دیسپچ تقاضا ابزاری برای مدیریت عدم قطعیت ناشی از واحدهای برق بادی

فاطمه دبوری فریمانی [۱]، حبیب رجبی مشهدی [۲]

[۱] دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، fateme.daburifarimani @stu.um.ac.ir

[۲] دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، h_mashhadi@um.ac.ir

چکیده- تا کنون راه‌حل‌های متنوعی برای مشکل عدم قطعیت تولید بادی ارائه شده است. هدف این مقاله ارائه‌ی راه حلی جدید و با صرفه است که تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است. درواقع با تغییر دیدگاه بهره‌برداری نسبت به واحدهای تولید بادی، این مشکل رفع می‌گردد. دیدگاه مرسوم بهره‌برداری، دنباله‌روی لحظه‌ای تولید از مصرف است که در واقع هیچ کنترلی بر روی مصرف وجود ندارد و آن‌چه که باید کنترل شود تا تعادل لحظه‌ای تولید و مصرف بوجود بیابد، تولید است. راه حل ارائه شده با دیدگاه جدیدی که به دیسپچ بار می‌پردازد، کنترل بخشی از بارهای شبکه است، به گونه‌ای که پروفیل بار، به صورت لحظه‌ای، خود را با پروفیل تولید بادی هماهنگ نماید. برای رسیدن به این هدف در این مقاله یک الگوریتم که بر اساس لیست حق تقدم بارها عمل می‌کند، برای کنترل بارها پیشنهاد می‌شود و بر روی یک ریزشبکه‌ی هوشمند اجرا می‌گردد. خروجی این الگوریتم الگوی برنامه‌ریزی بارها است به گونه‌ای است که بیشترین همبستگی بین بار و تولید تصادفی بادی بوجود بیاید. در نتیجه نیاز به در نظر گرفتن رزرو فراوان، ذخیره‌ساز و یا سایر روش‌های هزینه‌برِ کنترل عدم قطعیت بادی تا حد مناسبی مرتفع می‌شود. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مناسب الگوریتم را تأیید می‌نماید.

کلمات کلیدی- دیسپچ تقاضا، عدم قطعیت تولید بادی، ریزشبکه‌ی هوشمند، بهره‌برداری بهینه.

۱- مقدمه

روند فعلی و آینده‌ی تغییرات در شبکه‌های توزیع برق، به گونه‌ای است که به نظر می‌رسد رویکرد معمول بهره‌برداری، به‌تنهایی قادر به پاسخ‌گویی بهینه به نیازهای شبکه نباشد. از جمله‌ی این تغییرات می‌توان به افزایش روزافزون نفوذ منابع تولید پراکنده‌ی تجدیدپذیر بادی و خورشیدی و بارهای پرمصرف و چالش برانگیزی چون خودروهای برقی در شبکه اشاره کرد. مدیریت شبکه‌ی جدید با سهم بالایی از چنین تکنولوژی‌هایی جز با تغییر اساسی در رویکردهای مدیریت و بهره‌برداری شبکه میسر نمی‌باشد. در این راستا، ایده‌ی کلی و نوظهور دیسپچ تقاضا (DD)، برای بهره‌برداری از چنین منابعی مطرح شده است. خوشبختانه، هوشمند شدن شبکه کمک شایانی به اجرای این شیوه‌ی نوین بهره‌برداری می‌نماید. اکنون یکی از چالش‌های مربوط به نفوذ گسترده‌ی تولید بادی در شبکه را بررسی می‌نماییم و در این مقاله راه حل پیشنهادی را بر اساس تغییر دیدگاه بهره‌برداری ارائه می‌نماییم.

تولید واحدهای بادی به علت ماهیت تصادفی سرعت باد، متغیر و غیرقطعی بوده و این موضوع برای بهره‌بردار سیستم با رویکرد فعلی بهره‌برداری، یک چالش محسوب می‌شود. در واقع، متغیر بودن تولید خود یک چالش نبوده و مشکل اصلی، ناشی از شیوه‌ی بهره‌برداری از این واحدها می‌باشد که با متغیر بودن تولید سازگار نیست. در بهره‌برداری متداول، فرآیند بهره‌برداری به‌گونه‌ای طراحی شده است که تولید، به صورت لحظه‌ای، تغییرات انرژی الکتریکی بار را دنبال کند. این رویکرد کلی می‌تواند تا حدی اصلاح شده و در سطح بهره‌برداری از شبکه‌ی توزیع اتخاذ گردد. به‌خصوص در مورد واحدهای تولیدی بادی که نه‌تنها امکان کنترل توان خروجی آن‌ها وجود ندارد، بلکه هدف، استفاده‌ی حداکثری از توان تولیدی در دسترس است. از این رو، جهت بهره‌برداری بهینه از شبکه و عدم به‌کارگیری روش‌های پرهزینه‌ی بهره‌برداری از واحدهای بادی، در خصوص تولید متغیر بادی، می‌توان دیدگاه بهره‌برداری را برعکس نمود. یعنی بارها را به گونه‌ای کنترل نماییم که به صورت لحظه‌ای خود را با تولید هماهنگ کنند. به‌خصوص برای شبکه‌های هوشمند که بارهای شبکه قابلیت مشارکت در بهره‌برداری و کنترل از راه دور را دارند. در واقع، کنترل بارها به‌گونه‌ای که بار خود را با تولید هماهنگ نماید، راهکار مناسبی است که مبنای رویکرد دیسپچ تقاضا است. هدف اصلی این مقاله، پیاده‌سازی دیدگاه پیروی بار از تولید بادی به صورت الگوریتمیک است. این شیوه‌ی جدید بهره‌برداری، مشکل همبستگی پایین باد و بار در سطح خانگی و عدم قطعیت تولید بادی را به صورت بهینه‌ای حل می‌نماید. دیسپچ تقاضا[1] مفهوم

