

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه بیرجند  
دانشکده مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت در حضور نیروگاه بادی و سیستم ذخیره‌ساز انرژی

ابوالفضل صدقی

استاد راهنما:

دکتر مریم رمضانی

استاد مشاور:

دکتر حمید فلقی

تابستان ۱۳۹۲

## تأییدیه هیات داوران

(برای پایان نامه)

یک نسخه اصل فرم مربوطه

## تقدیم

این اثر را به جای تقدیم، متعلق به کسی می‌دانم که مرا الفبای نوشتن آموخت. کسی که بی‌شک بدون زحمت و

حمایت‌های اوسطری از خطوط این پایان‌نامه نگاشته نمی‌شد. **مادرم**،

**حاجیه خانم عذرا عطاری**

**مادر فداکارم؛ که از او ایمان، بخشش، کشاده‌دستی، مهربانی، صبر و امید آموختم.**

## تشکر و قدردانی

فریاد زدیم که چرخ گردون، لیلیا تو نداده ای به مجنون

فریاد بر آمد آن که خاموش، کم داداگر نکمیرد افزون

سپاس آفریدگار زمین و هفت آسمان را که داشته‌هایم را مدیون ذات متعالی‌اش و کاستی‌هایم را از سستی خود می‌دانم. با افتخار زحمات اساتید دوره کارشناسی‌ام در دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد که به اینجانب علاوه بر آموزش مبانی مهندسی الکترونیک، روحیه تلاش، همکاری و آئین برابری و صداقت را آموختند، ارج می‌نهم. از اساتید گروه قدرت دانشگاه بیرجند، دکتر محمدرضا آقابراهیمی، دکتر حمیدرضا نجفی، دکتر محمدعلی شمس‌نژاد، دکتر محسن فرشاد، دکتر محمود عبادیان، دکتر حمید فلقی و دکتر مریم رضائی که دروس دوره کارشناسی ارشد را در محضر آن‌ها گذرانده‌ام، نیز کمال تشکر و قدردانی را دارم. هم‌چنین از همراهی تمامی دوستانم در دانشگاه بیرجند، به‌ویژه دانشجویان کارشناسی ارشد مهندسی قدرت، مهندسین ارجمند رضا غنی‌زاده و محمد مهدی قاسمی‌پور و سرکار خانم زینب سادات بدیعیان سپاسگذارم.

در پایان قدردانی و سپاس بی‌کران خود را به اساتید راهنما و مشاور این پایان‌نامه، سرکار خانم دکتر مریم رضائی و جناب آقای دکتر حمید فلقی تقدیم می‌نمایم. اساتید فرزانه و فرهیخته‌ای که علاوه بر راهنمایی و مشاوره بی‌دریغ در تمامی دو سال دوره کارشناسی ارشد، به اینجانب روحیه پژوهش‌گری، انضباط کاری و نبوغ را آموختند. در تمام مراحل زندگی و هر جای کره خاکی، خود را مدیون محبت‌های این دو بزرگوار می‌دانم.

ابوالفضل صدقی

شهر یورماه یک هزار و سیصد و نود و دو

## چکیده

نگرانی‌های زیست محیطی ناشی از نیروگاه‌های سنتی، رشد تقاضا و محدودیت در منابع سوخت فسیلی موجب رشد به‌کارگیری انرژی باد در سیستم‌های الکتریکی سراسر جهان شده است. بسیاری کشورها قوانین خود را بر مبنای افزایش نفوذ باد در سبد تولید تنظیم کرده‌اند. نفوذ بالای باد می‌تواند موجب افزایش سطح ریسک در قابلیت اطمینان سیستم قدرت شود. سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در کنار نیروگاه‌های بادی می‌توانند موجب کنترل‌پذیر شدن توان خروجی نیروگاه بادی و پیوستگی در عرضه انرژی گردند. پایان‌نامه حاضر بر ارزیابی مزایای بهره‌گیری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی در کنار نیروگاه بادی، روی شاخص‌های قابلیت اطمینان متمرکز است. ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم، با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلوی ترتیبی صورت پذیرفته است. فرآیند ارزیابی شامل شبیه‌سازی توان خروجی سیستم تولید متداول، سرعت باد، توان خروجی نیروگاه بادی و سری‌زمانی شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد. از طرفی استراتژی بهره‌برداری از ذخیره‌ساز انرژی، اثرات متفاوتی بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم دارد. بنابراین شاخص‌های قابلیت اطمینان برای سناریوهای مختلف بهره‌برداری ارزیابی شده‌اند. سناریوهای بهره‌برداری شامل سناریوهای ارائه شده در مطالعات پیشین و سناریوهای جدید پیشنهادی می‌باشد. سناریوهای پیشنهادی بر اساس یک مدل جدید برای سیستم ذخیره‌ساز طراحی شده‌اند. شبیه‌سازی برای محدوده وسیعی از توان نصب شده نیروگاه بادی و ظرفیت‌های مختلف ذخیره‌ساز صورت پذیرفته است. علاوه بر آن، برای محدودیت جذب انرژی باد ابتدا از یک درصد قطعی و سپس از میانگین ساعتی داده‌های تاریخی توان خروجی نیروگاه بادی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی به روش مونت‌کارلوی ترتیبی بر سیستم RBTS مزایای روش پیشنهادی را به وضوح نشان می‌دهد. این نتایج می‌تواند برای بهره‌برداران و طراحان سیستم تولید مورد توجه و استفاده قرار گیرد.

