



پردیس علوم
دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر

برنامه ریزی مصرف انرژی در کنتورهای هوشمند بر اساس نظریه بازی

نگارنده

سحر جهانی

استاد راهنما

دکتر مهدی رضا درویش زاده

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی
در رشته ریاضیات و کاربردها

تیر ماه ۱۳۹۶

چکیده

در این پروژه، روش جدیدی برای مدیریت مصرف انرژی توسط کاربر ارائه شده است. در این روش، بر خلاف روش های سابق که تنها بر روابط بین شرکت انرژی و مصرف کننده تاکید می شد، مصرف کنندگان از طریق یک شبکه محلی و با به کار گیری روش های نوین دیجیتالی با یکدیگر در ارتباطند. هم چنین مسئله بهینه سازی مصرف انرژی به صورت یک بازی مدل شده است که بازیکنان همان مصرف کننده ها و انتخاب های بازیکنان، برنامه روزانه مصرف انرژی مصرف کننده ها است. بعلاوه در این پروژه بحث شده است که چگونه اتخاذ روش قیمت گذاری مناسب باعث ایجاد انگیزه برای مصرف کنندگان به منظور برنامه ریزی مصرف انرژی با الگوریتم مطرح شده، می شود. در این پروژه، نشان داده می شود که تعادل نش بازی مدل شده همان جواب بهینه سراسری مسئله کمینه کردن هزینه انرژی است و در جواب بهینه مسئله مذکور هم، مصرف انرژی به شکل مطلوبی توزیع شده است. در این روش، حریم شخصی مصرف کنندگان حفظ می شود و نیازی به فاش کردن جزئیات برنامه مصرف انرژی شان نیست. در مدل نظریه بازی مسئله فرض کرده ایم که هر کاربر بهترین انتخاب را در پاسخ به انتخاب های دیگر بازیکنان و تعرفه ها اتخاذ می کند. در پایان نتایج شبیه سازی نشان می دهد که دیدگاه مطرح شده باعث توزیع مصرف انرژی در ساعات مختلف روز، کاهش هزینه کلی انرژی و کاهش هزینه فردی هر کاربر می شود.

پیش‌گفتار

توسعه فناوری‌ها و گسترش صنایع موجب شده است که جوامع بیش از پیش به انرژی‌های فسیلی و همچنین برق محتاج شوند. شاید اغراق نباشد اگر بگوییم بدون انرژی‌ها زندگی برای انسان‌ها بسیار سخت و دشوار و در شرایطی غیر ممکن می‌گردد. از سوی دیگر با توجه به رشد فزاینده جمعیت در سرتاسر جهان و توسعه صنعتی کشورها، نقش و جایگاه انرژی‌ها در دنیای امروز به شدت افزایش پیدا کرده است و در آینده نیز همین اهمیت صدچندان می‌گردد. در سالهای اخیر بسیاری از کشورها به دنبال کسب منابع انرژی از طرق جدید هستند که شاید موضوع تولید برق از انرژی هسته‌ای نمونه بارز آن باشد. هزینه استخراج و یا جمع‌آوری، حمل و نقل و تبدیل انرژی نیز بسیار متفاوت است. بعضی از انواع انرژی بخصوص سوخت‌های فسیلی با تکنولوژی جاری در دسترس هستند. برای انواع دیگری از انرژی مثل منابع انرژی تجدیدپذیر جدید و انواع پیشرفته نیروگاه‌های هسته‌ای (راکتورهای زاینده سریع و جوش هسته‌ای) تکنولوژی‌هایی که باید مورد استفاده قرار گیرد، تازه دوران طفولیت خود را گذرانده و هنوز در حال توسعه هستند.^۱ قیمت بالای انرژی و هزینه‌های بسیار زیاد تولید آن، رشد اقتصادی و صنعتی شدن جوامع، نیاز روزافزون کشورها به انرژی، رقابت بسیار نزدیک کشورها در کاهش هزینه‌های تولید برای حضور مستمر در بازارهای مصرف و کمبود منابع عرضه انرژی کشورها را بر آن داشته است که برای جلوگیری از مصرف بی‌رویه و غیر بهینه انرژی و کاهش هزینه‌های تولید و افزایش رفاه عمومی، سیاست‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی را اتخاذ کنند.

در اکثر روش‌های بهینه‌سازی موجود، تنها بر روابط بین شرکت انرژی و

^۱ روزنامه رسالت، شماره ۷۵۰۹ به تاریخ ۹۱/۱/۱۶، صفحه ۷ (حرف امروز)

مصرف کنندگان تمرکز شده است اما، در این پروژه روشی ارائه شده که در آن روابط بین کاربران نیز در نظر گرفته شده است که باعث می شود با الگوریتم ارائه شده، مصرف انرژی در ساعات مختلف روز توزیع گردد و نسبت peak به میانگین کاهش یابد.

فهرست مطالب

۱	ضرورت بهینه سازی مصرف انرژی	۱
۴	آشنایی با نظریه بازی	۲
۴	تاریخچه	۱.۲
۵	کاربردها	۲.۲
۷	بازی های استراتژیک	۳.۲
۷	رفتار عقلایی	۱.۳.۲
۷	ساختار بازی	۲.۳.۲
۸	تعادل نش	۳.۳.۲
۸	نتایج تعریف تعادل نش	۴.۳.۲
۱۰	برنامه ریزی مصرف انرژی بر اساس نظریه بازی	۳
۱۰	مقدمه	۱.۳
۱۴	الگوریتم سیستم	۲.۳
۱۴	سیستم برق	۱.۲.۳
۱۵	الگوریتم هزینه انرژی	۲.۲.۳
۱۶	کنترل بار مسکونی	۳.۲.۳
۱۹	مدل کردن مسئله	۳.۳
۲۰	کمینه سازی نسبت <i>peak</i> به میانگین	۱.۳.۳
۲۱	کمینه کردن هزینه انرژی	۲.۳.۳
۲۱	بازی مصرف انرژی	۴.۳
۲۲	تعرفه های قیمت گذاری و صدور صورت حساب	۱.۴.۳
۲۴	مدل بازی	۲.۴.۳
۲۵	الگوریتم توزیع شده	۵.۳
۲۵	قاعده کلی الگوریتم	۱.۵.۳

فصل ۱

ضرورت بهینه سازی مصرف انرژی

هیچ يك از اعمال انسان ، بازدهی صد درصد ندارد. از این رو استفاده بهینه و ممانعت از هدر رفتن امکانات امری اساسی است. این نکته هنگامی اهمیت بیشتری پیدا می کند که موضوع انرژی مطرح شود. منظور از بهینه سازی مصرف انرژی ، انتخاب الگوها و اتخاذ و بکارگیری روش ها و سیاست هایی در مصرف درست انرژی است که از نقطه نظر اقتصاد ملی مطلوب باشد و استمرار وجود و دوام انرژی و ادامه حیات و حرکت را تضمین کند. در این چارچوب تعیین سهم صورت های مختلف انرژی در سبد انرژی هر جامعه با توجه به امکانات درازمدت آن جامعه، همچنین بکارگیری پربازده ترین شیوه استفاده از آنها که متضمن کاهش تخریب منابع انرژی و نیز کاهش تأثیرات سوء ناشی از استفاده ناصحیح از انرژی، بر عوامل دیگر حیات و محیط زیست مدنظر است ، این استفاده درست و به جا از انرژی، نه تنها متضمن استمرار حیات و توسعه پایدار جامعه است بلکه منجر به بقاء انرژی برای همگان و نسل های آتی و مانعی برای تولید و گسترش آلودگی های زیست محیطی ناشی از مصرف نادرست انرژی خواهد بود.

احداث تأسیسات تولید انرژی الکتریکی و شبکه های برق رسانی نیاز به هزینه های زیادی دارد. هزینه احداث تأسیسات تولید و انتقال و توزیع برق برای هر کیلووات ساعت معادل ۸۰۰ دلار می باشد. علاوه بر بار مالی زمان لازم برای احداث نیروگاه ۳ تا ۸ سال است. همچنین هزینه های جاری

و ثابت سالانه نیروگاه ها گاهی بالغ بر ۲۰ درصد سرمایه گذاری اولیه می شوند. از این رو کاهش مصرف انرژی الکتریکی به میزان قابل ملاحظه ای در حفظ و بقاء سرمایه های ملی مؤثر است. با توجه به پتانسیل های صرفه جویی موجود در بخش صنعت سالانه می توان ۶۷۰ میلیارد تومان در این بخش صرفه جویی کرد. در بخش خانگی نیز می توان با بکارگیری راهکارهای استفاده بهینه از لوازم خانگی انرژی بر تا حد زیادی از اتلاف سرمایه های ملی جلوگیری کرد. لازم به ذکر است در کشور ما در خانه و مکان های تجاری، سالانه در حدود ۲۰۰ میلیون بشکه نفت خام برای تولید حرارت و سرما مصرف می شود. در صورتیکه اگر با روشهای صرفه جویی فقط ۱۰ درصد در طول سال در مصرف انرژی وسایل گرمازا و سرمازای خود صرفه جویی کنیم در حدود ۲۰ میلیون بشکه نفت خام صرفه جویی کرده ایم که ارزش این مقدار انرژی (با احتساب قیمت هر بشکه نفت خام ۲۵ دلار و هر دلار ۳۲۰۰ تومان) هزار و ششصد میلیارد تومان است. ۱ علاوه بر بار اقتصادی عوامل دیگری نیز وجود دارد که ضرورت بهینه سازی مصرف انرژی را می رساند:

- استفاده بی رویه از انرژی های فسیلی که باعث افزایش آلودگی محیط زیست می شود: وسایل حمل و نقل، نیروگاههای برق، صنایع و واحدهای گرمایش خانگی و تجاری هر ساله مقادیر بسیاری گاز و ذرات زیان آور را در هوا رها می سازند. این آلاینده ها موجب بروز انواع بیماریها و به مخاطره افکندن محیط زیست می شوند. برآورد شده است که هفتاد درصد آلودگی هوای شهر تهران ناشی از گازهای خروجی از لوله دودکش (اگزوز) خودروهاست. ۲

- بالا بودن رشد جمعیت و نیاز به تقاضای بیشتر انرژی

- محدودیت منابع انرژی به دلیل تجدیدنپذیر بودن آن: منابع شناخته شده نفت و گاز طبیعی جهان با توجه به میزان مصرف فعلی تا ۴۰ سال آینده کافی است. البته چنانچه رشد جمعیت و افزایش تقاضا نیز در محاسبات منظور شود، این ذخایر تنها برای ۱۵ سال کفایت خواهند کرد. گرچه از زغال سنگ می توان سوختهای مایع تهیه نمود و انرژی مورد نیاز جهان را تا مدتی طولانی تامین کرد، اما تاثیرات دراز مدت

^۱ www.eecm.ir

^۲ www.daneshnameh.roshd.ir

آن بر محیط زیست فاجعه آفرین است.

افزون بر اینها باید توجه داشت که این منابع محدود به آیندگان نیز تعلق دارد و کاربرد بی رویه آنها مجاز نیست. سوزاندن نفت بدترین نوع استفاده از این ماده حیاتی است. انواع مواد پلاستیک شیمیایی، کودهای کشاورزی، گازهای صنعتی و نظایر اینها، نمونه‌هایی از مشتقات نفت هستند. استفاده از این ماده در صنایع دیگر مانند پتروشیمی ارزش افزوده بسیار بیشتری دارد.

● رشد بالای مصرف انرژی به دلیل الگوی ناصحیح مصرف انرژی: در کشور ما در حدود سالانه ۶۷۰ میلیارد تومان پتانسیل برای صرفه جویی وجود دارد. علاوه بر این در کشور ما سالانه بالغ بر ۲۰۰ میلیون بشکه نفت خام برای نیازهای گرمایشی و سرمایشی مصرف می‌شود، در صورتی که اگر با مصارف بهینه فقط ۱۰٪ صرفه جویی شود سالانه معادل ۲۰ میلیون بشکه نفت خام خواهد شد که با احتساب هربشکه ۲۵ دلار و هر دلار ۳۲۰۰ تومان معادل ۱۲۰۰ میلیارد تومان خواهد شد.^۳

● عدم وجود سیستم بازیافت انرژی

● وجود صنایع و کارخانجات فرسوده

● متکی بودن اقتصاد ملی به درآمدهای نفتی: نفت در تولید کشور ما سهم ۲۲ درصدی و در صادرات کشور سهم حدود ۶۵ درصدی از کل صادرات و در درآمدهای دولت سهم ۵۰ الی ۵۵ درصدی دارد.^۴

● افزایش گازهای گلخانه‌ای و باران‌های اسیدی

برای بهینه سازی مصرف انرژی در بخش خانگی دو رویکرد وجود دارد:

۱. صرفه جویی و کاهش مصرف

۲. انتقال ساعات مصرف

در این مقاله، ما روی مورد دوم تمرکز می‌کنیم و روشی را ارائه می‌دهیم که با اجرای آن، مقدار مصرف انرژی در ساعات مختلف روز توزیع شده و باعث کاهش فشار مصرف در ساعات خاصی از روز می‌شود.

^۳ www.resekhoon.ir

^۴ www.farsnews.ir

فصل ۲

آشنایی با نظریه بازی

نظریه بازی (*Game Theory*) شاخه‌ای از ریاضیات کاربردی است که در علوم اجتماعی و به ویژه در اقتصاد، زیست‌شناسی، مهندسی، علوم سیاسی، روابط بین‌الملل، علوم کامپیوتر، بازاریابی و فلسفه مورد استفاده قرار گرفته است. نظریه بازی در تلاش است که توسط ریاضیات رفتار افراد را در شرایطی که موفقیت هر فرد وابسته به انتخاب دیگران می‌باشد، مدل کند.

یک بازی شامل مجموعه‌ای از بازیکنان، مجموعه‌ای از انتخاب‌ها و نتیجه مشخصی برای هر ترکیب از انتخاب‌ها می‌باشد. رقابت دو کشور برای دستیابی به انرژی هسته‌ای، سازوکار حاکم بر روابط بین دو کشور در حل یک مناقشه بین‌المللی، رقابت دو شرکت تجاری در بازار بورس کالا نمونه‌هایی از بازی‌ها هستند.

