بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه صنعتی اصفهان**
دانشکده برق و کامپیوتر

# تأثیر شرایط بهره‌برداری منابع تولید پراکنده در برآورد قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت

**سید مصطفی هاشمی طغرالجردی**

استاد راهنما
**دکتر اکبر ابراهیمی**

**۱۳۸۷**

**دانشگاه صنعتی اصفهان**
دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق - قدرت آقای سید مصطفی هاشمی

تحت عنوان

# تأثیر شرایط بهره‌برداری منابع تولید پراکنده در برآورد قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع

در تاریخ ۱۳۸۷/۱۲/۲۱ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

| | |
|---|---|
| ۱- استاد راهنمای پایان‌نامه | دکتر اکبر ابراهیمی |
| ۲- استاد مشاور پایان‌نامه | دکتر حمیدرضا کارشناس |
| ۳- استاد داور | دکتر مهدی معلم |
| ٤- استاد داور | دکتر محمد اسماعیل همدانی گلشن |
| سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده | دکتر علی‌محمد دوست حسینی |

**کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.**

## تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که حمد کلید یادش و سبب افزونی فضلش و دلیل شناخت نعماتش است. سپاس خدای را که باب احتیاج را از همه سوی بر بندگانش بست؛ مگر به سوی خودش! و سپاس خدای را که کس سپاس فضل و کرمش نتواند:

از دست و زبان که بر آید　　کز عهده شکرش به در آید

پس از حمد و ثنای خداوند، بر خود واجب می‌دانم از خانواده عزیزم بخصوص پدر و مادر مهربانم بخاطر زحمات بی‌دریغشان و دعای خیرشان که همواره بدرقه راهم بوده و همسر عزیزم که امیدبخش زندگی‌ام گردید صمیمانه تشکر نمایم. از استاد راهنمای صبور و بزرگوارم جناب آقای دکتر اکبر ابراهیمی که انجام این پایان‌نامه با هدایت و راهنمایی‌های ارزنده ایشان میسر گردید صمیمانه متشکرم. از آقای دکتر حمید رضا کارشناس که مشاوره این پایان‌نامه را متقبل شدند و آقایان دکتر مهدی معلم و دکتر محمد اسماعیل همدانی گلشن که زحمت داوری آن را بر عهده گرفتند قدردانی می‌نمایم. برای اساتید بزرگوارم آقایان دکتر جعفر سلطانی، دکتر سید محمد مدنی، دکتر محمد ابراهیمی، دکتر سید مرتضی سقائیان نژاد و سایر اساتید گرانقدری که توفیق شاگردیشان نصیبم گردید آرزوی توفیق روز افزون دارم. همچنین از زحمات و راهنمایی‌های جناب آقای دکتر علی‌محمد دوست‌حسینی سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده و سرکار خانم نکوئی کمال تشکر را دارم. از کلیه دوستان عزیزی که دوران خوشی را در کنار آنها گذراندم و افتخار آشنایی با آنها را داشتم متشکرم و از خداوند متعال سلامتی و بهروزی همه آنان را خواستارم.

در نهایت از شرکت برق منطقه ای اصفهان که حمایت مالی این پایان نامه را عهده دار شدند تشکر می‌نمایم.

و من الله التوفیق

سید مصطفی هاشمی

اسفندماه ۱۳۸۷

تقدیم به محضر یار؛

باشد که مقبول افتد...

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


فهرست مطالب ..... هشت
چکیده ..... ۱
**فصل اول: مقدمه** ..... ۲

**فصل دوم: منابع تولید پراکنده**

۲-۱ تعریف تولید پراکنده ..... ۸
۲-۱-۱ ظرفیت تولید ..... ۹
۲-۱-۲ سطح ولتاژ اتصال به شبکه ..... ۹
۲-۱-۳ نوع منبع انرژی مورد استفاده ..... ۹
۲-۲ منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر ..... ۱۰
۲-۳ بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده ..... ۱۱
۲-۳-۱ منابع تولید پراکنده در حالت اتصال به شبکه ..... ۱۲
۲-۳-۲ منابع تولید پراکنده در حالت عدم اتصال به شبکه ..... ۱۳
۲-۴ انواع منابع تولید پراکنده ..... ۱۳
۲-۴-۱ سلولهای خورشیدی ..... ۱۴
۲-۴-۲ سلولهای سوختی ..... ۱۷
۲-۴-۳ میکروتوربین‌ها ..... ۲۱
۲-۴-۴ توربین‌های بادی ..... ۲۵

**فصل سوم: مفاهیم کلی در برآورد قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت**

۳-۱ مفاهیم قابلیت اطمینان ..... ۳۳
۳-۲ مدلسازی عملکرد تصادفی سیستم ..... ۳۵
۳-۳ کاربرد توزیع های احتمال در ارزیابی قابلیت اطمینان ..... ۳۷
۳-۳-۱ توزیع یکنواخت ..... ۳۸
۳-۳-۲ توزیع نمایی ..... ۳۸
۳-۳-۳ توزیع ویبال ..... ۳۹
۳-۴ سطوح قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت ..... ۴۰
۳-۵ شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع ..... ۴۱
۳-۵-۱ شاخص‌های مربوط به قطعی‌های مشترکین ..... ۴۲

۳-۵-۲ شاخص‌های مربوط به بار ..... ۴۳
۳-۶ روشهای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم های قدرت ..... ۴۴
۳-۶-۱ روش‌های تحلیلی ..... ۴۵
۳-۶-۲ روش‌های شبیه‌سازی ..... ۴۶

