

سورة الرحمن



دانشکده مهندسی برق و ریاتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت

**بررسی رویت‌پذیری به منظور تخمین حالت در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن**

**بستر مخابراتی حسگرهای بی‌سیم**

نگارنده: رضا شیرخانی

استاد راهنما

دکتر محسن اصیلی

استاد مشاور

دکتر محمد ابراهیم حاجی آبادی

بهمن ۱۳۹۵

تقدیم به:

چشمه های جوشان محبت

جلوه های مهر و عطف الهی

لبندهای پر مهر زندگی

پدر و مادر عزیزم

که در تمام مراحل زندگی، به من راه و رسم دست زیستن را آموختند.

# سپاس گزارمی...

در اینجا لازم می‌دانم از تلاش ها و زحمات بی دریغ و راه‌نمایی‌های ارزنده استادان گران‌قدر و  
دلسوزم، جناب آقای دکتر محسن اصیلی و جناب آقای دکتر محمد ابراهیم حاجی آبادی، صمیمانه  
تقدیر و تشکر نمایم.

رضا شیرخانی

زمستان ۱۳۹۵

# تمهید نامه

اینجانب رضا شیرخانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق/ قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی رویت پذیری به منظور تخمین حالت در شبکه های توزیع با در نظر گرفتن بستر مخابراتی حسگرهای بی سیم 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 پژوهش های دیگر پژوهش گران، به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب این 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 به دانشگاه شاهرود متعلق دارد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه 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 تمام مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته (یا استفاده) شده است، اصل رازداری و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

رضا شیرخانی

۱۳۹۵

## مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه 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

شبکه توزیع یکی از بخش‌های مهم سیستم قدرت می‌باشد. بهره‌برداری بهینه از شبکه توزیع مستلزم کنترل و نظارت دقیق بر آن می‌باشد. از این‌رو در شبکه‌های توزیع هوشمند جدید مسئله اندازه‌گیری و تخمین حالت سیستم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اندازه‌گیری از طریق دستگاه‌های اندازه‌گیری زمان‌واقعی محدود (واحدهای اندازه‌گیری فازوری) و توسط یک بستر مناسب مخابراتی انجام می‌شود که شبکه حسگر بی‌سیم می‌باشد. گام اول در هر تحلیل تخمین حالت بررسی رویت‌پذیری سیستم می‌باشد. کاهش هزینه اندازه‌گیری با توجه به هزینه بالای واحدهای اندازه‌گیری فازوری به منظور رویت‌پذیری شبکه قدرت و همچنین کاهش هزینه تجهیزات مخابراتی به منظور رویت‌پذیری شبکه مخابرات بسیار مهم است. از این‌رو تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری فازوری، موقعیت مناسب آن‌ها، نوع ارتباط مخابراتی و انتقال کامل اطلاعات اندازه‌گیری شده به مرکز کنترل مورد توجه قرار می‌گیرد.

هدف اصلی از انجام این پایان‌نامه تعامل رویت‌پذیری سیستم توزیع و هزینه‌های اندازه‌گیری و ارسال اطلاعات در بستر شبکه حسگر بی‌سیم می‌باشد. بدین منظور با طرح و اثبات قضیه سطح اتصال، برای اولین بار یک مسئله بهینه‌سازی مناسب طرح می‌شود که محدودیت‌های لازم از نظر کفایت رویت‌پذیری سیستم قدرت و همچنین رویت‌پذیری شبکه مخابراتی را در نظر می‌گیرد. ضمن این‌که هزینه ایجاد بستر اندازه‌گیری و ارسال اطلاعات می‌تواند به عنوان تابع هدف مطرح گردد. علاوه بر این تأثیر محدودیت‌های جغرافیایی بر تعداد بهینه گره‌های حسگر بی‌سیم به منظور رویت‌پذیری شبکه مخابراتی نیز بررسی می‌شود. مسئله در نهایت برای شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE پیاده‌سازی و نتایج ارائه می‌گردد. واژه‌های کلیدی: واحد اندازه‌گیری فازوری، شبکه حسگر بی‌سیم، رویت‌پذیری شبکه قدرت، قضیه

