

رسالة الرجوع من الرجوع



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

برنامه ریزی توسعه انتقال با توجه به توسعه تولید منابع بزرگ تجدیدپذیر

در یک منطقه نمونه

(بررسی موردی منطقه ی خواف استان خراسان رضوی)

خسرو قائمی

استاد راهنما:

دکتر محسن اصیلی

شهریورماه ۱۳۹۴

«تصویب نامه»

تقدیم بہ:

پدرم

حامی من در تمام زندگی

و تقدیم بہ مادرم

سنگ صبوری کہ الفبای زندگی بہ من آموخت

تقدیر و تشکر

ضمن سپاس و ستایش به درگاه ایزدمنان که به من توانایی داد تا با استعانت از او بتوانم این پژوهش را انجام دهم، بر خود لازم می‌بینم از

دکتر می و تشویق استاد راهنما و دوستانی که در مکارش این مجموعه مرایاری نمودند، قدر دانی نمایم:

جناب آقای دکتر محسن اصیلی، استاد راهنما، که در طول مکارش این مجموعه بارها راهنمایی‌های بجایشان، سکون دارشاید اسی در هدایت این

پایان نامه بوده‌اند.

پنجمین از مسئولین محترم شرکت برق منطقه‌ای استان خراسان رضوی، به ویژه آقای دکتر مصطفی رجبی مشهدی و مشاورین دفتر

برنامه ریزی و برآورد بار آقای مهندس سید محسن صدروخانم مهندس تکتم شیرینیان که در طی انجام این تحقیق، با من همکاری داشتند.

دخاتمه از دوستان ارجمندم آقای مهندس امین حجازی و خانم مهندس نایه اسماعیلی و دیگر دوستانی که مراد انجام این تحقیق یاری نمودند،

قدر دانی و تشکر می‌نمایم.

خسرو قانمی

تعهد نامه

اینجانب **خسرو قائمی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق / قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان «برنامه ریزی توسعه انتقال با توجه به توسعه تولید منابع بزرگ تجدیدپذیر در یک منطقه نمونه (بررسی موردی منطقه ی خواف استان خراسان رضوی)» تحت راهنمایی دکتر محسن اصیلی، متعهد می شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. 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 نمی باشد.

چکیده

امروزه استفاده از انرژی بادی با توجه به نیاز روزافزون بشر به منابع انرژی، مشکلات پرشمار اقتصادی و زیست‌محیطی رشد کرده و در سال‌های اخیر توجه چشمگیری را در سطح جهان و ایران به خود اختصاص داده است. در این پایان‌نامه با توجه به درخواست توسعه‌دهندگان مزارع بادی و همچنین پیش‌بینی رشد بار الکتریکی در منطقه خواف به برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال خراسان بر اساس ارزیابی قابلیت اطمینان پرداخته می‌شود. ابتدا به منظور شناخت ظرفیت‌های موجود از طرف شرکت برق قانون‌گذار در یک مطالعه پایه‌ای، امکان‌سنجی و ارزیابی پتانسیل توان بادی بر اساس اطلاعات به‌روز و واقعی سرعت باد صورت می‌گیرد. این کار با شناخت عوامل نایقینی نسبت به وضعیت زمین‌های منطقه و محاسبه حداکثر توان بادی قابل استحصال در یک چارچوب تخمینی در منطقه خواف انجام می‌شود. نظر به مقیاس بزرگ حضور توان بادی در مطالعه حاضر همبستگی بین توان بادی و بار الکتریکی برای بار باس‌های خاصی در منطقه خواف بررسی می‌شود. نایقینی‌های موجود در سیاست‌های سرمایه‌گذاری از طرف بخش‌های دولتی و خصوصی تعیین‌افق زمانی در برنامه‌ریزی را غیرممکن می‌سازد. برای پوشش این نایقینی‌ها سناریوهای گوناگونی در سطوح مختلف حضور مزارع بادی و رشد بار الکتریکی شبکه توسعه داده می‌شوند. همچنین مدلی برای مزارع بادی به منظور پوشش نایقینی‌های سرعت باد پیشنهاد می‌شود. در نهایت قابلیت اطمینان شبکه انتقال خراسان با توجه ویژه به شبکه فوق توزیع در منطقه خواف در حضور مزارع بادی تحلیل می‌شود. بارگذاری خطوط فوق توزیع، پیکربندی شبکه و مزارع بادی و تأثیر آن‌ها بر شاخص قابلیت اطمینان ارزیابی می‌شوند.

کلمات کلیدی: ارزیابی پتانسیل باد، تابع ویبال، قابلیت اطمینان، همبستگی، مزرعه بادی، آنالیز سناریو

مقالات مستخرج از پایان نامه:

- ۱- خسرو قائمی، محسن اصیلی، ارزیابی پتانسیل انرژی باد در منطقه خواف استان خراسان رضوی، چهارمین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، ایران، تهران، ۱۳۹۳.
- ۲- خسرو قائمی، محسن اصیلی، همبستگی متقابل تولید توان بادی و بار الکتریکی جهت انتخاب پست مناسب برای تزریق توان بادی-بررسی موردی منطقه خواف خراسان رضوی- سومین کنفرانس انرژی بادی ایران، تهران، ۱۳۹۴.

فهرست مطالب

۱	مقدمه
۱-۱	انگیزه تحقیق
۲-۱	اهداف تحقیق
۳-۱	مروری بر فصلهای پایان نامه
۲	روش‌های احتمالی در طراحی توسعه انتقال
۱-۲	مقدمه
۲-۲	پخش بار احتمالی
۳-۲	شبیه‌سازی‌های مونت کارلو
۱-۳-۲	شبیه‌سازی مونت کارلو نامتوالی
۲-۳-۲	شبیه‌سازی مونت کارلو متوالی
۳-۳-۲	نکاتی درباره‌ی دو روش مونت کارلو متوالی و نامتوالی
۴-۲	روش‌های موجود در حل مسئله برنامه‌ریزی احتمالی
۱-۴-۲	بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای حل مسئله برنامه‌ریزی احتمالی
۲-۴-۲	استفاده از ارزیابی ریسک و تحلیل اقتصادی برای حل مسئله برنامه‌ریزی احتمالی
۵-۲	جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۳	ارزیابی پتانسیل انرژی باد در منطقه خواف
۱-۳	مقدمه

- ۳-۲ معرفی منطقه خواف و شناسایی محدوده بادخیز ۳۳
- ۳-۲-۱ معرفی منطقه خواف ۳۳
- ۳-۲-۲ شناسایی محدوده بادخیز ۳۳
- ۳-۳ عوامل مؤثر در مکان‌یابی مزرعه بادی (چالش‌ها و نایقینی‌ها) ۳۵
- ۳-۳-۱ بحث اولیه ۳۵
- ۳-۳-۲ یافتن مکان‌هایی با منابع بادی خوب ۳۶
- ۳-۳-۳ امکان‌سنجی ۳۷
- ۳-۴ چیدمان دقیق نیروگاه‌های توان بادی ۴۲
- ۳-۴-۱ محاسبه توان قابل استحصال با توجه به قانون عمومی تخمینی ۴۴
- ۳-۴-۲ بهینه‌سازی نیروگاه بادی ۵۰
- ۳-۵ ارزیابی پتانسیل انرژی باد و مشخصه‌های احتمالی رژیم بادی منطقه خواف با استفاده از روش آماری ۵۱
- ۳-۵-۱ مروری بر پیشینه مطالعات ۵۲
- ۳-۵-۲ آنالیز داده‌های باد ۵۳
- ۳-۵-۳ روش‌شناسی ۵۳
- ۳-۵-۴ مطالعه موردی منطقه خواف ۵۵
- ۳-۶ نتیجه‌گیری ۶۰
- ۴ قابلیت اطمینان سیستم قدرت در حضور تولید توان بادی ۶۳**
- ۴-۱ مقدمه ۶۴
- ۴-۲ مفاهیم قابلیت اطمینان سیستم قدرت ۶۵

- ۶۵..... ۱-۲-۴ تقسیم‌بندی مطالعات قابلیت اطمینان سیستم قدرت
- ۶۷..... ۲-۲-۴ شاخصهای ارزیابی قابلیت اطمینان
- ۶۹..... ۳-۴ مدل‌سازی باد و نیروگاه بادی در ارزیابی قابلیت اطمینان
- ۶۹..... ۱-۳-۴ روشهای مدل‌سازی نیروگاه بادی در مطالعات قابلیت اطمینان
- ۷۱..... ۲-۳-۴ چالش مطرح در مدلسازیهای مرسوم برای نیروگاه بادی
- ۷۲..... ۴-۴ تحلیل میدانی همبستگی تولید توان بادی و بار الکتریکی
- ۷۳..... ۱-۴-۴ مرجع داده‌ها
- ۷۴..... ۲-۴-۴ تعریف همبستگی
- ۷۶..... ۳-۴-۴ مطالعه همبستگی بین توان بادی و بار
- ۷۹..... ۵-۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
- ۵ برنامه‌ریزی توسعه انتقال با توجه به توسعه منابع بزرگ تولید توان بادی ۸۱**
- ۸۲..... ۱-۵ مقدمه
- ۸۲..... ۲-۵ روش پیشنهادی در مدل‌سازی نیروگاه بادی
- ۸۳..... ۱-۲-۵ ساختار ریاضی و شرح مدل
- ۸۵..... ۳-۵ ساختار برنامه محاسبه شاخصهای قابلیت اطمینان
- ۸۵..... ۱-۳-۵ تعریف مسئله
- ۹۰..... ۴-۵ مطالعه موردی شبکه RBTS
- ۹۰..... ۱-۴-۵ معرفی شبکه

- ۹۱ ۲-۴-۵ نتایج شبیه‌سازی
- ۹۲ ۵-۵ برنامه‌ریزی توسعه انتقال با توجه به توسعه منابع بزرگ تولید توان بادی در منطقه خواف
- ۹۲ ۱-۵-۵ معرفی شبکه مورد مطالعه
- ۹۴ ۲-۵-۵ متدولوژی تحلیل شبکه
- ۹۵ ۳-۵-۵ تولید سناریو
- ۹۸ ۴-۵-۵ نتایج
- ۱۰۴ ۶-۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
- ۱۰۷۷ ۶ جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد
- ۱۰۸۸ ۱-۶ جمع‌بندی و مروری بر کارهای انجام‌شده
- ۱۰۹۹ ۲-۶ نتایج
- ۱۱۱۱ ۳-۶ پیشنهادها
- ۱۱۳ منابع و مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲) دیاگرام منطقی سیستمی با دو عنصر موازی [۴۰] ۲۰
- شکل (۲-۲) ترتیب زمانی فرآیند چرخه‌ی گذر حالت دو عنصر و توالی زمانی فرآیند گذر حالت سیستم موازی در سه سال اول [۴۰] ۲۰
- شکل (۳-۲) شماتیک از فرآیند برنامه‌ریزی پیشنهادی در [۱۴] ۲۸
- شکل (۱-۳) موقعیت شهرستان خواف در استان خراسان رضوی [۷۶] ۳۳
- شکل (۲-۳) برشی از نقشه بادی ایران. محدوده قرمز رنگ منطقه خواف را نشان می‌دهد [۷۷] ۳۴
- شکل (۳-۳) مناطق بادخیز منطبق بر اطلاعات میدانی و تصاویر ماهواره‌ای ۳۵
- شکل (۴-۳) پیکربندی مکان مزرعه بادی؛ قانون عمومی برای چیدمان نیروگاه توان بادی داشتن فاصله در یک ردیف برابر با $5D$ (قطر رتور) و یک فاصله برابر با $7D$ بین ردیف توربین‌ها [۷۸] ۴۳
- شکل (۵-۳) کاهش فاصله در یک ردیف بین توربین‌ها از $5D$ به $3D$ در صورت داشتن باد در یک یا دو جهت متضاد [۷۸] ۴۴
- شکل (۶-۳) فاصله بین توربین‌ها- ناحیه تحت پوشش توربین در چیدمان ردیفی ۴۵
- شکل (۷-۳) فاصله بین توربین‌ها در یک مزرعه بزرگ- ناحیه تحت پوشش باد توربین در آرایش چند ردیفی ۴۶
- شکل (۸-۳) نمایش وضعیت بهره‌برداری زمین‌های معدنی منطقه خواف در تصاویر ماهواره‌ای. رنگ سبز مربوط به زمین‌های در حال بهره‌برداری، بنفش مربوط به زمین‌های دارای درخواست اکتشاف، زرد مربوط به زمین‌های دارای گواهی اکتشاف و زیتونی مربوط به زمین‌های دارای پروانه اکتشاف ۴۷
- شکل (۹-۳) نمایش زمین‌های معدنی در حال بهره‌برداری منطبق بر تصاویر ماهواره‌ای در منطقه خواف. رنگ سبز مربوط به زمین‌های در حال بهره‌برداری، زمین‌های سیاه‌رنگ مربوط به ۴ مزرعه بادی ۴۹
- شکل (۱۰-۳) سرعت متوسط باد در ماه‌های مختلف به ازای ۳ ارتفاع ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متر در منطقه خواف ۵۶
- شکل (۱۱-۳) تغییرات ساعتی متوسط سرعت باد به ازای ۳ ارتفاع ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متر در منطقه خواف ۵۷

- شکل (۳-۱۲) توزیع فراوانی متوسط سرعت باد در ارتفاع ۴۰ متر در منطقه خواف ۵۸
- شکل (۳-۱۳) دیاگرام گلیاد در ارتفاع‌های ۳۰ و ۳۷/۵ متر در منطقه خواف ۵۹
- شکل (۴-۱) نمونه‌های از یک الگوی نامطلوب توان بادی روزانه ۷۲
- شکل (۴-۲) مدل توربین بادی ۷۴
- شکل (۴-۳) همبستگی تولید بادی و بار الکتریکی پست آسباد ۷۷
- شکل (۴-۴) همبستگی تولید بادی و بار الکتریکی پست سنگان ۷۷
- شکل (۴-۵) خلاصه همبستگی سالانه بین تولید بادی و بار پست آسباد ۷۸
- شکل (۴-۶) همبستگی سالانه بین تولید بادی و بار پست سنگان ۷۸
- شکل (۵-۱) گام‌های اساسی مدل‌سازی مزرعه بادی به روش پیشنهادی ۸۳
- شکل (۵-۲) محاسبه EENS و LOLP به کمک منحنی تداوم بار ۸۸
- شکل (۵-۳) روندنما عملکرد برنامه محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان ۸۹
- شکل (۵-۴) شبکه RBTS همراه با مزرعه بادی ۹۰
- شکل (۵-۵) نمودار تک‌خطی شبکه 400 KV خراسان ۹۳
- شکل (۵-۶) نمودار تک‌خطی شبکه 132 KV رینگ تربت جام-شادمهر ۹۳
- شکل (۵-۷) منحنی تداومی بار پیک شبکه خراسان ۹۷
- شکل (۵-۸) پیش‌بینی بار مرکز مصرف خواف ۹۷
- شکل (۵-۹) تأثیر نفوذ توان بادی و رشد بار بر شاخص قابلیت اطمینان ۱۰۱
- شکل (۵-۱۰) تأثیر پیکربندی مزارع بادی بر شاخص EENS ۱۰۲
- شکل (۵-۱۱) متوسط درصد بارگذاری خطوط فوق توزیع در حضور پست خواف ۱۰۳
- شکل (۵-۱۲) متوسط درصد بارگذاری خطوط فوق توزیع در غیاب پست خواف ۱۰۳

فهرست جداول

- جدول (۱-۲) روش‌ها و تکنیک‌های موجود در پخش بار احتمالی ۱۰
- جدول (۱-۳) توان الکتریکی قابل استحصال از منطقه خواف در حالت‌های مختلف زمین‌های معدنی و توان نامی توربین‌های انتخابی مزارع ۵۰
- جدول (۲-۳) سرعت متوسط سالیانه در ۳ ارتفاع و ثوابت توزیع ویبال سالیانه ۵۶
- جدول (۳-۳) متوسط چگالی توان و انرژی باد در ۴ ارتفاع برای منطقه خواف ۵۹
- جدول (۴-۳) کلاس‌بندی چگالی توان بادی یک منطقه [۹۴] ۶۰
- جدول (۱-۵) نتایج شبیه‌سازی شبکه RBTS و مقادیر LOLE محاسبه شده (hr/year) ۹۱
- جدول (۲-۵) سطوح توان بادی ۹۶
- جدول (۳-۵) تقاضای بار صنعتی پست ۴۰۰/۱۳۲ خواف ۹۷
- جدول (۴-۵) سناریوها و نتایج بر روی شبکه انتقال و فوق توزیع خراسان ۱۰۰

فصل اول

مقدمه

۱-۱ انگیزه تحقیق

با تأکید هرچه بیشتر بر کاهش کربن و ترویج اقتصاد نگهداشت پذیر، منابع انرژی تجدید پذیر بیشتر و بیشتر در سیستم قدرت الکتریکی در سراسر جهان توسعه پیدا کرده‌اند. در میان چندین گزینه تجدید پذیر، باد خود را به‌عنوان فناوری امیدبخش ثابت کرده است. باد با سرعت زیادی فناوری تولید توان در مقیاس بسیار چشمگیر در سراسر دنیا شده است. برخلاف پیشرفت سریع انرژی بادی، همچنان چالش‌های بزرگی در سر راه توسعه آن‌ها در شبکه الکتریکی وجود دارد. به علت تغییر بسیار زیاد و پیش‌بینی محدود انرژی بادی، ارزیابی توسعه نیروگاه‌های بادی در سیستم قدرت به‌صورت کارا از دیدگاه فنی و اقتصادی بر کل مجموعه صنعت برق ضروری است.

اساسی‌ترین موردی که در برنامه‌ریزی توسعه انتقال^۱ TEP با در نظر گرفتن توسعه انرژی بادی مطرح است تخمین میزان پتانسیل انرژی بادی منطقه بادخیز است. این کار سنگ بنا و انگیزه اصلی برای سرمایه‌گذاری تولید توان بادی در یک منطقه است. اگر نتیجه این تخمین رضایت‌بخش نباشد، سرمایه‌گذاری در آن منطقه کاملاً اشتباه خواهد بود. از طرفی انجام این مطالعه باعث شناخت هرچه بیشتر شرایط واقعی مورد مطالعه و آگاهی از نایقینی‌ها در برنامه‌ریزی توسعه شبکه خواهد شد.

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌هایی که برنامه‌ریزی با توسعه و پیشرفت فناوری‌های تولید توان روبروست، بحث نایقینی‌ها است. این نایقینی‌ها با دو ویژگی ذاتی ظاهر می‌شوند به‌طوری‌که آن‌ها را در دودسته اتفاقی^۲ و غیر اتفاقی^۳ قرار می‌دهند.

دسته اول انحراف آن پارامترهایی هستند که تکرارپذیرند و یک توزیع احتمال شناخته‌شده دارند و بنابراین، آمار (احتمال) آن‌ها را می‌توان بر اساس مشاهدات گذشته به دست آورد. از منابع ایجادکننده این دسته می‌توان به در دسترس بودن تجهیزات سیستم (نرخ خروج اجباری ژنراتورها، خطوط، و دیگر

^۱ Transmission Expansion Planning

^۲ Random

^۳ Non-random

اجزای سیستم) و فناوری‌های جدید تولید مانند مزارع بادی و واحدهای فتوولتائیک نام برد. دسته دوم تغییر شکل آن دسته از پارامترها هستند که تکرارناپذیرند و بنابراین آمار آن‌ها از مشاهدات گذشته قابل دستیابی نیست. نایقینی توسعه تولید و سیاست‌های دولت در این دسته قرار دارند.

به‌طور سنتی، توسعه تولید و توسعه انتقال زیر وظایفی از برنامه‌ریزی سیستم هستند که معمولاً توسط شرکت برق قانون‌گذار انجام می‌شوند. عموماً برنامه‌ریزی توسعه انتقال بیانگر یک مسئله توسعه شبکه انتقال قدرت است تا به‌صورت بهتر رشد تقاضا را پاسخ دهد درحالی‌که تعدادی از قیدهای اقتصادی و فنی را نیز در نظر داشته باشد. هنگامی که نایقینی‌ها در یک مطالعه با داده‌های مبهم (داده‌هایی که با صراحت قابل بیان نیستند) همراه بشوند، بهترین چاره کار استفاده از آنالیز سناریو و انجام تحلیل‌ها برای یک سری سناریوها محتمل و کاندید می‌باشد. لذا برنامه‌ریزان به دنبال برنامه‌های انعطاف‌پذیر هستند، برنامه‌هایی که با هر سناریوی بالقوه در کمترین هزینه وفق پذیری قابل اجرا باشند.

برنامه‌ریزی توسعه شبکه یک مسئله بلندمدت است و معمولاً بازه زمانی بیشتر از پنج سال را دربر می‌گیرد. هنگامی که تولید توان بادی در یک برنامه‌ریزی چشمگیر باشد، می‌توان مسائل دینامیکی تولید توان بادی را در سمت بهره‌برداری حل‌شده فرض کرد. به عبارتی بلندمدت بودن افق زمانی، مطالعه استاتیکی را پیشنهاد می‌دهد. استفاده از سناریوها، هم ابزاری برای اجرای مطالعه استاتیکی و هم روشی برای پوشش دسته‌ای از نایقینی‌ها است.

حدود یک دهه پیش، ظرفیت نصب‌شده مربوط به تولید بادی فقط بخش بسیار کوچکی از تمام منابع تولید در سیستم‌های قدرت به شمار می‌آمد و اثرات آن بر شرایط سیستم قابل اغماض بود. اما در شرایط کنونی از طرفی با افزایش نفوذ توان بادی در سیستم‌های قدرت، مقدار توان بادی با مقدار توان تولیدی واحدهای مرسوم موجود قابل مقایسه شده است و از سوی دیگر سیستم‌های قدرت در درجه اول بر ارائه منبع تولید توان قابل اطمینان و اقتصادی برای پاسخ به مشتریان تأکید می‌کنند. برنامه‌ریزان

سیستم نیز برای توسعه و گسترش زیرساخت‌های سیستم در افق‌های زمانی متفاوت، باید نقش قابل ملاحظه واحدهای بادی را بر شرایط سیستم به‌ویژه سطح قابلیت اطمینان شبکه، در نظر داشته باشند.

از دیدگاه برنامه ریزان و بهره‌برداران شبکه، با توجه به اینکه مطالعه و ارزیابی سطح قابلیت اطمینان شبکه تولید و انتقال سیستم قدرت یکی از نیازهای مبرم در فرآیندهای بهره‌برداری و برنامه‌ریزی شبکه است، قابلیت اطمینان سیستم، مؤثرترین شاخص در تحلیل سناریوهای انتخاب شده و تعیین مکان و زمان احداث تجهیزات جدید خواهد بود لذا می‌بایست سیاست‌های تشویقی از سوی برنامه ریزان و بهره‌برداران سیستم به‌منظور توسعه مزارع بادی در شبکه به‌گونه‌ای صورت گیرد که بهبود بیشتری را متوجه سطح قابلیت اطمینان سیستم گرداند. در این راستا محاسبه دقیق و صحیح شاخص‌های قابلیت اطمینان یکی از دغدغه‌های مهم برنامه ریزان و بهره‌برداران شبکه تولید و انتقال قدرت است. از طرفی با توجه به نیاز به احداث واحدهای تولید بادی جدید، از جمله پیچیدگی‌های مرتبط با محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه، چگونگی مدل‌سازی و نیز بررسی اثر تولید واحدهای بادی بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت است. شایان‌ذکر است که در این دست مطالعات، باید تأثیر هم‌زمانی الگوهای فصلی و ساعتی سرعت باد و بار در یک نقطه از شبکه بررسی شود.

۱-۲ اهداف تحقیق

اصلی‌ترین هدف در این پژوهش بررسی وضعیت شبکه انتقال خراسان با تمرکز مطالعه بر شبکه فوق توزیع در منطقه خواف بعد از حضور منابع بزرگ تولید توان بادی و رشد بار صنایع منطقه است. بدین منظور، مدلی برای تولید توان در مزارع بادی ارائه می‌شود. با استفاده از دانش تخصصی مشاورین پژوهش و درخواست‌های مطالعاتی آن‌ها به‌عنوان شرکت قانون‌گذار سناریوهای محتمل و اکیداً بااهمیت با استفاده از ارزیابی قابلیت اطمینان بررسی می‌شوند.

در این ارزیابی، میزان بهبود در شاخص قابلیت اطمینان در سطوح مختلف تولید توان بادی و بار الکتریکی تحلیل می‌شود. همچنین پیکربندی مزارع بادی در آرایش‌های مختلف و رشد بار الکتریکی بر

اساس شاخص قابلیت اطمینان مقایسه خواهند شد. وضعیت بارگذاری خطوط فوق توزیع بر اساس شاخص حداکثر بارگذاری در بهره‌برداری مشخص خواهد شد. در هر مجموعه از مطالعات بنا بر تغییرات شاخص قابلیت اطمینان پیشنهادی برای وضعیت شبکه ارائه می‌شود.

۳-۱ مروری بر فصلهای پایان نامه

در فصل دوم به ارائه گزارش کاملی در رابطه با شبیه‌سازی‌های مونت کارلو به‌عنوان ابزاری در برنامه‌ریزی سیستم قدرت به‌منظور در نظر گرفتن ویژگی‌های احتمالی موجود و یا منتخب در مطالعه سیستم قدرت پرداخته شده است. در فصل سوم ارزیابی پتانسیل توان بادی در منطقه خواف بنا به نیاز بنیادین مطالعه توسعه مزارع بادی و تقاضای شرکت قانون‌گذار انجام خواهد شد. در فصل چهارم مبانی و مفاهیم قابلیت اطمینان به همراه مدل‌سازی‌های مزارع بادی به‌کاررفته ارائه خواهد شد. همچنین وضعیت همبستگی تولید توان بادی و بار الکتریکی در منطقه مطالعه می‌شود. در فصل پنجم با ارائه مدل پیشنهادی برای نیروگاه‌های بادی و معرفی الگوریتم قابلیت اطمینان به‌کاررفته در مطالعه، سناریوهای منتخبی در تحلیل شبکه مطالعه خواهند شد. در فصل ششم، نتایج به‌طور خلاصه جمع‌بندی و پیشنهادهایی برای ادامه تحقیق ارائه می‌گردد.

فصل دوم

روش‌های احتمالی در طراحی توسعه انتقال

(مروری بر سابقه موضوع)

۱-۲ مقدمه

در این فصل ابتدا به ارائه چند روش کلی جهت برنامه‌ریزی احتمالی شبکه قدرت ترکیبی تولید و انتقال پرداخته شده است. اصولاً روش‌های احتمالی بر اساس ویژگی ذاتی و نیز پوشش نایقینی‌های اجزای سیستم مورد مطالعه گسترش داده شده‌اند. در هر یک از این روش‌ها به گزارش تکنیک‌های جدیدتر مطرح شده در قالب این روش‌های کلی پرداخته شده است. با توجه به اینکه در این پژوهش بیشتر مسائل قابلیت اطمینان و کفایت سیستم مورد توجه است، به استراتژی‌های موجود در این زمینه بیشتر توجه شده است. مسائل برنامه‌ریزی به الگوریتمی جهت پیدا کردن بهترین پاسخ نیازمندند. بنابراین الگوریتم‌های مطرح شده در این بحث به همراه خصوصیات و نقاط قوت و ضعف هر یک از آن‌ها معرفی شده است.

روش‌های احتمالی در طراحی توسعه انتقال با وجود نایقینی را می‌توان به دودسته کلی تقسیم کرد:

- پخش بار احتمالی^۱
- ارزیابی قابلیت اطمینان

که در ادامه هر یک به تفصیل بر حسب روش‌های موجود مطالعه شده توضیح داده خواهند شد.

۲-۲ پخش بار احتمالی

پخش بار با فراهم آوردن اطلاعاتی چون ولتاژ باس‌ها و توان عبوری از خطوط یکی از مهم‌ترین ابزارها برای آنالیز و تحلیل عملکرد سیستم قدرت است. ورودی‌های پخش بار ساختار شبکه، بار باس‌ها و مشخصات خطوط است که همگی مقادیر ثابتی دارند. از آنجاکه شرایط سیستم قدرت به‌طور مداوم (به دلایل متعدد چون تغییر بار باسها، تغییر توان تولیدی ژنراتورها و قطع خطوط) در حال تغییر است برای ارزیابی شبکه تحت شرایط مختلف نیاز به اجرای پخش بارهای متعدد است. از طرفی به دلیل اینکه

^۱ Probabilistic Load Flow

سیستم قدرت با نفوذ روزافزون منابع تجدید پذیر با مشخصه‌های تصادفی (نظیر نیروگاه بادی و خورشیدی) روبروست نیاز به محاسبات متنوع پخش بار در نقاط کاری مختلف سیستم مطرح می‌شود. پخش بار احتمالی ابزاری مناسب برای ارزیابی کارایی سیستم قدرت در محدوده کاری محتمل آن است [۱]. با تعریف متغیرهای ورودی تصادفی پخش بار، امکان تعیین رفتار احتمالی متغیرهای خروجی فراهم خواهد شد. پخش بار احتمالی با تأمین کردن اطلاعاتی در نقاط کار متنوع سیستم قدرت، دارای کاربرد وسیعی در مطالعات طراحی سیستم قدرت است.

پخش بار احتمالی نخستین بار در سال ۱۹۷۴ توسط برکاسوا [۲] مطرح شد. در این روش، شبکه با مدل DC نمایش داده می‌شود و با فرض مستقل بودن بار باس‌ها از یکدیگر ابتدا پخش بار سنتی (قطعی) اجرا می‌شود. در این پخش بار، بارها مقدار متوسط تعریف شده خود را دارند. پاسخ پخش بار نقطه بهره‌برداری سیستم را نشان می‌دهد و معادلات پخش بار حول آن خطی می‌شوند. علاوه بر روش بالا تاکنون روش‌های متعددی در پخش بار احتمالی سیستم قدرت ارائه شده‌اند که در یک دسته‌بندی کلی در یکی از دسته‌های زیر جای می‌گیرند [۱]:

- روش‌های تحلیلی (Analytical methods) [۳-۶].
- روش‌های تقریبی (Approximatical techniques) [۷].
- روش‌های ابتکاری (Heuristic procedures) [۸].
- شبیه‌سازی مونت کارلو (Monte Carlo Simulation) [۹, ۱۰].

جدول (۱-۲) برخی از تکنیک‌های مختلف که از خانواده این روش‌های مطرح شده هستند را ذکر می‌کند. در بین این روش‌ها تکنیک‌های مونت کارلو، سرشماری حالت و تخمین نقطه^۱ در تحقیقات مختلف بیشتر بکار رفته‌اند. بعضی از این روش‌ها مثل سری تیلور و FOSMM^۲ اشکالاتی از قبیل نیاز به محاسبه مشتقات با توجه به متغیرهای تصادفی دارند. همچنین روش Gram Charlier به آسانی استفاده

^۱ Point Estimation Method

^۲ First-Order Second-Moment Method

می‌شود، اما دارای محاسبات سنگینی است [۱۱]. مرجع [۱۲] از روش تخمین نقطه برای مدل‌سازی و به دست آوردن نایقینی‌ها استفاده کرده است. این در حالی است که نقایص این روش در مرجع [۱۳] برشمرده شده است. این معایب در ادامه ارائه شده‌اند:

- این روش به‌طور مستقیم نمی‌تواند نایقینی‌های ساختار شبکه را (خرابی‌های تصادفی در اجزای انتقال) مدل کند. از آنجایی که خرابی‌های اجزا مرتبط با یک تغییر تصادفی در توپولوژی شبکه است، با استفاده از مقدار میانگین و انحراف معیار یک متغیر ورودی نمی‌تواند ارائه شود.
- این روش نمی‌تواند با همبستگی بین متغیرهای ورودی (از قبیل بارهای باس‌ها) سروکار داشته باشد، زیرا که این روش بر این فرض استوار است که همه متغیرهای ورودی مستقل هستند. اگرچه روش تخمین نقطه ممکن است قادر به مدل کردن همبستگی از نقطه نظر ریاضی باشد. آن‌ها یا نمی‌توانند عملکرد با محاسبات بالا برای مسائل پخش بار را داشته باشند و یا نمی‌توانند متغیرهای توزیع غیرمتمقارن را در نظر بگیرند.

جدول (۱-۲) روش‌ها و تکنیک‌های موجود در پخش بار احتمالی

روش مونت کارلو	روش‌های ابتکاری	روش‌های تقریبی	روش‌های تحلیلی	روش‌های کلی
-	Fuzzy logic	FOSMM, PEMs, Taylor series, Clustering, Gram Charlier	FFT ^۱ , CM ^۲ , State enumeration	تکنیک‌ها

از میان روش‌های ارائه شده شبیه‌سازی مونت کارلو جامع‌ترین ابزاری است که امکان مدل‌سازی نا-یقینی‌های مختلف را در مطالعات پخش بار احتمالی فراهم آورده و به‌عنوان یک الگوریتم تحلیل کفایت در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم استفاده می‌شود. روش مونت کارلو می‌تواند عوامل تصادفی پیچیده

^۱ Fast Fourier Transform

^۲ Cumulant Method

را در نظر بگیرد که نسبت به بسیاری از روش‌ها مثل روش‌های تحلیلی، به دلیل پیچیدگی ذاتی از آن‌ها غفلت می‌شود. این روش را می‌توان به دو نوع نمونه‌برداری متوالی^۱ و نمونه‌برداری نامتوالی^۲ تقسیم کرد. هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خاصی دارند و نمی‌توان روشی با کاربرد عمومی را در نظر داشت. انتخاب روش مناسب به مسئله‌ی تحت بررسی، داده‌های موردنیاز و پیچیدگی ارزیابی بستگی دارد [۱۴].

۲-۳ شبیه‌سازی‌های مونت کارلو

در شبیه‌سازی مونت کارلو شاخص‌ها با شبیه‌سازی فرآیند حقیقی و رفتار تصادفی سیستم تخمین زده می‌شوند که این مسئله مانند یک سری از تجربیات تلقی می‌شود. اساس این روش مبتنی بر تکرار نمونه‌های تصادفی جهت محاسبات آماری است [۱۵].

برخی از مفاهیم و اصول این روش را می‌توان با آزمایش پرتاب یک سکه نشان داد. احتمال آمدن شیر یا خط در پرتاب یک سکه برابر $\frac{1}{2}$ است. حال می‌توان با شبیه‌سازی و تعیین فراوانی نسبی هر یک از دو روی سکه احتمال هر حالت را تقریب زد.

$$P(\text{head}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{H}{N} \right) \quad (1-2)$$

که H تعداد شیرها در طی نمونه‌برداری و N تعداد پرتاب‌ها است.

هرگاه یک سیستم واقعی مورد آزمایش قرار گیرد، وقوع رخدادها متأثر از رفتار ذاتی عناصر و متغیرهای آن سیستم است. ولی وقتی که آن سیستم شبیه‌سازی می‌شود، وقوع رخدادها بستگی به مدل‌ها و توزیع احتمالی دارد که برای نمایش عناصر و متغیرها به‌کاربرده می‌شود. این مدل‌ها و توزیع‌های احتمالی در شبیه‌سازی با به کار بردن اعداد تصادفی^۳ و تبدیل آن‌ها به تابع‌های توزیع فراوانی مناسب برای نمایش رفتار عناصر و متغیرهای موردنظر صورت می‌گیرد.

^۱ Sequential

^۲ Nonsequential

^۳ Random

به دو دلیل روش مونت کارلو مستقیم زمان بر است. دلیل اول در هر نمونه برداری برای تعیین حالت‌های خراب از پخش بار استفاده می‌شود و دلیل دوم حالت‌های مشابه زیادی در شبیه‌سازی نمونه برداری شده و مشخصات آن‌ها به‌طور تکراری حساب می‌شود. برای حل مشکل اول در مرجع [۱۶] برای ارزیابی حالت‌ها به‌جای پخش بار، شبکه عصبی کاررفته است و در مرجع [۱۷] برای حل مشکل دوم نیز دسته‌بندی حالت‌های مشابه به‌وسیله شبکه عصبی پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۸] از هر دو تکنیک مذکور برای کاهش زمان محاسبه مونت کارلو مستقیم استفاده شده است. روشی دیگر برای کاهش زمان محاسبه ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم ترکیبی تولید و انتقال روش هرس کردن^۱ فضای حالت است. در این روش ابتدا به‌وسیله الگوریتم‌های هوشمند حالت‌های سالم سیستم با احتمال بالا را جستجو شده، سپس این حالت‌های موفق را از فضای کل حالت جدا کرده و برای فضای باقیمانده از مونت کارلو استفاده می‌شود.

برای پیدا کردن حالت‌های موفق با احتمال بالا، در مرجع [۱۹] از الگوریتم ژنتیک، در [۲۰] از الگوریتم باینری پرندگان استفاده شده و در [۲۱] مقایسه‌ای کلی بین کارایی الگوریتم‌های مختلف برای این هدف انجام شده است. علاوه بر روش‌های ذکر شده در بالا در مرجع [۲۲] از الگوریتم ژنتیک و در [۲۳] از الگوریتم پرندگان مستقیماً برای نمونه برداری استفاده شده است.

در مرجع [۲۴] مقایسه‌ای کلی بین روش مونت کارلو متوالی و مونت کارلو نامتوالی برای ارزیابی قابلیت اطمینان ترکیبی تولید و انتقال کاربرد در این زمینه انجام شده است. در [۲۵، ۲۶] تأثیرات آب‌وهوا بر روی شاخص‌های قابلیت اطمینان در سطح ترکیب تولید و انتقال بررسی شده است. در مرجع [۲۷] اثر نایقینی در پیش‌بینی بار بر روی این شاخص‌ها مطالعه شده است و در مرجع [۲۸] شاخص‌های قابلیت اطمینان در سطح ترکیبی تولید و انتقال با در نظر گرفتن بارهای متغیر بازمان با استفاده از روش مونت کارلو متوالی محاسبه شده است. اثر مدیریت تقاضای بار بر روی شاخص‌های قابلیت اطمینان سطح ترکیبی تولید و انتقال در [۲۹] بررسی شده و در مرجع [۳۰] پیش‌بینی این شاخص‌ها با استفاده

^۱ Pruning

از روش مونت کارلو متوالی انجام شده است. همچنین در مرجع [۳۱] توزیع‌های احتمالی برای شاخص‌های ذکر شده به دست آمده است.