**کلید واژه‌ها:** آرم، سیستم ذخیره‌ساز انرژی، قابلیت اطمینان، نیروگاه بادی، مونت‌کارلوی ترتیبی

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
د	فهرست علایم و نشانه‌ها
و	فهرست جدول‌ها
ح	فهرست شکل‌ها
۱	<b>فصل ۱- مقدمه</b>
۱	۱-۱- پیش‌گفتار
۳	۱-۲- تاریخچه و ضرورت تحقیق
۵	۱-۳- اهداف تحقیق
۶	۱-۴- نوآوری تحقیق
۶	۱-۵- ساختار گزارش
۸	<b>فصل ۲- ارزیابی کفایت سیستم تولید</b>
۸	۲-۱- مقدمه
۹	۲-۲- مدل‌سازی سیستم در روش‌های احتمالاتی
۱۰	۲-۲-۱- مدل تولید
۱۲	۲-۲-۲- مدل بار
۱۴	۲-۲-۳- مدل ریسک سیستم
۱۴	۲-۳- روش‌های ارزیابی کفایت احتمالاتی
۱۴	۲-۳-۱- روش‌های تحلیلی
۱۷	۲-۳-۲- روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو
۱۸	۲-۳-۲-۱- روش نمونه‌برداری حالت
۱۸	۲-۳-۲-۲- روش شبیه‌سازی مونت‌کارلوی ترتیبی
۲۲	۲-۳-۲-۳- هم‌گرایی شبیه‌سازی
۲۳	۲-۴- مروری بر مطالعات پیشین
۲۳	۲-۴-۱- قابلیت اطمینان سیستم در حضور نیروگاه بادی
۲۶	۲-۴-۲- قابلیت اطمینان در حضور نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز انرژی
۲۷	۲-۵- نتیجه‌گیری

فصل ۳ - مدل نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز انرژی در ارزیابی کفایت سیستم تولید.....	۲۸
۱-۳- مقدمه .....	۲۸
۲-۳- مدل‌های سیستم‌های مبدل انرژی باد (WECS).....	۲۹
۱-۲-۳- مدل سرعت باد.....	۲۹
۲-۲-۳- مدل توربین ژنراتور بادی.....	۳۳
۳-۳- مدل ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم تولید، در حضور نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز انرژی.....	۳۶
۴-۳- نتیجه‌گیری .....	۴۰
فصل ۴- نتایج شبیه‌سازی و مطالعات عددی.....	۴۲
۱-۴- مقدمه .....	۴۲
۲-۴- سیستم مورد مطالعه .....	۴۲
۳-۴- شاخص‌های مورد مطالعه .....	۴۳
۴-۴- سناریوهای بهره‌برداری .....	۴۴
۵-۴- ارزیابی قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن درصد قطعی برای محدودیت جذب انرژی باد .....	۵۰
۱-۵-۴- تاثیر ظرفیت نیروگاه بادی.....	۵۱
۲-۵-۴- تاثیر ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی.....	۵۴
۳-۵-۴- اثر درصد محدودیت جذب انرژی باد.....	۵۷
۶-۴- ارزیابی قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن میانگین ساعتی داده‌های تاریخی توان خروجی نیروگاه بادی، برای محدودیت جذب انرژی باد .....	۶۰
۱-۶-۴- تاثیر ظرفیت نیروگاه بادی.....	۶۲
۲-۶-۴- تاثیر ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی.....	۶۵
۷-۴- اثر استراتژی بهره‌برداری بر طول عمر ذخیره‌ساز انرژی .....	۶۸
۸-۴- مقایسه دیدگاه‌های HMWP و $X_w\%$ .....	۷۲
۹-۴- مطالعات عددی بر محدوده‌های مختلف ظرفیت نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز انرژی.....	۷۵
فصل ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....	۸۱
۱-۵- نتیجه‌گیری .....	۸۱
۲-۵- پیشنهادات .....	۸۲
ضمیمه أ - مقالات .....	۸۳
ضمیمه ب - مشخصات سیستم RBTS.....	۸۴