نظریه بازی تلاش می‌کند تا رفتار ریاضی حاکم بر یک محیط استراتژیک (تضاد منافع) را مدل‌سازی کند. این موقعیت زمانی پدید می‌آید که موفقیت یک فرد وابسته به گزینه‌هایی است که دیگران انتخاب می‌کنند. هدف نهایی این دانش یافتن انتخاب بهینه برای بازیکنان است.

۱.۲ تاریخچه

رساله ۱۹۲۱، یک ریاضی‌دان فرانسوی به نام امیل برل (*Emile Borel*) برای نخستین بار به مطالعه تعدادی از بازی‌های رایج در قمارخانه‌ها پرداخت و تعدادی مقاله در مورد آن‌ها نوشت. او در این مقاله‌ها بر قابل پیش‌بینی بودن

نتایج این نوع بازی‌ها به طریق منطقی، تأکید کرده بود. اگرچه برل نخستین کسی بود که به طور جدی به موضوع بازی‌ها پرداخت، به دلیل آن که تلاش پیگیری برای گسترش و توسعه ایده‌های خود انجام نداد، بسیاری از مورخین ایجاد نظریه بازی را نه به او، بلکه به جان فون نیومن (*John Von Neumann*) ریاضی‌دان مجارستانی نسبت داده‌اند. آنچه نیومن را به توسعه نظریه بازی ترغیب کرد، توجه ویژه او به یک بازی با ورق بود. او دریافته بود که نتیجه این بازی صرفاً با تئوری احتمالات تعیین نمی‌شود. او شیوه بلوف‌زدن در این بازی را فرمول‌بندی کرد. بلوف‌زدن در بازی به معنای راه‌کار فریب‌دادن سایر بازیکنان و پنهان کردن اطلاعات از آنها می‌باشد.

در سال ۱۹۲۸ او به همراه اسکار مونگسترن (*Oskar Morgenstern*) که اقتصاددانی اتریشی بود، کتاب تئوری بازی‌ها و رفتار اقتصادی را به رشته تحریر در آوردند. اگرچه این کتاب صرفاً برای اقتصاددانان نوشته شده بود، کاربردهای آن در روان‌شناسی، جامعه‌شناسی، سیاست، جنگ، بازی‌های تفریحی و بسیاری زمینه‌های دیگر به زودی آشکار شد. نیومن بر اساس راهبردهای موجود در یک بازی ویژه شبیه شطرنج توانست کنش‌های میان دو کشور ایالات متحده و اتحاد جماهیر شوروی را در خلال جنگ سرد، با در نظر گرفتن آن‌ها به عنوان دو بازیکن در یک بازی مجموع صفر مدل‌سازی کند. از آن پس پیشرفت این دانش با سرعت بیشتری در زمینه‌های مختلف پی گرفته شد. از جمله در دهه ۱۹۷۰ به طور چشم‌گیری در زیست‌شناسی برای توضیح پدیده‌های زیستی به کار گرفته شد.

در سال ۱۹۹۴ جان نش (*John Nash*) به همراه دو نفر دیگر به خاطر مطالعات خلاقانه خود در زمینه تئوری بازی و تعادل نش برنده جایزه نوبل اقتصاد شدند. در سال‌های بعد نیز برندگان جایزه نوبل اقتصاد عموماً از میان نظریه‌پردازان بازی انتخاب شدند.

۲.۲ کاربرد ها

نظریه بازی در مطالعه طیف گسترده‌ای از موضوعات کاربرد دارد. از جمله نحوه تعامل تصمیم‌گیرندگان در محیط رقابتی به شکلی که نتایج تصمیم هر فرد بر تصمیمات سایر افراد تاثیرگذار باشد.

در واقع ساختار اصلی نظریه بازی های متناهی در بیشتر تحلیلها شامل ماتریسی چند بعدی است که در هر بعد مجموعه ای از گزینه ها قرار گرفته اند که درآرایه های این ماتریس نتایج کسب شده برای عوامل در ازاء ترکیب های مختلف از گزینه های مورد انتظار است. یکی از اصلی ترین شرایط بکارگیری این نظریه در تحلیل محیط های رقابتی، وفاداری عوامل متعامل در رعایت منطق بازی است. تحلیل پدیده های گوناگون اقتصادی و تجاری نظیر پیروزی در یک مزایده، معامله، داد و ستد، شرکت در یک مناقصه، از مواردی است که نظریه بازی در آن نقش ایفا می کند.

پژوهش ها در این زمینه اغلب بر مجموعه ای از راهبردهای شناخته شده به عنوان تعادل در بازی ها استوار است. این راهبردها اصولاً از قواعد عقلانی به نتیجه می رسند. مشهورترین تعادل ها، تعادل نش است. براساس نظریه تعادل نش، اگر فرض کنیم در هر بازی با استراتژی مخلوط، بازیکنان به طریق منطقی و معقول راهبردهای خود را انتخاب کنند و به دنبال حداکثر سود در بازی هستند، دست کم یک راهبرد برای به دست آوردن بهترین نتیجه برای هر بازیکن قابل انتخاب است (هر بازی با استراتژی مختلط حداقل یک تعادل نش دارد) و با انتخاب راهبرد های دیگر هیچ یک از بازیکنان سود نخواهند برد.

کاربرد نظریه بازی ها در شاخه های مختلف علوم مرتبط با اجتماع از جمله سیاست، جامعه شناسی، و حتی روان شناسی در حال گسترش است. در زیست شناسی هم برای درک پدیده های متعدد، از جمله برای توضیح تکامل و ثبات و نیز برای تحلیل رفتار تنازع بقا از نظریه بازی استفاده می شود. امروزه این نظریه کاربرد فزاینده ای در منطق و دانش کامپیوتر دارد. دانشمندان این رشته ها از برخی بازی ها برای مدل سازی محاسبات و نیز به عنوان پایه ای نظری برای سیستم های چندعاملی استفاده می کنند. هم چنین این نظریه نقش مهمی در مدل سازی الگوریتم های بر خط (*Online Algorithms*) دارد. کاربردهای این نظریه تا آن جا پیش رفته است که در توصیف و تحلیل بسیاری از رفتارها در فلسفه و اخلاق ظاهر می شود.

هرگاه سود یک فرد (حقیقی یا حقوقی) تنها در گرو رفتار خود او نبوده و متاثر از رفتار یک یا چند موجودیت دیگر باشد، و تصمیمات دیگر تاثیر مثبت و منفی بر روی سود او داشته باشند، یک بازی میان دو یا چند موجودیت یاد شده شکل گرفته است.^۱

^۱ www.ihoosh.ir

۳.۲ بازی های استراتژیک

بازی های استراتژیک، به دسته ای از بازی ها گفته می شود که ”زمان” در آن ها تأثیری ندارد. به بیان دیگر در این بازی ها:

- هر بازیکن عملش را یکبار برای همیشه انتخاب می کند
- بازیکنان عملهایشان را بطور همزمان انتخاب می کنند یعنی بدون اینکه از انتخاب های دیگری اطلاع داشته باشند.

۱.۳.۲ رفتار عقلایی

اصل مبنایی نظریه بازی ها بر عقلایی بودن رفتار بازیکنان است. عقلایی بودن به این معنا است که هر بازیکن تنها در پی بیشینه کردن سود خود بوده و هر بازیکن می داند که چگونه می تواند سود خود را بیشینه کند. بنابراین می توان رفتار ایشان را بر اساس نمودار هزینه-فایده حدس زد. مانند بازی شطرنج که میتوان حدس زد که حریف بازی بلد و با تجربه چه تصمیمی خواهد گرفت.

۲.۳.۲ ساختار بازی

یک بازی استراتژیک از اجزاء زیر تشکیل می شود:

۱. یک مجموعه متناهی که مجموعه بازیکنان است (N)
۲. متناظر با هر بازیکن، یک مجموعه (از عملها) نظیر می شود (A_i)
۳. متناظر با هر بازیکن، ارجحیتهائی که روی ”مجموعه بردارهای از عملها” تعریف می شود (u_i)

پس یک بازی استراتژیک به شکل زیر نمایش داده می شود:

$$(1.2) \quad \langle N, (A_i)_{i=1}^n, (u_i)_{i=1}^n \rangle$$

که N مجموعه بازیکنان، A_i مجموعه ی عمل های بازیکن i و u_i تابع سود بازیکن i ام که وابسته به عمل های همه ی بازیکنان است.

۳.۳.۲ تعادل نش

فرض کنید $\langle N, (A_i)_{i=1}^n, (u_i)_{i=1}^n \rangle$ یک بازی استراتژیک باشد. می گوئیم:

$$a^* = (a_1^*, \dots, a_n^*) \in A = A_1 \times \dots \times A_n \quad (۲.۲)$$

یک تعادل نش برای بازی فوق است هرگاه برای هر $i \in N$:

$$u_i(a^*) \geq u_i(a_i, a_{-i}^*) \quad \forall a_i \in A_i \quad (۳.۲)$$

که در آن

$$a_{-i} = (a_1, \dots, a_{i-1}, a_{i+1}, \dots, a_n) \quad (۴.۲)$$

و u_i تابع سودی است که ارجحیت های بازیکن i -ام را نمایش می دهد.

۴.۳.۲ نتایج تعریف تعادل نش

- هر بازیکن به هنگام انتخاب عمل خود، "اعتقادی" نسبت به عمل دیگر بازیکنان در ذهن خود دارد.
- این اعتقاد برای هر بازیکن، مبتنی بر تجربیات حاصل از اجرای زیاد چنین بازی هایی است. لذا هر بازیکن می داند که رقبای او چگونه رفتار می کنند.
- گرچه هر بازیکن دارای تجربه انجام چنین بازی هایی است ولی فرض بر اینست که هر بازیکن، خود را در مقابل رفتار رقبای خاصی نمی بیند بلکه هر بازی را به عنوان یک بازی ایزوله تلقی می کند.
- تعادل نش دارای دو مولفه است:
 - هر بازیکن عملش را بر اساس مدل انتخاب عقلایی انتخاب می کند، با این فرض که اعتقادش نسبت به عمل دیگر بازیکنان داده شده باشد.
 - اعتقاد هر بازیکن راجع به عمل دیگر بازیکنان صحیح است.
- یک تعادل نش متناظر با یک "حالت ایستا" است چون هیچ بازیکنی نمی تواند انحراف سودمندانه ای داشته باشد. به عبارت دیگر، هر تعادل نش یک "نرم اجتماعی" را ترسیم می کند.

- از مولفه دوم تعادل نش نتیجه می شود که اعتقادات دو بازیکن راجع به عمل یک بازیکن سوم، یکسان است.
- تعریف تعادل نش، تضمین نمی کند که هر بازی استراتژیک دارای یک تعادل نش یا دارای حداکثر یک تعادل نش است.
- تعریف تعادل نش به منظور مدل کردن یک حالت ایستا (*Steadystate*) بین بازیکنان مجرب طراحی شده است.
- با توجه به مطالعات انجام شده در مورد "تعادل نش تجربی"، نظریه تعادل نش نسبت به واقعیت، فقط یک تقریب است و مثل همه تئوری های مفید، به طور دقیق درست نیست.

فصل ۳

برنامه ریزی مصرف انرژی بر اساس نظریه بازی

۱.۳ مقدمه

مدیریت طرف تقاضا (*DSM*) عموماً به برنامه های اجرا شده توسط شرکت انرژی برای کنترل مصرف انرژی در کنتور نزد مشتری اطلاق می شود. این برنامه ها برای استفاده کارآمدتر انرژی بدون نیاز به نصب نسل جدید زیرساخت های مخابراتی استفاده می شوند. برنامه های *DSM* شامل حفظ منابع طبیعی و برنامه های بهره وری انرژی، برنامه های جایگزینی سوخت، برنامه های واکنش تقاضا و برنامه های مدیریت بار مصرفی مسکونی یا تجاری می شود. برنامه های مدیریت بار مصرفی مسکونی معمولاً قصد دارند به یک یا هر دو هدف طراحی زیر برسند:

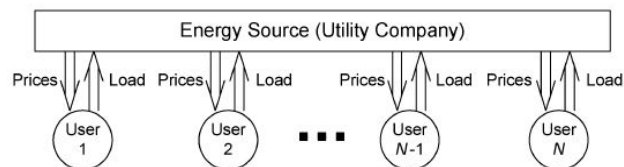
- کاهش مصرف
- انتقال مصرف

این با تشویق مصرف کنندگان به الگوهای مصرف انرژی-آگاهانه و ساخت ساختمان هایی با بازده انرژی بیشتر دست یافتنی است. اگرچه همچنان نیاز به راه حلی عملی برای انتقال مصرف دستگاه های پر مصرف خانوار به ساعت های غیر *peak* برای کاهش نسبت *peak* به میانگین (*PAR*) در بار تقاضایی وجود دارد پیش بینی می شود که انتقال بار مناسب در آینده بسیار پراهمیت است. زمانی که وسایل نقلیه دوگانه سوز برقی (*PHEV*) رایج شوند *PHEV* به ۰.۲-۰.۳ *KWh* شارژ برای یک مایل رانندگی نیاز دارند

این نشان‌دهنده بار قابل توجه جدیدی در سیستم توزیعی است به ویژه، در زمان شارژ *PHEV* ها تقریباً می‌توانند میانگین بار مصرفی خانوار را دو برابر کنند و شدیداً *PAR* بالای فعلی را افزایش دهند. به علاوه، افزایش تعداد *PHEV* ها می‌تواند باعث شرایط نامتعادلی شود که به افت کیفیت برق، مشکلات ولتاژ و حتی اگر سیستم به درستی تقویت نشده باشد، به تخریب نهانی شرکت انرژی و تجهیزات مصرف‌کننده بیانجامد.