در مطالعات برق بادی، به مدلی دقیق برای پیش‌بینی تغییرات سرعت باد در مزارع بادی و مدل‌هایی مناسب برای ژنراتورهای توربین بادی (WTGs^۱) نیاز است. در [۳۲] روشی مبتنی بر توزیع ویبال^۲ برای تخمین داده‌های سرعت باد در مطالعات برق بادی بکار رفته است و در [۳۳] یک الگوریتم سرعت باد ساعتی با استفاده از سری زمانی ARMA^۳ ارائه شده است. در مرجع [۳۴] با استفاده از مفهوم روش مارکوف مدلی برای توربین‌های بادی در مطالعات قابلیت اطمینان پیشنهاد شده است. در [۳۵] مدل چندحالتی با در نظر گرفتن نرخ خروج اجباری (FOR^۴) ارائه و ثابت شده است که در نظر گرفتن FOR تأثیر چندانی بر شاخص‌های مدل تولید ندارد. در مرجع [۳۶] مدل احتمالی برای انرژی خروجی توربین‌های بادی پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۵] نیز مدل‌های احتمالی مزارع بادی با استفاده از دسته‌بندی^۵ توان خروجی توربین‌های باد ارائه کرده است.

نایقینی در توان تولیدی نیروگاه‌های بادی به دلیل ماهیت متغیر و نوسانی سرعت باد باعث آن شده است که قابلیت اطمینان کل سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های بادی محدود شود. به همین دلیل افزایش نفوذ نیروگاه بادی باعث ریسک بالا در قابلیت اطمینان سیستم قدرت می‌شود. در مرجع [۳۷] با استفاده از روش سرشماری حالت شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های بادی محاسبه شده و تأثیر ضریب نفوذ مزرعه بادی در سیستم قدرت بر روی این شاخص‌ها مطالعه شده است. در مرجع [۳۸] این شاخص‌ها با استفاده از روش مونت کارلو متوالی محاسبه شده است. در مرجع

^۱ Wind Turbine Generators

^۲ Weibull Distribution

^۳ Auto Regressive Moving Average

^۴ Force Outage Rate

^۵ Clustering (k-means)

[۳۹] طراحی سیستم ترکیب تولید و انتقال با حضور نیروگاه‌های بادی با در نظر گرفتن ترکیب شاخص‌های قطعی و احتمالی انجام گرفته است.

۱-۳-۲ شبیه‌سازی مونت کارلو نامتوالی

شبیه‌سازی مونت کارلو نامتوالی روش نمونه‌برداری حالت نیز نامیده می‌شود. این روش کاربرد فراوانی در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت دارد. مبنای این روش این حقیقت است که حالت سیستم ترکیبی از حالت عناصر آن است و حالت هر عنصر را می‌توان از طریق نمونه‌برداری از احتمال آن عنصر به دست آورد.

می‌توان هر عنصر را طبق توزیع یکنواخت بین بازه‌ی $[0,1]$ مدل‌سازی کرد. فرض می‌شود هر عنصر فقط دارای دو حالت سالم و خراب بوده و پدیده‌های خرابی هر عنصر مستقل از هم هستند. s_i بیانگر حالت عنصر i ام و Q_i احتمال خرابی آن در نظر گرفته می‌شود. عدد تصادفی R_i را که به‌طور یکنواخت بین $[0,1]$ توزیع شده است برای عنصر i تولید می‌شود:

$$s_i = \begin{cases} 0 & (\text{success}) \text{ if } R_i > Q_i \\ 1 & (\text{failure}) \text{ if } 0 < R_i < Q_i \end{cases} \quad (2-2)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۲-۲) وضعیت سالم بودن یا خراب بودن عنصر i ام مشخص می‌شود. با تکرار این روند می‌توان وضعیت تمام عناصر را مشخص نمود. بدین ترتیب یک حالت سیستم به‌صورت تصادفی تولید می‌شود. برای سیستمی با N عنصر، حالت سیستم با بردار s بیان می‌گردد.

$$s = (s_1, \dots, s_i, \dots, s_N) \quad (3-2)$$

پس از انتخاب حالت سیستم طی نمونه‌برداری، برای تشخیص اینکه حالت موردنظر حالت خراب است یا نه باید سیستم را تحلیل نمود و در صورت خراب بودن، آن حالت به‌عنوان حالت خراب سیستم ثبت می‌شود.

در این روش برای محاسبه‌ی شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم، تعیین احتمال هر یک از حالت‌ها ضروری است. در این روش با توجه به این اصل که هرگاه تعداد نمونه به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد، احتمال وقوع حالت s سیستم از رابطه‌ی (۴-۲) محاسبه می‌شود:

$$P(s) = \frac{n(s)}{N_s} \quad (4-2)$$

که N_s تعداد نمونه‌ها و $n(s)$ تعداد وقوع حالت s در طی نمونه‌برداری است [۴۰].

۲-۳-۱- ارزیابی قابلیت اطمینان با استفاده از مونت کارلو نامتوالی

می‌توان برای مدل‌سازی نایقینی و خطاهای احتمالی تجهیزات شبکه در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت از مونت کارلو نامتوالی بهره برد. روند ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت توسط این روش به ترتیب زیر است [۴۰]:

(۱) انتخاب یک وضعیت بهره‌برداری شبکه:

بر اساس اطلاعات مربوط به بار و احتمال وقوع خطا، یک وضعیت بهره‌برداری شبکه انتخاب می‌شود و در این وضعیت، حالت در مدار بودن یا خروج تجهیزات سیستم به صورت تصادفی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو تعیین می‌گردد.

برای واحدهای تولیدی و خطوط انتقال، وضعیت دو حالتی در نظر گرفته می‌شود:

$$n_{g,i} = \begin{cases} 1 & \text{if } x \geq F(G_i) \\ 0 & \text{if } x < F(G_i) \end{cases} \quad (5-2)$$

$$n_{l,j} = \begin{cases} 1 & \text{if } x \geq F(L_j) \\ 0 & \text{if } x < F(L_j) \end{cases} \quad (6-2)$$

در این روابط $n_{g,i}$ و $n_{l,j}$ به ترتیب مشخص‌کننده وضعیت واحد تولیدی نام و خط انتقال نام می‌باشند. اگر مقدار این شاخص‌ها یک باشد نشان‌دهنده در مدار بودن تجهیز و اگر مقدارشان صفر باشد

بیانگر خروج تجهیز از شبکه می‌باشد. $F(L_i)$ و $F(G_i)$ به ترتیب احتمال خروج واحد تولیدی نام و خط‌زام است و x متغیر تصادفی دارای توزیع یکنواخت در بازه $[0, 1]$ می‌باشد.

(۲) بررسی توازن بین تولید و مصرف توان و رعایت قیود در شبکه:

ممکن است با توجه به احتمال خروج واحدهای تولیدی، توازن بین تولید و مصرف در شبکه دچار تغییر شود. به همان دلیل ذکر شده یا به علت خروج خطوط، ممکن است قیود شبکه نیز نقض گردند.

(۳) متعادل‌سازی شبکه:

برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان باید شبکه در حالت تعادل (قیود رعایت شده باشند) قرار داشته باشد، بنابراین با استفاده از اعمال اصلاحی که شامل توزیع مجدد توان بین ژنراتورها^۱ و قطع بار^۲ است، لازم است شبکه آرام شود و قیود مرتفع گردند.

برای انجام اعمال اصلاحی که در بالا ذکر شد از پخش بار بهینه (OPF^۳) استفاده می‌شود. تابع هدف در OPF کمینه کردن بار قطع شده در سیستم با در نظر گرفتن قیود بهره‌برداری است. در پخش بار بهینه ابتدا سعی می‌شود با برنامه‌ریزی مجدد تولید ژنراتورها قیود نقض شده برطرف گردند، در صورتی که این کار امکان‌پذیر نباشد، بار شین‌ها طوری قطع می‌شود که با کمترین میزان قطع بار شبکه آرام شود و قیود در محدوده مجاز قرار گیرند. در نتیجه می‌توان با انجام پخش بار بهینه، مقادیر بار قطع شده در شین‌ها را محاسبه کرد.

(۴) محاسبه میزان بار قطع شده در هر تکرار در صورت بروز قطع بار

(۵) تکرار مراحل فوق تا زمانی که معیار همگرایی موردنظر حاصل گردد.

^۱ Power Redispatch

^۲ Load Shedding

^۳ Optimal Power Flow

یکی دیگر از خروجی‌های شبیه‌سازی مونت کارلو، نحوه توزیع احتمالی پارامترها است که حاوی اطلاعات باارزشی است. برای به دست آوردن این توزیع، بازه تغییرات مقادیر آن پارامتر (مثل میزان قطع بار) که از شبیه‌سازی به دست آمده است، به چند زیر بازه مساوی تقسیم می‌شود. سپس احتمال مربوط به هر زیر بازه با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Prob}(i) = \frac{N_i}{N_s} \quad (7-2)$$

که در آن N_i تعداد تکرارهایی از شبیه‌سازی مونت کارلو را نشان می‌دهد که قطعی بار محاسبه شده در آن‌ها در زیر بازه‌ی i ام واقع شده است [۴۰].

۲-۳-۲ شبیه‌سازی مونت کارلو متوالی

منظور از شبیه‌سازی مونت کارلو متوالی، انجام شبیه‌سازی در یک بازه دارای ترتیب زمانی است. برای ایجاد چرخه مجازی گذر بین حالت‌های سیستم، از رهیافت‌های متفاوتی می‌توان استفاده کرد. نمونه‌گیری تداوم حالت، متداول‌ترین روش برای ایجاد چرخه گذر حالت است. رهیافت نمونه‌گیری گذر حالت در مرجع [۴۰] بررسی شده است. رهیافت نمونه‌گیری تداوم حالت، مبتنی بر نمونه‌گیری از توزیع احتمال تداوم حالت یک عنصر است. توزیع احتمال تداوم حالت فرایندهای کارکرد و تعمیر یک عنصر دو حالت معمولاً به صورت نمایی در نظر گرفته می‌شود [۴۱]. شبیه‌سازی مونت کارلو متوالی به صورت خلاصه شامل مراحل زیر است [۴۰]:

گام ۱: حالت‌های اولیه همه‌ی عناصر سیستم را تعیین می‌شود و معمولاً فرض می‌شود که در شرایط اولیه همه‌ی عناصر سیستم در حالت سالم قرار دارند.

گام ۲: از مدت اقامت هر عنصر در حالت فعلی آن با استفاده از توزیع احتمالی نمونه‌برداری شود. برای مثال متغیر تصادفی T با توزیع نمایی دارای تابع توزیع احتمالی به صورت رابطه‌ی (۲-۸) است [۴۰]:

$$f_T(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (۸-۲)$$

که λ مقدار متوسط توزیع است و تابع توزیع احتمال تجمعی آن به صورت:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (۹-۲)$$

ارتباط بین تابع توزیع احتمال تجمعی و عدد تصادفی R با توزیع یکنواخت، به صورت

رابطه‌ی (۱۰-۲) بیان می‌شود:

$$R = F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (۱۰-۲)$$

طبق روش تبدیل معکوس، داریم:

$$T = F^{-1}(R) = \frac{-1}{\lambda} \ln(1-R) \quad (۱۱-۲)$$

چون $(1-R)$ دارای توزیع یکنواخت مشابه توزیع R در بازه‌ی $[0, 1]$ است، رابطه‌ی (۱۲-۲) معادل

رابطه‌ی (۱۱-۲) است.

$$T = \frac{-1}{\lambda} \ln(R) \quad (۱۲-۲)$$

اگر حالت فعلی عنصر حالت سالم باشد، λ نرخ خرابی است و در صورتی که حالت فعلی عنصر حالت

خراب باشد، λ نرخ تعمیر خواهد بود.

گام ۳: گام دوم در بازه‌ی زمانی موردنظر (سال) تکرار می‌شود و مقادیر نمونه‌گیری شده‌ی تداوم

حالت همه‌ی عناصر ثبت می‌گردد. سپس ترتیب زمانی چرخه‌ی گذر حالت سیستم با ترکیب فرآیندهای

گذر حالت تمام عناصر ایجاد می‌شود.

گام ۴: برای محاسبه‌ی تابع شاخص قابلیت اطمینان، $\Phi(s)$ ، در هر یک از حالت‌ها، وضعیت سیستم

تحلیل می‌شود. اگر مقدار امید شاخص $\Phi(s)$ ، به صورت $E(\Phi)$ نمایش داده شود امید ریاضی این

شاخص یا تابع تست آن یعنی $E(\Phi)$ ، برای همه‌ی حالات به صورت زیر است:

$$E(\Phi) = \sum_{s \in G} \Phi(s) P(s) \quad (13-2)$$

که s یک حالت سیستم و G مجموعه‌ی کل حالت‌های سیستم است. فرض می‌شود هر یک از حالت‌های سیستم دارای احتمال $P(s)$ است.

با جایگزینی تواتر نمونه‌برداری حالت s سیستم، به جای $P(s)$ داریم:

$$E(\Phi) = \sum_{s \in G} \Phi(s) \frac{n(s)}{N} \quad (14-2)$$

که N تعداد نمونه‌ها و $n(s)$ تعداد وقوع حالت s در طی نمونه‌برداری است. $\Phi(s)$ با تحلیل مناسب سیستم به دست می‌آید. به طور مثال شاخص $\Phi(s)$ برای تعیین احتمال قطع بار به صورت زیر است:

$$\Phi(s) = \begin{cases} 1 & \text{if قطع باری در حالت } s \text{ سیستم وجود داشته باشد} \\ 0 & \text{if قطع باری وجود نداشته باشد} \end{cases} \quad (15-2)$$

رابطه‌ی (13-2) و (14-2) هنگام شبیه‌سازی مونت کارلو نامتوالی استفاده می‌شود. این روابط برای

کاربرد در شبیه‌سازی مونت کارلو متوالی به صورت زیر اصلاح می‌شوند:

$$E(\Phi) = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{n_i(s)} \Phi(s_{ji})}{N_s} \quad (16-2)$$

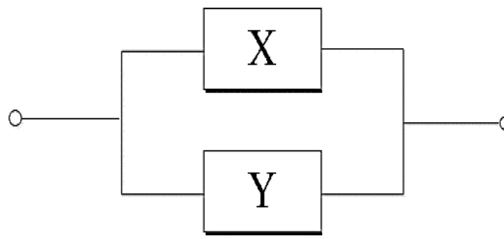
که $n_i(s)$ تعداد وقوع حالت s در سال i ام، $\Phi(s_{ji})$ تابع شاخص مربوط به زامین وقوع در سال i ام و

N_s تعداد کل سال‌های شبیه‌سازی شده است.

برای درک بهتر مفهوم فرآیند شبیه‌سازی مونت کارلو متوالی، روند انجام فرایند بر روی یک سیستم

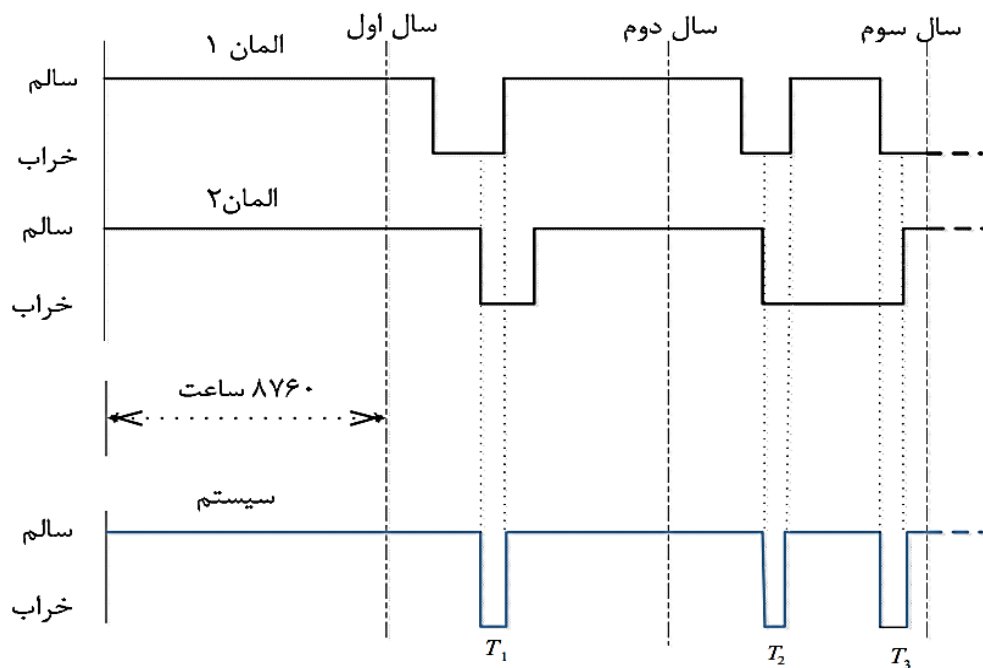
موازی ساده با دو عنصر تعمیر پذیر که شماتیک آن در شکل (1-2) [40] نمایش داده شده است، بیان

می‌گردد.



شکل (۱-۲) دیاگرام منطقی سیستمی با دو عنصر موازی [۴۰]

ترتیب زمانی فرآیند چرخه‌ی گذر حالت دو عنصر این سیستم برای سه سال متوالی شبیه‌سازی شده است. در شکل (۲-۲) [۴۰] این فرآیند نشان داده شده است. ترتیب زمانی چرخه‌ی گذر حالت سیستم با ترکیب فرآیندهای گذر حالت تمام عناصر ایجاد می‌شود. این مفهوم در پایین شکل (۲-۲) نمایش داده شده است.



شکل (۲-۲) ترتیب زمانی فرآیند چرخه‌ی گذر حالت دو عنصر و توالی زمانی فرآیند گذر حالت سیستم موازی در سه سال اول [۴۰]

همان‌طور که در شکل (۲-۲) پیداست، سیستم در سال اول شبیه‌سازی دچار خرابی نشده است، اما این سیستم در سال دوم یک‌بار و در سال سوم دو بار خراب شده است. اگر شاخص قابلیت اطمینان مطلوب $\Phi(s)$ ، شاخص تواتر خرابی سیستم باشد، امید ریاضی $E(\Phi)$ بر اساس این سه سال به صورت رابطه‌ی (۱۷-۲) محاسبه می‌شود.

$$E(\Phi) = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{n_i(s)} \Phi(s_{ji})}{N_s} = \dots \quad (17-2)$$

$$\dots \frac{\Phi(s_{fail,1}) + \Phi(s_{fail,2}) + \Phi(s_{fail,3})}{3} = \frac{0+1+1}{3} = 1 \text{ occurrence/year}$$

شایان ذکر است که هنگام استفاده از روش مونت کارلو متوالی، باید تعداد سال‌های شبیه‌سازی شده زیاد باشد تا نتایج حاصل از این روش قابل قبول واقع گردد.

۲-۳-۱ ارزیابی قابلیت اطمینان با استفاده از مونت کارلو متوالی

در این روش جهت شبیه‌سازی عناصر سیستم و بار و باد، ترتیب زمانی در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس وضعیت کارکرد سیستم بررسی می‌گردد. مراحل شبیه‌سازی مونت کارلو ترتیبی جهت ارزیابی قابلیت اطمینان در سطح سیستم ترکیبی تولید و انتقال به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۴۲]:

(۱) سرعت باد و بار مصرفی شبکه برای یک سال به ترتیب با بهره‌گیری از توزیع احتمالی ویبال و

نرمال تولید و با وجود این بادهای، توان تولیدی توربین‌ها برای هر ساعت محاسبه می‌شود.

(۲) میزان مدت استمرار هر المان در مرحله کنونی با استفاده از روش تبدیل معکوس [۴۳]، تابع

توزیع خطا و نرخ تعمیر المان تعیین گردد. برای مثال چنانچه تابع توزیع نمایی $f(t) = xe^{-xt}$

برای خرابی تجهیزات در نظر گرفته شود، تعیین میزان استمرار حالت (T) مربوط به i امین

المان، از طریق رابطه $T_i = -\ln((U_i)/x_i)$ انجام می‌شود که U_i عددی تصادفی با توزیع

یکنواخت بین [۰،۱] می‌باشد. x_i در حالتی که واحد تولیدی i ام سالم باشد، نرخ خرابی (λ) آن

و در حالت خرابی و خروج این المان، نرخ تعمیر (μ) آن واحد می‌باشد.

(۳) تکرار مرحله ۲ برای یک‌زمان معین (معمولاً ۱ سال).

(۴) اجرای پخش بار در شبکه به ازای همه ساعات سال (۸۷۶۰ ساعت) (با وضعیت تعیین‌شده‌ی

شبکه از قبل) و مشخص شدن وضعیت همگرایی و واگرایی پخش بار در هر ساعت.

۴-۱) در صورت همگرایی پخش بار، مراحل ۲ تا ۴ برای ساعات دیگر سال شبیه‌سازی شده تکرار می‌شود.

۴-۲) در صورت واگرایی پخش بار، پخش بار بهینه اجرا و با استفاده از آن توزیع دوباره توان واحدهای تولیدی و قطع بار انجام می‌شود. در این مرحله مقدار بار قطع شده محاسبه می‌شود و سپس مراحل ۲ تا ۴ برای ساعات دیگر سال شبیه‌سازی شده تکرار می‌شود.

۵) در صورتی که مراحل ۱ تا ۴ برای یک سال شبیه‌سازی به پایان رسید، مقدار قطع بار محاسبه می‌شود. سپس کوواریانس مقدار قطع بار محاسبه شده گرفته می‌شود، در صورتی که از مقدار مشخص شده کمتر شود حلقه مونت کارلو خاتمه می‌یابد. در غیر این صورت الگوریتم مونت کارلو مرحله ۱ را آغاز کرده تا برای مدت یک سال بار مصرفی کل شبکه و سرعت باد توسط توابع توزیع احتمالی ایجاد شود و کل مراحل یادشده انجام شوند.

۲-۳-۳ نکاتی درباره‌ی دو روش مونت کارلو متوالی و نامتوالی

مونت کارلو متوالی به‌طور کامل می‌تواند رفتار زمانی سیستم را در نظر بگیرد، در حالی که مونت کارلو نامتوالی این خصوصیات را در نظر نمی‌گیرد. روش متوالی فرکانس و مدت استمرار ارزیابی را با دقت بالاتری فراهم می‌کند. می‌توان گفت روش مونت کارلو شامل سه تکنیک ارزیابی نمونه‌برداری حالت، نمونه‌برداری گذار حالت و نمونه‌برداری مدت استمرار حالت می‌شود. نمونه‌برداری حالت و نمونه‌برداری گذار حالت در طبقه مونت کارلو نامتوالی جای دارد و نمونه‌برداری مدت استمرار حالت مربوط به روش مونت کارلو متوالی می‌باشد. برای اینکه یک مقایسه بین عملکرد مونت کارلو متوالی و نامتوالی داشته باشیم، مزایا و معایب مونت کارلو متوالی را نسبت به نامتوالی در زیر آورده شده است [۴۱]:

مزایا:

- در ارزیابی قابلیت اطمینان شاخص‌های مرتبط با فرکانس (تعداد رخ دادن اتفاقات و حالت‌ها) به شکل دقیق‌تر می‌تواند به دست آید.
- هر تابع توزیع مدت استمرار حالت مرتبط با خصوصیات قابلیت اطمینان اجزای سیستم به‌آسانی می‌تواند در این روش ایجاد شود.
- توابع احتمالی شاخص‌های قابلیت اطمینان به‌علاوه‌ی مقادیر مورد انتظار می‌تواند به دست آید.
- وضعیت‌های کاری سیستم با جزئیات و رفتار گذشته سیستم می‌تواند در این فرآیند شبیه‌سازی ایجاد شود.

معایب:

- روش متوالی به زمان محاسبه و حافظه جهت ذخیره بسیار بیشتری نسبت به نامتوالی نیاز دارد. این مشکل به این دلیل تولید یک متغیر تصادفی از یک تابع توزیع داده‌شده برای هر جزء سیستم و به‌منظور ذخیره اطلاعات فرآیندهای گذار حالت با ترتیب زمانی برای تمامی اجزای سیستم در یک محدوده زمانی طولانی است.
- روش متوالی به اطلاعات ورودی با جزئیات زیاد از قبیل منحنی‌های بار با ترتیب زمانی نیاز دارد.

با توجه به اینکه به‌منظور انتخاب طرح‌های توسعه، تحلیل ارزیابی قابلیت اطمینان (بخصوص با یک الگوریتم بهینه‌سازی) باید بارها انجام شود تا شاخص قابلیت اطمینان را مشخص کند، زمان اجرای این الگوریتم بسیار طولانی می‌شود. تا جایی که در [۴۴] حل مسئله برنامه‌ریزی احتمالی با در نظر گرفتن شاخص قابلیت اطمینان سیستم ترکیبی تولید و انتقال در عمل نشدنی تلقی شده است. بنابراین انتخاب روش مونت کارلو نامتوالی برای ارزیابی قابلیت اطمینان بسیار مطلوب‌تر ارزیابی می‌شود.

۴-۲ روش‌های موجود در حل مسئله برنامه‌ریزی احتمالی

برای انتخاب بهینه‌ترین طرح ممکن در تحقیقات مختلف از روش‌های گوناگون ریاضی و غیر ریاضی جهت حل مسئله برنامه‌ریزی احتمالی سیستم قدرت استفاده می‌کنند. در برنامه‌ریزی سنتی مهم‌ترین هدف در استفاده از این روش‌ها هزینه سرمایه‌گذاری طرح است [۴۵]. همچنین اهداف دیگری را نیز بعد از این هدف می‌توان دنبال کرد. معمولاً اهداف برنامه‌ریزی باهم در تضاد هستند و این یک چالش مهم در برنامه‌ریزی توسعه سیستم انتقال است. در برنامه‌ریزی پیشرفته می‌توان اهداف دیگر از قبیل زیر را دنبال کرد:

(۱) تسهیل رقابت بین سهامداران بازار [۴۶]

(۲) تهیه محیط عادلانه و رقابتی برای همه سهامداران [۴۷]

(۳) کاهش تراکم انتقال [۴۸, ۴۹]

(۴) بهینه‌سازی هزینه سرمایه‌گذاری [۱-۴۹]

(۵) کمینه‌سازی ریسک [۵۰]

(۶) بهبود امنیت و قابلیت اطمینان [۵۱, ۵۲]

(۷) در نظر گرفتن تولید پراکنده [۵۳]

(۸) کمینه‌سازی اثرات محیط‌زیست [۵۴]

این اهداف پیشنهاد داده شده اغلب باهم در تعارض هستند و ارضای آن‌ها باهم چالش‌برانگیز است. به‌منظور برنامه‌ریزی احتمالی سیستم قدرت لازم است که در ابتدا طرح‌های توسعه برای سیستم قدرت در نظر گرفته شود. تحقیقات مختلف در این زمینه از روش‌ها و استراتژی‌های مختلف جهت این منظور استفاده کرده‌اند. می‌توان گفت دو استراتژی کلی برای انتخاب بهترین طرح توسعه انتقال در نظر گرفته می‌شود که در ادامه به تفصیل صحبت شده است.

۲-۴-۱ بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای حل مسئله برنامه‌ریزی احتمالی

بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهت پیدا کردن بهترین طرح توسعه انتقال یکی از رویکردهایی است که بیشتر در مقالات استفاده شده است. می‌توان گفت این رویکردها برای ارائه طرح‌های پیشنهادی به دودسته کلی تقسیم می‌شوند. اولین دسته استفاده از تکنیک‌هایی جهت حل مسئله برنامه‌ریزی (با اهداف مطرح شده در قسمت قبل) است که می‌توان آن‌ها را به دودسته ریاضیاتی (تحلیلی) و محاسباتی (متاهیوریستیک) تقسیم‌بندی کرد [۵۵]. دومین دسته استفاده از ارزیابی ریسک و تحلیل اقتصادی در طرح‌های توسعه پیشنهادی است که قبلاً توسط کارشناسان با استفاده از آنالیزهایی مثل پخش بار مشخص شده [۱۴] یا به صورت سعی و خطا [۴۴] مورد ارزیابی قابلیت اطمینان قرار می‌گیرد. در ادامه به معرفی هر یک از این دودسته به‌طور جداگانه پرداخته شده است.

روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر ریاضیات:

۱) برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط [۴۶، ۵۶، ۵۷]

۲) تجزیه بندرز [۵۸]، روش branch-bound [۵۹]

۳) تئوری بازی [۶۰]

۴) الگوریتم هیوریستیک مبتنی بر شاخص حساسیت [۶۱]

۵) تجزیه Hierarchical [۶۲]

۶) Dynamic programming [۶۳]

روش‌های بهینه‌سازی متاهیوریستیک زیادی تا به حال در حل مسئله برنامه‌ریزی به کار گرفته شده است. از جمله آن‌ها کلونی مورچه [۶۴]، زنبور عسل [۶۵]، تکامل تفاضلی [۶۶]، قورباغه جهنده [۶۷]، انواع الگوریتم ژنتیک (Genetic algorithms with fuzzy hybrid, real coded, decimal coded) [۶۸]، جستجوی هارمونی [۶۹]، سرد شدن فلزات [۷۰] و جستجوی ممنوع [۷۱] می‌باشد.

این نکته کاملاً مشخص است که هر دو روش (ریاضیاتی و متا هیوریستیک) بسیار در حل این مسئله کاربردی هستند. مزایا و معایب این روش‌ها در تحقیقات مختلف مطالعه شده و در ادامه آورده شده است:

مزایای روش‌های ریاضیاتی:

(۱) معمولاً پاسخ بهینه دقیق و زمان حل کوتاه است.

(۲) همگرایی مناسبی به دست آورده می‌شود.

معایب روش‌های ریاضیاتی:

(۱) تبدیل معادلات سیستم قدرت به مدل برنامه‌نویسی بهینه‌سازی دشوار است و این مسئله در سیستم‌های قدرت در مقیاس بزرگ پیچیده‌تر است.

(۲) به منظور وارد کردن قید جدید، مدل باید باز آراسته شود و معادلات جدید باید اضافه شوند.

(۳) در این مدل، مدل سیستم قدرت به مجموعه‌ای از معادلات خطی و غیرخطی تبدیل می‌شوند. بنابراین، تنها در مطالعات استاتیک استفاده می‌شود و در مطالعات دینامیکی از قبیل تحلیل پایداری نمی‌تواند اجرا گردد.

(۴) در صورت حل مسئله با اهداف چندگانه که پیش‌تر ذکر شد، با مشکل روبرو می‌شود.

مزایای روش‌های هیوریستیک:

(۱) این تکنیک‌ها برای استفاده ساده و سراسر هستند.

(۲) در این روش‌ها نیازی به تبدیل مدل سیستم قدرت به یک مجموعه‌ای از برنامه‌نویسی بهینه‌سازی نیست. آنالیز سیستم قدرت (از قبیل پخش بار، پخش بار بهینه یا تحلیل پایداری) می‌تواند در یک بسته تحلیل‌کننده سیستم قدرت (مثل DigSILENT) اجرا شود و سپس پاسخ‌های خروجی روش‌های بهینه‌سازی را تغذیه کنند. در حقیقت، این روش‌ها تنها به پاسخ‌های خروجی برای حل این مسئله نیاز دارند.

۳) پیاده‌سازی این روش‌ها آسان بوده و در مطالعات دینامیکی از قبیل آنالیز پایداری می‌تواند اجرا گردد.

معایب روش‌های هیوریستیک:

۱) راه‌حل بهینه مرتبط با تقریب است و زمان شبیه‌سازی معمولاً بالاست.

۲) ممکن است الگوریتم بجای مینیمم سراسری به مینیمم محلی همگرا شود.

۳) امکان واگرایی بیشتر از تکنیک‌های مبتنی بر ریاضیات است.

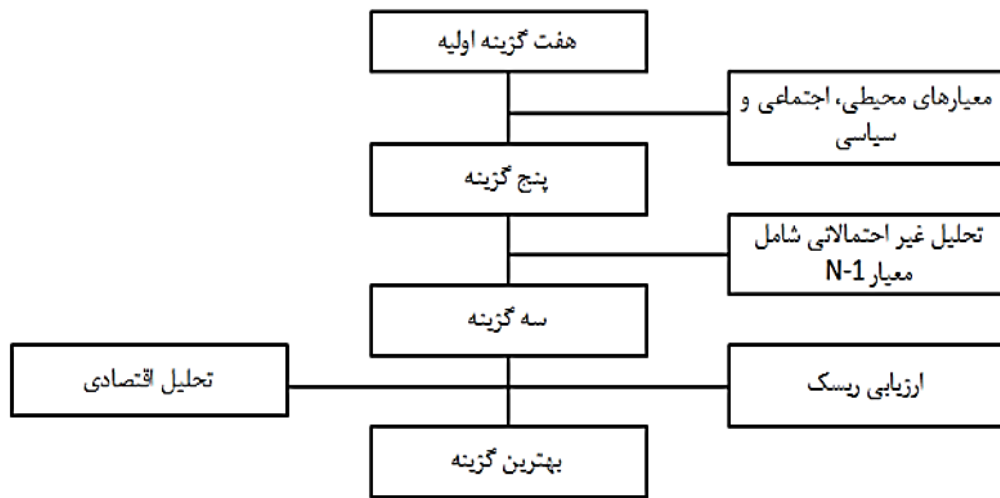
در بیشتر مطالعات برنامه‌ریزی از یک تکنیک جستجو برای کمینه‌سازی مسئله طراحی توسعه انتقال استفاده شده است [۷۲]. با توجه به ماهیت تعارض گونه بین بیشتر اهداف دنبال شده در بحث طراحی توسعه انتقال (از جمله هزینه سرمایه‌گذاری، معیارهای قابلیت اطمینان، تراکم سیستم انتقال، بازار برق و...) استفاده از الگوریتم‌های چندهدفه در بسیاری از مراجع توصیه و استفاده شده است [۱۲, ۵۵, ۷۲, ۷۳].

از طرفی این روش برای ارزیابی و گزینش بهترین طرح توسعه پیشنهادی محاسبات سنگین و بسیار زمان‌بر را در پی دارد. تا جایی که در [۴۴] حل مسئله برنامه‌ریزی احتمالی با در نظر گرفتن شاخص قابلیت اطمینان سیستم ترکیبی تولید و انتقال در عمل نشدنی تلقی شده است. برای اینکه با بهره‌گیری از روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی به عملکرد همگرایی قابل قبولی برسیم لازم است بازده محاسبات ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم بالا ببریم. محاسبه موازی و توزیع شده^۱ می‌تواند یک گزینه مناسب جهت حل این مشکل باشد که به‌منظور بالا بردن سرعت محاسبات، وظایف محاسباتی را بین ریزپردازنده‌های چندگانه تقسیم می‌کند [۷۴, ۷۵].

^۱ Parallel and distributed computing

۲-۴-۲ استفاده از ارزیابی ریسک و تحلیل اقتصادی برای حل مسئله برنامه‌ریزی احتمالی

روش دوم در حل مسئله برنامه‌ریزی احتمالی استفاده از طرح‌های توسعه پیشنهادی است که قبلاً توسط کارشناسان با استفاده از آنالیزهایی مثل پخش بار مشخص شده [۱۴] یا به صورت سعی و خطا [۴۴] مورد ارزیابی قابلیت اطمینان قرار می‌گیرد. در روش‌هایی که بر اساس سعی و خطا هستند تعداد محدودی از نامزدهای طرح توسعه برای ارزیابی انتخاب می‌شوند. بنابراین این ارزیابی برای گزینش بهینه‌ترین طرح پیشنهادی ضمانتی ندارد. اما طرح توسعه به صورتی که با آنالیزهای ارزیابی ریسک و تحلیل اقتصادی دنبال شود با توجه به پیشینه‌ی استفاده از آن در چند سیستم قدرت واقعی می‌تواند روش مناسبی باشد. مراحل برنامه‌ریزی به این روش در سیستم انتقال [۱۴] در شکل (۳-۲) در زیر آورده شده است:



شکل (۳-۲) شماتیک از فرآیند برنامه‌ریزی پیشنهادی در [۱۴]

همان‌طور که از شکل (۳-۲) مشخص است ۷ گزینه برنامه‌ریزی برای سیستمی مطرح است. بر مبنای ملاحظات محیطی و اجتماعی و سیاسی، دو گزینه از این گزینه‌ها حذف می‌شود. از بین ۵ گزینه باقیمانده دو گزینه به علت برآورده نکردن معیار غیر احتمالی $N-1$ حذف می‌شوند. سپس از بین سه گزینه موجود با ارزیابی ریسک و تحلیل اقتصادی بهترین گزینه انتخاب می‌شود. همان‌طور که در این شماتیک مطرح شد، هر دو معیار $N-1$ و تحلیل ریسک می‌توانند در کنار هم بکار روند.

می‌توان گفت روند اصلی در برنامه‌ریزی احتمالی در سیستم انتقال دارای مراحل زیر است:

(۱) اگر معیار $N-1$ ضروری باشد، با استفاده از یک برنامه سنتی پخش بار یا تحلیل پیشامد، گزینه‌هایی که این معیار را ارضا می‌کنند انتخاب نمایید. اگر معیار $N-1$ مدنظر نباشد، تمام گزینه‌های ممکن برای مرحله بعد باقی می‌مانند.

(۲) در بازه زمانی برنامه‌ریزی، ریسک و هزینه ریسک را برای گزینه‌های انتخاب‌شده توسط یک برنامه ارزیابی ریسک سیستم انتقال یا سیستم مرکب، ارزیابی کنید.