سطح اتصال، رویت‌پذیری شبکه مخابرات، تخمین حالت، شبکه توزیع

## فهرست مطالب

فصل ۱- مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- مروری بر کارهای گذشته	۳
۳-۱- مروری بر فصل‌های پایان‌نامه	۹
فصل ۲- روش‌شناسی و آشنایی با ابزارها	۱۱
۱-۲- شبکه حسگر بی‌سیم	۱۲
۲-۲- واحدهای اندازه‌گیری فازوری	۱۵
۳-۲- رویت‌پذیری شبکه قدرت	۱۷
۱-۳-۲- تحلیل رویت‌پذیری به روش عددی	۱۸
۲-۳-۲- تحلیل رویت‌پذیری به روش توپولوژیکی	۱۹
۳-۳-۲- رویت‌پذیری شبکه قدرت با استفاده از PMUها به روش توپولوژیکی	۲۰
۴-۲- تخمین حالت	۲۳
۱-۴-۲- ضرورت استفاده از برنامه تخمین حالت با وجود برنامه پخش بار	۲۶
۲-۴-۲- فرمول‌بندی مسئله تخمین حالت	۲۷
۳-۴-۲- فلوجارت الگوریتم مسئله تخمین حالت با روش حداقل مربعات وزن‌دار	۲۹
۴-۴-۲- ماتریس ژاکوبین اندازه‌گیری	۳۰
۵-۲- تخمین حالت تنها با استفاده از PMUها	۳۴
فصل ۳- طرح و اثبات قضیه سطح اتصال و رویت‌پذیر کردن شبکه مخابرات	۳۷
۱-۳- تعیین سطح اتصال گره‌ها بر مبنای تئوری گراف	۳۸
۲-۳- رویت‌پذیر کردن شبکه مخابرات	۴۳
۱-۲-۳- مش‌بندی ناحیه جغرافیایی	۴۳



۴۶	..... طرح مسئله بهینه‌سازی
۴۶-۲-۲	.....
۵۳	..... مدل کردن محدودیت‌های جغرافیایی
۵۳-۳	.....
۵۷	..... شبیه‌سازی و نتایج
۵۷-۴	.....
۵۸	..... شبکه مورد مطالعه
۵۸-۱-۴	.....
۵۸	..... رویت‌پذیری شبکه قدرت
۵۸-۲-۴	.....
۵۹	..... رویت‌پذیری شبکه مخابراتی
۵۹-۳-۴	.....
۶۱	..... مدل کردن محدودیت‌های جغرافیایی
۶۱-۱-۳-۴	.....
۶۳	..... پخش بار شبکه ۳۳ باسه
۶۳-۴-۴	.....
۶۶	..... تخمین حالت شبکه ۳۳ باسه
۶۶-۵-۴	.....
۷۳	..... نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۷۳-۵	.....
۷۴	..... نتیجه‌گیری
۷۴-۱-۵	.....
۷۶	..... پیشنهادات
۷۶-۲-۵	.....
۷۷	..... پیوست ۱: پخش بار پیشرو پسرو
۷۷-۱	.....
۷۹	..... پیوست ۲: اطلاعات شبکه ۳۳ باسه IEEE
۷۹-۲	.....
۸۰	..... مراجع

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
جدول ۱-۳	مجموعه جواب‌های ممکن قرارگیری روترها در شبکه توزیع ۷ باسه ..... ۵۴
جدول ۱-۴	موقعیت قرارگیری روترها در شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE ..... ۶۱
جدول ۲-۴	موقعیت قرارگیری روترها در شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE در حضور مانع طبیعی ..... ۶۳
جدول ۳-۴	نتایج حاصل از پخش بار شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE ..... ۶۴
جدول ۴-۴	مقدار تخمین زده شده دامنه و زاویه ولتاژ باس‌های شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE ..... ۶۸

