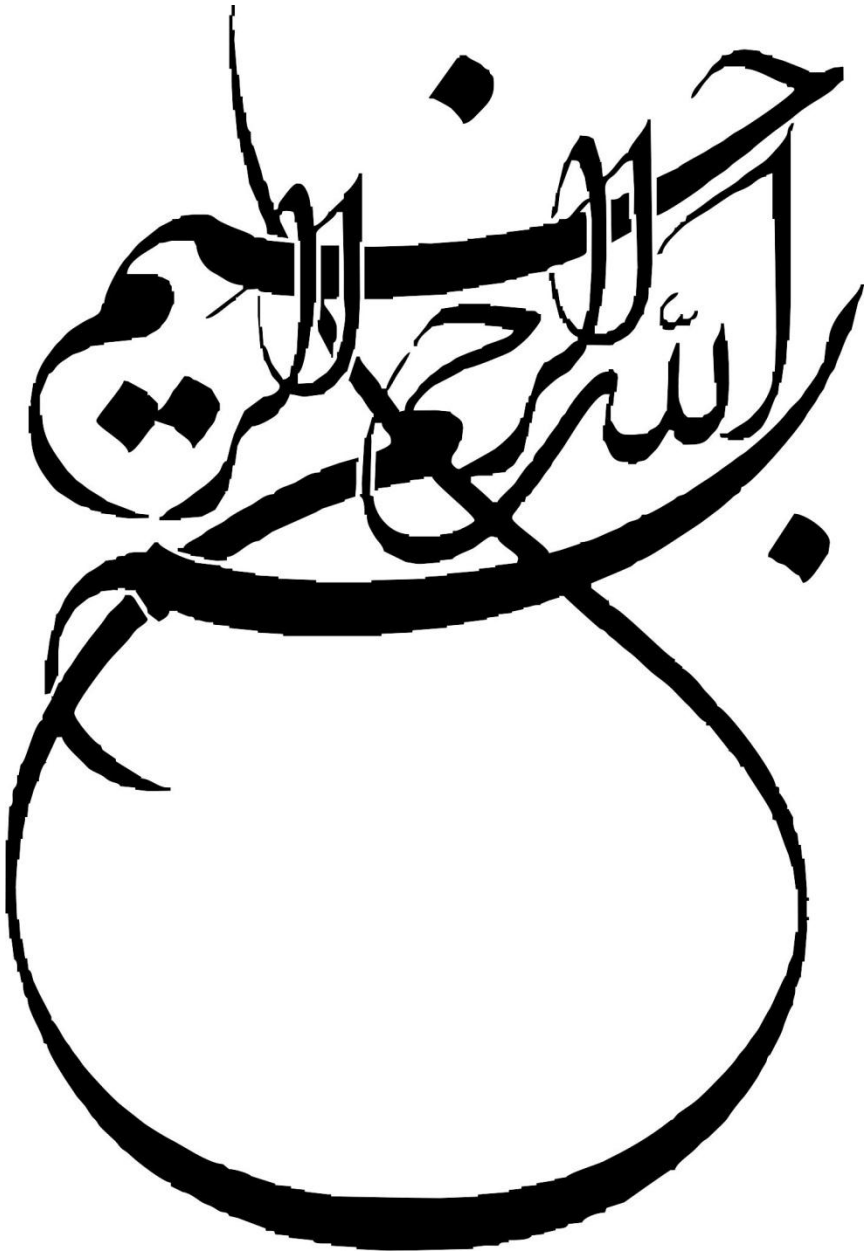
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

شماره پایان نامه :۹۳٤۰۲۰۲۲٦

پایان نامه کارشناسی ارشد برق

گرایش قدرت

عنوان :

بررسی تاثیر اقتصادی مدل پیش‌بینی باد بر خودبرنامه‌ریزی نیروگاه بادی در سیستم‌های قدرت تجدیدساختاریافته

استاد راهنما:

دکترمحسن صنیعی

استاد مشاور:

دکترسعیداله مرتضوی

نگارنده :

حامد ارجمند

تیرماه ۱۳۹۳

فرم۲

باسمه تعالی

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

(نتیجه ارزشیابی پایان نامه ارشد)

پایان نامه آقای حامد ارجمند دانشجوی رشته برق گرایش قدرت

دانشکده مهندسی به شماره دانشجویی۹۰۴۰۲۰۲

با عنوان :

بررسی تاثیر اقتصادی مدل پیش‌بینی باد بر خودبرنامه‌ریزی نیروگاه بادی در سیستم‌های قدرت تجدیدساختاریافته

جهت اخذ مدرک : کارشناسی ارشد در تاریخ : ۱۳۹۳/۴/۱۶ توسط هیأت داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و با درجه عالی تصویب گردید.