(۳) جریان مالی و ارزش فعلی هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و ریسک را برای گزینه‌های مدنظر در دوره زمانی برنامه‌ریزی محاسبه کنید.

(۴) معیار "کارایی هزینه" بر "مبنای عملکرد" را اعمال نمایید. بهترین گزینه باید به کمترین هزینه منجر شود:

$$Min = I + O + R \quad (18-2)$$

که در آن O ، I و R به ترتیب هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و ریسک هستند. عبارت "کارایی هزینه" به معنی حداقل هزینه کلی است و عبارت "بر مبنای عملکرد" یعنی اینکه هزینه دسترس‌ناپذیری به صورت مؤلفه هزینه ریسک در کل هزینه در نظر گرفته می‌شود. اگر فقط معیار هزینه بر مبنای عملکرد مدنظر باشد، گزینه‌هایی که معیار تک پیشامد را در گام اول برآورده نسازند، در گام اول کنار گذاشته نمی‌شوند. واضح است که در این شرایط، معیار تک پیشامد الزامی نیست. اثر تک پیشامدها و احتمالات آنها در قالب بخشی از ریسک کلی سیستم در نظر گرفته می‌شود. از طرف دیگر، اگر ترکیبی از معیارهای $N-1$ و کارایی هزینه بکار رود، گزینه‌هایی که معیار $N-1$ را ارضا نمی‌کنند، کنار گذاشته می‌شوند.

۵-۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل، مطالعات در حوزه برنامه‌ریزی احتمالی سیستم قدرت بررسی گردید. در این مطالعات بنا بر شرایط سیستم و مفروضات مطالعه روش‌های گوناگونی برای مدل‌سازی دقیق‌تر باهم ترکیب شده‌اند. در مطالعات قابلیت اطمینان که از روش مونت کارلو بهره برده‌اند، تکنیک‌های مختلفی برای سرعت بخشی به محاسبات استفاده شده است. چالش اصلی رویکرد یک‌طرفه به نحوه محاسبه شاخص‌ها در استفاده از تکنیک‌ها به صورت کاملاً شبیه‌سازی یا کاملاً تحلیلی بوده است. در این پایان‌نامه در راستای اهداف برنامه‌ریزی دارای اولویت از سمت شرکت برق قانون‌گذار، برحسب داده‌های واقعی موجود و مفروضات منطقی الگوریتمی ترکیبی از تکنیک‌های تحلیلی و شبیه‌سازی ایجاد شده است. در این الگوریتم اثر نایقینی‌های حضور تولید توان بادی را به‌طور کارا در محاسبات قابلیت اطمینان مدل‌سازی و سؤالات درزمینه‌ی آثار حضور این‌گونه تولید توان در سیستم قدرت بررسی شده است.

فصل سوم

ارزیابی پتانسیل انرژی باد در منطقه خواف

یکی از مهم‌ترین مواردی که در برنامه‌ریزی توسعه انتقال با در نظر گرفتن توسعه انرژی بادی مطرح است تخمین میزان پتانسیل انرژی بادی منطقه بادخیز است. شهرستان خواف با داشتن رژیم بادی کاملاً مناسب قابلیت تبدیل به یک بستر تولید انرژی بادی بزرگ‌مقیاس را دارا می‌باشد. از طرفی به علت وجود زمین‌های معدنی در شهرستان خواف در سال‌های آینده این منطقه به قطب صنعتی شرق کشور تبدیل خواهد شد که این امر باعث ازدیاد مصرف انرژی در این ناحیه خواهد شد. لذا می‌توان برای مصرف انرژی بادی تولیدشده در این منطقه بدون نیاز به انتقال انرژی به مناطق دوردست برنامه‌ریزی کرد.

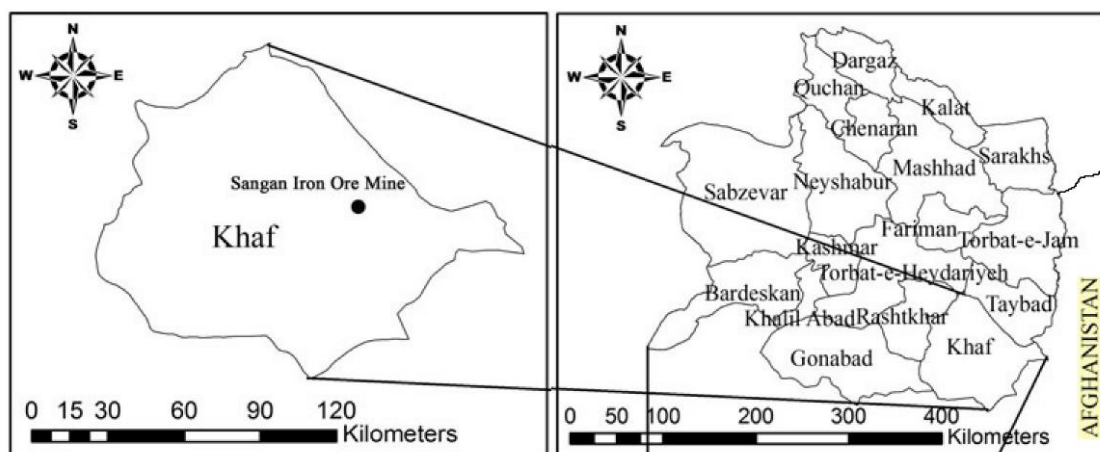
هدف از این فصل ارزیابی پتانسیل انرژی بادی در منطقه خواف است. برای این منظور در ابتدا می‌بایست مناطق بادخیز در محدوده شهرستان خواف شناسایی شوند. سپس برآوردی از توان بادی قابل حصول از این منطقه به دست آورده شود. این کار با استفاده از روشی مبتنی بر مساحت زمین‌های آزاد یک منطقه صورت می‌گیرد. در انتها برای شناخت ویژگی‌های رژیم بادی با استفاده از یک روش آماری به کلاس‌بندی منطقه جهت انتخاب و نصب توربین‌های بادی پرداخته می‌شود.

در ادامه این فصل، در بخش دوم به معرفی منطقه خواف و شناسایی منطقه بادخیز خواهیم پرداخت. در بخش سوم عوامل مؤثر در مکان‌یابی مزرعه بادی و نایقینی‌های موجود در منطقه خواف ارائه شده است. در بخش چهارم با ارائه روشی برای جانمایی دقیق توربین در یک مزرعه بادی، توان بادی قابل استحصال از منطقه خواف با استفاده از زمین‌های آزاد منطقه و مفهوم ناحیه تحت پوشش باد توربین محاسبه خواهد شد. در بخش پنجم با استفاده از روش آماری به ارزیابی پتانسیل انرژی باد، شناخت ویژگی‌های رژیم بادی منطقه خواف و کلاس‌بندی منطقه برحسب مقدار چگالی توان الکتریکی پرداخته خواهد شد. در انتهای فصل در بخش ششم، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از مطالب مطرح‌شده ارائه می‌شود.

۲-۳ معرفی منطقه خواف و شناسایی محدوده بادخیز

۱-۲-۳ معرفی منطقه خواف

منطقه خواف با قرار گرفتن در استان خراسان رضوی و دارا بودن زمین‌های معدنی در سال‌های آینده به قطب صنعتی شرق کشور تبدیل خواهد شد که این مسئله باعث ازدیاد مصرف انرژی در این ناحیه خواهد شد. این شهرستان از شمال به شهرستان تربت‌حیدریه، از غرب به شهرستان‌های رشتخوار و گناباد، از جنوب به شهرستان قاینات و از شرق به تایباد متصل بوده و مرز ۱۲۳ کیلومتری با افغانستان دارد [۷۶]. موقعیت شهرستان خواف در مجاورت شهرستان‌های نامبرده شده در شکل (۱-۳) دیده می‌شود.



شکل (۱-۳) موقعیت شهرستان خواف در استان خراسان رضوی [۷۶]

۲-۲-۳ شناسایی محدوده بادخیز

در شرایطی که نقشه‌های دقیق و به‌روز شده هواشناسی موجود باشند به راحتی می‌توان محدوده بادخیز را شناسایی کرد. اما در حالتی که این نقشه‌ها موجود نباشند می‌توان با استفاده از اطلاعات محلی و بازدید میدانی محدوده بادخیز را شناسایی نمود. از آنجاکه این سری نقشه‌ها به‌طور دلخواه در دسترس نمی‌باشند، لذا در این پروژه بر اساس اطلاعاتی که در بازدید از منطقه خواف به مورخ ۴ تیرماه ۱۳۹۳ به‌دست آمده، محدوده منطقه بادخیز شناسایی می‌شود.

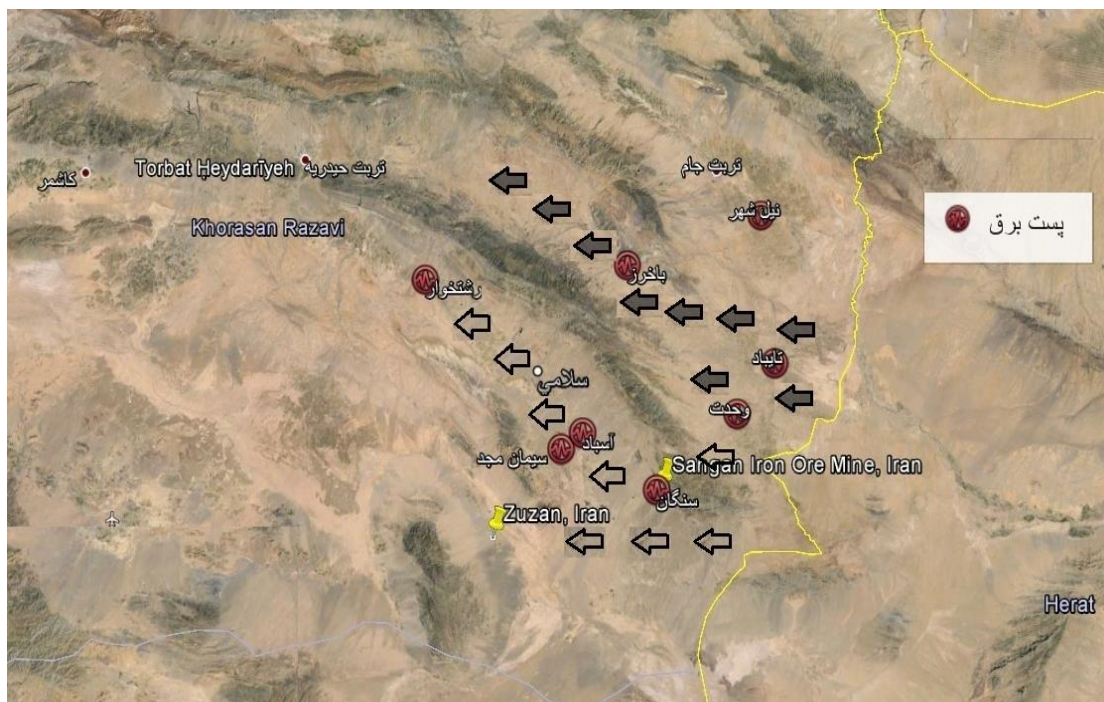
در شکل (۲-۳) که از نقشه بادی ایران مربوط به سال ۲۰۰۹ انتخاب شده [۷۷]، دو محدوده مشخص شده است. محدوده قرمز رنگ حدود مناطقی است که مربوط به شهرستان خواف بوده و تمرکز ما بر آن قرار دارد و در ادامه جزئیات بیشتری درباره حدود این منطقه ارائه می شود. نکته ای که قابل توجه است منطقه ایست که با خطوط سیاه رنگ مشخص شده و فاصله نسبتاً کمی با منطقه خواف دارد و دارای سرعت باد با میانگین سالانه بالاتری می باشد.

نقشه بادی ایران در ارتفاع ۸۰ متری از سطح زمین
(۲۰۰۹/۰۳)



شکل (۲-۳) برشی از نقشه بادی ایران. محدوده قرمز رنگ منطقه خواف را نشان می دهد [۷۷]

چنانچه در شکل (۳-۳) مشاهده می شود، محدوده های ذکر شده در شکل (۲-۳) به طور تقریبی بروی تصاویر ماهواره ای مشخص شده اند. بر اساس اطلاعات میدانی جمع آوری شده، پیکان های توپر مسیر ورود و حرکت باد اصلی با رژیم مناسب را به خاک ایران و منطقه خواف نشان می دهند. همچنین پیکان های توخالی معرف وزش بادهایی است که از پیکان های توپر نتیجه می شوند. به گفته ساکنین محلی این منطقه دارای بادهایی است که در زمستان نیز می وزند و آن ها را بادهای ناشی از سرمای کوهستان می نامند. پرواضح است که دلیل شکل گیری این دو تونل بادی، نوع ناهمواری این مناطق است. با دقت در شکل (۳-۳) ناهمواری های ذکر شده به صورت تیره رنگ بین دودسته از پیکان ها قرار دارند.



شکل (۳-۳) مناطق بادخیز منطبق بر اطلاعات میدانی و تصاویر ماهواره‌ای

بر اساس اطلاعاتی که در منطقه برحسب بادسنجی‌های میدانی به دست آمد، محدوده بادخیز از محل معدن آهن سنگان تا حوالی بخش سلامی از شهرستان خواف و در پایین شهرستان تا بالای بخش نشتیفان و با حرکت به سمت غرب تا حوالی روستاهای زوزن و قاسم‌آباد وسعت دارد. حال باید وضعیت معادن موجود و نیز ناهمواری‌های این محدوده را در نظر گرفت تا بتوان تخمین نسبتاً دقیقی از پتانسیل تولید توان بادی حاصل نمود.

۳-۳ عوامل مؤثر در مکان‌یابی مزرعه بادی (چالش‌ها و نایقینی‌ها)

۱-۳-۳ بحث اولیه

هنگامی که مکان‌های مناسب برای توربین‌های بادی جستجو می‌شوند، جنبه‌های بسیار زیادی باید در نظر گرفته شود که مهم‌ترین آن، منبع باد است. شرایط محلی مانند تپه‌ها، کوه‌ها، ساختمان‌ها و زندگی گیاهی بر باد تأثیر می‌گذارند و باید در محاسبات دقیق برای تخمین مقدار توانی که توربین‌های بادی می‌توانند در محل تولید کنند در نظر گرفته شوند.

توربین بادی باید به محل برده شده، نصب و به شبکه وصل شود. عوامل مهمی که باید در ارزیابی مکان نیروگاه در نظر گرفته شوند شامل عوامل مؤثر بر طراحی، هزینه پی‌ریزی و ظرفیت شبکه می‌باشند. این عوامل مؤثر بر طراحی به‌نوبه خود شامل فاصله تا جاده‌ها و راه‌های ارتباطی، هزینه‌ی ساختن جاده‌های دسترسی و شرایط زمین است.

پس از نصب، توربین بادی نباید باعث آزار مردمی گردد که در نزدیکی آن زندگی می‌کنند. در اروپا و آمریکای شمالی قوانینی در مورد سطح حداکثر نویز وجود دارد. این قوانین حداقل فاصله ساختمان‌ها تا مکان مزرعه را مشخص می‌کند. گرفتن اجازه نصب توربین‌های بادی از مقامات ضروری است. این قوانین و مقررات برای هر کشوری مشخص شده است؛ اما به‌عنوان یک قانون عمومی مقامات بررسی خواهند کرد که یک توربین بادی موجب ایجاد تداخل با انواع دیگر سرمایه‌گذاری‌ها و علاقه‌مندی‌ها نشود؛ بنابراین، برای یک توسعه‌دهنده هم عاقلانه و هم ضروری است که این منافع متضاد را در مکان موردنظر بررسی کند.

این موارد می‌تواند مانند یک فرودگاه، ترافیک هوایی عمومی (توربین‌ها بسیار بلند هستند)، تجهیزات نظامی و ارتشی (رادار، ارتباط رادیویی و غیره)، نواحی طبیعی حفاظت‌شده، مکان‌های باستان‌شناسی و غیره باشد. اطلاعات در مورد این منافع متضاد معمولاً می‌تواند توسط همان شهر یا بخش فراهم شود.

[۷۸].

۳-۳-۲ یافتن مکان‌هایی با منابع بادی خوب

اگر هدف این باشد که یک یا چند توربین بادی یا یک نیروگاه بادی را در یک منطقه جغرافیایی مشخص - یک شهرستان، ناحیه یا شهر - توسعه دهیم، اولین گام ایجاد خلاصه‌ای از مکان‌های مناسب است که با یک ارزیابی برای انتخاب بهترین مکان‌ها به جهت مطالعه‌ی امکان‌پذیری همراه هست.

مهم‌ترین پیش‌شرط برای یک پروژه توان بادی خوب این است که مکان مزرعه شرایط بادی خوبی داشته باشد. برای شروع کار نقشه‌های منابع بادی برای ناحیه (در صورتی که در دسترس باشند) مطالعه

می‌شوند. در صورت موجود نبودن این نقشه‌ها، می‌توان از راه‌های دیگر همچون تحلیل داده‌های ایستگاه-های هواشناسی، اطلاعات در مورد شرایط بادی را کسب کرد. این کار در بخش پنجم از همین فصل توضیح داده می‌شود.

همان‌طور که در بخش ۲-۳ بیان شد، مکان‌های با منابع بادی خوب در محدوده شهرستان خواف در شکل‌های (۲-۳) و (۳-۳) مشخص شدند. مکان‌ها یا به عبارتی محدوده مناسب بر اساس اطلاعاتی مشخص شدند که در منطقه برحسب بادسنجی‌های میدانی به‌دست آمده‌اند. محدوده بادخیز از محل معدن آهن سنگان تا حوالی بخش سلامی از شهرستان خواف و در پایین شهرستان تا بالای بخش نشتیفان و با حرکت به سمت غرب تا حوالی روستاهای زوزن و قاسم‌آباد وسعت دارد.

۳-۳-۳ امکان‌سنجی

پس از تعیین یک دسته از نواحی با منابع بادی خوب، بقیه‌ی پیش‌شرط‌ها برای این نواحی باید مطالعه شوند. به عبارتی موارد ذیل باید شفاف‌سازی شوند.

همسایه‌ها: نویز و سوسوی سایه‌ی پره‌های توربین نباید همسایه‌ها را اذیت کند. آیا توربین‌ها می‌توانند طوری نصب شوند که از این مزاحمت‌ها جلوگیری شود؟

اتصال به شبکه: آیا یک شبکه قدرت با ظرفیت انتقال قابل قبول در فاصله منطقی وجود دارد تا بتوان توربین‌های بادی را به آن وصل کرد؟

زمین: صاحب زمین در این مناطق کیست؟ آیا صاحبان زمین مایل به نصب توربین یا اختصاص زمینشان به مزارع بادی هستند؟

اجاره: آیا شانس اجاره گرفتن زمین‌ها منطقی وجود دارد؟

منافع متضاد: آیا ادوات نظامی، فرودگاه‌ها، نواحی حفاظت‌شده طبیعی یا فاکتورهای دیگری می‌تواند پروژه را متوقف کند؟

پذیرش محلی: ساکنین محل چه نظری در مورد توان بادی در همسایگی‌شان دارند [۷۸]؟

۱-۳-۳-۳ تأثیر بر همسایه‌ها

برای جلوگیری از مزاحمت برای همسایه‌ها، یک حداقل فاصله ۴۰۰ متری از نزدیک‌ترین محل سکونت این مشکل را حل می‌کند. برای یک نیروگاه بادی این فاصله ممکن است بیشتر شود. مکانی که توربین‌ها باید نصب شوند باید کاملاً بزرگ و دارای وسعت زیاد باشد. فاصله ۴۰۰ متری برای یک توربین تنها و یا چند صد متری برای یک مزرعه مشکل‌نویز را به حد قابل قبول می‌رساند [۷۹، ۸۰].

از آنجاکه در شهرستان خواف مناطقی که دارای رژیم بادی مناسب هستند عمدتاً بافاصله زیادی از منطقه شهری قرار دارد و بیشتر در حوالی این زمین‌ها صنایع وجود دارند لذا مشکل آسیب‌نویز یا سروصدا یا سایه‌روشن ناشی از چرخش پره‌های توربین‌ها مطرح نیست. همچنین به دلیل وسعت بسیار زیاد این مناطق می‌توان فاصله از هر واحد صنعتی را تا ۳ کیلومتر در نظر گرفت. این مورد را در برآورد توان الکتریکی قابل استحصال از منطقه به‌وسیله قانون عمومی در بخش ۳-۴ در نظر گرفته‌ایم.

۲-۳-۳-۳ اتصال به شبکه

خطوط قدرت معمولاً روی نقشه‌ها مشخص شده‌اند، بنابراین بسیار ساده است تا فاصله توربین‌ها تا شبکه را تخمین زد. باین‌حال، لازم است تا سطح ولتاژ مشخص شود، چراکه حدود مقدار توان (برحسب مگاوات) قابل اتصال به شبکه را مشخص می‌کند. همچنین فاصله تا نزدیک‌ترین نقطه اتصال یا پست (دارای ترانسفورماتور) مهم است.

در حال حاضر شرکت برق منطقه‌ای استان خراسان رضوی در منطقه خواف مشغول تکمیل یک پست با سطح ولتاژ ۴۰۰ KV می‌باشد. این پست مرکز ثقلی برای تأمین بار صنایع منطقه خواف می‌باشد و نیز برای جمع‌آوری توان تولیدی مزارع بادی‌ای که در منطقه به احداث خواهند رسید.

۳-۳-۳-۳ زمین برای نیروگاه‌های توان بادی

اینکه چه نوع صاحبان زمین در مکان نیروگاه وجود دارند به راحتی قابل حدس زدن می‌باشد. در یک حوزه کشاورزی، کشاورزان محلی معمولاً صاحبان زمین هستند. در این مورد کاملاً محتمل است که بتوان یک مالک را یافت که حاضر به اجاره دادن یا فروش بخشی از زمینش باشد. برای کشاورزان، زمین موردنظر همچون قبل از احداث، بازهم قابل دسترسی خواهد بود اما در این شرایط پول بیشتری به دست خواهد آمد. پول درآوردن از هوا تجارت خوبی خواهد بود!

در موارد دیگر، کمپانی‌ها، شهرها یا ایالت صاحب زمین هستند. اطلاعات زمین‌ها و صاحبانشان در دواير ثبت موجود است. بزرگی زمین موردنیاز به اندازه و طرح نیروگاه بادی بستگی دارد. حدود به وسیله ظرفیت شبکه و اندازه پروژه مشخص می‌شوند [۷۹].

یک قانون ساده برای تخمین زمین موردنیاز، مفهوم ناحیه تحت پوشش باد توربین است. فاصله بین توربین‌های بادی وابسته به قطر رتور است و باید ۴ تا ۷ برابر قطر رتور باشد. برای تخمین ناحیه زمین موردنیاز برای یک توربین، دایره‌هایی به شعاع ۲ تا ۳ برابر قطر رتور (برای یک فاصله بین توربین‌ها از ۴ تا ۶ برابر قطر رتور) می‌تواند استفاده شود و بدون هیچ‌گونه هم‌مرزی به یک ناحیه اختصاص داده شود [۷۸]. این قانون ساده در بخش چهارم از همین فصل توضیح داده خواهد شد.

۳-۳-۳-۴ پروانه ساخت

اختصاص وقت و صرف هزینه در پروژه‌هایی که اجازه ساخت ندارند بی‌فایده است. یکی از قسمت‌های مهم امکان‌پذیری در یک پروژه، بررسی امکان دریافت پروانه آن پروژه است. فرد توسعه‌دهنده باید با تمام قوانین و مقررات موجود بر یک پروژه‌ی نیروگاه بادی آشنا باشد و اینکه مقامات چگونه این قوانین را توصیف می‌کنند. اگر در یک بخش یا شهر پروژه بادی وجود داشته باشد، این مورد می‌تواند ایده خوبی از دورنمای پروژه در این منطقه به دست دهد.

این مورد در تحقیق حاضر چالشی برای پژوهشگر نبوده است. به عبارتی وصول پروانه ساخت و کارهای قانونی مربوط به شرکت‌های پیمانکار مزرعه بادی می‌باشند و در این مطالعه فرض بر این است که این اجازه داده شده است.

۳-۳-۵ منافع متضاد

امکان تحقق یک پروژه می‌تواند به وسیله منافع متضاد متوقف یا دچار مشکل شود. اولین چیزی که باید بررسی شود وجود تأسیسات نظامی در نزدیکی نیروگاه بادی است که می‌تواند اخذ مجوز پروژه را به دردمر بیندازد. تأسیسات نظامی ردیابی سیگنال و مراقبت ارتباطات رادیویی و غیره، این‌ها تأسیسات سری هستند لذا در نقشه‌ها وجود ندارند. یک طراح پروژه باید با مقامات مسئول نظامی تماس داشته باشد تا در صورتی که مواردی در منطقه موجود هستند که باعث ایجاد تداخل بین آن‌ها می‌شود آگاهی یابد. لذا می‌توان از آن‌ها مکانی را به‌عنوان پیشنهاد، درخواست کرد که با منافعشان تداخلی نداشته باشد.

توربین‌های بادی، سازه‌های با ارتفاع زیاد هستند که می‌توانند عبور و مرور هوایی را تحت تأثیر قرار دهند. قوانین محدودکننده‌ای در مورد ارتفاع سازه‌ها در نزدیکی فرودگاه‌ها وجود دارد. این قوانین توسط مقامات هواپیمایی ملی در دسترس است.

در هر کشوری نواحی وجود دارد که به‌صورت منافع ملی یا بین‌المللی دسته‌بندی شده‌اند تا از طبیعت و یا میراث فرهنگی مانند پارک‌های ملی، ذخایر طبیعی، نواحی محافظت پرندگان و غیره محافظت شود. از این نواحی باید دوری کرد، چراکه گرفتن پروانه برای نصب توربین بادی در این منطقه بسیار مشکل است [۸۰]. منافع متضاد در منطقه خواف به علت دارا بودن زمین‌های معدنی خود را جلوه‌گر می‌نمایند. وجود کانی‌های سنگ‌آهن و کارخانه‌های گندله‌سازی و سیمان خود نشانگر غنی بودن ظرفیت منطقه است. این مورد در بخش ۳-۴ که مناطق آزاد را مشخص کرده‌ایم در نظر گرفته شده است چراکه

زمین‌هایی که تحت مالکیت صنایع جهت استخراج هستند را نمی‌توان برای احداث مزرعه بادی خریداری کرد.

۳-۳-۳-۶ پذیرش محلی

رفتار ساکنین محلی در قبال یک پروژه توان بادی مطرح‌شده در مجاورتشان بیشتر به نحوه عملکرد طرح بستگی دارد. در اروپا بر اساس اخذ رأی و آمار، بیشتر مردم نظر مساعدی دارند اما همواره در ساکنین محلی آراء مخالفی نیز وجود دارد. اینکه ساکنین محلی چگونه واکنش نشان می‌دهند به میزان آموزش و آگاهی آن‌ها در مورد پروژه بستگی دارد. اگر اطلاعات مثبتی از مراحل اولیه به دست آورند، اکثراً نظرشان مثبت خواهد بود. زمانی که توربین‌ها به خط انتقال وصل باشند این بسیار ارزشمند است تا از حمایت مردمی برخوردار باشند و مردم نگاهشان به توربین‌ها باشد و در صورت بروز مشکل گزارش دهند.

همواره ساکنانی هستند که به‌شدت با پروژه‌های نیروگاه بادی مخالفت می‌کنند و دیدگاهشان این است که این پروژه‌ها مراتع را تبدیل به مناطق صنعتی می‌کنند. هرچند این نظرات بسیار اندک است اما می‌تواند باعث تأخیر، هزینه بیشتر و حتی توقف پروژه شود [۷۹، ۸۱].

۳-۳-۳-۷ تأثیر بصری

هنگامی که پیکربندی مزرعه مشخص شد، می‌توان نمایشی از توربین‌ها نصب‌شده به‌وسیله‌ی مونتاژ تصاویر داشت. بدین‌صورت که تصاویری از جهات مختلف از منطقه تهیه کرد و سپس به‌وسیله مونتاژ تصاویر توربین‌هایی را در تصویر قرارداد و بدین ترتیب نمایی از مزرعه به دست آورد [۷۹].

۳-۳-۳-۸ مشکلات

هرچند در قسمت‌های قبل مواردی برای بررسی ذکر شد که هرکدام می‌توانستند روند پروژه را دچار مشکل کنند اما مواردی نیز مانند دما، آب‌وهوای منطقه، بادهای با سرعت بسیار بالا و تأثیر درختان و جنگل‌ها فاکتورهایی هستند که باید در نظر گرفته شوند.

اگر تمام شرط‌های اولیه که در بالا ذکر شد به‌درستی و در حد قابل قبول قرار گرفت، نوبت به آن می‌رسد که گام نهایی در مطالعه امکان‌پذیری یعنی آنالیز اقتصادی صورت بگیرد. تصمیم نهایی در مورد یک پروژه که آن را رها کرده و یا تحقق می‌بخشد و البته وابسته به نتیجه آنالیز اقتصادی است.

۴-۳ چیدمان دقیق نیروگاه‌های توان بادی

هنگامی که یک مکان مناسب برای نیروگاه مشخص شد باید تعداد و سایز توربین‌های بادی و محل دقیق نشانیدن آن‌ها مشخص شود. اگر بیشتر از یک توربین در نیروگاه نصب شود بر روی تولید اثر می‌گذارد و مقدار تأثیر آن به فاصله بین توربین‌های بادی وابسته است. در سمت پشت رتور یک پی باد^۱ ایجاد می‌شود، سرعت باد کاهش یافته و در فاصله‌ای به‌اندازه ۱۰ برابر قطر رتور در پشت رتور به مقدار اولیه‌اش برمی‌گردد. این مورد باید در چیدمان مزرعه در نظر گرفته شود.

سرعت باد توسط رتور توربین بادی کند می‌شود و در پشت رتور دوباره شروع به افزایش می‌کند تا به سرعت اولیه‌اش برمی‌گردد. گسترش این پی باد به چیدمان توربین‌ها بستگی دارد. در پشت رتور، پهنای این پی باد هر ۱۰۰ متر حدوداً ۷/۵ متر اضافه می‌شود و سرعت باد در این فاصله افزایش می‌یابد تا در نهایت به مقدار اولیه‌اش برسد [۷۸]. رابطه بین سرعت باد V و فاصله x در پشت رتور به‌وسیله رابطه (۱-۳) تعریف می‌شود:

$$V = V_0 \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{R}{R + \alpha x} \right)^2 \right] \quad (1-3)$$

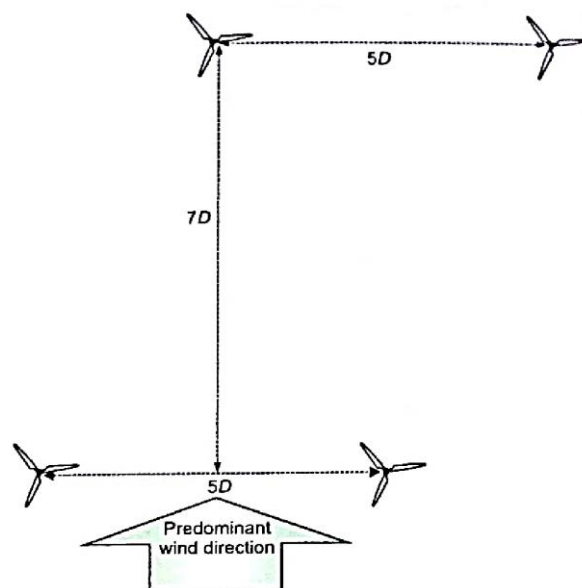
که در این رابطه، V سرعت باد x متر در پشت رتور، V_0 سرعت مختل نشده باد، R شعاع رتور است. α نیز ثابت فروپاشی تضعیف^۲ است (معیاری که نشان می‌دهد چقدر سریع پی باد در پشت توربین عریض

^۱ Wind wake

^۲ Wake decay constant

می‌شود و از بین می‌رود). شاخص α به کلاس سختی و ناهمواری زمین بستگی دارد و بدون واحد است. در دشت‌ها معمولاً برابر با ۰/۰۷۵ و در نواحی ساحلی برابر با ۰/۰۴ تنظیم می‌شود.

در یک گروه ۲ الی ۳ توربینی که معمولاً در یک خط مستقیم عمود بر جهت باد غالب قرار داده می‌شوند، فاصله بین توربین‌ها برحسب قطر رتورشان سنجیده می‌شود، چراکه اندازه پی باد به اندازه قطر رتور (D) بستگی دارد. یک قانون عمومی تخمینی^۱ این است که توربین‌هایی را که در یک ردیف قرار دارند در فاصله ۵ برابر قطر رتورشان قرار دهیم. نیروگاه‌های توان بادی بزرگ‌تر شامل چندین ردیف از توربین‌ها هستند. در این مورد فاصله بین ردیف‌ها معمولاً ۷ تا ۸ برابر قطر رتورشان خواهد بود [۷۸]. موارد گفته‌شده در شکل (۳-۴) از مرجع [۷۸] به نمایش گذاشته شده است.

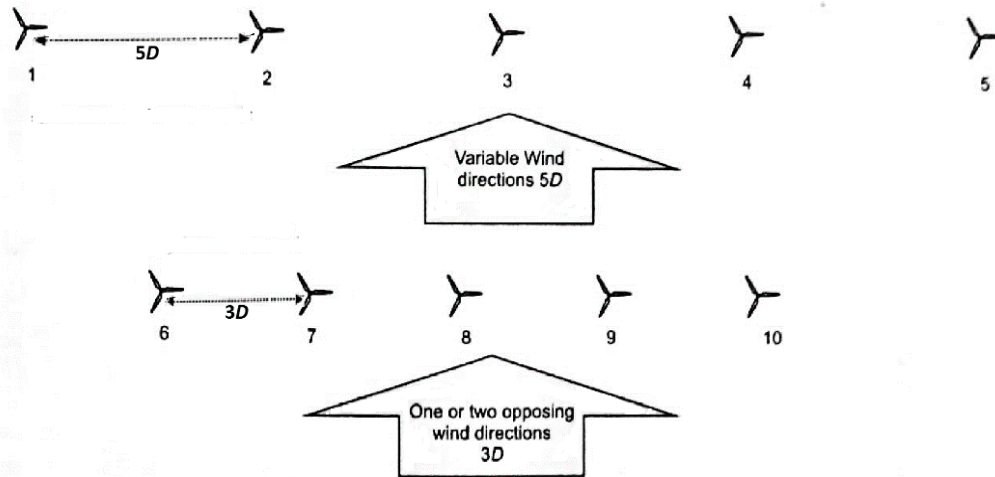


شکل (۳-۴) پیکربندی مکان مزرعه بادی؛ قانون عمومی برای چیدمان نیروگاه توان بادی داشتن فاصله در یک ردیف برابر با $5D$ (قطر رتور) و یک فاصله برابر با $7D$ بین ردیف توربین‌ها [۷۸]

با این حال چیدمان واقعی یک مزرعه بادی، معمولاً به وسیله‌ی محدودیت‌هایی که توسط شرایط محلی تعیین می‌شوند مانند محدودیت استفاده از زمین، فاصله تا مناطق مسکونی، جاده‌ها و شبکه قدرت انجام می‌گیرد. اگر تغییر ارتفاع در مکان مزرعه وجود داشته باشد چیدمان توربین‌ها تغییر خواهد کرد تا تولید

^۱ Common rule of thumb

توان بهینه شود. معمولاً منطقی نیست که فاصله بین توربین‌ها را برای کاهش اثر پی باد زیاد کنیم چراکه این کار استفاده‌ی نامفید از زمین است. این مورد را بازده مزرعه می‌نامند. برای یک گروه ۵ تا ۱۰ توربین این بازده باید ۹۰٪ باشد. در فاصله‌هایی که یک یا دو جهت باد متضاد دارند، فاصله بین توربین‌ها به ۲ الی ۳ قطر رتور کاهش می‌یابد [۷۸]. (شکل ۳-۵):



شکل (۳-۵) کاهش فاصله در یک ردیف بین توربین‌ها از $5D$ به $3D$ در صورت داشتن باد در یک یا دو جهت متضاد [۷۸]

۳-۴-۱ محاسبه توان قابل استحصال با توجه به قانون عمومی تخمینی

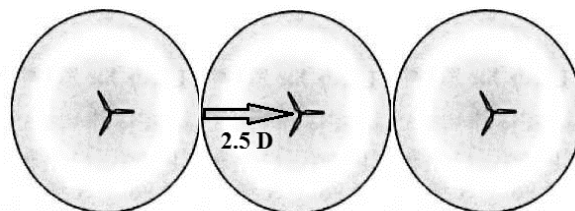
در این بخش قصد داریم با توجه به مفاهیم و روشی که در قسمت قبل بیان شد و شرایط واقعی که در منطقه خواف وجود دارد، تخمینی از مقدار توان الکتریکی قابل استحصال از منطقه به دست آوریم. همان‌طور که ذکر شد منطقه خواف دارای زمین‌های معدنی می‌باشد که در حال حاضر در حال بهره‌برداری هستند و تحت مالکیت شرکت‌های دولتی یا خصوصی قرار دارند. لذا زمین‌های این معادن اجازه کاربری دیگری ندارند. از طرفی با توجه به وسعت منطقه زمین‌های دیگری نیز در حال اکتشاف و انجام مراحل قانونی هستند که امکان دارد هرکدام از آن‌ها در زمانی به بهره‌برداری برسند و لذا آن‌ها نیز از زمره زمین‌هایی خارج می‌شوند که می‌توان در آن‌ها مزرعه بادی احداث نمود.

بنابراین باید حالت‌های متفاوتی را در نظر گرفت که در آن‌ها میزان زمین‌های آزاد منطقه با توجه به مقدار پیشرفت صنعتی و بهره‌برداری از زمین‌ها متفاوت خواهد بود. برای این کار در ادامه با در نظر

گرفتن فرضیاتی، وضعیت زمین‌های معدنی با تطبیق نقشه‌های GIS^۱ بر تصاویر ماهواره‌ای معرفی می‌شود. سپس با فرض ۲ حالت برای وضعیت بهره‌برداری زمین‌ها مقدار توان قابل حصول از منطقه خواف محاسبه می‌گردد.