۸۸	.....فهرست مراجع
۹۲	.....واژه نامه فارسی به انگلیسی
۹۶	.....واژه نامه انگلیسی به فارسی

## فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
ضریب پراکندگی	$\alpha$
نرخ خرابی واحد تولید	$\lambda$
نرخ تعمیر واحد تولید	$\mu$
میانگین ساعتی داده‌های تاریخی سرعت باد	$\mu_i$
انحراف معیار ساعتی داده‌های تاریخی سرعت باد	$\sigma_i$
مدل سری زمانی خودهم‌بسته و میانگین متحرک	ARMA
سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری	BESS
عمق دشارژ	DOD
حد پایین ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی	$ES_m$
حد بالای ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی	$ES_M$
سیستم ذخیره‌ساز انرژی	ESS
انرژی مورد انتظار ذخیره‌ساز که واحدهای متداول را پشتیبانی کرده است	EBSC
انرژی مورد انتظار ذخیره‌ساز که نیروگاه بادی را پشتیبانی کرده است	EBSW
انرژی مازاد باد مورد انتظار	ESWE
انرژی باد ذخیره شده در باتری مورد انتظار	EWEB
انرژی باد تولید شده مورد انتظار	EWEG
انرژی باد جذب شده مورد انتظار	EWEU
سطح سلسله مراتبی	HL
میانگین ساعتی داده‌های تاریخی توان خروجی نیروگاه بادی	HMWP
سیستم تست قابلیت اطمینان IEEE	IEEE-RTS
سری زمانی بار سیستم	$L_i$
انرژی از دست رفته مورد انتظار	LOEE
بار از دست رفته مورد انتظار	LOLE
احتمال از دست رفتن منبع تغذیه	LPSP

$MTTF$	متوسط زمان تا خرابی واحد تولید
$MTTR$	متوسط زمان تا تعمیر واحد تولید
RBTS	سیستم تست "روی بیلینتون"
SC	سناریوی بهره‌برداری از ذخیره‌ساز انرژی
$SG_{ci}$	سری زمانی توان مازاد واحدهای متداول
$SG_{wi}$	سری زمانی توان مازاد باد
$SW_t$	سرعت ساعتی باد
$TG_{ci}$	سری زمانی توان خروجی واحدهای تولید متداول
$TG_{wi}$	سری زمانی توان خروجی نیروگاه بادی
WTG	توربین ژنراتور بادی
$X_w\%$	درصد محدودیت جذب باد

## فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

جدول ۱-۴: اثر ظرفیت نیروگاه بادی بر انرژی باد ذخیره شده در باتری مورد انتظار در دیدگاه $X_w\%$ ... ۵۳	۵۳
جدول ۲-۴: اثر ظرفیت نیروگاه بادی بر انرژی مورد انتظار ذخیره‌ساز که نیروگاه بادی را پشتیبانی کرده است در دیدگاه $X_w\%$ ..... ۵۳	۵۳
جدول ۳-۴: اثر ظرفیت نیروگاه بادی بر انرژی مورد انتظار ذخیره‌ساز که واحدهای متداول را پشتیبانی کرده است در دیدگاه $X_w\%$ ..... ۵۴	۵۴
جدول ۴-۴: اثر ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی بر انرژی باد ذخیره شده در باتری مورد انتظار در دیدگاه $X_w\%$ ..... ۵۶	۵۶
جدول ۵-۴: اثر ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی بر انرژی مورد انتظار ذخیره‌ساز که نیروگاه بادی را پشتیبانی کرده است در دیدگاه $X_w\%$ ..... ۵۷	۵۷
جدول ۶-۴: اثر ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی بر انرژی مورد انتظار ذخیره‌ساز که واحدهای متداول را پشتیبانی کرده است در دیدگاه $X_w\%$ ..... ۵۷	۵۷
جدول ۷-۴: اثر $X_w\%$ بر انرژی باد ذخیره شده در باتری مورد انتظار ..... ۵۹	۵۹
جدول ۸-۴: اثر $X_w\%$ بر انرژی مورد انتظار ذخیره‌ساز که نیروگاه بادی را پشتیبانی کرده است ..... ۵۹	۵۹
جدول ۹-۴: اثر $X_w\%$ بر انرژی مورد انتظار ذخیره‌ساز که واحدهای متداول را پشتیبانی کرده است ..... ۶۰	۶۰
جدول ۱۰-۴: اثر ظرفیت نیروگاه بادی بر انرژی باد ذخیره شده در باتری مورد انتظار در دیدگاه HMWP ..... ۶۴	۶۴
جدول ۱۱-۴: اثر ظرفیت نیروگاه بادی بر انرژی مورد انتظار ذخیره‌ساز که نیروگاه بادی را پشتیبانی کرده است در دیدگاه HMWP ..... ۶۵	۶۵
جدول ۱۲-۴: اثر ظرفیت نیروگاه بادی بر انرژی مورد انتظار ذخیره‌ساز که واحدهای متداول را پشتیبانی کرده است در دیدگاه HMWP ..... ۶۵	۶۵
جدول ۱۳-۴: اثر ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی بر انرژی باد ذخیره شده در باتری مورد انتظار در دیدگاه HMWP ..... ۶۷	۶۷
جدول ۱۴-۴: اثر ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی بر انرژی مورد انتظار ذخیره‌ساز که نیروگاه بادی را پشتیبانی کرده است در دیدگاه HMWP ..... ۶۷	۶۷