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
شکل ۱-۲: ساختمان داخلی یک واحد حسگر	۱۳
شکل ۲-۲: موده‌های ارتباطی گره‌های حسگر: (a) تک‌گامی، (b) چندگامی	۱۵
شکل ۳-۲: پیکربندی یک واحد اندازه‌گیری فازوری	۱۶
شکل ۴-۲: واحد اندازه‌گیری فازوری متصل به یک باس	۱۷
شکل ۵-۲: شبکه توزیع ۷ باسه نمونه	۲۱
شکل ۶-۲: محل نصب گره‌های حسگر بی‌سیم در شبکه توزیع ۷ باسه	۲۳
شکل ۷-۲: فلوجارت روش تخمین حالت WLS	۳۰
شکل ۸-۲: مدل دوقطبی نوع $\pi$ خطوط شبکه	۳۱
شکل ۱-۳: رابطه شعاع برد واحد حسگر و طول ضلع هر ناحیه	۴۴
شکل ۲-۳: مش‌بندی ناحیه جغرافیایی شبکه توزیع ۷ باسه	۴۵
شکل ۳-۳: قرارگیری واحدهای حسگر در ناحیه جغرافیایی شبکه توزیع ۷ باسه به منظور رویت‌پذیری شبکه قدرت	۴۶
شکل ۴-۳: رویت‌پذیری شبکه مخابراتی با قرارگیری روتر در ناحیه ۶	۵۳
شکل ۵-۳: شبکه ۷ باسه در حضور مانع طبیعی بین ناحیه‌های ۵ و ۶	۵۴
شکل ۶-۳: فلوجارت روش رویت‌پذیر کردن شبکه مخابرات	۵۵
شکل ۱-۴: شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE	۵۸
شکل ۲-۴: محل قرارگیری واحدهای حسگر بی‌سیم در شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE	۵۹
شکل ۳-۴: تعداد روتر مورد نیاز برای رویت‌پذیری شبکه مخابراتی	۶۰
شکل ۴-۴: تعداد روتر مورد نیاز برای رویت‌پذیری شبکه مخابراتی در حضور مانع طبیعی	۶۲
شکل ۵-۴: دامنه ولتاژ باس‌های شبکه ۳۳ باسه IEEE حاصل از پخش بار	۶۵

- شکل ۴-۶: زاویه ولتاژ باس‌های شبکه ۳۳ باسه IEEE حاصل از پخش بار ..... ۶۵
- شکل ۴-۷: دستگاه‌های اندازه‌گیری موجود در شبکه ۳۳ باسه IEEE توسط واحدهای حسگر ..... ۶۶
- شکل ۴-۸: دامنه ولتاژهای تخمین زده شده باس‌های شبکه ۳۳ باسه IEEE ..... ۶۹
- شکل ۴-۹: زاویه ولتاژهای تخمین زده شده باس‌های شبکه ۳۳ باسه IEEE ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۰: مقدار خطای تخمین حالت برای اندازه ولتاژ باس‌های شبکه ..... ۷۰
- شکل ۴-۱۱: مقدار خطای تخمین حالت برای زاویه ولتاژ باس‌های شبکه ..... ۷۱

# فصل اول

## مقدمه

## فصل ۱- مقدمه

### ۱-۱- مقدمه

سیستم توزیع از مهم‌ترین بخش‌های یک سیستم قدرت می‌باشد، بنابراین بهره‌برداری بهینه از آن نیاز به کنترل و نظارت دقیق بر آن دارد [۱]. مانیتورینگ، اتوماسیون، کنترل و عملکرد سیستم توزیع چالش‌های اساسی پیش روی شبکه هوشمند هستند [۲]. راندمان، قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری بیشتر با بهبود این عوامل کاملاً قابل دسترسی است. از این‌رو در شبکه‌های توزیع هوشمند جدید مسئله اندازه‌گیری و تخمین حالت سیستم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اندازه‌گیری از طریق دستگاه‌های اندازه‌گیری زمان واقعی محدود و توسط یک بستر مناسب مخابراتی انجام می‌شود. یکی از بسترهای مناسب مخابراتی برای انتقال اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط اندازه‌گیرها به محل جمع‌آوری داده‌ها شبکه حسگر بی‌سیم (WSN<sup>۱</sup>) می‌باشد. کاهش هزینه اندازه‌گیری و تجهیزات مخابراتی در مقابل رسیدن به دقت بالایی از تخمین حالت سیستم بسیار مهم تلقی می‌شود. گام اول در هر تحلیل تخمین حالت بررسی رویت‌پذیری سیستم است. علاوه بر رویت‌پذیری شبکه قدرت، رویت‌پذیری شبکه مخابراتی بکار رفته نیز اهمیت دارد. از این‌رو تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری، موقعیت مناسب آن‌ها، نوع ارتباط مخابراتی و انتقال کامل اطلاعات اندازه‌گیری شده به مرکز کنترل در این تحلیل‌ها اهمیت زیادی دارد.

