد. در شکل (۴-۲) تعداد سرورهای فعال رسم شده است:



شکل ۴-۲: تعداد سرورهای فعال.

شکل (۴-۲)، تعداد سرورهای فعال است. به همین ترتیب برای ساعت‌های مختلف طریقه توزیع حجم درخواست‌ها توضیح داده می‌شود.

۴-۳-۱ تعداد سرورهای فعال

ساعت‌های ۱ الی ۵:

قیمت برق در این ساعت‌ها در ایالت هوستون پایین‌تر از مونتین است و در آتلانتا قیمت برق بالا است. بنابراین حجم درخواست‌ها ابتدا به هوستون و سپس مابقی داده‌ها به مونتین ارسال می‌شوند و مرکز داده آتلانتا غیرفعال است.

ساعت‌های ۶ الی ۹:

در ساعت‌های ۶، ۷ و ۹، قیمت برق در ایالت هوستون بسیار کم است و بنابراین تمامی سرورهای موجود در مرکز داده هوستون (۶۰۰۰۰ سرور) با تمام ظرفیت فعال هستند و حجم درخواست‌ها ابتدا به هوستون ارسال می‌شوند و مابقی درخواست‌ها به مرکز داده مونتین انتقال می‌یابند و مرکز داده آتلانتا در این ساعت‌ها غیر فعال است. در ساعت ۸، اختلاف قیمت برق این دو ایالت کمتر است و قیمت برق در هوستون پایین‌تر است و مقرون به صرفه است که حجم درخواست‌ها ابتدا به هوستون و سپس به مونتین ارسال شوند.

ساعت‌های ۱۰ الی ۱۴:

قیمت برق در ایالت هوستون پایین‌تر از مونتین است و در آتلانتا قیمت برق بالا است. بنابراین حجم درخواست‌ها ابتدا به هوستون و سپس مابقی داده‌ها به مونتین ارسال می‌شوند و مرکز داده آتلانتا غیرفعال است.

ساعت‌های ۱۵ الی ۱۹:

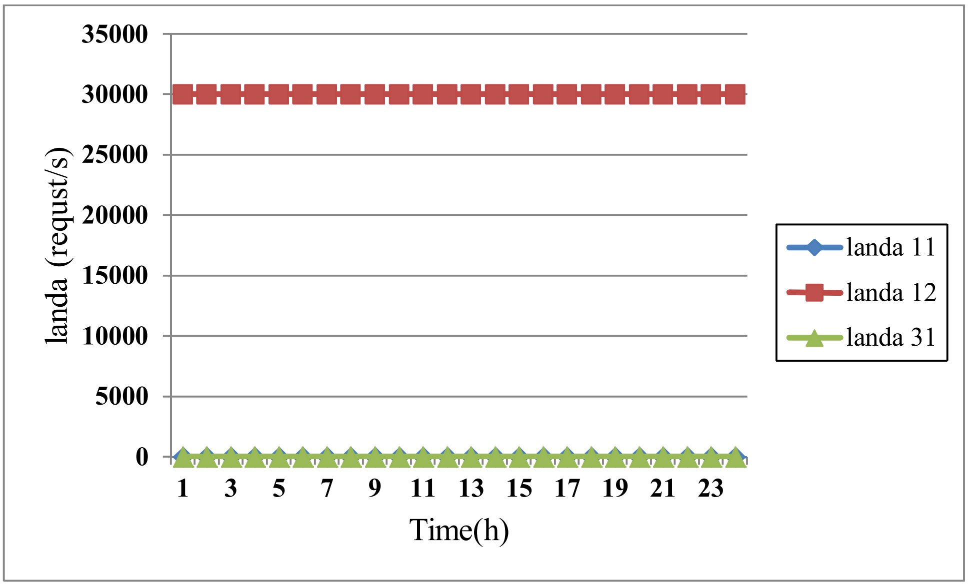
در این ساعت‌ها ایالت هوستون پایین‌ترین قیمت برق را نسبت به دو ایالت دیگر دارد و تمام سرورهای موجود در مرکز داده هوستون با تمام ظرفیت فعال هستند و بیشتر حجم درخواست‌ها به هوستون ارسال می‌شوند. در ساعت‌های ۱۶ و ۱۷ قیمت برق آتلانتا نسبت به مونتین کمتر است. بنابراین مابقی درخواست‌ها به آتلانتا ارسال می‌شود و سرورهای مونتین در این ساعت‌ها خاموش است.

ساعت‌های ۲۰ الی ۲۴:

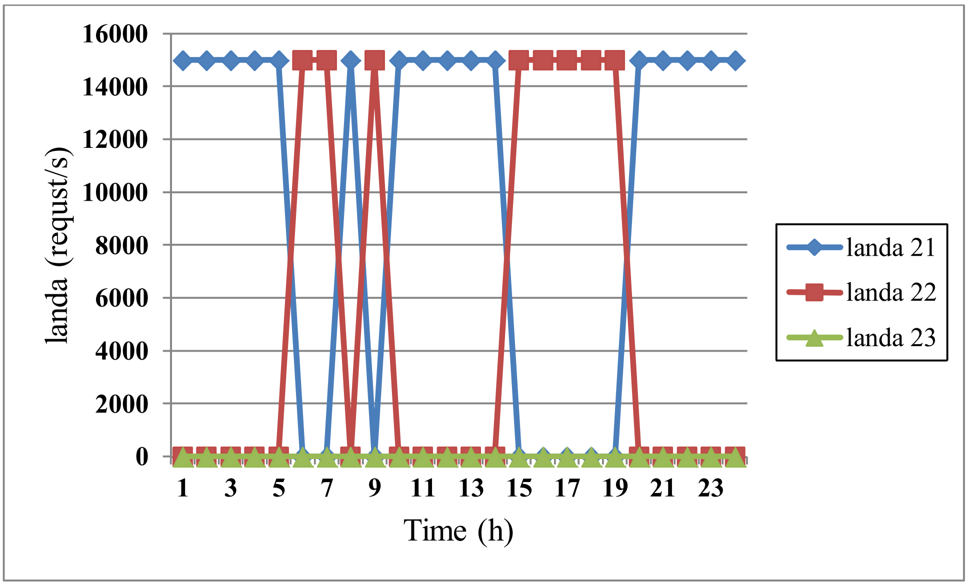
قیمت برق در ایالت هوستون پایین‌تر از مونتین است و در آتلانتا قیمت برق بالا است. بنابراین حجم درخواست‌ها ابتدا به هوستون و سپس مابقی داده‌ها به مونتین ارسال می‌شوند و مرکز داده آتلانتا غیرفعال است.

۴-۳-۲ توزیع حجم درخواست‌ها بین مراکز داده

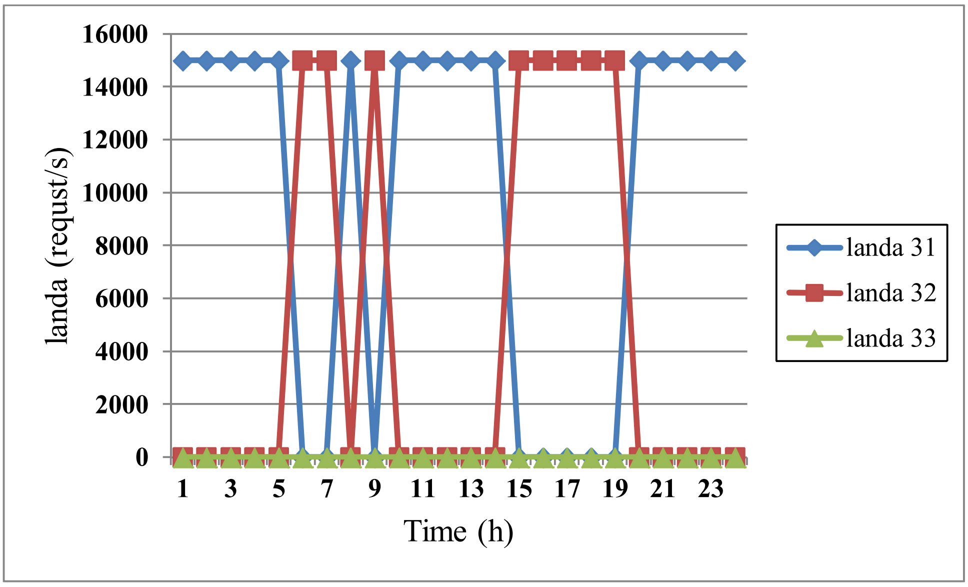
در این قسمت الگوی توزیع حجم درخواست‌ها بین مراکز داده نشان داده می‌شود. شکل(۴-۳) نرخ درخواست ارسالی از سرورهای رابط را به مراکز داده مختلف نشان می‌دهد. به طوری که در شکل(۴-۳-الف) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط اول به سه مرکز داده، شکل (۴-۳-ب) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط دوم به سه مرکز داده، شکل (۴-۳-ج) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط سوم به سه مرکز داده، شکل (۴-۳-د) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط چهارم به سه مرکز داده، شکل (۴-۳-ه) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط پنجم به سه مرکز داده را نشان می‌دهند.