- جدول ۴-۱۵: اثر ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی بر انرژی مورد انتظار ذخیره‌ساز که واحدهای متداول را پشتیبانی کرده است در دیدگاه HMWP..... ۶۸
- جدول ۴-۱۶: اثر سناریوی بهره‌برداری و ظرفیت نیروگاه بادی بر طول عمر باتری ذخیره‌ساز در دیدگاه  $X_w\%$  ..... ۷۰
- جدول ۴-۱۷: اثر سناریوی بهره‌برداری و ظرفیت نیروگاه بادی بر طول عمر باتری ذخیره‌ساز در دیدگاه HMWP ..... ۷۰
- جدول ۴-۱۸: اثر سناریوی بهره‌برداری و ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی بر طول عمر باتری ذخیره‌ساز در دیدگاه  $X_w\%$  ..... ۷۱
- جدول ۴-۱۹: اثر سناریوی بهره‌برداری و ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی بر طول عمر باتری ذخیره‌ساز در دیدگاه HMWP ..... ۷۱
- جدول ۱-۸۴: مشخصات توان نامی و قابلیت اطمینان واحدهای تولید سیستم RBTS ..... ۸۴
- جدول ۲-۸۵: درصد پیک بار هفتگی نسبت به پیک بار سالانه ( $P_w$ ) ..... ۸۵
- جدول ۳-۸۶: درصد پیک بار روزانه نسبت به پیک بار هفتگی ( $P_d$ ) ..... ۸۶
- جدول ۴-۸۷: درصد پیک بار ساعتی نسبت به پیک بار روزانه ( $P_h(t)$ ) ..... ۸۷

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: تقسیم بندی قابلیت اطمینان.....	۱
شکل ۲-۱: سطوح سلسله مراتبی [۱].....	۲
شکل ۳-۱: مجموع توان بادی نصب شده در سرتاسر جهان [۳].....	۳
شکل ۴-۱: نقشه اطلس میانگین سرعت باد ایران [۱۰].....	۵
شکل ۱-۲: مدل سیستم برای ارزیابی کفایت HL-I [۱].....	۸
شکل ۲-۲: مراحل مفهومی ارزیابی قابلیت اطمینان ظرفیت تولید [۱].....	۱۰
شکل ۳-۲: مدل دو حالتی یک واحد تولید [۱].....	۱۱
شکل ۴-۲: منحنی تداومی بار پریونیت شده.....	۱۲
شکل ۵-۲: مدل بار ساعتی با تسلسل زمانی RBTS.....	۱۳
شکل ۶-۲: روش محاسبه LOLE [۱].....	۱۵
شکل ۷-۲: روش محاسبه LOEE [۱].....	۱۶
شکل ۸-۲: سابقه عملکرد یک واحد تولید متداول.....	۱۹
شکل ۹-۲: سابقه عملکرد اختصاصی واحدها و حالت ظرفیت کل سیستم.....	۲۱
شکل ۱۰-۲: برهم نهی حالت‌های ظرفیت و مدل بار زمانی [۱۷].....	۲۱
شکل ۱۱-۲: هم‌گرایی LOEE.....	۲۳
شکل ۱-۳: میانگین ساعتی سرعت باد برای سایت سوویفت کارنت.....	۳۱
شکل ۲-۳: انحراف معیار ساعتی سرعت باد برای سایت سوویفت کارنت.....	۳۱
شکل ۳-۳: سرعت باد شبیه‌سازی شده یک روز نمونه برای سایت سوویفت کارنت.....	۳۲
شکل ۴-۳: سرعت باد شبیه‌سازی شده یک ماه نمونه، برای سایت سوویفت کارنت.....	۳۲
شکل ۵-۳: سرعت باد شبیه‌سازی شده یک سال نمونه، برای سایت سوویفت کارنت.....	۳۳
شکل ۶-۳: منحنی توان خروجی یک توربین ژنراتور بادی [۱۸].....	۳۴
شکل ۷-۳: توان خروجی یک نیروگاه بادی برای یک ماه نمونه.....	۳۵
شکل ۸-۳: توان خروجی یک نیروگاه بادی برای یک سال نمونه.....	۳۶
شکل ۹-۳: توزیع احتمالاتی توان خروجی شبیه‌سازی شده.....	۳۶
شکل ۱۰-۳: مدل پایه برای سیستم تولید متداول در حضور نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز انرژی [۱۷].....	۳۷