۱.	**اعضا ی هیأت داوران :**	**رتبه علمی**	**امضاء**
	استاد راهنما: دکتر محسن صنیعی	**استادیار**	.....
	استاد مشاور : دکتر سعیداله مرتضوی	**دانشیار**	.....
	استاد داور : دکتر محمود جورابیان	**استاد**	.....
	استاد داور : دکتر سید قدرت اله سیف‌السادات	**دانشیار**	.....
	نماینده تحصیلات تکمیلی :دکتر عزیز عظیمی	**استادیار**	.....
۲.	**مدیرگروه : دکتر محمد سروش**	**استادیار**	.....
۳.	**معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده : دکتر علی حقیقی**	**استادیار**	.....
۴.	**مدیرتحصیلات تکمیلی دانشگاه : دکتر عبدالرحمن راسخ**	**استاد**	.....

تشکر و قدردانی

(و یزکیهم و یعلمهم الکتاب و الحکمه)

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و دورد بر محمّد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛

با تشکر و سپاس از تمامی اساتید عزیز و به‌خصوص استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر صنیعی که علاوه بر راهنمایی‌هایشان به بنده درس اخلاق آموخته و با امتنان بیکران از مساعدت‌های استاد عزیزم جناب آقای دکتر مرتضوی، امیدوارم که توانسته باشم بخش کوچکی از زحمات ایشان را پاسخ داده باشم. ضمنا بر خود لازم می‌دانم از جناب آقای دکتر چینی‌پرداز که به کرات مزاحمت‌های بنده را تحمل نموده و در نهایت صبر و خوشرویی سوالات بنده را پاسخ گفته، کمال تشکر و قدردانی را نمایم.

و با تشکر خالصانه از دوستان عزیزم آقایان ایمان گرامی‌مقدم و سیدسعید افشین که در این راه مرا یاری نمودند.

و با تقدیر و درود فراوان خدمت پدر و مادر بسیار عزیز، دلسوز و فداکارم که پیوسته جرعه‌نوش جام تعیلم و تربیت ، فضیلت و انسانیت آنها بوده‌ام و همواره چراغ وجودشان روشنگر راه من در سختی‌ها و مشکلات بوده است.

و در آخر از همسر مهربانم که در این مدت پشتیبان و یاور من بوده صمیمانه تشکر می‌کنم و این کار را به روح مادربزرگ عزیزم تقدیم می‌کنم که در شنیدن خبر شهادت فرزندش جز شکر بر لب نیاورد.

فرم ٤

Abstract

Surname: Arjmand	**Name : Hamed**

Title : The Investigation of Economic Impact of Wind Forecast Model on Wind Power Self Scheduling in Restructured Power Systems.

Supervisor/s: Dr.Mohsen Saniei

Advisor/s: Dr.Saiedolah Mortazavi

Degree: Master of Science

University: Shahid Chamran University of Ahvaz

Faculty:Engineering	**Department : Electrical Engineering**
Graduating Date: 07/07/2014	**Number of Pages:94**

Keywords : wind forecasting – self scheduling – wind power – scenario generation scenario reduction – stochastic programming

Abstract : Wind forecasting is one of the most important challenge in wind power, due to variable and unpredictable nature of wind. On the other hand, an inecrase in wind forecast accuracy leads to decrease in penalty and consequently increase in profit of wind power producers in the electricity market. In this study, the results of four forecasting sets – 24 hours and 6 hours (intra day) for ARMA and SARIMA models – are compared, and impact of forecasting model and horizon on forecast accuracy and profit is investigated. To model uncertainty, wind speed senarios are generated by Time Series models and path-based method. Then wind speed senarios are converted to power senarios by wind to power model and reduced using backward reduction algorithm based on Kantorovich distance to reduce computation time in stochastic programming problem. For each forecast, profit is calculated using reduced senarios as input of stochastic programmng model.

فهرست

۱- مقدمه ۱

۲- تجدید ساختار و جایگاه انرژی‌های تجدیدپذیر ۷

۲-۱- دلایل و انگیزه‌های حرکت به سمت تجدیدساختار ۷

۲-۲- مدل‌های تجدید ساختار ۸

۲-۲-۱- مدل بازار اشتراکی ۹

۲-۲-۲- مدل قراردادهای دوطرفه ۱۰

۲-۲-۳- مدل هایبرید ۱۱

۲-۳- تعریف برخی از مفاهیم بازار برق ۱۲

۲-۳-۱- نقش بهره‌بردار مستقل سیستم ۱۲

۲-۳-۲- بورس توان (PX) ۱۴

۲-۳-۳- قیمت نهایی بازار (MCP) ۱۶

۲-۳-۴- سرویس‌های جانبی (Ancillary Services) ۱۶

۲-۴- جایگاه انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان و نحوه حضور آنها در بازارهای برق ۱۶