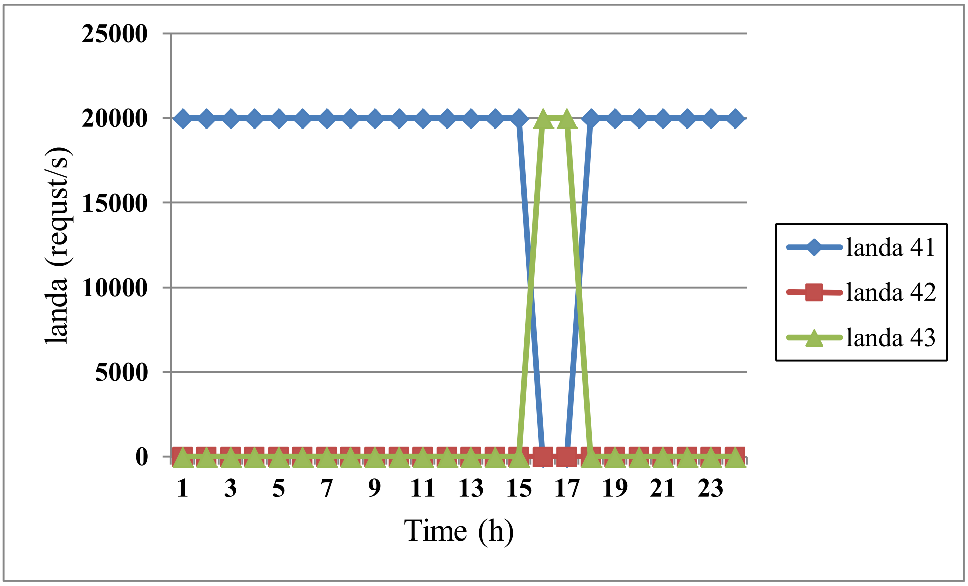
(الف)


16000
14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
landa (requst/s)
1
3
5
7
9
11
13
15
17
19
21
23
Time (h)
landa 21
landa 22
landa 23

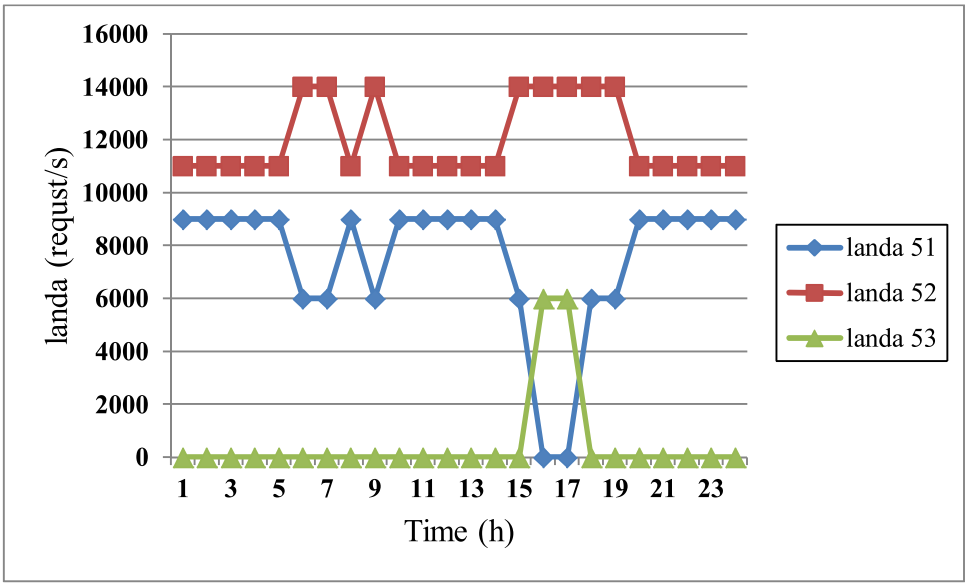
(ب)


16000
14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
landa (requst/s)
1
3
5
7
9
11
13
15
17
19
21
23
Time (h)
landa 31
landa 32
landa 33

(ج)



(د)

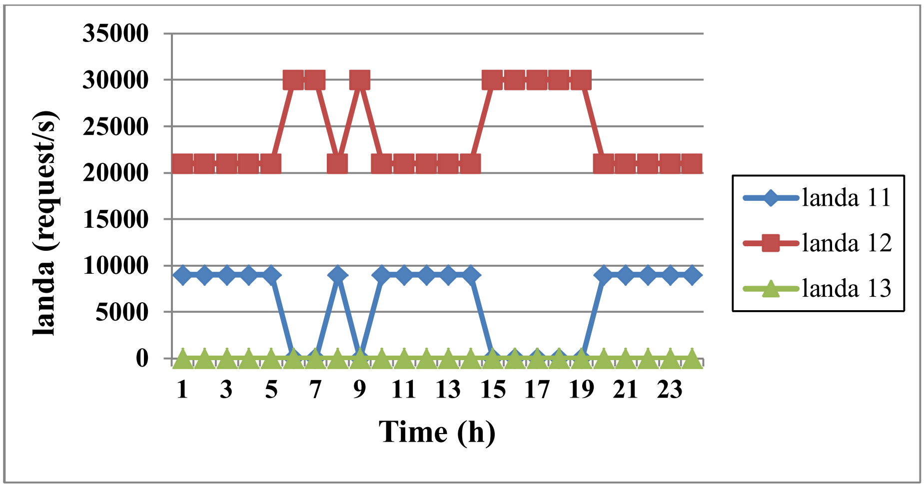


(ه)

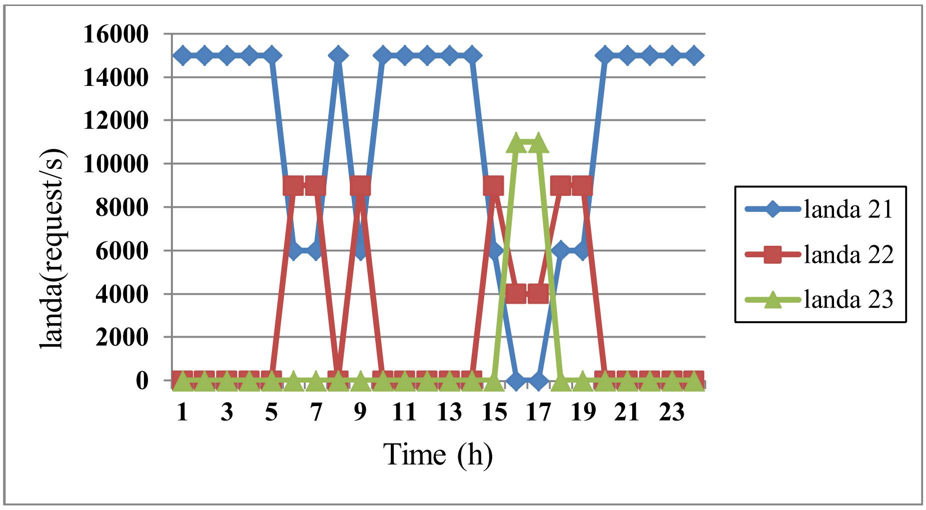
شکل ۴-۳: نرخ انتقال حجم درخواست‌ها از سرورهای رابط به مرکز داده ($\lambda_{ji}(t)$)، الف) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط اول به سه مرکز داده، ب) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط دوم به سه مرکز داده، ج) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط سوم به سه مرکز داده، د) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط چهارم به سه مرکز داده، ه) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط پنجم به سه مرکز داده.