گره‌های حسگر بی‌سیم به کمک تجهیزات اندازه‌گیری فازوری خود، اندازه‌گیری ولتاژ باس‌ها و جریان خطوط شبکه را انجام می‌دهند. مکان‌یابی محل نصب گره‌های حسگر بی‌سیم بر مبنای رویت‌پذیری شبکه قدرت و مخابرات انجام می‌گیرد. اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط این اندازه‌گیرها با هدف تشخیص

---

<sup>۱</sup> Wireless Sensor Network

خطاهای موجود در اندازه‌گیری و یا اطلاعات از دست رفته برخی از باس‌ها به ابزار ریاضی تخمین‌گر حالت داده می‌شود [۱].

برخلاف شبکه‌های فوق توزیع که با توجه به تعداد باس‌های کمتر اندازه‌گیری همه کمیت‌ها مقدور می‌باشد، در شبکه توزیع با تعداد باس‌های به مراتب بیشتری روبرو بوده و رویت‌پذیر نمودن شبکه مشکل‌تر و پرهزینه‌تر است. بر همین مبنا به دنبال حداقل تعداد اندازه‌گیرها و نیز بستر مخابراتی مناسب بوده تا با هزینه کم و به صورت بلادرنگ اطلاعات اندازه‌گیری شده به مرکز کنترل ارسال گردد.

## ۱-۲- مروری بر کارهای گذشته

تخمین حالت سیستم به معنای تعیین مقدار متغیرهای حالت نامعلوم سیستم می‌باشد. معرفی تخمین حالت، ضرورت کاربرد آن و روش‌های انجام آن به دهه ۱۹۶۰ میلادی برمی‌گردد. تخمین حالت در عملکرد ایمن سیستم قدرت نقشی اساسی بازی می‌کند. حالت‌های تخمینی اطلاعات مناسب و کامل‌تری از شبکه فراهم کرده و به اپراتورها در مواردی هم‌چون ارزیابی امنیت سیستم، مدیریت عملکرد بخش‌های مختلف سیستم و محاسبات قیمت‌دهی برای بازارهای برق زمان‌واقعی کمک می‌کند [۳]. اولین قدم برای رسیدن به تخمین حالت در هر شبکه‌ای بررسی رویت‌پذیری شبکه با توجه به اندازه‌گیری‌های موجود می‌باشد [۱]. اندازه‌گیری‌های انجام شده مرسوم در سیستم قدرت در گذشته شامل اندازه‌گیری اندازه ولتاژ، توان عبوری از برخی خطوط و توان تزریقی به برخی از باس‌ها می‌شد. بنا به دلایلی در بین این اندازه‌گیری‌ها زاویه هیچ کمیتی اندازه‌گیری نمی‌شد. با پیشرفت‌های انجام گرفته در زمینه سنکرون‌سازی بین اندازه‌گیری‌های مختلف، واحدهای اندازه‌گیری فازوری (PMU) معرفی شد، که قابلیت اندازه‌گیری ولتاژ و جریان فازوری را به صورت هم‌زمان دارا می‌باشند [۴]. با توجه

---

<sup>1</sup> Phasor Measurement Units

به این قابلیت و نیز هزینه بالای تمام شده برای نصب واحدهای اندازه‌گیری فازوری، نیازی به نصب آن‌ها در همه باس‌ها نیست، بنابراین تنها در برخی از باس‌ها نصب می‌شوند.