۳-۴-۱-۱ فرضیات

با توجه به اینکه سرعت میانگین باد منطقه در محدوده بالایی قرار دارد لذا گمان می‌رود بتوان از توربین‌های با توان ۱/۵MW، ۲MW و حتی ۳MW در احداث مزارع بادی استفاده کرد. این موضوع با توجه به پیکربندی، انتخاب و استفاده از توربین‌هایی با توان‌های نامی ذکر شده توسط شرکت‌های پیمانکار در منطقه تأیید می‌شود. همچنین با توجه به کلاس‌بندی منطقه برحسب توان و چگالی توان که در بخش ۳-۵ از همین فصل ارائه خواهد شد محدوده توانی توربین‌های پیشنهادی جهت استفاده در مزارع در همین مقادیر خواهد بود. لذا ما فرض می‌کنیم از توربین‌های ۱/۵MW در مزارع استفاده شود. حال باید ناحیه تحت پوشش یک توربین را که در شکل (۳-۶) دیده می‌شود را محاسبه کرد.

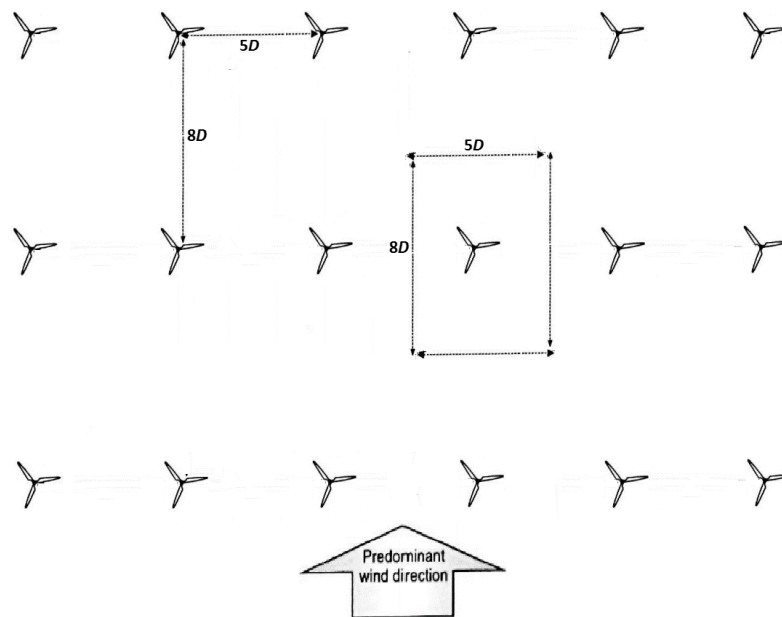


شکل (۳-۶) فاصله بین توربین‌ها- ناحیه تحت پوشش توربین در چیدمان ردیفی

در شکل (۳-۶) ناحیه تحت پوشش باد توربین در یک آرایش ردیفی به صورت دوایری نشان داده شده است که شعاع هریک از این دوایر ۲/۵ برابر قطر رتور توربین‌ها است. به عبارتی فاصله بین هر توربین ۵ برابر قطر رتور توربین‌ها است. چنانچه یک مزرعه بادی بزرگ داشته باشیم بی‌شک چند ردیف از این توربین‌ها وجود خواهد داشت. در شکل (۳-۷) سه ردیف از توربین‌ها را می‌بینیم. در صورتی که بخواهیم ناحیه تحت پوشش باد توربین را در حالت چند ردیفی محاسبه کنیم، مانند شکل (۳-۷) یک ناحیه

^۱ Geographic Information System

مستطیل شکل خواهد بود. طول این مستطیل در مطالعه ما ۸ برابر و عرض مستطیل ۵ برابر قطر رتور فرض می‌شود. حال اگر یک توربین ۱/۵MW با قطر رتور ۷۷ متر را برای محاسباتمان در نظر بگیریم، ناحیه تحت پوشش توربین ما برابر با مساحت مستطیلی به طول حدوداً ۶۰۰ متر و عرض ۳۸۰ متر خواهد بود. در ادامه با در نظر گرفتن ۲ حالت برای بهره‌برداری زمین‌ها مقدار توان الکتریکی که از مزارع با توربین‌های ۱/۵MW به دست می‌آیند را محاسبه خواهیم کرد.



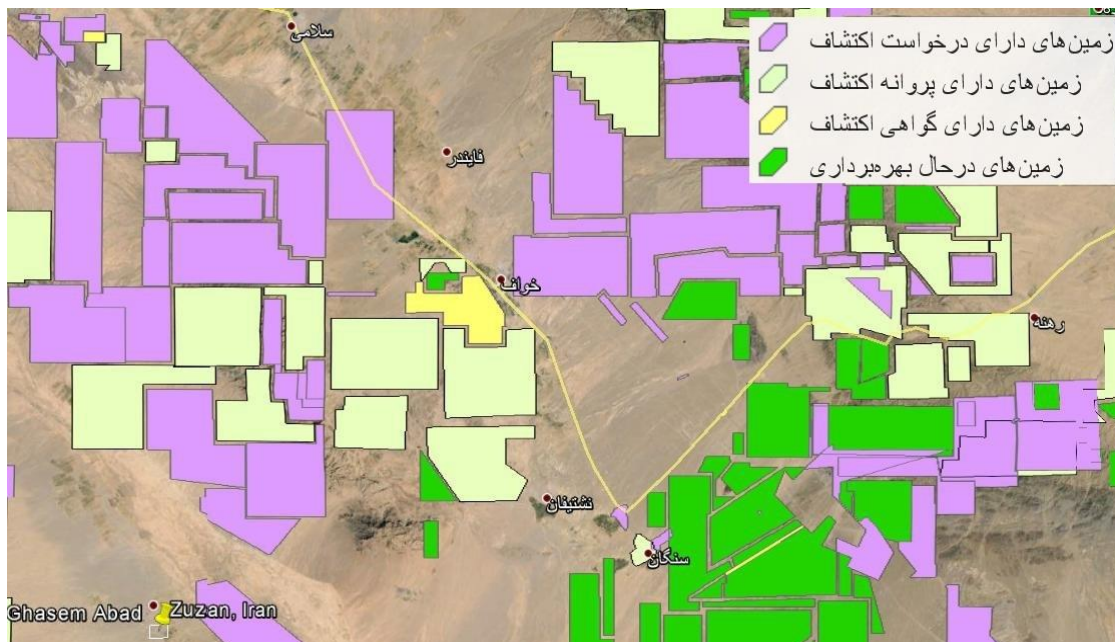
شکل (۷-۳) فاصله بین توربین‌ها در یک مزرعه بزرگ- ناحیه تحت پوشش باد توربین در آرایش چند ردیفی

۲-۱-۴-۳ حالت اول: محاسبه توان قابل استحصال در وضعیت بهره‌برداری از تمامی زمین‌های

معدنی منطقه خواف

با دقت در شکل (۸-۳) متوجه حضور ۴ رنگ مختلف می‌شویم. رنگ سبز مربوط به زمین‌هایی است که در حال حاضر بهره‌برداری می‌شوند. این زمین‌ها به هیچ‌وجه جزء زمین‌های آزاد منطقه به حساب نمی‌آیند و نباید به عنوان زمین‌های قابل دسترسی جهت احداث مزرعه بادی به حساب آورد. رنگ بنفش مربوط به زمین‌هایی است که درخواست اکتشاف برای آن‌ها داده شده است. رنگ زرد برای آن‌هایی است که گواهی اکتشاف آن‌ها صادر شده و در نهایت رنگ زیتونی برای زمین‌هایی است که پروانه اکتشاف آن‌ها

صادر شده است. در این حالت فرض می‌کنیم که تمام این زمین‌ها در افق برنامه‌ریزی ما به بهره‌برداری رسیده‌اند بنابراین نمی‌توان در این زمین‌ها مزرعه بادی احداث کرد.



شکل (۳-۸) نمایش وضعیت بهره‌برداری زمین‌های معدنی منطقه خواف در تصاویر ماهواره‌ای. رنگ سبز مربوط به زمین‌های در حال بهره‌برداری، بنفش مربوط به زمین‌های دارای درخواست اکتشاف، زرد مربوط به زمین‌های دارای گواهی اکتشاف و زیتونی مربوط به زمین‌های دارای پروانه اکتشاف

از آنجاکه قصد داریم فقط زمین‌های شهرستان خواف را مورد مطالعه قرار دهیم مناسب است تا مرزهای مطالعه را مشخص کنیم. این کار با توجه به شکل (۳-۸) و برحسب محدودیت‌های جغرافیایی و منافع متضاد صورت گرفته است. محدوده مطالعه ما یک فاصله ۲۰ کیلومتری با کشور افغانستان را حفظ می‌کند، همچنین در حاشیه جاده ارتباطی خواف- تربت حیدریه فاصله ۱ تا ۳ کیلومتری در نظر گرفته‌ایم. در حاشیه این جاده، از نشتیفان تا بخش سلامی، از محل نشتیفان تا نشانگر زوزن و از نشتیفان تا محل معدن آهن سنگان در بخش پایین خواف در محاسبه‌ی زمین‌های آزاد ما وارد شده‌اند.

با توجه به اطلاعات جامع و فرضیاتی که در قسمت‌های قبلی ارائه شد و در نظر گرفتن ناحیه تحت پوشش باد یک توربین، اگر همان فواصل ۶۰۰ و ۳۸۰ متر را در نظر بگیریم، محدوده‌ای با ۰/۲۲۸ کیلومترمربع برای هر توربین موردنیاز است. با اندازه‌گیری‌هایی که در محیط GIS انجام شد، میزان

زمین‌های آزاد عددی برابر با ۵۲۵/۸۹ کیلومتر مربع به دست آمد. حال برای محاسبه توان الکتریکی قابل استحصال از منطقه در این حالت از رابطه (۲-۳) استفاده می‌نماییم:

$$(۲-۳) \quad \text{توان نامی توربین} \times \text{مساحت زمین های آزاد محاسبه شده} = \frac{\text{توان قابل استحصال}}{\text{مساحت ناحیه تحت پوشش باد توربین}}$$

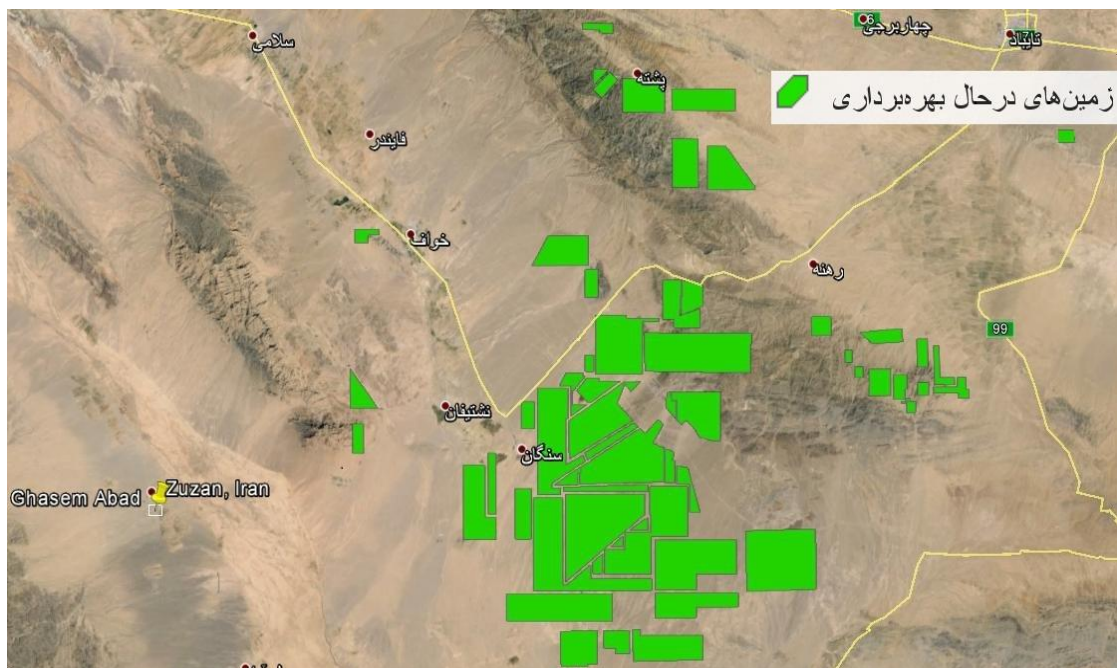
با استفاده از رابطه (۲-۳) توان قابل حصول از منطقه در حالتی که تمامی زمین‌های معدنی در افق برنامه‌ریزی به بهره‌برداری رسیده باشند، عددی برابر با ۳۴۵۹/۸MW به دست می‌آید. دقت شود این عدد با فرض استفاده از توربین‌های ۱/۵MW در مزارع بادی حاصل شده است. در ادامه حالت دیگری را برای میزان پیشرفت صنعتی و بهره‌برداری زمین‌های معدنی در نظر می‌گیریم.

۳-۱-۴-۳ حالت دوم: توان الکتریکی قابل استحصال تنها در حضور زمین‌های معدنی در حال

بهره‌برداری

این بدین معناست که معادن جدیدی در منطقه به بهره‌برداری نرسند و در افق برنامه‌ریزی تنها معادنی وجود داشته باشند که اکنون در حال بهره‌برداری هستند. احتمال رخداد چنین فرضی پایین است چراکه سیاست‌های دولت و نیز ذخایر عظیم سنگ آهن منطقه چنین اجازه‌ای را نخواهد داد. با این حال، مناسب دیده می‌شود تا این حالت نیز ارزیابی گردد.

در شکل (۳-۹) منطقه خواف به همراه معادن در حال بهره‌برداری دیده می‌شود. این معادن بارنگ سبز نمایش داده می‌شوند.



شکل (۳-۹) نمایش زمین‌های معدنی در حال بهره‌برداری منطبق بر تصاویر ماهواره‌ای در منطقه خواف. رنگ سبز مربوط به زمین‌های در حال بهره‌برداری، زمین‌های سیاه‌رنگ مربوط به ۴ مزرعه بادی

عددی که در این حالت با فرض‌های قبلی مانند حفظ فاصله از مرز افغانستان و راه‌های ارتباطی و نیز عدم تجاوز به زمین‌های معادن در حال بهره‌برداری برای مساحت زمین‌های آزاد به دست می‌آید برابر با $773/29$ کیلومترمربع می‌باشد. لذا با استفاده از رابطه (۳-۲) توان الکتریکی قابل استحصال عددی معادل با $5087/43 \text{ MW}$ محاسبه می‌شود.

در دو بخش قبلی ما بیشترین و کمترین توان الکتریکی قابل استحصال را با فرضیات مشخصی محاسبه کردیم. در کمترین حالت عددی معادل با 3460 MW و در بیشترین حالت حدوداً 5090 MW را می‌توان در برنامه‌ریزی در نظر گرفت. این نحوه محاسبه سرانگشتی، اعداد تخمینی مناسبی را در اختیار طراحان و برنامه‌ریزان قرار می‌دهد. البته مقادیر به‌دست‌آمده آن‌قدر زیاد هستند که قرار دادن این مقادیر در مطالعات سیستم قدرت چالش‌های بسیاری در زمینه‌های پایداری، قابلیت اطمینان و دینامیک شبکه ایجاد می‌کنند. چنانچه بجای توربین‌های $1/5 \text{ MW}$ از توربین‌های 2 MW یا 3 MW با قطر رتور 103 متر استفاده شود، اعداد به‌دست‌آمده برای توان الکتریکی تغییرات معناداری خواهند کرد. در جدول (۳-۱) این اعداد در هر ۲ حالت وضعیت زمین‌های معدنی ذکر شده‌اند.

جدول (۱-۳) توان الکتریکی قابل استحصال از منطقه خواف در حالت‌های مختلف زمین‌های معدنی و توان نامی توربین‌های انتخابی مزارع

توان قابل استحصال (MW)		ظرفیت توربین
حالت دوم: تنها در حضور زمین‌های معدنی در حال بهره‌برداری	حالت اول: بهره‌برداری کامل از تمامی زمین‌های معدنی منطقه	
۵۰۸۷/۴۳	۳۴۵۹/۸	توربین ۱/۵ مگاواتی
۲۳۰۱/۴۶	۱۵۶۵/۱۵	توربین ۲ مگاواتی
۳۴۵۲/۲	۲۳۴۷/۷	توربین ۳ مگاواتی

۳-۴-۲ بهینه‌سازی نیروگاه بادی

یک طراح پروژه باید چیدمان نیروگاه بادی را بهینه کند. همچنین باید از پارامترهایی که نیازمند بهینه‌سازی می‌باشند آگاه شود. برای مالک و بهره‌بردار مزرعه بادی، نه توان نصب‌شده برحسب مگاوات و نه توان خروجی نهایی بهینه می‌شوند. پارامتر مرتبط هزینه-فایده است، یعنی هزینه هر کیلووات ساعت توان الکتریکی باید کمینه شود. همچنین ناحیه مورد استفاده باید با بازده بکار گرفته شود. برای مالک زمین و همچنین توزیع‌کننده، سودمند است که بیشترین تعداد توربین را نصب کنند، اما برای مالک نیروگاه یا بهره‌بردار این گونه نیست.

زمین در دسترس و ظرفیت شبکه، بیشینه‌ی توان قابل نصب را محدود می‌کنند. طراح و یا به‌جای آن مصرف‌کننده‌ای که سفارش یک نیروگاه بادی را داده است، ممکن است محدودیت‌هایی درباره هزینه کل سرمایه‌گذاری داشته باشند. رابطه‌ی بین این فاکتورها چهارچوب بهینه‌سازی را برای پیکربندی نیروگاه بادی تنظیم می‌کند. خود توربین‌های بادی باید مناسب منابع بادی محل نیروگاه باشند.

در فرآیند بهینه‌سازی، بازده مزرعه مفهومی کلیدی است. هنگامی که تعداد زیادی توربین در یک مکان نصب شوند، مقداری باد را از یکدیگر می‌ربایند و مقدار این کار به پیکربندی مزرعه، مکان توربین‌ها و فاصله (برحسب قطر رتور) بین توربین‌ها وابسته است.

رسیدن به بازده ۱۰۰ برای مزرعه غیرواقعی است اما می‌توان بازده را تا حد امکان بالا برد. با همان تعداد توربین و همان مقدار زمین، می‌توان بازده پارک بادی را توسط قانون عمومی بهینه کرد. بازدهی پارک را همچنین می‌توان با تنظیم دقیق مکان توربین‌ها و بررسی آن به‌وسیله محاسبات بهینه نمود. با نگاه به هزینه‌ها، تلفات ۱۰٪ تولید - یک بازدهی پارک ۹۰ درصدی - را می‌توان با نصب بیشتر توربین‌ها، تفکیک کردن سرمایه‌گذاری‌های لازم برای جاده‌های دسترسی، اتصال به شبکه، جرثقیل‌ها و غیره به‌منظور ظرفیت بیشتر جبران کرد؛ اما پی باد ۱۰ درصدی باعث فرسودگی و خرابی بیشتر برای توربین‌ها به علت قرار گرفتن بیشتر در نوسانات بادی ایجادشده توسط توربین‌های بیشتر می‌شود.

زمانی که یک مزرعه بادی دیگر در نزدیکی احداث شود و در مسیر باد غالب مزرعه شما باشد، به‌رحال خروجی نیروگاه شما را کاهش می‌دهد. این مقدار کاهش بستگی به فاصله آن مزرعه دارد. در این موارد باید فاصله‌ی ۱۵ برابر قطر رتورها بین مزارع باشد. ظرفیت شبکه نیز یک سؤال حساس می‌باشد. همواره محدودیتی برای تزریق توان وجود دارد چراکه اگر مزرعه توان زیادی تزریق کند به‌ناچار از شبکه قطع می‌شود. به عبارتی این حالت شرایط باخت-باخت است [۷۸].

۳-۵ ارزیابی پتانسیل انرژی باد و مشخصه‌های احتمالی رژیم بادی منطقه خواف با

استفاده از روش آماری

شرایط جغرافیایی ایران به صورتی است که فشار پایین هوا موجب ایجاد جریان‌های هوایی قوی به‌طور کلی در مدت بین تابستان و زمستان در مقایسه با فشار بالا در نواحی شمال و شمال غربی می‌شود. اختلاف زیادی در فشار هوای موجود در اتمسفر بر روی ایران، مرکز آسیا و همچنین اقیانوس اطلس در طی ماه‌های زمستان وجود دارد که باعث وزش بادهای سرد از سمت شمال و جریان‌های هوای مرطوب از سمت اقیانوس اطلس و دریای مدیترانه از سمت غرب ایران می‌شود. ایران همچنین تحت تأثیر بادهایی از سمت اقیانوس اطلس در شمال غربی و بادهایی از سمت اقیانوس هند در سمت جنوب شرقی در طول تابستان قرار دارد که به بادهای ۱۲۰ روزه‌ی سیستان معروف است. دیگر بادهای موجود

عبارت‌اند از: بادهای شمالی در خلیج فارس و بادهای کوچ‌باد در جلگه گرگان، دیزباد بین مشهد و نیشابور و نیز بادهای شام در خوزستان [۸۲].

مشخصه‌های احتمالی توان بادی نقش ویژه‌ای در برنامه‌ریزی، طراحی و بهره‌برداری توربین‌های بادی بازی می‌کند. از نظر تئوری، این مشخصه‌ها توابعی از رفتار سرعت باد هستند؛ بنابراین لازم است روابط تحلیلی بین آمار داده‌های سرعت باد و مشخصه‌های توان بادی توسعه داده شوند [۸۳]. پتانسیل انرژی بادی ممکن است به صورت پتانسیل یک کشور، یک قاره و یا به یک مکان مشخص ارجاع داده شود. ارزیابی پتانسیل انرژی بادی با پیش‌بینی فرق دارد، چراکه اولی معمولاً با انرژی تولیدی سالیانه سروکار دارد ولی پیش‌بینی به محاسبه‌ی داده‌ها در ۲۴ الی ۷۲ ساعت آینده می‌پردازد [۸۴].

۳-۵-۱ مروری بر پیشینه مطالعات

گراسی (Grassi) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مقدار انرژی سالیانه را برای ایالت آیووا در امریکا محاسبه کرد. در به‌کارگیری ابزار GIS ملاحظات و قیود محیطی و انسانی در نظر گرفته شده است. او با استفاده از آنالیز حساسیت مقادیر توافق خرید توان را محاسبه نمود و در نهایت در نقشه‌های ماهواره‌ای زمین‌های ایالت آیووا با تطبیق بر GIS، ضریب ظرفیتی تعریف کرد و به صورت طیف رنگی در نقشه‌ها نمایش داد [۸۵]. آلتانکایناک (Altunkaynak) با استفاده از تئوری آشوب به دنبال فرمولی برای توان خروجی توربین بادی به صورت استفاده از روابط آماری است که موجب دستیابی به فرمول عمومی برای مقدار انتظاری خروجی توان و دیگر پارامترها مانند انحراف معیار و ضریب واریانس شد. او با مطالعه سه مکان مختلف در کشور ترکیه و رسم نمودارهای چگالی بر حسب سرعت باد و رسم تابع توزیع تجمعی و برازش آن‌ها با تابع ویبال^۱، دقت بالای محاسباتش را نشان داد. همچنین با در نظر گرفتن دو سطح ریسک، برتری مناطق را برای احداث نیروگاه بادی مقایسه نمود [۸۳].

^۱ Weibull Function

مطالعات ارزیابی پتانسیل انرژی‌های تجدید پذیر به‌ویژه باد در ایران نیز در سال‌های اخیر بیشتر بچشم می‌خورد که از نمونه‌های آن می‌توان به مطالعه آقایان بهرامی و عباس زاده اشاره کرد. آن‌ها با نگاهی به روند رو به رشد مصرف انرژی در جهان و ایران و نیز گرایش به استفاده از منابع انرژی پاک، مانند خورشید، باد و زمین‌گرایی استعدادهای ایران را در این زمینه با آوردن نقشه‌های جغرافیایی و نمایش مکان‌های مستعد مشخص کردند [۸۶]. علمداری، نعمت‌اللهی و میرحسینی به ارزیابی مهم‌ترین مشخصه‌های انرژی بادی در ۶۸ ایستگاه هواشناسی در سراسر ایران پرداخته‌اند و با استفاده از روش آماری و برازش با توزیع ویبال، سرعت متوسط باد، تابع توزیع باد و متوسط چگالی انرژی باد و گلباد^۱ را برای آن مکان‌ها نمایش دادند. نتیجه کار مناسب بودن تمامی مکان‌های مورد مطالعه برای نصب توربین‌های بادی است [۸۷]. ارزیابی پتانسیل انرژی در ایران در نواحی دیگری مانند یزد [۸۸]، منجیل در استان گیلان [۸۹] و تهران [۹۰] انجام شده است.

۳-۵-۲ آنالیز داده‌های باد

برای این قسمت از مطالعه، داده‌ها در طول بازه‌ی زمانی یک سال از ابتدا تا انتهای سال ۲۰۰۸ در فاصله‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای جمع‌آوری شده است. ثبت‌کننده داده از ۳ حسگر در ارتفاع‌های ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری برای ثبت سرعت باد و از ۲ حسگر در ارتفاع‌های ۳۰ و ۳۷/۵ متری برای ذخیره جهت باد استفاده کرده است [۹۱].

۳-۵-۳ روش‌شناسی

آگاهی از توزیع فراوانی سرعت باد نقش مهمی برای تخمین پتانسیل باد در هر مکان بازی می‌کند. با شناخته شدن توزیع سرعت باد، هم پتانسیل توان باد و هم امکان‌پذیری اقتصادی محل قابل‌محاسبه است. تابع توزیع دو پارامتری ویبال معمولاً به‌عنوان بهترین تابع برازش شناخته می‌شود، چراکه سادگی و دقت زیادی در آنالیز داده‌ها دارد. تابع چگالی توزیع ویبال به‌صورت رابطه‌ی (۳-۳) است [۹۲-۹۶]:

^۱ Wind Rose

$$f_w(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (3-3)$$

که در آن $f_w(v)$ احتمال سرعت باد برای سرعت v پارامتر بی‌بعد شکل k ($k > 0$) و c پارامتر اندازه برحسب متر بر ثانیه است ($c > 1$). از میان روش‌های موجود برای محاسبه پارامترهای تابع ویبال، از روش انحراف معیار در این مطالعه استفاده می‌کنیم. با استفاده از این روش k و c از روابط (3-4) و (3-5) محاسبه می‌شوند [93-95]:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (4-3)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1 + 1/k)} \quad (5-3)$$

برای محاسبه متوسط سرعت باد (\bar{v}) و انحراف معیار (σ) از روابط معرفی شده در زیر می‌توان استفاده کرد:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (6-3)$$

$$\sigma = \left[\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \right) \right]^{0.5} \quad (7-3)$$

که در آن‌ها n تعداد مشاهدات است. همچنین $\Gamma(x)$ تابع گاما بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود [95, 96]:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-u) u^{x-1} dx \quad (8-3)$$

برای ارزیابی منبع باد موجود در یک محل، لازم است تا چگالی توان باد محاسبه شود و نشان می‌دهد چه مقدار انرژی برای تبدیل به الکتریسیته در محل وجود دارد. توان بادی به صورت در واحد برحسب مساحت (A) به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (9-3)$$

بر اساس تابع چگالی احتمال ویبال، توان بادی را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۱۰-۳) محاسبه کرد

[۹۶-۹۳]:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv = \frac{1}{2} \rho \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (10-3)$$

که در آن ρ چگالی هوا در سطح دریا در متوسط دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ اتمسفر با مقدار $1/225 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ است. ما در این مطالعه با مقدار متوسط $1/076$ برای چگالی هوا در منطقه خواف به علت ارتفاع از سطح دریای منطقه سروکار داریم. با در نظرگیری روابط (۹-۳) و (۱۰-۳)، چگالی انرژی بادی برای یک بازه‌ی زمانی مشخص T به صورت زیر به دست می‌آید [۹۷]:

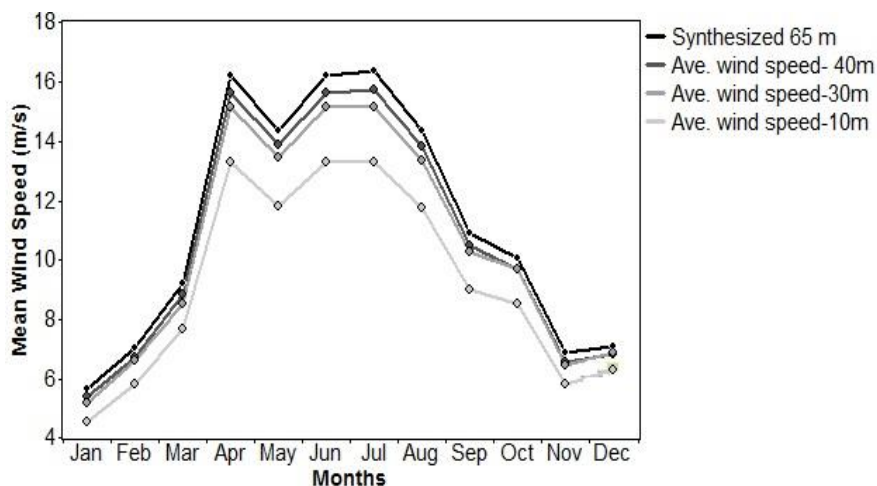
$$E = PT \quad (11-3)$$

۴-۵-۳ مطالعه موردی منطقه خواف

در جدول (۲-۳) سرعت متوسط باد به ازای هرماه از سال ۲۰۰۸ و برای ۳ ارتفاع ذکر شده نمایش داده شده است. بر اساس داده‌های این جدول، شکل (۱۰-۳) رسم شده است که متوسط سرعت باد را برای ۳ ارتفاع و نیز ارتفاع نمونه ۶۵ متر نشان می‌دهد که حداقل ارتفاع برای یک توربین با توان بیش از ۱ مگاوات است. با دقت در جدول (۲-۳) و شکل (۱۰-۳) می‌توان دریافت بیشترین مقدار متوسط سرعت باد اندازه‌گیری شده در همه ارتفاعها مربوط به ماه جولای با مقدار $15/723$ متربرثانیه بوده و کمترین متوسط سرعت باد با مقدار $5/37$ متربرثانیه در ماه ژانویه تقریباً مصادف با دی‌ماه اتفاق می‌افتند (جدول (۲-۳)). از ماه آوریل تا اوت که مصادف با اواسط فروردین تا دهه اول شهریورماه می‌باشند، رژیم باد مقادیر بالایی را نشان می‌دهد که این به معنای قابلیت تولید توان بیشتر است.

جدول (۲-۳) سرعت متوسط سالیانه در ۳ ارتفاع و ثوابت توزیع ویبال سالیانه

۴۰ متر		۳۰ متر		۱۰ متر		۴۰ متر	۳۰ متر	۱۰ متر	
c(m/s)	k	c(m/s)	k	c(m/s)	k	سرعت متوسط (m/s)			ماه
۵/۶۹۲	۱/۱۷۷	۵/۴۱۹	۱/۱۷۳	۴/۸۶۹	۱/۲۴۵	۵/۳۷۰	۵/۱۱۸	۴/۵۲۲	ژانویه
۷/۲۸۴	۱/۲۹۸	۷/۰۴۲	۱/۳۰۷	۶/۲۹۹	۱/۳۶۹	۶/۷۲۰	۶/۴۸۸	۵/۷۴۳	فوریه
۹/۸۳۱	۱/۶۵۷	۹/۳۴۱	۱/۵۸۱	۸/۲۵۹	۱/۶۲۳	۸/۸۰۳	۸/۳۹۲	۷/۸۸۲	مارس
۱۷/۱۱۵	۴/۳۳۴	۱۶/۶۲۰	۴/۰۹۳	۱۴/۶۳۵	۳/۸۹۹	۱۵/۶۱۵	۱۵/۱۱۷	۱۳/۷۷۶	آوریل
۱۵/۴۰۳	۳/۱۶۰	۱۴/۹۳۱	۲/۹۷۲	۱۳/۱۴۹	۲/۹۳۱	۱۳/۸۴۱	۱۴/۳۸۰	۱۱/۷۶۸	می
۱۷/۱۴۰	۴/۳۸۱	۱۶/۶۲۰	۴/۰۹۳	۱۴/۶۳۵	۳/۸۹۹	۱۵/۶۳۹	۱۵/۶۱۷	۱۳/۷۷۶	ژوئن
۱۷/۲۰۲	۴/۶۲۸	۱۶/۶۴۵	۴/۲۰۳	۱۴/۶۳۰	۴/۰۵۶	۱۵/۷۲۳	۱۵/۶۳۲	۱۳/۷۷۶	جولای
۱۵/۳۸۳	۳/۱۵۶	۱۴/۸۶۹	۲/۹۷۱	۱۳/۱۰۴	۲/۹۳۱	۱۳/۸۲۵	۱۳/۸۲۴	۱۲/۷۲۸	اوت
۱۱/۷۴۲	۱/۹۷۲	۱۱/۳۰۱	۱/۹۲۸	۹/۹۹۰	۱/۹۸۱	۱۰/۴۷۳	۱۰/۰۷۸	۸/۸۹۴	سپتامبر
۱۰/۷۹۷	۱/۷۶۵	۱۰/۴۰۱	۱/۷۳۹	۹/۳۲۴	۱/۸۰۴	۹/۶۵۴	۹/۳۰۳	۸/۸۱۰	اکتبر
۷/۱۷۴	۱/۳۹۸	۶/۹۰۰	۱/۳۹۱	۶/۲۳۰	۱/۴۹۲	۶/۵۴۴	۷/۲۹۵	۵/۶۲۲	نوامبر
۷/۴۱۰	۱/۳۴۳	۷/۲۲۱	۱/۳۷۶	۶/۴۸۸	۱/۴۶۰	۶/۸۲۰	۶/۶۱۳	۵/۸۷۵	دسامبر
۱۲/۱۱۶	۱/۷۱۷	۱۱/۶۷۵	۱/۶۸۷	۱۰/۳۳۸	۱/۷۳۲	۱۰/۸۹۴	۱۰/۷۱۹	۹/۵۳۷	کل سال

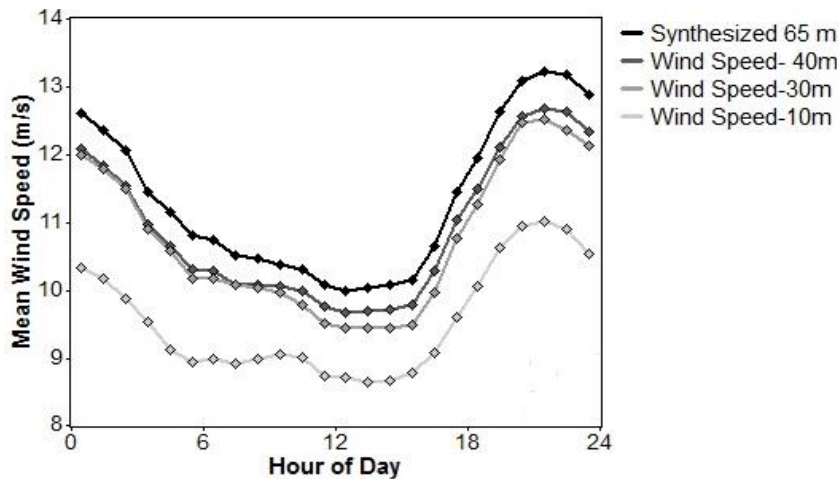


شکل (۱۰-۳) سرعت متوسط باد در ماه‌های مختلف به ازای ارتفاع ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متر در منطقه خواف

در شکل (۱۱-۳) سرعت متوسط را برای ارتفاع اندازه‌گیری نسبت به ساعات شبانه‌روز رسم

نموده‌ایم. نکته جالب‌توجه شروع افزایش میزان متوسط سرعت باد حدوداً در ساعاتی مربوط به عصر

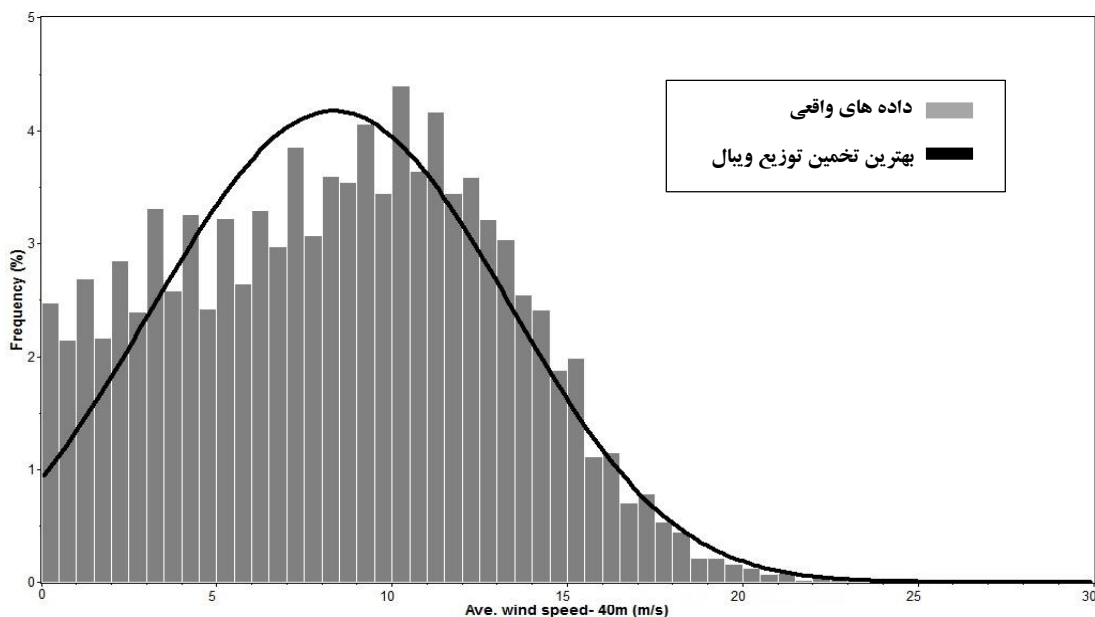
از ساعت ۴ تا اوج خود در انتهای شب است. این مورد معادل با افزایش توان تزریقی در این ساعات بوده و لذا مورد بسیار مهمی در مسائل بهره‌برداری از توربین‌هایی است که در این منطقه نصب خواهند شد.