**فصل چهارم: برآورد قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع با منابع تولید پراکنده قطعی**

۴-۱ ساختار شبکه‌های توزیع ..... ۴۷
۴-۲ دسته‌بندی منابع تولید پراکنده از نظر شرایط تولید و بهره‌برداری ..... ۴۸
۴-۲-۱ منابع تولید پراکنده قطعی-دائمی ..... ۴۹
۴-۲-۲ منابع تولید پراکنده قطعی-غیر دائمی ..... ۵۰
۴-۲-۳ منابع تولید پراکنده با تولید غیر قطعی ..... ۵۱
۴-۳ مدل‌سازی بار در محاسبات قابلیت اطمینان شبکه توزیع دارای منبع تولید پراکنده ..... ۵۱
۴-۴ محاسبه فرکانس و مدت‌زمان قطع بار ..... ۵۴
۴-۴-۱ ماتریس اتصال ..... ۵۶
۴-۴-۲ محاسبه فرکانس و مدت زمان قطعی برای منابع تولید پراکنده قطعی-دائمی ..... ۵۸
۴-۴-۳ محاسبه فرکانس و مدت زمان قطعی برای منابع تولید پراکنده قطعی-غیردائمی ..... ۶۱
۴-۴-۴ محاسبه قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع بدون منابع تولید پراکنده ..... ۶۳
۴-۵ نتایج شبیه‌سازی ..... ۶۴
۴-۵-۱ معرفی شبکه تست ..... ۶۴
۴-۵-۲ محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه توزیع در غیاب منابع تولید پراکنده ..... ۶۶
۴-۵-۳ محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان در حضور منابع تولید پراکنده قطعی-دائمی ..... ۶۹
۴-۵-۴ محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان در حضور منابع تولید پراکنده قطعی-غیر دائمی ..... ۸۰

**فصل پنجم: برآورد قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع با منابع تولید پراکنده غیر قطعی**

۵-۱ شبیه سازی مونت کارلو ..... ۸۷
۵-۱-۱ تولید اعداد تصادفی ..... ۹۰
۵-۱-۲ تولید متغیر های تصادفی ..... ۹۰
۵-۱-۳ مراحل شبیه سازی مونت کارلو ..... ۹۲
۵-۱-۴ معیارهای توقف شبیه سازی ..... ۹۳
۵-۲ کاربرد شبیه سازی مونت کارلو در ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع ..... ۹۳
۵-۳ ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه توزیع با منابع تولید پراکنده غیر قطعی ..... ۹۶
۵-۴ الگوریتم پیشنهادی برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه توزیع با منابع تولید پراکنده غیر قطعی ..... ۱۰۰

۵-۵ نتایج شبیه‌سازی ..... ۱۰۱
**فصل ششم: جمع‌بندی و پیشنهادات** ..... ۱۰۹
**مراجع** ..... ۱۱۳

## چکیده

با تجدید ساختار سیستم‌های قدرت، استفاده از منابع تولید پراکنده بعنوان یکی از راههای موثر تأمین انرژی الکتریکی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. این منابع می‌توانند زمینه‌ساز تعامل تولید کنندگان خرد در بازارهای برق باشند و در صورت استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر نیز منافع زیست‌محیطی فراوانی را فراهم آورند. از آنجا که منابع تولید پراکنده معمولاً به شبکه‌های توزیع متصل می‌گردند که محل وقوع بیشترین خطاهای منجر به قطع برق مشترکین است، مطالعه و ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع با وجود این منابع ضرورت می‌یابد. در این پایان‌نامه ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه توزیع در شرایط بهره‌برداری متفاوت از انواع منابع تولید پراکنده مورد بررسی قرار گرفته است و روشی برای برآورد قابلیت اطمینان در حضور منابعی که میزان تولید معین و امکان اتصال دائمی و یا موقت به شبکه را دارا هستند پیشنهاد شده است. روش مذکور بر اساس تعریف ماتریس اتصال و در نظر گرفتن منحنی ساعتی بار بوده و دقت آن با روش‌های شبیه‌سازی قابل مقایسه است. همچنین برای انجام این برآورد در شبکه‌های توزیع دارای توربین‌های بادی که منابعی با تولید غیر قطعی به حساب می‌آیند الگوریتمی بر اساس مدل‌سازی تصادفی میزان تولید و با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو ارائه شده است. محاسبه شاخص‌های استاندارد شبکه توزیع در یک سیستم تست نمونه و تحلیل آنها مبین کارآیی و دقت این روش‌ها در ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه در شرایط مختلف بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده است.



واژه‌های کلیدی: ۱- قابلیت اطمینان ۲- شبکه توزیع ۳- منابع تولید پراکنده ۴- روش تحلیلی ۵- شبیه‌سازی مونت کارلو