مقالات زیادی در مورد بررسی رویت‌پذیری شبکه قدرت به منظور تخمین حالت بحث کرده‌اند. در اکثر این مقالات سعی شده تا الگوریتمی ارائه شود که به کمک آن تعداد و موقعیت بهینه دستگاه‌های اندازه‌گیری شبکه بدست آید. مرجع [۵] به بررسی رویت‌پذیری شبکه قدرت با استفاده از اندازه‌گیرهای معمول و مراجع [۸]–[۶] به رویت‌پذیری شبکه قدرت با استفاده از واحدهای اندازه‌گیر فازوری پرداخته‌اند. در مراجع [۶]، [۱] رویت‌پذیری شبکه قدرت در حضور هر دو نوع اندازه‌گیرهای معمولی و فازوری بحث شده است. با طراحی مسئله رویت‌پذیری شبکه قدرت، به منظور حل این مسئله روش‌های مختلفی بکار رفته است. در مرجع [۹] برای حل مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری از روش برنامه‌ریزی عددی و روش‌های ابتکاری استفاده شده است. در مراجع [۱۱]، [۱۰] الگوریتم ژنتیک، در مرجع [۷]، [۵] هوش مصنوعی و الگوریتم کلونی زنبور عسل و در مراجع [۱۳]، [۱۲] الگوریتم تابو سرچ<sup>۱</sup> استفاده شده است. در صورت استفاده از الگوریتم ژنتیک، با توجه به عدم وابستگی این الگوریتم به گرادیان جواب‌های بهینه بدست خواهد آمد. به منظور جایابی بهینه PMUها و با هدف حداکثر کردن افزونگی<sup>۲</sup> یا به عبارتی کاهش بخش‌هایی از سیستم که رویت‌پذیر نیستند در مراجع [۱۵]، [۱۴] از الگوریتم BPSO و در مرجع [۱۶] از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط استفاده شده است. به منظور حل مسئله بهینه‌سازی در مراجع [۲۱]–[۱۷]، [۶] روش برنامه‌ریزی خطی باینری و در مراجع [۲۳]، [۲۲] روش جستجوی باینری و در مرجع [۲۴] الگوریتم انفجار نارنجک بکار رفته است که یکی از الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد. با توجه به این‌که در روش برنامه‌ریزی خطی از یک حدس اولیه شروع می‌شود، ممکن است مسئله به یک جواب همگرا شود در حالی که چندین جواب دیگر نیز وجود داشته باشد. برای

---

<sup>1</sup> Tabu Search

<sup>2</sup> Redundancy



رسیدن به چند هدف هم‌چون مینیمم کردن تعداد واحدهای اندازه‌گیری فازوری و ماکزیمم کردن افزونگی اندازه‌گیری‌ها روش برنامه‌ریزی خطی مناسب نیست. در مراجع [۲۵]، [۱۸] علاوه بر مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری با هدف رویت‌پذیری شبکه قدرت، این مسئله با فرض خروج خطوط شبکه و هم‌چنین خروج PMUها نیز حل شده است. در برخی از مراجع محدودیت تعداد کانال‌های واحدهای اندازه‌گیری فازوری نیز در جایابی بهینه آن‌ها در شبکه منظور شده است [۲۶]. در این پژوهش به مطالعه رویت‌پذیری شبکه قدرت در حضور واحدهای اندازه‌گیری فازوری پرداخته می‌شود و اندازه‌گیرهای معمولی در نظر گرفته نمی‌شوند.