- شکل ۳-۱۱: مدل توسعه یافته سیستم تولید متداول در حضور نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز انرژی [۲].... ۳۸
- شکل ۴-۱: دیاگرام تک خطی سیستم RBTS [۱۳] ..... ۴۳
- شکل ۴-۲: نمایش گرافیکی سناریوی ۱ ..... ۴۵
- شکل ۴-۳: نمایش گرافیکی سناریوی ۲ ..... ۴۵
- شکل ۴-۴: نمایش گرافیکی سناریوی ۳ ..... ۴۶
- شکل ۴-۵: مدل اصلاح شده پیشنهادی برای سیستم ذخیره‌ساز انرژی در کنار نیروگاه بادی ..... ۴۷
- شکل ۴-۶: نمایش گرافیکی سناریوی ۴ ..... ۴۸
- شکل ۴-۷: نمایش گرافیکی سناریوی ۶ ..... ۴۹
- شکل ۴-۸: اثر افزایش ظرفیت نیروگاه بادی بر ESWE تحت  $X_w\%$  های مختلف ..... ۵۰
- شکل ۴-۹: اثر ظرفیت نیروگاه بادی بر LOLE در دیدگاه  $X_w\%$  ..... ۵۱
- شکل ۴-۱۰: اثر ظرفیت نیروگاه بادی بر LOEE در دیدگاه  $X_w\%$  ..... ۵۲
- شکل ۴-۱۱: اثر ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی بر LOLE در دیدگاه  $X_w\%$  ..... ۵۵
- شکل ۴-۱۲: اثر ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی بر LOEE در دیدگاه  $X_w\%$  ..... ۵۵
- شکل ۴-۱۳: تاثیر درصد محدودیت جذب انرژی باد بر LOLE ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۴: تاثیر درصد محدودیت جذب انرژی باد بر LOEE ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۵: HMWP برای یک هفته نمونه ..... ۶۱
- شکل ۴-۱۶: HMWP سالانه برای ظرفیت نیروگاه بادی نصب شده ۲۰ مگاوات ..... ۶۱
- شکل ۴-۱۷: درصد محدودیت جذب انرژی باد ساعتی برای یک هفته نمونه ..... ۶۲
- شکل ۴-۱۸: اثر ظرفیت نیروگاه بادی بر LOLE در دیدگاه HMWP ..... ۶۳
- شکل ۴-۱۹: اثر ظرفیت نیروگاه بادی بر LOEE در دیدگاه HMWP ..... ۶۳
- شکل ۴-۲۰: اثر ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی بر LOLE در دیدگاه HMWP ..... ۶۶
- شکل ۴-۲۱: اثر ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی بر LOEE در دیدگاه HMWP ..... ۶۶
- شکل ۴-۲۲: اثر افزایش ظرفیت نیروگاه بادی بر EWEU و EWEG ..... ۷۳
- شکل ۴-۲۳: مقایسه انرژی باد ذخیره شده در باتری مورد انتظار برای دیدگاه‌های HMWP و  $X_w\%$  ..... ۷۴
- شکل ۴-۲۴: مقایسه LOLE برای دیدگاه‌های HMWP و  $X_w\%$  ..... ۷۵
- شکل ۴-۲۵: اثر تغییر ظرفیت نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز انرژی بر LOLE در دیدگاه  $X_w\%$  ..... ۷۷
- شکل ۴-۲۶: اثر تغییر ظرفیت نیروگاه بادی و  $X_w\%$  بر LOLE ..... ۷۸
- شکل ۴-۲۷: اثر تغییر ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی و  $X_w\%$  بر LOLE ..... ۷۹