بعد از اضافه کردن توربین بادی به مساله، دیده می‌شود که علاوه بر کم کردن هزینه، باعث توزیع بهتر حجم درخواست‌ها نیز می‌شود. به این صورت که حتی در ساعت‌هایی که قیمت برق یک ایالت

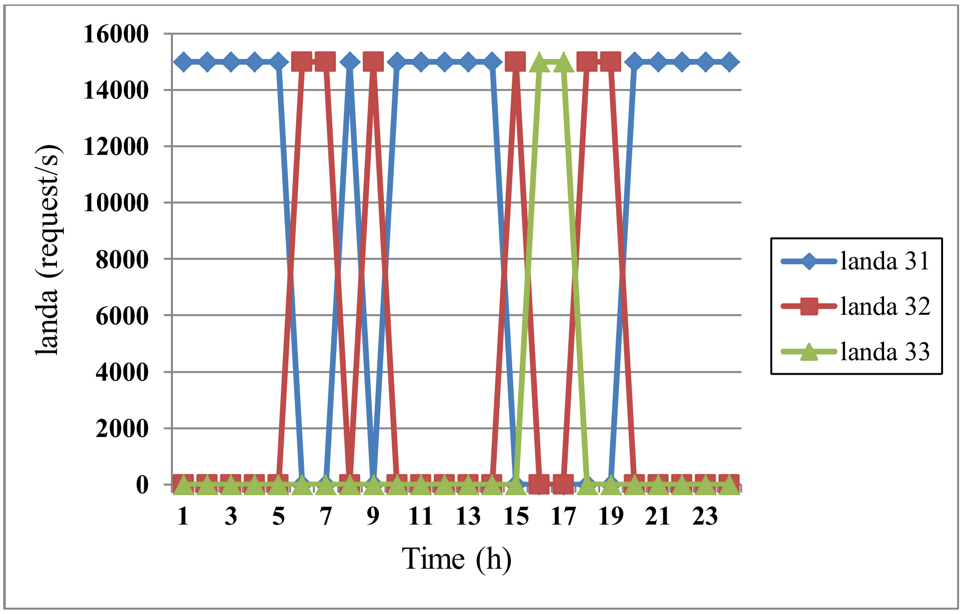
بالاتر از ایالت دیگر است اما بدلیل وجود توربین باد، ارسال درخواست‌ها به آن ایالت انجام می‌گیرد. در این قسمت الگوی توزیع حجم درخواست‌ها بین مراکز داده با وجود توربین بادی در مساله نشان داده می‌شود. شکل(۴-۴) نرخ درخواست ارسالی از سرورهای رابط به مراکز داده مختلف را نشان می‌دهد. به طوری که در شکل(۴-۴-الف) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط اول به سه مرکز داده، شکل (۴-۴-ب) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط دوم به سه مرکز داده، شکل (۴-۴-ج) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط سوم به سه مرکز داده، شکل (۴-۴-د) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط چهارم به سه مرکز داده، شکل (۴-۴-ه) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط پنجم به سه مرکز داده را نشان می‌دهند.



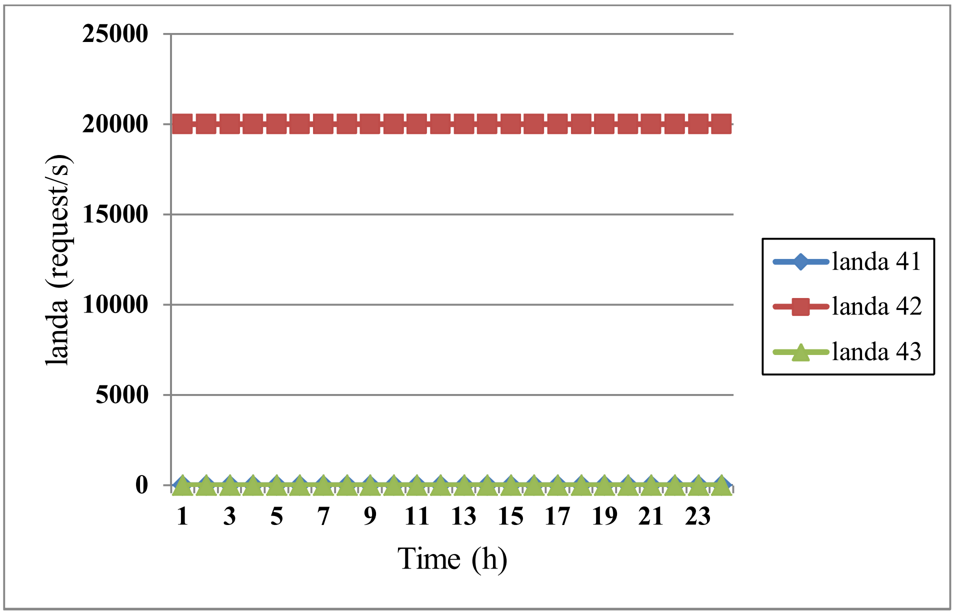
(الف)



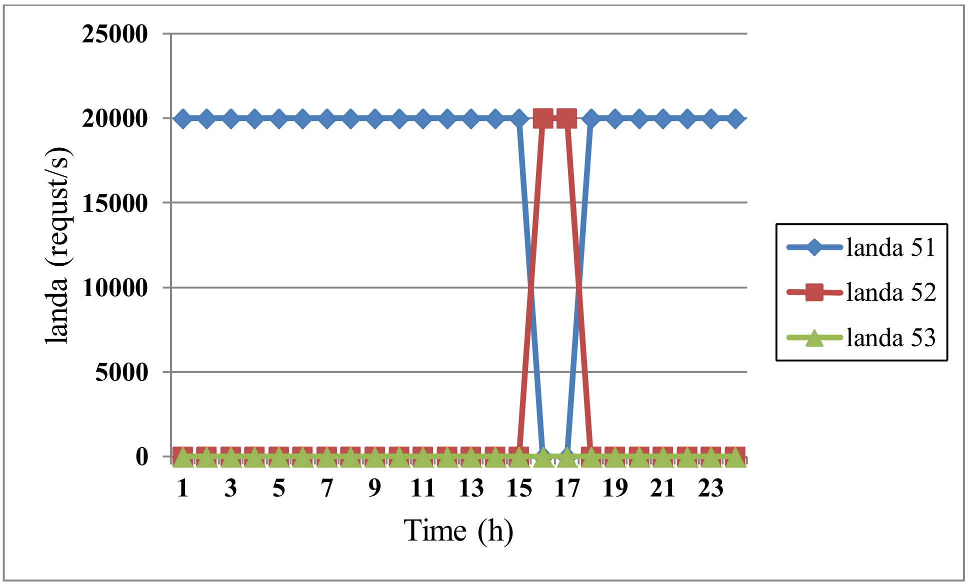
(ب)


16000
14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
landa (request/s)
1
3
5
7
9
11
13
15
17
19
21
23
Time (h)
landa 31
landa 32
landa 33

(ج)


25000
20000
15000
10000
5000
0
landa (request/s)
1
3
5
7
9
11
13
15
17
19
21
23
Time (h)
landa 41
landa 42
landa 43

(د)

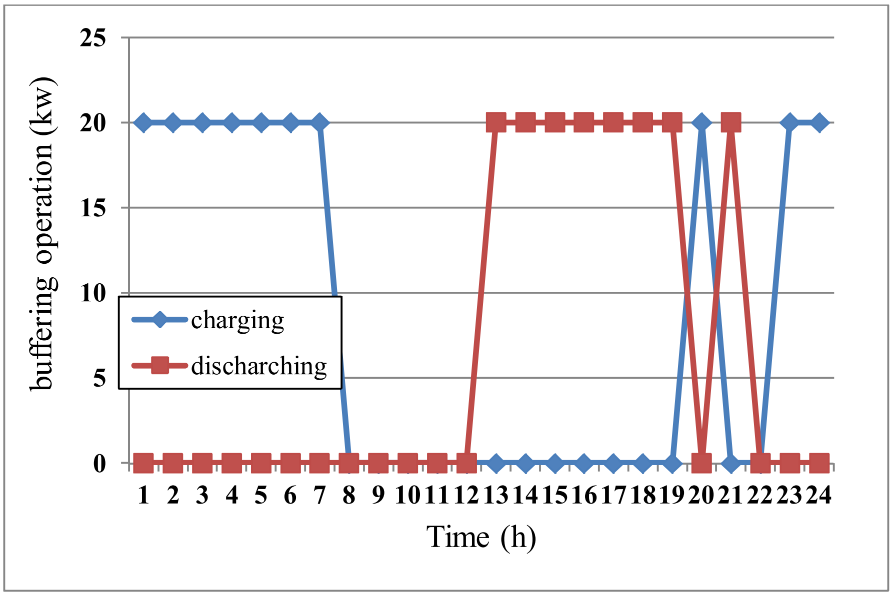


(ه)

شکل ۴-۴: نرخ انتقال حجم درخواست‌ها از سرورهای رابط به مرکز داده ($\lambda_{ji}(t)$)، الف) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط اول به سه مرکز داده با وجود توربین بادی، ب) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط دوم به سه مرکز داده با وجود توربین بادی، ج) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط سوم به سه مرکز داده با وجود توربین بادی، د) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط چهارم به سه مرکز داده با وجود توربین بادی، ه) نرخ درخواست‌های ارسالی از سرور رابط پنجم به سه مرکز داده با وجود توربین بادی.

