بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی برق و رباتیک
رشته برق گرایش قدرت (سیستم‌های قدرت)

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

مدیریت انرژی با استفاده از باتری‌ها در تنظیم بار محاسباتی برای مراکز داده توزیع‌شده

نگارنده: **شاهین علیزاده مقدم**

استاد راهنما
دکتر محسن اصیلی

شهریور ۱۳۹۵

شماره: ۱۴۸۴/۲.ت.ب
تاریخ: ۱۳۹۵/۰۶/۱۶
ویرایش: - - - - -

بسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

خانم / آقای **شاهین علیزاده مقدم** به شماره دانشجویی **۹۲۱۰۲۴۴** رشته **مهندسی برق** گرایش **قدرت** (سیستمهای قدرت) که در تاریخ **۹۵/۰۶/۱۶** تحت عنوان :

مدیریت انرژی با استفاده از باتری ها در تنظیم بار محاسباتی برای مراکز داده توزیع شده

با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه : بسیار خوب امتیاز ۱۸٫۶۵) ☑ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

نوع تحقیق: نظری ☑ عملی ☐

۱ـ عالی (۲۰ ـ ۱۹) ۲ـ بسیار خوب (۱۸/۹۹ ـ ۱۸)
۳ـ خوب (۱۷/۹۹ ـ ۱۶) ۴ـ قابل قبول (۱۵/۹۹ ـ ۱۴)
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استادراهنمای اول	محسن اصیل	استادیار	
۲- استادراهنمای دوم	ـــــ	ـــ	
۳- استاد مشاور	ـــــ	ـــ	
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	سید رضا سید شاهزاده	دانشیار	
۵- استاد ممتحن اول	هدی شاهزاده	استادیار	
۶ـ استاد ممتحن دوم	مرتضی رحیمیان	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم به:

چشمه‌های جوشان محبت

جلوه‌های مهر و عطوفت الهی

لبخندهای پر مهر زندگیم

پدر و مادر عزیزم

که در تمام مراحل زندگی، به من راه و رسم درست زیستن را آموختند.

تقدیر و تشکر:

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تلاش و زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزنده استاد گران‌قدر و دلسوزم، جناب آقای دکتر محسن اصیلی، صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم.

تعهــد نامه

این‌جانب **شاهین علیزاده مقدم** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق/قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان‌نامه **طراحی مدیریت انرژی با استفاده از باتری‌ها در تنظیم بار محاسباتی برای مراکز داده توزیع‌شده** تحت راهنمایی دکتر محسن اصیلی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام‌شده 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 پایان‌نامه 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 شاهرود هست 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (بافتهای آن‌ها) استفاده‌شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده‌شده 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 رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

چکیده فارسی

تعداد مراکز داده در سرتاسر دنیا در حال افزایش است و مالکان آن با مشکل هزینه عملیاتی بالا روبه‌رو هستند. اخیراً، مدیریت هزینه توان مصرفی موردنیاز مراکز داده بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

در این تحقیق، سیستمی مطالعه می‌شود که شامل مراکز داده توزیع‌شده در مناطق جغرافیایی مختلف تحت بازارهای متفاوت برق روز-قبل قرارگرفته‌اند. هر مرکز داده به یک سیستم ذخیره‌ساز با ظرفیت بالا مجهز شده است. کل سیستم طوری برنامه‌ریزی می‌شود که هزینه توان مصرفی توسط توزیع بهینه حجم درخواست‌ها و مدیریت بهینه انرژی سیستم ذخیره‌ساز، کاهش بیابد. این سیستم با توجه به محدودیت‌های تعادل توان، هزینه باتری و کیفیت سرویس‌دهی مدل‌سازی می‌شود. برای رسیدن به نتایج کاربردی‌تر، تابع جریمه‌ای برای عدم رعایت کیفیت سرویس‌دهی در نظر گرفته می‌شود. به‌علاوه، تأثیر عمق دشارژ باتری در هزینه انرژی ذخیره شده برای دقت بیشتر در مدلسازی مورد توجه قرار گرفته است. همچنین مسئله برای حل راحت و مناسب خطی‌سازی شده است و مسئله جهت بهینه‌سازی هزینه توان مصرفی شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که نه تنها الگوی توان مصرفی اصلاح می‌شود، بلکه هزینه توان مصرفی تا ۳۲٪ کاهش می‌یابد. همچنین تعادلی بهینه بین قیمت باتری و کاهش هزینه توان مصرفی برقرار می‌شود.

کلید-واژه: مدیریت انرژی، مرکز داده، بازار برق، سیستم ذخیره‌ساز، کیفیت سرویس‌دهی.

لیست مقالات مستخرج:

۱- شاهین علیزاده مقدم، محسن اصیلی، سهیل کعبه پهنه کلایی: "بهینه‌سازی هزینه تـوان مصـرفی مراکزداده توزیع‌شده تحت بازارهای متفاوت به همراه بافری انرژی" چهارمین کنفرانس منطقـه‌ای سیرد، تهران ۱۳۹۴.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱ اهداف تحقیق ۲

۱-۲ روشهای ارائه شده در پایان نامه ۳

۱-۳ مروری بر فصل‌های پایان نامه: ۴

۲ فصل دوم: آشنایی با عملکرد مراکز داده..... ۵

۲-۱ مقدمه ۶

۲-۲ قسمت‌های مختلف مرکز داده ۶

۲-۳ سرورهای رابط: ۹

۲-۴ معیارهای بازدهی توان ۹

۲-۴-۱ معیار تأثیرگذاری استفاده توان (PUE) ۹

۲-۴-۲ تأثیرگذاری زیرساخت مرکز داده (DCiE) ۱۰

۲-۴-۳ بررسی تأثیرگذاری استفاده از کربن دی‌اکسید (CUE) ۱۰

۲-۴-۴ ضریب عملکرد (CoP) ۱۱

۲-۵ روش‌های کاهش هزینه توان ۱۲

۲-۵-۱ مدیریت توان مصرفی ۱۲

۲-۶ مراکز داده سبز ۱۵

۲-۷ خلاصه ۱۶

۳ فصل سوم: مروری بر کار دیگران ۱۷
۳-۱ مقدمه ۱۸
۳-۲ مدیریت هزینه توان مصرفی ۱۸
۳-۳ مدیریت بافری انرژی ۲۱
۳-۴ خلاصه فصل ۲۵
۴ فصل چهارم: مدل‌سازی مسئله ۲۷
۴-۱ مقدمه ۲۸
۴-۲ بیان ریاضی مسئله ۲۹
۴-۲-۱ مرحله اول ۳۱
۴-۲-۲ مرحله دوم: با استفاده از باتری ۳۶
۴-۳ خلاصه فصل ۴۲
۵ فصل پنجم: شبیه‌سازی ۴۳
۵-۱ مقدمه ۴۴
۵-۲ اطلاعات سیستم ۴۵
۵-۲-۱ قیمت برق ۴۵
۵-۲-۲ مشخصات مراکز داده ۴۶
۵-۲-۳ کیفیت سرویس‌دهی ۴۶
۵-۲-۴ نرخ جریمه ۴۹
۵-۲-۵ پارامترهای باتری ۴۹

۵-۳ نتایج شبیه‌سازی ۴۹

۵-۳-۱ حالت نرخ جریمه بالا ۵۱

۵-۳-۲ توزیع حجم درخواست‌ها بین مراکز داده ۵۵

۵-۳-۳ توزیع میانگین حجم درخواست‌ها بین مراکز داده ۵۷

۵-۳-۴ مقدار توان شارژ و دشارژ شده در باتری ۵۷

۵-۴ هزینه توان مصرفی ۶۴

۵-۵ خلاصه فصل ۶۷

۶ فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۶۹

۶-۱ نتیجه‌گیری ۷۰

۶-۲ کارهای آینده ۷۱

فهرست جداول

جدول ۴-۱: علامت‌گذاری و تعریف‌ها ۲۹

جدول ۵-۱: پارامترهای مراکز داده ۴۶

جدول ۵-۲: نرخ درخواست‌های دریافت شده توسط سرورهای توزیع‌کننده ۴۸

جدول ۵-۳: نرخ جریمه در صورت عدم رعایت کیفیت سرویس‌دهی ۴۹

جدول ۵-۴: اطلاعات باتری ۴۹

جدول ۵-۵: بررسی نتایج برای دو ساعت خاص ۶۷

فهرست اشکال

شکل ۲-۲: شکل گرافیکی ارتباط اتاق کامپیوتر و واحد خنک‌ساز ۸

شکل ۲-۳: درصد توان مصرفی هر بخش مرکز داده ۱۱

شکل ۴-۱: ساختار کلی سیستم ۳۱

شکل ۴-۲: رابطه بین تعداد شارژ و دشارژ باتری در طول عمر و عمق دشارژ ۳۷

شکل ۵-۱: قیمت برق در سه موقعیت مختلف ۴۶

شکل ۵-۲: زمان تأخیر انتقال از سرورهای رابط به مراکز داده ۴۸

شکل ۵-۳: تعداد سرورهای فعال ۵۱

شکل ۵-۴: نرخ انتقال حجم درخواست‌ها از سرورهای رابط به مراکز داده ۵۷

شکل ۵-۵: عملیات بافری سیستم‌های ذخیره‌سازا ۵۹

شکل ۵-۶: عملیات بافری سیستم‌های ذخیره‌ساز ۶۱

شکل ۵-۷: عملیات بافری سیستم‌های ذخیره‌ساز ۶۳

شکل ۵-۸: هزینه توان مصرفی مراکز داده با حضور باتری و بدون آن ۶۴

شکل ۵-۹: توان مصرفی کل با در نظر گرفتن باتری و بدون آن ۶۶

فصل اول: مقدمه

۱-۱ اهداف تحقیق

هر روزه تعداد مشترکین اینترنت به صورت قابل ملاحظه‌ای در حال افزایش می‌باشد. مرکز داده، مجموعه بزرگی از تعداد زیادی سرور است که وظیفه پردازش اطلاعات را بر عهده دارد. بر اساس گزارشی که توسط آژانس حافظت محیط زیست (*EPA*[1]) ایالات متحده در آگوست ۲۰۰۷ منتشر شد، مشاهده می‌شود که توان مصرفی مراکز داده از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ دو برابر شده است که مقدار آن به ۶۰ TWh/yr (تراوات ساعت بر سال) می‌رسد[۱].

چالش اصلی در این پژوهش توان مصرفی بالای مراکز داده و هزینه‌های سرسام‌آور آن است. هر چقدر هزینه برق مراکز داده بالاتر باشد، سود ارائه‌دهنده‌های اینترنت کاهش می‌یابد؛ بنابراین، کاهش هزینه‌های توان مصرفی به یکی از اهداف ارائه‌دهنده‌های اینترنت تبدیل شده است.

به منظور افزایش قابلیت اعتماد در تداوم سرویس‌دهی توسط مراکز داده، معمولاً آن‌ها به صورت توزیع‌شده در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف واقع‌شده‌اند که تحت بازارهای چندگانه برق قرار دارند. اگر مراکز داده به صورت توزیع‌شده ساخته شوند در صورت بروز مشکل در یکی از مراکز داده، سرورهای رابط که وظیفه توزیع درخواست‌ها را بین مراکز داده بر عهده دارند، حجم درخواست‌ها را به مراکز دیگر ارسال می‌کند تا مشکل مرکز داده موردنظر رفع شده و دوباره توانایی پردازش درخواست‌های اینترنتی را داشته باشد.

مسئله دیگر این است که معمولاً این مراکز توان مورد نیازشان را از شبکه دریافت می‌کنند. با توجه به متغیر بودن درخواست‌های رسیده به مراکز داده، معمولاً نرخ بالای درخواست‌های مشترکین با پیک مصرف برق در آن منطقه هم‌پوشانی دارد. در این ساعات نیز قیمت برق نسبت به ساعات کم باری بیشتر است؛ بنابراین توان مصرفی بالای مراکز داده در این ساعات بسیار هزینه‌بر

[1] Environmental Protection Agency

است. به‌علاوه احتمال قطع شدن توان نیز افزایش مـی‌یابـد. در ایـن پایـان نامـه، روشـی ارائـه داده می‌شود که علاوه بر بهینه‌سازی هزینه توان مصرفی، الگوی مصرف توان را نیز بهبود بخشد. در ایـن روش علاوه بر توزیع بهینه حجم درخواست‌ها بین مراکز داده توزیع‌شده، از بافری انرژی برای کاهش هزینه استفاده می‌شود. رعایت کیفیت سرویس‌دهی در خدمات اینترنتی بسیار مهم است. مهم‌تـرین عامل برای مشترکین اینترنت جهت ارزیابی کیفیت سرویس‌دهی، زمان تأخیر است.

۱-۲ روش‌های ارائه شده در پایان نامه

در این پروژه، چند مرکز داده در نظر گرفته می‌شود که در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف تحت بازارهای برق متفاوت واقع‌شده‌اند. حجم انبوهی اطلاعات در هر لحظـه توسـط میلیـون‌هـا مشـترک اینترنت تولید می‌شوند. این حجم اطلاعات ابتدا به سرورهایی ارسال می‌شوند که سرورهای توزیـع-کننده نامیده می‌شوند. سرورهای توزیع‌کننده حجم درخواست‌ها را بین مراکز داده پخش می‌کننـد. توزیع حجم درخواست‌ها بین مراکز داده می‌تواند به صورت میانگین انجام شود، به ایـن ترتیـب کـه مقدار حجم درخواست‌ها که به سرورهای رابط می‌رسد به صورت مسـاوی بـین مراکـز داده تقسـیم می‌شوند. ولی از لحاظ اقتصادی بهینه است که قیمت برق در موقعیـت‌هـای مختلـف جهـت توزیـع درخواست‌ها در نظر گرفته شود؛ به عبارت دیگر، سرورهای رابط ابتدا مسیری را برای انتقـال حجـم درخواست‌ها به مراکز داده انتخاب می‌کنند که قیمت برق در آن موقعیت نسـبت بـه موقعیـت‌هـای دیگر کمتر باشد. البته در توزیع حجم درخواست‌ها بایستی تمام محدودیت‌هـا از جملـه محـدودیت کیفیت سرویس‌دهی در نظر گرفته شود.

بافری انرژی ایده‌ی دیگری است که در این پایان نامه پیشنهاد می‌شود که علاوه بر کاهش بیشتر هزینه توان مصرفی، باعث اصلاح الگوی مصرف نیز می‌شود. در هر مرکز داده یک باتری با ظرفیتـی بالا در نظر گرفته می‌شود که این باتری به شبکه نیز متصل است و مـی‌توانـد از شـبکه بـرق، تـوان دریافت کرده و همچنین می‌تواند توان را به مرکز داده تحویل دهد. با توجه به تغییرات قیمت بـرق

در ساعات مختلف، باتری طوری برنامه‌ریزی می‌شود تا در ساعاتی کـه قیمـت بـرق پـایین اسـت، از شبکه توان دریافت کند و در ساعات گرانی برق باتری دشارژ شود و توان را بـه مراکـز داده تحویـل دهد. این عمل علاوه بر کاهش هزینه باعث پیک سایی الگوی مصرف می‌شود. در ایـن مـورد قیمـت باتری در نظر گرفته می‌شود و تعادلی بهینه بین ذخیره هزینه توان مصرفی و قیمـت بـاتری برقـرار می‌شود.

شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار تخصصی بهینه‌سازی گمز[1] انجام می‌شـود و در نهایـت مشـاهده می‌شود که هزینه به مقدار قابل توجهی بدون کاهش کیفیت و همچنین بـا اصـلاح الگـوی مصـرف کاهش می‌یابد.

۱-۳ مروری بر فصل‌های پایان نامه:

سایر فصل‌های پایان نامه بدین شرح است:

در فصل دوم ساختار مراکز داده و عملکرد آن بیان می‌شود. سپس معیارهای سنجش بازدهی توان و قوانین اعمالی به مراکز داده از جمله قیمت برق و کیفیت سرویس‌دهی توضیح داده می‌شود. در فصل سوم، روش‌های کاهش هزینه توان مصرفی مراکز داده معرفی و مقالات مربوطه به صورت مختصر بررسی می‌شود. در فصل چهارم مدل ریاضی مسئله بهینه‌سازی که در این پایان نامه استفاده شده است، ارائه می‌گردد. در فصل پنجم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه شده و مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرد و در نهایت در فصل ششم، کارهای انجام شده در این پایان نامه جمع‌بندی می‌شود و راهکارهایی برای توسعه این مدل ارائه می‌گردد.

[1] GAMS

فصل دوم: آشنایی با عملکرد مراکز داده

۲-۱ مقدمه

جستجو در موتورهای جستجوگری همچون گوگل و بینگ، قرار دادن یک تصویر یا نوشته در شبکه‌های اجتماعی یا آپلود کردن هر نوع محتوی دیجیتال در سرویس‌های میزبانی فایل، به امری عادی بدل شده است. حجم انبوه اطلاعاتی که هر لحظه توسط میلیاردها کاربر اینترنت تولید می‌شوند، در سرورهایی در سراسر جهان قرار می‌گیرند. این سرورها در مراکز بزرگی به نام مراکز داده قرار می‌گیرند. مراکز داده از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده‌اند که هر قسمت توان بسیار بالایی مصرف می‌کند. مراکز داده مصرف‌کننده‌های بزرگ انرژی محسوب می‌شوند و هزینه تأمین این انرژی بسیار بالاست. از این رو معیارهایی برای سنجش بازدهی توان مراکز داده تعریف شده است. همچنین محققان به دنبال روش‌هایی برای کاهش هزینه توان مصرفی هستند.

موضوعی که در مراکز داده در حال حاضر بسیار اهمیت پیدا کرده، انتشار آلودگی در محیط است که نتیجه‌ی تأمین توان مورد نیاز این مراکز غول‌پیکر می‌باشد. معمولاً انرژی‌ای که مراکز داده مصرف می‌کنند از انرژی تولید شده توسط سوخت‌های فسیلی هستند. برای جلوگیری این مشکل، مراکز داده بزرگ موظف به تأمین بخشی از انرژی مورد نیازشان از طریق انرژی تجدید پذیر می‌باشند.

در این فصل ابتدا به معرفی قسمت‌های مختلف مراکز داده و طرز عملکرد آن پرداخته می‌شود. سپس معیارهای سنجش بازدهی توان را معرفی می‌شود. در نهایت، مقالاتی که از انرژی تجدیدپذیر جهت تأمین توان مورد نیازشان استفاده می‌کنند، بررسی می‌گردد.

۲-۲ قسمت‌های مختلف مرکز داده

هر مرکز داده شامل سه بخش اصلی است[1].

۱. فنّاوری اطلاعات (IT[1]): این قسمت شامل سرورها، دستگاه‌های ذخیره‌سازی و اجزای مرتبط با شبکه از قبیل سوئیچ‌ها، فایروال‌ها و ... است.

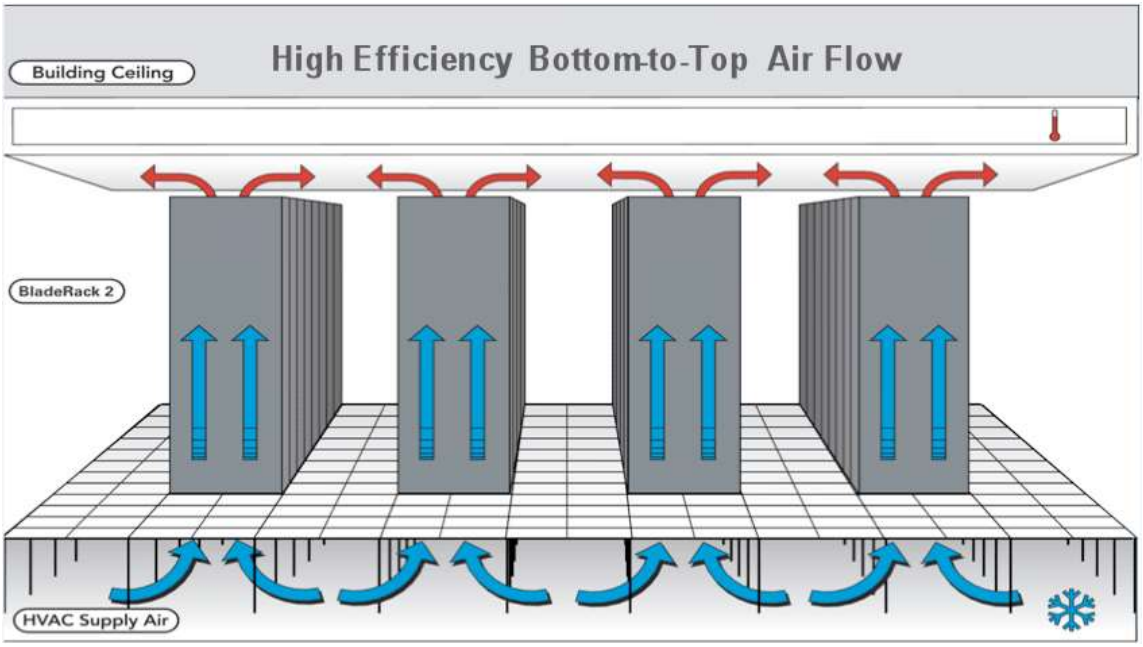
۲. فنّاوری خنک‌سازی (CT[2]): این قسمت شامل اجزایی مانند تهویه مطبوع اتاق کامپیوتر (CRAC[3] ها) و فن‌هاست.

۳. فنّاوری پشتیبانی: این قسمت شامل تجهیزاتی مانند باتری‌ها، ژنراتورهای پشتیبانی توان، تغذیه توان اضطراری[4] (ups ها)، واحدهای توزیع توان[5] (PDU ها) و ... است.