۲-۴-۱- دلایل گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر ۱۷

۲-۴-۲- مشکلات پیشروی انرژی‌های تجدیدپذیر ۱۸

۲-۴-۳- اثرات زیست‌محیطی استفاده از سوختهای فسیلی ۱۹

۲-۴-۴- سرمایه‌گذاری در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر ۲۰

۲-۵- سیاست‌های حمایت از گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر ۲۱

۲-۵-۱- یارانه‌های دولتی ۲۱

۲-۵-۲- حمایت‌های مالی ۲۲

۲-۵-۳- حمایت‌های مالیاتی ۲۲
۲-۵-۴- تغییر در قیمت‌ها ۲۲
۲-۶- مدل‌های حمایتی جهت حضور انرژی‌های تجدیدپذیر ۲۳
۲-۶-۱- مدل تعرفه ۲۳
۲-۶-۲- مدل سهم مشخص ۲۴
۲-۶-۳- مدل Net Metering ۲۵
۲-۶-۴- اجرای برخی سیاست‌های مرتبط با بازار ۲۶
۳- مبانی نظری پژوهش ۲۸
۳-۱- سری زمانی ۲۸
۳-۱-۱- فرآیند "میانگین متحرک" ۲۹
۳-۱-۲- فرآیند "خودبازگشتی" ۲۹
۳-۱-۳- فرآیند مرکب"خودبازگشتی- میانگین متحرک" ۲۹
۳-۱-۴- فرآیند "میانگین متحرک تلفیق شده با خودبازگشتی" ۳۰
۳-۱-۵- الگوی فصلی باکس- جنکینس ۳۰
۳-۲- تولید سناریو ۳۱
۳-۲-۱- مروری بر روش‌های تولید سناریو: ۳۱
۳-۳- روش‌شناسی ابزار درخت سناریو: ۳۳
۳-۳-۱- روش‌شناسی مدل‌های ابزار درخت سناریو ۳۴
۳-۳-۲- مدل خطای پیش‌بینی سرعت باد ۳۴
۳-۳-۳- متدولوژی برای یک ایستگاه اندازه گیری منفرد ۳۴
۳-۳-۴- همبستگی خطاهای پیش‌بینی سرعت باد ۳۶

۳-۳-۵- مدل تبدیل متراکم سرعت به توان ۳۷
۳-۳-۶- مدل کاهش سناریو ۴۰
۳-۳-۷- کاهش سناریو ۴۱
۳-۳-۸- مثال ۴۳
۴- روش انجام پژوهش ۴۷
۴-۱- الگوریتم تولید سناریو ۴۸
۴-۲- تبدیل سناریوهای سرعت به توان ۵۰
۴-۳- کاهش سناریو ۵۲
۴-۴- فاصله احتمال برای کاهش سناریو ۵۳
۴-۵- الگوریتم کاهش سناریو ۵۴
۴-۶- برنامه‌ریزی احتمالی و تحلیل اقتصادی ۵۶
۵- نتایج شبیه‌سازی و بحث ۵۸
۵-۱- پیش‌بینی ۲۴ ساعته با الگوی ARMA (۱,۱) ۶۲
۵-۲- پیش‌بینی ۲۴ ساعته با الگوی SARIMA $(1,1,1)(0,1,0)_{.8}$ ۶۶
۵-۳- پیش‌بینی شش ساعته با الگوی ARMA (۱,۱) ۷۰
۵-۴- پیش‌بینی شش ساعته با الگوی SARIMA $(1,1,1)(0,1,0)_{.8}$ ۷۳
۵-۵- برنامه‌ریزی احتمالی ۷۴
۵-۶- جمع‌بندی و تحلیل اقتصادی ۷۸
۶- نتیجه‌گیری ۸۲
۷- پیوست ۸۵
۷-۱ بخشی از برنامه‌های نوشته شده ۸۵
مراجع ۸۷