یک دیدگاه درباره مدیریت بار مسکونی، کنترل مستقیم بار (*DLC*) است. در برنامه‌های *DLC* بر اساس توافق‌نامه‌ای بین شرکت انرژی و مشترکین، شرکت انرژی یا کامپیوترهایی که توسط شرکت انرژی مدیریت می‌شوند می‌توانند از راه دور عملکرد و انرژی مصرفی دستگاه‌هایی معینی در خانوار را کنترل نمایند. مثلاً می‌توانند روشنایی، تجهیزات حرارتی، یخچال‌ها و پمپ‌ها را کنترل کنند. اگر چه زمانی که بحث کنترل بار مسکونی و کنترل خودکار خانه‌ها مطرح می‌شود، حریم شخصی مصرف‌کننده‌ها می‌تواند یک نگرانی بزرگ و حتی مانعی برای اجرای برنامه‌های *DLC* باشد. یک جایگزین برای *DLC* قیمت‌گذاری هوشمند است که در آن مصرف‌کننده به مدیریت فردی و داوطلبانه بار تشویق می‌شود، به عنوان مثال با کاهش مصرف در ساعات پیک. از این بابت قیمت‌گذاری *peak* بحرانی (*CPP*)، قیمت‌گذاری زمان مصرف (*ToUP*) و قیمت‌گذاری زمان حقیقی (*RTP*) از گزینه‌های رایجند. برای مثال در تعرفه‌های *RTP* قیمت برق در ساعات مختلف روز متغیر است. معمولاً قیمت‌ها در طول بعد از ظهر، در روزهای گرم تابستان و در روزهای سرد زمستان بیشتر هستند.

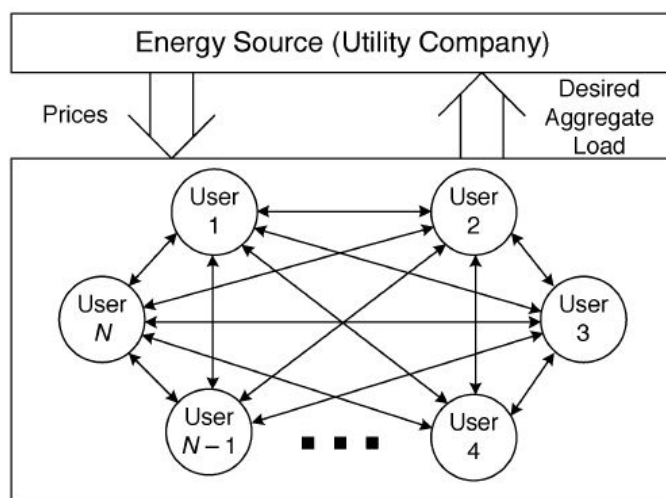
برنامه‌های *RTP* در بعضی مناطق در شمال آمریکا اتخاذ شده اند مثل شرکت برق *Illinois* در شیکاگو. علاوه بر این که معمولاً برای مصرف‌کنندگان پاسخ دستی به قیمت‌هایی که هر ساعت تغییر میکنند سخت و گیج کننده است، مشکل دیگری که *RTP* با آن مواجه است همزمانی بار است، زمانی که بخشی از بار از یک ساعت *peak* معمولی به یک ساعت غیر *peak* معمولی انتقال می‌یابد اما *PAR* کاهش قابل توجهی ندارد. در اکثر برنامه‌های *DSM* ای که در سه دهه اخیر گسترش یافته اند، تمرکز اصلی بر روابط متقابل شرکت انرژی و هر مصرف‌کننده نهایی است. برای مثال در برنامه‌های *RTP*، مصرف‌کننده نهایی انتظار می‌رود که به طور فردی بتواند به قیمت‌های متغیر با زمان، با انتقال بار مصرفی خود از ساعات با قیمت بالا به ساعات‌های با قیمت پایین پاسخ دهد. در این الگو، هر مشترک به تنهایی با منبع انرژی



شکل ۱.۳: برنامه ی DSM با تمرکز بر روابط فردی هر کاربر و شرکت انرژی

ارتباط دارد، همانگونه که در تصویر ۱.۳ نمایش داده شده است. هرچند در این مقاله ما استدلال می کنیم که این دیدگاه درباره کنترل بار مصرفی مسکونی ممکن است همیشه به بهترین جواب مسئله مصرف انرژی نرسد، در عوض به جای تمرکز بر اینکه فقط هر مشترک به تنهایی چگونه رفتار می کند، برنامه ی DSM مناسب باید صدق کردن بار مجموع در یک سری خواص مطلوب را هدف قرار دهد. به عنوان مثال، وقتی مسئله توزیع امکانات اقتصادی مطرح می شود فقط مجموع بار مصرفی در هر ساعت اهمیت دارد. همچنین PAR فقط به مجموع بار تقاضا بستگی دارد. بنابراین هرچند استفاده از واحدهای کامپیوتری برای شکل دهی بار مصرفی سودمند است، این هم مهم است که استراتژی های مدیریت بار مصرفی مسکونی کاراتری را طراحی کنیم که از طریق ممکن ساختن روابط بین مشترکین با تبادل پیام کار می کند، همانگونه که در تصویر ۲.۳ نشان داده شده است. اگر انگیزه مناسب برای مصرف کنندگان فراهم شود می توانند مصرف شان را با کاهش PAR یا کاهش هزینه انرژی متناسب کنند. با توجه به پیشرفت های اخیر در تکنولوژی های شبکه هوشمند لازم نیست که روابط متقابل بین مصرف کنندگان به صورتی دستی انجام شود بلکه می تواند به طور خودکار از طریق ارتباط دیجیتالی فراهم شود.

در این مقاله یک طرح انگیزشی برنامه ریزی مصرف انرژی برای شبکه هوشمند آینده را پیشنهاد می کنیم، ما سناریویی را مطرح میکنیم که در آن یک منبع انرژی (مثل یک ژنراتور یا یک ایستگاه کاهش ولتاژ که به شبکه متصل است) با تعدادی مشترک به اشتراک گذاشته می شود که هر مشترک مجهز به یک برنامه ریز خودکار مصرف انرژی (ECS) است.



شکل ۲.۳: برنامه ی DSM در کنتور های هوشمند با امکان رد و بدل کردن اطلاعات بین کاربران

کارکرد *ECS* در داخل کنتور های هوشمند است که نه تنها به خط برق وصل اند بلکه به یک شبکه ارتباطی هم متصل اند. کنتورهای با کارکرد *ECS* متقابلاً به طور خودکار با اجرای یک الگوریتم توزیع شده برای یافتن جدول بهینه مصرف انرژی برای هر مصرف کننده عمل می کنند. هدف بهینه سازی کمینه کردن هزینه انرژی در سیستم است. همانگونه که در تحلیل نظریه بازی می توان نشان داد، یک مکانیزم ساده قیمت گذاری می تواند برای مصرف کنندگان انگیزه همکاری را فراهم کند. کارایی کلی سیستم بهبود می یابد مصرف کننده هم کمتر هزینه می کند. به بیان دیگر از طریق یک طرح قیمت گذاری مناسب تعادل نش بازی مصرف انرژی بین کاربران شرکت کننده که یک منبع انرژی را به اشتراک گذاشتند جواب بهینه مسئله بهینه سازی کل سیستم است. در این مقاله ما نه تنها مسئله کمینه کردن هزینه انرژی بلکه مسئله کمینه سازی *PAR* در بار کلی را هم در نظر می گیریم. از این بابت ما ارتباط بین دو مسئله را هم توضیح می دهیم و تحلیل نظریه بازی ما در این مقاله شامل بحث های جدید در ویژگیهای ایجاد انگیزه الگوریتم مطرح شده است. یعنی توانایی بازداشتن مصرف کننده ها از تقلب و فریب

دادن بقیه در روابط متقابل. در نهایت نتایج شبیه سازی در این مقاله وسیع و دارای تخمین دقیق از ویژگی های همگرایی و بهینگی الگوریتم مطرح شده ماست که درک بهتر رابطه بین PAR در کل بار تقاضایی و PAR هر مصرف کننده به طور فردی را فراهم می آورد و تاثیر تغییرات تعداد دستگاه ها را در برنامه ریزی مصرف انرژی مشخص می کند.

در ادامه ما الگوی سیستم را معرفی می کنیم، سپس کمینه سازی PAR و هزینه انرژی فرموله می شوند. بازی های مصرف انرژی در بخش بعدی بیان شده اند. سپس الگوریتم توزیع شده ی DSM ارائه شده است. در بخش بعد نتایج شبیه سازی مقایسه می شود و مقاله در بخش آخر جمع بندی شده است. همه برهان های آنالیزی در پیوست خلاصه شده اند.

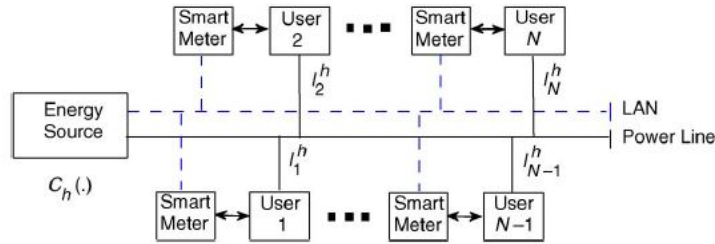
۲.۳ الگوی سیستم

در این بخش توضیحات آنالیزی برای نمایش سیستم برق، هزینه انرژی و کنترل بار مسکونی فراهم شده است. بر اساس این تعاریف دو مسئله طراحی را در بخش بعد فرموله می کنیم.

۱.۲.۳ سیستم برق

یک سیستم هوشمند برق با چندین مصرف کننده بار و یک منبع انرژی را در نظر بگیرید مثلاً یک ژنراتور یا ایستگاه کاهش ولتاژ که به شبکه متصل است. دیاگرام بلوکی این شبکه توزیع قدرت در تصویر ۳.۳ نشان داده شده است. ما فرض میکنیم که هر مشتری مجهز به کنتور هوشمندی است که قابلیت برنامه ریزی برای مصرف خانوار را داراست. کنتورهای هوشمند، همگی به خط برقی که از منبع انرژی می آید، متصلند. همچنین با یکدیگر و منبع انرژی از طریق شبکه محلی (LAN) در ارتباط اند. همه ارتباطات بین شرکت انرژی و کنتورهای هوشمند مشتری ها و همه پیام های رد و بدل شده بین کنتورهای هوشمند از طریق LAN با پروتکل های ارتباطی مناسب انجام می شود.

در کل این مقاله، \aleph نشانگر مجموعه مصرف کنندگان است که $N = |\aleph|$ تعداد مصرف کننده هاست. برای هر مشتری $n \in \aleph$ ، تعریف می کنیم l_n^h به



شکل ۳.۳: نمایش بلوکی سیستم شبکه هوشمند که از یک منبع انرژی، کاربران، خط توزیع انرژی و یک شبکه محلی ارتباطی تشکیل شده است.

معنی کل بار در ساعت h است که $h \in H = \{1, \dots, \bar{h}\}$ و $\bar{h} = 24$. بدون کاستن از کلیت، که زمان گسستگی یک ساعته دارد. بار روزانه مصرف کننده n به صورت $I_n = [l_n^1, \dots, l_n^{\bar{h}}]$ تعریف می شود. بر اساس این تعاریف، بار کلی برای همه مصرف کننده ها در هر ساعت $h \in H$ به این شکل محاسبه می شود:

$$L_h = \sum_{n \in \mathbb{N}} l_n^h \quad (1.3)$$

$peak$ روزانه و میانگین سطوح بار به ترتیب به شکل

$$L_{peak} = \max_{h \in H} L_h \quad (2.3)$$

$$L_{avg} = \frac{1}{\bar{h}} \sum_{h \in H} L_h \quad (3.3)$$

محاسبه می شوند. بنابراین PAR در بار تقاضایی بدین صورت است:

$$PAR = \frac{L_{peak}}{L_{avg}} = \frac{\bar{h} \max_{h \in H} L_h}{\sum_{h \in H} L_h} \quad (4.3)$$

۲.۲.۳ الگوی هزینه انرژی

ما تابع هزینه $C_h(L_h)$ که نمایش دهنده هزینه تولید یا توزیع برق منبع انرژی در هر ساعت $h \in H$ را تعریف می کنیم. در حالت کلی، هزینه بار یکسان در ساعات مختلف روز می تواند متفاوت باشد. به طور خاص هزینه می تواند

در شب در مقایسه با روز، کمتر باشد. به علاوه ما فرض های زیر را در این مقاله در نظر میگیریم:

فرض ۱

توابع هزینه صعودی اند. یعنی برای هر $h \in H$ نامعادله زیر برقرار است:

$$C_h(L_h^1) < C_h(L_h^2) \quad \forall L_h^1 < L_h^2 \quad (5.3)$$

فرض ۲

توابع هزینه اکیداً محدب اند. یعنی برای هر عدد حقیقی $L_h^1, L_h^2 \geq 0$ و هر عدد حقیقی $0 < \theta < 1$ داریم:

$$C_h(\theta L_h^1 + (1 - \theta)L_h^2) < \theta C_h(L_h^1) + (1 - \theta)C_h(L_h^2) \quad (6.3)$$

مثال جالبی برای توابع هزینه واقعی ای که در فرض های ۱ و ۲ صدق کنند، توابع هزینه درجه ۲ برای مولد های حرارتی به شکل

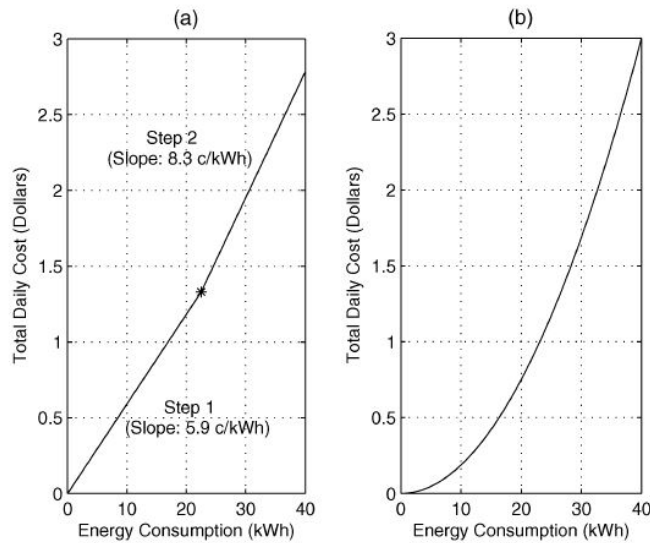
$$C_h(L_h) = a_h L_h^2 + b_h L_h + c_h \quad (7.3)$$

هستند که $a_h > 0$ ، $b_h, c_h \geq 0$ برای هر $h \in H$.