در هر ثانیه حجم درخواست‌ها به مرکز داده جهت پردازش می‌رسد. این حجم درخواست‌ها بین سرورها در مرکز داده توزیع می‌شود. سرورها به صورت فشرده، در قفسه‌هایی مونتاژ شده‌اند. در اثر پردازش حجم درخواست‌ها، سرورها شروع به گرم شدن می‌کنند. گرمای تولید شده توسط سرورها، محیط اتاق کامپیوتر را گرم می‌کند. با افزایش دما، عملکرد سرورها دچار مشکل می‌شود؛ بنابراین برای خنک‌سازی هوای اتاق کامپیوتر از واحدهای خنک‌ساز استفاده می‌شود. شکل کلی خنک‌سازی اتاق کامپیوتر توسط واحدهای خنک‌ساز به صورت گرافیکی در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، هوای گرم تولید شده توسط سرورها، از فضای بالایی خارج‌شده و به واحد خنک‌ساز انتقال می‌یابد. هوای گرم، توسط CRAC ها و فن‌ها خنک می‌شود و به اتاق کامپیوتر انتقال می‌یابد که برای کاهش دمای هوای گرم، واحدهای CRAC و فن‌ها توان بالایی مصرف می‌کنند. هوای گرم و خنک بین اتاق کامپیوتر و واحدهای خنک‌ساز همواره جایگزین می‌شوند.

---

[1] Information Technology
[2] Cooling Technology
[3] Computer Room Air Conditioner
4 Uninterruptible Power Supply
5 Power Distribution Unit



شکل ۲-۲: شکل گرافیکی ارتباط اتاق کامپیوتر و واحد خنک‌ساز[2]

قسمت سوم مرکز داده، قسمت پشتیبانی است. این قسمت جهت قابلیت اعتماد سیستم از جمله تداوم توان دهی به مرکز داده، عملکرد صحیح ابزارها از جمله سرورها، فن‌ها و ... می‌باشد. قطعی برق برای مدت کوتاهی باعث می‌شود تا ارائه‌دهنده‌های اینترنت متحمل خسارت هنگفتی شوند. تأثیرات منفی از کار افتادن عملیات مرکز داده نه تنها هزینه زمان بازیابی و همچنین از بین رفتن فرصت‌ها را به دنبال دارد، بلکه باعث کاهش شهرت کمپانی و اعتماد مردم می‌شود؛ بنابراین، زیرساخت قوی برای مراکز داده جهت کیفیت سرویس‌دهی و تداوم عملکرد مورد نیاز است که تجهیزات قابلیت اعتماد نیز مورد رضایت باشد. قابلیت اعتماد سیستم توزیع توان برای مراکز داده بستگی به تعدد اجزای الکترونیکی و مکانیکی دارد. در مرجع [۳]، تعادل بهینه بین قابلیت اعتماد سیستم مرکز داده و هزینه سرمایه‌گذاری انجام شده است. هزینه سرمایه‌گذاری با در نظر گرفتن عوامل متعددی محاسبه می‌شود که شامل هزینه زمان خاموشی، انتخاب اجزاء، شناسایی روش، هدف دسترس‌پذیری سیستم و هزینه عملکرد می‌باشند. در مرجع [۴]، هدف ارائه‌دهنده‌های اینترنت تلاش برای تقویت زیرساخت‌های مرکز داده برای افزایش قابلیت اعتماد تجهیزات و در عین حال کمینه کردن هزینه‌های کلی مرکز داده می‌باشد. این مرجع روشی پیشنهاد می‌دهد که شاخص‌های اهمیت قابلیت اعتماد را با هزینه کلی

مالکیت (TCA)[1] برای ارزیابی زیرساخت‌های توان مرکز داده ادغام می‌کند. با روش فوق، طراح‌ها می‌توانند تعادلی بین اهمیت قابلیت اعتماد هر قطعه و منابع مالی جهت تقویت آن‌ها برقرار کنند.

۲-۳ سرورهای رابط[2]:

این سرورها رابطی بین مشترکین اینترنت و مراکز داده هستند. زمانی که مشترکین در حال استفاده از اینترنت هستند، درخواست‌هایشان ابتدا به سروری به نام سرورهای رابط ارسال می‌شوند. نرخ بالایی از درخواست‌ها به سرورهای رابط می‌رسند و آن‌ها وظیفه مدیریت الگوی توزیع حجم درخواست‌ها را بین مراکز داده دارند.

۲-۴ معیارهای بازدهی توان

در سال‌های اخیر، معیارهای بسیاری جهت مقایسه و درک درست بازدهی و بهبود استفاده انرژی در مرکز داده ارائه شده است که به چند نمونه از آن‌ها اشاره می‌شود.

۲-۴-۱ معیار تأثیرگذاری استفاده توان (PUE[3])

رایج‌ترین معیاری که در بحث رتبه‌بندی و امتیاز مورد استفاده قرار می‌گیرد معیار تأثیر استفاده توان (PUE) است. این معیار به نسبت بین توان مصرفی کل مرکز داده به توان مصرفی بخش IT مرکز داده گفته می‌شود.

$$PUE = \frac{\text{توان مصرفی کل مرکز داده}}{\text{توان مصرفی بخش } IT} \qquad (۱-۲)$$

این معیار بزرگ‌تر از یک است و در اکثر مراکز داده در حدود ۲ است. به این معنی که توان مصرفی سرورها جهت پردازش، ذخیره و ... اطلاعات، نصف توان مصرفی کل مرکز داده است.

1 Total Cost of Acquisition
2 Front-end Web Portal Servers
3 Power Usage Effectiveness

در ساده‌ترین حالت این معیار به صورت سالیانه سنجیده می‌شود، ولی توصیه می‌شود تا ایـن اندازه‌گیری در مدت کوتاه‌تری (ماهیانه، هفتگی، روزانه و ...) صورت گیرد که با درک بهتـر از رفتار مرکز داده، اقدامات لازم جهت بهره‌وری بالاتر مرکز داده انجام شود[۵].

۲-۴-۲ تأثیرگذاری زیرساخت مرکز داده[1] (DCiE)

DCiE رابطه‌ای بین انرژی کل مصرف‌شده به‌وسیله قسمت *IT* و توان مصرفی کل تأسیسات است. یا به عبارتی این معکوس مشخصه *PUE* است [۵].

$$DCiE = \frac{\text{توان مصرفی بخش } IT}{\text{توان مصرفی کل تأسیسات}} \qquad (۲-۲)$$

$$DCiE = \frac{1}{PUE} \qquad (۳-۲)$$

$$0 \leq DCiE \leq 1$$

۲-۴-۳ بررسی تأثیرگذاری استفاده از کربن دی‌اکسید[2] (CUE):

CUE کربن دی‌اکسید منتشرشده نسبت به انرژی مصرفی مرکز داده است[۵].

$$DCiE = \frac{Kg\ Co2}{KWh} . \frac{\text{کلKWhمصرفی سالیاه}}{\text{انرژی مصرفی سالیانه}} \qquad (۴-۲)$$

$$DCiE = \frac{Kg\ Co2}{KWh} . \frac{1}{PUE} \qquad (۵-۲)$$

1 Data Center Infrastructure Efficiency
2 Carbon Usage Effectiveness

قسمت $\frac{\text{Kg Co2}}{\text{KWh}}$ ثابت تبدیل است که مقدار CO_2 تولید شده در هر KWh انرژی مصرفی توسط مرکز داده را مشخص می‌کند.

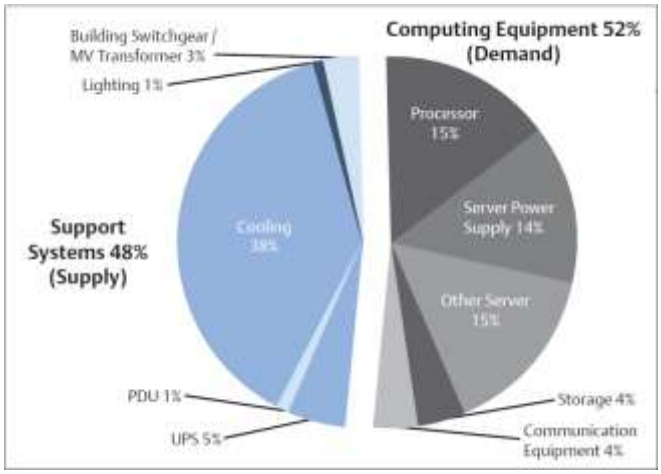
۲-۴-۴ ضریب عملکرد[1] (*CoP*)

برای ارزیابی عملکرد واحد خنک‌ساز از ضریبی به نام ضریب عملکرد استفاده می‌شود که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$CoP = \frac{\text{Q}}{\text{W}} \qquad (۶-۲)$$

که Q مقدار گرمای تولید شده است و W کاری که برای خروج گرمای تولید شده باید انجام شود.

شکل ۲-۳ درصد توان مصرفی را در یک مرکز داده نشان می‌دهد:



شکل ۲-۳: درصد توان مصرفی هر بخش مرکز داده [۶]

مطابق با شکل ۲-۳، ۵۳٪ از توان مصرفی مرکز داده مربوط به اتاق کامپیوتر است که شامل پردازش، منبع توان سرورها، ذخیره‌سازی و تجهیزات ارتباطی می‌شود. به عبارتی معیار PUE مرکز داده حدوداً برابر ۲ است. توان مصرفی واحد خنک‌ساز ۳۸٪ توان کل مرکز داده را شامل می‌شود و

1 Coefficient of Performance

توان مصرفی قسمت پشتیبانی ۶٪ توان مصرفی کل را شامل می‌شود. مقدار کمی از کل توان مصـرفی شامل روشنایی و سوئیچینگ و ... می‌شود.

۲-۵ روش‌های کاهش هزینه توان:

پس از آشنایی با قسمت‌های مختلف مراکز داده و اهمیت هر قسمت، راه‌های کاهش توان مصـرفی و هزینه تأمین آن بررسی می‌شود. در حالت کلی کاهش توان مصرفی باعث کاهش کیفیت مـی‌شـود. روش‌های کاهش توان مصرفی و هزینه آن، به صورت زیر بیان می‌شود[۷]:

۱. مدیریت توان مصرفی
۲. مدیریت هزینه توان
۳. مدیریت بافری انرژی

در این فصل توضیحی در مورد مدیریت توان مصرفی داده می‌شود و خلاصه‌ای از مراجع مربوط به این مبحث بیان می‌گردد. مدیریت هزینه توان و بافری انرژی که مربوط به ایده اصلی پایان نامه است، در فصل بعد بررسی می‌شود.

۲-۵-۱ مدیریت توان مصرفی

تحقیقات در این زمینه در سطح داخلی مرکز داده صورت می‌گیرد که مربوط به بخش‌های اتاق کامپیوتر و واحدهای خنک‌کننده است و هدف آن، کاهش توان مصرفی مرکز داده است. روش‌های مختلفی جهت کاهش توان مصرفی مراکز داده ارائه شده است. ابتدا یک روش معمول جهت کاهش توان مصرفی معرفی می‌شود و سپس تعدادی دیگر از این روش‌ها که در مقالات مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند، بررسی می‌شود.

۲-۵-۱-۱ روش مقیاس بندی تغییرات ولتاژ و فرکانس:

ابتدا توضیحی در مورد این روش داده می‌شود و سپس خلاصه‌ای از یک مقاله در مورد مدیریت توان مصرفی از طریق این روش بیان می‌شود:

- **روش مقیاس بندی ولتاژ**

مقیاس بندی ولتاژ، یک روش مدیریت توان در ساختارهای کامپیوتری است که ولتاژ مورد استفاده را بسته به شرایط می‌توان کاهش یا افزایش داد. در حالت افزایش ولتاژ، سرعت عملکرد سرور افزایش می‌یابد و در حالت کاهش ولتاژ، سرعت عملکرد سرور و گرمای تولید شده توسط آن کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ولتاژ عملکردی، سرعت عملکرد سرور نیز افزایش می‌یابد.

- **تغییرات مقیاس بندی فرکانس**:

مقیاس بندی تغییرات فرکانس، یک روش مدیریت توان در ساختار کامپیوتر است که فرکانس میکروپروسسور را می‌تواند به صورت خودکار تنظیم کند تا توان مصرفی و گرمای تولیدی توسط سرور کاهش یابد. در فرکانس کاری کم، گرمای تولیدی توسط سرورها کم است و بخشی از فن‌های واحد خنک‌ساز می‌توانند خاموش شوند که کاهش توان مصرفی را در پی دارد.

در مرجع[۸]، با استفاده از روش مقیاس بندی دینامیک ولتاژ و فرکانس[1](DVFS) هزینه توان مصرفی مراکز داده توزیع‌شده در مناطق جغرافیایی مختلف را کاهش داده است که متغیرهای مسئله فرکانس یا ولتاژ عملکرد سرورها، توزیع بهینه حجم درخواست‌ها و تغییر اندازه مرکز داده (الگوی روشن/ خاموش کردن سرورها) می‌باشند.

در مرجع[۱]، با استفاده از دو روش کنترلی توان مصرفی مرکز داده کاهش داده می‌شود. روش کنترلی هماهنگ و ناهماهنگ. روش ناهماهنگ به روشی گفته می‌شود که توان مصرفی مراکز داده بدون در نظر گرفتن رابطه بین مشخصه محاسباتی و گرمایی بهینه‌سازی می‌شود، در حالی که در

1 Dynamic voltage and frequency scaling

روش کنترلی هماهنگ، توان مصرفی مرکز داده با در نظر گرفتن رابطه بین مشخصه محاسباتی و گرمایی بهینه می‌شود. در حالت کنترلی ناهماهنگ دو مسئله بهینه‌سازی مجزا حل می‌شود. به این صورت که توان مصرفی بخش محاسباتی مرکز داده به همراه محدودیت‌های محاسباتی جداگانه بهینه‌سازی می‌شود و توان مصرفی واحد خنک‌ساز به همراه محدودیت‌های گرمایی نیز جداگانه بهینه‌سازی می‌شود. در حالی که در حالت کنترلی هماهنگ، توان مصرفی هر دو قسمت به‌طور مشترک در یک مسئله تحت محدودیت‌های محاسباتی و گرمایی بهینه‌سازی می‌شود. در نهایت نتیجه گرفته می‌شود که توان مصرفی کل مرکز داده در ساعات اوج مصرف در حالت کنترلی هماهنگ نسبت به حالت کنترلی ناهماهنگ کمتر می‌باشد.

در مقاله[۹] ، هدف تخصیص حجم درخواست‌ها بین هسته‌های ناهمگن مرکز داده با در نظر گرفتن توان مصرفی و گرمای تولیدی هر هسته می‌باشد. به همین منظور، یک روش جدید بهینه‌سازی ارائه می‌شود که هدف آن بیشینه کردن عملکرد مرکز داده و کمینه کردن توان مصرفی آن است. در این مسئله بهینه‌سازی، هدف به دست آوردن سه متغیر است که این متغیرها عبارت‌اند از حالت عملکردی هر هسته، تعداد مطلوب درخواست‌های اختصاص داده‌شده به هر هسته و همچنین دمای خروجی واحد *CRAC*. در نهایت نتیجه گرفته می‌شود در صورتی که با در نظر گرفتن سه عامل فوق به عنوان متغیر ، نسبت به حالتی که فقط حالت عملکردی هر هسته در نظر گرفته می‌شود، مرکز داده توان کمتری مصرف می‌کند. در مرجع [۱۰]، یک سیستم بازیابی انرژی مؤثر برای خنک‌سازی مرکز داده با استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر پیشنهاد می‌شود. سیستم خنک‌سازی شامل سردکن‌های جذبی است که توسط انرژی گرمایی بازیابی شده از اجزای مرکز داده و انرژی خورشیدی راه‌اندازی می‌شوند. گرمای پخش‌شده در محیط توسط قفسه‌های مرکز داده، برای تبخیر عوامل خنک‌سازی و فعال کردن واحدهای خنک‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در مرجع[۸]، با استفاده از روش مقیاس بندی دینامیک ولتاژ و فرکانس[1] (*DVFS*) هزینه توان مصرفی مراکز داده توزیع‌شده در مناطق جغرافیایی مختلف را کاهش داده است که متغیرهای مسئله فرکانس یا ولتاژ عملکرد سرورها، توزیع بهینه حجم درخواست‌ها و تغییر تعداد سرورهای روشن مرکز داده (الگوی روشن/ خاموش کردن سرورها) می‌باشند.

۲-۶ مراکز داده سبز[2]:

مراکز داده، معمولاً توان مصرفی را از شبکه برق دریافت می‌کنند که برای تأمین این توان، مقدار زیادی کربن دی‌اکسید (CO_2) در محیط منتشر می‌شود. مرکز داده سبز عبارت است از مرکز داده‌ای که بخش اعظمی از توان مصرفی‌اش از انرژی قابل تجدید پذیر مانند انرژِی باد، خورشید و ... تأمین می‌شود.

انرژی‌های تجدید پذیر دارای عدم قطعیت هستند. به این معنی که همیشه در دسترس نیستند، در حالی که در مراکز داده نیاز به پیوستگی توان دهی وجود دارد. در حالی که انرژی خورشید فقط در ساعات مشخصی از شبانه‌روز وجود دارد. همچنین در شرایطی که هوا ابری باشد، تأمین توان از انرژی خورشید ممکن نیست. انرژی باد نیز در طول شبانه‌روز متغیر است. در نتیجه استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر، به موقعیت مکانی مراکز داده بستگی دارد.

در مرجع [۱۱]، ایده استفاده از توان باد، برای مراکز داده توزیع‌شده مطرح شده است. به این صورت که چند مرکز داده در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف واقع‌شده‌اند. سرورهای رابط حجم درخواست‌ها را به مرکز داده‌ای انتقال می‌دهند که توان باد در آن موقعیت در دسترس باشد. همچنین توزیع حجم درخواست‌ها به طریقی انجام می‌شود که از توان تولیدی توسط انرژی تجدید پذیر

1 Dynamic voltage and frequency scaling
2 Green Data Center

بیشترین بهره‌برداری حاصل شود. به این روش آگاهی از توان باد[1] (*WPA*)، گفته می‌شود. این مرجع نشان می‌دهد که با استفاده از این روش، بیش از ۹۵٪ توان مصرفی مراکز داده از انرژی باد تأمین شده و مابقی توان، از شبکه سراسری دریافت می‌شود.

در مرجع [۱۲]، با استفاده از انرژی تجدید پذیر و الگوریتم برنامه‌ریزی حجم درخواست‌ها در مراکز داده توزیع‌شده، میزان استفاده از سوخت‌های فسیلی جهت تأمین توان را کاهش می‌دهد. هر مرکز داده دارای بخش خنک‌ساز است که انرژی مصرفی این بخش بستگی به دمای بیرون دارد. در این کار، برای برنامه‌ریزی الگوی توزیع حجم درخواست‌ها بین مراکز داده، علاوه بر تولید انرژی تجدید پذیر، دمای هوای بیرون و انرژی مصرفی بخش خنک‌ساز در این دما نیز در نظر گرفته می‌شود.

۲-۷ خلاصه:

در این فصل توضیحاتی در مورد ساختار مرکز داده و قسمت‌های مختلف آن ارائه شد. سپس معیارهای ارزیابی بازدهی توان معرفی شدند که رایج‌ترین آن معیار PUE بود. بعد از آن، روش‌های کاهش هزینه توان مصرفی بیان گردید. مورد اول کاهش توان مصرفی بود که در مورد آن چند مقاله مرتبط مرور شد. در نهایت راه‌کارهایی برای استفاده از انرژی تجدید پذیر و بیشینه کردن بهره‌وری از انرژی تجدید پذیر معرفی شدند.

1 wind-power-aware

فصل سوم: مروری بر کار دیگران

۳-۱ مقدمه

بعد شناخت کامل مراکز داده، در این فصل به‌طور کامل روش‌های کاهش هزینه توان مصرفی مراکز داده بررسی می‌شود. هزینه توان مصرفی ۳۰-۵۰٪ کل هزینه‌های عملیاتی مرکز داده را شامل می‌شود. از این رو محققین به دنبال روش‌هایی برای کاهش این هزینه هستند[۱۳].

سه روش برای کاهش هزینه توان مصرفی وجود دارد.

۱. مدیریت توان مصرفی
۲. مدیریت هزینه توان
۳. مدیریت بافری انرژی

که در این فصل روش‌های ۲ و ۳ را بررسی می‌شود و خلاصه‌ای از مراجع مربوط به این مباحث بیان می‌گردد.

۳-۲ مدیریت هزینه توان مصرفی

به‌طور معمول، مراکز داده به دلیل تأمین قابلیت اعتماد و کاهش زمان تأخیر، به صورت چندگانه در مناطق مختلف ساخته می‌شوند[۱۴]. به عنوان مثال، شرکت گوگل علاوه بر تعداد زیادی مرکز داده در ایالت متحده دارد و تعدادی مرکز داده در اروپا و آسیا نیز دارد.

یکی از مهم‌ترین روش‌ها جهت مدیریت هزینه توان مصرفی، توزیع بهینه حجم درخواست‌ها بین مراکز داده توزیع‌شده است. سرورهای رابط الگوی توزیع حجم درخواست‌ها را بین مراکز داده تحت بازارهای چندگانه برق مدیریت می‌کنند. انتقال حجم درخواست‌ها به مرکز داده‌ای که قیمت برق در موقعیت آن ارزان‌تر است، در اولویت قرار می‌گیرد. البته این انتقال در صورتی انجام می‌شود که

محدودیت‌ها از جمله محدودیت کیفیت سرویس‌دهی را رعایت کند. در این زیر بخش، تعدادی مرجع بررسی می‌شود که از این روش جهت بهینه‌سازی هزینه توان مصرفی استفاده کرده‌اند.