[1] Demand dispatch

©۱۳۹۴، انجمن علوم مهندسی برق ایران

کاملا متفاوتی نسبت به مباحث پاسخگویی بار[2] دارد و موضوعی بسیار جدید است که برای اولین بار در سال ۲۰۱۰ تعریف گردید. مهمترین تفاوت بین این دو مفهوم به ظاهر مشابه، کنترل مرکزی و نگاه از دید بهره‌بردار شبکه در دیسپچ تقاضا است.

یکی از نکات مهمی که باید در نظر گرفته شود، چگونگی برنامه‌ریزی برای بارهای قابل دیسپچ است. یکی از نوآوری‌های این مقاله ارائه‌ی یک برنامه‌ی منعطف با در نظر گرفتن ظرافت‌های مختلفی برای بارهای خانگی است به گونه‌ای که مشارکت در برنامه‌ی دیسپچ تقاضا نه‌تنها هیچ مزاحمتی برای مصرف‌کننده‌ها ندارد، بلکه از لحاظ امکانِ دادن برنامه‌ی اتوماتیک روزانه‌ی مصرف‌کننده‌های خانگی نیز بسیار مفید است. ایده‌ی این برنامه‌ریزی در بخش ۳ به صورت کامل و با ذکر یک مثال تشریح شده‌است. در واقع، یکی از اشکالات برنامه‌های مدیریت سمت مصرف و به‌خصوص برنامه‌های پاسخگویی بار زمان واقعی بر اساس دریافت سیگنال قیمت این است که مصرف‌کننده‌ها اغلب تمایلی به درگیر شدن با قیمت‌های لحظه‌ای برق ندارند و در واقع مشغول شدن به وسایل برقی خانگی برای آن‌ها نه امکان‌پذیر است و نه سود زیادی دارد. بنابراین بهتر است به جای پاسخگویی بار، مصرف‌کننده‌ها فقط بازه‌ی پیشنهادی مصرف خود را بدهند و کنترل زمان مصرف وسیله از راه دور و توسط بهره‌بردار شبکه انجام گیرد. بنابراین برای عملی شدن چنین رویکردی، نیاز است سیستم به صورت کامل طرح شود و ساختار مناسبی برای بهره‌برداری ارائه شود. بدین ترتیب یک ساختار جدید سلسله مراتبی برای دیسپاچینگ باید معرفی گردد که در این مقاله چنین ساختاری پیشنهاد می‌گردد.

رویکرد دیسپچ تقاضا برای اولین بار در سال ۲۰۱۰ میلادی [۲] معرفی شد. این مقاله پس از تعریف برنامه‌های پاسخ‌گویی بار (DR) و اشاره بر روند پیشرفت در تکنولوژی‌های ارتباطی و کنترلی، DD را نگاه جدیدی به DR دانسته و تفاوت‌های این دو مفهوم را به وضوح بیان کرده است. برخی از نیازمندی‌های DD و چگونگی استفاده از اینترنت جهت کنترل و ارتباطات را بیان کرده است. مرور مختصری بر برخی از مفاهیم اصلی بهره‌برداری از شبکه‌ی قدرت کرده و نشان داده است که بارهای مجهز به قابلیت‌های کنترلی و ارتباطی چگونه می‌توانند جمع‌آوری و دیسپچ (خاموش و روشن) شوند و به مدیریت شبکه کمک کنند. این مقاله نشان می‌دهد که بارهای قابل کنترل، قادرند بسیاری از خدمات جانبی شبکه (همچون رزور چرخان و رگولاسیون) که امروزه به وسیله‌ی نیروگاه‌ها صورت می‌گیرد را اجرا کنند. در میان خدمات جانبی، رگولاسیون به دلیل نیاز به پاسخ سریع، بسیار پراهمیت بوده و این مقاله طی یک مثال، توانایی DD در فراهم آوردن رگولاسیون را نشان داده است. همچنین به بیان برخی از مزایای خدمات جانبی مبتنی بر بار و تفاوت‌های آن با خدمات جانبی از طریق نیروگاه‌ها، پرداخته است. شبیه‌سازی شارژ هوشمند در خودروهای الکتریکی به عنوان مثالی از DD در این مقاله مطرح شده است.

در مرجع [۳]، تأثیر DD و همچنین استفاده از روش پیش‌بینی احتمالی توان بادی در گسترش مشارکت کلان تولید بادی در شبکه، مورد بررسی قرار گرفته است. سپس به محاسبه‌ی هزینه‌های مختلف بهره‌برداری (هزینه‌ی سوخت، راه‌اندازی، رزرو تأمین نشده، بار تأمین نشده و...)، قطع بار، رزرو و تولید بادی، میزان دیسپچ تکنولوژی‌های مختلف نیروگاهی (هسته‌ای، بخاری، سیکل ترکیبی، توربین‌های combustion و بادی) برای حالت‌های مختلف از نظر نوع بازار (بازار لحظه‌ای ، بازار یک روز بعد)، زمان پیش‌بینی باد (۱ساعت بعد و ۴ ساعت بعد) و اثر استفاده از DD در تعدادی از حالت‌ها، پرداخته است. نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه‌ی ایلینویز آمریکا، نشان می‌دهد DD به واسطه‌ی ایجاد انعطاف‌پذیری بالا در بهره‌برداری شبکه، می‌تواند با عدم قطعیت‌ها و ماهیت متغیر تولید بادی کنار بیاید و در نتیجه منجر به افزایش مشارکت تولید بادی در شبکه شود. نتایج همچنین کاهش چشمگیر هزینه‌ی کلی بهره‌برداری (که بیشتر ناشی از کاهش هزینه‌ی مربوط به رزرو است) را به خوبی نشان می‌دهد.