لازم به ذکر است که توابع هزینه ای که ما در این مقاله در نظر میگیریم، هم نشان دهنده هزینه واقعی انرژی مثلاً برای مولدهای حرارتی و هم نشان دهنده تعرفه های مصنوعی هزینه که شرکت انرژی برای کنترل مناسب بار به کار می برد، می باشد. برای مثال، Hydro (BC) Columbia British در کانادا مدل محدب تابع هزینه به شکل تابع دو تکه ای قطعه ای خطی را اتخاذ کرده است تا به حفاظت از انرژی تشویق کرده باشد، همانگونه که در تصویر ۴.۳a. نشان داده شده است. یک تابع هزینه درجه ۲ هموارتر هم در تصویر ۴.۳b. نشان داده شده است که برای منظور بهینه سازی، خوش فرم تر است.

۳.۲.۳ کنترل بار مسکونی

برای هر مصرف کننده A_n ، $n \in \mathbb{N}$ را مجموعه دستگاه های خانوار مثل ماشین لباسشویی، یخچال، ماشین ظرفشویی، دستگاه تهویه هوا، PHEV و ... قرار



شکل ۴.۳: دو نمونه تابع هزینه محدب و صعودی: (a) تابع دو قسمتی استفاده شده در شرکت Hydro BC؛ (b) تابع هزینه درجه ۲

می دهیم. برای هر دستگاه $a \in A_n$ ، بردار برنامه ریزی مصرف انرژی را به این شکل تعریف می کنیم:

$$x_{n,a} = [x_{n,a}^1, \dots, x_{n,a}^h] \quad (۸.۳)$$

که اسکالر $x_{n,a}^h$ مصرف انرژی برنامه ریزی شده در ساعت h برای دستگاه a توسط مصرف کننده n را نشان می دهد. به وضوح، بار کلی مصرف کننده n از طریق

$$l_n^h = \sum_{a \in A_n} x_{n,a}^h \quad h \in H \quad (۹.۳)$$

به دست می آید.

در طراحی ما همانطور که در تصویر ۵.۳ نشان داده شده است، وظیفه تابع ECS در کنتور هوشمند مصرف کننده n ، انتخاب بهینه بردار مصرف انرژی $x_{n,a}$ برای هر دستگاه a است. طبق ۹.۳ این صورت بار مصرفی مصرف کننده n ام را تشکیل می دهد. سپس انتخاب های شدنی بردارهای برنامه ریزی مصرف انرژی را بر اساس نیازهای مصرف کننده تشخیص می دهیم.

برای هر مصرف کننده $n \in \mathbb{N}$ و هر دستگاه $a \in A_n$ ، $E_{n,a}$ را به عنوان مصرف کلی روزانه انرژی مشخص می کنیم. مثلاً $E_{n,a} = 16kWh$ برای یک $PHEV$ معادل روزانه ۴۰ مایل رانندگی است. در این مقاله، برنامه ریز مصرف انرژی طراحی شده ما، قصد ندارد مقدار مصرف انرژی را کاهش دهد بلکه می خواهد به شکل اصولی آن را مدیریت کرده و انتقال دهد، مثلاً به منظور کاهش PAR یا کمینه کردن هزینه انرژی. در این حالت، مصرف کننده باید زمان شروع $\alpha_{n,a} \in H$ و زمان پایان $\beta_{n,a} \in H$ که بازه زمانی ای است که دستگاه a می تواند برنامه ریزی شود را، مشخص کند. به وضوح $\alpha_{n,a} < \beta_{n,a}$ مثلاً یک مصرف کننده ممکن است $\alpha_{n,a} = 11PM$ و $\beta_{n,a} = 8AM$ را برای شارژ و آماده کردن $PHEV$ اش قبل از رفتن به سر کار، انتخاب کند. این موضوع محدودیت هایی را برای بردار $x_{n,a}$ ایجاد می کند. در حقیقت بازه زمانی که دستگاه a می تواند برنامه ریزی کند با انرژی مصرفی روزانه مورد نیاز که از قبل تعیین شده، برابر است، یعنی

$$\sum_{h=\alpha_{n,a}}^{\beta_{n,a}} x_{n,a}^h = E_{n,a} \quad (10.3)$$

و

$$x_{n,a}^h = 0, \quad \forall h \in H \setminus H_{n,a} \quad (11.3)$$

که $H_{n,a} = \{\alpha_{n,a}, \dots, \beta_{n,a}\}$. برای هر دستگاه، بازه زمانی مقرر شده توسط مصرف کننده، لازم است که بزرگتر یا مساوی زمان لازم برای اتمام این عملیات باشد. به عنوان مثال، برای یک $PHEV$ زمان نرمال شارژ ۳ ساعت است، بنابراین لازم است که $\beta_{n,a} - \alpha_{n,a} > 3$ باشد. همچنین از ۱۰.۳ و ۱۱.۳ داریم که کل انرژی مصرف شده به وسیله همه دستگاه ها در سیستم در ۲۴ ساعت برابر با مجموع انرژی مصرفی روزانه دستگاه ها است. این یعنی، ما همواره رابطه متوازن انرژی زیر را داریم:

$$\sum_{h \in H} L_h = \sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{a \in A_n} E_{n,a} \quad (12.3)$$

در کل، عملکرد برخی دستگاه ها از نظر زمانی قابل انتقال نیست و ممکن است محدودیت های برنامه ریزی مصرف انرژی مستقیم داشته باشند. برای مثال، یک یخچال ممکن است لازم باشد که همواره روشن بماند در این

حالت، $\alpha_{n,a} = 1$ و $\beta_{n,a} = 24$. همانطور که در تصویر ۵.۳ نشان داده شده، عملکرد ECS در کنتور های هوشمند در اصل هیچ تاثیری بر برنامه ریزی مصرف انرژی برای دستگاه های خانوار که غیر قابل انتقال اند، ندارد. ما کمترین میزان مصرف را با $\gamma_{n,a}^{min}$ و بیشترین میزان مصرف را با $\gamma_{n,a}^{max}$ برای هر دستگاه $a \in A_n$ و برای هر مصرف کننده $n \in \mathbb{N}$ نشان می دهیم. مصرف standby به معنی میزان مصرف انرژی برای هر دستگاه در زمانی است که خاموش است یا در حالت standby قرار دارد. فرض می کنیم که

$$\gamma_{n,a}^{min} \leq x_{n,a}^h \leq \gamma_{n,a}^{max} \quad \forall h \in H_{n,a}. \quad (۱۳.۳)$$

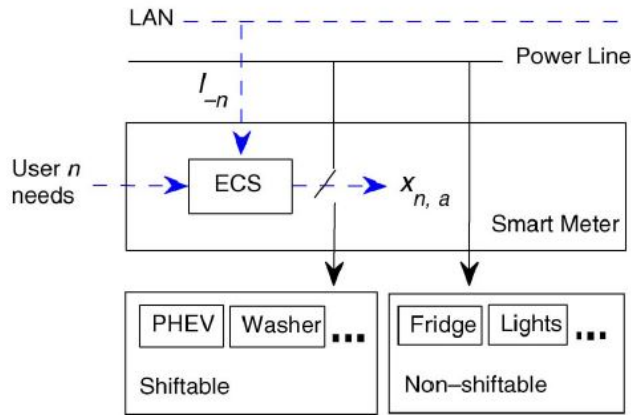
برای سادگی نمادگذاری، برای هر مصرف کننده n ، بردار x_n را معرفی می کنیم که از جمع کردن بردارهای برنامه ریزی مصرف انرژی $x_{n,a}$ برای همه دستگاه های $a \in A_n$ به دست آمده است. در این خصوص مجموعه شدنی برنامه ریزی مصرف انرژی مصرف کننده n را می توان به شکل زیر تعریف کرد:

$$X_n = \left\{ x_n \mid \sum_{h=\alpha_{n,a}}^{\beta_{n,a}} x_{n,a}^h = E_{n,a}, \quad x_{n,a}^h = 0, \quad \forall h \in H \setminus H_{n,a} \right. \\ \left. \gamma_{n,a}^{min} \leq x_{n,a}^h \leq \gamma_{n,a}^{max}, \quad \forall h \in H_{n,a} \right\}. \quad (۱۴.۳)$$

برنامه محاسبه شده توسط واحد ECS در کنتور مصرف کننده n تنها زمانی معتبر است که $x_n \in X_n$. حال آماده ایم که مسائل گوناگون بهینه سازی مصرف انرژی را در کنتور هوشمند فرموله کنیم.

۳.۳ مدل کردن مسئله

در این بخش، دو مسئله بهینه سازی بر اساس دو هدف طراحی رایج در سیستم توزیع برق مدل می کنیم: کمینه کردن PAR و کمینه کردن هزینه انرژی. ما نشان می دهیم وابسته به انتخاب تابع هزینه، این دو مسئله می توانند با هم ارتباط داشته باشند.



شکل ۵.۳: عملکرد کنتور هوشمند در طراحی ما با قابلیت ECS

۱.۳.۳ کمینه سازی نسبت $peak$ به میانگین

با کمک روابط ۱.۳، ۹.۳، ۱۰.۳، ۱۱.۳ و ۴.۳ PAR را بر حسب متغیرهای برنامه ریزی مصرف انرژی یعنی بردارهای x_1, \dots, x_n بازنویسی می کنیم:

$$\frac{\hbar \max_{h \in H} (\sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{a \in A_n} x_{n,a}^h)}{\sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{a \in A_n} E_{n,a}} \quad (15.3)$$

به طور کلی، PAR کم ارجحیت دارد. بنابراین با داشتن اطلاعات کامل درباره نیازهای مصرف کنندگان و کنتور هوشمند نشان داده شده در تصویر ۳.۳، یک برنامه ریزی مصرف انرژی کارا می تواند با جواب مسئله زیر مشخص شود:

$$\minimize_{x_n \in X_n, \forall n \in \mathbb{N}} \frac{\hbar \max_{h \in H} (\sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{a \in A_n} x_{n,a}^h)}{\sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{a \in A_n} E_{n,a}} \quad (16.3)$$

سپس چون \hbar و $\sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{a \in A_n} E_{n,a}$ ثابت اند و متغیرهای بهینه سازی x_1, \dots, x_N اهمیت دارند، می توان آن ها را از تابع هدف حذف کرد و ۱۶.۳ را به شکل مسئله معادل زیر، بازنویسی کرد:

$$\minimize_{x_n \in X_n, \forall n \in \mathbb{N}} \max_{h \in H} (\sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{a \in A_n} x_{n,a}^h) \quad (17.3)$$

اگرچه حل کردن مسئله فعلی ۱۷.۳ به دلیل شرط max در تابع هدف سخت است. این مسئله می تواند با معرفی متغیر کمکی Γ به صورت مسئله معادل زیر بازنویسی شود:

$$\begin{aligned} & \text{minimize}_{\Gamma, x_n \in X_n, \forall n \in \mathbb{N}} \Gamma \\ & \text{subject to } \Gamma \geq \sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{a \in A_n} x_{n,a}^h, \quad \forall h \in H \end{aligned} \quad (18.3)$$

مسئله ۱۸.۳ یک مسئله برنامه ریزی خطی است که با یکی از روش های متمرکز الگوریتم سیمپلکس یا نقطه درونی (IPM) می تواند حل شود. همچنین لازم به ذکر است که ۱۸.۳ ممکن است بیش از یک جواب بهینه داشته باشد که یعنی PAR کمینه یکسان در کل بار تقاضایی از طریق برنامه های مختلف مصرف انرژی قابل دستیابی است.

۲.۳.۳ کمینه کردن هزینه انرژی

یک برنامه ریزی مصرف انرژی کارا همچنین می تواند بر حسب کمینه کردن هزینه انرژی برای مصرف کنندگان مدل سازی شود که به شکل مسئله بهینه سازی زیر بیان می شود:

$$\text{minimize}_{x_n \in X_n, \forall n \in \mathbb{N}} \sum_{h=1}^{\bar{h}} C_h \left(\sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{a \in A_n} x_{n,a}^h \right). \quad (19.3)$$

مسئله بهینه سازی ۱۹.۳ محدب است و می تواند با یکی از روش های متمرکز الگوریتم سیمپلکس یا نقطه درونی (IPM) حل شود. از آنجایی که توابع هزینه اکیداً محدب فرض شده اند، مسئله کمینه سازی ۱۹.۳ وابسته به انتخاب تابع هزینه، همیشه یک جواب یکتا خواهد داشت. این یکی از تفاوت های مسئله کمینه سازی هزینه انرژی و کینه سازی PAR است. یاد آوری می کنیم که مسئله قبلی می توانست چندین جواب بهینه داشته باشد.

۴.۳ بازی مصرف انرژی

اگرچه مسائل بهینه سازی که در بخش قبل معرفی شد می تواند از طریق روش های متمرکز حل شود و برای مصرف کنندگان و برنامه های انرژی شان به جواب بهینه برسد، به صرفه تر است که روشی برای رسیدن به جواب

معرفی کنیم که به طور مستقل اجرا و به روز رسانی شود و با تغییرات درون سیستم وفق پیدا کند. به همین دلیل، تمایل داریم که مسئله ۱۹.۳ را به روش توزیع شده در کنتور های هوشمند با کارکرد ECS و با حداقل اطلاعات رد و بدل شونده بین کنتور ها و منبع انرژی حل کنیم. به خصوص، هدف این است که به هر کنتور هوشمند با کارکرد ECS اجازه دهیم که مصرف انرژی هر خانوار را با توجه به نیازهای مصرف کنندگان برنامه ریزی کند. هم چنین مهم است که مطمئن شویم کاربران عملاً انگیزه کافی برای بهره مندی از خواص ECS و پیروی از جدول های برنامه ریزی که معین می کنند را، دارا هستند. ما بر مسئله کمیته سازی هزینه انرژی تمرکز می کنیم. با این حال، در بخش بعد، خواهیم دید که با رسیدن به کمترین هزینه، به PAR کم در کل بار تقاضایی هم دست خواهیم یافت.