در[۱۵] و[۱۶]، مراکز داده به صورت توزیع‌شده در موقعیت‌های مختلف جغرافیایی تحت بازارهای مختلف واقع‌شده‌اند. ایده این مراجع این است که توزیع حجم درخواست‌ها بین مراکز داده بر اساس قیمت اولویت‌بندی شود. سرورهای رابط حجم درخواست‌ها را ابتدا به مرکز داده‌ای انتقال می‌دهند که قیمت برق در آن منطقه پایین‌تر است. در مراجع مربوطه کیفیت سرویس رعایت می‌شود. تأخیر صف‌بندی با استفاده از مدل صف‌بندی *M/M/n* مدل‌سازی می‌شود. همچنین، مسئله در قالب برنامه-ریزی صحیح[۱] (MIP) مختلط فرمول‌بندی شده و برای حل آن یک الگوریتم مؤثر پیشنهاد شده است. در نهایت هزینه توان مصرفی سیستم کلی به مقدار قابل ملاحظه‌ای نسبت به توزیع میانگین حجم درخواست‌ها کاهش می‌یابد.

در مرجع [۱۷]، مسئله توزیع بهینه حجم‌بار بین مراکز داده توزیع‌شده را با در نظر گرفتن تأخیر انتقال در قالب برنامه‌ریزی غیرخطی صحیح مختلط[۲] (NIMLP) مدل‌سازی می‌شود. همچنین، یک الگوریتم شاخه و کران ابداعی با فیدبک[۳] (HBBF) جهت حل مسئله پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۸]، روش تخصیص بهینه حجم درخواست‌ها بین مراکز داده توزیع‌شده را به صورت آنلاین پیاده‌سازی می‌کند و تعادلی بین هزینه‌های انرژی و پهنای باند برقرار می‌کند.

در مرجع [۱۹]، یک مدل برنامه‌ریزی پیشنهاد شده است که مبتنی بر راه‌حل مدیریت تقاضای برق مراکز داده است که تأثیر قیمت‌گذاری در موقعیت‌های مختلف و قابلیت مدیریت توان مرکز داده را با هم ادغام می‌کند. در این روش سه عامل مقیاس بندی تغییر ولتاژ/ فرکانس سرورهای تک، الگوی روشن/ خاموش بودن دسته‌ای از سرورها و تغییرات توزیع حجم‌بار بهینه‌سازی می‌شوند که در این

1 Mixed-Integer Programming
2 Mixed-Integer Nonlinear Programming
3 Heuristic based Branch and Bound with Feedback

بهینه‌سازی تمام محدودیت‌های عملکردی کل سیستم گسترده و سرورهای ناهمگن تکی با توجه به تغییرات حجم‌بار در واحد زمان در نظر گرفته می‌شود. همچنین در این مرجع انرژی مصرفی تجهیزات محاسباتی (IT) و سیستم‌های خنک‌سازی در نظر گرفته می‌شود. به‌علاوه قیمت‌گذاری در موقعیت‌ها و بازدهی سیستم خنک‌سازی بر اساس منطقه در مسئله‌ای یکپارچه مدل می‌شود. در نهایت هزینه توان مصرفی ۲۰٪ در دوره زمانی پیک حجم‌بار و ۸۰٪ در دوره زمانی که حجم‌بار کم است، کاهش می‌یابد.

همچنین در مرجع [۲۰]، با توجه به قابلیت شیفت زمانی و مکانی حجم درخواست‌ها و تغییر توان مصرفی در مراکز داده توزیع‌شده، با در نظر گرفتن وابستگی الگوی توزیع حجم درخواست‌ها به تغییرات قیمت برق و عملکرد خنک‌کنندگی، هزینه انرژی مصرفی را کاهش می‌دهد. در مرجع [۲۰]، روش کاهش هزینه با در نظر گرفتن احتمال خروج ارائه می‌شود. خروج در این کار با مفهوم بیشتر بودن نرخ درخواست ارسال‌شده به مراکز داده نسبت به نرخ سرویس‌دهی آن‌ها تعریف می‌شود. به منظور رعایت این محدودیت، ظرفیت سرورها به صورت متغیر تنظیم می‌شوند و جابه‌جایی درخواست‌ها در بازه‌های زمانی نیز انجام می‌شود.

در مرجع [۲۲]، کمینه‌سازی هزینه توان مصرفی در دو مرحله انجام می‌شود. مرحله اول رابطه بین شبکه برق و مراکز داده برای قیمت‌گذاری مناسب جهت تعادل بار و توان الکتریکی در نظر گرفته می‌شود. در مرحله دوم، تخصیص درخواست‌ها بین مراکز داده توزیع‌شده به منظور بهینه کردن هزینه برق انجام می‌شود. در مرجع [۲۳]، روش بهینه‌سازی تصادفی با برنامه‌ریزی توزیع حجم درخواست‌ها و مدیریت سرورها در مراکز داده، در دو مقیاس زمانی انجام می‌شود. در این کار، در مورد تعداد سرورهای فعال در هر مرکز داده با مقیاس زمانی کند تصمیم‌گیری می‌شود و همچنین نرخ سرویس‌دهی هر سرور کنترل می‌شود که تغییرات آن با مقیاس زمانی سریع انجام می‌شود. هر دو عمل گفته‌شده جهت بهینه‌سازی هزینه مورد استفاده قرار می‌گیرند که مسئله کلی با الگوریتم

بهینه‌سازی لیاپانوف حل می‌شود.

۳-۳ مدیریت بافری انرژی:

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، قیمت برق در شبکه متناسب با الگوی مصرف آن موقعیت جغرافیایی، مشخص می‌شود. در ساعاتی که مصرف برق در مقدار پیک خود قرار دارد، قیمت برق بیشترین مقدار خود را دارد و در ساعاتی که مصرف برق در آن منطقه پایین است، قیمت برق نیز پایین است؛ بنابراین قیمت برق در یک روز متغیر است و تفاوت آن می‌تواند به چند برابر هم برسد؛ بنابراین روشی که می‌تواند هزینه برق را کاهش داده و الگوی مصرف مرکز داده را بهتر کند، بافری انرژی است. به این ترتیب که توان را در ساعات ارزانی برق در دستگاه ذخیره‌ساز انرژی ذخیره کند و در ساعات گرانی و اوج مصرف برق، آن توان را از ذخیره‌ساز تحویل بگیرد. این روش در صنایع بزرگ و تجهیزات هوشمند به کار گرفته می‌شود[۲۴].

مرجع [۷]، با استفاده از روش بافری انرژی هزینه توان مصرفی را کمینه می‌کند. در این مقاله برای هر سرور یک باتری در نظر گرفته شده است. ماژول مدیریت توان، تصمیم می‌گیرد که منبع انرژی، توان مورد نیاز سرورها را تأمین خواهد کرد و یا اینکه باتری چه زمانی شارژ و یا دشارژ شود. این سیاست مدیریت توان، باعث کمینه شدن هزینه توان دهی می‌شود. برای حل مسئله مذکور از روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل[1] (MPC) استفاده شده است.

مراکز داده بزرگ و وسایل نقلیه الکتریکی در مقیاس بزرگ دارایی‌هایی با ارزشی هستند که می‌توانند با تنظیم توان مصرفی‌شان، فرکانس شبکه قدرت را تنظیم کرد. در مرجع [۲۵]، برای تنظیم فرکانس از روش مدیریت توان مرکز داده و خودروهای الکتریکی به صورت مشترک استفاده می‌شود. مسئله شامل طراحی روش کنترل توان مراکز داده و خودروهای الکتریکی برای ردیابی سیگنال تنظیم

[1] Model Predictive Control

فرکانس است. این روش کنترل به صورت روش برنامه‌ریزی، بهترین مقادیر ظرفیت و بار پایه را برای یک دوره عملکردی چند ساعته جهت کمینه کردن هزینه انرژی و بیشینه کردن درآمد سرویس تنظیم مشخص می‌کند. یک چارچوب مدیریت توان سلسله مراتبی دو لایه پیشنهاد شده که توانایی یک طراحی اصولی مسئله برنامه‌ریزی بازار و کنترل ردیابی را دارد. پیاده‌سازی مناسب روش مدیریت توان، منافع اقتصادی برای مالکان مرکز داده و مالکان خودروهای الکتریکی در پی دارد و ازآنجایی‌که تنظیم فرکانس در حال حاضر با روش‌های سنتی از جمله سوزاندن زغال انجام می‌شود، راهی ممکن برای تنظیم فرکانس پاک است. در مرجع [۲۶]، با استفاده از بافری انرژی توسط ups (سیستم‌های ذخیره‌ساز) هزینه مرکز داده را کاهش و الگوی توان مصرفی را تغییر می‌دهد به ترتیبی که پیک توان مصرفی به ساعت‌های کم باری انتقال می‌یابد و قیمت باتری و همچنین عمق دشارژ در این مقاله در نظر گفته می‌شود.

در مرجع [۲۷]، مسئله کمینه‌سازی هزینه انرژی برای مراکز داده توزیع‌شده در ریز شبکه‌های هوشمند با در نظر گرفتن دینامیک‌های سیستم حل می‌شود. اپراتورهای مرکز داده انتظار کمینه شدن هزینه انرژی بلند مدت با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت برق، حجم درخواست‌ها، تولید انرژی تجدید پذیر و حالت قطعی توان دارند. در ابتدا مسئله به صورت تصادفی با در نظر گرفتن توزیع درخواست‌ها، تأمین توان سرورها، مدیریت ذخیره انرژی، برنامه‌ریزی تولید، معادلات توان بین ریز شبکه‌های هوشمند و شبکه اصلی مدل می‌شود. سپس با استفاده از روش بهینه‌سازی لیاپانوف، یک الگوریتم عملیاتی طراحی می‌شود که توانایی برقراری تعادل بین صرفه‌جویی بین هزینه انرژی و قیمت سرمایه‌گذاری باتری را دارد.

پس از بررسی مقالات مرتبط با دو روش فوق‌الذکر، تعدادی مقاله دیگر مربوط به بهینه‌سازی هزینه توان مصرفی نیز بررسی می‌شود.

در مرجع [۲۸]، هدف معرفی چارچوب بهینه‌سازی مبتنی بر بازی استکل‌برگ[1] در شبکه هوشمند با تولیدات توان pv و مراکز داده توزیع‌شده می‌باشد. سیاست دینامیکی قیمت‌گذاری انرژی که اخیراً به فنّاوری شبکه برق هوشمند پیشنهاد داده شده است، می‌تواند مشوق کنترل‌کننده ابری در جابه‌جایی بار محاسباتی به مرکز داده که در مناطق با برق ارزان‌تر قرار دارند یا توان تولید شده زیادی توسط انرژی تجدید پذیر دارند، باشد. از طرفی دیگر، مراکز داده توزیع‌شده در عملیات ابری، فرصت‌هایی را برای کمک به شبکه برق با منابع توزیع‌شده تجدید پذیر ایجاد می‌کنند که باعث تقویت پایداری و متعادل‌سازی بار می‌شوند. این مقاله، یک سیستم فعل و انفعالی را برای شبکه هوشمند قدرت در نظر می‌گیرد که با تولید توان pv به صورت توزیع‌شده و سیستم محاسبات ابری به صورت مشترک، توزیع درخواست خدمات و مسئله مسیریابی را در عملیات ابری، با آنالیز شار توان در شبکه قدرت محاسبه می‌کند. فرمول نویسی با بازی استکل‌برگ برای سیستم فعل و انفعالی تحت دو سناریوی دینامیکی قیمت‌گذاری متفاوت فراهم شده است. دو بازیگر در این بازی کنترل‌کننده شبکه توان و کنترل‌کننده ابری هستند که بازیگر اول سیگنال قیمت‌گذاری را تنظیم می‌کند و بازیگر دوم تخصیص منابع را بین مراکز داده به عهده دارد.

هدف کنترل‌کننده شبکه قدرت، بیشینه کردن سود خود و اجرای تعادل سازی بار در بین باس-های توان و یا به عبارت دیگر، کمینه کردن شار توان از یک باس توان به بقیه باس‌ها می‌باشد. در حالی که هدف کنترل‌کننده‌های محاسباتی ابری بیشینه کردن سود خود با توجه به سیگنال قیمت‌گذاری وابسته به موقعیت می‌باشد. این مقاله براساس یک روش استقرای بازگشتی نقطه نزدیک به بهینه را به دست می‌آورد. یک روش هوشمند با بازدهی بالا برای افزایش بهره‌برداری از انرژی تجدیدپذیر، کاهش هزینه راه‌اندازی و تقویت نرخ رضایت پیشنهاد شده است که مقداری از توان مورد نیازش توسط انرژی تجدید پذیر تأمین می‌شود[۲۸].

[1] Stackelberg

در[۲۹]، هدف بیشینه کردن سود مرکز داده مبتنی بر بهینه‌سازی با استفاده از انرژی تجدید پذیر در توان‌دهی به مرکز داده است. در این مقاله تعادلی بین کمینه‌کردن هزینه انرژی مرکز داده و بیشینه کردن درآمد سرویس‌های محاسبات ابری برقرار می‌شود. همچنین در این مرجع مواردی در نظر گرفته می‌شود که در توافق‌نامه سطح خدمات در حال حاضر بین مراکز داده و مشترکین برقرار است. عوامل متعددی از جمله دسترس‌پذیری توان تولیدی انرژی تجدیدپذیر، طبیعت تصادفی حجم-بار مرکز داده و ... در نظر گرفته می‌شود. در نهایت مشاهده می‌شود که طرح پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های مدیریت عملکرد و انرژی که اخیراً در مقالات آورده شده‌اند، دارد.

در مرجع [۳۰]، روشی برای کاهش هزینه برق در مدت زمان پیک تقاضا و همچنین کاهش انتشار کربن دی‌اکسید با استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر و بافری انرژی به صورت مشترک ارائه می‌شود. این روش به صورت مدیریت آنلاین برای بیشینه کردن بهره‌برداری از انرژی تجدید پذیر و کمینه کردن هزینه برق پیاده‌سازی می‌شود. در مرجع [۳۱]، بهینه‌سازی هزینه برق مراکز داده با استفاده از روش هوشمند بهره‌برداری از انرژی سبز، بر مبنای پیش‌بینی تغییرات قیمت برق و منبع انرژی تجدید پذیر انجام می‌شود. در مرجع [۳۲]، بررسی می‌شود که هزینه انرژی مراکز داده توزیع‌شده در ریز شبکه‌های هوشمند با در نظر گرفتن انتشار کربن کمینه می‌شود. مسئله به صورت یک مسئله تصادفی مدل می‌شود که نرخ درخواست، تولید انرژی تجدید پذیر و نرخ انتشار کربن به صورت رندم به دست می‌آیند.

در مرجع [۳۳]، برای تقویت بهره‌برداری از انرژی تجدید پذیر و پیاده‌سازی وظایف، هدف هماهنگی انجام وظایف محاسباتی با تولید انرژی تجدید پذیر می‌باشد. گره‌های محاسباتی توانایی تنظیم خودکار فرکانس و ولتاژ جهت افزایش بهره‌وری انرژی را دارد. این مسئله به صورت یک مسئله چند هدفه با استفاده از الگوریتم تکاملی حل می‌شود که هدف بیشینه کردن بهره‌وری از انرژی تجدید پذیر و نرخ رضایت از سرویس‌دهی و همچنین کمینه کردن توان مصرفی و مدت زمان انجام وظایف

می‌باشد. این کار ترکیبی از بهینه‌سازی توان مصرفی و استفاده از انرژی تجدید پذیر است.

۳-۴ خلاصه فصل:

در این بخش، دو روش جهت کاهش هزینه توان مصرفی معرفی و مقالات مرتبط با آن بررسی شدند. روش اول مدیریت هزینه با استفاده از الگوی توزیع درخواست‌های اینترنتی بین مراکز داده توزیع‌شده است و روش دوم مدیریت انرژی با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز بزرگ است. محوریت اصلی مراجعی که در این بخش بررسی شدند، دو روش ذکر شده بودند که در هر مرجع روش متفاوتی برای حل مسئله در نظر شده است.

فصل چهارم: مدل‌سازی مسئله

۴-۱ مقدمه:

همان‌طور که در فصول قبل نیز اشاره شد، مراکز داده به صورت در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف تحت بازارهای چندگانه واقع شده‌اند. حجم درخواست‌هایی از مشترکین اینترنت به سرورهای رابط می‌رسند، بایستی به مراکز داده انتقال یابند. این سرورها قابلیت مدیریت الگوی توزیع حجم درخواست‌ها را دارد؛ بنابراین مرکز داده‌ای را برای انتقال حجم درخواست‌ها در اولویت قرار می‌دهد که قیمت برق ارزان‌تری دارد. البته رعایت محدودیت‌ها از جمله کیفیت سرویس‌دهی نیز در این انتقال لحاظ می‌شود و در صورت عدم رعایت محدودیت‌ها انتقال درخواست‌ها انجام نمی‌شود.

از آنجایی که 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 توان دهی به مراکز داده در این زمان کوتاه از باتری‌های UPS استفاده می‌شود و توان ذخیره‌شده در باتری‌ها به مرکز 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 توزیع‌شده به همراه باتری مدل‌سازی می‌شود.

ابتدا در این فصل، مسئله توزیع بهینه حجم درخواست‌ها بین مراکز داده توزیع‌شده تحت بازارهای متفاوت با محدودیت‌های مرتبط با آن 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.

۴-۲ بیان ریاضی مسئله:

مسئله بهینه‌سازی هزینه توان مصرفی در دو مرحله بهینه‌سازی می‌شود.

- **مرحله اول**

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

- **مرحله دوم**

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

ابتدا نشانه‌گذاری و تعریفات در جدول ۴-۱ آورده می‌شود و سپس فرمول‌بندی ارائه داده می‌شود:

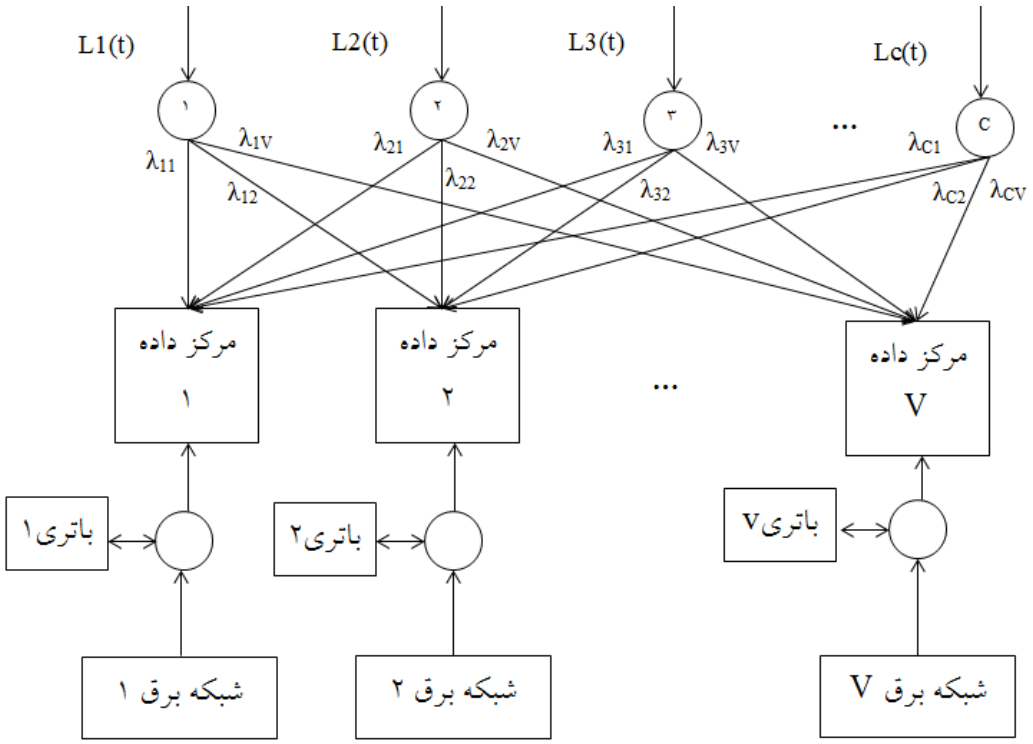
جدول۴-۱: علامت‌گذاری و تعریف‌ها

سرور رابط	i
موقعیت مراکز داده	j
زمان	t
تعداد سرورهای رابط حجم درخواست‌ها	C
تعداد مراکز داده	V
محدودیت تأخیر بر اساس SLA	D_{dy}
توزیع حجم درخواست‌ها از سرور رابط i به مرکز داده j	$\lambda_{ij}(t)$
تعداد سرورهای فعال در موقعیت j در زمان t	$n_j(t)$
نرخ سرویس‌دهی سرور در j در زمان t	$\mu_j(t)$

قیمت برق در موقعیت j در زمان t	$Pr_j(t)$
زمان تأخیر انتقال از سرور رابط i به مرکز داده j	$Td_{ij}(t)$
توانی که مرکز داده به همراه باتری از شبکه در موقعیت j و در زمان t می‌کشد	$Pg_j(t)$
توان مصرفی که مرکز داده j در زمان t	$Pdc_j(t)$
حداکثر نرخ ذخیره توان	U_j
مقدار توان شارژ شده در باتری در موقعیت j در زمان t	$u_j(t)$
حداکثر نرخ تخلیه توان	Q_j
مقدار توان دشارژ شده در باتری در موقعیت j در زمان t	$q_j(t)$
حالت شارژ باتری j در زمان t	$X_j(t)$
نرخ بازدهی شارژ شدن	α
سطح اضطراری باتری	Ce_j
ظرفیت باتری	C_j
نرخ حجم درخواست‌های دریافتی توسط سرور رابطi در زمان t	$L_i(t)$
هزینه توان مصرفی هر مرکز داده در روز	Zcost
عمق دشارژ باتری	DoD

سیستم کلی:

سیستم کلی به صورت شکل ۴-۱ نشان داده می‌شود. این سیستم شامل j مرکز داده در موقعیت‌های مختلف تحت بازارهای برق متفاوت است. تعداد i سرور رابط وجود دارد که حجم درخواست‌ها را با نرخ $L_i(t)$ دریافت می‌کنند و این حجم‌بار را با نرخ $\lambda_{ij}(t)$ بین مراکز داده توزیع می‌کنند. همچنین یک باتری برای هر مرکز داده جهت بافری انرژی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۴-۱: ساختار کلی سیستم

برای مدل‌سازی مسئله به دو بخش تقسیم می‌گردد. ابتدا سیستم شکل ۴-۱ بدون در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌ساز انرژی در نظر گرفته و فقط مسئله توزیع بهینه حجم درخواست‌ها با در نظر گرفتن کیفیت سرویس‌دهی و تعریف جریمه جهت عدم رعایت آن مدل‌سازی می‌شود. در بخش دوم، باتری‌ها را جهت بافری انرژی به سیستم اضافه‌شده و سیستم را مدل می‌شود.