شرح جزئیات روش پیش‌بینی احتمالی توان بادی توسط نویسندگان همین مقاله در مرجع [۴] آورده شده است. سپس با استفاده از روش WPF به اصلاح مدل برنامه‌ریزی در مدار قرار گرفتن واحدها (UC) در مرجع [۵] پرداخته شده است.

در این مقاله نیز مدل UC با در نظر گرفتن اثر دیسپچ تقاضا اصلاح شده است. چنین روندی برای مدل‌سازی مجدد مسأله‌ی پخش بار اقتصادی (ED) تکرار شده است.

در مرجع [۶]، ابتدا فرمول‌بندی مسأله‌ی DD (تعیین تابع هدف و برخی از قیود) بر اساس مدل‌های خطی استاتیک برای بار ارائه شده است:

در حالتی‌که قرار است بار مصرف‌کننده دیسپچ شود، تفاوت‌هایی وجود خواهد داشت. برای مثال کل بار از دو بخش بارهای قابل کنترل و بارهای غیرقابل کنترل تشکیل می‌شود. به‌عبارتی، تمام بار قابل کنترل نخواهد بود. برخلاف دیسپچ تولید که یک تابع هزینه‌ی غیر خطی برای تولید در نظر گرفته می‌شد، در این‌جا تابع هزینه نسبت به بار، خطی فرض می‌شود. در این مقاله سه ساختمان در نظر گرفته شده که هر یک دارای یک بار قابل کنترل (HVAC Chiller) است. پس از معرفی تابع هدف، به مدل‌سازی بار HVAC و در گام بعد به خطی سازی آن پرداخته شده است. سپس با حل مسأله به روش برنامه‌ریزی خطی، دیسپچ بهینه‌ی تقاضا برای بارهای قابل کنترل در هر یک از ساختمان‌ها را در طول یک روز بدست آورده است. به طور کلی، مقالات معدودی در زمینه‌ی دیسپچ تقاضا ارائه

[2] Demand response

شده است و مسأله در ابعاد محدودی (در حد چند ساختمان) در نظر گرفته شده است. همچنین مدل‌سازی شفافی از رویکرد دیسپچ تقاضا ارائه نشده است. مسأله‌ی دیسپچ تقاضا در ابعاد بزرگتر چالش‌های خاص خود را دارد و هماهنگی تعداد زیادی بار قابل دیسپچ کار ساده‌ای نخواهد بود. در این مقاله، مسأله را در ابعاد بزرگتری، در حد تعداد زیادی منزل مسکونی در یک ریزشبکه و با دیدگاهی جدیدتر برای در انتظار گذاشتن بارها برای مصرف، مدل‌سازی و اجرا خواهیم نمود.

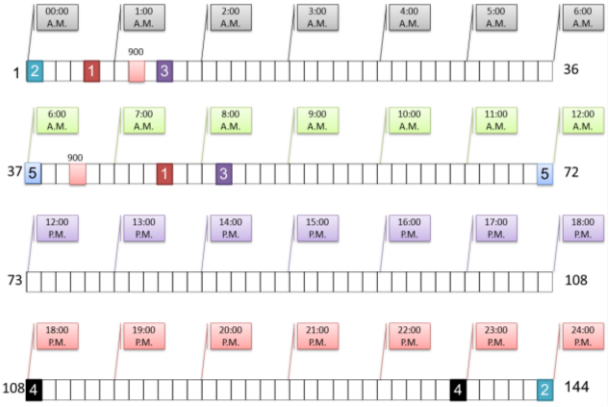
در ادامه‌ی مقاله، ابتدا در بخش ۲ تعاریفی از دیسپچ تقاضا ارائه می‌گردد. سپس در بخش ۳ مشارکت مصرف‌کننده در دیسپچ تقاضا به عنوان یکی از نو آوری‌های مقاله مدل می‌گردد. در بخش ۴ رویکرد اصلی مقاله و چگونگی در نظر گرفتن تعادل بار و تولید به عنوان نوآوری دیگری از مقاله آورده شده است. در بخش ۵ به صورت مختصر ساختار سلسله‌مراتبی موجود دیسپاچینگ را اشاره کرده و سطح جدیدی را برای دیسپاچینگ ریزشبکه به آن اضافه می‌نماییم. در بخش ۶، صورت مسأله تعریف شده و الگوریتم مورد نظر معرفی می‌شود. سپس نتایج اجرای الگوریتم بر روی ریزشبکه‌ی نمونه در بخش ۷ بیان می‌شود و در انتها مقاله جمع‌بندی و نتیجه‌گیری می‌گردد.