شکل (۳-۱۱) تغییرات ساعتی متوسط سرعت باد به ازای ۳ ارتفاع ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متر در منطقه خواف

۳-۵-۴-۱ تابع توزیع ویبال

پارامترهای تابع توزیع ویبال در جدول (۳-۲) برای تمامی ماه‌های سال و برای هر ۳ ارتفاع ذکر شده محاسبه شده‌اند. در معرفی مفهومی پارامترهای محاسبه شده می‌توان گفت که پارامتر شکل (k) مقدار تیزی توزیع فراوانی را برای داده‌ها نشان می‌دهد و پارامتر اندازه (c) مقدار توانمندی باد را در منطقه‌ی موردنظر نشان می‌دهد [۹۷]. در شکل (۳-۱۲) توزیع فراوانی داده‌های سرعت باد در ارتفاع ۴۰ متر با تابع توزیع ویبال برازش شده است. بهترین برازش حاصله دارای پارامترهایی برابر با ($k=1.72, c=12.12$) است که قبلاً در جدول (۳-۲) به ازای تمام سال به دست آمده است.

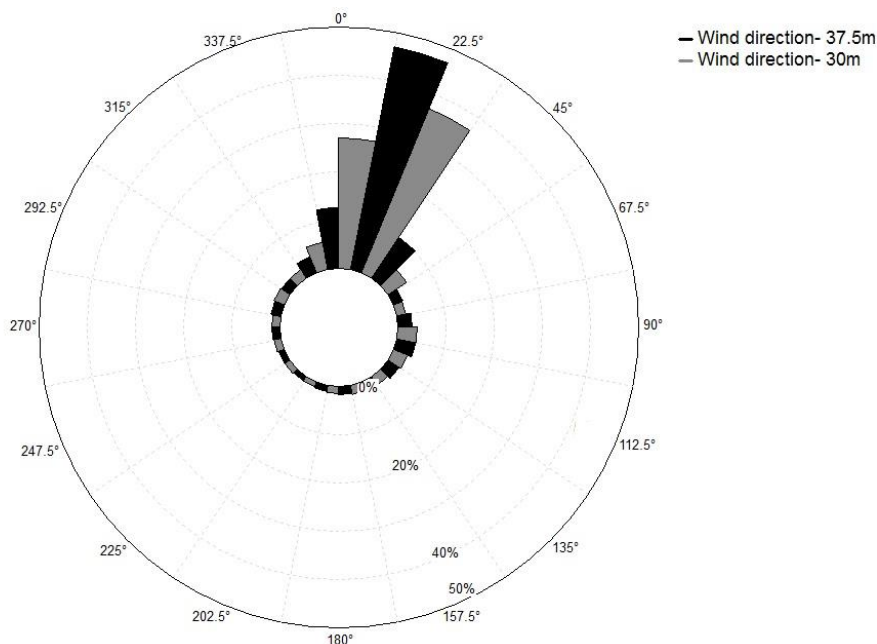


شکل (۳-۱۲) توزیع فراوانی متوسط سرعت باد در ارتفاع ۴۰ متر در منطقه‌ی خواف

۳-۴-۵-۲ گلباد

جهت باد بیشترین اهمیت را در ارزیابی امکان استفاده از انرژی باد داراست و نقش ویژه‌ای در مکان‌یابی و چیدمان دقیق توربین‌های یک مزرعه بادی بازی می‌کند. گلباد دیاگرامی است که توزیع زمانی جهت باد و توزیع مکانی سرعت باد را در یک مکان مشخص نمایش می‌دهد. گلباد ابزار مناسبی برای نمایش داده‌های بادسنج (سرعت و جهت باد) برای تحلیل مکان‌یابی است [۹۸].

براسم گلباد برای ۲ ارتفاع ۳۰ و ۳۷/۵ متر در شکل (۳-۱۳) به‌راحتی می‌توان دید جهت باد غالب در منطقه‌ی خواف به‌صورت شمال به شمال شرقی است. نزدیک به ۵۰ درصد مواقع در ارتفاع ۳۷/۵ متر، باد در محدوده‌ی زاویه‌ای ۱۱/۲۵ تا ۲۲/۵ درجه نسبت به شمال جغرافیایی می‌وزد و نزدیک به ۴۰ درصد مواقع در ارتفاع ۳۰ متری باد در محدوده‌ی زاویه‌ای ۲۲/۵ تا ۳۳/۷۵ درجه حضور دارد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شده بود، به‌طورکلی باد گرایش به وزش از شمال تا شمال شرق دارد و این خود دلیلی بر متفاوت بودن بادهای منطقه‌ی خواف از بادهای ۱۲۰ روزه‌ی سیستان است چراکه در این صورت باد گرایش به حضور از سمت جنوب شرق این شهرستان می‌داشت.



شکل (۳-۱۳) دیاگرام گلباد در ارتفاع‌های ۳۰ و ۳۷/۵ متر در منطقه‌ی خواف

۳-۴-۵-۳ چگالی توان و انرژی باد

در جدول (۳-۳) مقادیر چگالی توان و انرژی برای ۳ ارتفاع ذکر شده محاسبه شده است. اعداد به دست آمده با میانگین‌گیری متوسط چگالی توان و انرژی باد در ماه‌های مختلف سال ۲۰۰۸ به دست آمده‌اند. اعدادی که در ستون ۶۵ متر قرار گرفته‌اند با توجه به این است که ارتفاع برج یک توربین با توان مگاواتی معمولاً بیش از مقداری است که توسط حسگرها ثبت می‌شوند و از طرفی نزدیک به ارتفاع برج یک توربین واقعی است. با ملاک قرار دادن کلاس‌بندی ارائه شده در جدول (۳-۴) [۹۴]، با قرار گرفتن منطقه‌ی خواف در بالاترین کلاس توان بادی (کلاس ۷) می‌توان دریافت که منطقه خواف بی‌شک برای نصب توربین‌های بادی و احداث مزرعه بادی کاملاً مناسب است.

جدول (۳-۳) متوسط چگالی توان و انرژی باد در ۴ ارتفاع برای منطقه خواف

متغیر	۱۰ متر	۳۰ متر	۴۰ متر	۶۵ متر
متوسط چگالی توان (W/m^2)	۸۳۹	۱۲۲۱	۱۴۳۰	۱۶۷۹
متوسط محتوای انرژی ($kWh/m^2/year$)	۷۳۵۰	۱۰۶۹۹	۱۲۵۲۰	۱۴۷۰۵

جدول (۳-۴) کلاس‌بندی چگالی توان بادی یک منطقه [۹۴]

کلاس توان بادی	توضیح	چگالی توان بادی در ۵۰ متر (W/m^2)
۱	ضعیف	۰ - ۲۰۰
۲	مرزی (نصب یا عدم نصب توربین)	۲۰۰ - ۳۰۰
۳	نسبتاً خوب	۳۰۰ - ۴۰۰
۴	خوب	۴۰۰ - ۵۰۰
۵	بسیار خوب	۵۰۰ - ۶۰۰
۶	برجسته	۶۰۰ - ۸۰۰
۷	عالی	۸۰۰ - ۲۰۰۰

۳-۶ نتیجه‌گیری

۱. محدوده بادخیز در شهرستان خواف از محل معدن آهن سنگان تا حوالی بخش سلامی از شهرستان خواف، در پایین شهرستان تا بالای بخش نشتیفان و به سمت غرب اگر برویم تا حوالی روستاهای زوزن و قاسم‌آباد وسعت دارد.
۲. میزان توان الکتریکی قابل استحصال از منطقه خواف در بهره‌برداری کامل از تمامی زمین‌های معدنی مستعد و در صورت استفاده از توربین‌هایی با توان‌های نامی $1/5MW$ ، $2MW$ و $3MW$ در مزارع بادی به ترتیب مقادیری برابر با $3460MW$ ، $1565/15MW$ و $2347/7MW$ به دست می‌آید.
۳. میزان توان الکتریکی قابل استحصال از منطقه خواف تنها در حضور زمین‌های در حال بهره‌برداری و در صورت استفاده از توربین‌هایی با توان‌های نامی $1/5MW$ ، $2MW$ و $3MW$ در مزارع بادی مقادیری برابر با $5090MW$ ، $2301/46MW$ و $3452/2MW$ مگاوات به دست می‌آید.

۴. مقادیر به دست آمده برای توان بادی قابل استحصال از منطقه خواف بر اساس روش قانون عمومی تخمینی گویای برتری نصب توربین‌های $1/5\text{MW}$ در این منطقه است. الویت بندی توان نامی توربین‌ها را می‌توان به ترتیب $1/5\text{MW}$ ، 3MW و 2MW ذکر کرد.
۵. بیشترین مقدار متوسط سرعت باد در طول سال در ماه جولای مصادف با تیرماه و کمترین متوسط سرعت باد در ماه ژانویه مصادف با دی‌ماه اتفاق می‌افتند. از ماه آوریل تا اوت که مصادف با اواسط فروردین تا دهه اول شهریورماه می‌باشند، رژیم باد مقادیر بالایی را نشان می‌دهد که این به معنای قابلیت تولید توان بیشتر در این ماه‌ها است.
۶. تغییرات ساعتی سرعت باد در طول شبانه‌روز در منطقه خواف به گونه‌ای است که در ساعت‌های عصر حدوداً از ساعت ۴ به بعد شروع به افزایش می‌کند تا به اوج سرعت خود در ساعت‌های انتهایی شب برسد. این مورد معادل با افزایش توان تزریقی در این ساعات بوده و لذا مورد بسیار مهمی در مسائل بهره‌برداری شبکه و پخش توان با توجه به تولید توربین‌هایی است که در این منطقه نصب خواهند شد.
۷. جهت غالب وزش باد در منطقه خواف به صورت شمال به شمال شرقی است. این خود دلیلی بر متفاوت بودن بادهای این منطقه از بادهای 120 روزه سیستان است.
۸. منطقه خواف در بالاترین کلاس توان بادی (کلاس ۷) قرار می‌گیرد. این مورد تأییدی بر مناسب بودن منطقه برای احداث مزارع بادی به به‌ویژه با توربین‌های بادی با توان‌های نامی مگاواتی است.

فصل چهارم

قابلیت اطمینان سیستم قدرت در حضور

تولید توان بادی

به میزان توانایی یک سیستم در انجام کاری که به آن محول شده است، قابلیت اطمینان می‌گویند. به عبارت دیگر قابلیت اطمینان یک سیستم، احتمال عملکرد رضایت‌بخش سیستم در یک دوره زمانی مشخص و تحت شرایط کاری معین است [۹۹]. با رقابتی شدن بازار برق و وابستگی به فناوری‌هایی که نیروی برق با قابلیت اطمینان بالا نیاز دارند، اهمیت استانداردهای قابلیت اطمینان افزایش یافته است. چراکه قابلیت اطمینان، درجه عملکرد اجزاء سیستم است که نتیجه‌ی آن تحویل برق با استانداردهای قابل قبول و به مقدار لازم به مصرف‌کننده‌ها خواهد بود. از سوی دیگر با توجه به افزایش سطح نفوذ واحدهای تولید بادی، بررسی تأثیر این واحدهای تولیدی بر سطح قابلیت اطمینان سیستم قدرت امری اجتناب‌ناپذیر است و کمک شایانی در امر برنامه‌ریزی و توسعه سیستم‌های قدرت خواهد کرد.

هدف از این فصل ارائه مفاهیم عمومی قابلیت اطمینان و نحوه محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان به کاررفته در محاسبات قابلیت اطمینان در این پایان‌نامه است. سپس به ارائه روش‌های مدل‌سازی باد و نیروگاه بادی در محاسبات قابلیت اطمینان پرداخته شده است. در انتها به مطالعه همبستگی تولید توان بادی و بار الکتریکی در منطقه خواف پرداخته شده است تا وضعیت این فاکتور مهم در مفاهیم قابلیت اطمینان و توسعه شبکه مشخص شود.

در ادامه فصل، در زیر بخش دوم ابتدا به تقسیم‌بندی مطالعات قابلیت اطمینان و مسائل مطرح در آن‌ها و معرفی و نحوه محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان پرداخته شده است. در زیر بخش سوم روش‌های مدل‌سازی باد و نیروگاه بادی ارائه شده است. به دلیل اهمیت شاخص همبستگی در مطالعه حاضر وضعیت همبستگی تولید توان بادی و بار الکتریکی در منطقه خواف در زیر بخش چهارم از این فصل مطالعه شده است. در انتهای فصل جمع و نتیجه‌های حاصل از این مطالعه آورده شده است.

۲-۴ مفاهیم قابلیت اطمینان سیستم قدرت

در دنیای رو به رشد امروزی، تأمین انرژی موردنیاز بخش‌های مختلف به‌خصوص بخش صنعت، به شیوه مداوم و مطمئن، از اهمیت بسزایی برخوردار است. از این‌رو در سال‌های اخیر، بسیاری از شرکت‌های تأمین‌کننده انرژی الکتریکی به سمت بهبود کیفیت خدمات‌رسانی به مشترکین خود رفته‌اند. یکی از معیارهایی که در کیفیت خدمات نقش اساسی دارد، تداوم تأمین انرژی و به‌عبارت‌دیگر تأمین میزان انرژی موردنیاز به‌صورت کامل و بدون قطع انرژی است. جهت بررسی این مسئله و سنجش کیفیت عملکرد سیستم قدرت از نقطه‌نظر پیوستگی در سرویس‌دهی به مشترکین، شاخص‌هایی مورداستفاده قرار می‌گیرد که به‌طور کلی تحت عنوان ارزیابی‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت نامیده می‌شود. بنابراین قابلیت اطمینان یک سیستم قدرت، بیانگر میزان اطمینان به عملکرد صحیح و مطلوب این سیستم در آینده و احتمال پاسخگویی مطلوب آن در سرویس‌دهی و انجام وظیفه از پیش تعیین‌شده آن است، به‌خصوص در طی شرایط نامساعدی که منجر به خرابی‌المان‌ها و ازکارافتادن بخشی از سیستم می‌شود [۹۹].

۱-۲-۴ تقسیم‌بندی مطالعات قابلیت اطمینان سیستم قدرت

مطالعات مربوط به ارزیابی سطح قابلیت اطمینان یک سیستم به دو بخش کلی ارزیابی امنیت سیستم و ارزیابی کفایت سیستم قدرت تقسیم می‌شود.

الف) ارزیابی کفایت^۱ سیستم

به توانایی یک سیستم برای تأمین کلیه تقاضاهای انرژی صورت گرفته از طرف تمامی مشترکین سیستم، کفایت یا شایستگی آن سیستم گفته می‌شود. برای حصول اطمینان از شایستگی یک سیستم، سه شرط اساسی باید برقرار باشد:

^۱ Adequacy Assessment

- میزان ظرفیت تولید انرژی در شبکه باید از مجموع میزان تقاضا و نیز میزان تلفات شبکه بیشتر باشد.
- شبکه باید قابلیت انتقال انرژی تولیدشده به مصرف‌کنندگان را داشته باشد. در این حالت، خطوط انتقال موجود باید توانایی انتقال این انرژی را بدون وقوع اضافه‌بار در المان‌های شبکه دارا باشند.
- توان تحویلی به مشترکین باید در محدوده ولتاژ موردقبول قرار داشته باشد.
- ارزیابی کفایت یک سیستم، اغلب تحت شرایط استاتیک و به‌عبارت‌دیگر شرایطی که اغتشاشی به سیستم وارد نشود، صورت می‌گیرد [۱۰۰].

ب) ارزیابی امنیت^۱ سیستم

امنیت یک سیستم به قابلیت آن سیستم برای تأمین تمامی بارها در شرایطی که یک یا چند اتفاق ناخواسته در سیستم به وقوع بپیوندد، اطلاق می‌شود. این اتفاق ناخواسته می‌تواند وقوع خطا در سیستم و یا خروج یک المان از مدار باشد. مطالعات امنیت سیستم به دودسته استاتیک و دینامیک تقسیم می‌شود. در مطالعات استاتیکی امنیت سیستم، فرض بر این است که المان‌های حفاظتی سیستم با وقوع حالت ناخواسته به‌درستی عمل کرده و سیستم با خروج المان‌ها، به وضعیت پایدار می‌رسد. در این نوع مطالعه یک المان یا بخشی از سیستم خارج‌شده و پخش بار برای باقی‌مانده سیستم صورت می‌گیرد و شرایط لازم برای تأمین بار چک می‌شود. چنانچه با حذف هر المانی از مدار، سیستم قادر به تأمین بار موردنیاز کلیه مشترکین خود تحت شرایط ذکرشده باشد، سیستم تا مرتبه $N-1$ ایمن در نظر گرفته می‌شود. چنانچه سیستمی با خروج هر x المان از مدار، همچنان قادر به تأمین بار باشد، سیستم امن از مرتبه $N-x$ است. در عمل، با خروج یک المان از سیستم، لزوماً سیستم به یک وضعیت پایدار نمی‌رسد. بررسی این موضوع که آیا با خروج المانی از سیستم، سیستم همچنان پایدار می‌ماند یا خیر، به عهده مطالعات دینامیک امنیت سیستم گذاشته می‌شود [۱۰۰].

^۱ Security Assessment

۲-۲-۴ شاخص‌های ارزیابی قابلیت اطمینان

بسته به آن که چه بخش از سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد شاخص‌های مختلفی برای بررسی سطح قابلیت اطمینان سیستم قدرت قابل استفاده است. در اینجا با توجه به بررسی سطح قابلیت اطمینان شبکه با احتساب واحدهای بادی، سه شاخص مهم که عمدتاً در ارزیابی قابلیت اطمینان به کار می‌روند آورده شده است که عبارت‌اند از:

(۱) LOLP^۱: احتمال از دست دادن بار

(۲) LOLE^۲: مقدار انتظاری بار از دست‌رفته (ساعت بر سال)

(۳) EENS^۳: مقدار انتظاری انرژی تأمین نشده (مگاوات ساعت بر سال)

که در ادامه توضیح اجمالی و نحوه محاسبه هر یک از این شاخص‌ها آورده شده است [۱۰۰].

الف) احتمال از دست رفتن بار (LOLP)

این شاخص قدیمی‌ترین و درعین حال اساسی‌ترین شاخص احتمالی به کاررفته در ارزیابی قابلیت اطمینان است. این شاخص به صورت احتمال فراتر رفتن مقدار بار از مقدار تولید بیان می‌شود. نحوه محاسبه این شاخص در رابطه (۱-۴) آورده شده است.

$$LOLP = \Pr(Load > CapacityIn) \quad (1-4)$$

نقطه ضعف این شاخص آن است که احتمال یک رخداد را بیان می‌کند، اما در مورد میزان اهمیت وقوع آن اطلاعاتی به دست نمی‌دهد. اینکه میزان قطع بار یک مگاوات یا هزار مگاوات باشد می‌تواند

^۱ Loss Of Load Probability

^۲ Loss Of Load Expectation

^۳ Expected Energy Not Supplied

دارای احتمال یکسان باشد اما واضح است که اهمیت وقوع قطع هزار مگاوات به مراتب بیش از یک مگاوات است.

ب) مقدار انتظاری بار از دست رفته (LOLE)

این شاخص به شکل عمده در تعیین مقدار توسعه لازم در ظرفیت تولید، مورداستفاده قرار می‌گیرد. معمولاً این شاخص به شکل مقدار انتظاری روز بر سال که طی آن بار پیک از مقدار تولید ممکن فراتر برود (و یا به عبارتی سیستم با کمبود تولید مواجه گردد) بیان می‌شود. به شکل دیگری، این میزان می‌تواند تعداد انتظاری ساعت بر سال باشد که بار از مقدار تولید پیشی گرفته است. رابطه (۲-۴) نحوه محاسبه LOLE را نشان می‌دهد.

$$LOLE = \sum_{i=1}^n LOLP_i \quad (2-4)$$

در این رابطه n دوره مورد مطالعه است که می‌تواند روز و یا ساعت باشد. شایان ذکر است که LOLE یک احتمال نمی‌باشد و مفهوم آن متوسط روز یا ساعات از دوره مورد مطالعه است که بار از ظرفیت موجود در شبکه بیش‌تر باشد. در این شاخص نیز مشکلی مشابه با مشکل مطرح شده در مورد شاخص LOLP وجود دارد؛ یعنی این شاخص میزان بار از دست رفته را بیان نمی‌نماید.

ج) مقدار انتظاری انرژی تأمین نشده (EENS)

این شاخص، میزان انرژی‌ای را که با بالاتر رفتن مقدار بار از تولید تأمین نمی‌شود، نشان می‌دهد. این شاخص نسبت به شاخص‌های گذشته اطلاعات بیشتری را در اختیار قرار می‌دهد؛ زیرا که اهمیت و بزرگی میزان قطع بار را نیز نشان می‌دهد و بدین ترتیب خطر و ریسک حاصل از قطع بار بیشتر نمایانده می‌شود. به نظر می‌رسد با رشد سیستم قدرت و اهمیت آن به‌عنوان یک سیستم تأمین انرژی به‌جای تأمین بار، این شاخص بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. در این پژوهش نیز در محاسبات قابلیت اطمینان

از این شاخص استفاده شده است. این شاخص مطابق با رابطه (۳-۴) قابل محاسبه است. در این رابطه N تعداد کل باس‌های سیستم است.

$$EENS = \frac{\sum_{y=1}^N \text{Loss} \cdot \text{of} \cdot \text{Load}_y}{N} \text{ (MWh/Year)} \quad (3-4)$$

۳-۴ مدل سازی باد و نیروگاه بادی در ارزیابی قابلیت اطمینان

از آنجاکه تناوب در سرعت باد و وابستگی آن به شرایط اقلیمی منجر به تغییرات در خروجی توربین بادی می‌گردد، می‌توان خروجی یک مزرعه بادی را یک توان احتمالی دانست. بنابراین جهت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت با احتساب واحدهای بادی، ابتدا باید مدل مناسبی از سرعت باد و توان خروجی واحدهای بادی تعریف گردد [۱۰۱]. در دو دهه اخیر مدل‌های فراوانی بدین منظور برای واحدهای بادی معرفی و توسعه داده شده‌اند که مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۱-۳-۴ روش‌های مدل‌سازی نیروگاه بادی در مطالعات قابلیت اطمینان

به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت باید مدل مناسبی از سرعت باد و توان خروجی واحدهای بادی تعریف گردد. واضح است که یک مدل مناسب باید بتواند مشخصه تصادفی و احتمالی بودن سرعت باد را برای هر واحد بادی در خود بگنجاند. از این‌رو اغلب مدل‌های معرفی شده به شبیه‌سازی سرعت باد و توان خروجی نیروگاه بادی و استفاده از آن جهت مدل‌سازی واحد بادی پرداخته‌اند، تا در این راستا یک ارزیابی واقع‌بینانه از سیستم قدرت واقعی با احتساب واحد بادی صورت گیرد [۱۰۲]. در ادامه روش‌هایی که عمدتاً در مقالات و مجلات علمی به‌منظور مدل‌سازی واحدهای بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند، مورد بررسی قرار گرفته است.

الف) روش واحد چندحالته

در اکثر مراجع به منظور مدل سازی واحدهای بادی در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت از این روش استفاده می شود که به ارائه یک مدل چندحالته و احتمالی از خروجی واحدهای بادی و سطح بندی توان خروجی واحدهای بادی و استفاده از آن در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم پرداخته می شود [۱۰۳]. در این روش از داده های سرعت باد در طول سال های گذشته، به منظور استخراج تابع توزیع احتمال سرعت باد در یک منطقه جغرافیایی مشخص، استفاده می شود. با توجه به طبیعت باد و داده های موجود از سرعت باد اغلب از توزیع ویبال برای تخمین توزیع احتمال سرعت باد، استفاده می شود. سرانجام با توجه به مشخصه توان- سرعت توربین های بادی، سطح توان خروجی مزرعه بادی به ازای هر سرعت باد و احتمال رخداد آن به دست خواهد آمد [۱۰۵]. در واقع بدین ترتیب واحد بادی به صورت یک واحد تولیدی چندحالته تبدیل خواهد شد که احتمال متناظر با هر حالت نیز در دسترس خواهد بود. در نهایت از این مدل در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت با احتساب واحدهای بادی استفاده می گردد.

ب) روش سری زمانی

همان طور که ذکر شد یک نیاز مبرم در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم های با احتساب واحد بادی، شبیه سازی دقیق سرعت باد به صورت ساعتی است. سرعت باد با تغییر شرایط مکانی و زمانی تغییر خواهد کرد. از طرفی سرعت باد در هر ساعت، به میزان سرعت آن در ساعات گذشته نیز وابسته است. از این رو در برخی مراجع از یک مدل سری زمانی ARMA به منظور شبیه سازی سرعت باد در زمان های مختلف استفاده شده است [۳۳]. در این روش نیز مانند روش قبل به اطلاعات بلندمدت سرعت باد در منطقه مورد نظر نیاز خواهد بود. با داشتن این داده ها می توان سرعت باد را به صورت یک سری زمانی ARMA شبیه سازی و پیش بینی نمود. پس از آنکه سرعت باد در طی یک دوره زمانی مشخص به صورت

ساعت به ساعت شبیه سازی شد، توان خروجی توربین بادی متناظر با هر سرعت باد با توجه به منحنی توان-سرعت توربین های بادی به دست خواهد آمد.

ج) مدل مارکوف

در بسیاری از مراجع از مدل مارکوف به منظور مدل سازی سرعت باد یا توان بادی قابل استحصال از مزرعه بادی استفاده شده است. در این مدل فرض می شود تعداد حالت های توان خروجی مزرعه بادی برابر با مثلاً m حالت باشد. در حالت کلی برای اینکه یک فرایند تصادفی به صورت زنجیره مارکوف مدل شود، لازم است نرخ انتقال بین حالات مختلف محاسبه شود. در این مدل در واقع در صورت مدل سازی سرعت باد، داده های پیوسته سرعت باد با میانگین گیری به صورت گسسته تبدیل می شوند [۳۶].

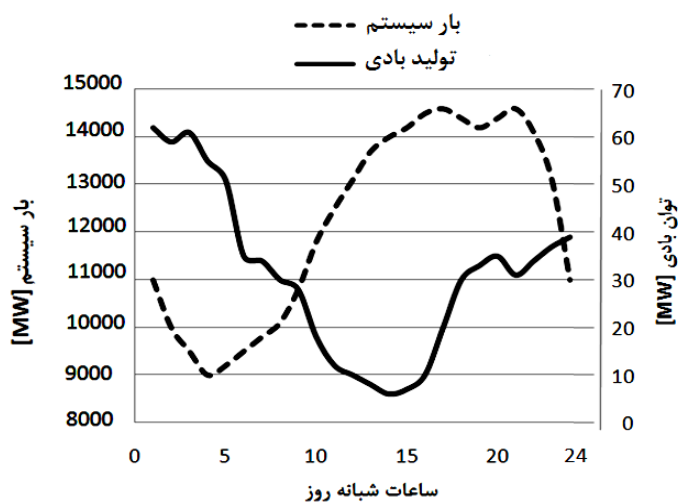
۲-۳-۴ چالش مطرح در مدل سازی های مرسوم برای نیروگاه بادی

یک مدل مناسب باید بتواند مشخصه تصادفی و احتمالی بودن سرعت باد را برای یک نیروگاه بادی در خود بگنجاند. از این رو اغلب مدل های ارائه شده که در قسمت قبل مورد بررسی قرار گرفت، به شبیه سازی سرعت باد و استفاده از آن، جهت مدل سازی واحد بادی پرداخته اند، تا در این راستا یک ارزیابی واقع بینانه از سیستم قدرت با احتساب واحد بادی صورت گیرد.

یک مدل سازی بهینه در این راستا باید به گونه ای باشد که تأثیر همزمانی سرعت باد و بار در یک نقطه از شبکه را به خوبی نشان دهد؛ لذا مدل سازی این واحدهای تولیدی و بررسی اثر همزمانی آنها با بار هر منطقه، بر شاخص های قابلیت اطمینان شبکه امری ضروری به نظر می رسد. به همین منظور در ادامه به بررسی همبستگی متقابل تولید توان بادی و بار الکتریکی در دو پست در منطقه خواف خراسان رضوی پرداخته شده است.

۴-۴ تحلیل میدانی همبستگی تولید توان بادی و بار الکتریکی

در برخی از مزرعه‌های بادی، الگوهای فصلی و روزانه باد با الگوهای بار محلی متفاوت‌اند؛ به این معنی که بادهای سنگین در طول دوره بار کم و بادهای ضعیف در طول دوره بار پیک اتفاق می‌افتد. بدترین سناریو برای یک پروژه احداث واحد بادی وقتی است که در آن منطقه جریان‌های غنی باد در طول شب‌های فصل زمستان رخ دهد و درعین حال، اوج بار سیستم در طی روزهای فصل تابستان صورت گیرد. به‌عنوان نمونه شکل (۴-۱) مشخصات بار و توان بادی تولیدشده از یک مزرعه بادی نمونه را به مدت ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. واضح است که روند تغییرات بار و تولید بادی در خلاف یکدیگرند.



شکل (۴-۱) نمونه‌ای از یک الگوی نامطلوب توان بادی روزانه

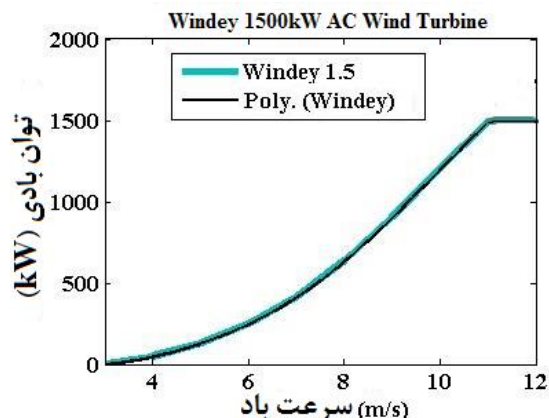
از اهداف اصلی برنامه‌ریزی شبکه، تعیین مکان و زمان نصب تجهیزات جدید به منظور حفظ سطح قابلیت اطمینان سیستم یا رساندن آن به سطح استاندارد است. در این راستا یکی از مقوله‌هایی که تأثیر بسزایی در برنامه‌ریزی شبکه خواهد داشت، مسئله تأمین بار پیک شبکه است که مستقیماً بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم تأثیر خواهد گذاشت، لذا در نصب یک مزرعه بادی جدید، همزمانی باد و بار به صورت ساعتی نقش بسزایی در تأمین بار پیک شبکه خواهد داشت. در واقع اگر در یک ناحیه ساعات پیک بار همزمان با ساعات پیک باد نباشد، منجر به بار از دست‌رفته بیشتری در طول سال در

محاسبات قابلیت اطمینان خواهد شد و بهبود کمتری را متوجه شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم می‌کند.

از طرفی، از دید بهره‌بردار سیستم همبستگی مثبت تولید توان بادی و بار الکتریکی به دلیل کاهش بار پیک شبکه منجر به آسان‌تر شدن بهره‌برداری از سیستم می‌شود، در صورتی که همبستگی منفی بهره‌برداری از شبکه را دشوارتر می‌کند.

۱-۴-۴ مرجع داده‌ها

داده‌های سرعت باد در این مطالعه در طول بازه زمانی یک سال از ابتدا تا انتهای سال ۱۳۹۳ در فاصله‌های زمانی ۶۰ دقیقه‌ای از ایستگاه هواشناسی واقع در منطقه خواف جمع‌آوری شده است [۹۱]. داده‌های پیک‌بار الکتریکی ساعتی توسط شرکت برق منطقه‌ای استان خراسان رضوی مربوط به سال ۱۳۹۳ برای پست‌های سنگان و آسباد واقع در منطقه خواف ثبت شده‌اند که این دو پست بار شهری و صنعتی منطقه خواف را تأمین می‌کنند. به‌منظور یافتن همبستگی بین بار الکتریکی و تولید بادی، هر دو این داده‌ها مورد نیاز است. باین‌حال توان بادی در منطقه خواف هیچ مجموعه داده تاریخی ندارد که برای تحلیل مناسب باشد بنابراین، تولید توان بادی بر اساس داده‌های سرعت باد که به‌صورت ساعتی نمونه‌برداری شده‌اند به همراه مدل توربین بادی صورت می‌گیرد. توربین Windey-WD77 برای مدل‌سازی ژنراتور بادی انتخاب شده است [۱۰۶]. بر اساس داده‌هایی که شرکت Windey برای توربین خود ارائه کرده است، یک چندجمله‌ای برای ارتباط بین توان بادی و سرعت باد به دست آورده شده است. میزان تناسب این چندجمله‌ای با منحنی توان برحسب سرعت توربین بادی در شکل (۲-۴) دیده شده است.



شکل (۲-۴) مدل توربین بادی

معادله (۴-۴) چندجمله‌ای برازش شده را برای محاسبه‌ی توان بادی ارائه می‌دهد:

$$P = \begin{cases} 0 & v < 3 \\ (-0.04049v^6 + 1.62226v^5 - 26.461031v^4 + 224.62238v^3 - 1022.12785v^2 + 23935.6048v - 2262.9999) & 3 < v < 12 \\ 1500 & 11 < v < 25 \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (4-4)$$

که در آن P توان بادی برحسب کیلووات و v سرعت باد برحسب متر بر ثانیه است. باید توجه داشت که جهت باد در محاسبه توان بادی در نظر گرفته نشده است. به عبارتی فرض شده توربین بادی بتواند خود را با هر جهت وزش باد وفق دهد.

۲-۴-۴ تعریف همبستگی

در این بخش تعریف و نمایش دقیق ضریب همبستگی بیان شده است. در این قسمت از مطالعه بر اساس نرخ نمونه‌گیری داده‌ها که در بخش قبل تهیه شده بود، نرخ تحلیل داده‌ها نیز به صورت ساعتی خواهد بود. کل زمان مطالعه ۱۲ ماه است، اما از آنجا که سرعت باد تمایل به تغییر در فصل‌های مختلف را دارد، ضریب همبستگی هرماه به صورت جداگانه برای هر ساعت شبانه‌روز محاسبه شده است. در رابطه (۵-۴)

ضریب همبستگی متقابل به دست می‌آید [۱۰۷]:

$$r_{i-j} = \frac{\sum_{k=1}^K (W_{i-j-k} - \overline{W_{i-j-k}})(L_{i-j-k} - \overline{L_{i-j-k}})}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (W_{i-j-k} - \overline{W_{i-j-k}})^2 (L_{i-j-k} - \overline{L_{i-j-k}})^2}} \quad (5-4)$$

به طوری که W_{i-j-k} توالی داده‌های تولید بادی ماه i ام، ساعت j ام و روز k ام است، همچنین L_{i-j-k} توالی داده‌های بار ماه i ام، ساعت j ام و روز k ام است و K کل روزهای ماه i ام است.

سپس مقایسه سالانه صورت می‌گیرد تا تفاوت همبستگی بار پست‌های سنگان و آسباد با تولید بادی در یک عدد خلاصه شود. در مقایسه سالانه، تمام ضرایب همبستگی ساعتی هر ماه متوسط‌گیری می‌شود تا یک عدد به عنوان ضریب همبستگی هر ماه به دست آید؛ توسط رابطه (۴-۶):

$$r_i = \frac{\sum_{j=1}^{24} r_{i-j}}{24} \quad (6-4)$$

به طوری که r_i به طور متوسط ضریب همبستگی متقابل بین بار و تولید بادی ماه i ام را نشان خواهد داد. همچنین r_{i-j} ضریب همبستگی متقابل بین بار و تولید بادی ماه i ام و ساعت j ام است.

ضریب همبستگی متقابل دارای مقادیری مابین ۱ و -۱ است. مقدار r_{i-j} می‌تواند به عنوان ارتباط بین تولید بادی و بار در ساعت j ام از ماه i ام در نظر گرفته شود [۱۰۷]. با فرض اینکه بار در ساعت j ام افزایش یابد، داشتن مقدار ۱ ضریب همبستگی نشان می‌دهد که تولید بادی به همان شکل در آن ساعت افزایش می‌یابد، مقدار صفر نشان می‌دهد تغییر توان بادی ربطی به تغییر بار ندارد و مقدار -۱ نشان می‌دهد تولید بادی در آن ساعت کاهش یافته است.

می‌توان گفت اگر اطلاعات همبستگی متقابل بین تولید بادی و بار با جزئیات زیاد در نواحی مشخصی قابل وصول باشد، می‌توان به عنوان راهنمایی برای شرکت‌های تولید توان بادی و برنامه‌های پاسخ تقاضا قرار بگیرند.

۳-۴-۴ مطالعه همبستگی بین توان بادی و بار

با روش‌شناسی تشریح شده در بخش‌های ۱-۴-۴ و ۲-۴-۴، تحلیل همبستگی بین توان بادی و بار الکتریکی انجام شده است. سال مورد مطالعه ۱۳۹۳ بوده است.