۴-۲-۱ مرحله اول

هدف از این مرحله کمینه کردن هزینه برق مراکز داده توزیع‌شده تحت بازارهای مختلف با استفاده از انتقال بهینه بار است. در این حالت، سه مرکز داده و چهار سرور رابط فرض می‌شود. تعداد مراکز داده را با j و تعداد سرورهای نهایی با i نمایش داده می‌شود.

۴-۲-۱-۱ تابع هدف

تابع هدف به صورت رابطه ۴-۱ تعریف می‌شود:

$$Zcost(t) = Min_{n_j(t),\lambda_{ij}(t)} \sum_{j=1}^{V} (\left(n_j(t).Pr_j(t).Ps_j(t)\right) + \sum_{i=1}^{C} \Delta t_q.\alpha.\lambda_{ij}(t)) \quad (۱-۴)$$

در فرمول ۴-۱، $n_j(t)$ تعداد سرورهای فعال مرکز داده j در ساعت t، $Pr_j(t)$ قیمت برق در موقعیت j و در زمان t است و $Ps_j(t)$ توان مصرفی هر سرور در موقعیت j و در زمان t است. هزینه توان مصرفی همه مراکز داده‌ها جمع می‌شود. قسمت دوم رابطه ۴-۱ مربوط به مقدار جریمه در صورت عدم رعایت کیفیت سرویس‌دهی است. α (درخواست/$) *نرخ* جریمه است که تابعی از زمان تأخیر انتقال است که به صورت رابطه ۴-۲ نشان داده می‌شود.

$$\alpha = f(Td_{ij}(t)) \quad (۲-۴)$$

Δt_q مقدار زمانی است که کیفیت سرویس‌دهی رعایت نمی‌شود و واحد آن ثانیه (s) است. نکته قابل توجه در رابطه ۴-۱ این است مراکز داده تحت بازار روز-قبل هستند که قیمت برق در ساعات مختلف را برای برنامه‌ریزی روز آینده در اختیار دارند.

۴-۲-۱-۲ توان مصرفی سرورها

برای راحتی کار توان مصرفی همه سرورها در هر سه مرکز داده، یکسان در نظر گرفته می‌شود. توان مصرفی هر سرور با استفاده از رابطه ۴-۳ محاسبه می‌شود:

$$Ps_j(t) = A_j.f_j^p + B_j \quad (۳-۴)$$

که A_j و B_j ثابت‌های مثبت هستند و f فرکانس کار هر سرور است و p ضریبی متغیر بین ۲/۵ تا ۳ است.

حال محدودیت‌های مسئله را بررسی می‌کنیم و به صورت ریاضی آن‌ها را مدل‌سازی می‌کنیم.

۴-۲-۱-۳ مدل تعادل حجم درخواست‌های محاسباتی

درخواست‌های مشترکین ابتدا توسط سرورهای رابط دریافت می‌شوند و سرورها حجم درخواست‌ها را بین مراکز داده توزیع می‌کند.

$$\sum_{j=1}^{V} \lambda_{ij}(t) = l_i(t) \qquad (۴-۴)$$

$$\lambda_{ij}(t) \epsilon N, \quad \forall\, i = 1, \dots, C$$

که $\lambda_{ij}(t)$ نرخ حجم درخواست‌های است که از سرور رابط i به مرکز داده j می‌رسد و واحد آن job/s است، همچنین $l_i(t)$ نرخ بار محاسباتی دریافت شده توسط سرور رابط i است.

۴-۲-۱-۴ تعداد سرورهای فعال

هر مرکز داده شامل تعدادی سرور است که این سرورها با توجه به نرخ حجم درخواست‌هایی که به آن‌ها می‌رسد می‌توانند فعال یا غیرفعال باشد. محدوده فعال بودن تعداد سرورهای مرکز داده به صورت رابطه ۴-۵ نشان داده می‌شود:

$$0 \leq n_j(t) \leq N_j \qquad (۴-۵)$$

که در فرمول ۴-۵، N_j تعداد کل سرورهای هر مرکز داده است.

۴-۲-۱-۵ محدودیت تأخیر

تأخیر نهایی به دو قسمت تقسیم می‌شود. تأخیر انتقال و تأخیر صف‌بندی.

- **تأخیر انتقال**

مدت‌زمانی که طول می‌کشد تا بارهای محاسباتی از سرورهای رابط به مراکز داده انتقال یابند را تأخیر انتقال می‌نامند. این مدت زمان وابسته به فاصله سرور رابط تا مرکز داده و همچنین مقدار حجم

درخواست‌های محاسباتی است.

- **محدودیت تأخیر صف‌بندی**

در این مسئله از مدل صف‌بندی M/M/n استفاده می‌کنیم. در این مدل، تأخیر صف‌بندی را با استفاده از رابطه ۴-۶ نشان می‌دهیم [۱۷]:

$$D_j(t) = \frac{1}{n_j(t).\mu_j(t) - \sum_{i=1}^{C} \lambda_{ij}(t)} \qquad (۶-۴)$$

$$\lambda_{ij}(t) \in N$$

که در فرمول ۴-۶ $\mu_j(t)$ نرخ سرویس‌دهی سرورهای مرکز داده j در زمان t است.

پس از معرفی دو تأخیر، مجموع این تأخیرها باید از زمان مشخصی کمتر باشد که این زمان در توافق‌نامه سطح خدمات (SLA) می‌شود:

$$\frac{1}{n_j(t).\mu_j(t) - \sum_{i=1}^{C} \lambda_{ij}(t)} + Td_{ij}(t) \leq D_{dy} \qquad (۷-۴)$$

که D_{dy} محدودیت تأخیر نهایی است. $Td_{ij}(t)$ تأخیر انتقال از سرور رابط i به مرکز داده j در زمان t است.

متغیرهای مسئله بهینه‌سازی $n_j(t)$ و $\lambda_{ij}(t)$ هستند که در فرمول ۴-۷ در مخرج کسر واقع‌شده‌اند و رابطه ۴-۷ غیرخطی است؛ بنابراین باید این رابطه خطی سازی شود.

۴-۲-۱-۶ خطی سازی محدودیت تأخیر انتقال

برای خطی سازی مسئله، رابطه ۴-۷ به صورت شکل ۴-۸ در می‌آید:

$$\frac{1}{D_{dy} - Td_{ij}(t)} \leq n_j(t).\mu_j(t) - \sum_{i=1}^{C} \lambda_{ij}(t), \qquad \forall\, j = 1, \dots, V \tag{۸-۴}$$

$$Td_{ij}(t) < D_{dy}$$

شرط در رابطه ۴-۸، به این معنی است که نباید مخرج رابطه ۴-۸ منفی باشد، بنابراین محدودیت تأخیر با توجه به تأخیر به صورت پله‌ای با نرخ جریمه‌های مشخص تنظیم می‌شود.

۴-۲-۱-۷ تابع جریمه برای کیفیت سرویس‌دهی

همان‌طور که گفته شد، مجموع تأخیر انتقال و صف‌بندی باید کمتر از زمان مشخص‌شده توسط *SLA* باشد. در صورتی که این تأخیر از زمان مشخص شده بیشتر شد، ارائه‌دهنده اینترنت ملزم به پرداخت جریمه می‌باشند. نرخ جریمه با توجه به زمان تأخیر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

- اگر مجموع تأخیرها کمتر از X_1 ms باشد، میزان جریمه صفر است.
- اگر مجموع تأخیرها مابین X_2 ms تا X_3 ms باشد، میزان جریمهY_1 \$/request است.
- اگر مجموع تأخیرها مابین X_3 ms تا X_4 ms باشد، میزان جریمهY_2 \$/request است.
- اگر مجموع تأخیرها بیشتر از X_3 ms باشد، میزان جریمهY_3 \$/request است.

حال که تابع هدف و قیود را توضیح دادیم مسئله را به صورت رابطه ۴-۹ تعریف می‌کنیم:

$$Zcost(t) = \text{Min}_{n_j(t),\lambda_{ij}(t)} \sum_{j=1}^{V} \left(\left(n_j(t).Pr_j(t).Ps_j(t)\right) + \sum_{i=1}^{C} \Delta t.\alpha.\lambda_{ij}(t)\right) \tag{۹-۴}$$

s.t.

$$\frac{1}{D_{dy} - Td_{ij}(t)} \leq n_j(t).\mu_j(t) - \sum_{i=1}^{C} \lambda_{ij}(t), \qquad \forall\, j = 1, \dots, V$$

$$j = 1, \dots, V, \qquad i = 1, \dots, C, \qquad if \qquad Td_{ij}(t) < D_{dy}$$

$$0 \le n_j(t) \le N_j$$

$$\sum_{j=1}^{V} \lambda_{ij}(t) = l_i(t)$$

$$\lambda_{ij}(t)\ \epsilon\ N, \quad \forall\ i = 1, \dots, C$$

در مدل‌سازی ۴-۹ متغیرهای مسئله تعداد سرورهای فعال $n_j(t)$ و نرخ بار محاسباتی انتقال‌یافته از سرور وب نهایی i به مرکز داده j ($\lambda_{ij}(t)$) است. شرطی که در محدودیت کیفیت سرویس‌دهی در نظر گرفته شده است، باعث می‌شود مخرج فرمول همیشه مثبت باشد. در غیر این صورت محدودیت همیشه برقرار می‌باشد.

۴-۲-۲ مرحله دوم: با استفاده از باتری

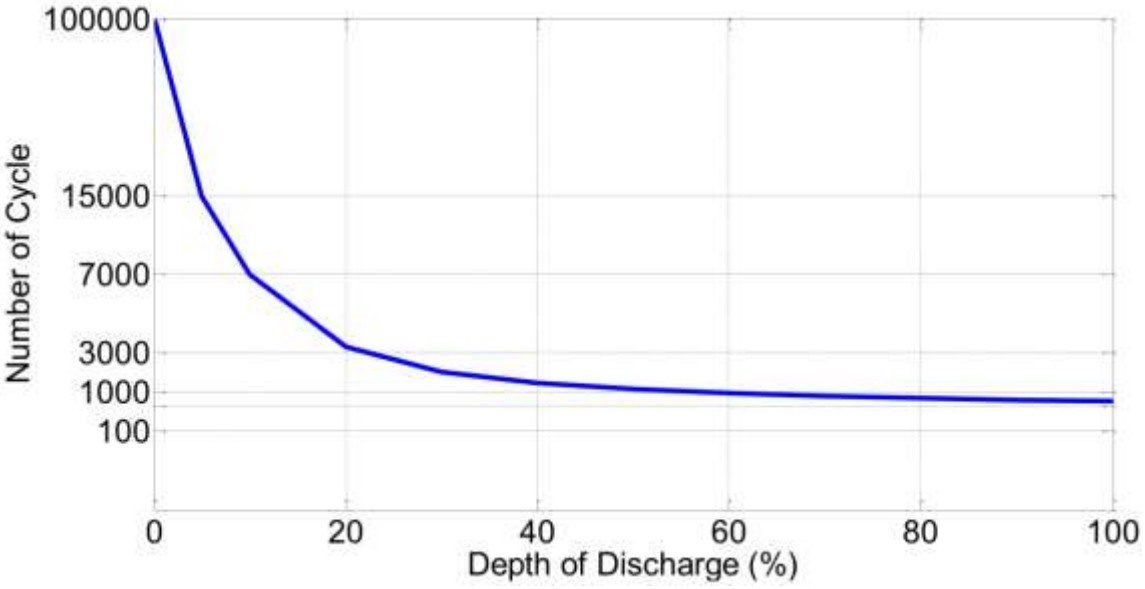
هدف از این مرحله، کمینه کردن هزینه برق با استفاده از انتقال بهینه بار و بافری انرژی است. در این مسئله به ازای هر مرکز داده یک باتری در نظر گرفته می‌شود که علاوه بر مسئله قابلیت اعتماد، هزینه‌های برق مراکز داده را کمتر کند. به این صورت که در ساعاتی که قیمت برق ارزان است باتری شارژ و در ساعات اوج مصرف و گرانی برق، باتری دشارژ می‌شود که هم به مصرف بار در ساعات اوج کمک می‌کند و هم هزینه را کاهش می‌دهد که سود ارائه‌دهنده اینترنت را افزایش می‌دهد. همچنین در این مدل‌سازی قیمت برق نیز در نظر گرفته می‌شود و مسئله طوری طراحی می‌شود تا تعادلی بین ذخیره هزینه انرژی و قیمت باتری برقرار شود.

۴-۲-۲-۱ توضیحاتی در مورد طول عمر باتری لیتیوم یون و عوامل مؤثر بر آن:

در این پایان‌نامه از باتری لیتیوم یون جهت بافری انرژی استفاده می‌شود؛ بنابراین در این قسمت توضیحی در مورد طول عمر باتری داده می‌شود. هر باتری یک طول عمر مشخص دارد که به سه عامل وابسته است. ۱. تعداد دفعات شارژ و دشارژ باتری ۲. سطح توان دشارژ شده باتری ۳. دما

سطح توان دشارژ شده باتری را عمق دشارژ (DOD[1]) می‌نامند. شکل ۴-۲ رابطه بین تعداد شارژ و دشارژ باتری در طول عمرش را در دمای معمولی اتاق نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۴-۳ مشاهده می‌شود، با افزایش عمق دشارژ توان تعداد شارژ و دشارژ باتری در طول عمرش کاهش می‌یابد. به عنوان مثال اگر باتری به‌طور کامل شارژ شده و به‌طور کامل دشارژ شود، حد بالای تعداد شارژ و دشارژش برابر ۱۰۰۰ بار است، در حالی که اگر فقط ۳۰ درصد ظرفیت باتری، توان دشارژ شود، تعداد شارژ و دشارژ باتری حدود ۱۷۰۰۰ بار است.



شکل ۴-۲: رابطه بین تعداد شارژ و دشارژ باتری در طول عمر و عمق دشارژ[۳۴]

۴-۲-۲-۲ مدل هزینه باتری

باتری‌ها دارای طول عمر محدود هستند. اصولاً در این موارد باتری‌های لیتیومی (*Li*) مورد استفاده قرار می‌گیرند. ظرفیت باتری‌های لیتیومی تا زمانی که حداکثر ظرفیت دشارژ شدن باتری به کمتر از ۸۰٪ برسد، به تدریج کاهش می‌یابد و پس از آن نسبتاً سریع شکست خراب می‌شود[۳۵].

در تابع هدف به‌جای استفاده از قیمت باتری، از هزینه انرژی بافری در باتری استفاده می‌کنیم که

[1] depth of discharge

با استفاده از فرمول ۴-۱۰ محاسبه می‌شود:

$$Prb(t) = \frac{P1}{DoD.nt.C} \qquad (۱۰-۴)$$

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

۴-۲-۲-۳ تابع هدف

در حالتی که مراکز داده مجهز به باتری می‌شوند، تابع هدف به صورت ۴-۱۰ مدل می‌شود:

$$Zcost(t) = Min_{n_j(t),\lambda_{ij}(t),u_j(t),q_j(t)} \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{V}(Pr_j(t).Pt_j(t) + Pr_j(t).\frac{u_j}{\theta} + Prb_j(t).q_j(t) + \sum_{i=1}^{C}\Delta t.\alpha.\lambda_{ij}(t)) \qquad (۱۱-۴)$$

در رابطه ۴-۱۱، متغیرهای مسئله عبارت‌اند از:

- تعداد سرورهای فعال در مرکز داده j در ساعت t ($n_j(t)$)
- نرخ انتقال حجم درخواست‌ها از سرور وب نهایی i به مرکز داده j ($\lambda_{ij}(t)$)
- مقدار توان شارژ شده در باتری j در ساعت t ($u_j(t)$) برحسب kWh
- مقدار توان دشارژ شده در باتری j در ساعت t ($q_j(t)$) برحسب kwh

همان‌طور که دیده می‌شود تابع هدف شامل سه قسمت است. قسمت اول هزینه برقی که مرکز داده از شبکه می‌گیرد که برابر است با $Pr_j(t)$ (قیمت برق در ساعت t و در و موقعیت j)، ضرب‌در $Pt_j(t)$ (توانی که شبکه به مرکز داده می‌دهد) می‌دهد. قسمت دوم مقدار توانی که باتری از شبکه در هر ساعت می‌گیرد ضرب‌در قیمت برق در آن ساعت که برابر با هزینه برق برای شارژ باتری می‌شود. همچنین قسمت سوم هزینه توان دشارژ شده است که $Prb_j(t)$ هزینه توان دشارژ شده باتری است و

$q_j(t)$ مقدار توان دشارژ شده است.

۴-۲-۲-۴ محدودیت‌های مربوط به باتری

- **محدودیت نرخ شارژ و دشارژ شدن باتری:**

هر باتری دارای حداکثر نرخ شارژ شدن و حداکثر نرخ دشارژ شدن هستند که با رابطه‌های ۴-۱۱ نشان داده می‌شوند:

$$0 \leq u_j(t) \leq U_j \quad (۱۲-۴)$$

$$0 \leq q_j(t) \leq Q_j \quad (۱۳-۴)$$

در رابطه ۴-۱۲، $u_j(t)$ مقدار انرژی شارژ شده در باتری در موقعیت j و زمان t و U_j حداکثر نرخ شارژ شدن است. در رابطه ۴-۱۳، $q_j(t)$ مقدار انرژی شارژ شده در باتری در موقعیت j و زمان t و Q_j نرخ دشارژ شدن باتری است.

- **محدودیت سطح توان باتری**

هر باتری دارای حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی است و با شارژ و دشارژ شدن سطح توان باتری تغییر می‌کند. رابطه ۴-۱۴ تغییر سطح توان باتری را نشان می‌دهد:

$$X_j(t+1) = X_j(t) + \Delta t_b.(u_j(t) - q_j(t)) \quad (۱۴-۴)$$

که در رابطه ۴-۱۴، $X_j(t)$ سطح توان باتری در ساعت t ام است که رابطه ۴-۱۴ به این معنی است که سطح توان در ساعت $t+۱$ ام برابر است با سطح توان در ساعت t ام به‌علاوه مقدار توانی که در ساعت t ام در باتری ذخیره شد منهای مقدار توانی که در ساعت t ام دشارژ شد. Δt_b بازه زمانی است که باتری شارژ یا دشارژ می‌شود و واحد آن بر حسب ساعت (h) است.

همان‌طور که گفته شد این باتری برای قابلیت اطمینان برق‌رسانی به مرکز داده مورد استفاده قرار

می‌گیرد و بنابراین باید مقداری از توان ذخیره‌شده در باتری بماند تا در مواقع اضطراری مورد استفاده قرار گیرد. محدودیت سطح توان باتری به صورت ۴-۱۵ تعریف می‌شود:

$$Ce_j \leq X_j(t) \leq C_j \qquad (۱۵-۴)$$

در فرمول ۴-۱۵، C_e مقدار توان لازم برای مواقع اضطراری است و C ظرفیت باتری است.

۴-۲-۲-۵ محدودیت تعادل توان

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

$$Pdc_j(t) = n_j(t).Ps_j(t) \qquad (۱۶-۴)$$

$$Pt_j(t) = Pdc_j(t) - q_j(t) \qquad (۱۷-۴)$$

که $Pdc_j(t)$ توان مصرفی مرکز داده j در زمان t است و $Pt_j(t)$ توانی است که مرکز داده j در زمان t از شبکه برق دریافت می‌کند.

۴-۲-۲-۶ محدودیت باتری:

رابطه ۴-۱۸ به این مفهوم است که باتری توانایی شارژ و دشارژ هم‌زمان را ندارد.

$$u_j(t).q_j(t) = 0 \qquad (۱۸-۴)$$

رابطه ۴-۱۸ به این معنی است که باتری در یک زمان نمی‌تواند هم شارژ و هم دشارژ شود. ولی به دلیل اینکه هم $u_j(t)$ و هم $q_j(t)$ جزء متغیرهای مسئله هستند که در هم ضرب می‌شوند، قید موردنظر غیرخطی است. به دلیل اینکه نرم‌افزار گمز در حالت غیرخطی نقطه جواب بهینه سراسری را پیدا نمی‌کند، بنابراین برای حل این مسئله باید قید موردنظر خطی سازی شود. برای خطی‌سازی، ابتدا یک متغیر باینری به نام a تعریف می‌شود. سپس قید غیرخطی به صورت روابط ۴-۱۹ الی ۴-۲۱

خطی‌سازی می‌گردد:

$$\alpha_j(t)\ \epsilon\ \{0 \quad 1\} \tag{۱۹-۴}$$

$$u_j(t) \le U_j.\alpha_j(t) \tag{۲۰-۴}$$

$$q_j(t) \le Q_j.(1-\alpha_j(t)) \tag{۲۱-۴}$$

در رابطه ۴-۱۹، a یک متغیر باینری است که می‌تواند $\{۱،۰\}$ باشد.

ازآنجایی‌که $u_j(t)$ و $q_j(t)$ همواره بزرگ‌تر از صفر هستند، بنابراین در صورتی که a=1 باشد، $u_j(t)$ می‌تواند کمتر مساوی از U_j باشد، یعنی هم می‌تواند U_j و هم می‌تواند صفر باشد ولی $q_j(t)$ همواره صفر است و در صورتی که a=0 باشد، $u_j(t)$ همواره صفر است ولی $q_j(t)$ می‌تواند هم صفر و هم مساوی با Q_j باشد.