۲-تعریف دیسپچ تقاضا

مطابق تعریف مرجع [۱]، دیسپچ تقاضا به معنای "توانایی جمع‌آوری و کنترل دقیق بارها به صورت انفرادی بر حسب دستورات مشخص" است. مطابق تعریف مرجع [۲]، دیسپچ تقاضا عبارتست از: "یک مدل بهره‌برداری، قابل استفاده توسط بهره‌برداران شبکه، جهت دیسپچ منابعی که بعد از کنتور در سمت مصرف‌کننده قرار دارند و در هر دو جهت کاهش و افزایش بار، به عنوان مکملی برای دیسپچ تولید و در راستای بهینه‌سازی مؤثرتر بهره‌برداری از شبکه عمل می‌کند". با جمع‌بندی تعاریف مراجع مختلف می‌توان دیسپچ تقاضا را کنترل مستقیم بارهای قابل دیسپچ، ذخیره‌سازها و واحدهای تولید پراکنده‌ی کوچک در سمت تقاضا، توسط بهره‌بردار شبکه دانست.

۳-مدل مصرف‌کننده در دیسپچ تقاضا

مدل پیشنهادی برای مشارکت مصرف‌کننده و چگونگی اعلام حضور و ارائه‌ی بازه‌ی انتظار بارهای قابل دیسپچ، در قالب مثالی ارائه می‌شود: به عنوان مثال، یک ماشین لباسشویی را به عنوان یک بار قابل دیسپچ در نظر بگیرید. ساعت ۷ صبح است و مصرف‌کننده قصد دارد از منزل خارج شود. شستشوی کامل لباس‌ها ۴۰ دقیقه زمان نیاز دارد. مصرف‌کننده تا ساعت ۲۲ به لباس‌های تمیز خود نیازی نداشته و بنا به دلایلی ترجیح می‌دهد لباسشویی او از ساعت ۱۲ به بعد روشن گردد و در یک زمان پیوسته‌ی ۴۰ دقیقه‌ای کار خود را انجام دهد. با فرض این‌که وسیله‌ی او از طریق خطوط مخابراتی قادر است تعدادی داده به بهره‌بردار مربوطه ارسال نماید، زمان شروع، زمان پایان و مدت زمان لازم عملکرد وسیله بعلاوه‌ی انرژی مصرفی آن را از طریق خود دستگاه یا مکانیزم مخابراتی تعریف شده‌ی دیگری ارسال می‌نماید. اگر مطابق شکل (۱) یک روز را به ۱۴۴ بازه‌ی ۱۰ دقیقه‌ای تقسیم نماییم، در این مثال او اعداد ۷۲ (ساعت ۱۲)، ۱۳۲ (ساعت ۲۲) و



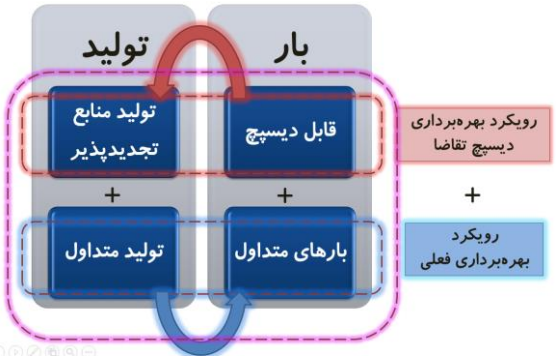
شکل ۱: **بازه‌ی انتظار برای بارهای قابل دیسپچ در طول شبانه‌روز**

۴ (چهار بازه‌ی ده دقیقه‌ای) را به عنوان ساعت شروع، ساعت پایان و زمان عملکرد مورد نیاز، ارسال می‌نماید. در واقع مصرف کننده در محدوده‌ی زمانی که پیشنهاد داده است، کنترل روشن شدن وسیله‌ی خود را در اختیار بهره‌بردار قرار داده است. این مسأله بسیار شبیه به اعلام آمادگی واحدهای نیروگاهی برای مشارکت در تولید است. بهره‌بردار موظف است در طول محدوده‌ی زمانی پیشنهادی که از این پس آن را بازه‌ی انتظار نیز می‌نامیم، بار مصرف‌کننده را وصل نموده و تا پایان بازه‌ی انتظار، عملکرد وسیله را تکمیل کند. محدوده‌ی زمانی پیشنهادی در اختیار مصرف‌کننده است. وی می‌تواند بازه‌های زمانی ارزان‌تر را برای عملکرد وسیله‌ی خود انتخاب نماید. اما در صورت انتخاب محدوده‌ی بزرگی از روز، با توجه به این‌که روشن شدن وسیله‌ی او در اختیار بهره‌بردار است، کنترلی بر روی قیمت انرژی در زمان روشن شدن وسیله ندارد. این مسأله می‌تواند با تعیین مناسب پاداش بر اساس طول محدوده‌ی زمانی پیشنهادی حل گردد. برای مصرف‌کننده خیلی راحت‌تر است که وسیله‌ی او در بازه‌ی زمانی‌ای که خود می‌پسندد، به صورت اتوماتیک و ترجیحاً در بازه‌هایی که قیمت برق ارزان‌تر است، روشن شود. دیسپچ تقاضا این مزیت را دارد که باعث مشغول شدن ذهن مصرف کننده برای مدیریت مصرف خود مطابق قیمت‌های متغیر نمی‌شود. چنان‌چه سیستم به گونه‌ای تعریف شود که رگولاتور مربوطه به دنبال بیشینه کردن رفاه اجتماعی مشترکان خود باشد، مصرف‌کننده به راحتی و بدون درگیر کردن خود در مسائل اقتصادی قادر خواهد بود علاوه بر کمک به بهره‌بردار شبکه، هزینه‌ی مصرف انرژی خود را کاهش دهد.