فهرست اشکال

شکل ۲-۱: چگونگی عملکرد Net Metering ۲۶
شکل ۳-۱: چهار مثال خطای پیش‌بینی سرعت باد از خروجی‌های ARMA(1,1) با پارامترهای α=۰/۹۵، β=۰/۰۲ و zσ ۳۵
شکل ۳-۲: همبستگی بین خطاهای پیش‌بینی برای ایستگاه‌های مختلف. فاصله ایستگاه‌ها (کیلومتر) ۳۷
شکل ۳-۳: مثالی از نمودارهای توان بادی نرمالیزه شده برای توربین‌های منفرد و چندتایی [۵۰] ۳۹
شکل ۳-۴: نمودار درخت سناریوی استفاده شده در "مدل بازار مشترک" ۴۱
شکل ۳-۵: درخت سناریوی اصلی با ۱۰ سناریو ۴۴
شکل ۳-۶: درخت سناریو پس از حذف سناریوهای ۳ و ۴ ..... ۴۶
شکل ۴-۱: مراحل کلی استفاده شده از پیش‌بینی تا محاسبه درآمد ۴۷
شکل ۴-۲: فلوچارت الگوریتم تشریح شده تولید سناریو ۴۹
شکل ۴-۳: نمودار نقطه‌ای سرعت-توان برای یک توربین نمونه با ظرفیت ۵۰۰۰ kW ۵۲
شکل ۴-۴: فلوچارت الگوریتم تشریح شده کاهش سناریو ۵۵
شکل ۵-۱: توزیع داده‌های ساعتی سرعت باد در هشت سال ۵۹
شکل ۵-۲: نمودار خودهمبستگی داده‌های سرعت باد ۶۰
شکل ۵-۳: نمودار خودهمبستگی جزیی داده‌های سرعت باد ۶۰
شکل ۵-۴: نمودار سرعت وزش باد در ۱۲۰ ساعت گذشته و داده‌های واقعی سرعت باد در ۲۴ ساعت آینده ۶۱
شکل ۵-۵: منحنی سرعت-توان برای توربین Nordex N80/2500 ..... ۶۲
شکل ۵-۶: توزیع سناریوهای سرعت برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته ARMA ۶۳

شکل ۵-۷: توزیع سناریوهای توان برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته ARMA ۶۴
شکل ۵-۸: ارزیابی توزیع سناریوهای توان قبل و بعد از کاهش برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته ARMA ۶۴
شکل ۵-۹: سناریوهای توان قبل و بعد از کاهش برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته ARMA ۶۵
شکل ۵-۱۰: توزیع سناریوهای سرعت برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته SARIMA ۶۷
شکل ۵-۱۱: توزیع سناریوهای توان برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته SARIMA ۶۷
شکل ۵-۱۲: ارزیابی توزیع سناریوها قبل و بعد از کاهش برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته SARIMA ۶۸
شکل ۵-۱۳: سناریوهای توان قبل و بعد از کاهش برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته SARIMA ۶۸
شکل ۵-۱۴: توزیع سناریوها برای چهار پیش‌بینی شش ساعته ARMA ۷۰
شکل ۵-۱۵: توزیع کل سناریوهای سرعت برای پیش‌بینی شش ساعته ARMA ۷۱
شکل ۵-۱۶: ارزیابی سناریوهای توان قبل و بعد از کاهش برای پیش‌بینی شش ساعته ARMA ۷۲
شکل ۵-۱۷: سناریوهای توان قبل و بعد از کاهش برای پیش‌بینی شش ساعته ARMA ۷۲
شکل ۵-۱۸: سمت چپ: توزیع سرعت. سمت راست: توزیع توان و ارزیابی کاهش سناریو ۷۳
شکل ۵-۱۹: سناریوهای توان قبل و بعد از کاهش برای پیش‌بینی شش ساعته SARIMA ۷۴
شکل ۵-۲۰: قیمت انرژی در ساعات مختلف ۷۶
شکل ۵-۲۱: مقایسه پیشنهادات بهینه پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته ARMA و SARIMA ۷۶

شکل ۵-۲۲: مقایسه پیشنهادات بهینه پیشبینی‌های شش و ۲۴ ساعته ARMA ۷۷
شکل ۵-۲۳: مقایسه پیشنهادات بهینه پیشبینی‌های شش و ۲۴ ساعته SARIMA ۷۸
شکل ۵-۲۴: جریمه اختصاص یافته به هر پیش‌بینی در ساعات مختلف ۸۰
شکل ۵-۲۵: درآمد کل ۲۴ ساعت به ازای هر پیش‌بینی ۸۱
شکل ۵-۲۶: درصد زیان اقتصادی کل برای ۲۴ ساعت ۸۱
شکل ۷-۱: برنامه کاهش سناریو ۸۵
شکل ۷-۲: برنامه تبدیل سرعت-توان با مشخصات توربین ۸۶
شکل ۷-۳: برنامه تبدیل سرعت-توان توسط جدول تبدیل ۸۶

فهرست جداول

جدول ۲-۱: میزان مصرف اکسیژن و تولید CO_2 هنگام سوختن یک تن ماده سوختنی ۱۹
جدول ۲-۲: سرمایه‌گذاری در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر ۲۰
جدول ۳-۱: سناریوهای داده شده ۴۴
جدول ۳-۲ ماتریس فاصله برای درخت اصلی ۴۵
جدول ۳-۳: ماتریس فاصله پس از حذف سناریوی ۳ ..... ۴۶
جدول ۵-۱: نتایج بدست آمده در فرایند کاهش سناریو برای ساعت اول پیش‌بینی ۲۴ ساعته SARIMA ۶۹
جدول ۵-۲: پیشنهادات ارائه شده برای مدل‌های پیش‌بینی مختلف ۷۵
جدول ۵-۳: جرایم اختصاص یافته به هر کدام از مدل‌های پیش‌بینی ۷۹