# فصل اول
## مقدمه

ارزیابی قابلیت اطمینان ابتدا در ارتباط با صنایع هوا ـ فضا و کاربردهای نظامی شکل گرفت؛ اما سریعاً توسط صنایعی مانند صنایع هسته ای که تضمین های امنیتی شدیدی در مورد آنها لازم است و همچنین سیستم‌هایی که توقف آنها خسارت های بزرگ مالی را در پی دارد مورد توجه قرار گرفت. امروزه شیوه های ارزیابی قابلیت اطمینان که اصولاً بر محور ارزیابی احتمال خطر استوار هستند در تمامی زمینه هایی که نقض عملکرد موجب اثرات سوء اقتصادی- اجتماعی می گردد مورد توجه می‌باشند. اگر چه برآورد کیفی قابلیت اطمینان سیستم‌ها از طرق قضاوت‌های مهندسی می‌تواند در مواردی مفید واقع شود، اما برآورد کمی از قابلیت اطمینان امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. این ارزیابی‌ها نقش مهمی در طراحی بهینه سیستم و پیش‌بینی عملکرد آینده آن ایفا می کنند. به طور کلی تعاریف مختلفی برای قابلیت اطمینان سیستم ها قابل طرح است که متداول ترین آن احتمال عملکرد رضایتبخش سیستم تحت شرایط کاری مشخص و برای مدت زمانی معین می‌باشد. واضح است که تنها بخشی از این مفهوم جنبه محاسباتی داشته و شاخص ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها محسوب می گردد و بنابراین مفاهیم مهندسی نیز نقش مهمی در برآورد قابلیت اطمینان دارند. در نهایت می‌توان گفت که هدف از محاسبات قابلیت اطمینان سیستم بدست آوردن معیاری در ارزیابی عملکرد آن سیستم است که مشخص کننده شکست و یا موفقیت آن در اهداف مربوطه خواهد بود. این معیارها معمولاً در ضرایب و یا شاخص‌های قابلیت اطمینان خلاصه می گردد. اگرچه معمولاً شاخص کلاسیک قابلیت اطمینان سیستم‌ها میزان وقوع از کارافتادگی در آنها می‌باشد، اما بسته به نوع سیستم والزامات آن شاخص های دیگری نیز مورد استفاده قرار می گیرند. بنابراین قابلیت اطمینان به عنوان یک نام عمومی برای بسیاری از این شاخص ها بکار می‌رود.

قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت از دیرباز به عنوان یکی از مهمترین مشخصه‌های عملکرد وبرآورد آن عاملی کلیدی برای طراحی و توسعه این سیستم‌ها به شمار می‌آید. در گذشته قابلیت اطمینان سیستم های قدرت بیشتر در سطح تولید و انتقال مورد مطالعه قرار می‌گرفت و محاسبه آن در شبکه‌های توزیع کمتر مورد توجه بوده است. از جمله دلایل این مسئله می‌توان به حجم بالای سرمایه‌گذاری در بخش‌های تولید و انتقال نسبت به سیستم توزیع اشاره کرد. همچنین این مطلب نیز حائز اهمیت است که رخداد قطعی در سیستم‌های تولید و انتقال می‌تواند تعداد زیادی از مشترکین را تحت تأثیر قرار دهد. با مطرح شدن خصوصی سازی در سیستم‌های قدرت و بوجود آمدن بازارهای رقابتی برق، قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع از اهمیت بیشتری برخوردار شده است. این شبکه‌ها بخش مهمی از سیستم‌های قدرت هستند که انرژی الکتریکی تولیدی را از سیستم‌های انتقال دریافت کرده و به مشترکین می‌رسانند و در واقع نقطه اتصال نهایی بین سیستم قدرت و مشترکین را فراهم می‌کنند. شبکه‌های توزیع به دلایل گوناگونی از جمله گستردگی و ساختار معمولاً شعاعی و در معرض خرابی بودن تجهیزات بدلیل شرایط خاص مداری، محل وقوع بیشترین رخدادهای خطا و منجر به بیشترین قطعی بار مشترکین هستند. بدیهی است که در صورت قابل اعتماد نبودن این سیستم‌ها، ضررهای فراوانی هم به مشتریان و هم به شرکت های توزیع وارد می‌آید که این مسئله اهمیت مطالعات قابلیت اطمینان در شبکه های توزیع را به خوبی مشخص می‌کند.

شبکه‌های توزیع را می‌توان به دو بخش عمده سیستم اولیه و سیستم ثانویه تقسیم کرد. سیستم ثانویه سیستم توزیعی است که ولتاژ آن برابر ولتاژ مصرف کننده است و سیستم اولیه نیز تغذیه کننده سیستم ثانویه می‌باشد. سیستم‌های توزیع بسته به نوع و میزان مصرف و بطور کلی بر اساس نوع نیاز می‌توانند آرایش‌های مختلفی بخود بگیرند که هر کدام از این شبکه ها از نظر قابلیت اطمینان متفاوت خواهند بود. بدیهی است چنانچه سیستم مطمئن‌تری مد نظر باشد ساختار پیچیده تری را بایستی انتخاب نمود. با این وجود عمدتاً شبکه های توزیع به صورت شعاعی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. از جمله دلایل این مسئله می‌توان به مشکلاتی اشاره کرد که در صورت شعاعی نبودن شبکه در تنظیمات مربوط به رله‌های حفاظتی رخ می‌دهد.

در روشهای بهره‌برداری سنتی از سیستم‌های قدرت، چندین ژنراتور با ظرفیت تولید زیاد کل تولید مورد نیاز سیستم را تأمین می‌کردند. بارهای مختلف به شبکه‌های توزیع متصل می‌شدند و تولید ژنراتورها توسط خطوط انتقال به این بارها می‌رسید. در سالهای اخیر که مصرف انرژی الکتریکی بسیار افزایش یافته است، لازم است تا سیستم‌های تولید، شبکه‌های انتقال و شبکه‌های توزیع نیز به همان نسبت گسترش یابند تا تقاضای انرژی الکتریکی برآورده شود. افزایش ظرفیت شبکه‌های انتقال و توزیع در بسیاری از مکانها بسیار سخت و در بعضی موارد غیر ممکن است و هزینه زیادی نیز در بر دارد. یکی از راه‌حلهایی که برای این مشکل پیشنهاد شده است استفاده از منابع تولید پراکنده[1] می‌باشد. این منابع تولیدی به مراتب کمتر از واحدهای متداول دارند و معمولاً به شبکه‌های توزیع متصل می‌شوند. استفاده از شبکه های با منابع تولید پراکنده علاوه بر آن که باعث افزایش ظرفیت تولید شبکه می گردد و افزایش تقاضا را برآورده می کند ، شرایط بهره‌برداری مناسبی نیز در شبکه ایجاد می‌کند. مطالعات سازمانهای مختلف جهانی بر رشد سریع منابع تولید پراکنده دلالت دارند[۱].