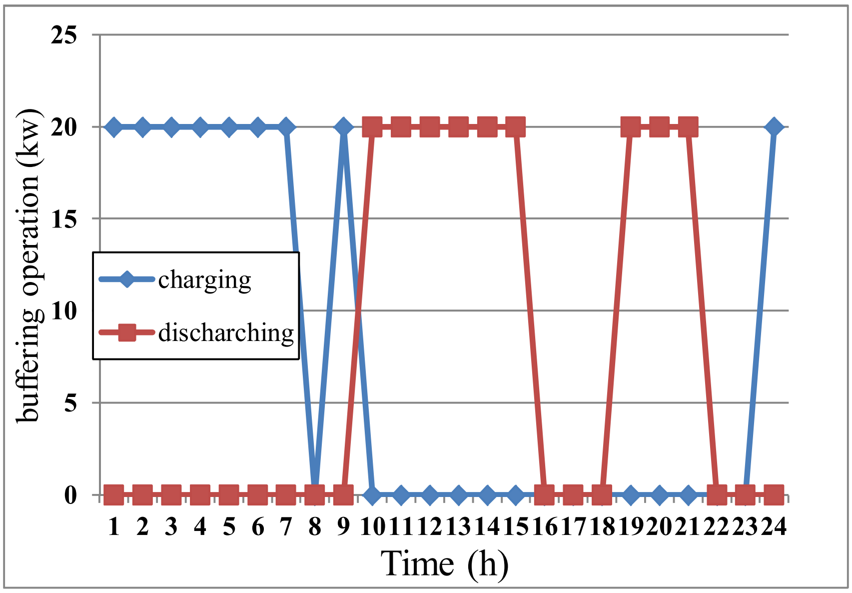
۴-۳-۳ مقدار توان شارژ و دشارژ شده در باتری

در نمودارهای قبل نتایج دو متغیر مسئله بهینه‌سازی نشان داده و به طور کامل تحلیل شد. حالا نتایج دو متغیر دیگر که عبارت‌اند از مقدار توان شارژ شده در باتری ($u_i(t)$) و مقدار توان دشارژ شده از باتری ($q_i(t)$)، در شکل‌های زیر مشاهده می‌شود. شکل(۴-۵) الگوی شارژ و دشارژ باتری‌های مرکز داده مونتین و هوستون را با مشخصات و قیمتی که در جدول(۴-۴) آورده شده است، نشان می‌دهد.



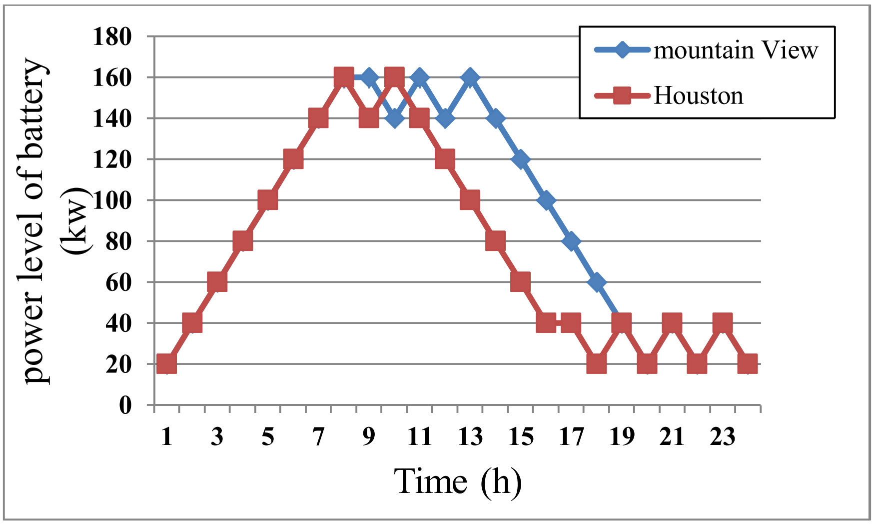
25
20
15
10
5
0
buffering operation (kw)
charging
discharching
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
Time (h)

(الف)



25
20
15
10
5
0
buffering operation (kw)
charging
discharching
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
Time (h)

(ب)



(ج)

شکل ۴-۵: عملیات بافری سیستم های ذخیره ساز، الف) الگوی شارژ و دشارژ باتری در مرکز داده مونتین، ب) الگوی شارژ و دشارژ در مرکز داده هوستون، ج) سطح توان باتری ها

همانطور که در شکل بالا مشاهده می شود، باتری در مرکز داده مونتین به دلیل ارزان بودن قیمت برق در ساعات ۱ الی ۷ و ساعت‌های ۲۰، ۲۳ و ۲۴ شروع به شارژ می‌کند و توان ذخیره شده در باتری افزایش می‌یابد تا ظرفیت باتری به طور کامل شارژ شود. سپس باتری در ساعات ۱۳ الی ۱۹ و ساعت ۲۱ که قیمت برق بالا است و ساعات اوج مصرف برق در آن منطقه است دشارژ می‌شود. به دلیل اینکه مراکز داده، مراکز بزرگ مصرف کننده‌های انرژی هستند، کاهش توان مصرفی در ساعات اوج برای شبکه برق در آن ایالت مفید است و باعث کاهش احتمال قطعی برق در این ساعت‌ها می‌شود. در این حالت الگوی مصرف برق نیز بهبود می‌یابد و پیک مصرف برق به آف پیک نزدیک می‌شود.

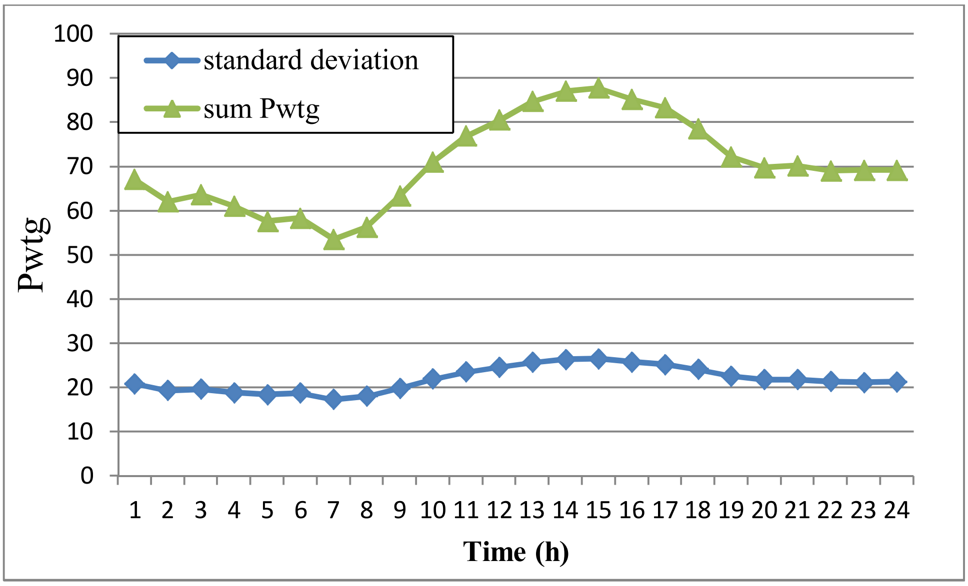
حال الگوی شارژ و دشارژ باتری در مرکز داده ایالت هوستون بررسی می‌شود. در این ایالت در ساعات ۱ الی ۷ و ساعت های ۹ و ۲۴ که قیمت برق پایین است، باتری شروع به شارژ شدن می‌کند و در ساعات ۱۰ الی ۱۵ و ۱۹ الی ۲۱ که ساعات اوج مصرف در این ایالت و ساعات گرانی برق است

باتری شروع به دشارژ شدن می‌کند. در این حالت هم باعث کاهش هزینه برق می‌شود و هم باعث بهبود الگوی مصرف برق می‌شود.