۱.۴.۳ تعرفه های قیمت گذاری و صدور صورت حساب

برای هر کاربر $n \in \mathbb{N}$ ، b_n را مقدار هزینه روزانه ای که کاربر n به شرکت انرژی بر حسب دلار باید پرداخت کند، قرار می دهیم. قیمت ها باید بازتاب کل انرژی مصرفی کاربر باشند و آن را به هزینه کل انرژی سیستم مربوط سازند. پس منطقی است که فرض کنیم:

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} b_n \geq \sum_{h=1}^{\bar{h}} C_h \left(\sum_{n \in \mathbb{N}} l_n^h \right). \quad (20.3)$$

سمت چپ نامساوی ۲۰.۳ هزینه روزانه پرداختی کاربران و سمت راست هزینه روزانه انرژی را نشان می دهد. برای راحتی نمادگذاری قرار می دهیم:

$$K = \frac{\sum_{n \in \mathbb{N}} b_n}{\sum_{h=1}^{\bar{h}} C_h \left(\sum_{n \in \mathbb{N}} l_n^h \right)} \geq 1 \quad (21.3)$$

اگر $K = 1$ ، یعنی سیستم صورت حساب بودجه-متوازن است و شرکت انرژی از کاربران تنها هزینه تولید و فراهم کردن انرژی را دریافت می کند. از طرف دیگر، اگر $K > 1$ ، تفاوت بین کل هزینه پرداختی کاربران و هزینه کلی انرژی

نشانگر سود شرکت انرژی است. بعلاوه ما فرض می کنیم

$$\frac{b_n}{b_m} = \frac{\sum_{h=1}^{\bar{h}} l_n^h}{\sum_{h=1}^{\bar{h}} l_m^h} \quad \forall n, m \in \mathbb{N} \quad (22.3)$$

یعنی هزینه پرداختی کاربران متناسب با مصرف کلی روزانه انرژی آن هاست. به طور مثال، اگر کاربر n دو برابر کاربر m انرژی مصرف کند، دو برابر هم هزینه متحمل می شود. مقدار دقیق هزینه به هزینه انرژی در هر ساعت روز بستگی دارد که از تابع اکیداً محدب $C(\cdot)$ مانند تصویر ۴.۳، نتیجه می شود. مادامی که فرض ۲۲.۳ با مربوط ساختن هزینه پرداختی کاربر به هزینه کلی سیستم تحلیل ما را قابل قبول می کند، این الگو با مدل های اندازه گیری مسکونی جاری هم سازگار است. حال می توانیم مدل کارای قیمت گذاری را معرفی کنیم که در هر دو شرط ۲۰.۳ و ۲۲.۳ صدق می کند. بعد از جمع کردن دوطرف تساوی ۲۲.۳ روی همه کاربران $m \in \mathbb{N}$ ، برای هر $n \in \mathbb{N}$ داریم:

$$\sum_{m \in \mathbb{N}} b_m = \sum_{m \in \mathbb{N}} \left(b_n \frac{\sum_{h=1}^{\bar{h}} l_m^h}{\sum_{h=1}^{\bar{h}} l_n^h} \right) = b_n \frac{\sum_{m \in \mathbb{N}} \sum_{h=1}^{\bar{h}} l_m^h}{\sum_{h=1}^{\bar{h}} l_n^h} \quad (23.3)$$

با روابط ۹.۳، ۱۰.۳، ۲۱.۳ و ۲۳.۳ و جایگذاری می توانیم نشان دهیم:

$$b_n = \Omega_n \sum_{h=1}^{\bar{h}} C_h \left(\sum_{m \in \mathbb{N}} \sum_{a \in A_m} x_{m,a}^h \right) \quad (24.3)$$

که

$$\Omega_n = \frac{K \sum_{a \in A_n} E_{n,a}}{\sum_{m \in \mathbb{N}} \sum_{a \in A_m} E_{m,a}} \quad (25.3)$$

در ادامه، رفتار کاربران را وقتی از روش قیمت گذاری ۲۴.۳ استفاده می شود، بررسی می کنیم.

۲.۴.۳ مدل بازی

از ۲۴.۳ داریم که هزینه پرداختی هر کاربر، به برنامه مصرف او و دیگر کاربران بستگی دارد. این موضوع طبیعتاً به بازی زیر بین کاربران هدایت می کند:

بازی مصرف انرژی بین کاربران

- - بازیکنان: کاربران عضو مجموعه \mathbb{N}
- - مجموعه عمل ها: هر کاربر $n \in \mathbb{N}$ بردار برنامه ریزی مصرف انرژی را انتخاب می کند که تابع سودش را بیشینه کند.
- - تابع سود: $P_n(x_n; x_{-n})$ برای هر کاربر $n \in \mathbb{N}$:

$$P_n(x_n; x_{-n}) = -b_n = -\Omega_n \times (\sum_{h=1}^H C_h(\sum_{m \in \mathbb{N}} \sum_{a \in A_m} x_{m,a}^h))$$

اینجا $x_{-n} = [x_1, \dots, x_{n-1}, x_{n+1}, \dots, x_N]$ شامل بردارهای برنامه ریزی مصرف انرژی همه کاربران به غیر از کاربر n است.

بر اساس تعاریف تابع سود و مجموعه عمل ها در بازی ۱، کاربران سعی می کنند برنامه مصرف انرژی را انتخاب کنند که هزینه پرداختی به شرکت انرژی را کمینه کند.

قضیه ۱: در نظر بگیرید که فرض های ۱ و ۲ برقرارند. تعادل نش بازی ۱ همواره وجود دارد و یکتا است.

برهان قضیه ۱ در پیوست A آورده شده است. یاد آوری می کنیم که تعادل نش مفهوم جوابی است که مشخص می کند بازیکنان چگونه بازی می کنند. متغیرهای برنامه ریزی مصرف انرژی $(x_n^*, \forall n \in \mathbb{N})$ تعادل نش بازی را تشکیل می دهند اگر و فقط اگر داشته باشیم

$$P_n(x_n^*; x_{-n}^*) \geq P_n(x_n; x_{-n}^*), \quad \forall n \in \mathbb{N}, x_n \geq 0$$

(۲۶.۳)

اگر بازی در تعادل نش یکتای خود باشد، هیچ کاربری با انحراف از برنامه سود نمی برد $(x_n^*, \forall n \in \mathbb{N})$. در ادامه کاربرد تعادل نش در بازی ۱ را نشان می دهیم.

قضیه ۲: تعادل نش یکتای بازی ۱، جواب بهینه مسئله کمینه سازی هزینه انرژی است.

برهان قضیه ۲ در پیوست B آورده شده است. از قضیه های ۱ و ۲، زمانی که تابع هزینه $C_h(\cdot)$ برای هر $h \in H$ صعودی و اکیداً محدب است و مدل

قیمت گذاری در شرایط ۲۰.۳ و ۲۲.۳ صدق می کند، کاربران انگیزه ای برای همکاری با یکدیگر و کاهش هزینه های پرداختی به وسیله حل مسئله را دارا هستند.

۵.۳ الگوریتم توزیع شده

از نتایج بخش قبل داریم که کاربران مایلند همکاری کنند و اجازه می دهند واحد های ECS مصرف انرژی خانوارشان را برنامه ریزی کنند تا هزینه کمتری بپردازند. به خصوص، نشان دادیم تعادل نش یکتای بازی مصرف انرژی بین کاربران همان جواب بهینه سراسری مسئله برنامه ریزی مصرف انرژی است. در این قسمت الگوریتمی را برای اجرا در واحد های ECS ارائه می دهیم تا به تعادل نش بازی ۱ و کارایی بهینه سیستم برسیم. ما ویژگی های همگرایی و بهینگی الگوریتم مطرح شده را اثبات می کنیم. همچنین نشان می دهیم هیچ کاربری با گمراه کردن دیگران در ارتباطات متقابل به وسیله اطلاعات اشتباه درباره مصرفش، سود نمی برد.

۱.۵.۳ قاعده کلی الگوریتم

کاربر $n \in \mathcal{N}$ را در نظر بگیرید. با داشتن x_{-n} و فرض این که بقیه کاربران برنامه مصرف انرژی شان را طبق x_{-n} مشخص کرده اند، بهترین پاسخ کاربر n با حل مسئله بهینه سازی موضعی زیر معین می شود:

$$\text{maximize}_{x_n \in X_n} P_n(x_n; x_{-n}) \quad (27.3)$$

توجه کنید دلیل این که ۲۷.۳ را مسئله موضعی می دانیم این است که تنها متغیر بهینه سازی بردار برنامه ریزی مصرف انرژی کاربر n x_n است. از آنجایی که Ω_n ثابت است و به انتخاب x_n بستگی ندارد، ۲۷.۳ به این شکل بازنویسی می شود:

$$\text{minimize}_{x_n \in X_n} \sum_{h=1}^{\bar{h}} C_h \left(\sum_{a \in A_n} x_{n,a}^h + \sum_{m \in \mathcal{N} \setminus \{n\}} l_m^h \right) \quad (28.3)$$

توابع هدف ۲۸.۳ و ۱۹.۳ یکسان اند. هرچند، مسئله ۲۸.۳ فقط متغیرهای موضعی کاربر n ام را دارد. بعلاوه، ۲۸.۳ محدب است و با روش نقطه درونی قابل حل است. کاربر n ام با داشتن تایع هزینه C_h برای هر $h \in H$ و $l_n = [l_1, \dots, l_{n-1}, l_{n+1}, \dots, l_N]$ (بردار شامل برنامه مصرف انرژی روزانه برای بقیه کاربران)، می تواند ۲۸.۳ را حل کند. این مشاهدات الگوریتم ۱ توزیع شده را برای حل مسئله ۱۹.۳ مطرح می کند.

الگوریتم ۱: اجرا برای هر کاربر $n \in \mathbb{N}$

۱. انتخاب l_n و l_{-n} به صورت تصادفی
۲. به تعداد تصادفی انجام بده {
۳. مسئله ۲۸.۳ را با روش نقطه درونی حل کن
۴. اگر تغییری در برنامه فعلی ایجاد شد: {
۵. x_n را با جواب جدید به روز رسانی کن
۶. پیام کنترلی برای اعلام l_n به کنترلهای دیگر در سیستم بفرست {
۷. {
۸. {
۹. اگر پیام کنترلی دریافت کردی: {
۱۰. l_n را طبق آن به روز رسانی کن {
۱۱. {
۱۲. تا زمانی که هیچ واحد ECS ای برنامه جدیدی را اطلاع ندهد، الگوریتم را ادامه بده

در ادامه توضیح می دهیم که الگوریتم مطرح شده چگونه کار می کند. در خط ۱، هر کاربر $n \in \mathbb{N}$ با یک سری شرایط تصادفی شروع می کند. یعنی هر کاربر n بردار l_m را به صورت تصادفی برای هر $m \in \mathbb{N} \setminus \{n\}$ انتخاب می کند. این شرط لازم است چون در ابتدا، کاربر n هیچ اطلاعات قبلی ای درباره بقیه کاربران ندارد. حلقه خط ۲ تا ۱۳ تا زمانی انجام می شود که الگوریتم

همگرا شود. در داخل این حلقه، هر واحد ECS به طور جداگانه مسئله بهینه سازی موضعی ۲۸.۳ خود را با روش نقطه درونی در خط ۴ حل می کند. اینگونه هر بازیکن بهترین پاسخ خود را، همانطور که در بخش قبل بحث شد، بازی میکند. برنامه جدید از طریق انتشار پیام کنترلی در سیستم به بقیه اعلام می شود. در حقیقت، تبادل پیام بین کاربران در چارچوب کلی که در تصویر ۲.۳ نشان داده شده، به صورت اعلام l_n برای هر کاربر n از طریق شبکه محلی در الگوریتم ۱، اجرا می شود. لازم به ذکر است که کاربران جزییات مصرف انرژی دستگاه هایشان را فاش نمی کنند و حریم شخصی حفظ می شود. آنان فقط مصرف کلی در هر ساعت را اعلام می کنند که در هر صورت باید برای صدور صورت حساب به منبع انرژی اعلام شود. در این الگوریتم، هر کاربر حافظه محلی خود را، زمانی که یک پیام کنترلی از بقیه کاربران دریافت می کند، در خط ۱۱ به روز رسانی می کند. راهبرد DSM ای که در این بخش بحث شد، تفاوت های کلیدی با برنامه های DSM فعلی دارد. اولاً، برخلاف DLC هر کاربر کارکرد دستگاه های خود را مدیریت می کند. دوماً، نگران حفظ حریم شخصی کاربران نیستیم. علاوه بر این، کاربران به سادگی بهترین برنامه را دنبال می کنند به جای اینکه تصمیم بگیرند کدام برنامه مصرف برایشان بهتر است و بهترین پاسخ را انتخاب کنند. برخلاف DLC و RTP که بر اساس چارچوب نشان داده شده در تصویر ۱.۳ کار می کنند، طراحی ما بر اساس شرایط تصویر ۲.۳ کار می کند و روابط متقابل بین کاربران را در خود جای می دهد.

۲.۵.۳ همگرایی و بهینگی

در این بخش، ویژگی های همگرایی و بهینگی الگوریتم توزیعی مطرح شده را، اثبات می کنیم. پایه اثبات ما، قضیه زیر است.

قضیه ۳: اگر به روز رسانی های برنامه مصرف انرژی فردی کاربران همزمان نباشد، یعنی هیچ دو کاربر $m, n \in \mathbb{N}$ در یک زمان بردار های مصرف انرژی x_m و x_n را به روز رسانی نکنند، با شروع از هر شرایط انتخابی تصادفی، الگوریتم ۱ به نقطه ثابتش که همان تعادل نش بازی مصرف انرژی است، همگرا می شود.

برهان قضیه ۳ در پیوست C آورده شده است. قضیه ۳ شرایط کافی برای

همگرایی را فراهم می کند. این شرایط فقط مستلزم به روز رسانی بردارهای مصرف انرژی به صورت متوالی است مثلاً شرکت انرژی می تواند برای هر کاربر زمانی را برای به روز رسانی بردار مصرف انرژی تعیین کنند. در این شرایط، به جای خط ۳ در الگوریتم ۱، کاربر n خط ۴ تا ۷ را در صورتی اجرا می کند که پیامی از طرف منبع انرژی مبنی بر اعلام نوبتش برای به روز رسانی بردار مصرف انرژی دریافت کند. روش های دیگری هم می تواند برای نوبت دهی و هماهنگ کردن برنامه ریزی بردارهای مصرف انرژی بین کاربران به کار گرفته شود.