سیستم شبکه‌های برق مرسوم یک سیستم متمرکز و تک‌جهته است که شارش توان از سمت تولید به سمت مصرف می‌باشد. یکی از تکنولوژی‌های مهم و پیشرفته در سیستم‌های قدرت الکتریکی، شبکه هوشمند است. یکی از ویژگی‌های شبکه هوشمند امکان تبادل دوطرفه توان و اطلاعات بین تولیدکننده و مصرف‌کننده با استفاده از اندازه‌گیرهای هوشمند و سیستم اندازه‌گیری هوشمند<sup>۱</sup> می‌باشد که در شبکه‌های مرسوم وجود ندارد. شبکه هوشمند با استفاده از تکنولوژی‌های مدرن اطلاعات و ارتباطات، اقدام به گردآوری و پردازش داده‌ها می‌کند تا بتواند با فراهم آوردن کنترل خودکار موجب بهبود راندمان، قابلیت اطمینان و امنیت شبکه قدرت موجود شود [۲]. در شبکه هوشمند فاکتور کلیدی و مهم در انتقال توان با قابلیت اطمینان بالا از واحدهای تولیدی به محل مصرف، اطلاعات لحظه‌ای درست و مطمئن می‌باشد. می‌توان تأثیر خطاهای تجهیزات، محدودیت ظرفیت، وقوع حوادث طبیعی و بلایای ناگهانی که سبب اختلالات و خروج توان می‌شود را تا حد زیادی با مانیتورینگ لحظه‌ای شرایط سیستم قدرت و تشخیص خطاها و اتخاذ تصمیم‌های مناسب کاهش داد. از این‌رو مانیتورینگ هوشمند و با هزینه کم شبکه مهم و حیاتی می‌باشد. شبکه حسگر بی‌سیم این امکان را فراهم می‌کند. بنابراین مانیتورینگ

---

<sup>۱</sup> Advanced Metering Infrastructure (AMI)

لحظه‌ای قسمت‌های مختلف و در نتیجه مدیریت و کنترل شبکه از طریق شبکه حسگر بی‌سیم فراهم می‌شود [۳۰]-[۲۷].

شبکه‌های حسگر بی‌سیم در بخش‌های مختلف شبکه قدرت مانند نیروگاه‌ها، خطوط انتقال، پست‌ها، شبکه توزیع، محل احداث انرژی‌های تجدیدپذیر، منازل و غیره کاربرد دارند [۳۲], [۳۱]. این شبکه‌ها اندازه‌گیری‌های خاصی انجام داده، اطلاعات مربوط به توان مصرفی، بازده تولید و بسیاری اطلاعات دیگر مورد نیاز را جمع‌آوری کرده و به مرکز کنترل ارسال می‌کنند. به علاوه کنترل برخی تجهیزات شبکه و تشخیص خطاها را برعهده دارند [۳۴], [۳۳].

در نیروگاه‌های تولید برق، ژنراتورها تجهیزات کلیدی هستند، بنابراین اطمینان از ایمنی و پایداری آن‌ها اهمیت فراوانی دارد. به طور معمول وضعیت ژنراتورها توسط حسگرهایی هم‌چون حسگرهای تعادل، حسگرهای دود، حسگرهای قدرت میدان مغناطیسی و غیره مانیتور می‌شود. بر اساس اطلاعات این حسگرها از وضعیت کلی ژنراتورها و محیط اطراف آن‌ها مطلع شده و تشخیص خطاهای احتمالی و رفع آن‌ها هرچه سریع‌تر انجام می‌گیرد [۳۱].

قابلیت اطمینان خطوط انتقال قدرت از مهم‌ترین عوامل برقراری امنیت و پایداری شبکه قدرت می‌باشد. به منظور تأمین این قابلیت اطمینان، مانیتور کردن شرایط خط انتقال ضروری می‌باشد. شبکه هوشمند با معرفی یک سیستم ارتباطی دوطرفه به شبکه‌های مرسوم قدرت این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان خط انتقال را حتی در مناطق با دسترس‌پذیری سخت به طور زمان واقعی مانیتور کرد. در مرجع [۳۵] شبکه حسگر بی‌سیمی معرفی شده که سعی دارد با کمترین میزان مصرف انرژی و بالاترین قابلیت اطمینان، خطوط انتقال شبکه هوشمند را مانیتور کند. ضمن این‌که انتقال داده‌ها در این شبکه حسگر به صورت چندگامی انجام می‌گیرد. در حال حاضر اطلاعات مختلفی هم‌چون دمای هادی، تصویر خط و محیط اطراف آن به کمک شبکه حسگر قابل مانیتور است [۳۸]-[۳۶]. البته با توجه

به بالا بودن ولتاژ خط انتقال نمی‌توان مستقیماً از خط انتقال برای تأمین توان شبکه حسگر استفاده نمود و بنابراین استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر هم‌چون انرژی خورشیدی برای تأمین توان پیشنهاد می‌شود. این محدودیت در شبکه توزیع بعلت پائین بودن ولتاژ وجود ندارد.