چکیده

نام خانوادگی : ارجمند	نام: حامد	شماره دانشجویی : ۹۰٤۰۲۰۲

عنوان پایان نامه : بررسی تاثیر اقتصادی مدل پیش‌بینی باد بر خودبرنامه‌ریزی نیروگاه بادی در سیستم‌های قدرت تجدیدساختاریافته

استاد راهنما: دکتر محسن صنیعی

استاد مشاور: دکتر سعیدالله مرتضوی

درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: برق	گرایش: قدرت
دانشگاه : شهید چمران اهواز	دانشکده: مهندسی	گروه : برق

تاریخ فارغ التحصیلی : ۱۳۹۳/٤/۱٦ **تعداد صفحه: ۹٤**

کلید واژه ها : پیش‌بینی باد - خودبرنامه‌ریزی – نیروگاه بادی – تولید سناریو - کاهش سناریو برنامه‌ریزی احتمالی

چکیده: یکی از مهم‌ترین چالش‌های نیروگاه‌های بادی، پیش بینی باد می‌باشد، چرا که باد دارای ماهیتی متغیر و غیر قابل پیش‌بینی بوده، و افزایش دقت در پیش‌بینی باد منجر به کاهش جریمه و درنتیجه افزایش سود برای مالکان نیروگاه بادی در بازار برق می‌شود. در این پژوهش، نتایج چهار پیش-بینی ۲۴ ساعته و ۶ ساعته (درون روزی) مدل‌های ARMA و SARIMA با هم مقایسه شده و میزان افزایش دقت و سود ناشی از مدل و افق پیش بینی بررسی شده است. برای مدلسازی عدم‌قطعیت، سناریوهای باد از مدل سری‌های زمانی و روش مسیرپایه تولید شده‌اند. این سناریوها پس از تبدیل به سناریوهای توان توسط منحنی سرعت- توان توربین بادی، به وسیله الگوریتم کاهش عقب گرد بر اساس فاصله کانترووِیچ به تعداد معینی کاهش داده شده‌اند تا از پیچیدگی محاسباتی در مساله برنامه‌ریزی احتمالی جلوگیری شود. نهایتا با قرار دادن سناریوهای کاهش یافته در یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی، میزان درآمد برای هر پیش بینی محاسبه شده و با هم مقایسه شده‌اند.

فصل اول

۱– مقدمه

سال‌های متمادی صنعت برق در هر سه بخش تولید، انتقال و توزیع تحت اختیار یک شرکت و به‌صورت یکپارچه و انحصاری اداره می‌شد. این شرکت‌ها که عموما دولتی بودند، مسئول فراهم آوردن انرژی‌الکتریکی و انتقال آن به مصرف کننده‌ها بودند. بهره‌برداری و کنترل چنین سیستمی در طول سال‌ها با موفقیت همراه بوده است. هدف اصلی بهره‌بردار در چنین سیستم‌هایی کمینه‌کردن هزینه کل سیستم با توجه به محدودیت‌های سیستم بود. علی‌رغم اینکه به نظر می‌رسید اینگونه بهره‌برداری، کنترل و برنامه‌ریزی سیستم در طول سال‌ها خوب جواب داده است صنعت برق به سمت یک پروسه تبدیل و تجدید ساختار حرکت نمود. به‌طوریکه از اواخر دهه ۱۹۸۰، ساختار کلی صنعت برق تغییرات سریع و غیرقابل بازگشتی داشته است. این تغییرات شکل جدیدی به صنعتی که برای مدت‌زمان قابل توجهی کاملا پابرجا و برطرف‌کننده خواسته‌های عامه مردم بود، داده است. قدم اول در فرآیند تجدیدساختار صنعت برق جداسازی فعالیت‌های سیستم انتقال از فعالیت‌های تولید برق بود و قدم بعدی ایجاد زمینه لازم برای رقابت بین تولیدکنندگان و فراهم آوردن شرایط بازارگونه در این صنعت بوده است. این حرکت به سمت ایجاد بازار رقابتی توان الکتریکی را

معمولا با عناوینی همچون سازماندهی مجدد صنعت برق[1] و یا حذف محدودیت‌های قانونی صنعت برق[2] نامگذاری می‌کنند[۱].