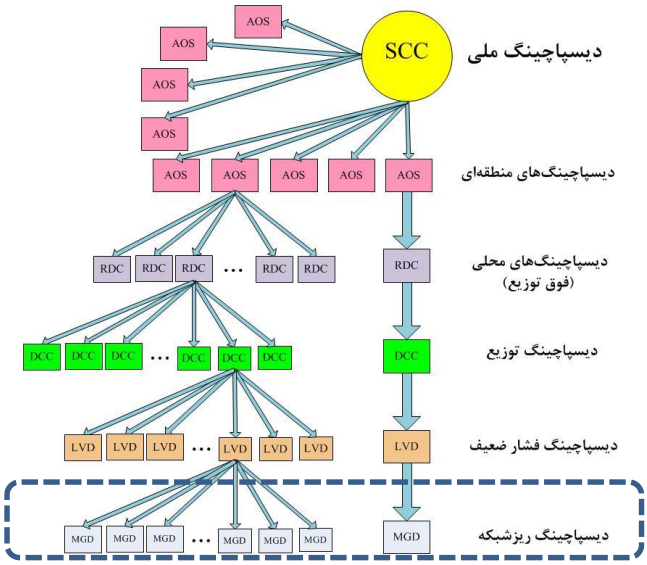
۴-پیروی بار از تولید

اکنون دیدگاه جدیدی برای تعادل بار و تولید ارائه می‌کنیم. اگر فرض کنیم بار سیستم به دو بخش قابل دیسپچ و متداول تقسیم گردد، همچنین تولید را در دو دسته‌ی تجدیدپذیر و متداول قرار دهیم، رویکرد دیسپچ تقاضا

کنترل بخش قابل دیسپچ بار بر اساس تولید تجدیدپذیرِ موجود است. رویکرد متداول بهره‌برداری نیز هم‌چنان در مورد بارهای متداول سیستم و تولید متداول برقرار است شکل(۲). در نظر گرفتن دو دسته بار و دو دسته تولید همگی به صورت یکجا، و بهینه‌سازی کلی نیز حالت دیگری برای دیسپچ تقاضا است که در [۷] بررسی کرده‌ایم.



شکل۲: **دنبال کردن تولید در رویکرد دیسپچ تقاضا و پیروی از بار در رویکرد فعلی بهره‌برداری**



شکل ۳: **ساختار سلسله‌مراتبی دیسپاچینگ با در نظر گرفتن دیسپاچینگ ریزشبکه**

۵-سطوح دیسپاچینگ

با توجه به در نظر گرفتن یک واحد کنترل برای ریزشبکه که از آن به عنوان دیسپچر یاد می‌کنیم، لازم دانستیم تا هویت دقیق‌تر این واحد را در ساختار دیسپاچینگ تعریف کنیم. اگرچه ممکن است ساختار فعلی معرفی شده با اهداف ارائه شده کاملاً منطبق نباشد. سیستم دیسپاچینگ باید به گونه‌ای طراحی شود که نه‌تنها با ساختار شبکه‌ی برق هماهنگ باشد و با روش فعلی بهره‌برداری مطابقت داشته باشد، بلکه قابلیت انعطاف و هم‌خوانی با ساختارهای آینده‌ی شبکه و روش‌های جدید بهره‌برداری را داشته باشد. مرکز کنترل دیسپاچینگ در کشورهای مختلف یک ساختار سلسله‌مراتبی دارد. مطابق شکل (۳)، ساختار فعلی دیسپاچینگ ایران نشان داده شده و در انتها فرض می‌شود دیسپاچینگ در سطح ریزشبکه نیز در ادامه‌ی ساختار سلسله‌مراتبی قرار داشته باشد.

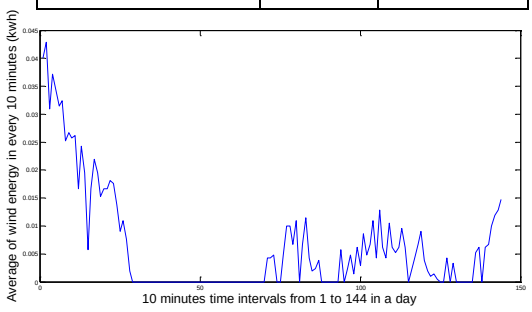
۶-صورت مسأله و ارائه‌ی الگوریتم

یک ریزشبکه‌ی هوشمند را مطابق شکل (۵) در نظر بگیرید. این ریزشبکه از تعدادی واحد مسکونی شامل بارهای عادی، بارهای قابل دیسپچ، تعدادی خودروی برقی به عنوان بار قابل دیسپچ و یک توربین بادی تشکیل شده است که مشخصات آن در جدول (۱) آمده است. داده‌های سرعت باد، برای هر ده دقیقه، در ارتفاع ۴۰ متری، در تاریخ یک اکتبر ۲۰۰۸ در شهرستان خواف در دسترس است. همچنین داده‌های انرژی باد بر اساس سرعت باد و مشخصات توربین بادی مطابق فرمول تبدیل سرعت باد به انرژی (رابطه‌ی (۱))بدست آورده شده است. چنان‌چه سرعت باد در بازه‌ی k ام ($s_w(k)$)، از سرعت قطع پایین توربین کمتر باشد، توان تولیدی توربین صفر خواهد بود. در سرعت‌های بین r_s و سرعت قطع بالای توربین، توان تولیدی توربین برابر توان نامی آن می‌شود. در سرعت‌های بین سرعت قطع پایین و سرعت r_s، توان تولیدی توربین به صورت خطی تخمین زده شده است. منظور از $S(k)$، سرعت باد در بازه‌ی k اُم است.