▪ مطالعه ماهانه

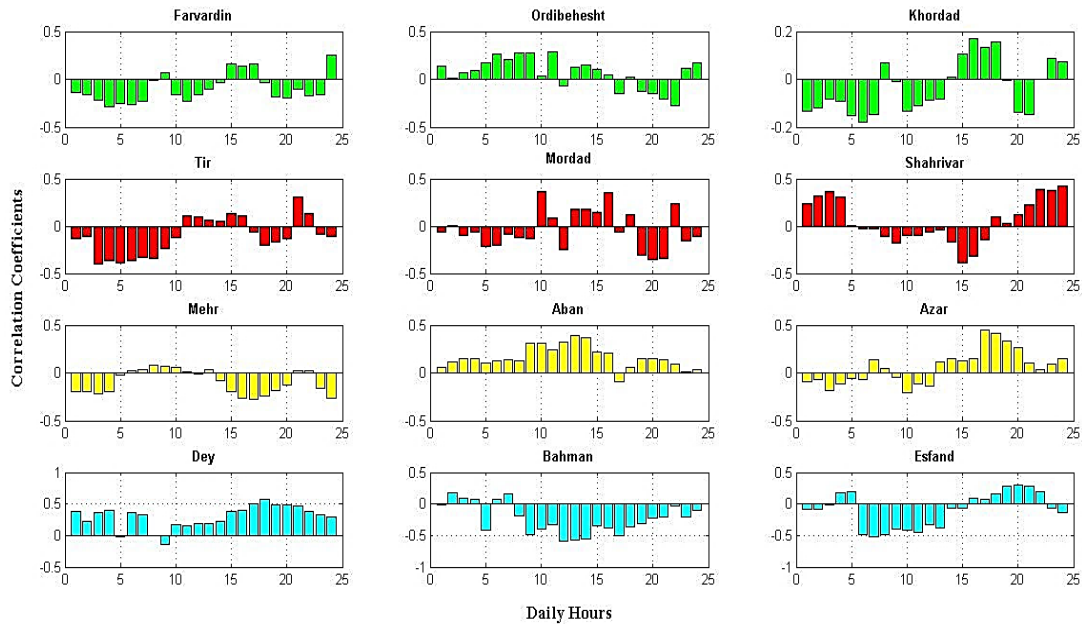
تحلیل ساعتی ۱۲ ماه بین تولید توان بادی و بار الکتریکی در شکل‌های (۳-۴) و (۴-۴) نمایش داده شده است. ماه‌های هر فصل به صورت سطری دسته‌بندی شده‌اند. باید توجه داشت بار صنعتی در منطقه خواف با در نظر گرفتن ساعات ۸ تا ۱۴ به عنوان نوبت اصلی کار خود را نشان می‌دهد.

در شکل (۳-۴) ضرایب همبستگی تولید توان بادی در منطقه خواف و بار الکتریکی پست آسباد برای تأخیر زمانی صفر رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد میزان همبستگی برای ماه‌های مختلف متفاوت است. بیشترین ساعات متوالی با همبستگی مثبت را در ماه‌های آبان و دی‌ماه دیده شده در حالی که خلاف این موضوع در بهمن‌ماه اتفاق افتاده است. همبستگی مثبت مشاهده شده، بار شبکه را کاهش می‌دهد و از دید بهره‌بردار مفید می‌باشد.

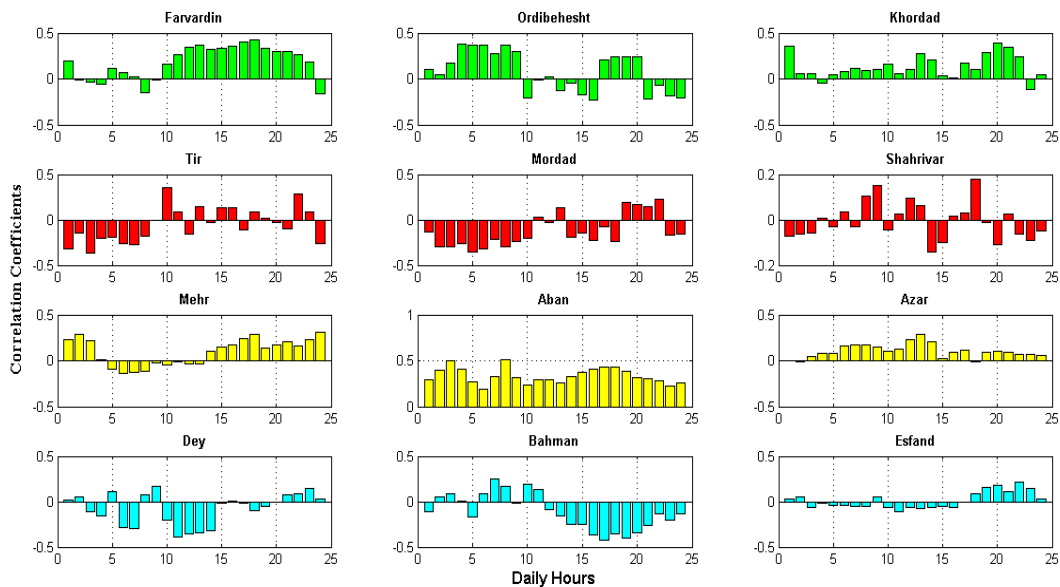
با دقت در شکل (۴-۴) می‌توان دریافت که ضرایب همبستگی بین تولید توان بادی و بار الکتریکی پست سنگان، مقادیر مثبت خود را بیشتر در آبان و آذرماه نشان داده است. کمترین مقادیر همبستگی در اسفندماه دیده شده است که البته مورد توجه بهره‌بردار شبکه خواهد بود.

به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که همبستگی بین تولید توان بادی و بار الکتریکی در منطقه خواف به علت تغییرات ساعتی فراوان در هر ساعت شبانه‌روز در هرماه سال، مقادیری کمی را بروز داده است. علت موضوع این است که همان‌طور که در شکل (۳-۱۱) از فصل سوم نشان داده شده بود، سرعت باد در ساعات ابتدای روز یعنی نیمه‌شب تا ۶ صبح و ساعات عصر بین ۱۸ تا ۲۳ شب افزایش پیدا می‌کند در حالی که بار الکتریکی، با در نظرگیری نوبت‌کاری در ساعاتی به‌غیر از ساعات یادشده افزایش پیدا

می‌کند. به همین دلیل تغییرات دو متغیر توان بادی و بار الکتریکی با یکدیگر هم‌نمایی کمی دارند و در اکثر ساعات ماه‌های سال برعکس هم هستند.



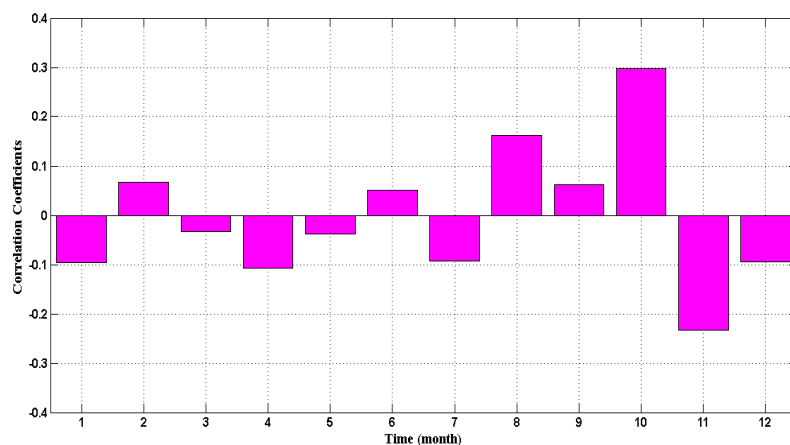
شکل (۳-۴) همبستگی تولید بادی و بار الکتریکی پست آسباد



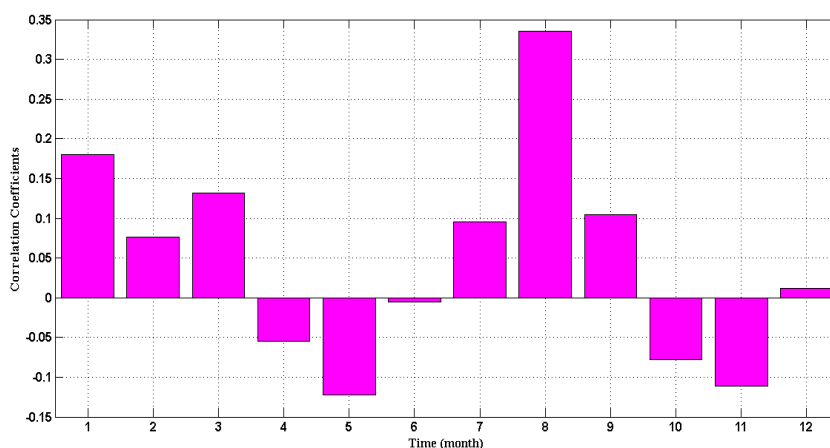
شکل (۴-۴) همبستگی تولید بادی و بار الکتریکی پست سنگان

▪ مطالعه سالانه

شکل‌های (۴-۵) و (۴-۶) نمایش خلاصه سالانه مطالعه همبستگی بین تولید بادی و بار پست‌های آسباد و سنگان را ارائه داده‌اند. ضریب همبستگی برای سال ۱۳۹۳ به ترتیب برای پست‌های آسباد و سنگان مقادیر $0/046-$ و $0/0471+$ به دست آمده است. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد به دلیل الگوی باد و بار الکتریکی در منطقه خواف به‌طور کل تولید بادی و بار همبستگی بالایی نداشته‌اند. شاید بتوان گفت از دید بهره‌بردار شبکه پست سنگان با داشتن همبستگی مثبت با توان بادی در دو فصل بهار و پاییز بار شبکه را کاهش خواهد داد و گزینه مناسب‌تری برای تزریق توان بادی باشد.



شکل (۴-۵) خلاصه همبستگی سالانه بین تولید بادی و بار پست آسباد



شکل (۴-۶) همبستگی سالانه بین تولید بادی و بار پست سنگان

۴-۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل کلیات مربوط به ارزیابی قابلیت اطمینان در سیستم قدرت مورد بررسی قرار گرفت و مفاهیم مربوط به این مطالعات شامل تقسیم‌بندی، شاخص‌ها و روش‌ها در ارزیابی قابلیت اطمینان معرفی شد. همچنین ضمن آشنایی با روش‌هایی که عمدتاً به منظور مدل‌سازی نیروگاه بادی در محاسبات قابلیت اطمینان به کار می‌رود، چالش موجود در مدل‌سازی‌های ارائه‌شده در این زمینه معرفی شد و در همین راستا تحلیل همبستگی تولید توان بادی و بار الکتریکی در منطقه خواف صورت گرفت. به‌طور کلی به دلیل همبستگی کم تولید توان بادی و بار الکتریکی در منطقه خواف، در نظرگیری همبستگی در مدل‌سازی‌های آتی تأثیری در بهبود شاخصه‌ای قابلیت اطمینان ایجاد نخواهد کرد بنابراین برای مدل‌سازی نیروگاه بادی در فصل پنجم مدلی ارائه خواهد شد که هم دقت بیشتری داشته باشد و هم نایقینی ناشی از باد را پوشش دهد.

نتایج تحلیل میدانی همبستگی در زیر آمده است:

۱. تحلیل اطلاعات واقعی سرعت باد وجود همبستگی بین تولید توان بادی و بار الکتریکی را تأیید می‌کند. نتایج نشان می‌دهد همبستگی تولید بادی برای ساعات محدود در یک ماه خاص از سال ممکن است قابل توجه باشد.
۲. بار پست سنگان دارای همبستگی متقابل مثبت با تولید بادی می‌باشد درحالی‌که بار پست آسباد منفی است. این بدان معناست که بار پست سنگان با تغییرات تولید بادی در هم‌نوایی نسبتاً بیشتر می‌کند. لذا می‌توان پست سنگان را نسبت به پست آسباد گزینه مناسب‌تری برای اتصال یک مزرعه بادی جهت تأمین توان آن پنداشت.
۳. بار پست سنگان در ۳ ماه بهار و ۳ ماه پاییز همبستگی متقابل مثبتی با تولید بادی داشته درحالی‌که بار پست آسباد این‌گونه نیست. این ۶ ماه بهار و پاییز برای بار پست سنگان بهره‌برداری راحت‌تری برای بهره‌برداران شبکه قدرت خواهد بود. شاید بتوان گفت تزریق توان

بادی در زمان افزایش بار پست سنگان باعث کاهش انتقال توان از سوی ژنراتورهای معمولی شبکه خواهد شد و تلفات انتقال کاهش می‌یابد.

۴. مهم‌ترین مشاهده صورت گرفته می‌تواند این باشد که ضریب همبستگی تولید بادی تغییرات چشمگیری نه تنها به صورت فصلی داشته بلکه به صورت ماه به ماه نیز تغییراتی عکس هم دارد.

فصل پنجم

برنامه‌ریزی توسعه انتقال با توجه به
توسعه منابع بزرگ تولید توان بادی
(بررسی موردی منطقه خواف خراسان رضوی)

۵-۱ مقدمه

یکی از اهداف مهم در برنامه‌ریزی سیستم قدرت، بهبود سطح قابلیت اطمینان شبکه است که با تعمیرات و یا نصب تجهیزات جدید در نقاط مختلف سیستم امکان‌پذیر خواهد بود. این امر در طول برنامه‌ریزی تولید سیستم نیز همواره از سوی بهره‌برداران و برنامه‌ریزان شبکه مورد تأکید است، لذا محل نصب تجهیزات جدید به‌ویژه نیروگاه‌ها از جمله مزارع بادی در سیستم قدرت همواره مورد توجه آن‌ها خواهد بود، تا حداکثر بهبود را متوجه سطح قابلیت اطمینان سیستم گرداند.

در این فصل مسئله توسعه شبکه انتقال با هدف توسعه تولید منابع بزرگ توان بادی در منطقه خواف به همراه نتایج شبیه‌سازی بر روی نمونه‌های مطالعاتی با داده‌های واقعی آورده شده است. ابتدا در بخش دوم از فصل به ارائه روش پیشنهادی در مدل‌سازی نیروگاه بادی در مطالعه قابلیت اطمینان سیستم پرداخته شده است. در بخش سوم ساختار برنامه محاسب شاخص‌های قابلیت اطمینان، معادلات، قیود و جزئیات مسئله بهینه‌سازی شرح داده شده است. سپس در بخش چهارم شاخص قابلیت اطمینان برای شبکه^۱ RBTS به‌منظور سنجش الگوریتم و مدل‌سازی محاسبه شده است. در نهایت در بخش پنجم مطالعه جامعی بر روی شبکه انتقال شبکه خراسان با تمرکز بر وضعیت شبکه فوق توزیع در منطقه خواف صورت گرفته است.

۵-۲ روش پیشنهادی در مدل‌سازی نیروگاه بادی

در راستای بررسی تأثیر ورود واحدهای بادی به سیستم قدرت، مدل‌های فراوانی برای نیروگاه بادی به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت معرفی شده‌اند. از آنجاکه تناوب در سرعت باد و وابستگی آن به شرایط اقلیمی منجر به تغییرات در خروجی توربین بادی می‌گردد، می‌توان خروجی مزرعه بادی را یک توان احتمالاتی دانست. بنابراین جهت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت

^۱ Roy Bilinton Test System

دربرگیرنده واحدهای بادی، ابتدا باید مدل مناسبی از سرعت باد و توان خروجی واحدهای بادی ارائه گردد.

۵-۲-۱ ساختار ریاضی و شرح مدل

در این بخش روابط مورد استفاده در مدل نیروگاه بادی و نحوه دسته‌بندی داده‌های سرعت باد آورده شده است. در رابطه (۵-۱) تابع چگالی توزیع ویبال بیان شده است. در این رابطه v سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه، c پارامتر مقیاس بر حسب متر بر ثانیه و k پارامتر شکل و بدون بعد است.

$$h(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (5-1)$$

مدل پیشنهادی در این مبحث شامل چهار گام می‌باشد که در روند نما شکل (۵-۱) نشان داده شده است و در ادامه، هر گام شرح داده شده است.

گام اول
جمع‌آوری داده‌های سرعت باد و دسته‌بندی آنها
گام دوم
برازش داده‌های دسته‌بندی شده و تعیین پارامترهای k و c توزیع ویبال
گام سوم
تولید سرعت باد تصادفی و محاسبه توان بادی خروجی براساس منحنی توان-سرعت توربین بادی
گام چهارم
محاسبه توان تولیدی هر مزرعه بادی برای مدت یک سال (۸۷۶۰ ساعت)

شکل (۵-۱) گام‌های اساسی مدل‌سازی مزرعه بادی به روش پیشنهادی

▪ گام اول

شاخص تعیین‌کننده در مدل‌سازی نیروگاه بادی در مطالعه حاضر نحوه دسته‌بندی داده‌های سرعت باد است. برای این کار داده‌های سرعت باد به مدت ۵ سال در طول سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۳ جمع‌آوری شده است [۹۱]. به دلیل اینکه سرعت باد در اکثر مناطق به‌ویژه منطقه خواف به صورتی است که از الگوهای روزانه پیروی بیشتری می‌کند بدین معنی که به‌طور مثال مقادیر سرعت باد در

ساعت ۱۲ ظهر روزهای فروردین ماه الگوی منظم‌تری از خود نشان می‌دهد تا مقادیر سرعت باد در ساعت ۱۲ ظهر در تمام روزها از سال‌های مورد مطالعه، لذا دسته‌بندی داده‌ها به‌طور ساعات هرماه صورت گرفته است.

▪ گام دوم

با بررسی داده‌های سرعت باد و تناسب برآزش با تابع توزیع ویبال پارامترهای k و c برای هر ساعت از هرماه سال به‌دست آمده است.

▪ گام سوم

این دو پارامتر که برای هر ساعت از هرماه سال برآزش شده‌اند به تولیدکننده عدد تصادفی فرستاده می‌شوند تا یک عدد به‌عنوان سرعت باد برای هر ساعت از هرماه سال تولید شود. این سرعت باد تصادفی تولیدشده به مدل توربین بادی داده‌شده است که در فصل چهارم توسط رابطه (۴-۴) معرفی شد و بدین ترتیب توان یک توربین بادی را در برای همه ساعات سال با تکرار همین منوال تولیدشده است.

▪ گام چهارم

با فرض یکنواخت بودن وزش باد در هر مزرعه با ضرب تعداد توربین‌های سالم در هر ساعت مزرعه بادی در خروجی توربین مدل‌سازی شده، توان کل مزرعه برای هر ساعت در طول یک سال به‌دست آمده است. توان خروجی مزرعه بادی از طریق رابطه (۵-۲) به دست می‌آید.

$$P = 0.95AX \quad (۵-۲)$$

در این رابطه A تعداد توربین‌های مزرعه بادی، X ظرفیت یک نوع مشخص از توربین بادی و ضریب 0.95 نیز به‌عنوان ضریب همبستگی واحد بادی شناخته می‌شود که به آرایش توربین‌های بادی وابسته است [۱۰۵].

وضعیت سالم یا خراب بودن هر توربین بادی مانند رابطه (۲-۵) توسط تولید عدد تصادفی در بازه [۰،۱] و مقایسه با نرخ خروج اجباری معادل با ۰/۰۵ اختصاص داده شده برای هر توربین بادی مشخص شده است. باید توجه داشت چون خود مزرعه بادی به طور کلی می تواند ارتباطش با شبکه کاملاً قطع شود و این مورد به صورت قطع خط ارتباطی مزرعه با شبکه مدل شده است که مقادیر نرخ خروج اجباری آن ۰/۰۰۸ انتخاب شده است.

۳-۵ ساختار برنامه محاسبه شاخص های قابلیت اطمینان

۱-۳-۵ تعریف مسئله

شاخص ها و روش های ارزیابی سطح قابلیت اطمینان سیستم قدرت در فصل دوم و چهارم مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت در سطح HLI^۱ شاخص احتمالی میزان انرژی انتظاری تأمین نشده سیستم (EENS) برای همه باس های شبکه محاسبه می گردد. این شاخص میزان انرژی که انتظار می رود در بازه ی زمانی مشخص (یک سال) توسط سیستم قدرت تأمین نشود را نشان می دهد.

در یک سیستم واقعی همه بارها دارای ارزش یکسان نیستند و از این رو برای بهره بردار سیستم در هنگام اضطرار، تغذیه برخی از بارها دارای اهمیت است. این که میزان اهمیت هر یک از این بارها به چه نحوی تعیین می گردد، بستگی به شرایط امنیتی و اقتصادی دارد. برای انجام مقایسه بین اهمیت بارهای مختلف در یک سیستم، می توان از شاخص های اقتصادی استفاده کرد؛ به این نحو که ارزش اقتصادی بار از دست رفته در هر باس را مورد بررسی قرارداد. یکی از عمده ترین شاخص های استفاده شده در این ارتباط، شاخص نرخ ارزیابی شده انرژی قطع شده یا IEAR^۲ است که ارزش مالی مقدار انرژی که به بارها عرضه نشده است را نشان می دهد. واحد این شاخص \$/kWh است. مشخصاً هر چه مقدار این

^۱ Hierarchical Level II

^۲ Interrupted Energy Assessment Rate

شاخص برای یک بار بیشتر باشد، نشان‌دهنده‌ی اهمیت بیشتر آن است. در این حالت لازم است که به هر وجه ممکن، برای یک شبکه قدرت میزان حداکثر بار قابل تأمین، مشخص گردد. به‌طور مشخص این یک مسئله بهینه‌سازی باهدف حداکثر سازی مقدار بار با در نظر گرفتن ارزش بارها است که می‌تواند به شکل معادله (۳-۵) بیان شود:

$$\min \left(- \sum_{bus} IEAR_i \times P_{L,i} \right) \quad (3-5)$$

در این معادله $P_{L,i}$ نشان‌دهنده‌ی میزان بار در باس i است. در معادله فوق مجموع بارهای باس‌ها به حداکثر خواهد رسید. در این بین قیود بسیاری در شبکه قدرت وجود دارد که این میزان را محدود می‌سازد.

در ابتدا قید حداکثر بار هر باس وجود دارد. این مقدار برابر با پیک مصرف در هر باس خواهد بود که در منحنی تداوم بار^۱ دیده می‌شود. در شرایط عادی آن‌چنان که گفته شد این مقدار توسط ژنراتورهای موجود در شبکه قابل تأمین است، اما بروز حادثه‌ای می‌تواند منجر به خارج شدن یک یا چند ژنراتور از شبکه گردد. قید دیگر مربوط به مقدار تولیدی است که هر ژنراتور می‌تواند داشته باشد. مسلماً حداکثر مقدار تولید هر ژنراتور محدودیتی دیگر بر حداکثر میزان تأمین بار اعمال می‌کند.

محدودیت‌های دیگری نیز می‌توانند در نظر گرفته شوند که از آن جمله می‌توان به محدودیت‌های پخش بار شبکه یا محدودیت‌های اقتصادی اشاره کرد. اما در نظر گرفتن این قیود با توجه به بالا بردن تعداد معادلات، پیچیدگی مسئله را به‌شدت افزایش خواهد داد و حل آن را اگر غیرممکن نسازد، بسیار زمان‌بر خواهد کرد. از این‌رو در بیشتر مراجع با در نظر گرفتن پخش بار DC برای شبکه قدرت، سعی در ساده‌سازی معادلات است.

با صرف‌نظر از تغییر ولتاژ در باس‌ها (در نظر گرفتن معادلات پخش بار DC) می‌توان مسئله بهینه‌سازی (۳-۵) را به یک مسئله برنامه‌ریزی خطی با قیود مطرح‌شده تبدیل کرد که به شکل رابطه

^۱ Load Duration Curve (LDC)

(۴-۵) قابل بیان است و در هر فرآیند تکرار مونت کارلو بعد از مشخص شدن، وضعیت شبکه را نشان می دهد [۱۰۸].

$$\begin{aligned} & \text{Min} \quad -\sum_{i=1}^{bus} IEAR_i \times P_{L,i} \\ & \text{such that :} \\ & \sum P_{g,i} - P_{L,i} - \sum_j f_{ij} = 0 \quad \text{for } i = 1, \dots, N \\ & f_{ij} - \gamma_{ij} (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad \text{for } i = 1, \dots, N \\ & |f_{ij}| \leq \text{Max}(f_{ij}) \\ & 0 \leq P_{g,i} \leq \text{Max}(P_{g,i}) \quad \text{for } i = 1, \dots, G \\ & 0 \leq P_{L,i} \leq \text{Max}(P_{L,i}) \quad \text{for } i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (۴-۵)$$

هدف در این معادله تأمین حداکثر بار با در نظر گرفتن ارزش بارها است. قید اول؛ قید تعادل توان در هر باس، قید دوم؛ قید پخش بار DC و قیود سوم تا پنجم به ترتیب قیود حداکثر ظرفیت خط انتقال، حداکثر تولید ژنراتورها و حداکثر بار هر باس هستند. همچنین در این معادله N تعداد باس ها، G تعداد ژنراتورها و L تعداد خطوط هستند. برای حل این مسئله اطلاعاتی باید در اختیار باشد. در اختیار داشتن توپولوژی شبکه، مستلزم آن است که نحوه اتصال خطوط به باس ها و محل قرارگیری ژنراتورها و بارها در شبکه معین گردد. همچنین پارامترهای خطوط برای حل معادلات پخش بار شبکه، ظرفیت خطوط، ظرفیت تولید ژنراتورها و پیک بار در هر باس باید مشخص شود

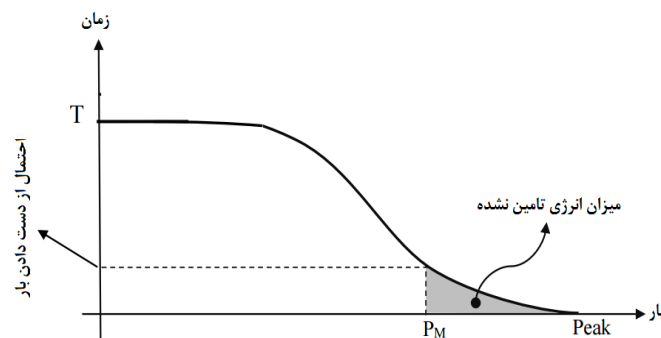
معادله (۴-۵) یک مسئله برنامه ریزی خطی است. جواب به دست آمده از حل این مسئله، مقدار حداکثر بار قابل تأمین برای هر حالت از شبکه را نشان می دهد. چنانچه منحنی تداوم بار برای این شبکه موجود باشد، می توان به راحتی با کمک آن منحنی، میزان انرژی تأمین نشده^۱ و همچنین مدت زمان از دست رفتن بار^۲ در سال را محاسبه کرد. این موضوع در شکل (۵-۲) نشان داده شده است. این مسئله باید برای حالت های مختلف یک شبکه قدرت در روند الگوریتم مونت کارلو برای دفعات متعدد به مقدار کافی تکرار گردد تا مقدار مورد انتظار برای شاخص های مورد نیاز به دست آید و به این صورت قضاوتی

^۱ Energy Not Supplied

^۲ Loss Of Load

صحيح از ميزان كفايت سيستم صورت گيرد. از آنجايكه حالاتهاي متعدد از يك شبكه مرجع استخراج مي‌گردد، بايستي امكان بروز هر يك از اين حالات مشخص شود. اين امر بايستي از طريق مشخص ساختن نرخ خروج براي خطوط و ژنراتورها صورت گيرد. پس لازم است كه اطلاعات قابليت اطمينان تجهيزات شبكه نيز در اختيار باشد. آن چنان كه اشاره شد، جهت تعيين مقدار انرژي تأمين نشده در شبكه كه يك شاخص عمده در مباحث قابليت اطمينان به شمار مي‌رود، بايستي مقدار حداكثر بار قابل تأمين (PM) در منحنی تداوم بار قرار داده شود و آن چنان كه در شكل (۲-۵) نشان داده شده است با يك انتگرال گيري از سطح زير منحنی از مقدار حداكثر بار قابل تأمين تا ميزان حداكثر بار هر باس (Peak)، ميزان انرژي تأمين نشده در شبكه محاسبه مي‌گردد. پس بايستي براي هر باس، منحنی تداوم بار آن مشخص شده باشد.

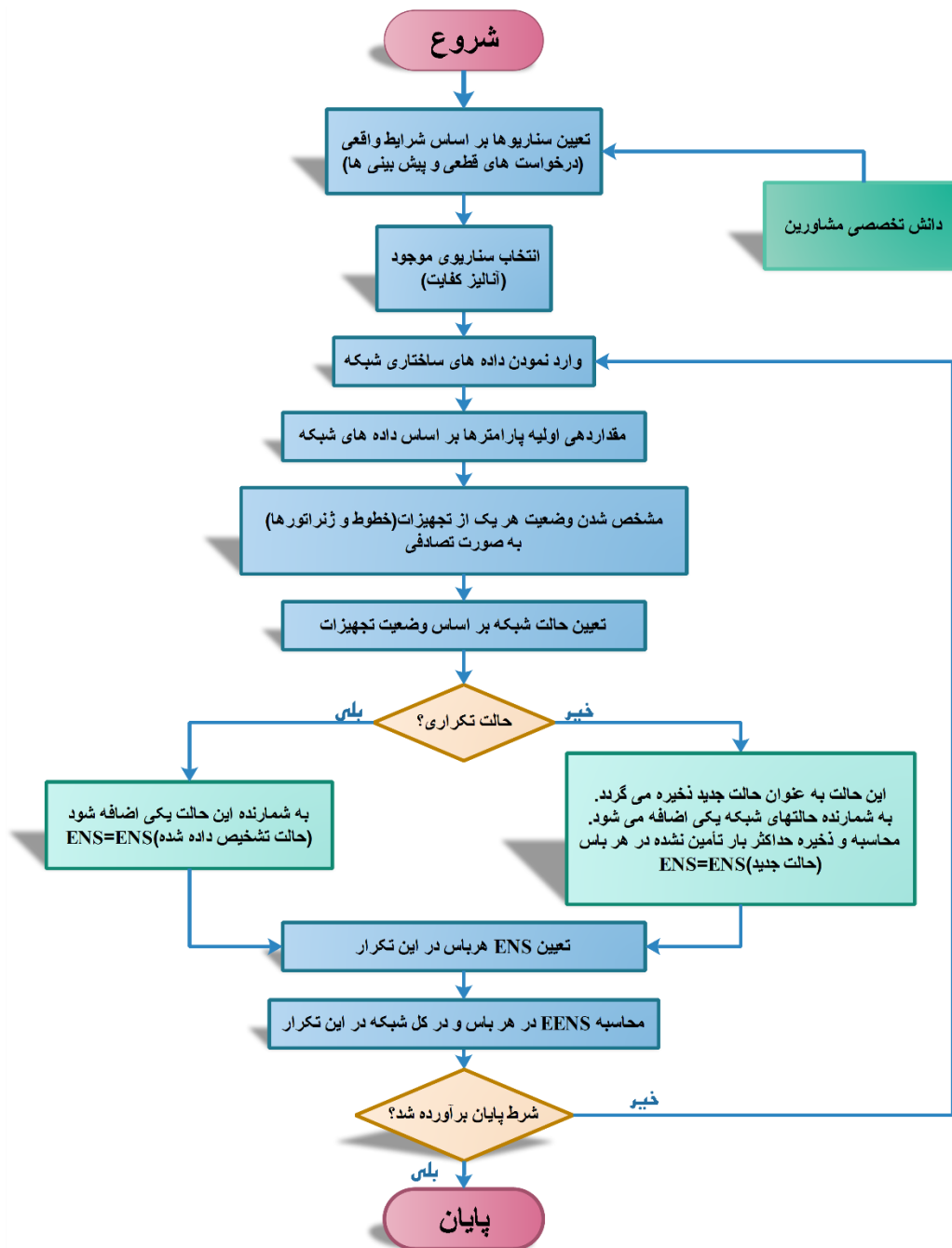
در صورت موجود بودن داده‌هاي فوق مي‌توان انواع شاخص‌هاي موردنياز را به دست آورد. عمده‌ترين اين شاخص‌ها، مقدار انرژي تأمين نشده و مقدار زمان از دست رفتن بار است كه به راحتی قابل محاسبه خواهد بود.



شكل (۲-۵) محاسبه EENS و LOLP به كمك منحنی تداوم بار

روند نما شكل (۳-۵) نمودار فرآيند مونت كارلو را براي حل معادله (۴-۵) در حضور توليد توان بادي نمايش داده است. هر حالت جديد كه در فرآيند مونت كارلو تشخيص داده شود، بعد از تعيين تعداد جزيره‌هاي شبكه و انتساب يك باس اسلگ به هر جزيره، ابتدا محاسبات بهينه‌سازي معادلات (۴-۵) در مورد آن انجام مي‌شود. سپس با كمك نتايج حاصل از حل مسئله بهينه‌سازي، ميزان حداكثر توان رسيده به بار در هر باس و در هر حالت مشخص مي‌گردد. بر مبناي حداكثر بار رسيده به هر باس، انرژي

تأمین نشده در آن حالت در هر باس تعیین و نتایج به دست آمده در هر حالت ذخیره می گردند و در صورت تکرار آن حالت در برنامه مونت کارلو از نتایج محاسبه شده قبلی آن حالت استفاده می شود. این کار موجب افزایش سرعت این برنامه شده است. مزیت اصلی این برنامه این است که تعداد حالات بررسی شده در نتیجه فرآیند مونت کارلو و نیز تعداد تکرار هر حالت و در نتیجه احتمال رخداد هر حالت و نیز نتایج پخش بار در هر حالت در انتهای برنامه مشخص می گردد.

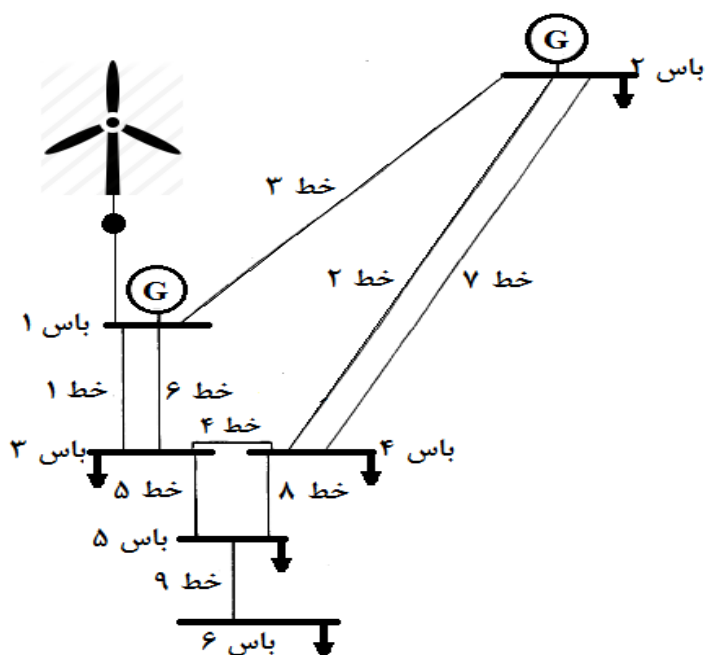


شکل (۵-۳) روند عملکرد برنامه محاسبه شاخص های قابلیت اطمینان

۴-۵ مطالعه موردی شبکه RBTS

۱-۴-۵ معرفی شبکه

هدف از این مطالعه، ارزیابی روش ارائه شده و مقایسه نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه RBTS با مرجع [۱۰۹] است. در مرجع ذکر شده سرعت باد به وسیله سری زمانی ARMA مدل‌سازی شده است. شبکه RBTS شامل ۱۱ واحد تولیدی مرسوم با توان‌های نامی ۵MW تا ۴۰MW با ظرفیت نهایی نصبی ۲۴۰MW است. بار پیک این شبکه ۱۸۰ مگاوات و شامل ۹ خط انتقال است. سپس به این شبکه ۱۰۰ توربین بادی با توان نامی ۲۲۵kW، نرخ خروج اجباری ۰/۰۴ و سرعت قطع پایین، سرعت نامی و سرعت قطع بالای به ترتیب ۱۲، ۳۸ و ۸۰ کیلومتر بر ساعت اضافه می‌شود. چون در مرجع مطالعه ذکر نکرده است که این توربین‌ها به کدام باس‌ها اضافه می‌شوند، بنابراین به دلخواه توربین‌های بادی به باس ۱ اضافه شده‌اند. شکل (۴-۵) شبکه مورد مطالعه به همراه توربین‌های بادی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مدل‌سازی و شبیه‌سازی توسط مدل پیشنهادی در محاسبه شاخص قابلیت اطمینان LOLE و مقایسه با نتایج حاصل از مرجع [۱۰۹] در ادامه آورده شده است.



شکل (۴-۵) شبکه RBTS همراه با مزرعه بادی

به علت در اختیار نداشتن رژیم سرعت بادی کشور کانادا که در مرجع استفاده شده است از اطلاعات سرعت بادی منطقه خواف استفاده شده است. همچنین برخلاف مقاله، همبستگی بین توربین‌های بادی در نظر گرفته نشده است.

۵-۴-۲ نتایج شبیه‌سازی

در جدول (۱-۵) نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه RBTS بر اساس روش پیشنهادی مدل‌سازی توربین بادی و نتایج سری زمانی از مرجع [۱۰۹] آورده شده است.

جدول (۱-۵) نتایج شبیه‌سازی شبکه RBTS و مقادیر LOLE محاسبه شده (hr/year)

روش مدل‌سازی	روش پیشنهادی	سری زمانی ARMA
LOLE شبکه بدون واحدهای بادی	۱/۱۶۷۴	۱/۱۲۸۲
LOLE شبکه در حضور واحدهای بادی	۰/۵۶۲۱	۰/۷۸۹۵

مقایسه نتایج در حالت عدم حضور واحدهای بادی نشان‌دهنده دقت و صحت مطلوب الگوریتم محاسبه قابلیت اطمینان است. اختلاف مشاهده شده را می‌توان در تولیدکننده اعداد تصادفی در شبیه‌سازی و استفاده از پخش بار DC دانست. البته در مرجع [۱۰۹] هیچ اشاره‌ای به روش پخش بار استفاده شده نکرده است. در حالتی که واحدهای بادی حضور دارند، مقادیر اختلاف بیشتری از خود نشان داده‌اند. این موضوع به این دلیل است که اولاً داده‌های بادی استفاده شده متفاوت بوده‌اند. رژیم بادی در منطقه خواف دارای سرعت متوسط بالاتری نسبت به منطقه باترفورد^۱ کانادا می‌باشد که داده‌های سرعت باد این منطقه در مرجع نامبرده استفاده شده و لذا تولید سالیانه توان بادی تزریقی به شبکه باعث کاهش شاخص LOLE شده است. دلیل دوم نیز محل تزریق توان بادی در شبکه می‌تواند باشد که چون در یک باس حضور پیدا کرده است باعث ایجاد اختلاف در مقادیر شبیه‌سازی شده و مرجع [۱۰۹] شده است. دلیل سوم برای این اختلاف مشاهده شده به علت در نظر نگرفتن خودهمبستگی توربین‌های بادی است که چون در الگوریتم پیشنهادی وارد نشده این اختلاف را موجب شده است.