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

$$Zcost(t) = Min_{n_j(t),\lambda_{ij}(t),u_j(t),q_j(t)} \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{V}(Pr_j(t).Pt_j(t) + Pr_j(t).\frac{u_j}{\Theta} + Prb_j(t).q_j(t) + \sum_{i=1}^{C}\Delta t.\alpha.\lambda_{ij}(t)) \tag{۲۲-۴}$$

s.t. (۲۳-۴)

$$\frac{1}{D_{dy} - Td_{ij}(t)} \le n_j(t).\mu_j(t) - \sum_{i=1}^{C}\lambda_{ij}(t), \qquad \forall\, j = 1,\dots,V$$

$$j = 1,\dots,V, \qquad i = 1,\dots,C, \qquad if \qquad Td_{ij}(t) < D_{dy}$$

$$\sum_{j=1}^{V}\lambda_{ij}(t) = l_i(t)$$

$$\lambda_{ij}(t)\,\epsilon\,N,\quad \forall\, i=1,\dots,C$$

$$0 \le n_j(t) \le N_j,\qquad \forall\, j=1,\dots,V$$

$$u_j(t)\epsilon\,\{0\quad U_j\}$$

$$q_j(t)\,\epsilon\,\{0\quad Q_j\}$$

$$\alpha_j(t)\,\epsilon\,\{0\quad 1\}$$

$$u_j(t) \le U_j.\alpha_j(t)$$

$$q_j(t) \le Q_j.(1-\alpha_j(t))$$

$$Pdc_j(t) = n_j(t).Ps_j(t)$$

$$Pt_j(t) = Pdc_j(t) - q_j(t)$$

$$X_j(t+1) = X_j(t) + \Delta t_b.(u_j(t) - q_j(t))$$

$$Ce_j \le X_j(t) \le C_j$$

۳-۴ خلاصه فصل

در این فصل، مسئله بهینه‌سازی توان مصرفی مدل‌سازی گردید. در ابتدا، مراکز داده را بـه صـورت توزیع‌شده بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز انرژی مدل‌سازی شد. در این مدل‌سازی نـرخ جریمـه‌ای در تابع هدف برای عدم رعایت کیفیت سرویس‌دهی در نظر گرفته شد. در مرحله بعد بـاتری بـا در نظـر گرفتن تمام محدودیت‌های فنی و اقتصادی به مدل افزوده شد. مسئله بهینه‌سازی دارای دو محدودیت غیرخطی است. ازآنجایی‌که نرم‌افزار گمز در حالتی که مسئله خطی باشد بهینه سراسری را مـی‌یابـد، این محدودیت‌ها خطی سازی شدند.

فصل پنجم: شبیه‌سازی

۵-۱ مقدمه

شرکت‌های بزرگی مانند گوگل، دارای تعداد زیادی مرکز داده در سرتاسر دنیا هستند. در این قسمت سه مرکز داده که در ایالات مونتین[۱]، آتلانتا[۲] و هوستون[۳] واقع‌شده‌اند، در نظر گرفته می‌شود. همچنین چهار سرور رابط در نظر گرفته می‌شود. حجم درخواست‌ها با نرخ‌های مشخصی به این مراکز داده می‌رسند. همچنین مراکز داده تحت بازارهای چندگانه برق واقع‌شده‌اند. قیمت برق در هر سه ایالت از روز قبل در اختیار مرکز داده قرار می‌گیرد. برای کاهش هزینه توان مصرفی، سرورهای رابط طوری برنامه‌ریزی می‌شوند که انتقال حجم درخواست‌ها را به مرکز داده‌ای که قیمت برق پایین‌تر، در اولویت قرار دهند. محدودیت تأخیر انتقال که عامل اصلی کیفیت سرویس‌دهی است، در این انتقال بایستی رعایت شود[۱۷].

توافق‌نامه سطح خدمات، قراردادی است بین ارائه‌دهنده اینترنت و مشتری جهت تضمین کیفیت سرویس‌دهی به مشتریان که بر اساس این توافق، تأخیر نهایی بایستی کمتر از زمان مشخص‌شده باشد. در صورت عدم رعایت کیفیت سرویس‌دهی، نرخ جریمه‌ای در توافق‌نامه تعریف می‌شود که مالکان مراکز داده موظف به پرداخت آن هستند.

با توجه به نرخ جریمه الگوی توزیع درخواست‌های اینترنتی در این کار بررسی می‌شود.

- الگوی توزیع حجم درخواست‌ها با نرخ جریمه بالا
- الگوی توزیع حجم درخواست‌ها با نرخ متوسط جریمه
- و در نهایت الگوی توزیع حجم درخواست‌ها با نرخ جریمه پایین

قیمت برق در دو ایالت مونتین و هوستون متغیر با زمان است. اختلاف قیمت در این دو ایالت در بعضی ساعات به بیش از دو برابر نیز می‌رسد. سیاست قیمت‌گذاری برق در هر منطقه بر اساس

---

[1] Mountain View
2 Atlanta, GA
[3] Houston, Texas

الگوی مصرف آن منطقه است؛ بنابراین کاهش توان در ساعت اوج به سود شبکه برق است و احتمال قطعی برق کاهش می‌یابد.

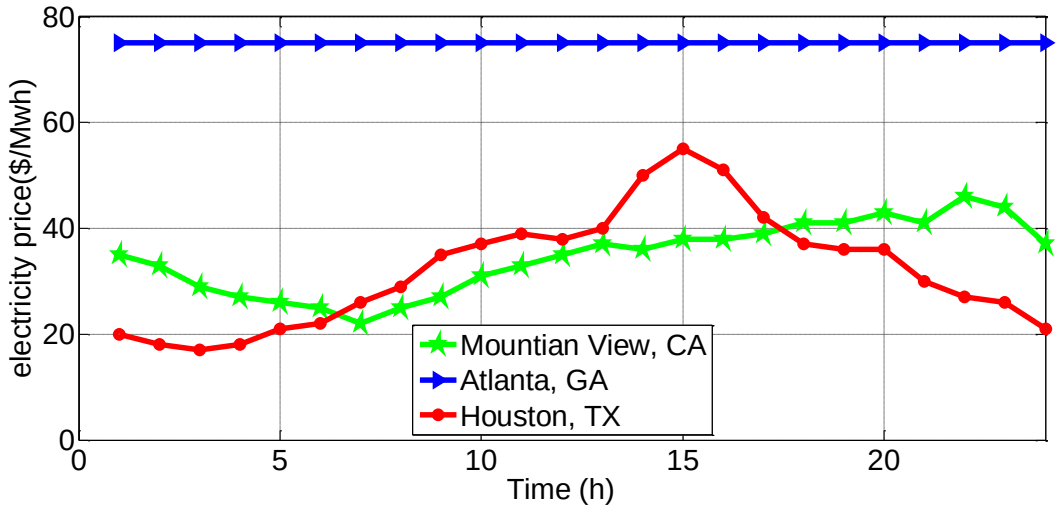
بنابراین برای تغییر الگوی مصرف و کاهش مصرف پیک در ساعات اوج مصرف، از بافری انرژی استفاده می‌شود. به این صورت که یک باتری با ظرفیت بالا برای این دو مرکز داده انتخاب می‌گردد. سیستم ذخیره‌ساز انرژی طوری برنامه‌ریزی می‌شود تا در ساعات اوج مصرف و گرانی برق، شروع به شارژ شدن می‌کنند و در ساعات اوج مصرف و گرانی برق توان ذخیره‌شده 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.

۵-۲ اطلاعات سیستم

در ادامه این بخش پارامترهای مربوط به مراکز داده، قیمت برق هر منطقه، اطلاعات مربوط به باتری‌ها و نرخ جریمه را ارائه می‌شود.

۵-۲-۱ 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 ۵-۱ نشان داده می‌شود[۳۶]، [۳۷]،[۳۸].



شکل ۵-۱: قیمت برق در سه موقعیت مختلف

همان‌طور در شکل ۵-۱ که مشاهده می‌شود، قیمت برق در ایالت‌های مونتین و هوستون متغیر بازمان هستند، در حالی که در ایالت آتلانتا قیمت در ساعات مختلف ثابت است.

۵-۲-۲ مشخصات مراکز داده

جدول ۵-۱ مشخصات مربوط به هر سه مرکز داده را نشان می‌دهد. پارامترهایی که در جدول آورده شده است عبارت‌اند از: تعداد سرورهای هر مرکز داده، فرکانس عملکردی هر سرور و ثابت‌های توان مصرفی آن‌ها.

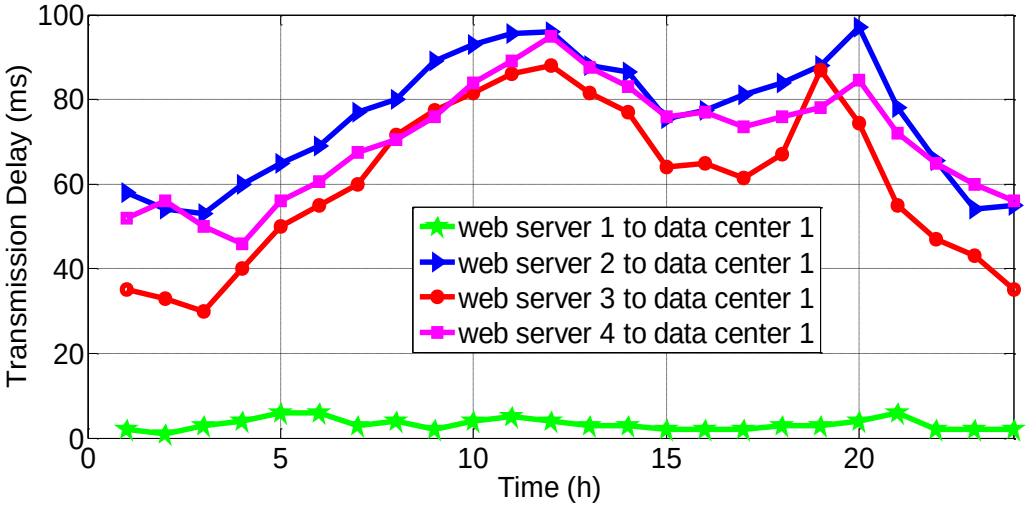
جدول ۵-۱: پارامترهای مراکز داده

J	Nj	Ps(j)	μ
1	50000	120	2
2	40000	120	2
3	40000	120	2

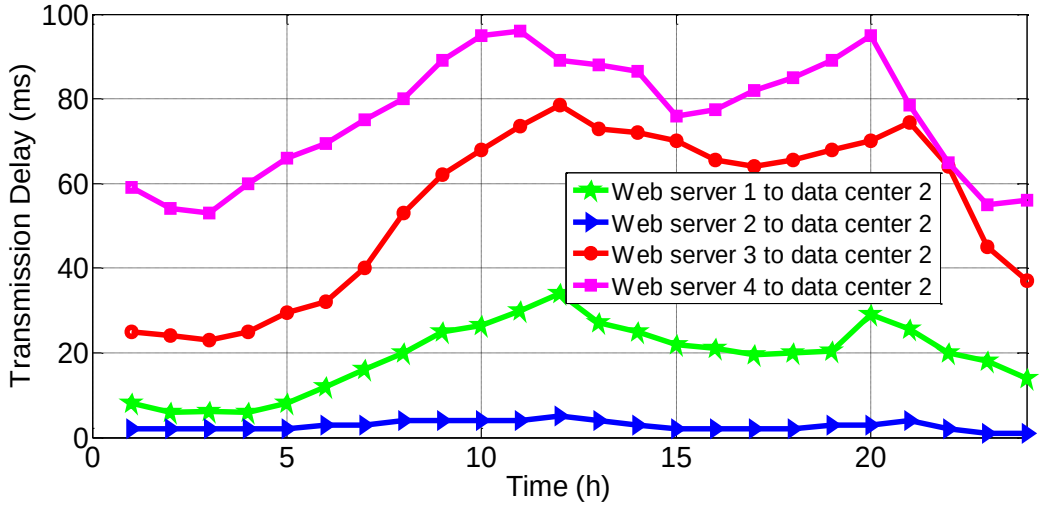
۵-۲-۳ کیفیت سرویس‌دهی

همان‌طور که گفته شد، مهم‌ترین عامل کیفیت سرویس‌دهی رعایت محدودیت تأخیر است. محدودیت تأخیر شامل دو بخش است که عبارت‌اند از: تأخیر انتقال از سرورهای رابط به مراکز داده و

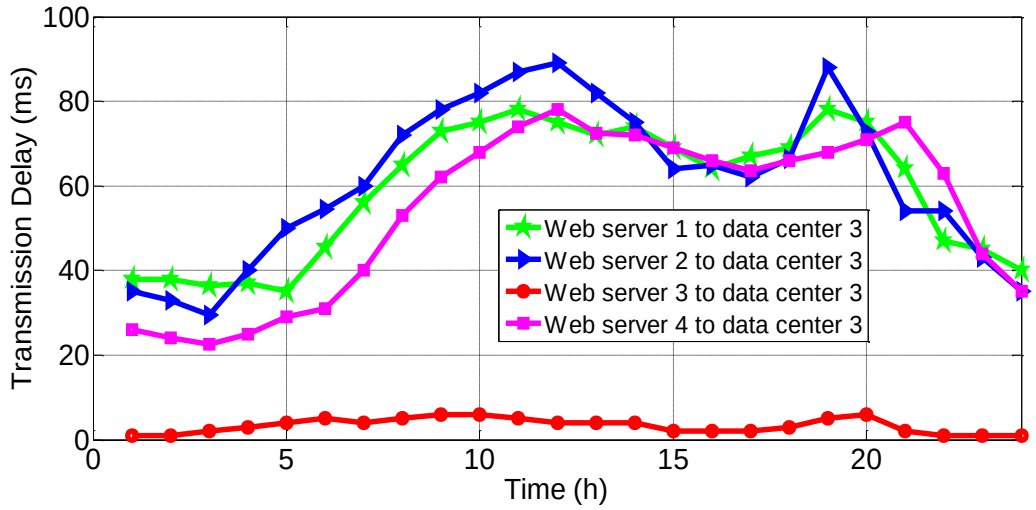
تأخیر صف‌بندی. در این بخش تأخیر انتقال از سرورهای رابط به مراکز داده مختلف در همه ساعت-های یک روز نشان داده می‌شود. شکل۵-۲. الف تأخیر انتقال حجم‌بار از سرورها رابط به مرکز داده مونتین را نشان می‌دهد. به همین ترتیب شکل ۵-۲. ب و۵-۲.ج تأخیر انتقال را برای مراکز داده ایالات آتلانتا و هوستون نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵-۲: زمان تأخیر انتقال از سرورهای رابط به مراکز داده، الف) مرکز داده مونتین، ب) مرکز داده آتلانتا، ج) مرکز داده هوستون

تأخیر صف‌بندی از رابطه گفته‌شده به دست می‌آید که به نرخ حجم درخواست‌های رسیده به مرکز داده و نرخ سرویس‌دهی آن وابسته است.

نرخ حجم درخواست‌هایی که به سرورهای رابط می‌رسد، متغیر با زمان است؛ اما به دلیل راحتی و در دست نداشتن اطلاعات دقیق از این حجم درخواست‌ها ، نرخ حجم درخواست‌ها در ساعت‌های مختلف به صورت جدول ۵-۲ فرض می‌شود. واحد آن (درخواست/s) است.

جدول ۵-۲: نرخ درخواست‌های دریافت شده توسط سرورهای توزیع‌کننده

i/t	1_6	7_18	19_24
L1	30000	40000	30000
L2	40000	40000	30000
L3	40000	50000	40000
L4	30000	30000	20000

۵-۲-۴ نرخ جریمه

نرخ جریمه را در هر سه حالت در جدول ۵-۳ می‌آوریم. واحد نرخ جریمه ($/درخواست) است.

جدول ۵-۳: نرخ جریمه در صورت عدم رعایت کیفیت سرویس‌دهی

زمان تأخیر نرخ جریمه	کمتر از ۸۰ ms	۸۰ms تا ۱۳۰	۱۸۰-۱۳۰	۱۸۰ به بالا
بالا	۰	$1*10^{-6}$	$1.5*10^{-6}$	$2.5*10^{-6}$
متوسط	۰	$0.25*10^{-6}$	$0.4*10^{-6}$	$0.6*10^{-6}$
پایین	۰	$0.1*10^{-6}$	$0.15*10^{-6}$	$0.25*10^{-6}$

۵-۲-۵پارامترهای باتری

جدول۵-۴ اطلاعات مربوط به باتری استفاده شده در مراکز داده مونتین و هوستون را نشان می‌دهد.

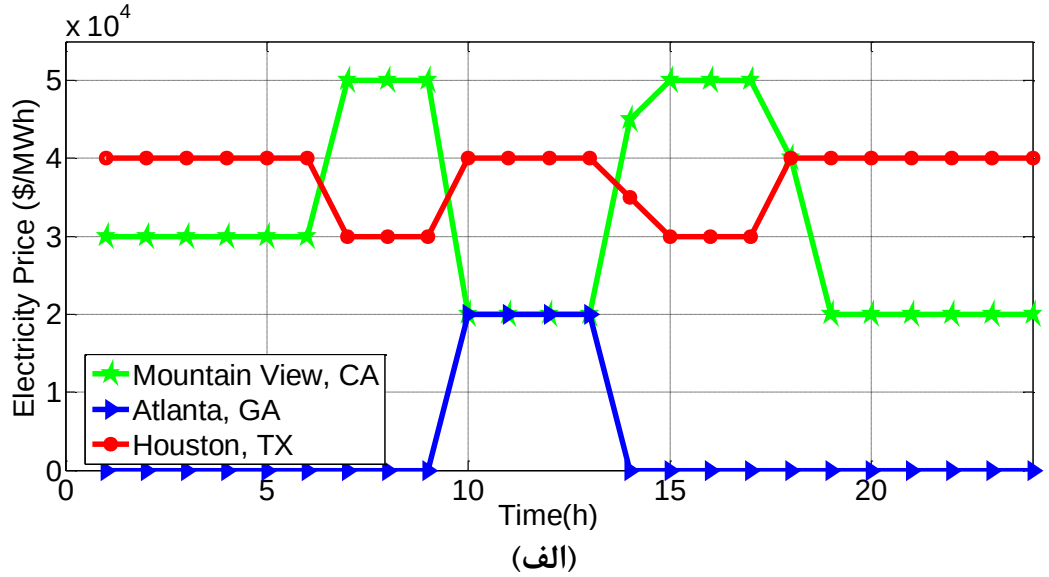
جدول۵-۴: اطلاعات باتری

قیمت باتری (P1)	۱۶۰۰۰۰
نرخ شارژ شدن (U)	۲۰۰۰۰۰۰
نرخ دشارژ شدن (Q)	۲۰۰۰۰۰۰
نرخ بازدهی (Θ)	۰/۹۸
تعداد شارژ و دشارژ در یک دوره طول عمر (nt)	۲۰۰۰
ظرفیت (C)	۱۶۰۰۰۰۰۰

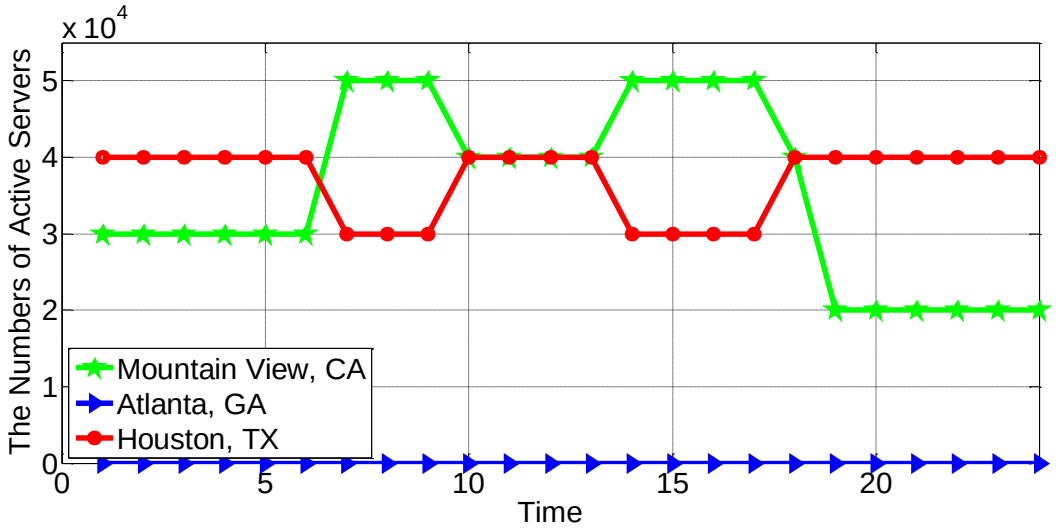
۵-۳ نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی را بررسی می‌کنیم. متغیرهای مسئله تعداد سرورهای فعال ($n_j(t)$)، نرخ انتقال حجم درخواست‌ها از سرورها رابط به مراکز داده ($\lambda_{ij}(t)$) و مقدار توان شارژ شده ($u_j(t)$) و دشارژ شده ($q_j(t)$) در باتری است.