با کمک قضیه های ۲ و ۳ داریم که با شروع از یک نقطه اولیه الگوریتم ۱ به صورت خودکار به بهینه سراسری مسئله کمینه کردن هزینه انرژی، همگرا می شود. لازم به ذکر است که اگر مصرف انرژی همه کاربران در ۲۴ ساعت بدون تغییر باقی بماند، الگوریتم ۱ از طراحی برنامه ریزی مصرف انرژی یک روز جلوتر می افتد. اگر هم نیاز های مصرف انرژی کاربران مدام عوض شود، الگوریتم ۱ در زمان بیشتری به برنامه مصرف انرژی جدید همگرا می شود.

۳.۵.۳ ویژگی ایجاد انگیزه

در این بخش می خواهیم به این سوال پاسخ دهیم که آیا تقلب یک کاربر و یا گروهی از کاربران و اعلام برنامه مصرف انرژی اشتباه به دیگران می تواند سودمند باشد؟ یعنی کاربر n با صادق نبودن و اعلام $(\sum_{a \in A_n} x_{n,a}^h) \neq l_n$ در نقطه ثابت الگوریتم ۱ تابع سودش را افزایش دهد؟ مطمئناً، شرکت انرژی می تواند بر پیام های رد و بدل شده بین کاربران نظارت و آن ها را کنترل کند به شکلی که نتوانند تقلب کنند اما جالب است بدانیم که آیا الگوریتم ۱ خود می تواند صادق بودن کاربران را ضمانت کند تا نیازی به نظارت از طرف شرکت انرژی نباشد.

قضیه ۴: زمانی که الگوریتم ۱ توسط کاربران اجرا می شود هیچ کاربر و یا گروهی از کاربران با عدم صداقت سود نمی برد یعنی هر کاربر $n \in \mathcal{N}$ اگر اطلاعات نادرست منتشر کند در پایان هزینه بیشتری برای انرژی باید بپردازد. برهان قضیه ۴ در پیوست D آمده است. طبق قضیه ۴ می توانیم اطمینان

داشته باشیم همه کاربران اطلاعات درست و دقیقی از برنامه مصرف انرژی شان را اعلام می کنند. این حالت باعث می شود که همه کاربران اطمینان داشته باشند سایر کاربران نیز صادق اند. این بازی اساساً با بازی هایی مانند معمای زندانی که اگر سایر کاربران صادق باشند با تقلب می توانند سود ببرند، متفاوت است و ترغیب به تقلب نمی کند. لازم به توضیح است ویژگی ایجاد انگیزه به این دلیل مهم در الگوریتم ۱ ایجاد شده است که مدل صورت حسابی ما تابع سود هر کاربر را مستقیماً به هزینه کلی سیستم مربوط ساخته است. در حقیقت در مدل ما، بهینه سازی هزینه کلی و هزینه فردی تا حد زیادی در ارتباطند. بنابراین رفتاری از کاربر یا گروهی از کاربران که سیستم را از کارکرد بهینه منحرف کند، برای هزینه فردی کاربر یا کاربران متقلب هم ضرر خواهد داشت که کاربران را از چنین رفتارهایی باز می دارد.

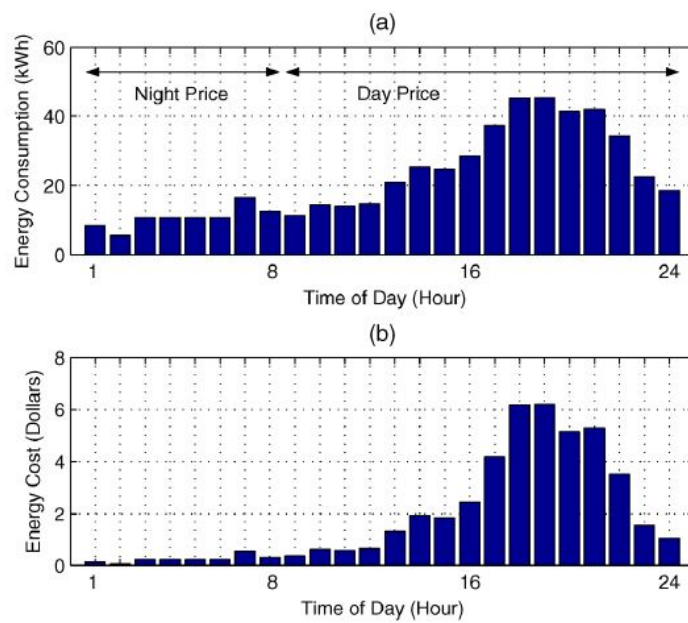
۶.۳ نتایج شبیه سازی

در این بخش، نتایج شبیه سازی را ارائه می دهیم و کارایی الگوریتم مطرح شده را ارزیابی می کنیم. در جامعه‌ی نمونه‌ی $N = 10$ ما در نظر گرفتیم کاربر وجود دارند که سرویس *ECS* را قبول کرده اند. به منظور بررسی، برای هر کاربر بین ۱۰ تا ۲۰ دستگاه با زمان مصرف غیر قابل انتقال در نظر گرفته شده است که محدودیت های اکیدی را برای مسئله مصرف انرژی تولید می کنند. این دستگاه ها شامل یخچال - فریزر (روزانه: 1.32 kWh) اجاق برقی (روزانه: 2.90 kWh) روشنایی (روزانه برای ۱۰ لامپ استاندارد: 1.00 kWh) و سیستم گرمایشی (روزانه: 7.1 kWh) می شود. علاوه بر این هر مصرف کننده بین ۱۰ تا ۲۰ دستگاه با زمان مصرف قابل انتقال دارد که برای مسئله محدودیت های قابل انعطاف ایجاد می کنند. یادآوری می کنیم که کنتور هوشمند با کارکرد *ECS* تنها برای دستگاه هایی با محدودیت های قابل انعطاف برنامه ریزی می کند. دستگاه هایی مثل ماشین ظرفشویی (روزانه: 1.44 kWh)، ماشین لباسشویی (روزانه: 1.49 kWh) برای حالت اقتصادی و 1.94 kWh (برای حالت عادی)، خشک کننده لباس (روزانه: 2.50 kWh) و PHEV (روزانه: 9.9 kWh). در مدل شبیه سازی ما برای هر کاربر یک ترکیب تصادفی از دستگاه های قابل انتقال و غیر قابل انتقال زمان مصرف برای استفاده در ساعات مختلف روز با در نظر گرفتن اینکه بار مصرفی در

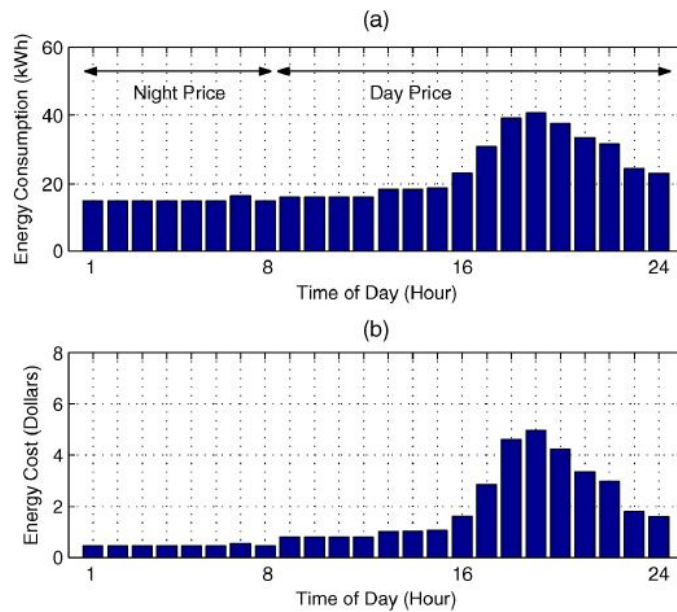
بعد از ظهر بیشتر و در طول شب کمتر است، در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال فرض کرده ایم زمانی که PHEV ها، همان طور که پیش بینی شده، رواج یابند منطقی است که اکثر کاربران (در تنظیمات ما ۴ نفر از ۵ نفر) ماشین هایی برقی دارند که باید زمانی بین بعد از ظهر تا صبح روز بعد شارژ شوند. تابع هزینه مانند ۷.۳ درجه ۲ شده اند. برای سادگی فرض کرده ایم $b_h = c_h = 0$ برای $h \in H$. همچنین داریم $a_h = 0.3cents$ در طول روز (یعنی از ساعت ۸ صبح تا ۱۲ شب) و $a_h = 0.2cents$ در طول شب (یعنی از ۱۲ شب تا ۸ صبح روز بعد). سیستم برق بودجه-متوازن شده است یعنی $K = 1$ (به ۲۱.۳ رجوع شود). الگوریتم ۱ نوبتی که قبلاً مطرح شد بر اساس سناریویی نوبتی که شرکت انرژی هماهنگ می کند، کار می کند. در این سناریو در هر نوبت کاربر n محاسبات موضعی را شروع می کند تا برنامه مصرف انرژی خود را طبق خط ۴ الگوریتم ۱ به روز رسانی کند. سپس به منبع انرژی اطلاع می دهد که نوبت را به کاربر تصادفی دیگری اختصاص دهد و الگوریتم تا جایی ادامه پیدا می کند که همگرا شود. در این شرایط منبع انرژی کنترل می کند که در هر دور هر کاربر یک نوبت داشته باشد.

۱.۶.۳ مقایسه کارایی

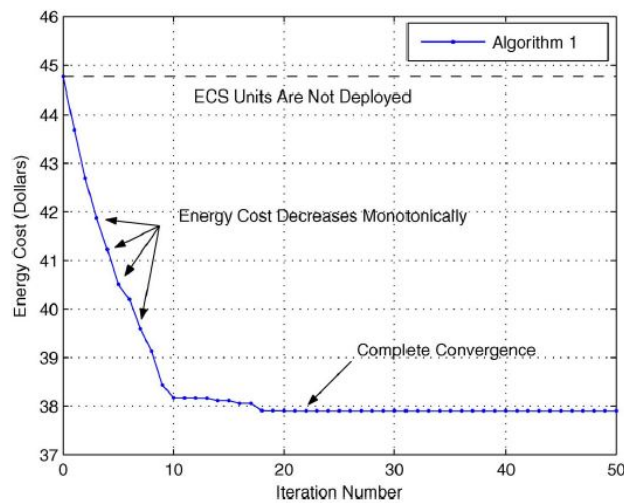
نتایج شبیه سازی برنامه ریزی مصرف انرژی و هزینه انرژی در تصاویر ۶.۳ و ۷.۳ با استفاده و بدون استفاده از تابع ECS کنترلهای هوشمند، به ترتیب نشان داده شده است. برای حالت بدون تابع ECS ، برای هر دستگاه $a \in A_n$ و هر کاربر $n \in \mathbb{N}$ فرض شده است که استفاده از ابتدای بازه زمانی $[\alpha_{n,a}, \beta_{n,a}]$ شروع می شود و میزان مصرف انرژی اش به صورت معمول است. برای حالت با استفاده از تابع ECS ، زمان و میزان مصرف انرژی برای هر خانوار طبق الگوریتم ۱ معین شده است. با مقایسه نتایج در تصاویر ۶.۳ و ۷.۳ می بینیم که وقتی از تابع ECS استفاده نشده، PAR ، ۲.۱ و هزینه انرژی ۴۴.۷۷ دلار است. با شرایط مشابه زمانی که از تابع ECS استفاده شده، PAR به ۱.۸ کاهش یافته است (۱۷٪ کاهش) و هزینه انرژی به ۳۷.۹۰ دلار رسیده است (۱۸٪ کاهش). همچنین در این حالت بار مصرفی به شکل یکنواخت تری در طول ساعات مختلف روز توزیع شده است. یادآوری می کنیم که هر کاربر در هر دو حالت، مصرف انرژی یکسانی دارد اما با کمک واحدهای



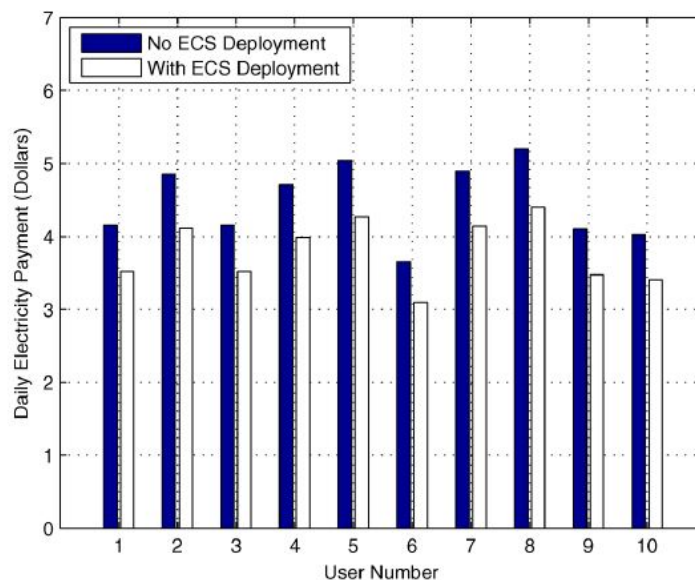
شکل ۶.۳: برنامه مصرف انرژی و هزینه متناظر زمانی که از واحدهای ECS استفاده نشده است: PAR ۲.۱ و هزینه کلی روزانه ۴۴.۷۷ دلار



شکل ۷.۳: برنامه مصرف انرژی و هزینه متناظر زمانی که واحدهای ECS اعمال شده اند: PAR ۱.۸ و هزینه کلی روزانه ۳۷.۹۰ دلار



شکل ۸.۳: روند تغییرات هزینه انرژی در تکرارهای الگوریتم ۱. می بینیم که الگوریتم مطرح شده به سرعت همگرا می شود. بعد از ۲۲ تکرار به حالت ایستا رسیده ایم که هزینه انرژی کمینه شده است.