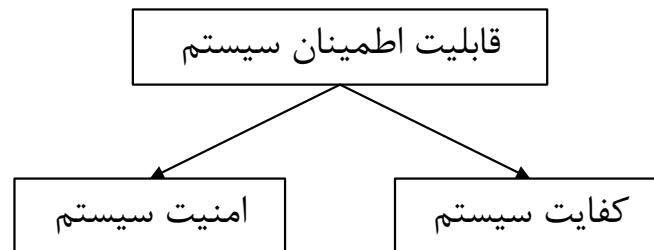
شکل ۴-۲۸: اثر تغییر ظرفیت نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز انرژی بر LOLE در دیدگاه HMWP ..... ۸۰



## فصل ۱ - مقدمه

### ۱-۱- پیش‌گفتار

وظیفه اصلی سیستم قدرت تغذیه مشترکان به اقتصادی‌ترین شکل ممکن؛ با سطح قابل قبول از پیوستگی و کیفیت است [۱]. مردم جوامع مدرن به آسانی نمی‌توانند زندگی بدون حضور الکتریسیته را درک کنند. از این رو انتظار می‌رود تقاضای توان با کیفیت و مطمئن به روند افزایشی خود ادامه دهد. قابلیت اطمینان سیستم قدرت، معیاری جهت بررسی توانایی کلی سیستم در ارضای نیاز انرژی الکتریکی مشترکین است. قابلیت اطمینان سیستم قدرت می‌تواند به دو زیرمجموعه تقسیم شود: کفایت<sup>۱</sup> و امنیت<sup>۲</sup> سیستم [۱]. همان‌طور که در شکل ۱-۱ مشاهده می‌شود قابلیت اطمینان برای بررسی جزئی‌تر عملکرد سیستم به دو بخش تقسیم شده است.



شکل ۱-۱: تقسیم بندی قابلیت اطمینان

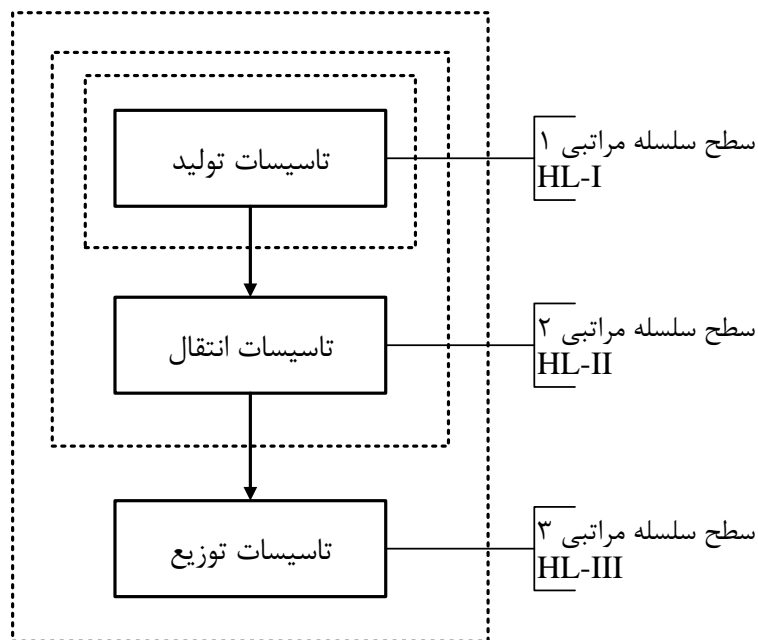
مفهوم کفایت معمولاً به وجود تاسیسات مناسب و کافی در سیستم به منظور مواجهه با نیاز مشترکین است. این تاسیسات شامل تجهیزات تولید انرژی کافی، خطوط انتقال مرتبط و شبکه‌های توزیع مورد نیاز برای تبادل انرژی با نقاط حقیقی بار است. بنابراین کفایت به حالتی از سیستم که در شرایط استاتیکی و بدون وجود اغتشاش‌هاست، مرتبط می‌شود. از طرف دیگر امنیت به توانایی سیستم جهت پاسخ به اغتشاش‌های رخ داده در سیستم، اطلاق می‌شود. بنابراین امنیت به پاسخ سیستم به اغتشاش‌های مربوطه ارتباط دارد. این موارد شرایطی را که موجب تاثیرات محلی و گسترده و از دست دادن بخش عمده تولید و امکانات انتقال می‌باشند را شامل می‌شود [۱].