در مراجع [۴۰]، [۳۹] به کاربرد شبکه حسگر بی‌سیم به منظور مانیتورینگ و کنترل در پست‌ها پرداخته شده و راهکارهایی برای بهبود عملکرد گره‌های حسگر و افزایش طول عمر آن‌ها ارائه شده است.

یکی از اهداف شبکه هوشمند افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در چرخه تولید انرژی است. این منابع تولید انرژی تجدیدپذیر ممکن است در مناطقی دور دست یا با دسترس پذیری سخت باشند. در این شرایط شبکه حسگر بی‌سیم با هزینه‌ای کم این امکان را می‌دهد که به طور پیوسته بر این منابع نظارت و کنترل وجود داشته باشد [۴۱].

در مراجع [۴۳]، [۴۲] به کاربرد شبکه حسگر بی‌سیم در مدیریت مصرف انرژی در محل زندگی و تأثیر آن بر کاهش هزینه‌ها پرداخته شده است.

شبکه‌های حسگر بی‌سیم در بخش اتوماسیون صنعت نیز کاربرد زیادی دارند. به طور مرسوم ارتباطات در سیستم‌های اتوماسیون صنعتی از طریق سیم انجام می‌گیرد. از طرفی در سیستم‌های اتوماسیون سیمی نیاز به نصب کابل‌های ارتباطی گسترده و محافظت مستمر از آن‌ها وجود دارد که باعث افزایش هزینه می‌شود. بنابراین نیاز مبرمی به سیستم‌های اتوماسیون بی‌سیم احساس می‌شود که هم کاهش هزینه‌ها و هم کاهش آلودگی هوا را با مدیریت صحیح سیستم‌های صنعتی در پی دارد [۴۵]، [۴۴].

در زندگی روزمره امروزی استفاده از ارتباطات بی‌سیم به قدری گسترده و فراگیر شده است که زندگی بدون آن تقریباً قابل تصور نمی‌باشد. برای مثال در صنعت خودروسازی می‌توان از حسگرهای

بی‌سیم برای کنترل وضعیت موتور اتومبیل، سطح روغن، فشار باد لاستیک‌ها، رعایت فاصله طولی با اتومبیل‌های دیگر، پارک اتوماتیک اتومبیل، کارکرد اتوماتیک برف‌پاک‌کن‌ها و ... استفاده نمود [۳۴].

از شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌توان در خطوط تولید یا خطوط مونتاژ یک کارخانه نیز برای نظارت و کنترل آسان‌تر بر مراحل تولید و مونتاژ محصول استفاده کرد.

تفاوت شبکه‌های حسگر بی‌سیم با شبکه‌های سنتی در این است که شبکه‌های حسگر بی‌سیم با محیط و پدیده‌های فیزیکی در ارتباط بوده و اطلاعات آن‌ها را در اختیار پایگاه‌های اطلاعاتی قرار می‌دهد اما شبکه‌های سنتی به برقراری ارتباط بین پایگاه‌های ارتباطی و انسان کمک می‌کنند. یکی از اساسی‌ترین کاربردهای شبکه حسگر بی‌سیم قابلیت استفاده در محیط‌هایی است که انسان نمی‌تواند در آن‌جا حضور داشته باشد، مثلاً در میان جنگل‌های انبوه، زیر آب [۴۷]، [۴۶]، زیر زمین [۴۹]، [۴۸]، کف دریا، مناطق جنگلی، مناطق آلوده چه از لحاظ آب و هوا و چه از لحاظ شیمیایی و یا حتی هسته‌ای [۵۰].

در زمینه تکنیک‌های مکان‌یابی گره‌ها در شبکه حسگر بی‌سیم مقالات و پژوهش‌های بسیاری انجام گرفته است که هدف عمده آن‌ها با توجه به محدودیت توان منبع تغذیه گره‌ها مکان‌یابی آن‌ها با کمترین میزان انرژی مصرفی توسط گره‌ها است، که این امر منجر به افزایش طول عمر شبکه حسگر نیز می‌شود. البته در شبکه توزیع که مورد مطالعه است مشکل محدودیت توان وجود ندارد.