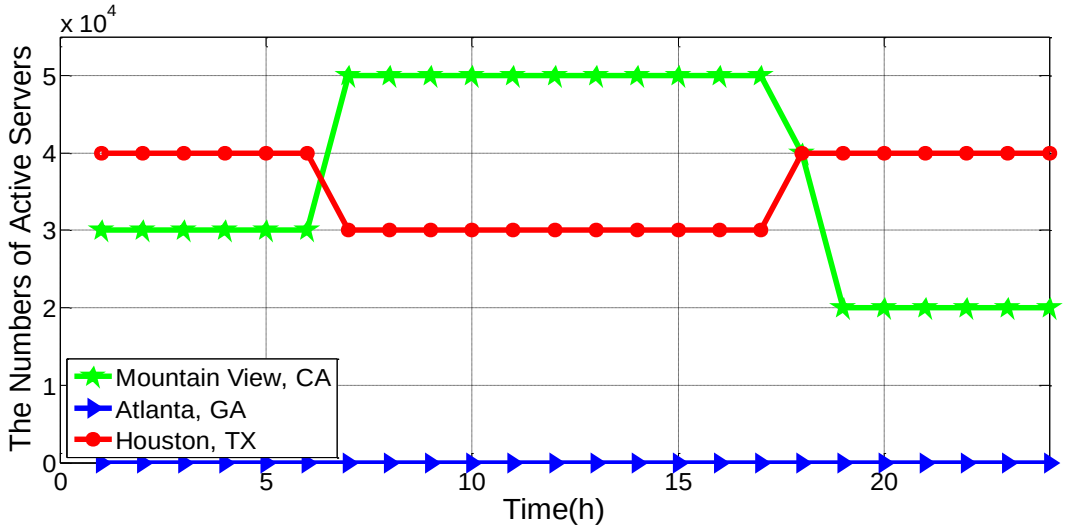
تعداد سرورهای فعال در هر مرکز داده رابطه مستقیمی با هزینه توان مصرفی دارد. در شکل ۵-۳ تعداد سرورهای فعال برای نرخ جریمه‌های مختلف رسم شده است:



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵-۳: تعداد سرورهای فعال- الف) نرخ جریمه بالا، ب) نرخ جریمه متوسط، ج) نرخ جریمه پایین

شکل ۵-۳. الف تعداد سرورهای فعال با در نظر گرفتن نرخ جریمه بالا برای عدم رعایت کیفیت سرویس‌دهی است. به همین ترتیب برای ساعت‌های مختلف طریقه توزیع حجم درخواست‌ها توضیح داده می‌شود.

۵-۳-۱ حالت نرخ جریمه بالا

ساعت‌های ۱ الی ۶:

تعداد سرورهای فعال مراکز داده در ۶ ساعت اولیه مشابه یکدیگر است. در ساعات ۱ الی ۶ قیمت برق در ایالت هوستون نسبت به مونتین ارزان‌تر است و در ایالت آتلانتا قیمت برق بالاتر از هر دو ایالت دیگر است؛ بنابراین از نظر اقتصادی به‌صرفه است تا حجم درخواست‌ها ابتدا به مرکز داده هوستون جهت پردازش انتقال یابند. ازآنجایی‌که محدودیت تأخیر نیز مشکلی برای انتقال حجم درخواست‌ها به مرکز داده هوستون و مونتین ندارد، بنابراین ابتدا حجم درخواست‌ها با نرخ $۸۰۰۰۰ J/s$ به مرکز داده هوستون انتقال می‌یابد و مابقی حجم درخواست‌ها به مرکز داده مونتین انتقال می‌یابد و مرکز داده آتلانتا غیرفعال است.

ساعت‌های ۷ الی ۹:

ترتیب قیمت برق در سه ایالت به ترتیب از پایین به بالا عبارت است از: ایالت مونتین، ایالت هوستون، ایالت آتلانتا

به دلیل اینکه انتقال حجم درخواست‌ها از سرورهای رابط به مراکز داده در این بیشتر از ۸۰ ms نیست، بنابراین مرکز داده واقع در مونتین که ارزان‌ترین قیمت برق را دارد، با تمام ظرفیت فعال است. مابقی حجم درخواست‌ها تا به مرکز داده هوستون انتقال می‌یابد و مرکز داده آتلانتا در این ساعات خاموش است.

ساعت‌های ۱۰ الی ۱۳:

در این چند ساعت، ترتیب قیمت برق در ایالت‌های مختلف از پایین به بالا عبارت است از: ایالت مونتین، ایالت هوستون و ایالت آتلانتا: انتقال حجم درخواست‌ها به مرکز داده مونتین فقط از سرور رابط ۱ انجام می‌شود، به دلیل اینکه این انتقال محدودیت تأخیر را رعایت می‌کند، در حالی که محدودیت تأخیر در انتقال حجم درخواست‌ها از سرورهای رابط دیگر به مرکز داده مونتین رعایت نمی‌شود؛ بنابراین حجم درخواست‌ها سرورهای دیگر به مرکز داده هوستون انتقال می‌یابد تا اینکه ظرفیت این مرکز داده کامل می‌شود و در صورت انتقال بیشتر حجم درخواست‌ها تأخیر صف‌بندی افزایش می‌یابد و دیگر محدودیت تأخیر رعایت نمی‌شود. به همین دلیل، مابقی حجم درخواست‌ها به مرکز داده آتلانتا انتقال می‌یابد. قیمت برق در این ایالت گران است، اما به دلیل نرخ بالای جریمه جهت عدم رعایت کیفیت سرویس‌دهی، انتقال مابقی حجم درخواست‌ها به مرکز داده آتلانتا به‌صرفه است.

ساعت ۱۴:

قیمت برق در ایالت مونتین پایین‌تر از ایالت هوستون است. همچنین قیمت برق در ایالت آتلانتا

خیلی بالاست؛ بنابراین اولویت انتقال حجم درخواست‌ها ابتدا به مرکز داده مونتین و سپس هوستون می‌باشد. تأخیر انتقال از دو سرور رابط (سرورهای ۱ و ۳) به مرکز داده مونتین کمتر از محدودیت مشخص‌شده است، بنابراین این دو سرور رابط حجم درخواست‌ها را به مرکز داده مونتین انتقال می‌دهند و دو سرور رابط دیگر به دلیل نقض کیفیت سرویس‌دهی در صورت انتقال حجم درخواست‌ها به مرکز داده مونتین، حجم درخواست‌ها را به مرکز داده هوستون انتقال می‌دهند.

ساعت‌های ۱۵ الی ۱۷:

در این ساعت‌ها، ترتیب قیمت برق از پایین به بالا عبارت است از: ایالت مونتین، ایالت هوستون و ایالت آتلانتا؛ بنابراین مرکز داده مونتین برای انتقال حجم درخواست‌ها در اولویت قرار می‌گیرد که سرورهای ۱، ۳ به‌طور کامل و سرور ۴ بخشی از درخواست‌ها را به این مرکز داده انتقال می‌دهند و سرور ۲ و باقی‌مانده حجم درخواست‌ها سرور ۴ به مرکز داده هوستون با رعایت کیفیت سرویس‌دهی انتقال می‌یابد.

ساعت‌های ۱۸ الی ۲۴:

توزیع حجم درخواست‌ها در این ساعت‌ها همانند ۶ ساعت اولیه است و کیفیت سرویس‌دهی نیز رعایت می‌شود.

حالت دوم: نرخ جریمه پایین

ساعت‌های ۱ الی ۶:

در این ساعت‌ها ترتیب قیمت برق از پایین به بالا عبارت است از: هوستون، مونتین و آتلانتا

همچنین در این ساعت‌ها محدودیت تأخیر رعایت می‌شود و ارائه‌دهندگان اینترنت برای انتقال حجم درخواست‌ها به مراکز داده‌ای که در موقعیتی با قیمت پایین واقع‌شده‌اند جریمه نمی‌شود؛ بنابراین انتقال حجم درخواست‌ها به مرکز داده هوستون در اولویت است. در این ساعت‌ها همه سرورهای مرکز داده فعال هستند و مابقی حجم درخواست‌ها به مرکز داده مونتین انتقال می‌یابد. همچنین مرکز داده آتلانتا خاموش است.

ساعت‌های ۵ الی ۱۷:

بنابراین مرکز داده مونتین اولویت در انتقال حجم درخواست‌ها قرار دارد. در ساعت‌های ۵ الی ۹، به دلیل رعایت کیفیت سرویس‌دهی در همه حالت انتقال حجم درخواست‌ها از سرورهای رابط به هر کدام از مراکز داده، مرکز داده مونتین با تمام ظرفیت خود (۵۰۰۰۰ سرور) فعال است و مابقی حجم درخواست‌ها به مرکز داده هوستون انتقال می‌یابد که ۳۰۰۰۰ سرور این مرکز داده فعال است.

اما در ساعت‌های ۱۰ الی ۱۳ انتقال حجم درخواست‌ها از سرورها ۳،۲ و ۴ به مرکز داده مونتین محدودیت تأخیر را رعایت نمی‌کنند و در صورت انجام شدن این انتقال، مالکان مرکز داده موظف به پرداخت جریمه هستند؛ اما به دلیل پایین بودن مقدار جریمه بهینه است تا این انتقال انجام شود و درخواست‌ها با قیمت برق پایین‌تر مورد پردازش قرار بگیرند.

در ساعت ۱۴ نیز همین‌طور است. در صورت انتقال حجم درخواست‌ها از سرورهای ۲ و ۴ به مرکز داده مونتین مرکز داده جریمه می‌شود، ولی به دلیل پایین بودن جریمه و قیمت برق ارزان در این منطقه، حجم درخواست‌ها به این مرکز داده انتقال می‌یابد. برای ساعت‌های ۱۵ الی ۱۷ نیز کیفیت سرویس‌دهی رعایت می‌شود و انتقال حجم درخواست‌ها به مرکز داده مونتین و هوستون مانعی ندارد.

ساعت‌های ۱۸ الی ۲۴:

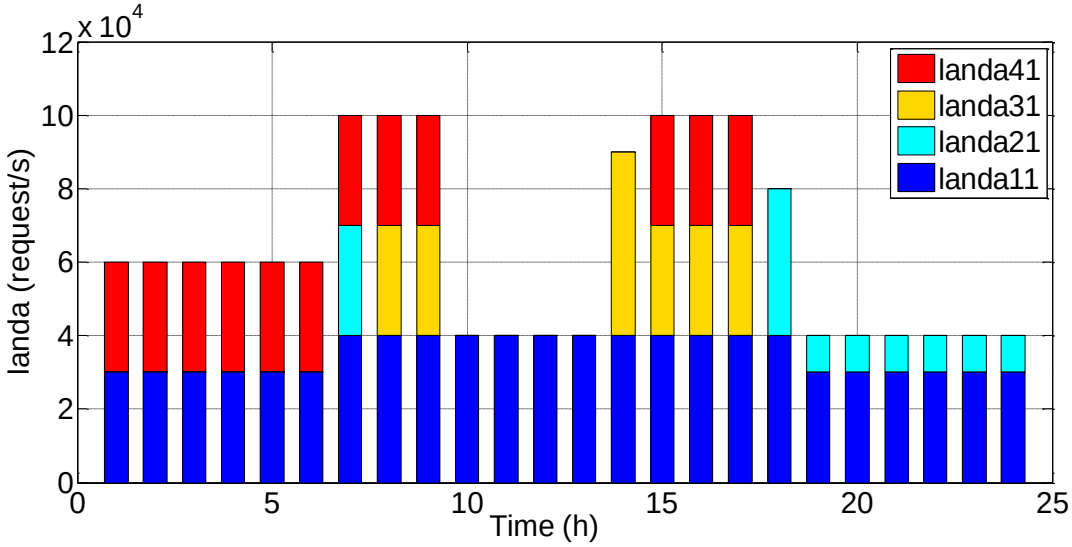
در این ساعت‌ها ترتیب قیمت و طریقه توزیع حجم درخواست‌ها مشابه ۶ ساعت اول است.

نرخ جریمه متوسط:

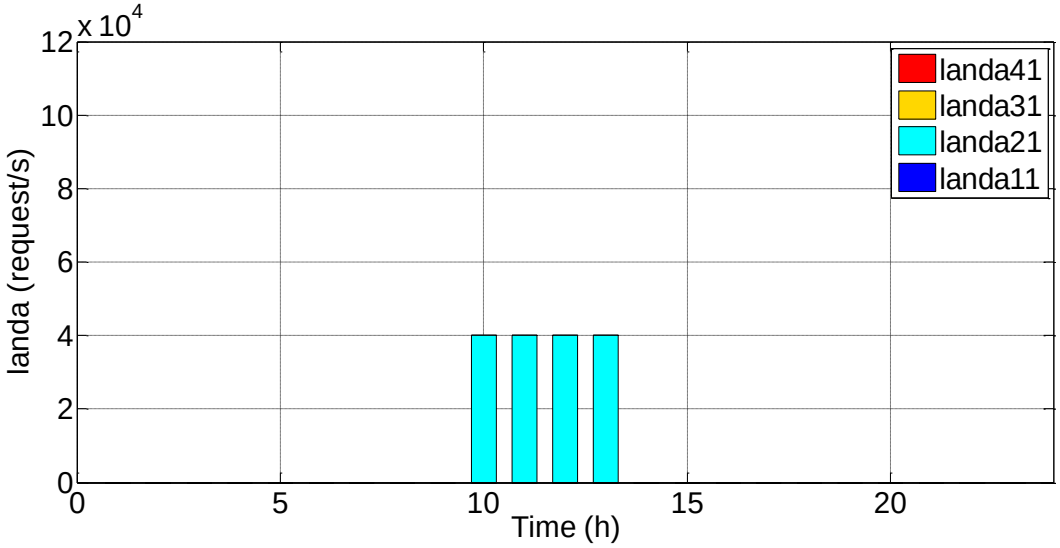
تفاوت این حالت با حالت جریمه بالا در ساعت‌های ۱۰ الی ۱۳ است. در این ساعت‌ها، سرور رابط ۱ حجم درخواست‌ها را به مرکز داده مونتین که کمترین قیمت برق را دارد، انتقال می‌دهد و سرورهای ۳ و ۴ با توجه به کمتر بودن محدودیت تأخیر از مقدار مشخص حجم درخواست‌ها را به مرکز داده هوستون انتقال می‌دهند که در نتیجه ظرفیت مرکز داده کامل می‌شود. حال سرور ۲ باقی می‌ماند که می‌تواند درخواست‌ها را به مرکز داده آتلانتا بدون نقض محدودیت کیفیت سرویس‌دهی ارسال کند، همچنین می‌تواند با قبول پرداخت جریمه حجم درخواست‌ها را به مرکز داده مونتین پرداخت کند که با توجه به اینکه نرخ جریمه بالا نیست، انتقال حجم درخواست‌ها از سرور ۲ به مرکز داده مونتین به‌علاوه پرداخت جریمه از لحاظ اقتصادی به‌صرفه است.

۵-۳-۲ توزیع حجم درخواست‌ها بین مراکز داده

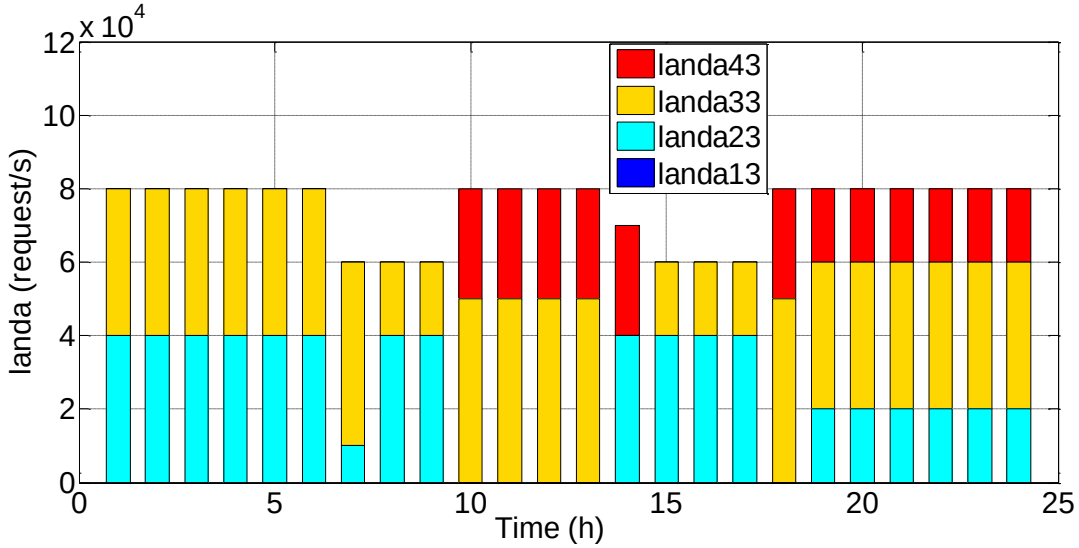
در این قسمت الگوی توزیع حجم درخواست‌ها بین مراکز داده نشان داده می‌شود. شکل ۵-۴ نرخ درخواست ارسالی از سرورهای رابط را به مراکز داده مختلف نشان می‌دهد. به‌طوری‌که در شکل۵-۴ .الف نرخ درخواست‌های ارسالی سرورهای رابط به مرکز داده مونتین و به همین ترتیب در شکل‌های شکل۵-۴. ب و ج نرخ درخواست‌های ارسالی را به مراکز داده آتلانتا و هیوستون نشان می‌دهد.


x 10^4
landa (request/s)
Time (h)
landa41
landa31
landa21
landa11

(الف)


x 10^4
landa (request/s)
Time (h)
landa41
landa31
landa21
landa11

(ب)



(ج)

شکل۵-۴: نرخ انتقال حجم درخواست‌ها از سرورهای رابط به مراکز داده ($\lambda ij(t)$)، الف) مرکز داده مونتین، ب) مرکز داده آتلانتا، ج) مرکز داده هوستون.

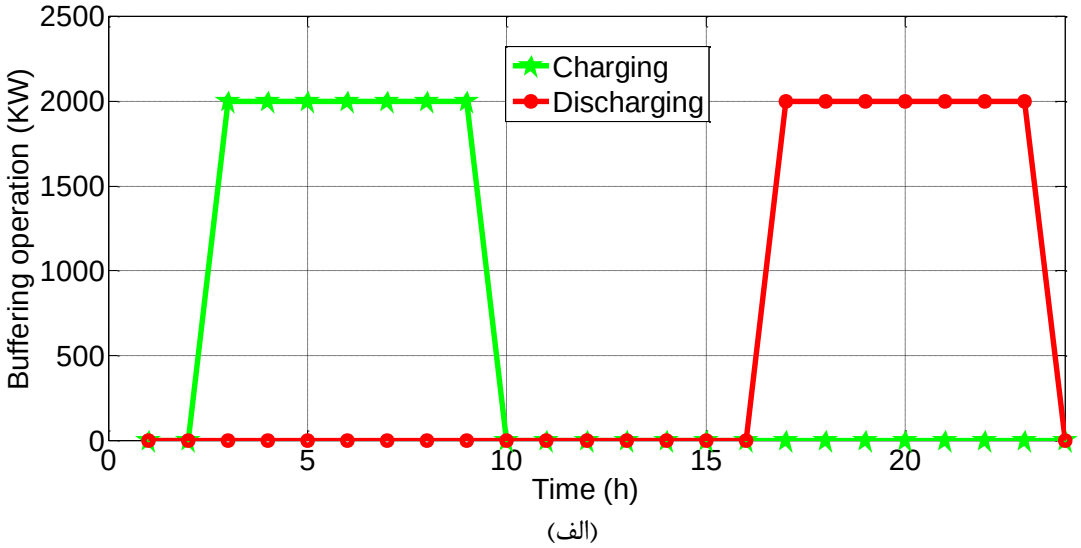
۵-۳-۳ توزیع میانگین حجم درخواست‌ها بین مراکز داده

در حالتی که کل حجم درخواست‌ها دریافتی توسط سرورهای رابط بین مراکز داده به صورت مساوی تقسیم شوند، توزیع میانگین حجم درخواست‌ها نامیده می‌شود. در این حالت با توجه به این‌که همه سرورهای مرکز داده را مشابه در نظر گرفتیم و با نرخ سرویس‌دهی یکسان، توان یکسانی مصرف می‌کنند، بنابراین توان مصرفی در حالت توزیع بهینه حجم درخواست‌ها و در حالت میانگین برابر است. در حالی با توجه به تفاوت قیمت برق در موقعیت‌ها و ساعات مختلف هزینه توان مصرفی مراکز داده در حالت توزیع بهینه به مقدار قابل توجهی کمتر از هزینه توان مصرفی در حالت توزیع میانگین است.