^۱ Batterford

۵-۵ برنامه‌ریزی توسعه انتقال با توجه به توسعه منابع بزرگ تولید توان بادی در

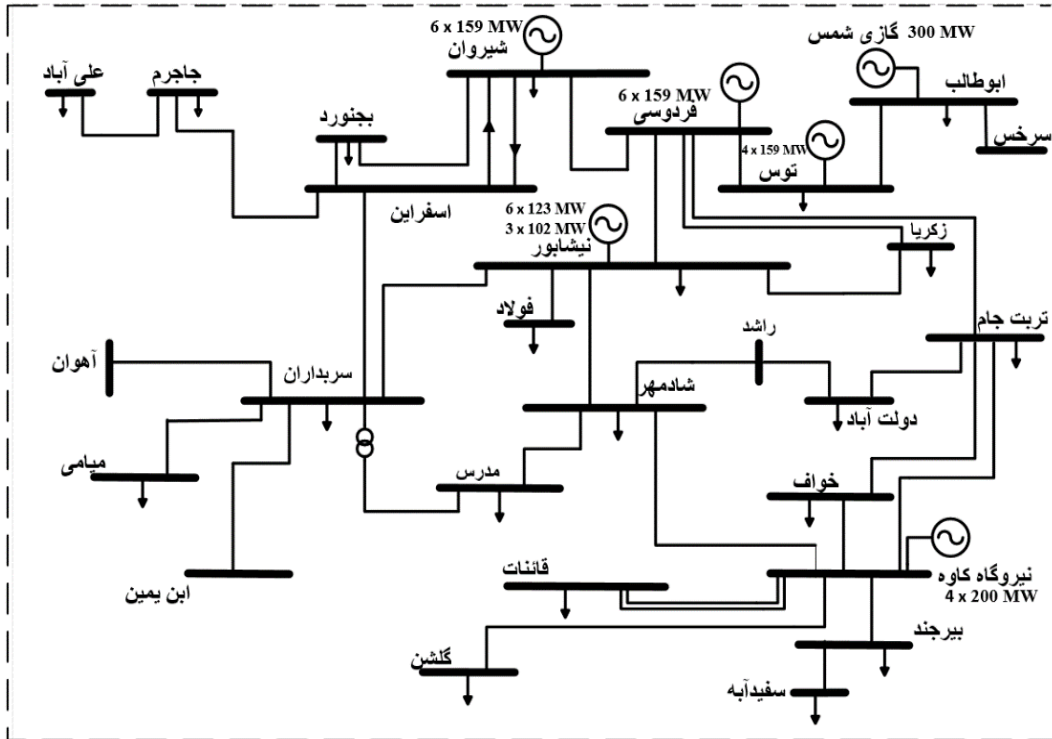
منطقه خواف

۵-۵-۱ معرفی شبکه مورد مطالعه

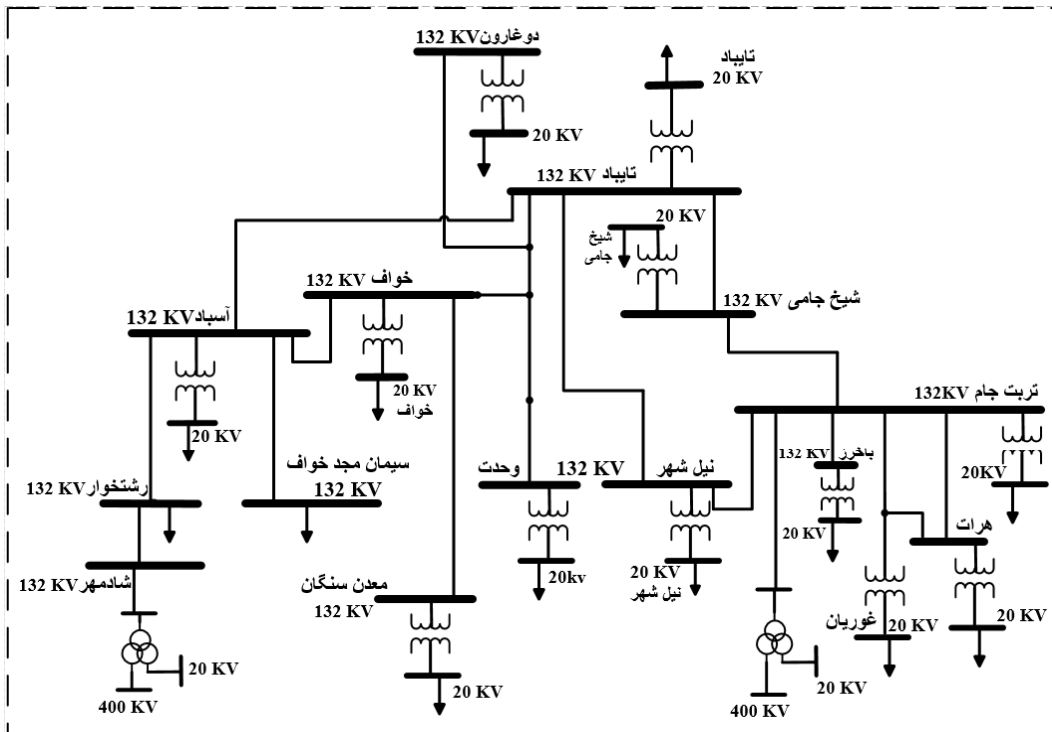
جهت ارائه و اجرای مدل پیشنهادی بر روی یک شبکه حقیقی، از شبکه انتقال خراسان و شبکه فوق توزیع در منطقه خواف استفاده شده است. به دلیل اهمیت وضعیت شبکه انتقال و نیز کاهش ابعاد شبکه و افزایش سرعت محاسبات در این مطالعه شبکه ۴۰۰KV به همراه رینگ ۱۳۲KV اطراف منطقه خواف شامل باس‌های ۱۳۲KV تربت‌جام تا باس شادمهر در نظر گرفته می‌شود. دلیل در نظر گرفتن رینگ ۱۳۲KV خواف، پیش‌بینی و نیز تقاضای ثبت‌شده برخی از پیمانکاران مزارع بادی و نیز رشد صنعتی و بار الکتریکی در این ناحیه بر روی سطح ولتاژ ۱۳۲KV بوده است. در این پایان‌نامه اثر نیروگاه‌های مشهد و شریعتی و بار باس‌های ۶۳ KV و ۲۰KV تغذیه شونده از این سطوح به صورت تجمیعی لحاظ شده است.

شبکه مبنای مورد مطالعه در دو سطح ۱۳۲KV و ۴۰۰KV دارای ۴۲ باس و ۶۰ خط انتقال است که به ترتیب ۸۶۲ و ۳۷۷۱ کیلومتر طول دارد. نمودار تک‌خطی شبکه انتقال و فوق توزیع مطالعه شده به ترتیب در شکل‌های (۵-۵) و (۶-۵) نشان داده شده است. کل ظرفیت نصب‌شده تولید در این شبکه ۴۷۶۰MW است.

همان‌طور که در شکل (۵-۵) قابل مشاهده است، برخی از باس‌ها دارای بار نیست. دلیل این امر نرسیدن بار این باس‌ها به افق زمانی مورد مطالعه و یا عدم اطلاعات پیش‌بینی بار این باس‌هاست. شایان توجه است که پیکربندی شبکه مورد مطالعه بر اساس شبکه‌ای است که از شرکت محترم برق منطقه‌ای خراسان رضوی برای افق برنامه‌ریزی سال ۱۳۹۷ دریافت شده است.



شکل (۵-۵) نمودار تک خطی شبکه ۴۰۰ KV خراسان



شکل (۶-۵) نمودار تک خطی شبکه ۱۳۲ KV رینگ تریب جام-شادمهر

۵-۵-۲ متدولوژی تحلیل شبکه

شبکه خراسان معرفی شده در بخش ۵-۵-۱ به منظور تحلیل وضعیت شبکه پس از حضور مزارع بادی و نیز رشد بار کل شبکه و به ویژه بار صنعتی منطقه خواف مورد مطالعه قرار گرفته است. نایقینی‌های غیر اتفاقی (غیر تکرارشونده) که در حضور این مزارع بادی و نیز رشد بار صنعتی منطقه وجود دارد موجب این می‌شود که نتوان این عوامل نایقینی را به صورت دقیق و قابل پیش‌بینی در مدل‌سازی وارد کرد. از مهم‌ترین این نایقینی‌ها سیاست‌های سرمایه‌گذاری از جانب دولت و بخش خصوصی نام برد و البته مشکلات و بحث‌هایی که برای واردات و یا تولید داخلی توربین‌ها برای نصب در این بستر بزرگ مقیاس توسعه توان بادی وجود دارد. به دلیل اینکه این موارد زمان حضور مزارع بادی و نیز رشد بار را مورد تغییرات زیادی در مدت‌زمان انجام این پژوهش کرده است، بهترین روش برخورد با این دست مسائل که آنالیز سناریو می‌باشد برای تعیین وضعیت شبکه و تحلیل آن انتخاب شده است. این مورد البته در ابتدای مطالعه برحسب مشاوره با مهندسين برق منطقه‌ای خراسان رضوی نیز پیش‌بینی شده بود. هریک از این سناریوها با جزئیاتی که برای آن‌ها تخصیص داده می‌شود، به برنامه محاسب قابلیت اطمینان داده می‌شوند تا شاخص‌های EENS و LOLE برای آن‌ها محاسبه شوند. این دو شاخص معیار اصلی مقایسه سناریوها خواهند بود. علاوه بر این دو شاخص بنا بر شرایط سناریوها پارامترهای دیگری از شبکه مانند توان عبوری از خطوط نیز تحلیل خواهند شد.

برای انجام آنالیز سناریو به پارامترهایی نیاز است تا سناریوهای گوناگون به منظور ایجاد شرایطی که احتمال وقوع آن برحسب اطلاعات تجربی در بهره‌برداری از شبکه زیاد است مورد بررسی قرار بگیرند. در این پایان‌نامه این پارامترها به صورت زیر هستند:

- سطح توان بادی
- سطح بار کل شبکه و سطح بار صنعتی پست ۴۰۰KV خواف
- نحوه اتصالات مزارع به سطوح ولتاژ در منطقه خواف

انتخاب این پارامترها و سطوحی که برای آنها انتخاب شده است دلایل متنوعی دارد. از اصلی ترین این دلایل می توان زمان و مقیاس درخواست های ثبت شده مزارع بادی، زمان و میزان بار درخواستی شرکت ها و کارخانه ها، تجارب مهندسين مشاور شرکت برق منطقه ای خراسان رضوی و البته میزان پیشرفت این درخواست ها در طی انجام مطالعه بوده است. برخی از سناریوهای تحلیل شده به درخواست اکید شرکت محترم برق منطقه ای صورت گرفته است. نقش موارد یادشده در تحلیل های آتی دوباره ذکر خواهد شد. استفاده از دانش و تجارب مهندسين مشاور نه تنها فضای مطالعه و سناریوها را با حذف حالت های با احتمال وقع پایین به شدت کاهش می دهد بلکه امکان دستیابی به یک طرح انعطاف پذیر را ممکن می سازد [۵۰]. این موضوع در روندنما شکل (۵-۳) مشخص شده است.

۳-۵-۵ تولید سناریو

۱-۳-۵-۵ اطلاعات

در این بخش جزئیات اطلاعات استفاده شده در تولید سناریوها آورده شده است که در قسمت قبل دسته بندی شد.

سطح توان بادی:

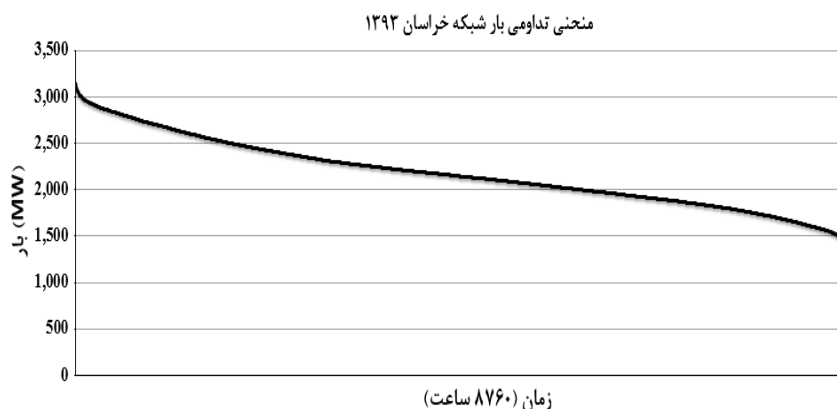
توان بادی در منطقه خواف دارای 875MW درخواست ثبت شده است که در جدول (۵-۲) جزئیات آنها آمده است. درخواست دهنده C سه فاز اجرایی برای مزارع خود در نظر دارد که درخواست اولیه این پیمانکار دارای دو سطح ولتاژ متفاوت است. فازهای ۲ و ۳ این پیمانکار با درخواست دهنده G زمان در مدار قرار گرفتنشان یکی اعلام شده است. قابل توجه است در تحلیل ظرفیت ها چون فرقی در یک سطح توان بادی معادل مثلاً 200MW برای زوج های E-F با C-1-D وجود ندارد، تنها یک بار این سطح توان با سطح ولتاژ 132KV مطالعه شده است. به طور پیش فرض توان بادی تولیدی زوج مزرعه های B - A ، G ، C و ۳ - E هر کدام توان تولیدی شان به یک باس می ریزد و با یک خط دو مداره 132KV به باس هم ولتاژ در پست $400/132$ خواف وصل شده اند.

جدول (۲-۵) سطوح توان بادی

درخواست دهنده	توان نامی ثبت شده (MW)	سطح ولتاژ در پیش‌بینی اولیه (KV)
A	۷۵	۱۳۲
B	۱۰۰	۱۳۲
C-1	۱۰۰	۱۳۲
C-2,3	۲۰۰	۴۰۰
D	۲×۵۰	۱۳۲
E	۱۰۰	۱۳۲
F	۱۰۰	۱۳۲
G	۱۰۰	۴۰۰

سطح بار شبکه و بار پست خواف:

شبکه خراسان در سال ۱۳۹۳ دارای پیک بار 3153 MW بوده که منحنی تداومی بار پیک ساعتی این شبکه در شکل (۷-۵) نمایش داده شده است. برای مدل‌سازی بار باس‌های مورد مطالعه به‌غیر از بار مرکز مصرف خواف و پست خواف، محاسبه انرژی تغذیه نشده با استفاده از مقادیر پیک بار پیش‌بینی شده در افق برنامه‌ریزی ۱۳۹۷ صورت گرفته است. یعنی فرض شده است مقدار پیک بار مربوط به سال ۱۳۹۷ باشد اما روند تغییرات ساعتی آن از منحنی تداومی بار در سال انجام پژوهش پیروی کند. با در نظر گرفتن حدوداً ۸ درصد رشد بار در هر سال، بار پیک در سال ۱۳۹۷ به 3970 MW خواهد رسید. بار مرکز مصرف شهرستان خواف در سال انجام پژوهش شامل بار توزیع به‌علاوه تغذیه دو واحد صنعتی با مقدار درخواستی 33 MW بوده است. این مقدار در انتهای افق برنامه‌ریزی قرار است تا از بخش مرکز مصرف خواف جدا شده و بر روی بار پست ۴۰۰/۱۳۲ خواهد رفت. به عبارتی فقط بار شبکه توزیع شهرستان خواف به‌عنوان بار مرکز مصرف خواف خواهد ماند. گفتنی است پست خواف ۴۰۰/۱۳۲ در حال احداث می‌باشد.



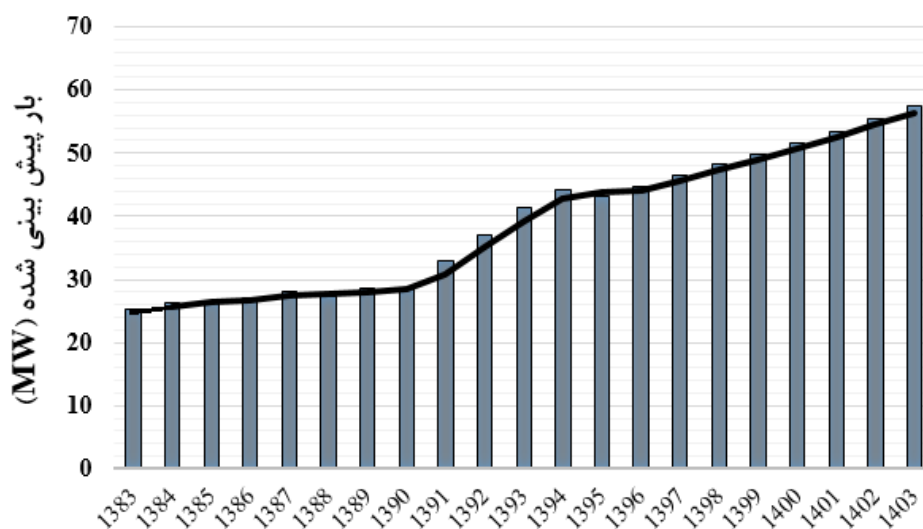
شکل (۷-۵) منحنی تداومی بار پیک شبکه خراسان

مقادیر بار درخواستی واحدهای صنعتی و مقادیر پیش‌بینی شده بار مرکز مصرف خواف در جدول

(۳-۵) و شکل (۸-۵) آورده شده است. شکل (۸-۵) بار توزیع را نشان می‌دهد.

جدول (۳-۵) تقاضای بار صنعتی پست ۴۰۰/۱۳۲ خواف

مقدار تقاضا (MW)	نام شرکت
۵۰	شرکت کاوه پارس (کاوه شرق)
۵۰	فولاد خراسان (نیشابور)
۵۰	شرکت صنعتی و معدنی توسعه ملی
۸۵	شرکت سنگ آهن فولاد سنگان
۵۹	معدن سنگان
$۲۹۴ \approx ۳۰۰$	مجموع



شکل (۸-۵) پیش‌بینی بار مرکز مصرف خواف

در سناریوها به طور پیش فرض برای بار صنعتی سه سطح صفر، 300 MW و 420 MW در نظر گرفته شده است که به باس 400 KV پست خواف متصل هستند. مقدار 420 MW با توسعه ۴ درصدی بار پست لحاظ شده است.

۴-۵-۵ نتایج

برای ارزیابی آثار حضور تولید بزرگ مقیاس توان بادی و رشد بار الکتریکی در سطوح مختلف بر شبکه برق، سناریوهای تولید توان بادی و بار الکتریکی تولید شده و مقدار شاخص قابلیت اطمینان برای هر حالت در زیر بخش اول تعیین شده است. علاوه بر این برای تحلیل نحوه اثرپذیری شاخص مطالعاتی قابلیت اطمینان از پیکربندی خطوط انتقال توان مزارع بادی با شبکه، حالات متفاوتی برحسب پیشنهادهای تخصصی مشاورین در نظر گرفته شده است. میزان بارگذاری خطوط فوق توزیع در منطقه خواف شبکه بررسی و پیشنهادهایی ارائه شده است. همچنین نقش حضور پست در حال احداث خواف در دو حالت حضور و عدم حضور این پست مطالعه شده است.

۴-۵-۵-۱ تحلیل تأثیر نفوذ بزرگ مقیاس توان بادی و رشد بار بر شاخص قابلیت اطمینان

نفوذ بزرگ مقیاس توان بادی و رشد بار الکتریکی در سطوح مختلف روی شاخص قابلیت اطمینان اثرگذار است. در محاسبات، فرض شده است که در تمام مزارع از توربین‌های $1/5\text{ MW}$ معرفی شده در زیر بخش ۴-۴-۱ استفاده شده است. محاسبات ارزیابی قابلیت اطمینان به روش شبیه‌سازی مونت کارلو در سطح HLI و در شبکه انتقال و فوق توزیع معرفی شده اجرا شده است. به منظور مدل‌سازی نیروگاه بادی در این محاسبات از مدل پیشنهادی ارائه شده در زیر بخش ۵-۲ استفاده شده است. در این راستا اطلاعات میانگین سرعت باد در ۱۵ سال اخیر به طور ساعتی از ایستگاه سینوپتیک هواشناسی در منطقه خواف فراهم شده است.

در جدول (۴-۵) و شکل (۹-۵) مقایسه‌ای از نتایج نفوذ بزرگ مقیاس توان بادی و رشد بار الکتریکی در سطوح مختلف روی شاخص قابلیت اطمینان ارائه شده است. در سه سناریو اول هدف مطالعه شاخص

EENS در غیاب توان بادی بوده است. سپس با اضافه کردن بار مرکز مصرف خوفاً به بار کل شبکه و رساندن به مقدار نهایی پیش‌بینی خود که در شکل (۵-۸) نمایش داده شده بود، مقدار EENS تغییر (افزایش) چندانی ندارد. به همین دلیل مقدار بار مرکز مصرف خوفاً را در تمام سناریوها در مقدار حداکثر خود قرار داده شده است. سناریوهای ۴ و ۵ تکرار سناریوهای ۲ و ۳ با تزریق ۱۷۵MW توان بادی است. کاهش شاخص EENS به دلیل تزریق توان بادی به وضوح مشاهده شده است. با گروه‌بندی وضعیت بار پست خوفاً در مقادیر صفر، ۳۰۰ و ۴۲۰MW بار شبکه در سه مقدار ۳۹۸۴، ۴۲۸۴ و ۴۴۱۱MW قرار خواهد گرفت، مقدار تزریق توان بادی و نحوه اتصالات با توجه به جدول (۵-۲) افزایش داده شده است.

در یک سطح توان بادی مشخص ۵۷۵MW آرایش (A, C1-2-3, D) نسبت به آرایش (A, B, C1, D, E, F) کاهش بیشتری (۲۴۹MWh/year) در شاخص EENS در بین سه سطح بار الکتریکی ایجاد کرده است. علت این امر اتصال ۳۰۰MW از آرایش سناریو اول به ولتاژ ۴۰۰KV در پست خوفاً و ظرفیت انتقال بالای خطوط ۴۰۰KV است. لذا این سطح توان بادی تزریقی به شبکه در آرایش شبکه با سناریو اول ارجحیت دارد.

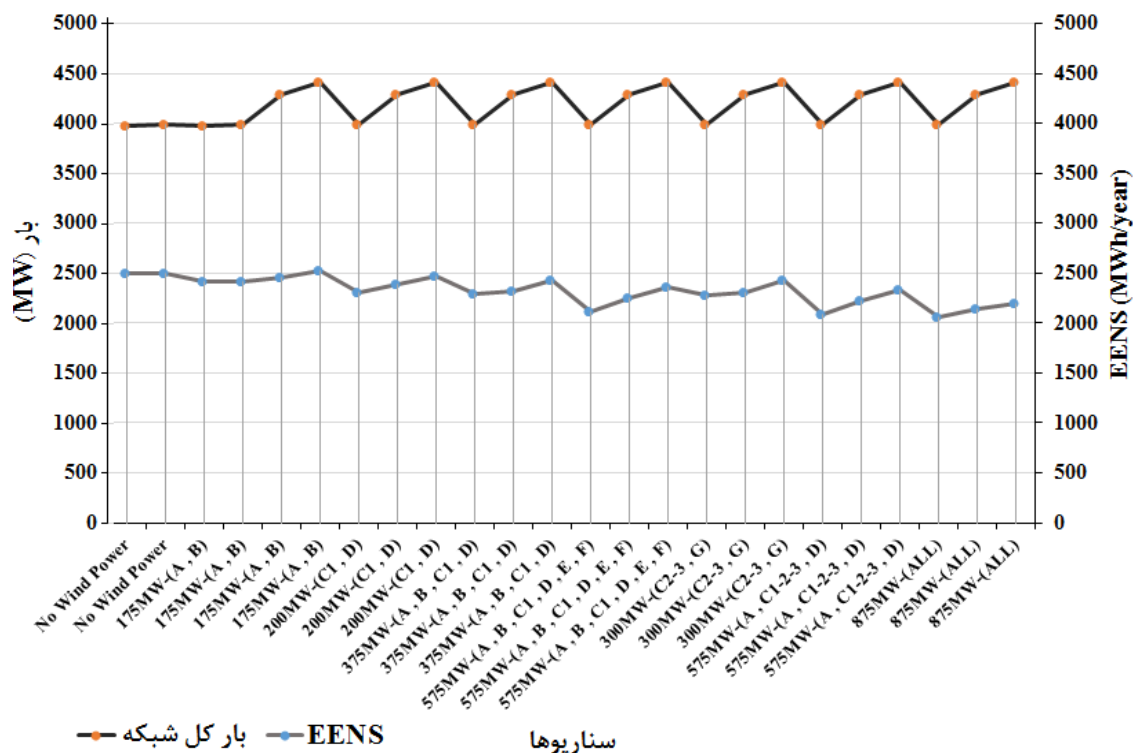
هرچند در تمام سناریوها با افزایش نفوذ توان بادی در هر سطح بار مشابه شبکه شاخص EENS کاهش بیشتری یافته است اما با مقایسه ۶ سناریو آخر می‌توان دریافت که افزایش نفوذ توان بادی از یک مقدار در حدود ۶۰۰MW کاهش چشمگیری در شاخص قابلیت اطمینان ایجاد نمی‌کند. این مورد به دلیل همبستگی پایین تولید توان بادی و بار الکتریکی به‌ویژه با بارهای صنعتی اتصالی به پست خوفاً است.

تأثیر سطح ولتاژ اتصالی مزارع به شبکه در سناریوهای توان بادی در دو مقدار ۳۷۵MW و ۳۰۰MW مشاهده شده است. بااینکه آرایش (A, B, C1, D) ۳۷۵MW را به شبکه تزریق کرده است، مقدار شاخص EENS در دو سطح بار نخست در آرایش (C2-3, G) مقادیر کمتری داشته است و در سطح بار

سوم شاخص EENS دقیقاً برابر بوده است. این مطلب اهمیت سطح ولتاژ اتصالی مزارع به شبکه را نشان داده و البته آرایش دوم را با توان بادی تزریقی کمتر ارجحیت می‌دهد.

جدول (۴-۵) سناریوها و نتایج بر روی شبکه انتقال و فوق توزیع خراسان

بار کل شبکه	EENS	شماره سناریو	سطح توان بادی (MW)	بار کل شبکه	EENS	شماره سناریو	سطح توان بادی (MW)
۳۹۸۴	۲۱۱۶	۱۴	575MW (A, B, C1, D, E, F)	۳۱۵۳	۲۲۳۸	۱	عدم حضور توان بادی
۴۲۸۴	۲۲۵۰	۱۵		۳۹۷۱	۲۴۹۱	۲	
۴۴۱۱	۲۳۵۸	۱۶		۳۹۸۴	۲۵۰۱	۳	
۳۹۸۴	۲۲۷۵	۱۷	300MW (C2-3, G)	۳۹۷۱	۲۴۱۰	۴	175MW (A, B)
۴۲۸۴	۲۳۱۰	۱۸		۳۹۸۴	۲۴۱۷	۵	
۴۴۱۱	۲۴۳۰	۱۹		۴۲۸۴	۲۴۵۰	۶	
۳۹۸۴	۲۰۹۰	۲۰	575MW (A, C1-2-3, D)	۴۴۱۱	۲۵۲۱	۷	200MW (C1, D)
۴۲۸۴	۲۲۱۹	۲۱		۳۹۸۴	۲۳۰۳	۸	
۴۴۱۱	۲۳۲۹	۲۲		۴۲۸۴	۲۳۸۷	۹	
۳۹۸۴	۲۰۶۶	۲۳	875MW (ALL)	۴۴۱۱	۲۴۷۴	۱۰	375MW (A, B, C1, D)
۴۲۸۴	۲۱۴۸	۲۴		۳۹۸۴	۲۲۹۱	۱۱	
۴۴۱۱	۲۱۹۹	۲۵		۴۲۸۴	۲۳۱۶	۱۲	
تعداد کل سناریوها: ۲۵				۴۴۱۱	۲۴۳۰	۱۳	



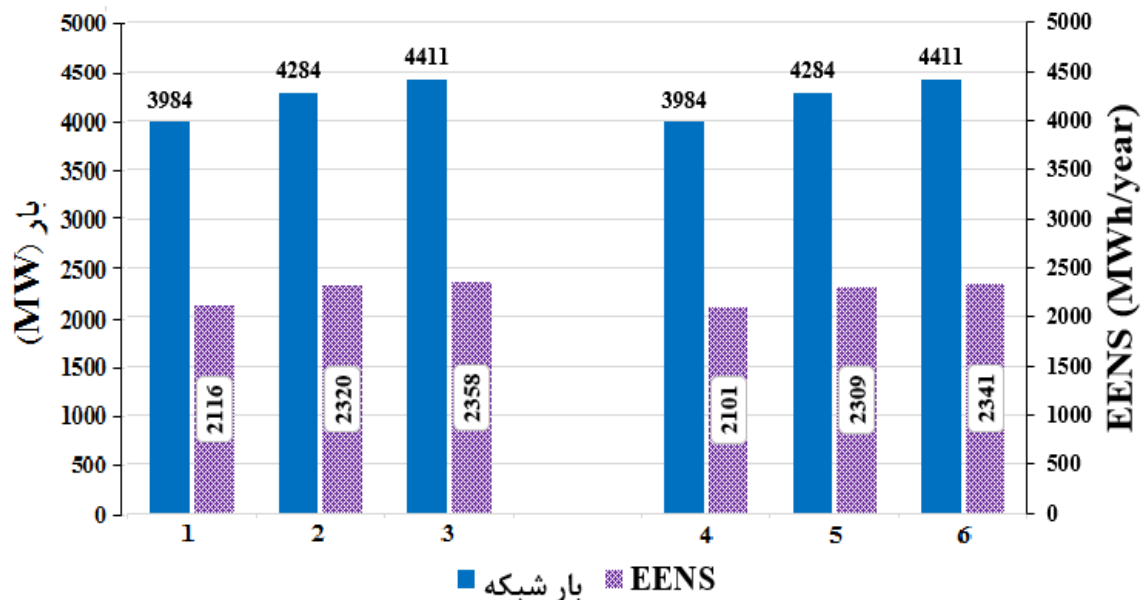
شکل (۹-۵) تأثیر نفوذ توان بادی و رشد بار بر شاخص قابلیت اطمینان

۵-۴-۵-۵ تحلیل پیکربندی مزارع بادی

در این بخش به منظور تعیین اولویت پیشنهادهای پیکربندی مزارع دو حالت برای آرایش مزارع (A, B, C1, D, E, F) با توان نامی ۵۷۵MW در نظر گرفته شده است. در حالت اول هر دو مزرعه با داشتن یک پست مشترک اختصاصی توان تولیدی خود را توسط یک خط دو مداره به باس ۱۳۲KV پست خواف داده‌اند که مقادیر شاخص EENS در زیر بخش ۵-۴-۵-۱ مطالعه شده است. در حالت دوم فرض شده است هر یک از این مزارع دارای پست اختصاصی باشند و توان خود را مانند حالت قبل با یک خط ۱۳۲KV به باس هم ولتاژ در پست خواف تحویل دهند.

در شکل (۱۰-۵) سه سناریوی دوم با پیکربندی توضیح داده شده مقادیر EENS پایین‌تری به خود اختصاص داده‌اند. با محاسبه اختلاف مقدار شاخص EENS در هر دو حالت در هر سطح بار شبکه به ترتیب مقادیر ۱۵، ۱۱ و ۱۷MWh/year بهبود ایجاد شده است. هرچند این مطالعه حاکی از تأثیر مثبت

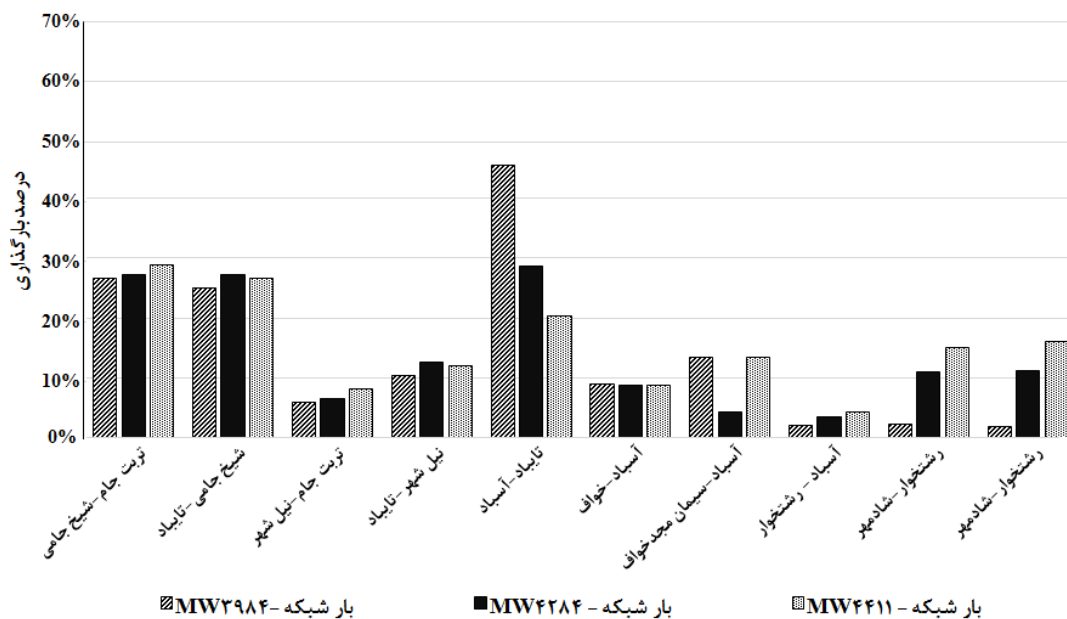
افزایش تعداد خطوط انتقال توان برای مزارع بادی است، اما چون این بهبود موجب ۲ برابر شدن هزینه‌های توسعه خطوط می‌شود بنابراین ساختار پیشنهادی اول دارای ارجحیت خواهد بود.



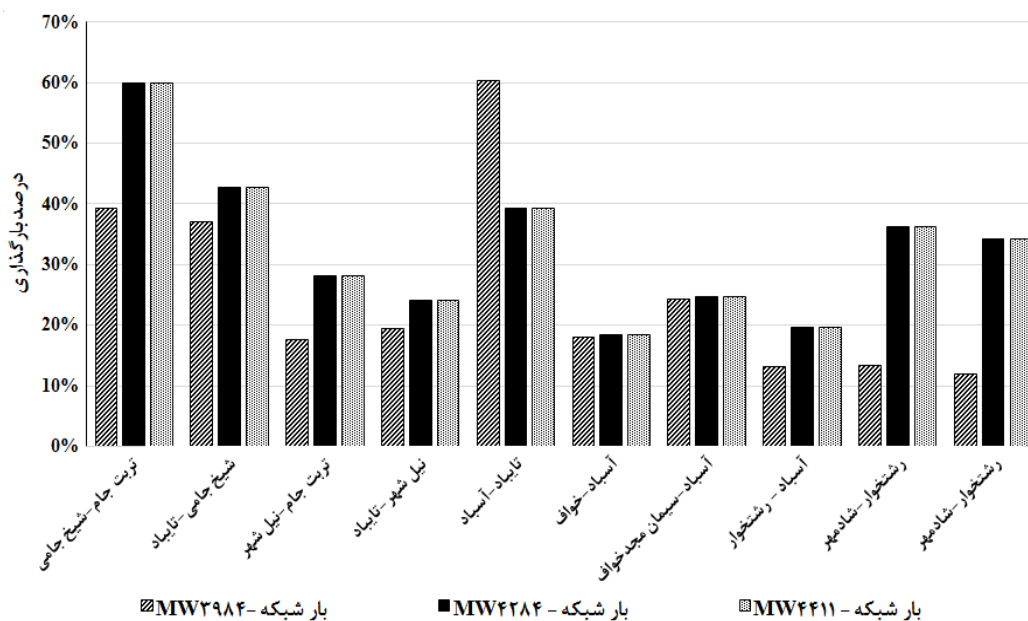
شکل (۵-۱۰) تأثیر پیکربندی مزارع بادی بر شاخص EENS

۵-۴-۳ تحلیل بارگذاری خطوط فوق توزیع منطقه خواف

خطوط فوق توزیع در مطالعه حاضر همگی از نوع آلیاژ با نام تجاری Hawk بوده است. در بهره‌برداری از خطوط فوق توزیع حد حرارتی آن‌ها را به‌عنوان حداکثر توان عبوری در نظر می‌گیرند. این مقدار حداکثر در این پایان‌نامه معادل با ۱۵۰ MW لحاظ شده است. به دلیل مقیاس بزرگ حضور مزارع بادی بارگذاری حداکثری در خطوط فوق توزیع در رینگ تربت جام-خواف نمایش داده شده در شکل (۵-۶) محتمل شمرده شده است. برای روشن شدن این مطلب مقدار متوسط بارگذاری چند خط در منطقه خواف در حالت حداکثر تزریق توان بادی و ۳ سطح بار شبکه در حضور و عدم حضور پست خواف بررسی شده است. درصد متوسط بارگذاری خطوط در شکل‌های (۵-۱۱) و (۵-۱۲) نمایش داده شده است.