شکل (۴-۵-ج)، سطح توان هر دو باتری را نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود، کمترین مقداری که در باتری توان ذخیره شده است، برابر با ۲۰ کیلووات است. این مقدار توان، جهت قابلیت اعتماد سیستم برای جلوگیری از توقف عملکرد مرکز داده در صورت قطعی برق است.

۴-۳-۴ تولید توربین بادی

همانطور که در شکل (۴-۶) مشاهده می‌شود، توان ورودی توربین بادی و انحراف معیار آن رسم شده است. انحراف معیار، ۰/۵۲ میانگین در نظر گرفته شده است. در ساعات ابتدایی روز، ساعات ۱ الی ۱۱، متوسط میزان تولید بادی پایین است. در ساعات میانی روز، ساعات ۱۱ الی ۱۸ مقدار تولید بادی بالا است. در ساعات انتهایی روز، ساعات ۱۹ الی ۲۴ نیز افت تولید داریم.

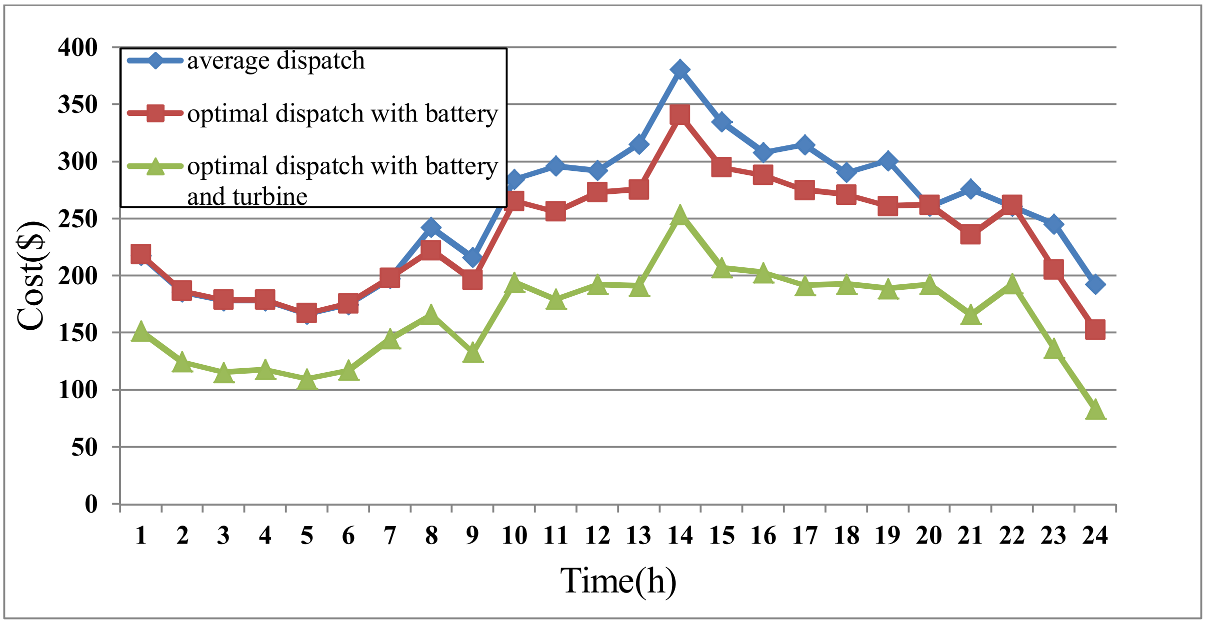


شکل ۴-۶: توان تولیدی توربین بادی و انحراف معیار آن

۴-۳-۵ هزینه توان مصرفی

همان‌طور که در شکل‌های زیر دیده می‌شود، توان مصرفی در ساعات اوج مصرف کاهش می‌یابد و الگوی مصرف برقی که مرکز داده به همراه باتری و توربین بادی از شبکه دریافت می‌کنند بهبود یافته است؛ که این موضوع برای شبکه نیز بسیار مفید است.

شکل (۴-۷) مقدار میانگین هزینه کل مراکز داده را در ساعات مختلف شبانه روز برای سه حالت مختلف که عبارت‌اند از حالت توزیع میانگین حجم درخواست‌ها بین مراکز داده، توزیع بهینه حجم درخواست‌ها به همراه به همراه بافری انرژی و توزیع بهینه حجم درخواست‌ها به همراه توربین بادی را نشان می‌دهد.



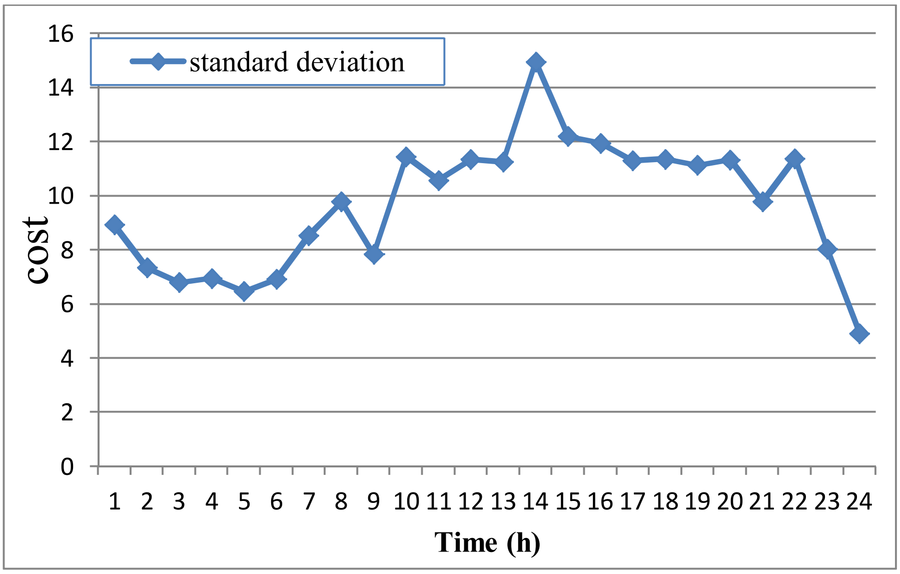
شکل ۴-۷: میانگین هزینه توان مصرفی مراکز داده با حضور باتری، با حضور باتری و توربین و بدون آنها

در حالتی که از توزیع میانگین حجم درخواست‌ها بین مراکز داده استفاده شود، کل هزینه در یک روز برابر $ ۶۱۰۷/۸۲۹ می‌شود که رقم بسیار بالایی است. برای حالتی که توزیع بهینه حجم درخواست‌ها به همراه بافری انرژی انجام می‌شود، هزینه کل روز برابر $ ۵۶۲۷/۸۲ می‌شود. و برای

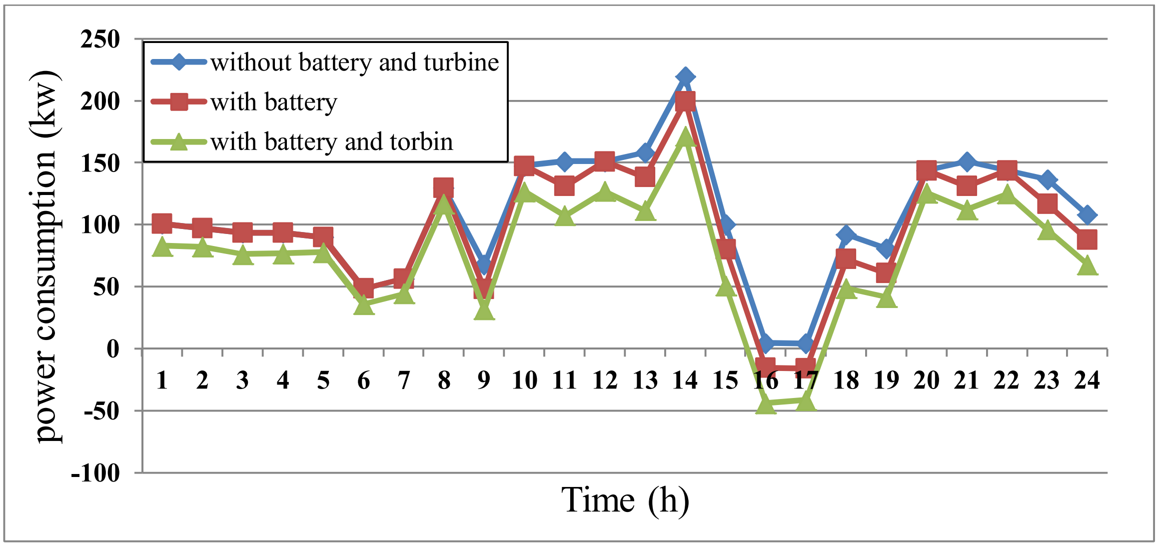
حالتی که توزیع بهینه حجم درخواست‌ها به همراه بافری انرژی و توربین بادی انجام می‌شود، هزینه کل روز برابر $ ۳۹۴۴/۷۰۱ می‌شود.