سیستم‌های قدرت مدرن بسیار پیچیده و یکپارچه‌اند. به همین خاطر آنالیز تمام سیستم قدرت به‌طور هم‌زمان با همه جزئیاتش بسیار سخت و غیرعملی است. با این وجود این امر یک مشکل به حساب نمی‌آید

<sup>1</sup> Adequacy

<sup>2</sup> Security

زیرا کلیت سیستم قدرت را می‌توان به سه ناحیه کاری تولید، انتقال و توزیع تقسیم کرد و محاسبات را برای هر ناحیه به‌طور جداگانه انجام داد. این نواحی کاری در شکل ۱-۲ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱-۲: سطوح سلسله مراتبی [۱]

ارزیابی قابلیت اطمینان سطح سلسله مراتبی<sup>۱</sup> ۱ (HL-I) تنها به تاسیسات تولید مربوط است. در این سطح، توان تولیدی مجموع سیستم (شامل توان ورودی از نواحی دیگر) تعیین و توانایی سیستم برای مواجهه تقاضای بار محاسبه می‌شود. ارزیابی قابلیت اطمینان HL-I معمولاً به‌عنوان ارزیابی کفایت سیستم تولید تعریف می‌شود و تاسیسات انتقال و توزیع در آن لحاظ نمی‌شوند. ارزیابی کفایت در سطح سلسله مراتبی ۲ (HL-II) هم شامل تاسیسات تولید و هم شامل تاسیسات انتقال است. در این سطح توانایی سیستم مرکب<sup>۲</sup> برای تولید و انتقال توان مورد نیاز به نقطه بار جمع‌شده<sup>۳</sup> ارزیابی می‌شود. این آنالیز معمولاً با عبارات ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم مرکب یا ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت عمده<sup>۴</sup> تعریف می‌شود. ارزیابی کفایت در سطح سلسله مراتبی ۳ (HL-III) ارزیابی کلی است که در آن هر سه ناحیه کاری مورد بررسی قرار می‌گیرند. البته عملاً محاسبات برای HL-II انجام می‌گیرد و از نتایج آن برای محاسبات سطح توزیع استفاده می‌شود [۱]. در تحقیق حاضر مطالعات در سطح سلسله

<sup>1</sup> Hierarchical Level

<sup>2</sup> Composite system

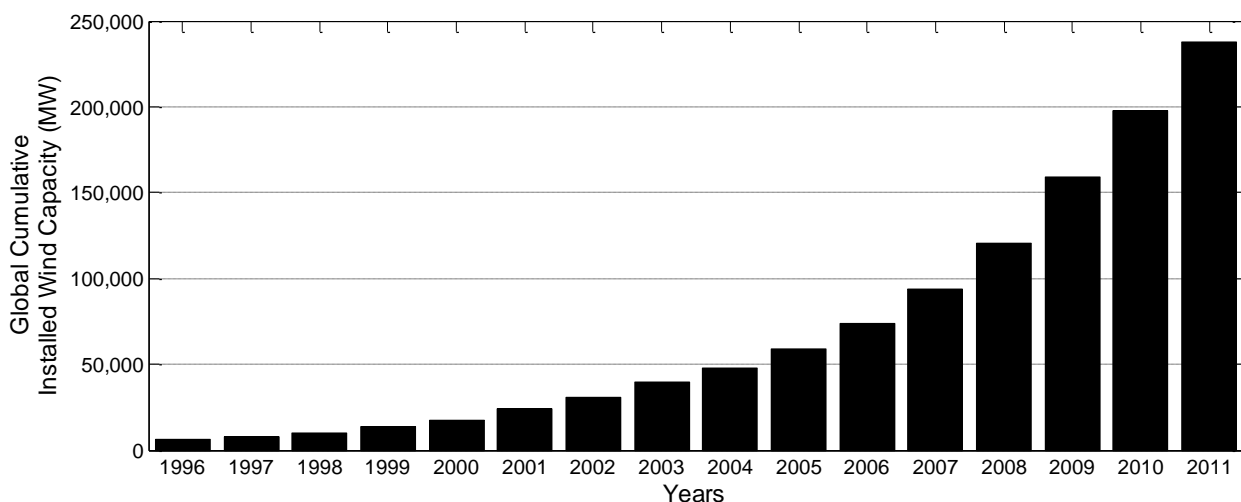
<sup>3</sup> Bulk load point

<sup>4</sup> Bulk power system

مراتبی ۱ انجام شده است و تمرکز اصلی روی مزایای به کارگیری سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در کنار نیروگاه‌های بادی، بر کفایت سیستم تولید متداول است.

## ۱-۲- تاریخچه و ضرورت تحقیق

نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از منابع تولید سنتی، افزایش تقاضای انرژی الکتریکی و محدودیت در ذخایر سوخت‌های فسیلی مانند: ذغال‌سنگ، نفت و گاز طبیعی ایجاب می‌کند تا استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر گسترش یابد [۲]. انرژی باد یکی از سریع‌ترین منابع تجدیدپذیر در حال رشد است. شکل ۱-۳ مجموع توان بادی نصب شده در جهان را برای سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۱ نشان می‌دهد [۳]. بر اساس این شکل مجموع توان بادی نصب شده در جهان طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۱، در حدود ۳۹۰۰ درصد افزایش داشته است.