شکل (۵-۱۱) متوسط درصد بارگذاری خطوط فوق توزیع در حضور پست خواف



شکل (۵-۱۲) متوسط درصد بارگذاری خطوط فوق توزیع در غیاب پست خواف

در شکل (۵-۱۱) خط تایباد-آسباد با بیشترین متوسط درصد بارگذاری کاندیدای ورود به شرایط بحرانی در شرایط رشد بار شبکه است. بیشتر بودن متوسط درصد بارگذاری در خطوط تربت جام-شیخ جامی و شیخ جامی-تایباد این منطقه را به همراه خطوط فوق توزیع آن، برای تقویت ساختار شبکه مورد توجه قرار می‌دهد. خطوط موجود در منطقه خواف شامل باس‌های آسباد، خواف و سیمان

مجد خواف با بارگذاری کاملاً نرمال و پایین شرایط مطلوبی را در شرایط حضور ۸۷۵MW مزرعه بادی و رشد بار در منطقه دارا می‌باشند.

به‌منظور مشخص شدن اهمیت فوق‌العاده پست در حال احداث خواف ۴۰۰/۱۳۲ که به‌نوعی در کانون بار منطقه خواف قرار خواهد گرفت، وضعیت بارگذاری خطوط مطالعه شده است. فرض شده است رشد بار صنعتی منطقه خواف بر روی باس ۱۳۲KV خواف موجود و آسباد صورت گرفته باشد. همچنین تزریق توان مزارع بادی به‌طور برابر بر روی این دو باس به دلیل نزدیکی به منطقه بادخیز صورت گرفته باشد.

شکل (۵-۱۲) افزایش متوسط درصد بارگذاری را در تمامی خطوط مطالعه شده نمایش داده است. این افزایش متوسط درصد بارگذاری به‌ویژه در خطوط تربت جام-شیخ جامی و شیخ جامی-تایباد و تایباد-آسباد دیده شده است. با در نظر گرفتن متوسط درصد بارگذاری ۵۰ درصد به‌عنوان معیاری برای تقویت خطوط تحت این مقدار بارگذاری در افق توانی بار شبکه، خطوط نامبرده شده کاندیدای تقویت هستند. چراکه تلفات انتقال توان در شرایط بارگذاری بالای این خطوط باعث ایجاد هزینه‌های سنگینی در درازمدت بر دوش بهره‌بردار شبکه خواهد گذاشت.

نکته قابل توجه بارگذاری خط آسباد-خواف است. این خط در هر سه حالت بار شبکه، بارگذاری تقریباً یکسانی دارد. این مورد برای خط آسباد-سیمان مجد خواف نیز رخ داده است. دلیل این رخداد را در تزریق توان بادی به دو باس خواف و آسباد مربوط است به‌طوری‌که می‌توان گفت در پخش بار توان بادی تزریقی به این باس‌ها تا حدی در خود این باس‌ها توزیع شده است.

۵-۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل برنامه ریزی توسعه انتقال با توجه به توسعه منابع بزرگ توان بادی و رشد بار الکتریکی بر اساس اطلاعات واقعی صورت گرفت. سپس برای بررسی آثار حضور مزارع بادی بر شاخص قابلیت اطمینان، روشی برای مدل‌سازی مزارع بادی طراحی شد. در پایان سناریوهایی برای مشخص شدن

وضعیت شبکه، توسعه و تقویت احتمالی آن تحلیل شد. در ادامه نتایج اصلی به دست آمده از تحلیل سناریوها ارائه شده است:

۱. تحلیل اطلاعات واقعی تولید بزرگ مقیاس توان بادی و رشد بار الکتریکی در شبکه خراسان نشان می دهد این شبکه وضعیت خوبی از نظر قابلیت اطمینان دارد و با حضور مزارع بادی متعدد و رشد بار تا افق مطالعه دچار شرایط بحرانی نخواهد شد.

۲. افزایش سطح توان بادی نامی تزریقی در هر سطح بار الکتریکی پیش بینی شده در تمام سناریوهای مطالعه شده باعث کاهش شاخص EENS شده است.

۳. کاهش در شاخص EENS در سطح توان بادی نامی مزارع حدوداً تا ۶۰۰MW تاثیر بیشتری داشته است. دلیل این امر پایین بودن همبستگی توان بادی و بار الکتریکی در منطقه خواف می باشد.

۴. انتقال و تزریق توان بادی به شبکه با سطح ولتاژ ۴۰۰KV ارجحیت بیشتری از خود نشان داده است. شاهد موضوع اتصال با شبکه در ولتاژ ۴۰۰KV در سطح توان بادی نامی کمتر باعث کاهش بیشتر شاخص EENS نسبت به اتصال با شبکه در ولتاژ ۱۳۲KV مزارع بادی در سطح توان بادی نامی بالاتر شده است.

۵. پیکربندی پیشنهادی مزارع در سطح ولتاژ ۱۳۲KV با احداث یک پست برای هر دو مزرعه و انتقال توان بادی تولیدی به پست خواف نسبت به ایجاد خطوط انتقال برای هر مزرعه ارجحیت بیشتری دارد. دلیل این امر تفاوت اندک شاخص EENS در دو حالت پیکربندی ذکر شده است.

۶. خطوط فوق توزیع در انتهای رشد بار پیش بینی شده، در حضور و عدم حضور توان بادی دارای وضعیت مناسبی از نظر درصد بارگذاری هستند. حضور تمامی مزارع بادی باعث افزایش بارگذاری در تمامی خطوط به ویژه خطوط بین باس های تربت جام، نیل شهر و تایباد شده است.

۷. متوسط درصد بارگذاری خطوط حاضر در منطقه خواف بین باس‌های خواف، آسباد و سیمان مجد خواف همگی در ولتاژ $132KV$ بعد از حضور توان بادی افزایش یافته اند اما این افزایش شرایط بارگذاری خطوط را بحرانی نمی‌کند.
۸. با تزریق توان بادی مزارع به طور مساوی بین باس‌های موجود خواف و آسباد، برابری شاخص قابلیت اطمینان در سناریوهای رشد بار صنعتی منطقه خواف نشان از مصرف توان بادی تزریقی مزارع در باس‌های آسباد و خواف بوده است.

فصل ششم

جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد

۶-۱ جمع‌بندی و مروری بر کارهای انجام‌شده

در این پایان‌نامه، به برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال با توجه به توسعه منابع بزرگ توان بادی در منطقه خواف خراسان رضوی پرداخته شد.

در فصل سوم با توجه به نیاز بنیادین در توسعه منابع بزرگ‌مقیاس توان بادی، به ارزیابی پتانسیل توان بادی منطقه خواف پرداخته شد. ابتدا به معرفی منطقه خواف و شناسایی منطقه بادخیز پرداخته شد. سپس عوامل مؤثر در مکان‌یابی مزرعه بادی و نایقینی‌های موجود در منطقه خواف ارائه گردید. با ارائه روشی برای جانمایی دقیق توربین در یک مزرعه بادی، توان بادی قابل استحصال از منطقه خواف با استفاده از زمین‌های آزاد منطقه و ناحیه تحت پوشش باد توربین محاسبه شد. در انتها با استفاده از روش آماری به ارزیابی پتانسیل انرژی باد، شناخت ویژگی‌های رژیم بادی منطقه خواف و کلاس‌بندی منطقه برحسب مقدار چگالی توان الکتریکی پرداخته شد.

در فصل چهارم، ابتدا به تقسیم‌بندی مطالعات قابلیت اطمینان و مسائل مطرح در آن‌ها، معرفی و نحوه محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان پرداخته شد. سپس روش‌های مدل‌سازی باد و نیروگاه بادی ارائه گردید. به دلیل اهمیت شاخص همبستگی در مطالعه حاضر وضعیت همبستگی تولید توان بادی و بار الکتریکی در منطقه خواف از این فصل مطالعه شد.

در فصل پنجم، مسئله توسعه شبکه انتقال باهدف توسعه تولید منابع بزرگ توان بادی در منطقه خواف؛ ارزیابی قابلیت اطمینان بر روی نمونه‌های مطالعاتی با داده‌های واقعی صورت گرفت. ابتدا روش پیشنهادی در مدل‌سازی نیروگاه بادی و معرفی ساختار برنامه محاسب شاخص‌های قابلیت اطمینان، مسئله توسعه انتقال به همراه معادلات، قیود و جزئیات مسئله بهینه‌سازی صورت‌بندی شد. سپس شاخص قابلیت اطمینان برای شبکه^۱ RBTS به‌منظور سنجش الگوریتم و مدل‌سازی محاسبه شد. درنهایت در بخش پنجم مطالعه جامعی بر روی شبکه انتقال شبکه خراسان با تمرکز بر وضعیت شبکه

^۱ Roy Bilinton Test System

فوق توزیع در منطقه خواف صورت گرفت. در این راستا ابتدا به تولید سناریوهایی بر اساس اطلاعات واقعی قطعی یا پیش‌بینی شده و درخواستی برای سطح توان بادی و رشد بار الکتریکی پرداخته شد. سپس تحلیلی بر تأثیر نفوذ بزرگ‌مقیاس توان بادی و رشد بار بر شاخص قابلیت اطمینان در سناریوهای مختلف محتمل ارائه شد. نحوه تأثیر پیکربندی مزارع بادی در یک سطح توان بادی برابر ارزیابی گردید. همچنین تحلیل بارگذاری خطوط فوق توزیع منطقه خواف مطالعه شد.

۲-۶ نتایج

نتایج به دست آمده در این پایان‌نامه را می‌توان به‌طور خلاصه به‌صورت زیر مطرح نمود:

- محدوده بادخیز در شهرستان خواف از محل معدن آهن سنگان تا حوالی بخش سلامی از شهرستان خواف، در پایین شهرستان تا بالای بخش نشتیفان و به سمت غرب اگر برویم تا حوالی روستاهای زوزن و قاسم‌آباد وسعت دارد.
- میزان حداکثر توان الکتریکی قابل استحصال از منطقه خواف بر اساس استفاده از زمین‌های آزاد منطقه، در بهره‌برداری کامل از تمامی زمین‌های معدنی مستعد و یا تنها در حضور زمین‌های در حال بهره‌برداری، در صورت استفاده از توربین‌هایی با توان نامی $1/5\text{MW}$ به ترتیب 3460MW و 5090MW محاسبه شده است.
- بیشترین مقدار متوسط سرعت باد در طول سال در ماه جولای مصادف با تیرماه و کمترین متوسط سرعت باد در ماه ژانویه مصادف با دی‌ماه اتفاق می‌افتند. از ماه آوریل تا اوت که مصادف با اواسط فروردین تا دهه اول شهریورماه می‌باشند، رژیم باد مقادیر بالایی را نشان می‌دهد. تغییرات ساعتی سرعت باد در طول شبانه‌روز در منطقه خواف به‌گونه‌ای است که در ساعت‌های عصر حدوداً از ساعت ۴ به بعد شروع به افزایش می‌کند تا به اوج سرعت خود در ساعت‌های انتهایی شب برسد. این مورد معادل با افزایش توان تزریقی در این ساعات بوده و لذا مورد بسیار

مهمی در مسائل بهره‌برداری شبکه و پخش توان با توجه به تولید توربین‌هایی است که در این منطقه نصب خواهند شد.

- جهت غالب وزش باد در منطقه خواف به صورت شمال به شمال شرقی است. این خود دلیلی بر متفاوت بودن بادهای این منطقه از بادهای ۱۲۰ روزه سیستان است.

- منطقه خواف در بالاترین کلاس توان بادی (کلاس ۷) قرار می‌گیرد. این مورد تأییدی بر مناسب بودن منطقه برای احداث مزارع بادی به به‌ویژه با توربین‌های بادی با توان‌های نامی مگاواتی است.

- تحلیل اطلاعات واقعی سرعت باد وجود همبستگی بین تولید توان بادی و بار الکتریکی را تأیید می‌کند. نتایج نشان می‌دهد همبستگی تولید بادی برای ساعات محدود در یک ماه خاص از سال ممکن است قابل توجه باشد.

- بار پست سنگان دارای همبستگی متقابل مثبت با تولید بادی می‌باشد درحالی‌که بار پست آسباد منفی است. این بدان معناست که بار پست سنگان با تغییرات تولید بادی در تغییرات هم‌نواپی بیشتری از خود نشان می‌دهد. لذا می‌توان پست سنگان را نسبت به پست آسباد گزینه مناسب‌تری برای اتصال یک مزرعه بادی جهت تأمین توان آن پنداشت.

- در تحلیل همبستگی بین تولید توان بادی و بار الکتریکی مهم‌ترین مشاهده این است که ضریب همبستگی تولید بادی تغییرات چشمگیری نه تنها به صورت فصلی داشته بلکه به صورت ماه به ماه نیز تغییراتی عکس هم دارد.

- تحلیل اطلاعات واقعی تولید بزرگ‌مقیاس توان بادی و رشد بار الکتریکی در شبکه خراسان نشان می‌دهد این شبکه وضعیت خوبی از نظر قابلیت اطمینان دارد و با حضور مزارع بادی متعدد و رشد بار تا افق مطالعه دچار شرایط بحرانی نخواهد شد. همچنین افزایش سطح توان بادی نامی تزریقی در هر سطح بار الکتریکی پیش‌بینی شده در تمام سناریوهای مطالعه شده باعث کاهش شاخص EENS شده است.

- کاهش در شاخص EENS در سطح توان بادی نامی مزارع حدوداً تا ۶۰۰MW تأثیر بیشتری داشته است و بعد از این مقدار توان تزریقی تاثیرش کم می‌شود. دلیل این امر می‌تواند پایین بودن همبستگی توان بادی و بار الکتریکی در منطقه خواف باشد.
- انتقال و تزریق توان بادی به شبکه با سطح ولتاژ ۴۰۰KV ارجحیت بیشتری از خود نشان داده است. همچنین پیکربندی پیشنهادی مزارع در سطح ولتاژ ۱۳۲KV با احداث یک پست برای هر دو مزرعه و انتقال توان بادی تولیدی به پست خواف نسبت به ایجاد خطوط انتقال برای هر مزرعه ارجحیت بیشتری دارد. دلیل این امر تفاوت اندک شاخص EENS در دو حالت پیکربندی ذکر شده است.
- خطوط فوق توزیع در انتهای رشد بار پیش‌بینی شده، در حضور و عدم حضور توان بادی دارای وضعیت مناسبی از نظر درصد بارگذاری هستند. حضور تمامی مزارع بادی باعث افزایش بارگذاری در تمامی خطوط به‌ویژه خطوط بین باس‌های تربت‌جام، نیل شهر و تایباد شده است.
- متوسط درصد بارگذاری خطوط حاضر در منطقه خواف بین باس‌های خواف، آسباد و سیمان مجد خواف همگی در ولتاژ ۱۳۲KV بعد از حضور توان بادی افزایش یافته‌اند اما این افزایش شرایط بارگذاری خطوط را بحرانی نمی‌کند.
- با تزریق توان بادی مزارع به‌طور مساوی بین باس‌های موجود خواف و آسباد، برابری شاخص قابلیت اطمینان در سناریوهای رشد بار صنعتی منطقه خواف می‌تواند نشان از مصرف توان بادی تزریقی مزارع در باس‌های آسباد و خواف بوده است.

۳-۶ پیشنهادها

هدف از این پروژه توسعه شبکه انتقال در حضور منابع بزرگ مزارع بادی با توجه به روند رو به رشد آن به‌خصوص در ایران و منطقه خواف بوده است. همچنین در این راستا مدلی جدید به‌منظور مدل‌سازی نیروگاه بادی در محاسبات قابلیت اطمینان توسعه داده شد. وضعیت شبکه انتقال خراسان و شبکه فوق

توزیع در منطقه خواف بررسی شد. بر این مبنا پیشنهاد می‌گردد مطالعات بعدی حول مطالب زیر صورت

پذیرد:

- مطالعه شبکه در حضور مزارع بادی از دیدگاه اقتصاد سیستم قدرت
 - در نظرگیری مباحث مربوط به توان راکتیو و تأثیرات آن بر شبکه برق
 - امکان‌سنجی و در نظر گرفتن منابع انرژی تجدید پذیر دیگر مانند انرژی خورشیدی در مطالعه ارزیابی قابلیت اطمینان در مناطق مختلف شبکه خراسان
 - توسعه مبانی احتمالاتی روش پیشنهادی در مدل‌سازی مزرعه بادی و در نظر گرفتن مدل تجهیزات کوچک‌تر یک مزرعه بادی در محاسبات قابلیت اطمینان
- امید است انجام این مطالعات بتواند کم‌شایانی در توسعه هر چه بیشتر مزارع بادی همراه با سطح کارایی و بهینه‌سازی بالاتر باشد و بتواند در آینده زمینه‌ای روشن برای حضور هرچه بهتر این واحدهای تولید در صنعت برق فراهم آورد.

منابع و مراجع

- [١] J. M. Morales, L. Baringo, A. J. Conejo, and R. Mínguez, (2010), "Probabilistic power flow with correlated wind sources," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 4, pp 641-651.
- [٢] B. Borkowska, (1974), "Probabilistic load flow," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 93, pp 752-759.
- [٣] R. Allan, A. Da Silva, and R. Burchett, (1981), "Evaluation methods and accuracy in probabilistic load flow solutions," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 5, pp 2539-2546.
- [٤] R. N. Allan and M. R. G. Al-Shakarchi, (1977), "Probabilistic techniques in a.c. load-flow analysis," *Proc. Inst. Electr. Eng. UK*, vol. 124, p. 154.
- [٥] P. Zhang and S. T. Lee, (2004/02 2004), "Probabilistic Load Flow Computation Using the Method of Combined Cumulants and Gram-Charlier Expansion," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, pp 676-682.
- [٦] L. Sanabria and T. Dillon, (1986), "Stochastic power flow using cumulants and Von Mises functions," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 8, pp 47-60.
- [٧] M. Madrigal, K. Ponnambalam, and V. H. Quintana, "Probabilistic optimal power flow," in *Electrical and Computer Engineering, 1998. IEEE Canadian Conference on*, 1998, pp. 385-388.
- [٨] V. Miranda and J. Saraiva, "Fuzzy modelling of power system optimal load flow," in *Power Industry Computer Application Conference, 1991. Conference Proceedings*, 1991, pp. 386-392.
- [٩] A. Da Silva, V. Arienti, and R. Allan, (1984), "Probabilistic load flow considering dependence between input nodal powers," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 6, pp 1524-1530.
- [١٠] C.-L. Su, (2005), "Probabilistic load-flow computation using point estimate method," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp 1843-1851.
- [١١] G. Verbič and C. Canizares, (2006), "Probabilistic optimal power flow in electricity markets based on a two-point estimate method," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp 1883-1893.

- [١٢] M. Moeini-Aghtaie, A. Abbaspour, and M. Fotuhi-Firuzabad, (2012), "Incorporating large-scale distant wind farms in probabilistic transmission expansion planning—Part I: Theory and algorithm," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp 1585-1593.
- [١٣] W. Li, (2011), "*Probabilistic transmission system planning*" vol. 65. John Wiley & Sons.
- [١٤] W. Li, (2014), "*Risk assessment of power systems: models, methods, and applications*". John Wiley & Sons.
- [١٥] Y. Zhang, A. Chowdhury, and D. Koval, (2011), "Probabilistic wind energy modeling in electric generation system reliability assessment," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 47, pp 1507-1514.
- [١٦] C. Singh, X. Luo, and H. Kim, "Power system adequacy and security calculations using Monte Carlo simulation incorporating intelligent system methodology," in *Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006. PMAPS 2006. International Conference on*, 2006, pp. 1-9.
- [١٧] P. Yuanidis, M. A. Styblinski, D. R. Smith, and C. Singh, (1994), "Reliability modeling of flexible manufacturing systems," *Microelectronics Reliability*, vol. 34, pp 1203-1220.
- [١٨] C. Singh and L. Wang, (2008), "Role of artificial intelligence in the reliability evaluation of electric power systems," *Turk J Elec Engin*, vol. 16, pp 189-200.
- [١٩] L. Wang and C. Singh, "Multi-deme parallel genetic algorithm in reliability analysis of composite power systems," in *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest, 2009*, pp. 1-6.
- [٢٠] R. C. Green, L. Wang, M. Alam, and C. Singh, "State space pruning for reliability evaluation using binary particle swarm optimization," in *Power Systems Conference and Exposition (PSCE), 2011 IEEE/PES, 2011*, pp. 1-7.
- [٢١] R. C. Green, L. Wang, Z. Wang, M. Alam, and C. Singh, "Power system reliability assessment using intelligent state space pruning techniques: A comparative study," in *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 1-8.
- [٢٢] N. Samaan and C. Singh, "Assessment of the annual frequency and duration indices in composite system reliability using genetic algorithms," in *Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, 2003*.
- [٢٣] M. R. Gholami, S. Hoseini, and M. Mohamad Taheri, "Assessment of power composite system annualized reliability indices based on improved particle swarm optimization and comparative study between the behaviour of GA and PSO," in *Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International*, 2008, pp. 1609-1612.

- [٢٤] E. Zio, (2013), "*The Monte Carlo simulation method for system reliability and risk analysis*". Springer.
- [٢٥] M. Bhuiyan and R. Allan, (1994), "Inclusion of weather effects in composite system reliability evaluation using sequential simulation," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 141, pp 575-584.
- [٢٦] R. Billinton and L. Cheng, "Incorporation of weather effects in transmission system models for composite system adequacy evaluation," in *IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, 1986, pp. 319-327.
- [٢٧] R. Billinton and D. Huang, (2008), "Effects of load forecast uncertainty on bulk electric system reliability evaluation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp 418-425.
- [٢٨] A. Sankarakrishnan and R. Billinton, (1995), "Sequential Monte Carlo simulation for composite power system reliability analysis with time varying loads," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 10, pp 1540-1545.
- [٢٩] D. Huang, R. Billinton, and W. Wangdee, "Effects of demand side management on bulk system adequacy evaluation," in *Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th International Conference on*, 2010, pp. 593-598.
- [٣٠] R. Billinton and W. Wangdee, (2006), "Predicting bulk electricity system reliability performance indices using sequential Monte Carlo simulation," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp 909-917.
- [٣١] W. Wangdee and R. Billinton, (2005), "Reliability-performance-index probability distribution analysis of bulk electricity systems," *Electrical and Computer Engineering, Canadian Journal of*, vol. 30, pp 189-193.
- [٣٢] I. Abouzahr and R. Ramakumar, (1991), "An approach to assess the performance of utility-interactive wind electric conversion systems," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp 627-638.
- [٣٣] R. Billinton, H. Chen, and R. Ghajar, (1996), "Time-series models for reliability evaluation of power systems including wind energy," *Microelectronics Reliability*, vol. 36, pp 1253-1261.
- [٣٤] T. Manco and A. Testa, "A Markovian approach to model power availability of a wind turbine," in *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, 2007*, pp. 1256-1261.

- [٣٥] R. Billinton and Y. Gao,(2008)" ,Multistate wind energy conversion system models for adequacy assessment of generating systems incorporating wind energy," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp 163-170.
- [٣٦] A. P. Leite, C. L. Borges, and D. M. Falcao, (2006), "Probabilistic wind farms generation model for reliability studies applied to Brazilian sites," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp 1493-1501.
- [٣٧] E. Bassiouny and S. Othman, "Adequacy assessment of bulk electric power systems incorporating wind energy," in *GCC Conference and Exhibition (GCC), 2011 IEEE*, 2011, pp. 279-282.
- [٣٨] W. Wangdee and R. Billinton, (2007), "Reliability assessment of bulk electric systems containing large wind farms," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 29, pp 759-766.
- [٣٩] R. Billinton, Y. Gao, and R. Karki, (2010), "Application of a joint deterministic-probabilistic criterion to wind integrated bulk power system planning," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp 1384-1392.
- [٤٠] W. Li, (2013), "*Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods*". Springer Science & Business Media.
- [٤١] W. Wangdee, "Bulk electric system reliability simulation and application," Citeseer, 2005.
- [٤٢] R. Billinton and G. Bai, (2004)" ,Generating capacity adequacy associated with wind energy," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp 641-646.
- [٤٣] P. Poonpun and W. T. Jewell, (2008), "Analysis of the cost per kilowatt hour to store electricity," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 23, pp 529-534.
- [٤٤] L. Wang and C. Singh, "A conceptual study on reliability constrained transmission system planning including wind power," in *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE*, 2009, pp. 1-7.
- [٤٥] H. Mori and H. Kakuta, "A new meta-heuristic method for probabilistic transmission network expansion planning," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES*, 2010, pp. 1-6.
- [٤٦] R.-C. Leou, (2011), "A multi-year transmission planning under a deregulated market," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, pp 708-714.

- [٤٧] A. A. Foroud, A. A. Abdoos, R. Keypour, and M. Amirahmadi, (2010), "A multi-objective framework for dynamic transmission expansion planning in competitive electricity market," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32, pp 861-872.
- [٤٨] G. Qu, H. Cheng, L. Yao, Z. Ma, and Z. Zhu, (2010), "Transmission surplus capacity based power transmission expansion planning," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, pp 19-27.
- [٤٩] O. B. Tor, A. N. Guven, and M. Shahidehpour, (2008), "Congestion-driven transmission planning considering the impact of generator expansion," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp 781-789.
- [٥٠] J. H. Zhao, Z. Y. Dong, P. Lindsay, and K. P. Wong, (2009), "Flexible transmission expansion planning with uncertainties in an electricity market," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp 479-488.
- [٥١] R.-A. Hooshmand, R. Hemmati, and M. Parastegari, (2012), "Combination of AC transmission expansion planning and reactive power planning in the restructured power system," *Energy Conversion and Management*, vol. 55, pp 26-35.
- [٥٢] B. Alizadeh and S. Jadid, (2011), "Reliability constrained coordination of generation and transmission expansion planning in power systems using mixed integer programming," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 5, pp 948-960.
- [٥٣] J. Zhao and J. Foster, (2010), "Investigating the impacts of distributed generation on transmission expansion cost: an Australian case study," *Energy Economics and Management Group Working Papers*, vol. 2, pp 108-115.
- [٥٤] D. Osborn and J. Lawhorn, "Midwest ISO transmission planning processes," in *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE, 2009*, pp. 1-5.
- [٥٥] H. Kakuta and H. Mori, "A multi-objective memetic algorithm for probabilistic transmission network expansion planning," in *Systems Man and Cybernetics (SMC), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, pp. 1414-1419.
- [٥٦] Z. M. Al-Hamouz and A. S. Al-Faraj, (2003), "Transmission-expansion planning based on anon-linear programming algorithm," *Applied energy*, vol. 76, pp 169-177.
- [٥٧] L. Bahiense, G. C. Oliveira, M. Pereira, and S. Granville, (2001), "A mixed integer disjunctive model for transmission network expansion," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 16, pp 560-565.

- [۵۸] T. Akbari, A. Rahimikian, and A. Kazemi, (2011), "A multi-stage stochastic transmission expansion planning method," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, pp 2844-2853.
- [۵۹] L. P. Garcés, A. J. Conejo, R. García-Bertrand, and R. Romero, (2009), "A bilevel approach to transmission expansion planning within a market environment," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp 1513-1522.
- [۶۰] L. Xiaotong, L. Yimei, Z. Xiaoli, and Z. Ming, (2012), "Generation and transmission expansion planning based on game theory in power engineering," *Systems Engineering Procedia*, vol. 4, pp 79-86.
- [۶۱] E. Bustamante-Cedeño and S. Arora, (2009) ,(Multi-step simultaneous changes constructive heuristic algorithm for transmission network expansion planning," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, pp 586-594.
- [۶۲] R. Romero and A. Monticelli, (1994), "A hierarchical decomposition approach for transmission network expansion planning," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 9, pp 373-380.
- [۶۳] Y. Dusonchet and A. El-Abiad, (1973), "Transmission planning using discrete dynamic optimizing," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, pp 1358-1371.
- [۶۴] A. M. L. da Silva, L. S. Rezende, L. A. da Fonseca Manso, and L. C. de Resende, (2010), "Reliability worth applied to transmission expansion planning based on ant colony system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32 ,pp 1077-1084.
- [۶۵] Z. Ming, T. Kuo, X. Song, Q. Liu-qing, and D. Jun, (2010), "Chance constrained transmission planning method based on chaos quantum honey bee algorithm," *Power System Protection and Control*, vol. 38, pp 1-7.
- [۶۶] P. S. Georgilakis ,(2010)" ,Market-based transmission expansion planning by improved differential evolution," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32, pp 450-456.
- [۶۷] M. Eghbal, T. K. Saha, and K. N. Hasan, "Transmission expansion planning by meta-heuristic techniques: a comparison of shuffled frog leaping algorithm, PSO and GA," in *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, 2011, pp. 1-8.
- [۶۸] S. Jalilzadeh, A. Kazemi, H. Shayeghi, and M. Madavi, (2008), "Technical and economic evaluation of voltage level in transmission network expansion planning using GA," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp 1119-1125.

- [٢٩] A. Verma, B. Panigrahi, and P. Bijwe, (2010), "Harmony search algorithm for transmission network expansion planning ",*Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 4, pp 663-673.
- [٧٠] M. C. Carmona, R. P. Behnke, and O. Moya, "Transmission Network Expansion Planning by a Hybrid Simulated Annealing Algorithm," in *Intelligent System Applications to Power Systems, 2009 .ISAP'09. 15th International Conference on*, 2009, pp. 1-7.
- [٧١] A. Sadegheih and P. Drake, (2008), "System network planning expansion using mathematical programming, genetic algorithms and tabu search," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp 1557-1566.
- [٧٢] N. Gupta, R. Shekhar, and P. K. Kalra, (2012), "Congestion management based roulette wheel simulation for optimal capacity selection: Probabilistic transmission expansion planning," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, pp 1259-1266.
- [٧٣] H. Mori and H. Kakuta, "A cnsqa-ii based method for multi-objective probabilistic transmission network expansion planning," in *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, 2010, pp. 1-6.
- [٧٤] N. Gubbala and C. Singh, (1995)" ,Models and considerations for parallel implementation of Monte Carlo simulation methods for power system reliability evaluation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10 ,
- [٧٥] L. Wang and C. Singh, "Reliability evaluation of composite power systems using parallel genetic algorithms: Some conceptual and simulation studies," in *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE'09. IEEE/PES*, 2009, pp. 1-7.
- [٧٦] A. Naghizadeh, A. H. Mahvi, H. Jabbari, E. Derakhshani, and H. Amini, (2011), "Exposure assessment to dust and free silica for workers of Sangan iron ore mine in Khaf, Iran," *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, vol. 87, pp 531-538.
- [٧٧] A. Mostafaeipour, A. Sedaghat, A. Dehghan-Niri, and V. Kalantar, (2011), "Wind energy feasibility study for city of Shahrabak in Iran," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp 2545-2556.
- [٧٨] J. Earnest and T. Wizelius, (2011), "*Wind power plants and project development*". PHI Learning Pvt. Ltd., India, pp.495.
- [٧٩] H. R. Zamot, E. O'Neill-Carrillo, and A. Irizarry-Rivera, "Analysis of wind projects considering public perception and environmental impact," in *Power Symposium, 2005. Proceedings of the 37th Annual North American*, 2005, pp. 591-596.

- [^{۸۰}] M. Wolsink, (2000), "Wind power and the NIMBY-myth: institutional capacity and the limited significance of public support," *Renewable energy*, vol. 21, pp 49-64.
- [^{۸۱}] M. Yazdanpanah, N. Komendantova, and R. S. Ardestani, (2015), "Governance of energy transition in Iran: Investigating public acceptance and willingness to use renewable energy sources through socio-psychological model," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp 565-573.
- [^{۸۲}] D. Saeidi, M. Mirhosseini, A. Sedaghat, and A. Mostafaeipour, (2011), "Feasibility study of wind energy potential in two provinces of Iran: North and South Khorasan," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp 3558-3569.
- [^{۸۳}] A. Altunkaynak, T. Erdik, İ. Dabanlı, and Z. Şen, (2012), "Theoretical derivation of wind power probability distribution function and applications," *Applied Energy*, vol. 92, pp 809-814.
- [^{۸۴}] S. Jung, O. A. Vanli, and S.-D. Kwon, (2013), "Wind energy potential assessment considering the uncertainties due to limited data," *Applied energy*, vol. 102, pp 1492-1503.
- [^{۸۵}] S. Grassi, N. Chokani, and R. S. Abhari, (2012), "Large scale technical and economical assessment of wind energy potential with a GIS tool: Case study Iowa," *Energy Policy*, vol. 45, pp 73-85.
- [^{۸۶}] M. Bahrami and P. Abbaszadeh, (2013), "An overview of renewable energies in Iran," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp 198-208.
- [^{۸۷}] P. Alamdari, O. Nematollahi, and M. Mirhosseini, (2012), "Assessment of wind energy in Iran: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp 836-860.
- [^{۸۸}] A. Mostafaeipour, (2010), "Feasibility study of harnessing wind energy for turbine installation in province of Yazd in Iran," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp 93-111.
- [^{۸۹}] A. Mostafaeipour and H. Abarghoeei, (2008) "Harnessing wind energy at Manjil area located in north of Iran," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp 1758-1766.
- [^{۹۰}] A. Keyhani, M. Ghasemi-Varnamkhasti, M. Khanali, and R. Abbaszadeh, (2010), "An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran," *Energy*, vol. 35, pp 188-201.
- [^{۹۱}] "SUNA," (2013). Renewable energies organization of Iran. Available: <http://www.suna.org.ir/fa/aboutorganization/ationoffice/windenergyoffice/windamar>

- [٩٢] N. Eskin, H. Artar, and S. Tolun, (2008), "Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp 839-851.
- [٩٣] A. Ouammi, H. Dagdougui, R. Sacile, and A. Mimet, (2010), "Monthly and seasonal assessment of wind energy characteristics at four monitored locations in Liguria region (Italy)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp 1959-1968.
- [٩٤] K. Mohammadi and A. Mostafaeipour, (2013), "Using different methods for comprehensive study of wind turbine utilization in Zarrineh, Iran," *Energy Conversion and Management*, vol. 65, pp 463-470.
- [٩٥] S. Diaf and G. Notton, (2013), "Technical and economic analysis of large-scale wind energy conversion systems in Algeria," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp 37-51.
- [٩٦] B. Yaniktepe, T. Koroglu, and M. Savrun, (2013), "Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Osmaniye, Turkey," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, pp 703-711.
- [٩٧] A. Mostafaeipour, M. Jadidi, K. Mohammadi, and A. Sedaghat, (2014), "An analysis of wind energy potential and economic evaluation in Zahedan, Iran," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp 641-650.
- [٩٨] M. Mirhosseini, F. Sharifi, and A. Sedaghat, (2011)," Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp 449-459.
- [٩٩] R. Billinton and R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques ",
- [١٠٠] R. N. Allan and Billinton, "Reliability Evaluation of Power Systems ",
- [١٠١] Y. Zhang and A. Chowdhury, "Reliability assessment of wind integration in operating and planning of generation systems," in *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09 .IEEE*, 2009, pp. 1-7.
- [١٠٢] C. Nemes and F. Munteanu, (2010), "Development of reliability model for wind farm power generation," *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, pp 24-29.
- [١٠٣] M.-R. Haghifam and S. Soltani, "Reliability models for wind farms in generation system planning," in *Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th International Conference on*, 2010, pp. 436-441.

- [١٠٤] A. Chowdhury, "Reliability models for large wind farms in generation system planning," in *Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, 2005*, pp. 1926-1933.
- [١٠٥] M.-R. Haghifam and M. Omidvar, "Wind farm modeling in reliability assessment of power system," in *Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006. PMAPS 2006. International Conference on, 2006*, pp. 1-5.
- [١٠٦] Y. He and X. Chen, (2009), "Wind turbine generator systems. The supply chain in China: Status and problems," *Renewable Energy*, vol. 34, pp 2892-2897.
- [١٠٧] W. DeCoursey, (2003), "*Statistics and probability for engineering applications*". Elsevier.
- [١٠٨] R. Billinton and E. Khan, (1992), "A security based approach to composite power system reliability evaluation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 7, pp 65-72.
- [١٠٩] R. Billinton, H. Chen, and R. Ghajar, (1996), "A sequential simulation technique for adequacy evaluation of generating systems including wind energy," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 11, pp 728-734.

Abstract

Nowadays, we have witnessed an increase in the usage rate of wind energy, mainly due to the increasing need of human to energy along with economic and environmental considerations, and has drawn a lot of attention throughout the world. We, therefore, due to the wind farm extension requests and an estimated increase in Khaf's electrical energy demand, here in this thesis, study the extension of Khorasan Electrical transmission system based on system reliability. First to get a sense of the existing possibilities and capacities created from the Electrical Policy Making Company, we study the possibilities and potentials of the area's wind-energy capacities based on the updated data. It is done in a framework with recognition of uncertain factors respect to regional lands situation and calculation of the maximum extractable wind power in the Khaf region. Forasmuch as the large scale presence of wind power in this study, the correlation between wind power and electric load has been checked for the specific buses in Khaf area. In this regard, existing uncertainties in the investment policies of the government and private sectors makes planning's time horizon impossible to determine. To cover and compensate for these uncertainties, various scenarios at different levels of wind farms and grid electric load growth has been developed. Moreover, in order to reduce the uncertainties, a model for wind farms is proposed.

Eventually, the reliability of the Khorasan transmission is scrutinized with special attention to distribution network in the Khaf region in the presence of wind farms. Distribution lines loadings, network configuration and wind farms and their impact on the reliability index have been evaluated.

Keywords

Wind potential assessment, correlation, Weibull function, reliability, wind farm, scenario analysis.



University of Shahrood

Faculty of Electrical Engineering and Robotic

Dissertation Submitted in Partial
Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in
Electrical Engineering

**Transmission Expansion Planning considering
large-scale renewable sources in a sample zone**

The case study of Khaf, Khorasan Razavi province

Khosro Ghaemi

Supervisor:

Dr. Mohsen Assili

September 2015