$$P_W(k)=\begin{cases}0 & if \quad s_w(k)\ge co_s \quad or \quad s_w(k)\le ci_s\\ ins_{cap} & if \quad s_w(k)\ge r_s \quad or \quad s_w(k)\le co_s\\ \dfrac{ins_{cap}}{r_s-ci_s}\times S(k).co_s & if \quad s_w(k)\ge ci_s \quad or \quad s_w(k)\le r_s\end{cases} \quad (1)$$

جدول ۱: **مشخصات توربین بادی**

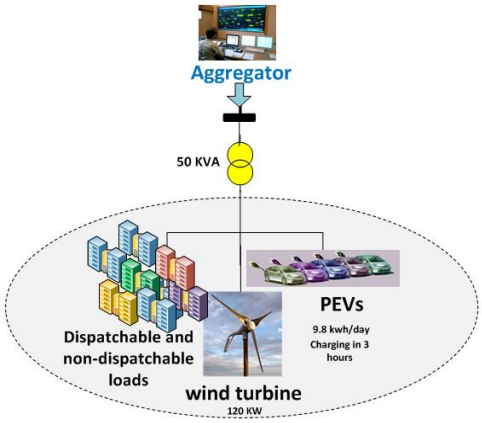
ظرفیت نصب شده	ins_{cap}	120 KW
سرعت قطع پایین	ci_s	3.5 m/s
سرعت قطع بالا	co_s	25 m/s
سرعت نامی	r_s	14 m/s



شکل٤: انرژی باد در هر ده دقیقه در ارتفاع ٤٠ متری در ۱ اکتبر ۲۰۰۸ در خواف

از این رو میزان انرژی بادی در دسترس برای هر یک از بازه‌های ده دقیقه‌ای مطابق شکل (۴) معلوم می‌شود. در این مطالعه فرض می‌شود زمان انتظار هریک از بارهای قابل دیسپچ، از روز قبل، برای کل ۲۴ ساعت

آینده تعیین شده است. همچنین فرض می‌شود که این بارها پس از اعلام آمادگی برای حضور، به طور قطعی در مدار قرار می‌گیرند. الگوریتم لیست حق تقدم، از دیدگاه بهره‌بردار ریزشبکه اجرا می‌شود. از دیدگاه وی، در هر بازه‌ی ده دقیقه‌ای، تعدادی بار قابل دیسپچ آماده برای مصرف و در حال انتظار وجود دارد. در هر بازه‌ی خاصی از روز، از دید بهره‌بردار، هر یک از این بارها در یک موقعیت زمانی خاصی از محدوده‌ی زمانی انتظار خود قرار دارند. برای مثال، مطابق آن‌چه در شکل (۶) نشان داده شده است، اگر بهره‌بردار در بازه‌ی ششم روز؛ یعنی ساعت یک بامداد قرار داشته باشد، بار شماره‌ی ۱، یکی از بارهای در حال انتظار او به شمار می‌رود که در دقایق اولیه‌ی بازه‌ی انتظار خود قرار دارد. البته با فرض این‌که قرار است تا انتهای بازه‌ی انتظار، وسیله عملکرد خود را تکمیل کرده باشد، آخرین فرصت بهره‌بردار برای وصل هر یک از بارهای قابل دیسپچ، مدت زمانی قبل از انتهای بازه است که این زمان برابر مدت عملکرد وسیله است. برای مثال در ساعت یک بامداد (سومین بازه‌ی ده دقیقه‌ای از زمان انتظار بار شماره‌ی ۱) برای بار شماره‌ی یک، ۵۵ بازه‌ی دیگر زمان بیشتر باقی نمانده است. بنابراین، در هر بازه‌ای از روز، بهره‌بردار با تعدادی بار مواجه است که هر یک تا پایان بازه‌ی مجاز خود، زمان معینی فرصت باقی دارند.



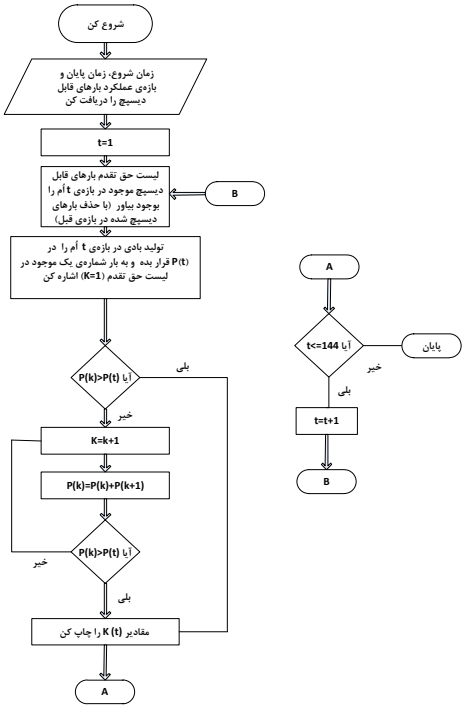
شکل ۵: **اجزای در نظر گرفته شده برای ریزشبکه**