[1] Distributed Generation(DG)

منابع تولید پراکنده می‌توانند به شبکه متصل و در تأمین بار آن سهیم شوند. با این کار علاوه بر تأمین محلی بار مورد نیاز، امکان انتقال و فروش انرژی اضافی تولیدی به شبکه وجود دارد. علاوه بر آن برخی از این منابع می‌توانند بصورت جدا از شبکه نیز مورد بهره‌برداری قرار گیرند و امکان برق‌رسانی به مناطق دور از شبکه‌های سراسری که ممکن است کشیدن خط انتقال صرفه اقتصادی نداشته باشد را فراهم سازند. همچنین این منابع می‌توانند در حالت کار عادی به شبکه متصل باشند؛ اما در هنگام وقوع خطا در شبکه بالادست با رعایت تمهیداتی به تأمین انرژی مورد نیاز بارهای جدا شده از شبکه بپردازند. در صورتی که منبع تولید پراکنده مورد استفاده ظرفیت تولید کافی داشته باشد، بدلیل تأمین برق اضطراری در هنگام بروز خطا قابلیت اطمینان سیستم بهبود قابل توجهی پیدا می‌کند.

یکی از مهمترین مسائلی که در بحث قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع مطرح است امکان بازیابی بارها در هنگام رخداد خطا در شبکه بالادست می‌باشد. در صورتی که این امکان برای منابع تولید پراکنده وجود داشته باشد که به‌صورت جدا از شبکه کار کنند قابلیت اطمینان سیستم می‌تواند بهبود چشمگیری پیدا کند. با توجه به اینکه ظرفیت منابع تولید پراکنده و همچنین روش‌های بهره‌برداری از آنها با واحدهای تولیدی متداول تفاوت اساسی دارد، تعیین میزان انرژی الکتریکی که بصورت اضطراری می‌تواند توسط این منابع به شبکه تزریق شود بسیار مهم است. همچنین میزان بار و آرایش شبکه در هنگام رخداد خطا نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در منطقه تحت بازیابی دارد. بنابراین لازم است که هر کدام از این موارد در محاسبات قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع با منابع تولید پراکنده لحاظ گردند.

در این پایان نامه منابع تولید پراکنده از نظر تولید و بهره‌برداری به سه دسته تقسیم شده‌اند که این سه دسته عبارتند از:

۱ -منابع تولید پراکنده‌ای که امکان تولید قطعی و با دسترسی دائم را دارا هستند.

۲ -منابع تولید پراکنده‌ای که تولید قطعی اما با دسترسی غیر دائم دارند.

۳ منابع تولید پراکنده‌ای که تولید غیر قطعی دارند.

از جمله مهمترین منابع تولید پراکنده‌ای که در شبکه‌های توزیع به‌کار گرفته می‌شوند و در دسته اول قرار می‌گیرند منابعی هستند که انرژی اولیه آنها از طریق سوخت فراهم می‌شود. با توجه به قیمت انرژی الکتریکی، قیمت سوخت و اهداف نصب، می‌توان سه حالت کاری پیک، آماده‌به‌کار و کارکرد دوگانه را برای منابع این دسته برشمرد. هدف از نصب منابع تولید پراکنده‌ای که در هنگام پیک مصرف مورد استفاده قرار می‌گیرند بدست آوردن سود در بازارهای برق می‌باشد[۲-۵]. منابع تولید پراکنده‌ای که به صورت آماده به‌کار نصب می‌شوند معمولاً به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان سیستم و کاهش نرخ قطع بار مصرف‌کنندگان در هنگام رخداد خطا مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. معمولاً این منابع هزینه تولید بالایی داشته و به همین دلیل در حالت کار عادی سیستم به تولید توان نمی‌پردازند[۶]. حالت کاری دیگر منابع این دسته بهره‌برداری به هر دو صورت پیک و آماده‌به‌کار می‌باشد. در این حالت منابع تولید پراکنده‌ای که در حالت پیک مصرف به تولید برق می‌پردازند در زمانهای غیر پیک نیز بواسطه قراردادهای مابین صاحبان آنها و گردانندگان شبکه و یا شرکت‌های توزیع به عنوان واحدهای آماده به‌کار مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند[۷].

دسته دوم منابع تولید پراکنده منابعی هستند که تولید قطعی اما با دسترسی غیر دائم دارند. این منابع بدلیل محدودیت‌هایی که دارند نمی‌توانند در تمامی ساعات به تولید برق بپردازند؛ اما در طی مدت‌زمانی که امکان استفاده از آنها وجود دارد میزان تولید آنها مقدار مشخصی است. از جمله مهمترین منابع تولید پراکنده‌ای که می‌توانند در این دسته جای بگیرند واحدهای تولید برق خورشیدی هستند که بدلیل تغییرات کم انرژی دریافت شده از خورشید، تولید آنها در طول روز قطعی در نظر گرفته می‌شود.

از جمله مهمترین منابع تولید پراکنده‌ای که در دسته سوم جای می‌گیرند و تولید آنها دارای عدم قطعیت است توربین‌های بادی هستند. عدم قطعیت تولید منابع بدین معنی است که زمان بهره‌برداری و میزان تولید آنها از قبل مشخص نیست و بستگی به عواملی دارد که کنترل آنها در اختیار ما قرار ندارد. میزان تولید توربین‌های بادی بطور عمده وابسته به سرعت باد است که مقدار آن حتی می‌تواند صفر نیز باشد. بنابراین بدیهی است که تولید این منابع مقدار قطعی ندارد.