در نهایت هزینه توان مصرفی در حالتی که توزیع اقتصادی حجم درخواست‌ها به همراه بافری انرژی در نظر گرفته شده است، نسبت به حالتی که فقط توزیع بهینه در نظر گرفته شده، ۷/۶٪ کاهش می‌یابد و برای حالتی که توزیع بهینه به همراه بافری انرژی است نسبت به حالت توزیع بهینه به همراه بافری انرژی و توربین بادی ۳۰٪ کاهش می‌یابد.

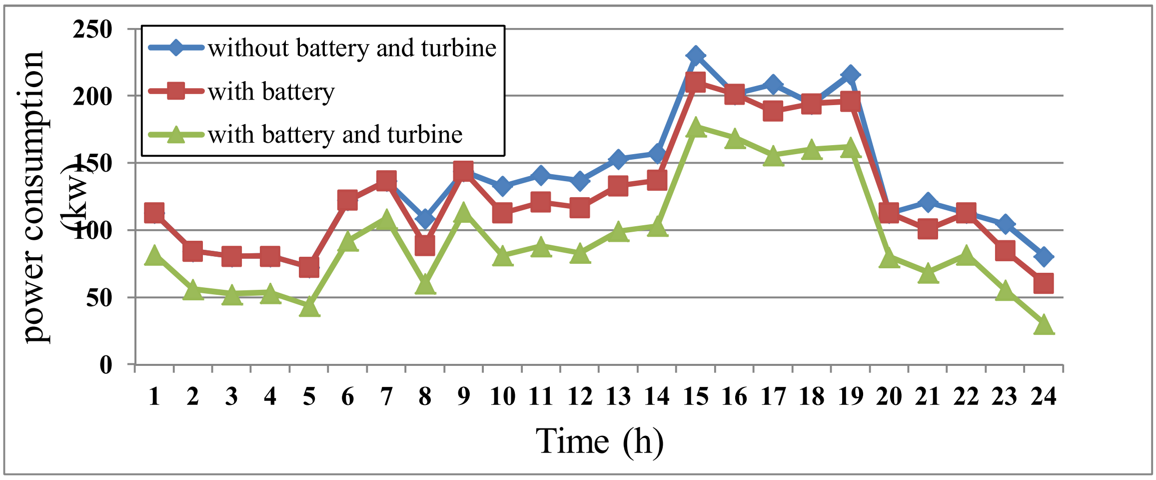
در شکل (۴-۷)، طبق فرمول (۳-۲۸)، هزینه توان مصرفی با در نظر گرفتن میانگین هزینه توربین باد بدست آمده است. در شکل (۴-۸)، طبق فرمول (۳-۲۹) واریانس هزینه توان مصرفی توربین باد بدست می‌آید که با جذر گرفتن از آن انحراف میعار بدست آمده، ترسیم شده است. همانطور که در شکل (۴-۶) مشخص است، با توجه به اینکه در ۱۱ الی ۱۷ تولید بادی نسبت به سایر ساعات شبانه-روز بیشتر است، اما در شکل (۴-۸) در ساعات ۱۱ الی ۱۷ هزینه نسبت به سایر ساعات شبانه‌روز بیشتر است، بدلیل اینکه در این ساعات هزینه برق نسبت به سایر ساعات شبانه‌روز بیشتر می‌باشد.



شکل ۴-۸: انحراف معیار هزینه توان مصرفی مراکز داده با وجود توربین بادی



(الف)



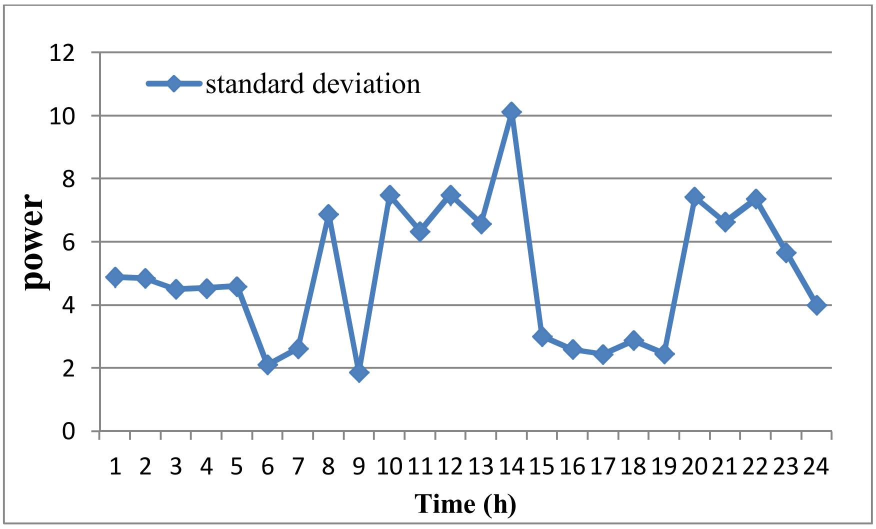
(ب)

شکل ۴-۹: میانگین توان مصرفی کل مراکز داده با حضور باتری، با حضور باتری و توربین و بدون آنها ، الف) میانگین توان مصرفی مرکز داده مونتین، ب) میانگین توان مصرفی مرکز داده هوستون.

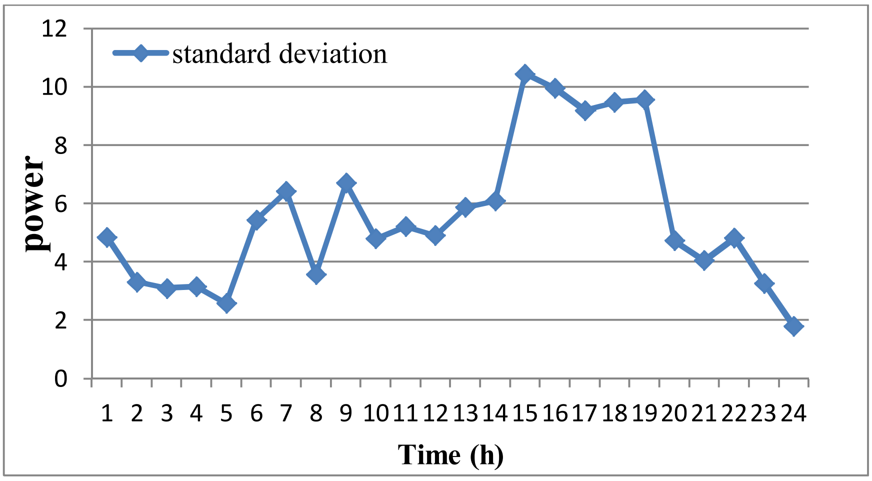
شکل (۴-۹)، طبق فرمول (۳-۲۸)، میانگین توان مصرفی مراکز داده را در سه حالت نشان می‌دهد. در حالت (الف) میانگین توان مرکز داده مونتین در سه حالت با حضور باتری، با حضور باتری و توربین و بدون آنها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است الگوی توان مصرفی سیستم تغییر کرده و در ساعات گرانی قیمت برق که ساعات اوج مصرف برق می‌باشد، توان کشیده شده از شبکه برق کاهش می‌یابد. قسمت (ب) شکل، میانگین توان مصرفی مرکز داده هوستون در سه حالت با حضور باتری، با حضور باتری و توربین و بدون آنها را نشان می‌دهد که الگوی مصرف توان در این مرکز داده مانند

مرکز داده هوستون طوری تغییر کرده است که توان مصرفی در ساعات گرانی به ساعات دیگر که قیمت برق ارزان است، شیفت یافته است.