از طرف دیگر، با توجه به تلاش‌های صورت‌گرفته در زمینه تولید انرژی الکتریکی از انرژی‌های تجدیدپذیر به خصوص باد، نحوه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت در حال تغییر می‌باشد. در سال‌های اخیر تولید انرژی بادی در کشورهای اتحادیه اروپا به خصوص در دانمارک، آلمان و اسپانیا به شکل قابل ملاحظه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌شده است[۲]. برنامه‌ریزی‌های زیادی برای افزایش سهم تولید انرژی بادی در کشورهای اروپایی[۳]، ایرلند[۴]، بریتانیا[۵] و ایالات متحده[۶] انجام شده است. در اروپا برای افزایش این‌گونه انرژی‌ها جهت کاهش CO_2 و صرفه‌جویی در سوخت، سیاست‌های تشویقی قرار داده شده است که منجر به رشد قابل‌توجه انرژی‌های تجدیدپذیر شده است[۷].

اما با این وجود، جایگزینی نیروگاه‌های معمولی با نیروگاه‌های تجدیدپذیر مانند باد، که دارای ماهیت متغیر و غیرقابل پیش‌بینی دقیق می‌باشد، خود بوجودآورنده چالش‌های جدیدی در زمینه‌ی بهره‌برداری می‌باشد. در سیستم‌هایی که سهم انرژی باد قابل‌توجه می‌باشد، مدیریت عدم اطمینان باد به وسیله پیش‌بینی هر چه صحیح‌تر باد حائز اهمیت فراوانی می‌باشد. برنامه‌ریزی احتمالی[3] با سناریوهای ورودی یک راه رسیدن به این هدف است.

با وجود اینکه نیروگاه‌های بادی هزینه‌ای برای انرژی باد نمی‌پردازند، ولی در عوض برای خطای پیش‌بینی تولید به واحد نیروگاهی جرائمی تعلق می‌گیرد. در نتیجه هر چه این پیش‌بینی‌ها دقیق‌تر باشد، از میزان این جرائم کاسته می‌شود و طبق این پیش‌بینی‌ها، برنامه‌ریزی نیروگاه جهت حضور در بازار شکل می‌گیرد. به‌همین دلیل بهره‌بردار نیروگاه بادی باید با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت پیش‌بینی باد، به‌گونه‌ای در بازار حضور نماید که

---

[1] Power System Restructuring

[2] Power System Deregulating

[3] stochastic scheduling

میـزان جـرایم مـرتبط بـا عـدم‌تعـادل و خطـای پـیش‌بینـی کمینـه گـردد. یـک راهکـار معمـول، استفاده از برنامه‌ریزی احتمالی بـرای برنامـه‌ریـزی تولیـد نیروگـاه‌هـای بـادی اسـت. در ایـن مسـاله، توزیـع احتمـال تولیـد نیروگـاه بـه وسـیله تعـدادی از سـناریوهای سـری زمـانی نمـایش داده مـی-شود که هر کـدام از ایـن سـناریوها بـه تناسـب احتمـال وقـوع هرکـدام، وزن‌دار شـده‌انـد. در اغلـب موارد، هزینه‌های بهره‌برداری بـرای هـر کـدام از شـاخه‌هـای درخـت سـناریو محاسـبه مـی‌شـود[۸]، هر چند که هدف اصلی، هزینه مورد انتظار کـل درخـت‌هـای سـناریو اسـت کـه بایـد حـداقل شـود. به عنوان مثـال، پـروژه ویلمـار[1] یـک مـدل برنامـه‌ریـزی احتمـالی را بـرای یکپارچـه‌سـازی نیروگـاه بـادی در یـک سیسـتم بـزرگ آزاد بـرق، ارائـه مـی‌کنـد[۹]. ایـن مـدل، قـبلا بـرای مطالعـه فوایـد نحوه عملکرد برنامـه‌ریـزی احتمـالی در مقایسـه بـا نحـوه عملکـرد برنامـه‌ریـزی قطعـی و همچنـین تاثیر عدم قطعیت‌ها با افزایش فرکانس برنامه‌ریزی چرخان[2] استفاده می‌شد[۱۰].

در زمینه پیش‌بینی باد مقالات زیادی در سال‌های اخیر ارائه شده است که این روش‌های پیش-بینی عمدتا یا بر پایه روش‌های سری زمانی[۱۱] می‌باشد و یا اگر مدل بـه شـکل غیـرخطـی باشـد از شبکه عصبی[۱۲] استفاده می‌شود. در [۱۳] برای به‌دست‌آوردن یک تـابع توزیـع احتمـال مناسـب از خطای پیش‌بینی باد، یک الگوریتم غیرمستقیم براساس تابع توزیع احتمـال بتـا ارائـه شـده اسـت، در حالی‌که توزیع خطای پیش‌بینی باد معمولا به شکل گاوسی در نظر گرفته مـی‌شـود و همچنـین یـک سیستم ذخیره‌کننده انرژی برای کاهش خطای پیش‌بینی در نظر گرفته شده است. در [۱۴] یک مدل مختلط بر پایه توزیع برای تقریب زدن توزیع خطای پیش‌بینی ارائه شده است. سپس این مـدل بـرای تخمین جرائم جهت شرکت در بازارهای برق کوتاه مدت بکار گرفته شده است. تعدادی از مقالات نیـز تاثیر این پیش‌بینی‌ها را بر روی تعهدات واحد بررسی نموده‌اند. در [۱۵] یک مدل بهینه خطی مختلط