در روش‌های تحلیلی که به منظور محاسبه قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار می‌گیرند معمولاً عدم قطعیتی در عوامل دخیل در محاسبات در نظر گرفته نمی‌شود. در این روش‌ها نرخ خطا مقدار مشخصی دارد و میزان تولید نیز اگرچه ممکن است متغیر باشد، اما با مقدار قطعی منظور می‌گردد. در صورتی که امکان وارد کردن عدم قطعیت در محاسبات وجود داشته باشد، پیچیدگی محاسبات بالا می‌رود و دقت محاسبات نیز کاهش خواهد یافت. توجه به این نکته ضروری است که عدم قطعیت تولید با تولید متغیر تفاوت اساسی دارد. در واقع تولید متغیر با وجود متفاوت بودن میزان آن، در هر لحظه از زمان مقداری مشخص و قابل پیش‌بینی دارد؛ در حالیکه منابع دارای عدم قطعیت در هر لحظه از زمان می‌توانند تولیدی متفاوت و غیر قابل پیش‌بینی داشته باشند. عدم قطعیت در میزان تولید منبع باعث می‌گردد که منطقه تحت بازیابی متغیر باشد و حتی در طی مدت زمان رخداد خطا در شبکه بالادست نیز دستخوش تغییر گردد. در مطالعاتی که وارد کردن عدم قطعیت منابع تولید پراکنده اجتناب ناپذیر است معمولاً از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای محاسبه قابلیت اطمینان استفاده می‌شود[۸-۱۵].

در این پایان‌نامه به‌منظور محاسبه قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع با منابع تولید پراکنده قطعی روشی تحلیلی ارائه شده است. همچنین با توجه به مباحث مطرح شده در مورد قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع دارای منابع تولید پراکنده غیر قطعی لازم است که از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده گردد. به این منظور الگوریتمی بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو پیشنهاد شده است که برای محاسبات قابلیت اطمینان شبکه توزیع با منابع غیر قطعی به‌کار گرفته شده است. روش ارائه شده کلی بوده و از آن می‌توان برای محاسبه قابلیت اطمینان شبکه های توزیع با منابع تولید پراکنده قطعی نیز استفاده کرد.

مدل کردن بار در محاسبات قابلیت اطمینان شبکه توزیع با منابع تولید پراکنده نقش تعیین کننده‌ای دارد. ساده ترین و عمومی‌ترین حالت در لحاظ نمودن توان مصرفی و بار در شبکه توزیع، در نظر گرفتن متوسط مصرف است. در روش‌های تحلیلی محاسبات قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع بدون منابع تولید پراکنده نیز معمولاً از بار متوسط استفاده می‌شود[۱۶-۲۱]. در مورد شبکه‌های توزیع با منابع تولید پراکنده محاسبات قابلیت اطمینان تفاوت اساسی با شبکه‌های بدون این منابع دارد. در واقع میزان تأثیر منابع تولید پراکنده بر قابلیت اطمینان شبکه توزیع ارتباطی

تنگاتنگ با ناحیه تحت بازیابی در هنگام رخداد خطا در شبکه بالادست دارد و این ناحیه علاوه بر نحوه بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده و میزان تولید آنها به میزان بار سکشن‌ها نیز بستگی دارد. بدلیل پاره‌ای محدودیت‌ها در روش تحلیلی محاسبه قابلیت اطمینان شبکه توزیع با منابع تولید پراکنده به منظور بازیابی سکشن‌ها معمولاً از اطلاعات بار پیک سالیانه استفاده می‌شود[۲۲-۲۸]. این کار می‌تواند دقت نتایج را با اشکال جدی مواجه کند. در این پایان‌نامه روشی پیشنهاد شده است که بر مبنای آن نقاط مختلف منحنی بازیابی بار که دارای عملکرد قابلیت اطمینان یکسانی هستند دسته‌بندی شده و سپس با استفاده از محاسبه احتمال رخداد آنها به محاسبه قابلیت اطمینان سیستم پرداخته خواهد شد.

به طور کلی دو عامل عدم تأمین توان توسط شبکه‌های بالادست و همچنین رخداد خطا در شبکه توزیع می‌تواند باعث رخداد قطعی مشترکین شبکه توزیع گردد. اگرچه قابلیت اطمینان شبکه توزیع به صورت جدا از شبکه‌های تولید و انتقال محاسبه می‌گردد، اما لازم است که امکان وارد کردن خطای این شبکه‌ها در روش‌های محاسبات قابلیت اطمینان شبکه توزیع وجود داشته باشد. بدیهی است در صورتی که شاخص‌های قابلیت اطمینان بدون در نظر گرفتن خطای سیستم‌های تولید و انتقال محاسبه گردند در واقع شاخص‌های واقعی مربوط به مشتریان مورد محاسبه قرار نگرفته است. این مسئله در مورد شبکه‌های توزیع با منابع تولید پراکنده نیز حائز اهمیت است و با توجه به پیچیدگی که در محاسبات قابلیت اطمینان این شبکه‌ها وجود دارد ارائه روشی که امکان وارد کردن خطای شبکه‌های بالادست در آن وجود داشته باشد بسیار مهم خواهد بود. علاوه بر این توجه به وجود ساختارهای گوناگون منابع تولید پراکنده و شرایط گوناگون تولید، لازم است که علاوه بر امکان وارد کردن خطای شبکه بالادست در محاسبات، احتمال خطای منابع تولید پراکنده نیز در هنگام بازیابی بارها در نظر گرفته شود. این مسئله به جامعیت و دقت روش ارائه شده کمک شایانی می‌نماید.