در شکل (۴-۱۰)، طبق فرمول (۳-۲۹) واریانس توان مصرفی مراکز داده حساب شده و با جذر گرفتن از آن انحراف معیار بدست آمده را نشان می‌دهد. شکل حالت (الف) انحراف معیار توان مصرفی مرکز داده مونتین را نشان می‌دهد. قسمت (ب) شکل، انحراف معیار توان مصرفی مرکز داده هوستون را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۱۰: انحراف معیار توان مصرفی کل مراکز داده با وجود توربین بادی ، الف) انحراف معیار توان مصرفی مرکز داده مونتین، ب) انحراف معیار توان مصرفی مرکز داده هوستون.

۴-۴ خلاصه فصل

در این فصل سیستم مورد مطالعه شامل سه مرکز داده توزیع شده تحت بازارهای چندگانه است. که اطلاعات مربوطه داده شده است. بدلیل اینکه قیمت برق در در مونتین و هوستون متغیر با زمان است، دو باتری با ظرفیت بالا جهت بافری انرژی برای این دو مرکز داده در نظر گرفته شده است. در حالی که به دلیل ثابت بودن قیمت برق در آتلانتا، باتری در نظر گرفته شده فقط برای مواقع اضطراری و به عنوان UPS در نظر گرفته شده که ظرفیت پایینی دارد. در نتیجه توان مصرفی کاهش یافت. و علاوه بر باتری برای هر مرکز داده یک توربین بادی هم در نظر گرفته شده است که علاوه بر کاهش هزینه مصرفی، باعث بهبود دیسپچ بهینه هم شده است. عدم‌قطعیت توربین بادی با روش Unscented transformation مدل شد. سیستم مدلسازی شده در فصل قبل، توسط نرم افزار تخصصی گمز بهینه سازی شد.

فصل پنجم:

نتیجه‌گیری

۵-۱ نتیجه گیری

با افزایش روزافزون استفاده از سرویس‌های آنلاین، هزینه توان مصرفی مراکز داده اینترنت نیز افزایش یافته است. در این پایان‌نامه مراکز داده اینترنت تحت بازارهای مختلف برق با قیمت برق متفاوت قرار دارند. قیمت برق روز قبل در اختیار مراکز داده قرار می‌گیرد. عملکرد سیستم به این صورت است که درخواست‌های کاربران به سرورهای رابط ارسال می‌شود و سرورها حجم درخواست‌ها را بر اساس قیمت برق به مراکز داده اینترنت انتقال می‌دهند. چالش اصلی کاهش هزینه برق مصرفی توسط مراکز داده می‌باشد.

در این پایان نامه در دو مرحله کاهش هزینه برق مصرفی صورت گرفته است. در مرحله اول برای هر مرکز داده یک باتری درنظرگرفته شده است که در ساعاتی ارزانی برق شارژ شود و در ساعات گرانی و ساعات اوج مصرف انرژی را به مراکز داده تحویل دهد. نتایج می‌دهد این باعث کاهش حدود ۷٪ هزینه‌ها شده است. در حالت بعدی علاوه بر باتری، برای هر مرکز داده یک توربین‌بادی نیز درنظرگرفته شده است که باعث کاهش حدود ۳۰٪ هزینه‌ها شده و علاوه بر کاهش هزینه، باعث توزیع بهینه حجم درخواست‌ها نیز شده است. عدم‌قطعیت توربین‌بادی با روش Unscented transformation مدلسازی شد. شبیه‌سازی با نرم‌افزار تخصصی گمز انجام شده است، و در فصل قبل نتایج حاصل از شبیه‌سازی تحلیل شده‌اند.

۵-۲ کارهای آینده

در این پایان‌نامه برای کاهش هزینه توان مصرفی از بافری انرژی و توربین بادی استفاده شده است. برای ادامه کار می‌توان از سلول‌های خورشیدی نیز در کنار باتری و توربین بادی استفاده کرد که به مراتب باعث کاهش بیشتر هزینه خواهد شد. همچنین می‌توان در کارهای بعدی عدم‌قطعیت حجم درخواست‌ها را نیز مورد بررسی قرار داد.

مراجع:

[1] T. Jiang, L. Yu, Y, Cao, " *Energy Management of Internet Data Centers in Smart Grid*," Green Energy and Technology, DOI 10.1007/978-3-662-45676-7_6, 2015

[2] S. Ranjan, K. Karrer, E. Knightly, "Wide area redirection of dynamic content by internet data centers," In: Proceedings of IEEE international conference on computer communications (INFOCOM), 2000

[3] Qureshi A, Weber R, Balakrishnan H, Guttag J, Maggs B, "Cutting the electric bill for internet-scale systems," In: Proceedings of ACM special interest group on data communication (SIGCOMM), 2009

[4] PX. Gao, AR. Curtis, B. Wong, S. Keshav, "It's not easy being green," In: Proceedings of ACM special interest group on data communication (SIGCOMM), 2012

[5] http://smartgrid.ieee.org/ieee-smart-grid. Assessed 20 Sept 2013

[6] L. Rao, X. Liu, L. Xie, W. Liu, "Coordinated energy costmanagement of distributed internet data centers in smart grid," IEEE Trans Smart Grid, 2012, 3(1):50–58

[7] L. Yu, T. Jiang, Y. Cao, S. Yang, Z. Wang, "Risk management in internet data center operations under smart grid environment," In: Proceedings of IEEE international conference on smart grid communications (SmartGridComm), 2012

[8] R. Kaewpuang, S. Chaisiri, D. Niyato, B. Lee, P. Wang, "Adaptive power management for data center in smart grid environment," In: Proceedings of international symposium on parallel and distributed processing with applications (ISPA), 2012

[9] P. Wang, L. Rao, X. Liu, Y. Qi, "D-pro dynamic data center operations with demandresponsive electricity prices in smart grid," IEEE Trans Smart Grid, 2012, 4(3):1–12

[10] D. Salomonsson, L. Soder, A. Sannino, "An adaptive control system for a DC microgrid for data centers," IEEE Trans Ind Appl, 2008, 44(6):1910–1917

[11] A. Rahman, X. Liu, F. Kong, "A survey on geographic load balancing based data center power management in the smart grid environment," IEEE Commun Surv Tutor, 2014, 16(1):214–233

[12] J. Yao, X. Liu, W. He, and A. Rahman, "Dynamic control of electricity cost with power demand smoothing and peak shaving for distributed internet data centers," in Distributed Computing Systems (ICDCS), 2012 IEEE 32nd International Conference on, 2012, pp. 416-424.

[13] L. Rao, X. Liu, L. Xie, and W. Liu, "Coordinated energy cost management of distributed internet data centers in smart grid," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 3, pp. 50-58, 2012.

[14] 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 *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*, 2010, pp. 1-9.

[15] H. Shao, L. Rao, Z. Wang, X. Liu, Z. Wang, and K. Ren, "Optimal load balancing and energy cost management for internet data centers in deregulated electricity markets," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems,* vol. 25, pp. 2659-2669, 2014.

[16] L. Yu, T. Jiang, Y. Zou, "Real-Time Energy Management for Cloud Data Centers in Smart Microgrids," IEEE ACCESS, VOL. XX, NO. XX, 2016

[17] M. Islam, Sh. Ren, H. Mahmud, G. Quan, "Online Energy Budgeting for Cost Minimization in Virtualized Data Center," IEEE Transactions on Services Computing, 2016

[18] L. Yu, T. Jiang, Y. Zou, Zh. Sun, "Joint Energy Management Strategy for Geo-Distributed Data Centers and Electric Vehicles in Smart Grid Environment," IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 7, NO. 5, SEPTEMBER, 2016

[19] J. Luo, L. Rao, X. Liu., "Temporal Load Balancing with Service Delay Guarantees for Data Center Energy Cost Optimization," IEEE .Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2014

[20] Zh. Liu, M. Lin, A. Wierman, S. Low, La. L, H. Andrew, "Greening Geographical Load Balancing," IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, 2014

[21] Y. Cao ,T. Jiang, and Q. Zhang, "Reducing electricity cost of smart appliances via energy buffering framework in smart grid," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems,* vol. 23, pp. 1572-1582, 2012.

[22] J. Yao, X. Liu, and C. Zhang, "Predictive electricity cost minimization through energy buffering in data centers," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 5, pp. 230-238, 2014.

[23] S. Govindan, A. Sivasubramaniam, B. Urgaonkar, "Benefits and limitations of tapping into stored energy for datacenters," in *Computer Architecture (ISCA), 2011 38th Annual International Symposium on*, 2011, pp. 341-351.