در الگوریتم نشان داده شده در شکل (۷)، ابتدا باید چک کنیم که بازه‌ای که در آن قرار داریم که با t، نشان داده شده است، در محدوده‌ی مجاز کدام‌یک از بارهای قابل دیسپچ قرار دارد. همچنین باید چک شود که به بارهایی که در بازه‌های زمانی قبلی فراخوانی شده‌اند، فرمان دیسپچ داده نشود. بنابراین مشخص می‌شود که کدام بارها در بازه‌ی مورد نظر امکان فراخوانی و روشن شدن را دارند. در هر t ای که بهره‌بردار به آن می‌رسد، اولویت وصل با بارهایی قرار می‌گیرد که فرصت کمتری برایشان باقی مانده است. برای اولویت‌بندی بارها، عدد A (زمان باقی مانده از بازه‌ی انتظار هر یک) را مطابق رابطه‌ی (۲) بدست آورده‌ایم. جمله‌ی دوم در این رابطه، (i_e)، زمان انتهای بازه‌ی پیشنهادی و جمله‌ی سوم (N_{dl}) بیانگر تعداد بازه‌های عملکرد وسیله است. بنابراین گام اول الگوریتم، مرتب کردن بارهای مجاز در آن بازه‌ی زمانی خاص بر اساس عدد A است. در واقع بهره‌بردار سعی می‌کند به صورت بهینه، از زمان اختصاص داده شده توسط بارها استفاده نماید.

شکل ۶: **مثال‌هایی از محدوده‌ی انتظار و زمان روشن شدن بار قابل دیسپچ**

$$A = t - (i_e - N_{dl} + 1) \qquad \forall t, \quad \forall dl \qquad (۲)$$

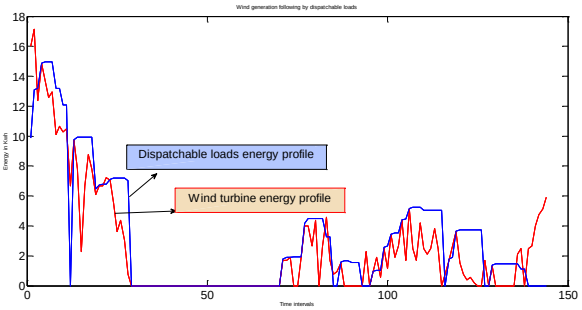
بنابراین او در ابتدا بارهایی را که به زمان انتهایی خود نزدیک‌تر هستند، پاسخ می‌دهد. در گام بعدی الگوریتم، با توجه به این‌که بهره‌بردار در هر بازه‌ی زمانی اطلاعات بارهای در دسترس و همچنین تولید بادی را دارد، بر اساس لیست حق تقدم خود در گام قبل، به میزان لازم بار قابل دیسپچ فراخوانی می‌کند تا انرژی بادی تولیدی را مصرف کنند. در این الگوریتم قیود بارهای قابل دیسپچ از جمله زمان شروع و پایان و قید پیوستگی بازه‌های شارژ بار در نظر گرفته شده است. خروجی این الگوریتم شماره‌ی بارهای قابل دیسپچ در هر یک از بازه‌های زمانی است. در شکل (۷)، عملکرد کلی الگوریتم مورد نظر آورده شده است. در رابطه‌ی (۱)، t نشان دهنده‌ی بازه‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای و N_{dl} نشان دهنده‌ی تعداد بازه‌های مورد نیاز هر بار قابل دیسپچ (dl) برای تغذیه‌ی کامل است.



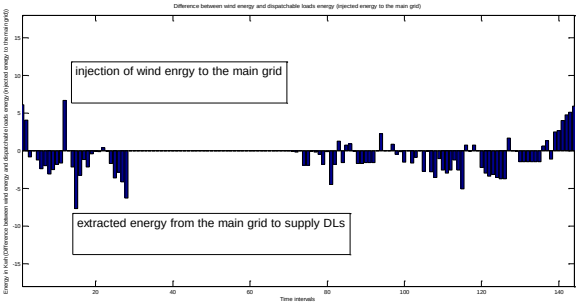
شکل ۷: **الگوریتم لیست حق تقدم برای دیسپچ بارهای قابل دیسپچ و پیروی بار از باد**