روند ارائه مطالب در این پایان‌نامه بصورت زیر می‌باشد:

فصل دوم به معرفی منابع تولید پراکنده اختصاص دارد. در این فصل ابتدا به معرفی تعاریف مختلف این منابع می‌پردازیم. سپس منابع تجدیدپذیر و تجدید ناپذیر انرژی معرفی شده و مزایا و محدودیت‌های استفاده از این منابع به اجمال مورد بررسی قرار خواهد گرفت. قسمت عمده این فصل نیز به معرفی منابع تولید پراکنده مهم مورد استفاده در شبکه‌های توزیع اختصاص دارد و توربین های بادی، میکروتوربینها، سلولهای سوختی و سلولهای خورشیدی مورد بررسی قرار می‌گیرند. علاوه بر آن نحوه اتصال این منابع به شبکه نیز به صورت مختصر بررسی خواهد شد.

فصل سوم به مفاهیم قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت اختصاص دارد. در این فصل ابتدا مفاهیم قابلیت اطمینان به همراه توابع توزیع احتمال مهم و نحوه مدلسازی رفتار تصادفی سیستم مورد بحث قرار می‌گیرد. همچنین رده‌های سلسله‌مراتبی محاسبات قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت معرفی گردیده و شاخص‌های مهم این رده‌ها با تکیه بر شاخص‌های استاندارد شبکه توزیع تعریف خواهند شد. روش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی محاسبه قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت نیز به طور اجمال بررسی می‌شوند.

فصل چهارم به برآورد قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع با منابع تولید پراکنده قطعی اختصاص دارد. در این فصل ابتدا به دسته‌بندی منابع تولید پراکنده از نظر شرایط تولید خواهیم پرداخت. سپس مدل بار در محاسبات قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سپس روش تحلیلی پیشنهادی برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه توزیع با منابع تولید پراکنده قطعی معرفی می‌گردد. در نهایت پس از معرفی شبکه تست شاخص‌های مهم قابلیت اطمینان آن مورد محاسبه قرار خواهد گرفت.

فصل پنجم به برآورد قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع با منابع تولید پراکنده غیر قطعی اختصاص خواهد داشت. در این فصل ابتدا مفاهیم مربوط به شبیه‌سازی مونت کارلو، تولید اعداد تصادفی و متغیرهای تصادفی مورد بحث قرار گرفته اند. سپس مراحل کلی شبیه‌سازی مونت کارلو و روش‌های توقف شبیه‌سازی مطرح شده‌اند. کاربرد شبیه‌سازی مونت کارلو در ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع و همچنین علت استفاده از این روش در ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع با منابع تولید پراکنده غیر قطعی نیز در ادامه مطالب قبلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین الگوریتم پیشنهادی برای محاسبه شاخص‌های شبکه توزیع با منابع تولید پراکنده غیر قطعی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو مطرح گردیده و در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی شبکه تست آورده شده است.

فصل ششم نیز به جمع بندی مطالب اختصاص داشته و پیشنهادهایی برای ادامه کار ارائه شده است.

# فصل دوم
# منابع تولید پراکنده

## مقدمه

در این فصل ابتدا تعاریف مربوط به تولید پراکنده خواهد آمد و سپس منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر انرژی معرفی خواهند شد. همچنین پس از بیان روش‌های بهره برداری از منابع تولید پراکنده مهمترین منابع مورد استفاده در شبکه‌های توزیع مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

## ۲ ـ۱ تعریف تولید پراکنده

ساده‌ترین تعریفی که می‌تواند برای تولید پراکنده در نظر گرفته شود تولیدات با مقدار کم می‌باشد؛ اما هیچ توافق اصولی بر روی این میزان تولید وجود ندارد. برخی از کشورها تولید پراکنده را روی سطح ولتاژ تعریف می‌کنند؛ درحالی که در برخی دیگر از کشورها این مسئله روی نحوه منتقل کردن انرژی به مراکز بار تعریف می‌شود. شاخص‌های دیگری نیز مانند استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر برای تولید انرژی الکتریکی، مالکیت منابع مورد استفاده و تکنولوژی تولید نیز برای تعریف تولید پراکنده در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. بطور کلی می‌توان شاخص‌های مربوط به تعریف تولید پراکنده را در ظرفیت تولید، سطح ولتاژ اتصال به شبکه و نوع منبع انرژی اولیه مورد استفاده در منابع تولید پراکنده خلاصه کرد که در ادامه به بیان هر یک از آنها پرداخته خواهد شد.

**۲-۱-۱ ظرفیت تولید:** یکی از معمولترین ملاک‌هایی که می‌تواند برای تعریف این منابع مد نظر قرار گیرد ظرفیت تولید واحدهاست. البته روی این مسئله توافق جامعی وجود ندارد. معمولاً ماکزیمم ظرفیت قابل اتصال به شبکه بستگی به ظرفیت شبکه در محل اتصال دارد که این مسئله در مورد شبکه‌های توزیع نقش تعیین‌کننده‌تری دارد. با توجه به اینکه این ظرفیت می‌تواند در محدوده وسیعی تغییر کند، نمی‌توان از این شاخص به تنهایی برای تعریف دقیق منابع تولید پراکنده استفاده کرد.