[24] L. Yu, T. Jiang, Y. Cao, “Energy cost minimization for distributed internet data centers in smart microgrids considering power outages,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems,* vol. 26, pp. 120-130, 2015.
[25] H .Lei, T. Zhang, Y. Liu, Y. Zha, and X. Zhu, “SGEESS: Smart green energyefficient
scheduling strategy with dynamic electricity price for data center,” *Journal of Systems and Software,* vol. 108, pp. 23-38, 2015.
[26] L. Liu, H. Sun, Y. Hu, J. Xin, N. Zheng, and T. Li, “Leveraging distributed UPS energy for managing solar energy powered data centers,” in *Green Computing Conference (IGCC), 2014 International*, 2014, pp. 1-8.
[27] M. Aien, M. Rashidinejad, M. Fotuhi Firuz-Abad, “Probabilistic optimal power flow in correlated hybrid wind-PV power systems: A review and a new approach,” Renewable and Sustainable Energy Reviews 41(2015)1437–1446.
[28] JM. Morales, S. Pineda, AJ. Conejo, M. Carrion, “Scenario reduction for futures market tradingin electricity markets,” IEEE Trans Power Syst 2009; 24 (2):878–88.
[29] G. Valverde, A.T. Saric, and V. Terzija, “Probabilistic load flow with non-gaussian correlated random variables using 69aussian mixture models,” IET Gen., Transm., Distrib., vol. 6, no. 7, pp. 701–709, July 2012.
[30] J.M. Morales, L. Baringo, A.J. Conejo, and R. Minguez, “Probabilistic power flow with correlated wind sources,” IET Gen., Transm., Distrib., vol. 4, no. 5, pp. 641–651, May 2010.
[31] H. Yang, B. Zou, “The Point Estimate Method Using Third-Order Polynomial Normal Transformation Technique to Solve Probabilistic Power Flow With Correlated Wind Source and Load,” 978-1-4577-0547-2/12/$31.00 ©2012 IEEE.
[32] L. Rao, X. Liu, L. Xie, W. Liu, “Coordinated Energy Cost Management of Distributed Internet Data Centers in Smart Grid ,” IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 3, NO. 1, MARCH 2012
[33] B. Price, E. Dietz, and J. Richardson, “Life cycle costs of electric and hybrid electric vehicle batteries and end-of-life uses,” in *Electro/Information Technology (EIT), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 1-7.
[34] SJ. Julier, “Comprehensive process models for high-speed navigation,” (PhD dissertation). Oxford,U.K.: Dept. Eng. Sci. Univ. Oxford;1997.

[35] S. Julier, J. UhlmannUnscented filtering and nonlinear estimation IEEE Proc 2004;92(3):401–22.

[36] J. Usaola, “Probabilistic load flow in systems with wind generation,” IET Gener Transm Distrib 2009;3(12):1031–41.

[37] A. Keyhani, M. Ghasemi-Varnamkhasti, M. Khanali, & R. Abbaszadeh, “An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran,” *Energy,* 2010, 35 (1), 188–201.

[38] J. P. Hennessey, “Some Aspects of Wind Power Statistics,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1977, 16, 119–128.

[39] S. Toure, “Investigations on the eigen-coordinates method for the 2-parameter Weibull distribution of wind speed,” *Renewable Energy,* 2005, 30 (4), 511-521.

[40] E.L. Skidmore, J. Tatarko, “*Stochastic wind simulation for wind erosion modeling*,” Trans. ASAE, 1990, 33, 1893.

[41] A. Balouktsis, D. Chassapis, Th. D.Karapantsios, “A nomogram method for estimating the energy produced by wind turbine generators,” *Solar Energy*, Vol. 72, No.3, pp. 251-259, 2002.

[42] R. Billinton, W. Li, “ Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo method,” Springer; 1994.

[43] United States Energy Information Administration U.S. Department of Energy [Online]. Available: http://www.eia.doe.gov

[44] United States Federal Energy Regulatory Commission [Online]. Available: http://www.ferc.gov

[۴۵] علیزاده شاهین، “مدیریت انرژی با استفاده از باتری ها در تنظیم بار محاسباتی برای مراکز داده توزیع شده”, پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۵.

[۴۶] بهاره باقری، طاهر نیکنام، “ در نظر گرفتن عدم قطعیت توان تزریقی مزرعه های بادی و بار ها در تخمین حالت سیستم های توزیع”, ششمین کنفرانس انرژیهای تجدیدپذیر، پاک و کارآمد, ۲۲ آبان ۱۳۹۳.

[47] JF. Manwell, AF. Ellis, A. Gambhir, “WIND DATA REPORT FALMOUTH, MA,” Massachusetts Technology Collaborative 75 North Drive Westborough, MA 01581, May1, 2004.

[48] U. Abdulwahid, JF. Manwell, AL. Rogers, AF. Ellis, A. Gambhir, "WIND DATA REPORT Orleans," Massachusetts Technology Collaborative 75 North Drive Westborough, MA 01581, 1st June, 2004.

[49] AL. Rogers, "WIND DATA REPORT Vinalhaven," Fox Islands Electric Cooperative, May 12, 2004.

[50] M. Aien, A. Hajebramhimi, M. Fotouhi-Firuzabad, "A comprehensive review on uncertainty modeling techniques in power system studies," Renewable and Sustainable Energy Reviews 57,1077–1089, 2016.

[51] G.S. Aujla, N. Kumar, " SDN-based energy management scheme for sustainability of data centers: An analysis on renewable energy sources and electric vehicles participation," J. Parallel Distrib. Comput, 2017, http://dx.doi.org/10.1016/j.jpdc.2017.07.002.

[52] L, Grange, G. D. Costa, P. Stolf, "Green IT scheduling for data center powered with renewable energy," Future Generation Computer Systems 86 (2018) 99–120, https://doi.org/10.1016/j.future.2018.03.049.

[53] R..H.A. Zubo, G. Mokryani, H.S. Rajamani, J. Aghaei,T. Niknam, P. Pillai, "Operation and planning of distribution networks with integration of renewable distributed generators considering uncertainties: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews 72 (2017) 1177–1198.

[54] A. Soroudi, T. Amraee , "Decision making under uncertainty in energy systems: State of the art ," RenewableandSustainableEnergyReviews28(2013)376–384.

[55] J.Zhu, "Optimization of power system operation", *Wiley-IEEE Press*; 2009.

[56] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Information and Control,* vol. 8, pp. 338-353,1965.

[57] Y. Ben-Haim, "Info-gap decision theory: decisions under severe uncertainty", *2nd ed.Oxford: Academic Press*; 2006.

[58] AL. Soyster , "Technical note—convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming*", Oper. Res.,* 21:1154–71973.

[59] M. Aien, A. Hajebrahimi, M. Fotuhi-Firuzabad, "A comprehensive review on uncertainty modeling techniques in power system studies", Renewable and Sustainable Energy Reviews 57(2016)1077–1089

[60] M. Aien, M. Fotouhi-Firuzabad, and F. Aminfar, "Probabilistic load flow in correlated uncertain environment using unscented transformation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 4, pp. 2233–2241, Nov. 2012.

[61] A. Kavousi-Fard, T. Niknam, M. Fotuhi-Firuzabad, “Stochastic Reconfiguration and Optimal Coordination of V2G Plug-in Electric Vehicles Considering Correlated Wind Power Generation,” IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, VOL. 6, NO. 3, JULY 2015.

Abstract

With increased demand for Internet services, the power consumption of the internet data centers has increased, Which has led Internet service providers to think about ways to manage energy consumption data centers. In this thesis, taking into account the battery and wind turbine, power consumption has been reduced by Internet data centers. And considering the wind turbine, in addition to reducing costs, the optimal distribution of workloads has also been made. In this study, three data centers were investigated in different geographic regions with different electricity markets a day-ahead. And the results show that by putting the battery about 7% lower in cost, and with batteries and wind turbines, it has cut energy consumption by about 30%. In this study, the uncertainty of wind turbine power generation is modeled by Unscented Transformation.

Keywords: Electricity market, Energy consumption management, Internet data center, Uncertainty, Wind torbin.

Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotics Engineering

M.S.c Thesis in Electrical Power Systems Engineering

IDC Energy Management Considering Wind Generation and its Uncertainty in the Restructured Power Market

By:

Nahid Rajabzadeh

Supervisor:

Dr. Mohsen Asili

September 2018