۷-نتایج پیاده‌سازی الگوریتم بر روی ریزشبکه‌ی معرفی شده

در این مطالعه فرض شده است یک ریزشبکه با حدود ۱۹۲ واحد مسکونی داریم که مصرف روزانه‌ی هر یک از آن‌ها به طور متوسط ۶ kwh باشد. با فرض این‌که انرژی مصرفی روزانه‌ی بارهای قابل دیسپچ برابر۲ kwh باشد، کل انرژی بارهای قابل دیسپچ برای یک روز خاص، برابر ۳۸۵ kwh تخمین زده شده است. مطابق [۲]، ۳۳ درصد از کل بارها قابل دیسپچ هستند. از این رو در نظر گرفتن ۲ کیلووات ساعت انرژی برای بارهای قابل دیسپچ از ۶ کیلووات ساعت انرژی کل بارها، منطقی به نظر می‌رسد. در این ریزشبکه حدود ۹۰۰ بار قابل دیسپچ در نظر گرفته شده است. خروجی این الگوریتم برنامه‌ی دیسپچ بهینه‌ی بارهای مورد نظر در هر بازه‌ی زمانی است. در نهایت شناسه‌ی بارهای دیسپچ شده در هر یک از بازه‌های زمانی ده دقیقه‌ای از الگوریتم استخراج می‌شود. پس از مشخص شدن وضعیت زمانی روشن شدن بارهای قابل دیسپچ، منحنی انرژی مصرفی بارهای قابل دیسپچ بدست می‌آید. در شکل (۸)، منحنی انرژی مصرفی بارهای قابل دیسپچ در کنار منحنی انرژی تولید واحد بادی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بارهای قابل دیسپچ تغییرات توان بادی را تا حدود خوبی دنبال کرده‌اند. با توجه به وجود قید روشن ماندن بار قابل دیسپچ برای یک مدت معین پس از روشن شدن، که برابر زمان عملکرد بار قابل دیسپچ است، پس از دنبال کردن نقاط قله مانند انرژی بادی، بارها روشن می‌مانند و تغییرات کاهشی سریع باد را دنبال نمی‌کنند. در چنین بازه‌های زمانی، انرژی بادی از انرژی مورد نیاز بارهای قابل دیسپچ کمتر می‌شود و این اختلاف توان از طریق شبکه جبران می‌گردد. در شکل (۹) اختلاف انرژی بادی و انرژی بارهای قابل دیسپچ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در بازه‌هایی که منحنی، بالای محور افقی قرار گرفته است، انرژی اضافی واحد بادی از ریزشبکه به شبکه‌ی اصلی تزریق می‌شود. در بازه‌هایی که مقدار اختلاف انرژی منفی بدست آمده است، انرژی اضافی مورد نیاز بارهای قابل دیسپچ، از شبکه‌ی اصلی تأمین می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود، مقدار انرژی مبادله شده بین شبکه و ریزشبکه، به علت پیروی مناسب بار قابل دیسپچ از تولید بادی، نسبتاً کوچک است.



شکل ۸: **منحنی انرژی مصرفی بارهای قابل دیسپچ در کنار منحنی انرژی واحد بادی**



شکل ۹: **اختلاف انرژی تولیدی واحد بادی و انرژی مصرفی بارهای قابل دیسپچ**

۸-نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از معرفی دیسپچ تقاضا با یک دید اولیه‌ی مهندسی مبنی بر پیروی بار قابل دیسپچ از تولید، الگوریتمی از دید بهره‌بردار ریزشبکه ارائه کردیم. همان‌طور که در شبیه‌سازی نشان داده شد، این الگوریتم، همبستگی باد و بار در سطح خانگی را بیشینه می‌کند. بخصوص که در بخش خانگی، تولید بادی و مصرف خانگی در برخی از بازه‌های شبانه‌روز، همبستگی منفی دارند. از فواید دیگر رویکرد پیروی بار از تولید، کاهش نیاز به تولید واحد پشتیبان یا ذخیره‌ساز برای جبران تولید متغیر و تصادفی واحدهای بادی و خورشیدی و امکان استفاده از اضافه‌تولید بادی در هر بازه‌ای از روز، توسط بارهای قابل دیسپچ موجود در آن بازه، است. افزایش همبستگی بار و باد به عنوان یکی از نتایج این الگوریتم ارزش اقتصادی زیادی از لحاظ قابلیت اطمینان سیستم قدرت در بر دارد.

مراجع

[1] “Demand Dispatch — Intelligent Demand for a More Efficient Grid,” conducted by the National Energy Technology Laboratory (NETL) for the U.S. department of Energy (DOE) office of Electricity Delivery and Energy Reliability, August, 2011.

[2] Brooks, A.; Lu, E.; Reicher, D.; Spirakis, C.; Weihl, B., “Demand Dispatch,” IEEE magazine on power and energy, Vol.8, No.3, pages 20-29, cited by 40, May/June 2010.

[3] Botterud, A.; Zhi Z; Jianhui W; Sumaili, J.; Keko, H.; Mendes, J.; Bessa, R.J.; Miranda, V. , “Demand Dispatch and Probabilistic Wind Power Forecasting in Unit Commitment and EconomicDispatch: A Case Study of Illinois,” IEEE Transactions on Sustainable Energy, Volum.4, Issue.1, pages 250-261, Jan. 2013.

[4] Monteiro, C.; Bessa, R; Miranda, V; Botterud, A.; Wang, J.; and Conzelmann, G., “Wind Power Forecasting,”: State-of-the-art 2009, ANL/DIS-10-1 Argonne National Laboratory, Nov. 2009.

[5] Wang, J.; Botterud, A.; Bessa, R.; Keko, H.; Carvalho, L.; Issicaba, D.; Sumaili, J. and Miranda, V.; “Wind power forecasting uncertainty and unit commitment,” Appl. Energy, vol. 88, no. 11, pp. 4014–4023, 2011.

[6] Wu, T.; Wu, G.; Bao, Z., Yang, Q., Yan, W., Pen, N., “Demand Dispatch of Smart Charging for Plug-in Electric Vehicles,” IEEE International Conference on Control Engineering and Communication Technology, 2012.

[7] Fateme Daburi Farimani, Habib Rajabi Mashhadi, "Modeling and Implementation of Demand Dispatch in a Smart Micro-grid," 13th International Confernece on Integral Methods in Science and Engineering (IMSE2014), KIT, Germany, July, 2014.