**۲-۱-۲ سطح ولتاژ اتصال به شبکه:** با وجود اینکه در برخی از تعاریف تولید پراکنده امکان اتصال این منابع به شبکه‌های انتقال وجود دارد اما در بیشتر تعاریف چیزی که مورد پذیرش است این است که این منابع بایستی به شبکه‌های توزیع و یا حداقل در سمت مصرف‌کننده به شبکه متصل شوند[۲۹و۳۰]. تقریباً در تمامی تعاریف، این مسئله پذیرفته شده است که تولید پراکنده باید در نزدیکی مراکز بار قرار گیرد. مسئله‌ای که بایستی مد نظر قرار گیرد این است که اصولاً سطح ولتاژی که مرز بین شبکه‌های توزیع و انتقال باشد بطور دقیق وجود ندارد. در واقع این مسئله در کشورهای مختلف و حتی در نواحی مختلف شبکه متفاوت است. بنابراین در نظرگرفتن سطح ولتاژ نیز نمی‌تواند به تنهایی معیار مناسبی برای تعریف منابع تولید پراکنده به‌حساب آید.

**۲-۱-۳ نوع منبع انرژی مورد استفاده:** در برخی از مراجع نوع انرژی مورد استفاده در منابع تولید پراکنده به عنوان عاملی برای تعریف این منابع در نظر گرفته می‌شود. در برخی از تعاریف ادعا می‌شود که تولید پراکنده تنها به تولیداتی گفته می‌شود که از منابع تجدیدپذیر تأمین شوند[۳۰]. باید این واقعیت را پذیرفت که منابع کوچک زیادی در شبکه وجود دارند که از منابع تجدیدپذیر استفاده نمی‌کنند و همچنین منابعی مانند نیروگاههای بادی در شبکه وجود دارند که تولیداتی به مراتب بیش از منابع تولید پراکنده متداول و تا سطح چند صد مگاوات دارند. بنابراین تکنولوژی تولید نیز نمی‌تواند به تنهایی عاملی برای تعریف منابع تولید پراکنده باشد.

از موارد مطرح شده در بالا به‌راحتی می توان به این نتیجه دست یافت که در کشورهای مختلف و توسط سازمانهای گوناگون، تعاریف مختلفی از تولید پراکنده قابل طرح است. CIGRE تولید پراکنده را بدین صورت تعریف کرده است: همه واحدهای تولیدی با ماکزیمم ظرفیت تولید ۵۰ تا ۱۰۰ مگاوات که معمولاً به شبکه‌های توزیع متصل می‌شوند و طراحی و بهره‌برداری از آنها به‌صورت واحدهای متمرکز نیست. از این تعریف می‌توان به این نتیجه دست یافت که اصولاً منابع تولید پراکنده تحت کنترل کامل گردانندگان شبکه نیستند[۳۰]. بنابر این، واحدهای تولیدی که توسط گردانندگان شبکه برای تأمین افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان ساخته می‌شوند و کنترل آنها در دست مراکز دیسپاچینگ است، در این تعریف جزء منابع تولید پراکنده قرار نمی‌گیرند. IEEE تولید پراکنده را بدین‌صورت تعریف کرده است: تولید الکتریسیته با منابعی که به‌قدر کافی کوچکتر ازنیروگاههای متمرکز هستند و می‌توانند در هر نقطه‌ای به شبکه متصل گردند[۲۹و۳۰]. البته تعاریف دیگری نیز برای این منابع در نظر گرفته شده است که از آن جمله می‌توان به منابعی که تولیدات آنها کمتر از ۱۰ مگاوات است و همچنین منابع با تولید کمتر از ۳۰ مگاوات نیز اشاره کرد[۲۹].

طبق مطالبی که مطرح شد واضح است که در تعاریف مختلفی که برای تولید پراکنده مطرح است، گستره‌های گوناگونی برای میزان تولید این منابع قابل طرح می‌باشد. در برخی از این تعاریف حتی می‌توان نیروگاههای بادی را که به خطوط انتقال متصل می‌شوند جزء منابع تولید پراکنده در نظر گرفت؛ در حالی که در برخی دیگر از این تعاریف تمرکز روی منابعی با تولید کم است که به شبکه‌های توزیع متصل می‌شوند. قسمتی که در تمامی این تعاریف مشترک است و توسط بسیاری از محققین به عنوان تولید پراکنده در نظر گرفته می‌شود منابعی با میزان تولید به مراتب کمتر از واحدهای متداول است که به شبکه‌های توزیع متصل می‌شوند. همچنین واحدهای تولیدی که در نزدیکی مراکز مصرف نصب و به شبکه‌های توزیع متصل می‌شوند معمولاً به عنوان منابع تولید پراکنده در نظر گرفته می‌شوند.