[1] WILMAR(Wind Power Integration in Liberalised Electricity Markets)
[2] rolling planning

عدد صحیح برای برنامه‌ریزی احتمالی طبق پیش‌بینی‌ها به عنوان پارامترهای با عدم قطعیت ارائه شده است. این مدل در ترکیب برنامه‌ریزی تصمیمات واحد و کنترل توسط پیش‌بینی‌های به‌روز شده منحصر به فرد است. برنامه‌ریزی‌های واحد به شکل پیوسته با در دسترس قرارگرفتن پیش‌بینی‌ها به‌روز می‌شود [۱۶]. در [۱۷] بر روش‌های "ابزار درخت سناریو"ی (STT) که به پیش‌بینی‌های مورد نیاز شبیه‌سازی توان بادی اعمال شده است تمرکز شده است و همچنین تعیین میزان تقاضا برای رزرو را مورد بررسی قرار داده است. در [۱۸] یک فرمولاسیون موثر برای مسئله برنامه‌ریزی احتمالی واحد ارائه شده است که برای استفاده در شبیه‌سازی‌های برنامه‌ریزی یک سیستم قدرت تک‌شینه به کار می‌رود. مزیت روش ارائه‌شده این است که از ساختار درخت سناریوی برپایه چارک استفاده می‌کند که از نیاز به رزروهای خارجی جلوگیری می‌کند.

در مرجع [۱۹] تاثیر اقتصادی پیش‌بینی غیردقیق قیمت بر خودبرنامه‌ریزی چند شرکت تولیدی بررسی شده است. از آنجا که قیمت نیز مانند سرعت باد دارای ماهیت متغیر و غیرقطعی بوده، لذا پیش‌بینی غیردقیق آن می‌تواند زیان اقتصادی برای شرکت‌های تولیدی به بار بیاورد. در مرجع مذکور، ارزش اقتصادی بهبود پیش بینی قیمت در مساله خودبرنامه‌ریزی شرکت تولیدی ارائه شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که زیان اقتصادی مربوط به یک مجموعه پیش‌بینی قیمت، می‌تواند برای تولیدکنندگان مختلف دارای نتایج کاملا متفاوتی باشد . ضمنا یک مدل پیش‌بینی با داشتن خطاهای کاملا بیشتر بر اساس معیار MAPE[1]، ممکن است در مقایسه با مدل‌های دیگر، همیشه به زیان اقتصادی کاملا بیشتر منجر نشود. علاوه بر این، معیارهای متداول خطا از جمله MAPE و MAE[2] همیشه برای انتخاب نوع مدل پیش‌بینی کارامد نیستند، به خصوص هنگامی‌که سطوح

[1] Mean Absolute Percent Error

[2] Mean Absolute Error

خطای مدل‌ها نزدیک باشند. به عبارت دیگر، همیشه یک مدل با MAPE بالاتر منجر به زیان اقتصادی کمتر نمی شود. در عوض ثابت شده است که دیگر پارامترهایی که برپایه بهره‌برداری تعریف می‌شوند، برای مثال شاخص زیان اقتصادی یا ELI[1] برای استفاده به عنوان پایه برای انتخاب مدل پیش‌بینی قابل اطمینان‌تر است.

در مرجع [۲۰]، سعی شده است که تاثیر مشخصات آماری خطای پیش‌بینی به خصوص "درجه اوج در نمودار آماری[2]" و "چولگی[3]" بر روی UC بررسی شود. از این‌رو، دو مورد شبیه سازی اجرا شده است. مورد اول به این منظور است که مشخص نماید که کدام مشخصه آماری خطای پیش بینی باد به شکل تاثیر گذاری به بهره برداری سیستم قدرت کمک می‌کند. به عبارت دیگر صرف‌نظر کردن از یک مشخصه آماری به چه میزان بر بهره-برداری تاثیر می‌گذارد. مورد دوم نشان می دهد که عدم دقت در کدام مشخصه آماری خطای پیش بینی، بر بهره برداری و عملکرد سیستم قدرت تاثیر بیشتری می گذارد. شبیه-سازی‌ها بیان می‌کند همان‌طور که انتظار می رود، واریانس بیشترین تاثیر را دارد اما نتایج همچنین نشان می دهد که اگر چولگی به اطلاعات خطا اضافه شود، درجه اوج نیز باید برای کاهش هزینه سیستم اضافه شود. برهم کنش واریانس، چولگی و درجه اوج استفاده و تعهدات واحد را تغییر می‌دهد. بویژه معرفی واریانس، چولگی و درجه اوج می‌تواند بر وابستگی تعهدات به واحدهای انعطاف پذیر و اینکه کجا استفاده می‌شود تاثیر می‌گذارد. اضافه بر این، ارائه دقیق مشخصات خطای باد می‌تواند بر سهم بهینه واحدهای انعطاف‌پذیر در سیستم قدرت داده‌شده و همچنین بر تعیین بهینه رزرو تاثیر بگذارد.