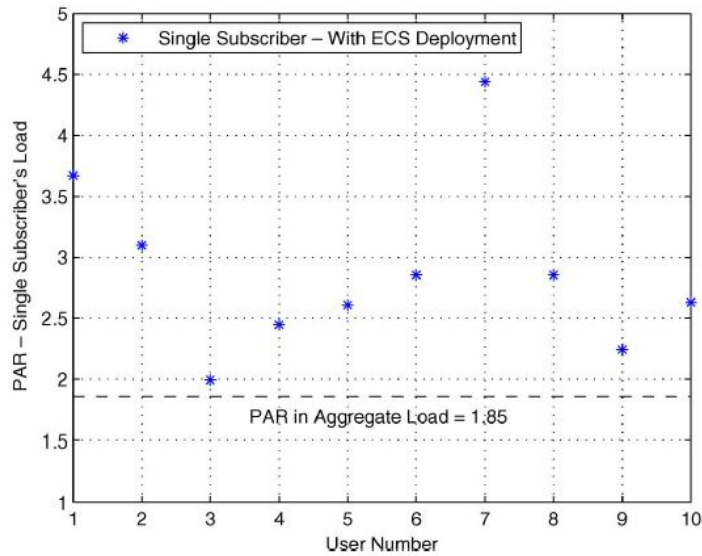


شکل ۹.۳: هزینه روزانه هر مشترک وقتی ECS اعمال شده است و اعمال نشده است.

ECS مصرف انرژی به طور مؤثر برنامه ریزی شده است. از طرف دیگر نمودار نتایج هزینه کلی انرژی زمانیکه الگوریتم ۱ به طور توزیع شده اجرا می شود، در تصویر ۸.۳ نشان داده شده است. مشاهده می کنیم زمانی که کاربران الگوریتم ۱ را اجرا میکنند، هزینه انرژی به طور یکنواخت کاهش پیدا میکند و بعد از تنها ۲۲ تکرار همگرا می شود یعنی تقریباً ۲ تکرار به ارای هر کاربر.

۲.۶.۳ هزینه پرداختی کاربر

همان طور که در الگوریتم توزیعی مطرح شده، هزینه ی کلی انرژی کمتر و *PAR* پایین تر است، برای هر کاربر به طور فردی نیز سودمند است. در تصویر ۹.۳ هزینه ی پرداختی همه کاربران نشان داده شده است. شرایط شبیه سازی در اینجا مانند قسمت قبل است. می بینیم که همه کاربران، زمانی که از فن آوری *ECS* در کنتورهای شان استفاده می کنند، به شکل قابل توجهی هزینه کمتری به شرکت انرژی می پردازند. بنابراین کاربران مایلند که



شکل ۱۰.۳: PAR در بار روزانه هر کاربر و مقایسه با PAR در بار مجموع کاربران

در الگوریتم خودکار طرف تقاضای مدیریتی سیستم شرکت کنند. نکته جالب دیگری هم در تصویر ۱۰.۳ نشان داده شده است. در این تصویر، PAR برای بار هر کاربر نمایش داده شده و با PAR در مجموع بار همه کاربران مقایسه شده است. برای هر کاربر $n \in \mathcal{N}$ ، PAR فردی به این شکل محاسبه می شود:

$$PAR_n = \frac{\hbar \max_h l_n^h}{\sum_{h=1}^{\hbar} l_n^h}. \quad (29.3)$$

در تصویر ۱۰.۳ میبینیم که PAR در مجموع بار به شکل قابل توجهی کمتر از PAR در بار فردی هر کاربر است. در حقیقت برای بعضی کاربران مثل کاربر ۷ در مثال ما، بار به شکل نامتوازنی است و PAR حدود ۴.۵ است. این تأکیدی بر بحث ما در بخش اول مبنی بر این است که نیازی نیست همه کاربران بارشان را متوازن کنند بلکه ممکن است محدودیت‌های مصرف انرژی کاربری به شکلی باشد که نتوان ساعات مصرف او را انتقال داد.

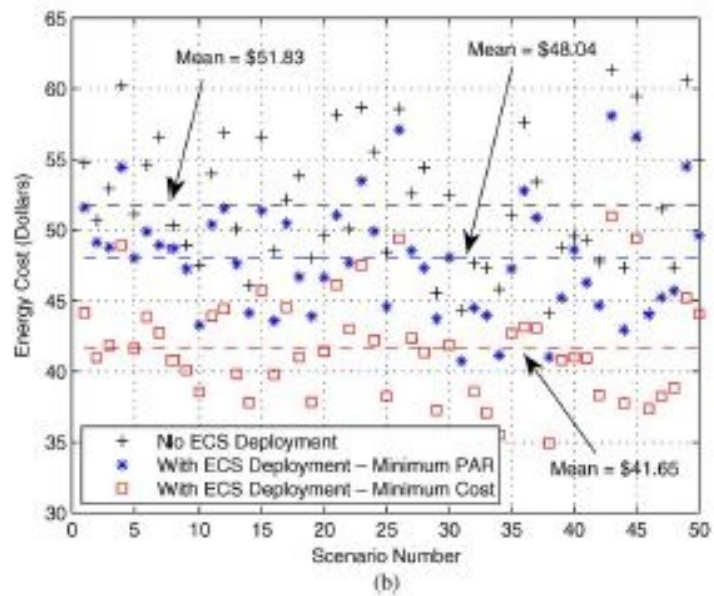
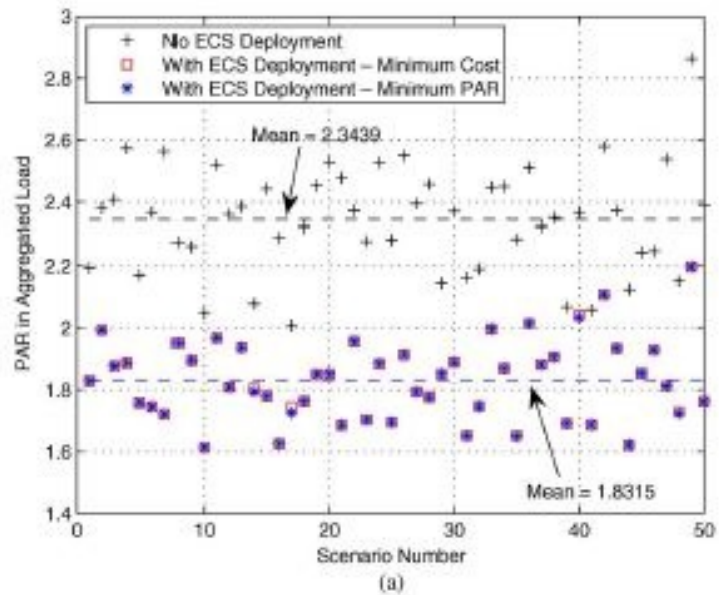
۳.۶.۳ بهینگی کاهش *PAR*

یادآوری می‌کنیم که با رسیدن به *PAR* کمینه، می‌توانیم مصرف انرژی را طبق جواب بهینه‌ی مسئله ۱۸.۳ برنامه ریزی کنیم. هرچند الگوریتم توزیعی مطرح شده در این مقاله تنها بر کمینه سازی هزینه انرژی یعنی حل مسئله ۱۹.۳ تاکید می‌کند. در این بخش نشان می‌دهیم که با حل مسئله ۱۹.۳، الگوریتم ۱ به نتایجی می‌رسد که *PAR* آن بسیار نزدیک به مقادیر *PAR* ای است که از طریق حل مسئله ۱۸.۳ به دست می‌آید. به علاوه الگوریتم ۱ لزوماً هزینه انرژی را کاهش می‌دهد. نتایج شبیه سازی مربوط در تصویر ۱۱.۳ نشان داده شده است. در اینجا ۵۰ حالت مختلف را برای رسیدن به نتایج دقیق مقایسه کردیم. از نتایج تصویر ۱۱.۳، a. می‌توانیم ببینیم که *PAR* به دست آمده با حل مسئله کمینه سازی *PAR* ۱۸.۳ تقریباً با نتایج به دست آمده از حل مسئله کمینه سازی هزینه انرژی ۱۹.۳ یکسان است. در ۳۲ حالت از ۵۰ حالت، مقادیر *PAR* یکسان است. در ۱۸ حالت باقی مانده، جواب مسئله کمینه سازی *PAR* اکیداً *PAR* کمتری دارد مثلاً در حالت ۱۷. اگرچه در این حالات اختلاف خیلی کم است. به طور میانگین *PAR* از ۱.۸۳۲۵ به ۱.۸۳۱۵ کاهش یافته است (یعنی پیشرفت حدوداً ۵٪). از طرف دیگر، از تصویر ۱۱.۳، b. می‌بینیم که الگوریتم ۱ در شرایطی از بهینگی *PAR* خارج می‌شود که هزینه انرژی را کاهش دهد. لازم به ذکر است که متوسط هزینه انرژی زمانی که از واحد های *ECS* استفاده نمی‌شود، ۵۱.۸۳ دلار است و متوسط هزینه انرژی در جواب بهینه مسئله کمینه کردن *PAR* به ۴۸.۰۴ دلار کاهش پیدا می‌کند. هر چند متوسط هزینه انرژی در جواب بهینه مسئله کمینه کردن هزینه انرژی تنها ۴۱.۶۵ دلار است. بنابراین می‌توانیم نتیجه گیری کنیم که الگوریتم ۱، که برای کمینه سازی هزینه انرژی طراحی شده، به طور مؤثر *PAR* را در بار مجموع کاهش می‌دهد. به علاوه به شکل قابل توجهی هزینه انرژی را کم می‌کند.

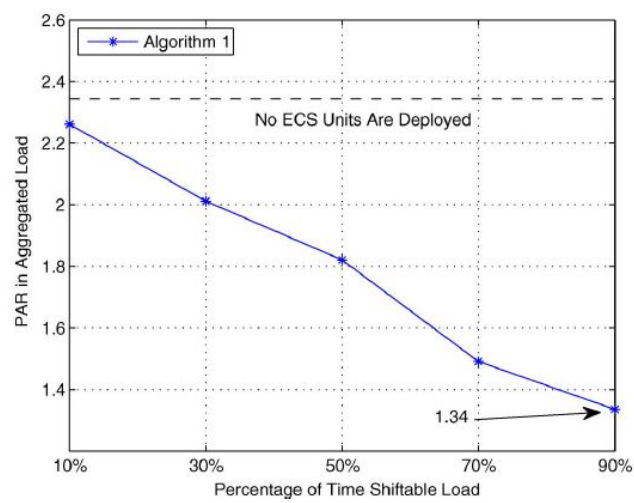
۴.۶.۳ تاثیر مقدار بار قابل انتقال

برای حالت های شبیه سازی تا به اینجا، فرض کرده ایم که حدود نیمی از بار مسکونی قابل انتقال و نیمی دیگر غیر قابل انتقال است. به وضوح، انتظار

می رود واحد های *ECS* زمانی که بار دستگاه های بیشتری قابل انتقال است، تاثیر مهمتری داشته باشند. برای واضح شدن این موضوع، نمودار *PAR* را زمانی که درصد بار قابل انتقال از ۱۰% تا ۹۰% تغییر می کند، در تصویر ۱۲.۳ رسم کرده ایم. در این خصوص، می توان دید که اگر ۹ تا از ۱۰ دستگاه بار قابل انتقال داشته باشند، به طور میانگین *PAR* در بار مجموع می تواند تا ۱.۳۵ کاهش یابد که توزیع تقریباً یکنواخت را نشان می دهد.



شکل ۱۱.۳: مقایسه بین جواب بهینه مسئله کمینه کردن PAR ، جواب بهینه مسئله کمینه کردن هزینه انرژی و زمانی که ECS در کنترل‌های هوشمند اعمال نشده است. (a) کمینه کردن PAR در بار مجموع کلی. کمینه (b) کردن هزینه انرژی



شکل ۱۲.۳: PAR در بار کلی وقتی که درصد بار قابل انتقال از ۱۰٪ تا ۹۰٪ تغییر می کند. در این سناریو زمانی که اکثر بار قابل انتقال است، بار به خوبی توزیع می شود و PAR خیلی پایین می رسیم.

فصل ۴

نتایج و کارهای آینده

در این مقاله، ما الگوریتم بهینه توزیع شده برنامه ریزی مصرف انرژی را مطرح کردیم که مستقل و بر اساس ایجاد انگیزه است تا هزینه انرژی را کمینه کند و بار مسکونی کاربرانی که از یک منبع انرژی بهره می برند را متوازن کند. برخلاف راهبرد های *DSM* قبلی که منحصراً بر روابط بین شرکت انرژی و هر کاربر تمرکز می کند، اساس طراحی ما بر روابط متقابل بین کاربران است. الگوریتم توزیعی مطرح شده ما، تنها نیازمند تعداد محدودی پیام رد و بدل شده بین کاربران است زمانی که هرکدام سود خود را در مدل نظریه بازی پیشینه کند. برای تشویق کاربران به اینکه طبق روش مطلوب ما عمل کنند (کمینه کردن هزینه انرژی) تعرفه های هوشمند قیمت گذاری را عنوان کردیم که روابط متقابل بین کاربران به طور خودکار به یک وضعیت بهینه بار مجموع در تعادل بازی برنامه ریزی مصرف انرژی، هدایت شود. نتایج شبیه سازی تایید می کنند که راهبرد توزیعی مطرح شده مدیریت سمت کاربر می تواند *PAR*، هزینه انرژی و هزینه پرداختی روزانه هر کاربر را کاهش دهد. نتایج این مقاله در چندین جهت می تواند گسترش یابد. اولاً، راهبرد توزیعی *DSM* مطرح شده، می تواند برای حالتی که چندین منبع انرژی وجود دارد استفاده شود. در این حالت، کاربران نه تنها باید مصرف انرژی خود در هر ساعت را مشخص کنند بلکه باید سهمی از انرژی که از هر کدام از منابع انرژی دریافت می کنند را هم، معین کنند. دوماً، اگر این طراحی را برای هم کاهش و هم انتقال مصرف توسعه دهیم، جالب توجه خواهد بود. این کار

می تواند با معرفی تابع هزینه انرژی جدیدی انجام شود که نه تنها به مصرف انرژی در هر ساعت، بلکه به مصرف کلی انرژی روزانه هم بستگی داشته باشد. در این رابطه، مدل خطی صورت حساب ۲۲.۳ می تواند به مدل غیر خطی جامع تری گسترش یابد. سوماً، ممکن است کسی شرط محدب بودن در انتخاب تابع هزینه را کنار بگذارد تا مدل های مصرف انرژی گسترده تری را پوشش دهد، البته به مسائل بهینه سازی برخورد خواهد کرد که حلشان دشوار است. چهارماً، مدل سیستم ما می تواند به وضعیتی توسعه یابد که کاربران بتوانند در ساعات خاصی انرژی را ذخیره کنند، مثلاً در باتری *PHEV* ها در طول شب. سپس می توانند این انرژی را در ساعات *peak* به شبکه برگردانند. این موضوع می تواند با قبول مقادیر منفی برای دستگاه هایی که میتوانند انرژی را ذخیره کنند، در متغیر های برنامه ریزی مصرف انرژی نشان داده شود که مقدار منفی نشان دهنده فراهم کردن انرژی به جای مصرف آن خواهد بود. در پایان، همانگونه که تحلیل ما تنها بر مصارف مسکونی تمرکز می کند، با روش های مشابه می توان بار تجاری در حوزه صنعتی را نیز، مدیریت کرد.