شکل ۱-۳: مجموع توان بادی نصب شده در سراسر جهان [۳]

همان‌طور که قبلاً بیان شد در بین انواع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از انرژی باد و توسعه نیروگاه‌های بادی بیشترین توجه را در مجامع بین‌المللی جلب کرده است؛ به گونه‌ای که در بعضی کشورها هم‌اکنون باد یک بخش مهم از تولید می‌باشد. به‌عنوان مثال در کشور دانمارک ۲۰ درصد از انرژی الکتریکی تولیدی از طریق باد تامین می‌شود. در سایر کشورها نیز برنامه‌ریزی‌های دقیقی در راستای گسترش استفاده از انرژی باد صورت گرفته است [۴]. انجمن انرژی جهانی<sup>۱</sup> ظرفیت انرژی بادی مجموع جهان را تا سال ۲۰۲۰ حدود ۴۷۴۰۰۰ مگاوات تخمین زده است [۵]. بسیاری کشورها در سراسر جهان

<sup>۱</sup> World Energy Council

سیاست‌های خود را بر اساس توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر بنا نهاده‌اند. پذیرش استاندارد رنیوبل پرتفولیو<sup>۱</sup> (RPS) تعهدی مبنی بر تولید درصد معین از تولید مجموع با منابع تجدیدپذیر را ایجاد می‌کند [۶]. در ایالات متحده آمریکا، ۱۳ ایالت RPS را به‌منظور افزایش ۱۰ تا ۲۰ درصدی توان تجدیدپذیر تا قبل از سال ۲۰۱۰، در قوانین ایالتی خود وارد کرده‌اند. ضوابطی چون فیکسد فید-این-تریفس<sup>۲</sup> در آلمان، دانمارک و اسپانیا [۷] و الزام تجدیدپذیر<sup>۳</sup> در بریتانیا [۸]، این کشورها را ملزم به توسعه انرژی باد می‌کند.

ایران تا سال ۲۰۱۱ میلادی، بار پیک ۴۰۲۳۹ مگاوات و ظرفیت تولید نامی ۶۱۲۰۳ مگاوات داشته است [۹]. از لحاظ ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های بادی، ایران در سال ۲۰۰۹ با ۸۲ مگاوات رتبه سی و هشتم را به‌خود اختصاص داده است و تا انتهای سال ۲۰۱۱ این ظرفیت به ۹۱ مگاوات رسیده است [۳]. ایران دارای تعدادی نیروگاه بادی است که از توربین‌ها بادی مدرن استفاده می‌کنند. در نیروگاه نزدیک منجیل در استان گیلان، ابتدا توربین‌های ۳۰۰ کیلووات و ۵۰۰ کیلووات نوردتانک<sup>۴</sup> کنترل شده توسط اتافک در اواسط دهه ۹۰ میلادی استفاده شد و اخیراً از توربین‌های ۶۰۰ کیلووات وستاس<sup>۵</sup> که به کنترل کننده زاویه پره مجهزند، استفاده شده است. این سایت‌ها، شامل سایت‌های واقع در منجیل، رودبار، هرزوبین و سیاهپوش هستند [۴]. شکل ۱-۴ اطلس میانگین سرعت باد ایران در ارتفاع ۶۰ متری است [۱۰]. پتانسیل باد ایران در حدود ۵۰۰۰۰ مگاوات تخمین زده شده است؛ البته باید توجه داشت برای نقاط با ارتفاع بیش از ۲۰۰۰-۲۵۰۰ متر نصب و بهره‌برداری از توربین‌های بادی (به‌دلیل عمده رقیق بودن هوا) عملاً غیر ممکن است. لذا به‌این ترتیب پتانسیل باد ایران با تکنولوژی موجود به حدود ۱۶۰۰۰ مگاوات تقلیل می‌یابد [۴].

در حال حاضر مهم‌ترین مانع پیش رو در عدم توسعه نیروگاه‌های بادی، نگرانی‌های اقتصادی می‌باشد. بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط شرکت توانیر، صرفه اقتصادی تولید نیروگاه بادی نسبت به تولید گازی در ایران و در یک بازه پانزده ساله به روشنی مشاهده می‌شود [۴]. از این‌رو لزوم توسعه نیروگاه‌های بادی با توجه به پتانسیل بالا و عدم نگرانی در مورد صرفه اقتصادی امری بدیهی است.

<sup>1</sup> Renewable Portfolio Standard

<sup>2</sup> Fixed feed-in-tariffs

<sup>3</sup> Renewable obligation

<sup>4</sup> Nordtank

<sup>5</sup> Vestas