خودبرنامه‌ریزی یک نیروگاه بادی شامل مراحل مختلفی از جمله پیش‌بینی باد، تولید سناریوهای سرعت باد، تبدیل سناریوهای سرعت به توان، کاهش سناریوها و برنامه ریزی

---

[1] Economoc Loss Index

2 kurtosis

3 skewness

احتمالی طبق سناریوهای بدست آمده است. در این پژوهش، سیر کامل مراحل ذکر شده به تفصیل انجام شده است. مرحله پیش‌بینی باد با استفاده از مدل‌های سری زمانی انجام پذیرفته و با استفاده از روش برپایه مسیر سناریوهای سرعت تولید شده‌اند. سپس این سناریوها با کمک منحنی تبدیل سرعت-توان به سناریوهای توان تبدیل شده و به منظور جلوگیری از پیچیدگی محاسباتی سناریوها براساس فاصله کانترووییچ به تعداد دلخواهی کاهش داده شده‌اند. در عین حال سعی شده است مشخصات آماری این سناریوها به صورت نسبی حفظ شود. سناریوهای کاهش داده شده به منظور ارائه پیشنهادات بهینه در بازار در مدل برنامه ریزی احتمالی قرار گرفته و پارامترهای اقتصادی از جمله درآمد مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در راستای بررسی تاثیر اقتصادی مدل پیش‌بینی بر خودبرنامه ریزی نیروگاه بادی، با توجه به مدل و افق پیش‌بینی، برای دو مدل مختلف از سری‌های زمانی الگوهای پیش‌بینی ۲۴ ساعته و شش ساعته در این پژوهش ارائه شده است. مراحل ذکر شده خودبرنامه‌ریزی برای هر کدام از این الگوها به صورت مجزا و کامل انجام شده و نهایتا این چهار الگو با هم مقایسه شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل بعد، نگاهی کلی به مفاهیم تجدیدساختار داشته و به بررسی جایگاه انرژی-های تجدیدپذیر خواهیم پرداخت. در فصل سوم، مبانی نظری لازم برای انجام پژوهش ازجمله مباحث مربوط به سری‌های زمانی، تولید سناریو، تبدیل سناریوی سرعت به توان، کاهش سناریو و ... تشریح شده و سیر کلی انجام کار مشخص شده است. در فصل چهارم روش استفاده شده در این پژوهش تشریح و برای هر بخش الگوریتم مربوطه ارائه شده است. فصل پنجم حاوی نتایج مربوط به چهار شبیه‌سازی مختلف انجام شده است که به تفکیک ارائه شده و در نهایت با هم مقایسه شده‌اند. نهایتا در فصل ششم به جمع بندی موضوعات پرداخته و نتایج حاصل از این پژوهش بررسی شده است.

فصل دوم

۲– تجدید ساختار و جایگاه انرژی‌های تجدیدپذیر

سازماندهی مجدد صنعت برق در اواخر دهه ۱۹۸۰ در شیلی و انگلستان آغاز شد و به کشورهای آمریکای لاتین هم‌چون آرژانتین گسترش یافت. این روند در سال‌های ۱۹۹۰ با شتابی بیش‌تر و با شکل‌های متفاوت در ایالات متحده، استرالیا، کشورهای اسکاندیناوی و تعدادی از کشورهای آسیایی ادامه یافت. عوامل متعددی ازجمله پیشرفت‌های فناوری، تغییر در گرایش‌های سیاسی و اعتقادی، وجود اشکال در برخی قوانین نظارتی، تعرفه‌های بالا، ضعف مدیریتی، فشار تجاری جهانی، رشد گرایش‌های طرفدار طبیعت و کمبود منابع لازم برای سرمایه‌گذاری در کشورهای در حال توسعه، به شکل یک تمایل و حرکت جهانی با این روند سازماندهی نوین همراه گردید.

۲–۱– دلایل و انگیزه‌های حرکت به سمت تجدیدساختار

مزایای تجدید ساختار صنعت برق را به‌طور خلاصه می‌توان در موارد زیر بیان نمود.

الف) **ایجاد رقابت**: شکل‌گیری بازار برق موجب ایجاد رقابت بین تولیدکنندگان در امر تامین توان الکتریکی می‌شود.

ب) **نوآوری**: طرح انحصاری نمی‌توانست انگیزه لازم را برای ایجاد نوآوری فراهم نماید.