### ۲ ۴ منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر

منابع انرژی تجدید ناپذیر عمدتاً شامل سوختهای فسیلی نظیر نفت، گاز، و زغالسنگ و همچنین سوختهای هسته‌ای می‌باشند. دلیل نامگذاری این منابع به‌عنوان منابع تجدیدناپذیر آن است که این مواد از زمین استخراج شده و به‌سرعت مصرف می‌شوند؛ در حالیکه جایگزینی این مواد با سرعتی بسیار کمتر از سرعت مصرف آنها صورت می‌گیرد. حتی اورانیوم که در تولید انرژی هسته‌ای به‌کار می‌رود دارای معادن و منابع محدودی می‌باشد؛ به‌طوری‌که مطابق پیش‌بینی‌ها، بیشتر منابع اورانیوم در مدت کمتر از ۲۰۰ سال مصرف خواهند شد. به همین دلیل اورانیوم نیز جزء منابع تجدیدناپذیر انرژی طبقه‌بندی می‌شود. یکی از مشکلاتی که در ارتباط با منابع انرژی تجدیدناپذیر به‌خصوص انواع سوختهای فسیلی وجود دارد مسئله آلودگی هوا و افزایش گازهای گلخانه‌ای است. با افزایش استفاده از سوختهای فسیلی در دهه‌های اخیر، تولید گازهای گلخانه‌ای به شدت افزایش یافته است. گازهایی همانند متان، دی اکسیدکربن و نیتروکسیدها از جمله گازهای گلخانه‌ای هستند. گازهای گلخانه‌ای به علت داشتن خاصیت جذب اشعه مادون قرمز، سبب گرم شدن کره زمین می‌شوند که این امر می‌تواند پدیده‌های شدید جوی را به‌همراه داشته باشد. معمولاً نیروگاههای سنتی که از سوختهای فسیلی برای تبدیل انرژی استفاده می‌کنند بیشترین سهم را در تولید گازهای گلخانه‌ای دارا می‌باشند. بر اثرمصرف سوختهای فسیلی علاوه بر گازهای گلخانه‌ای، گازهای سمی دیگری نظیر دی‌اکسید سولفور، گازهای هیدروکربنی فرار و فلزاتی همچون سرب نیز تولید می‌گردد که سبب آلودگی محیط زیست می‌شوند. البته این مسئله در مورد انرژی هسته‌ای نیز به طریق دیگری برقرار است. آلودگیهای ناشی از پسماندهای هسته‌ای و خطرات ناشی از پرتوهای رادیواکتیو این مواد، سلامتی انسانها و محیط زیست را به شدت تهدید می‌کنند.

انرژیهای تجدیدپذیر انواعی از انرژی هستند که امکان جایگزین شدن دارند و تقریباً به طور نامحدود در اختیار انسان می‌باشند. انرژیهای تجدیدپذیر معمولاً از جریان طبیعی نور خورشید، باد یا آب و با روشهای خاصی بدست می‌آیند. تا زمانی که جریان آب، نور خورشید و باد وجود داشته باشند این انرژیها نیز قابل دستیابی هستند. منابع دیگری نیز وجود دارند که به‌طور غیر مستقیم و از طریق ذخیره‌کردن انرژی خورشید به‌وجود آمده‌اند، مانند

انرژی زمین گرمایی. اینگونه منابع نیز جزء منابع تجدیدپذیر انرژی محسوب می‌شوند. این منابع علاوه بر اینکه همواره در دسترس هستند، کاملاً پاک بوده و محیط زندگی انسان را نیز آلوده نمی‌کنند.

جهت استفاده بهینه از انرژی منابع تجدیدپذیر بهتر است که این انرژیها ابتدا به مرسوم‌ترین شکل انرژی یعنی انرژی الکتریکی تبدیل شوند. روشهایی که تا کنون جهت تبدیل انرژی این منابع به انرژی الکتریکی ابداع شده‌اند نیاز به سرمایه‌گذاری زیاد داشته و در عین حال دارای راندمان پایینی هستند که این مسئله موجب بیشتر بودن سهم منابع انرژی تجدیدناپذیر از تولید انرژی الکتریکی است. با این حال، با توجه به پیشرفتهای روزافزون تحقیقات در زمینه انرژیهای تجدیدپذیر و وجود مسائلی همچون بحران انرژی در جهان و کاهش منابع سوختهای فسیلی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر طی سالیان اخیر کانون توجه محققین و دولتها به‌ویژه در کشورهای صنعتی جهان بوده است. با توجه به نقش مهمی که این منابع در تأمین انرژی مورد نیاز بشر در آینده ایفا می‌کنند، تحقیقات جهت بهبود سیستمهای مورد نیاز در استحصال انرژی و بهره‌برداری از این منابع به‌شدت مورد توجه محققین بوده و تکنولوژیهای مربوط به این تجهیزات به سرعت در حال گسترش می‌باشند[۳۱].

از جمله مهمترین مزایای انرژیهای تجدیدپذیر می‌توان به تثبیت قیمت انرژی، کاهش گازهای گلخانه‌ای و بکارگیری منابع نامحدود و رایگان انرژی اشاره کرد[۳۰]. هر یک از این موارد می‌توانند به تفصیل مورد بررسی قرار گیرند که در اینجا مجال پرداختن به آنها وجود ندارد. به هر حال هنوز موانع جدی برای بهره‌برداری وسیع از این منابع برای تولید انرژی الکتریکی وجود دارد و یکی از مهمترین آنها مسائل اقتصادی است. این مسئله در کشورهای صنعتی با پرداخت یارانه‌های دولتی تا حدی تعدیل شده است و لازم است که در کشورهای دیگر نیز راهکارهایی برای این مشکل اندیشیده شود.

### ۲ ۳ بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده

امروزه با توجه به تکنولوژیهای موجود، استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی در ابعاد کوچک تا حدودی اقتصادی می‌باشد. به همین دلیل منابع تولید پراکنده در اندازه‌های کوچک ولی به تعداد زیاد در کشورهای صنعتی در حال استفاده هستند. اگرچه در اکثر موارد منبع تولید انرژی این واحدها از انرژیهای تجدیدپذیر می‌باشد، اما لزومی برای این مسئله وجود ندارد. مولدهایی مانند میکروتوربینها، سلولهای سوختی و یا ژنراتورهایی که از طریق سوختهای فسیلی تولید الکتریسیته می‌کنند نیز وجود دارند که به عنوان منابع تولید پراکنده کاربرد دارند[۳۲]. به عبارت دیگر اگرچه ظهور شبکه‌های دارای منابع تولید پراکنده و گسترش آنها یکی از تبعات استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر بوده است، ولی دلایل متعدد دیگری نیز برای گسترش اینگونه شبکه‌ها وجود داشته و دارد.

منابع تولید پراکنده می‌توانند به دو صورت جدا از شبکه و یا متصل به شبکه بهره‌برداری شوند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.