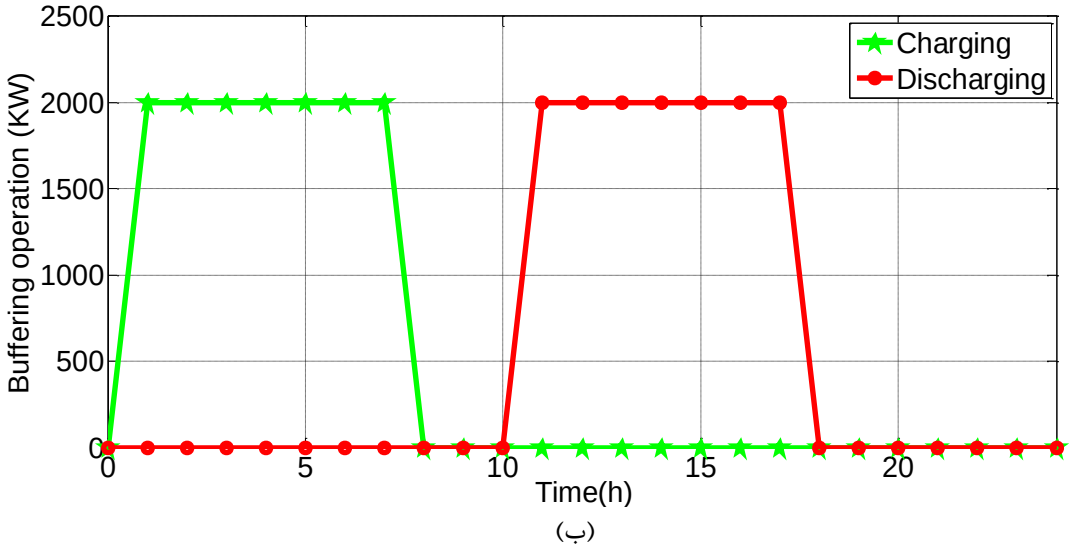
۵-۳-۴ مقدار توان شارژ و دشارژ شده در باتری

در نمودارهای قبل نتایج دو متغیر مسئله بهینه‌سازی نشان داده و به‌طور کامل تحلیل شد. حالا نتایج دو متغیر دیگر که عبارت‌اند از مقدار توان شارژ شده در باتری ($u_j(t)$) و مقدار توان دشارژ شده

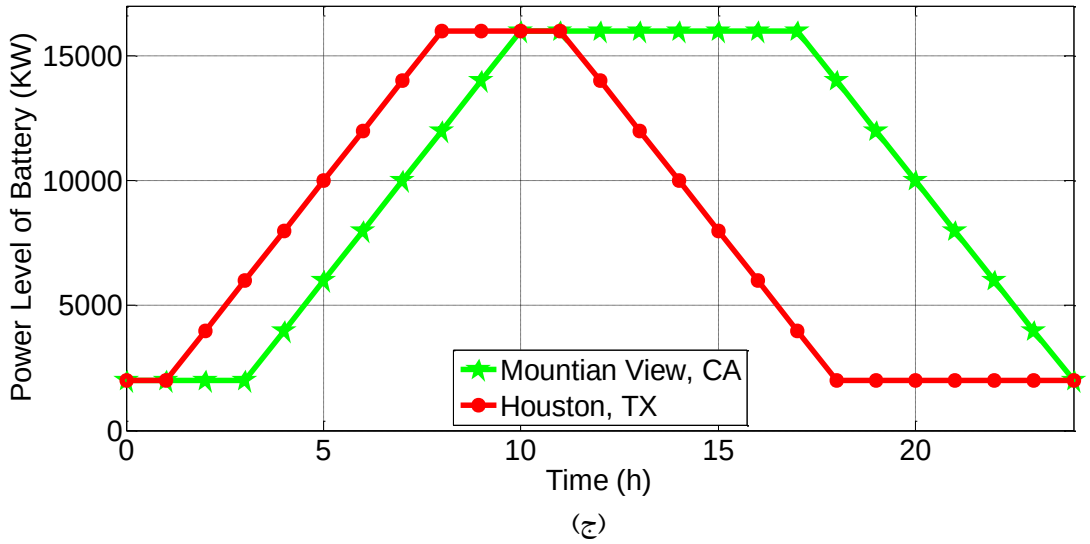
از باتری ($q_j(t)$)، در شکل‌های ۵-۵ مشاهده می‌شود. در این قسمت تأثیر قیمت باتری در الگوی شارژ و دشارژ آن بررسی می‌شود. شکل ۵-۵ الگوی شارژ و دشارژ باتری‌ها مرکز داده مونتین و هوستون را با مشخصات و قیمتی که در جدول ۵-۴ آورده شده است، نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

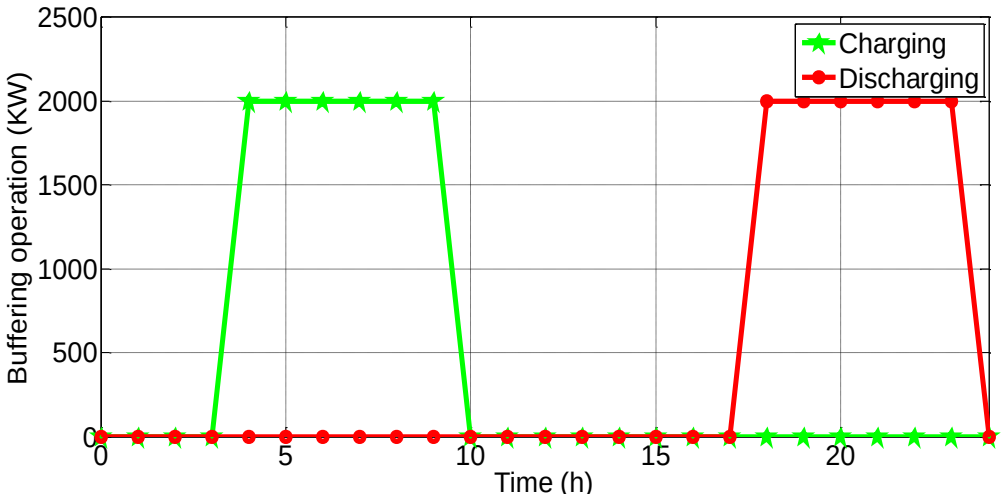


شکل۵-۵: عملیات بافری سیستم‌های ذخیره‌ساز، الف) الگوی شارژ و دشارژ باتری در مرکز داده مونتین، ب) الگوی شارژ و دشارژ در مرکز داده هوستون، ج) سطح توان باتری‌ها

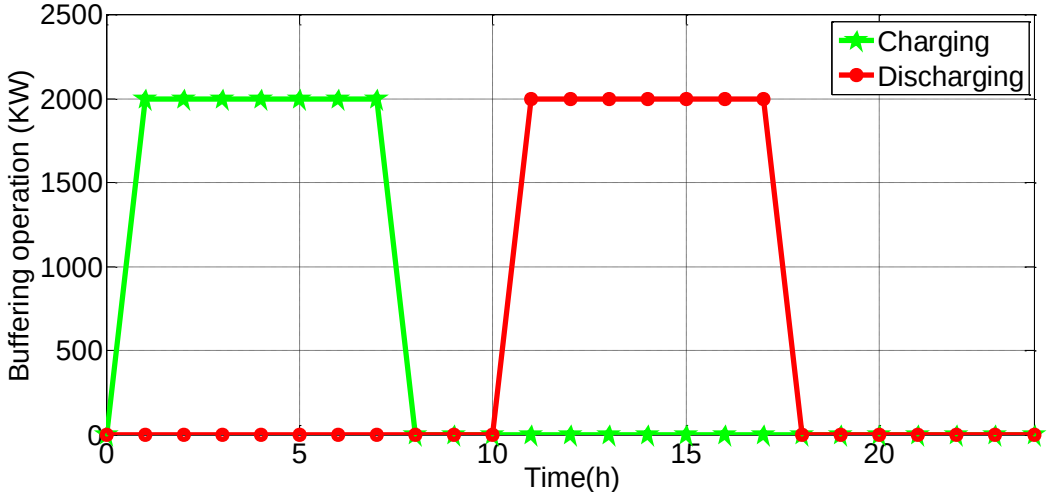
همان‌طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود، باتری در مرکز داده مونتین به دلیل ارزان بودن قیمت برق در ساعات ۳ الی ۹ شروع به شارژ می‌کند و توان ذخیره‌شده در باتری افزایش می‌یابد تا ظرفیت باتری به‌طور کامل شارژ شود. سپس باتری در ساعات ۱۷ الی ۲۳ که قیمت برق بالا است و ساعات اوج مصرف برق در آن منطقه است دشارژ می‌شود. به دلیل اینکه مراکز داده، مراکز بزرگ مصرف‌کننده‌های 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 قیمت برق پایین است، بنابراین باتری شروع به شارژ شدن می‌کند و در ساعات ۱۱ الی ۱۸ 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.

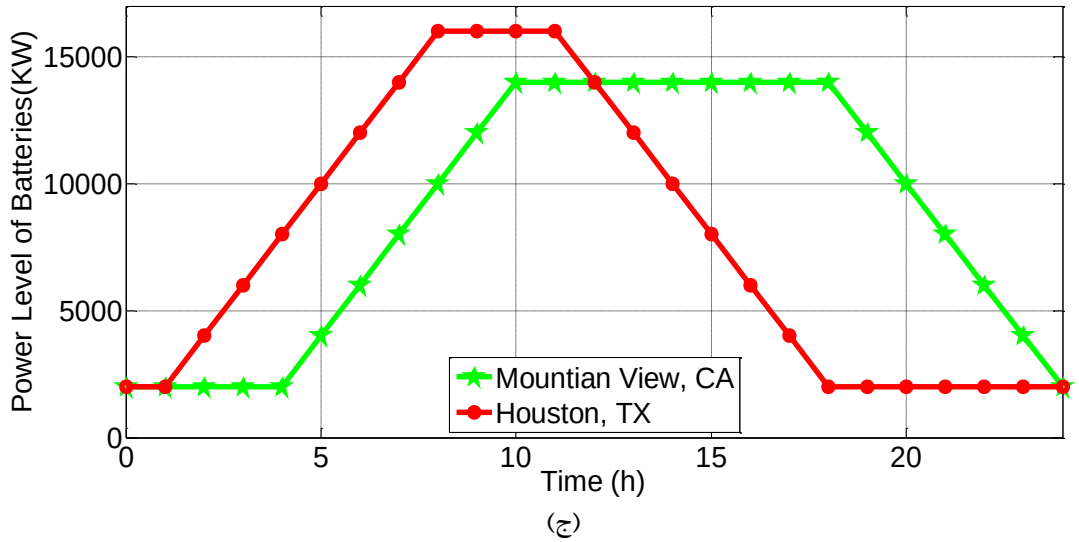
شکل۵-۵. ج، سطح توان هر دو باتری را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، کمترین مقداری که در باتری توان ذخیره‌شده است، برابر با ۲۰۰۰kw است. این مقدار توان، جهت قابلیت اعتماد سیستم برای جلوگیری از توقف عملکرد مرکز داده در صورت قطعی برق است. حال اثر تغییر قیمت برق بر الگوی شارژ و دشارژ باتری‌ها بررسی می‌شود. فرض می‌کنیم قیمت باتری برابر با ۳۰۰۰۰۰ $ باشد. الگوی شارژ و دشارژ باتری در شکل ۵-۶ نشان داده می‌شود.



(الف)



(ب)

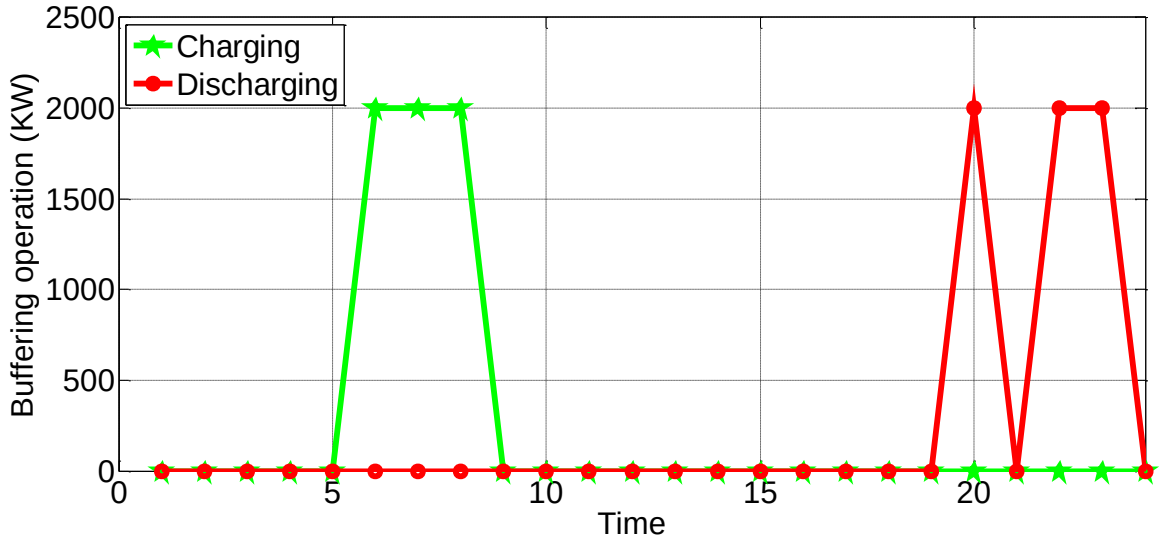


(ج)

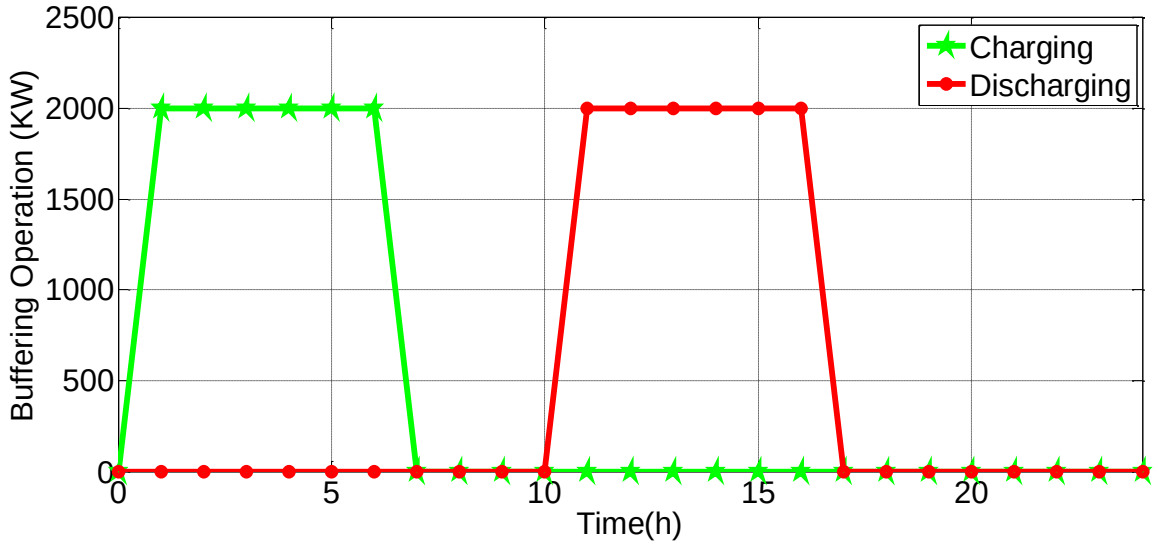
شکل۵-۶: عملیات بافری سیستم‌های ذخیره‌ساز، الف) الگوی شارژ و دشارژ باتری در مرکز داده مونتین، ب) الگوی شارژ و دشارژ در مرکز داده هوستون، ج) سطح توان باتری‌ها

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نرخ شارژ و دشارژ باتری با افزایش قیمت باتری تغییر کرد. در ایالت مونتین باتری به طور کامل شارژ نمی‌شود، در حالی که در ایالت هوستون مقدار الگوی شارژ و دشارژ باتری تغییری نکرده است. دلیل آن این است که حداقل اختلاف قیمت برق که باتری در آن ساعات شارژ و دشارژ شده است، برابر $\$/MWh$ ۱۳ است و این اختلاف در ایالت مونتین برابر $\$/MWh$ ۱۰ است؛ بنابراین با توجه به قیمت باتری و هزینه‌ای که برای یک ساعت دشارژ آن محاسبه می‌شود، شارژ و دشارژ در آن ساعات به‌صرفه نیست.

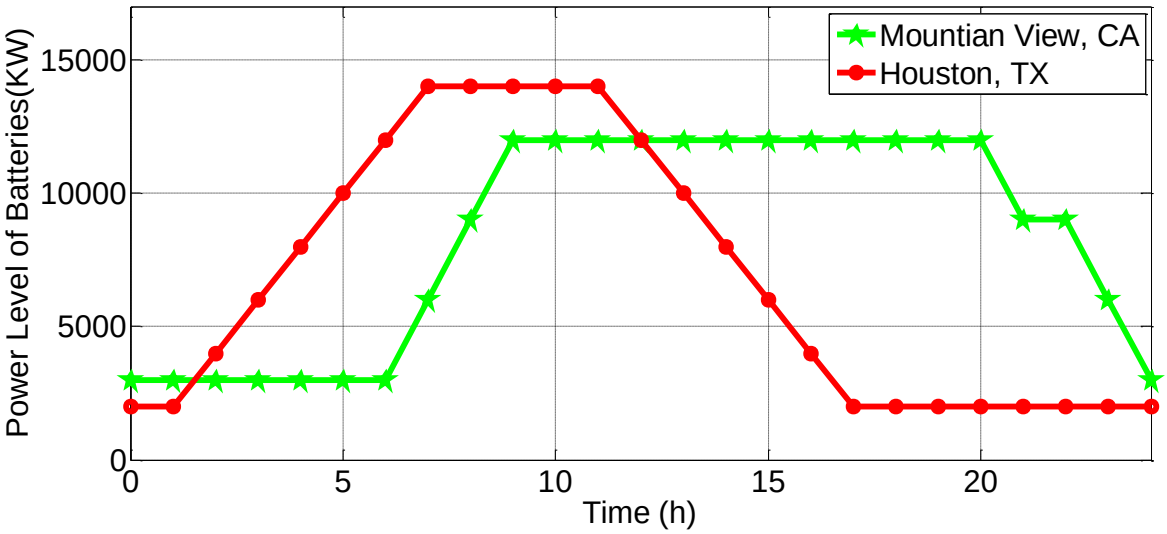
بار دیگر قیمت باتری را افزایش می‌دهیم و نتیجه را مشاهده می‌کنیم. فرض می‌شود که قیمت باتری $۴۸۰۰۰۰ است. حال نرخ شارژ و دشارژ باتری‌ها به صورت شکل مشاهده می‌شود:


Charging
Discharging
Buffering operation (KW)
2500
2000
1500
1000
500
0
0
5
10
15
20
Time

(الف)


Charging
Discharging
Buffering Operation (KW)
2500
2000
1500
1000
500
0
0
5
10
15
20
Time(h)

(ب)



(ج)

شکل۵-۷: عملیات بافری سیستم‌های ذخیره‌ساز، الف) الگوی شارژ و دشارژ باتری در مرکز داده مونتین، ب) الگوی شارژ و دشارژ در مرکز داده هوستون، ج) سطح توان باتری‌ها

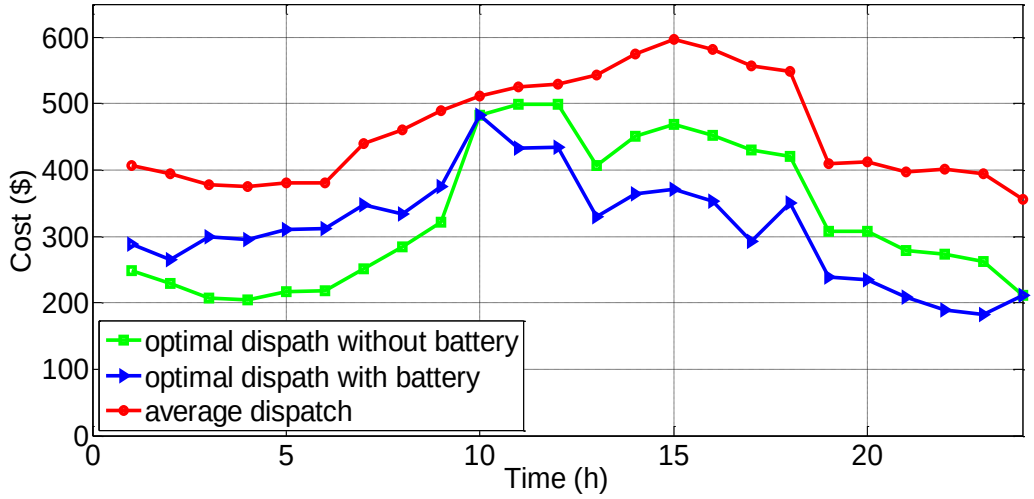
همان‌طور که در شکل‌های ۵-۷ دیده می‌شود در ایالت مونتین، فقط ۳ ساعت باتری شارژ و دشارژ می‌شود. همچنین شارژ و دشارژ باتری مرکز داده هوستون تا حداکثر ظرفیت خود شارژ نمی‌شود. دلیل آن نیز گران بودن قیمت باتری است. بر اساس فرمول ۴-۹، هزینه توان بافری در باتری به دست می‌آید که این هزینه بیشتر از کاهش هزینه مرکز داده توسط بافری انرژی در برخی ساعت‌ها، می‌باشد؛ بنابراین شارژ و دشارژ باتری فقط در همین سه ساعت در آن موقعیت از لحاظ اقتصادی به‌صرفه است. همچنین در شکل ۵-۷ در ایالت مونتین در ساعات ۷،۶ و ۸ باتری شارژ شده و در ساعات ۲۰، ۲۲ و ۲۳ دشارژ می‌شود و در ساعت ۲۱ که قیمت پایین‌تر از سه ساعت گفته‌شده است، باتری توانی به مرکز داده نمی‌دهد و سطح توان در این ساعت ثابت است.

در نهایت، از الگوی شارژ و دشارژ باتری در این حالات به این نتیجه می‌رسیم که قیمت باتری که برحسب *($/MWh)* در تابع هدف قرار گرفته است، در حالتی شارژ و دشارژ آن برای کاهش هزینه کل از لحاظ اقتصادی به‌صرفه است که هزینه توان دشارژ شده از باتری کمتر از اختلاف قیمت برق در ساعت‌هایی باشد که باتری می‌خواهد شارژ و دشارژ شود.

۵-۴ هزینه توان مصرفی

همان‌طور که در شکل ۵-۸ دیده می‌شود، توان مصرفی در ساعات اوج مصرف کاهش می‌یابد و الگوی مصرف برقی که مرکز داده به همراه باتری از شبکه دریافت می‌کنند بهبود یافته است؛ که این موضوع برای شبکه نیز بسیار مفید است.

شکل ۵-۸ مقدار هزینه کل مراکز داده را در ساعات مختلف شبانه‌روز برای سه حالت مختلف که عبارت‌اند از حالت توزیع میانگین حجم درخواست‌ها بین مراکز داده، توزیع بهینه حجم درخواست‌ها و توزیع بهینه حجم درخواست‌ها به همراه بافری انرژی را نشان می‌دهد.