فصل ۵

پیوست

۱.۵ A : برهان قضیه ۱

در ابتدا فرض می‌کنیم $C_h(\cdot)$ برای هر $h \in H$ اکیداً محدب و تابع سود $P_n(x_n; x_{-n})$ بر حسب x_n اکیداً مقعر است. بنابراین بازی ۱، یک بازی اکیداً محدب N نفره است. در این شرایط وجود تعادل نش مستقیماً از [25, Th.1] نتیجه می‌شود. علاوه بر این، یکتایی تعادل نش طبق [25, Th.3] بدست می‌آید.

۲.۵ B : برهان قضیه ۲

در ابتدا نشان می‌دهیم که جواب بهینه سراسری ۱۹.۳، یک تعادل نش بازی ۱ است. برابری نمادگذاری، فرض می‌کنیم x_1^*, \dots, x_N^* جواب بهینه ۱۹.۳ باشد. همچنین تعریف می‌کنیم:

$$C^* = \sum_{h=1}^{\bar{h}} C_h \left(\sum_{m \in \mathbb{N}} \sum_{a \in A_m} x_{m,a}^{h*} \right) \quad (1.5)$$

طبق تعریف بهینگی، برای هر $n \in \mathbb{N}$ و هر $x_n \geq 0$ دلخواه، داریم:

$$C^* \leq \sum_{h=1}^{\bar{h}} C_h \left(\sum_{m \in \mathbb{N} \setminus \{n\}} \sum_{a \in A_m} x_{m,a}^{h*} + \sum_{a \in A_n} x_{n,a}^h \right). \quad (2.5)$$

بعد از ضرب هر دو طرف ۲.۵ در Ω_n خواهیم داشت:

$$P_n(x_n^*; x_{-n}^*) \geq P_n(x_n; x_{-n}^*) \quad \forall x_n \geq 0. \quad (۳.۵)$$

با مقایسه ۳.۵ و ۲۶.۳، میبینیم که x_1^*, \dots, x_N^* یک تعادل نش برای بازی ۱ را تشکیل می دهد. همچنین طبق قضیه ۱، بازی ۱ تعادل نشی یکتا دارد. پس جواب بهینه مسئله ۱۹.۳ همان تعادل نش بازی ۱ است.

۳.۵ C : برهان قضیه ۳

یادآوری می کنیم که عمل به بهترین پاسخ برای هر کاربر $n \in \mathbb{N}$ معادل با حل مسئله بهینه سازی ۲۸.۳ است. بنابراین، اگر کاربران به ترتیب در طی اجرای الگوریتم ۱، بهترین پاسخشان را بازی کنند، هر بار که یک کاربر برنامه مصرف انرژی اش را به روز رسانی می کند، هزینه انرژی در سیستم یا کاهش می یابد و یا تغییری نمی کند. از آنجایی که هزینه انرژی از پایین کراندار است (هزینه انرژی همواره نامنفی است)، به یک نقطه ثابت همگرا می شود. از طرف دیگر، در نقطه ثابت الگوریتم ۱، وقتی همه بهترین پاسخشان را بازی می کنند هیچ کاربری با انحراف از نقطه ثابت نمی تواند تابع سودش را افزایش دهد که این موضوع نشانگر این است که نقطه ثابت، تعادل نش بازی ۱ بین کاربران است.

۴.۵ D : برهان قضیه ۴

فرض کنیم $\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_N$ تعادل نش بازی ۱ باشد زمانی که، یک مجموعه ناتهی $M \subseteq \mathbb{N}$ از کاربران صادق نیستند و بقیه کاربران $\mathbb{N} \setminus M$ صادق اند. همچنین فرض کنیم x_1^*, \dots, x_N^* جواب بهینه مسئله ۱۹.۳ باشد. از قضیه ۲ داریم که x_1^*, \dots, x_N^* وقتی همه ی کاربران صادقند، تعادل نش بازی ۱ نیز هست. برای هر کاربر $n \in M$ برای اینکه از صادق نبودن سود ببرد باید:

$$P_n(\bar{x}_n; \bar{x}_{-n}) \geq P_n(x_n^*; x_{-n}^*). \quad (۴.۵)$$

با تقسیم هر دو طرف ۴.۵ بر $-\Omega_n$ ، خواهیم داشت:

$$\sum_{h=1}^{\bar{h}} C_h \left(\sum_{m \in \mathbb{N}} \sum_{a \in A_m} \bar{x}_{m,a}^h \right) \leq \sum_{h=1}^{\bar{h}} C_h \left(\sum_{m \in \mathbb{N}} \sum_{a \in A_m} x_{m,a}^{*h} \right) \quad (۵.۵)$$

اما این موضوع با بهینگی x_1^*, \dots, x_N^* برای ۱۹.۳ تناقض دارد. بنابراین کاربر n با اعلام اطلاعات غیر دقیق درباره‌ی برنامه‌ی روزانه مصرف انرژی اش، در خط ۷ الگوریتم ۱، سود نمی برد. در حقیقت، ار آنجایی که تابع سود فردی کاربر چیزی نیست اما هزینه کلی انرژی در Ω_n ضرب می شود، برای هر کاربر یا گروهی از کاربران، تنها راه افزایش تابع سود در تعادل نش، کاهش هزینه کلی انرژی است. بنابراین، هر رفتاری مانند عدم صداقت که باعث افزایش هزینه انرژی نسبت به حالت بهینه (کمینه) شود، به همان اندازه که به دیگر کاربران ضرر می رساند، باعث ضرر کاربر یا کاربران متقلب نیز می شود.

کتاب نامه

- [۱] H. Allcott. Real time pricing and electricity markets. Working Paper. Harvard Univ.. Cambridge, MA, Feb. ۲۰۰۹
- [۲] M. Amin and B. F. Wollenberg. "Toward a smart grid: Power delivery for the ۲۱ st century." IEEE Power Energy Mag., vol. ۴ no. ۶ pp. ۴۱-۳۴ Nov. ۲۰۰۶
- [۳] M. Ann-Piette, G. Ghatikar, S. Kiliccote, D. Watson, E. Koch, and D. Hennage. "Design and operation of an open, interoperable automated demand response infrastructure for commercial buildings." J. Comput. Inf. Sci. Eng., vol. ۹ pp. ۹-۱ Jun. ۲۰۰۹
- [۴] D. Bertsimas and J. N. Tsitsiklis. Introduction to Linear Optimization. : Athena Scientific. ۱۹۹۷
- [۵] S. Boyd and L. Vandenberghe. Convex Optimization. : Cambridge University Press. ۲۰۰۴
- [۶] British Columbia Hydro Conservation Electricity Rates [Online]. Available: <https://www.bchydro.com/youraccount/content/residential-inclining-block.jsp> ۲۰۰۹
- [۷] P. Centolella. "The integration of price responsive demand into regional transmission organization (RTO) wholesale power markets and system operations (article in press)." Energy, vol. ۳۵ no. ۴ pp. ۱۵۷۴-۱۵۶۸ Apr. ۲۰۱۰
- [۸] C. M. Chu, T. L. Jong, and Y. W. Huang. "A direct load control of air-conditioning loads with thermal comfort control." in Proc. IEEE PES Gen. Meet., San Francisco, CA, Jun. ۲۰۰۵
- [۹] Comverge Demand Response Aggregatos [Online].

Available: <http://www.comverge.com/demandmanager/> ۲۰۱۰

[۱۰] D. Fudenberg and J. Tirole, *Game Theory*. Cambridge, MA: MIT Press, .۱۹۹۱

[۱۱] C. W. Gellings and J. H. Chamberlin, *Demand Side Management: Concepts and Methods*, ۲nd ed. Tulsa, OK: PennWell Books, .۱۹۹۳

[۱۲] A. Gomes, C. H. Antunes, and A. G. Martins, "A multiple objective approach to direct load control using an interactive evolutionary algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. ۲۲ no. ۳ pp. ۱۰۱۱–۱۰۰۴ Aug. ۲۰۰۷

[۱۳] K. Herter, "Residential implementation of critical-peak pricing of electricity," *Energy Policy*, vol. ۳۵ pp. ۲۱۳۰–۲۱۲۱ Apr. ۲۰۰۷

[۱۴] A. Ipakchi and F. Albuyeh, "Grid of the future," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. ۷ no. ۲ pp. ۶۲–۵۲ Mar.–Apr. ۲۰۰۹

[۱۵] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. Hoboken, NJ: Wiley, .۲۰۰۴

[۱۶] A. H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia, "Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. ۱ no. ۲ pp. ۱۳۳–۱۲۰ Sep. ۲۰۱۰

[۱۷] A. H. Mohsenian-Rad, V. W. S. Wong, J. Jatskevich, Robert Schober and Alberto Leon-Garcia, "Autonomous Demand-Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. ۱ no. ۳ Dec. ۲۰۱۰

[۱۸] A. H. Mohsenian-Rad, V. W. S. Wong, J. Jatskevich, and R. Schober, "Optimal and autonomous incentive-based energy consumption scheduling algorithm for smart grid," presented at the IEEE PES Conf. Innovative Smart Grid Technol., Gaithersburg, MD, Jan. ۲۰۱۰

[۱۹] Office of Energy Efficiency, Natural Resources Canada, *Energy Consumption of Household Appliances Shipped in Canada* Dec. ۲۰۰۵

[۲۰] OpenHAN Task Force of the UtilityAMI Working Group, *Home Area Network System Requirements Spec-*

ification Aug. .2008

[21] M. A. A. Pedrasa, T. D. Spooner, and I. F. MacGill. "Scheduling of demand side resources using binary particle swarm optimization." *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24 no. 3 pp. 1181–1173 Aug. .2009

[22] Quantum Consulting Inc. and Summit Blue Consulting, LLC Working Group 2 Measurement and Evaluation Committee and Southern California Edison Company. Demand response program evaluation—Final report Apr. .2005

[23] B. Ramanathan and V. Vittal. "A framework for evaluation of advanced direct load control with minimum disruption." *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23 no. 4 pp. 1688–1681 Nov. .2008

[24] Reducing electricity consumption in houses. Ontario Home Builders' Assoc., May 2006 Energy Conservation Committee Report and Recommendations.

[25] J. B. Rosen. "Existence and uniqueness of equilibrium points for concave n -person games." *Econometrica*, vol. 33 pp. 351–347. 1965

[26] N. Ruiz, I. Cobelo, and J. Oyarzabal. "A direct load control model for virtual power plant management." *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24 no. 2 pp. 966–959 May .2009

[27] C. Triki and A. Violi. "Dynamic pricing of electricity in retail markets." *Q. J. Oper. Res.*, vol. 7 no. 1 pp. 36–21 Mar. .2009

[28] L. H. Tsoukalas and R. Gao. "From smart grids to an energy internet: Assumptions, architectures, and requirements." presented at the 3rd Int. Conf. Elect. Utility Deregulation Restructuring Power Technol., Nanjing, China, Apr. .2008

[29] U.S. Dept. Energy. The Smart Grid: An Introduction. .2009

[30] A. Vojdani. "Smart integration." *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 6 no. 6 pp. 79–72 Nov. .2008

[31] D. D. Weers and M. A. Shamsedin. "Testing a new direct load control power line communication system." *IEEE*

Trans. Power Del., vol. 12 no. 3 pp. 660-667 Jul. 1987
[32] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control. New York: Wiley-Interscience, 1996

واژه‌نامه

step-down sub-station transformer	ایستگاه کاهش ولتاژ
simplex method	الگوریتم سیمپلکس
strategic games	بازی‌های استراتژیک
ECS	برنامه ریز خودکار مصرف انرژی
budget-balanced	بودجه-متوازن
optimality	بهینگی
cost function	تابع هزینه
Nash equilibrium	تعادل نش
interior point method	روش نقطه درونی
time shiftable	زمان قابل انتقال
LAN	شبکه محلی
CPP	قیمت گذاری peak بحرانی
RTP	قیمت گذاری زمان حقیقی
ToUP	قیمت گذاری زمان مصرف
DLC	کنترل مستقیم بار
smart meter	کنتور هوشمند
DSM	مدیریت طرف مشترک
average load levels	میانگین سطوح بار
PAR	نسبت peak به میانگین
game theory	نظریه بازی
PHEV	وسایل دوگانه سوز برقی
strategy-proof property	ویژگی ایجاد انگیزه
convergence	همگرایی

Abstract

Most of the existing demand-side management programs focus primarily on the interactions between a utility company and its customers/users. In this paper, we present an autonomous and distributed demand-side energy management system among users that takes advantage of a two-way digital communication infrastructure which is envisioned in the future smart grid. We use game theory and formulate an energy consumption scheduling game, where the players are the users and their strategies are the daily schedules of their household appliances and loads. It is assumed that the utility company can adopt adequate pricing tariffs that differentiate the energy usage in time and level. We show that for a common scenario, with a single utility company serving multiple customers, the global optimal performance in terms of minimizing the energy costs is achieved at the Nash equilibrium of the formulated energy consumption scheduling game. The proposed distributed demand-side energy management strategy requires each user to simply apply its best response strategy to the current total load and tariffs in the power distribution system. The users can maintain privacy and do not need to reveal the details on their energy consumption schedules to other users. We also show that users will have the incentives to participate in the energy consumption scheduling game and subscribing to such services. Simulation results confirm that the proposed approach can reduce the peak-to-average ratio of the total energy demand, the total energy costs, as well as each user's individual daily electricity charges.



Faculty of Science
School of mathematics, statistics and computer science

Energy Consumption Scheduling in Smart Meters Based on Game Theory

By

Sahar Jahani

Supervisor

Dr. Mehdi Reza Darvishzadeh

Project for receiving bachelor degree
Mathematics and its applications

July 2017