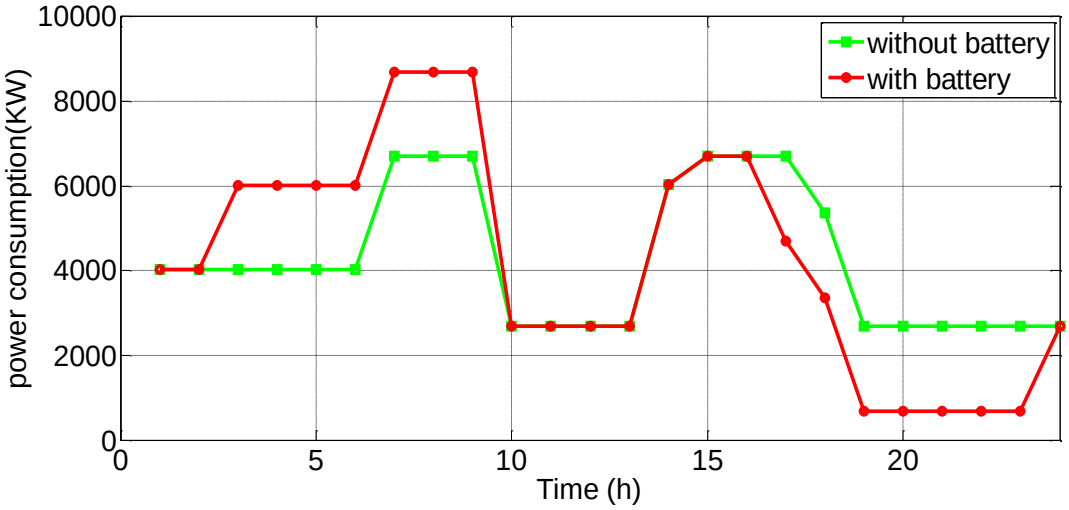


شکل۵-۸: هزینه توان مصرفی مراکز داده با حضور باتری و بدون آن

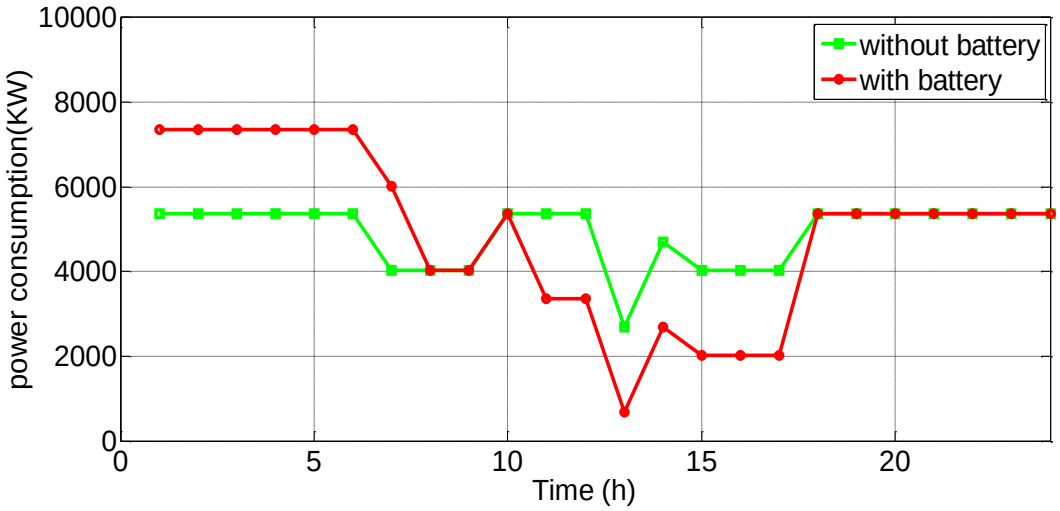
در حالتی که از توزیع میانگین حجم درخواست‌ها بین مراکز داده استفاده شود، کل هزینه در یک روز برابر ۱۱۰۴۷ $ می‌شود که رقم بسیار بالایی است. برای حالتی که توزیع حجم درخواست‌ها بهینه انجام می‌شود هزینه کل روز برابر ۷۹۳۸/۹۵ $ می‌شود و برای حالتی توزیع بهینه حجم درخواست‌ها به همراه بافری انرژی انجام می‌شود، هزینه کل روز برابر ۷۵۰۴/۸۱$ می‌شود.

در نهایت هزینه توان مصرفی در حالتی که توزیع اقتصادی حجم درخواست‌ها به همراه بافری در

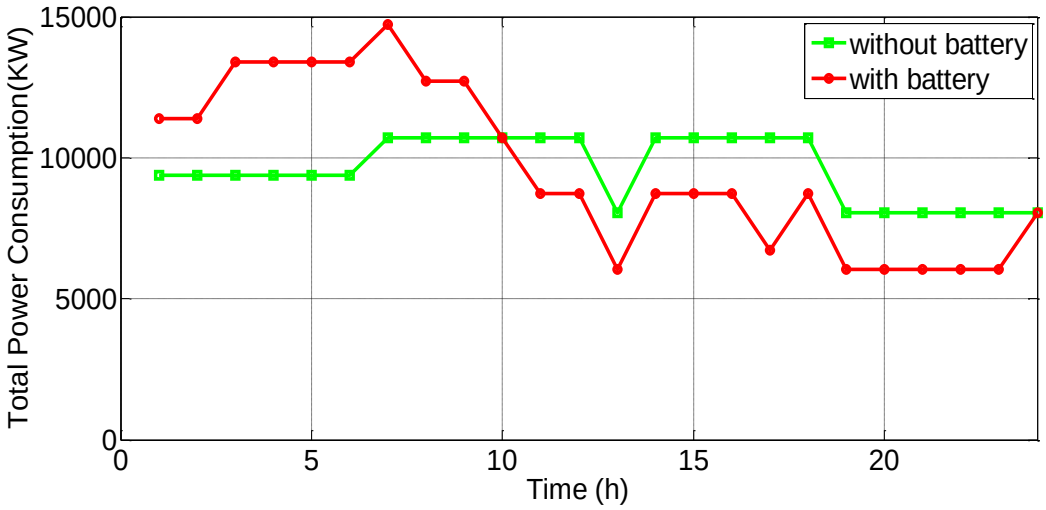
نظر گرفته شده است، نسبت به حالتی که فقط توزیع بهینه در نظر گرفته شده، ۵/۷۹٪ کاهش می‌یابد و نسبت به حالت توزیع میانگین ۳۲/۰۶٪ کاهش می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل۵-۹: توان مصرفی کل با در نظر گرفتن باتری و بدون آن، الف) توان مصرفی مرکز داده مونتین، ب) توان مصرفی مرکز داده هوستون، ج) توان مصرفی کل مراکز داده

شکل ۵-۹ توان مصرفی مراکز داده را در سه حالت نشان می‌دهد. در حالت الف توان مرکز داده مونتین در دو حالت با در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌ساز و بدون در نظر گرفتن آن 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، توان مصرفی مرکز داده هوستون در دو حالت با باتری و بدون آن را نشان می‌دهد که الگوی مصرف توان در این مرکز داده مانند مرکز داده مونتین طوری تغییر کرده است که توان مصرفی در ساعات گرانی به ساعات دیگر که قیمت برق ارزان است، شیفت یافته است. در نهایت در قسمت (ج) توان مصرفی هر سه مرکز داده را با باتری و بدون نشان داده شده است.

جدول ۵-۵: بررسی نتایج برای دو ساعت خاص

J	t	Mi	uj(t)	qj(t)	$C_{optimal}$	C_{ave}	C	Cost reduce
1	1	30011	0	0	248.05	406.46	288.6	%28.9
2	1	0	---	---				
3	1	40000	2000000	0				
J	**t**	**Mi**	**uj(t)**	**qj(t)**	$C_{optimal}$	C_{ave}	**C**	**Cost reduce**
1	13	20004	0	0	407.4768	543.1467	329.32	%39.4
2	13	20008	---	---				
3	13	40000	0	2000000				

جدول ۵-۵ نتایج به‌دست‌آمده برای دو ساعت ۱ و ۱۳ را نشان می‌دهد، در حالتی قیمت باتری مطابق با جدول ۵-۴ باشد و نرخ جریمه در صورت عدم رعایت کیفیت سرویس‌دهی بالا باشد. در ساعت یک هزینه توان مصرفی در حالت توزیع میانگین نسبت به حالتی که توزیع حجم درخواست‌ها به صورت بهینه انجام می‌شود و باتری نیز در نظر گرفته شده است، مقدار ۲۸٪ کاهش هزینه داشته است و این کاهش هزینه برای ساعت ۱۳ برابر با ۳۹٪ است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود در مرکز داده هوستون باتری در ساعت ۱ شارژ شده و در ساعت ۱۳ دشارژ می‌شود. باتری در صورتی در دو ساعت مشخص شارژ و دشارژ می‌شود که ذخیره هزینه توسط بافری انرژی به دلیل اختلاف قیمت برق در دو ساعت مشخص، بیشتر از هزینه انرژی دشارژ شده از باتری باشد.

۵-۵ خلاصه فصل

در این فصل سیستم مورد مطالعه که شامل سه مرکز داده توزیع‌شده ارائه شد که تحت بازارهای چندگانه واقع شده بودند. اطلاعات مربوط به سیستم موردنظر داده شد. به دلیل اینکه قیمت برق در

دو ایالت کالیفرنیا و تگزاس متغیر با زمان است، دو باتری با ظرفیت بالا جهت بافری انرژی برای مراکز داده مونتین و هوستون در نظر گرفته شد، در حالی که به دلیل ثابت بودن قیمت برق در ایالت جورجیا باتری در نظر گرفته شده برای مرکز داده آتلانتا فقط برای مواقع اضطراری و به عنوان UPS در نظر گرفته شده است که ظرفیت پایینی دارد. در نهایت سیستم مدل‌سازی شده در فصل چهارم، توسط نرم‌افزار تخصصی گمز بهینه‌سازی شد. در این شبیه‌سازی جریمه برای عدم رعایت کیفیت سرویس‌دهی در نظر گرفته شد که با تغییر نرخ جریمه، الگوی توزیع حجم درخواست‌ها بین مراکز داده تغییر می‌کرد. همچنین قیمت باتری استفاده‌شده جهت بافری انرژی در نظر گرفته شد. در نتیجه، هزینه توان مصرفی به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت و در نهایت الگوی مصرف نیز کاهش یافت. همچنین تعادلی بهینه بین ذخیره هزینه و هزینه باتری برقرار شد.

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱ نتیجه‌گیری

توان مصرفی بالای مراکز داده و هزینه بالای آن، موجب شد تا روشی برای کاهش این هزینه بدون کاهش کیفیت پیشنهاد شود؛ بنابراین هدف از انجام این پایان‌نامه، کاهش هزینه توان مصرفی بدون کاهش کیفیت سرویس‌دهی به همراه اصلاح الگوی توان مرکز داده است. سه مرکز داده تحت بازارهای مختلف، با قیمت برق متفاوت در نظر گرفته شد. سیاست قیمت‌گذاری برق، اصولاً به صورت متغیر با زمان به گونه‌ای است تا در ساعات اوج مصرف برق بیشترین قیمت را دارد. در ساعات کم باری در آن موقعیت جغرافیایی، قیمت برق پایین است. همچنین در این کار قیمت برق به صورت روز در اختیار مرکز داده قرار می‌گیرد؛ بنابراین می‌توان جهت کاهش هزینه توان مصرفی مراکز داده برای روز آینده برنامه‌ریزی کرد.

همچنین حجم درخواست‌ها توسط سرورهای توزیع‌کننده، بین مراکز داده توزیع می‌شوند. در این انتقال موردی که مهم است، تأخیر انتقال و صف‌بندی است که در نهایت بر اساس توافق‌نامه سطح خدمات، این مدت زمان باید کمتر از مقدار مشخصی باشد. در صورت عدم رعایت این محدودیت، مالکان مرکز داده مجبور به پرداخت جریمه هستند. این جریمه برحسب نرخ مشخصی که در توافق‌نامه قید شده است، باید پرداخت شود. حال بر اساس اهمیت پردازش حجم درخواست‌ها این نرخ می‌تواند جریمه سنگین، یا جریمه در حد متوسط و یا پایین باشد.

در این پایان‌نامه، برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار گمز استفاده شد. ابتدا سیستم به صورت ریاضی مدل‌سازی می‌شود. به دلیل اینکه نرم‌افزار گمز، در مسائل غیرخطی الزاماً جواب بهینه سراسری را نمی‌یابد و معمولاً ممکن است بهینه محلی را پیدا کند، بنابراین مسئله در ابتدا خطی سازی شد. در نهایت نتیجه شبیه‌سازی برای سه حالت جریمه به دست آمد. در حالتی که نرخ جریمه سنگین بود، اگر در انتقال حجم درخواست‌ها به مرکز داده کیفیت سرویس‌دهی رعایت نمی‌شد، به هیچ عنوان آن

انتقال صورت نمی‌گرفت. در حالی که در حالت نرخ جریمه پایین، انتقال حجم درخواست‌ها فقط بر اساس قیمت برق انجام می‌شد و هزینه پردازش حجم درخواست‌ها به مرکز داده مونتین و هوستون به‌علاوه پرداخت جریمه کمتر از انتقال حجم درخواست‌ها به مرکز داده آتلانتا می‌شد؛ به همین دلیل مرکز داده آتلانتا در طول روز خاموش بود. به همین ترتیب، الگوی توزیع حجم درخواست‌ها بین مراکز داده با تغییر نرخ جریمه تغییر کرد.

در مرحله دوم، برای دو مرکز داده‌ای که قیمت برق آن‌ها متغیر با زمان بود، یک باتری در نظر گرفته شد. قسمتی از ظرفیت باتری جهت قابلیت اعتماد سیستم استفاده می‌شود و مابقی ظرفیت جهت بافری انرژی برای کاهش هزینه برق استفاده می‌شود. با استفاده از این روش، هزینه توان مصرفی به اندازه ۵/۷۹٪ کاهش یافت و الگوی مصرف توان نیز اصلاح شد.

در این پایان‌نامه، تغییرات قیمت باتری نیز در نظر گرفته شده است. در این کار یک تعادل بین کاهش هزینه برق و قیمت باتری در نظر گرفته می‌شود. در صورت کمتر بودن قیمت باتری نسبت کاهش هزینه توسط بافری انرژی، باتری شارژ و دشارژ می‌شود و در غیر این صورت از لحاظ اقتصادی شارژ و دشارژ باتری به‌صرفه نیست. این موضوع نیز در فصل قبل با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها به وضوح مشاهده شد.

۶-۲ کارهای آینده

در این پایان‌نامه هزینه توان مصرفی مراکز داده توزیع‌شده تحت بازار برق روز قبل بهینه‌سازی شد. همچنین برای راحتی کار سرورهای مراکز داده به صورت مشابه در نظر گرفته شدند. برای ادامه کار، می‌توان قیمت برق را تحت بازار زمان حقیقی پیش‌بینی کرد و از این برنامه در شبکه هوشمند نیز بهره برد. همچنین می‌توان از سرورهای ناهمگن با فرکانس کاری و نرخ خدمت‌دهی متفاوت برای مراکز داده استفاده کرد تا برای بهینه‌سازی توان مصرفی، الگوی تخصیص حجم‌بار بین سرورهای مرکز

داده نیز اهمیت پیدا کند.

مراجع:

[١] L. Parolini, B. Sinopoli, and B. H. Krogh, *Models and Control Strategies for Data Centers in the Smart Grid*. New York: Springer, 2011.

[٢] 'Typical Uses: https://www. sites.google.com.com."

[٣] M. Wiboonrat, "An optimal data center availability and investment trade-offs," in *Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing, 2008. SNPD'08. Ninth ACIS International Conference on*, 2008, pp. 712-719.

[٤] J. Figueiredo, P. Maciel, G. Callou, E. Tavares, E. Sousa, and B. Silva, "Estimating reliability importance and total cost of acquisition for data center power infrastructures," in *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2011 IEEE International Conference on*, 2011, pp. 421-426.

[٥] E. Jaureguialzo, "PUE: The Green Grid metric for evaluating the energy efficiency in DC (Data Center). Measurement method using the power demand," in *2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 2011, pp. 1-8.

[٦] Neural Energy Consulting: http://www.neuralenergy.info/.

[٧] 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.

[٨] L. Gu, D. Zeng, A. Barnawi, S. Guo, and I. Stojmenovic, "Optimal task placement with QoS constraints in geo-distributed data centers using DVFS," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 64, pp. 2049-2059, 2015.

[٩] A. M .Al-Qawasmeh, S. Pasricha, A. A. Maciejewski, and H. J. Siegel, "Power and thermal-aware workload allocation in heterogeneous data centers," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 64, pp. 477-491, 2015.

[١٠] V. A. Chiriac and F. Chiriac, "Novel energy recovery systems for the efficient cooling of data centers using absorption chillers and renewable energy resources," in *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2012 13th IEEE Intersociety Conference on*, 2012, pp. 814-820.

[١١] Y .Gao, Z. Zeng, X. Liu, and P. Kumar, "The answer is blowing in the wind: Analysis of powering internet data centers with wind energy," in *INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE*, 2013, pp. 520-524.

[١٢] C. Chen, B. He, and X. Tang, "Green-aware workload scheduling in geographically distributed data centers," in *Cloud Computing Technology and Science (CloudCom), 2012 IEEE 4th International Conference on*, 2012, pp. 82-89.

[١٣] Z. Xu, W. Liang, and Q. Xia, "Electricity Cost Minimization in Distributed Clouds by Exploring Heterogeneity of Cloud Resources and User Demands," in *Parallel and Distributed Systems (ICPADS), 2015 IEEE 21st International Conference on*, 2015, pp. 388-395.

[١٤] 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.

[١٥] 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.

[١٦] 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.

[١٧] 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.

[١٨] N. Buchbinder, N. Jain, and I. Menache, "Online job-migration for reducing the electricity bill in the cloud," in *International Conference on Research in Networking*, 2011, pp .172-185.

[١٩] J. Li, Z. Li, K. Ren, and X. Liu, "Towards optimal electric demand management for internet data centers," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 183-192, 2012.

[٢٠] J. Li, Z. Bao, and Z. Li, "Modeling demand response capability by internet data centers processing batch computing jobs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 737-747, 2015.

[٢١] D. Xu, X. Liu, and B. Fan, "Efficient Server Provisioning and Offloading Policies for Internet Data Centers with Dynamic Load-Demand," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 64, pp. 682-697, 2015.

[٢٢] H. Wang, J. Huang, X. Lin, and H. Mohsenian-Rad, "Proactive Demand Response for Data Centers: A Win-Win Solution," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, pp. 1584-1596, 2016.

[٢٣] Y. Yao, L .Huang, A. B. Sharma, L. Golubchik, and M. J. Neely, "Power cost reduction in distributed data centers: A two-time-scale approach for delay tolerant workloads," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 25, pp. 200-211, 2014.

[٢٤] 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.

[٢٥] S. Li, M. Brocanelli, W. Zhang, and X. Wang" ,Integrated power management of data centers and electric vehicles for energy and regulation market participation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 2283-2294, 2014.

[٢٦] S. Govindan, A. Sivasubramaniam, and 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.

[٢٧] L. Yu, T. Jiang, and 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.

[٢٨] 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 Transactions on Energy Conversion*, vol. 29, pp. 978-987, 2014.

[٢٩] M. Ghamkhari and H. Mohsenian-Rad, "Energy and performance management of green data centers: A profit maximization approach," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 1017-1025, 2013.

[٣٠] 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.

[٣١] H .Lei, T. Zhang, Y. Liu, Y. Zha, and X. Zhu, "SGEESS: Smart green energy-efficient scheduling strategy with dynamic electricity price for data center," *Journal of Systems and Software*, vol. 108, pp. 23-38, 2015.

[٣٢] L. Yu, T. Jiang, Y. Cao, and Q. Qi, "Carbon-aware energy cost minimization for distributed internet data centers in smart microgrids," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, pp. 255-264, 2014.

[٣٣] H. Lei, R. Wang, T. Zhang, Y. Liu, and Y. Zha, "A multi-objective co-evolutionary algorithm for energy-efficient scheduling on a green data center," *Computers & Operations Research*, vol. 75, pp. 103-117, 2016.

[٣٤] 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.

[٣٥] How Does Depth Discharge Factor Grid Connected Battery Systems: https://www.civicsolar.com.

[٣٦] California ISO. [Online]. Available: http://www.caiso.com/.

[٣٧] Electric Reliability Council of Texas. [Online]. Available: http://www.ercot.com/mktinfo/dam./

[٣٨] Georgia Gas and Electric. [Online]. Available: http://www.georgiagasandelectric.com./

Abstract

Increasing the number of data centers around the world, their owners have been faced with the problem of high operating costs. The cost management of power consumption required for data centers has been recently paid more attention. In this thesis, we study a system that involves distributed data centers across different geographic regions under different day-ahead electricity markets. Each data center is equipped with high-capacity energy storage system. The whole system is programmed in such a way that the cost of power consumption reduces by optimal workload dispatching and optimal energy management of storage systems. The system is modeled regarding power balancing constraints, battery cost and QoS. For more practical results a penalty function is also considered in case QoS constraints are not met. Furthermore, for more accuracy the model has been extended to consider the effects of batteries' depth of discharge in the cost of energy storage. Also the problem have been linearized for comfortable solving and simulated to optimize the cost of power consumption. The results show that not only the scheme of power consumption is improved, but also the cost of power consumption is also decreased by 32% and achieve an optimal trade-off between battery cost and electricity cost saving.

Keywords: Energy management, Data center, electricity market, energy storage system, Quality of Service (QoS)

Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical Engineering and Robotic

MSc Thesis in power systems

Energy Management Using Batteries in Regulation of the Computational Workload for Distributed Data Centers

BY: Shahin Alizadeh Moghaddam

Supervisor:

Dr. Mohsen Asili

September 2016