همان‌طور که اشاره شد تاکنون درباره رویت‌پذیری شبکه قدرت با استفاده از کمترین تعداد اندازه‌گیرها (واحدهای اندازه‌گیری فازوری یا واحدهای حسگر بی‌سیم) و نیز کاربردهای متنوع شبکه حسگر بی‌سیم در سطوح مختلف شبکه قدرت مقالات بسیاری ارائه شده است. اما به کاربرد شبکه حسگر بی‌سیم در سیستم برداشت اطلاعات از شبکه توزیع، بررسی رویت‌پذیری شبکه قدرت و نیز بحث رویت‌پذیری خود شبکه حسگر بی‌سیم به منظور اطمینان از ارسال کامل و دقیق اطلاعات به مرکز

کنترل ورود نشده است. در این پایان نامه سعی می‌شود در کنار رویت‌پذیری شبکه قدرت که تاکنون به اندازه کافی بحث شده، رویت‌پذیری شبکه مخابرات نیز برای اولین بار بررسی شود.

### ۱-۳- مروری بر فصل‌های پایان نامه

هدف از این پایان نامه جایی بهینه تعداد گره‌های حسگر بی‌سیم (هر گره شامل واحد اندازه‌گیری فازوری می‌باشد) در یک شبکه توزیع است به گونه‌ای که علاوه بر رویت‌پذیری شبکه قدرت، شبکه مخابراتی نیز رویت‌پذیر شود. علاوه بر این تأثیر محدودیت‌های جغرافیایی بر تعداد بهینه گره‌های حسگر بی‌سیم به منظور رویت‌پذیری شبکه مخابراتی نیز بررسی می‌شود.

در فصل دوم با معرفی شبکه حسگر بی‌سیم و واحدهای اندازه‌گیری فازوری، به تعریف رویت‌پذیری شبکه قدرت پرداخته و انواع رویت‌پذیری شبکه قدرت بررسی می‌شود. به کمک مقالات ارائه شده در بحث مسئله جایی بهینه واحدهای اندازه‌گیر فازوری به منظور رویت‌پذیری شبکه قدرت، مسئله جایی بهینه واحدهای حسگر بی‌سیم با هدف رویت‌پذیری شبکه توزیع مطرح و فرمول‌بندی می‌شود. در ادامه به بررسی تخمین حالت سیستم و ضرورت استفاده از آن با وجود برنامه پخش بار پرداخته و مسئله تخمین حالت در سیستم‌های اسکادا به روش مرسوم حداقل مربعات وزن‌دار فرمول‌بندی می‌شود. در انتهای فصل دوم نیز مسئله تخمین حالت شبکه توزیع در حالتی که تنها از واحدهای اندازه‌گیری فازوری به منظور رویت‌پذیری شبکه قدرت استفاده شود فرمول‌بندی می‌شود.

در فصل سوم برای تعیین سطح اتصال گره‌ها برای اولین بار به کمک تئوری گراف قضیه سطح اتصال طرح و اثبات می‌گردد. بدین ترتیب شبکه قدرت با یک گراف مدل شده و به کمک قضیه سطح اتصال و بدون نیاز به الگوریتم‌های جستجوی پیشرفته تعیین گره‌های جزیره شده در شبکه حاصل می‌شود. در ادامه با توجه به ابعاد ناحیه جغرافیایی شبکه توزیع قدرت و شعاع برد گره‌های حسگر بی‌سیم، ناحیه

جغرافیایی را مش بندی کرده و به منظور رویت پذیر کردن شبکه مخابرات یک مسئله بهینه سازی مناسب طرح می گردد. علاوه بر این محدودیت های جغرافیایی نیز در این مسئله مدل خواهد شد.

در فصل چهارم مطالعه بر روی شبکه توزیع ۳۳ باسه انجام گرفته و نتایج بیان می گردد. در انتها و در فصل پنجم نیز نتیجه گیری های حاصل از این پایان نامه مطرح و به منظور انجام مطالعات بعدی پیشنهاداتی ارائه می گردد.

## **فصل دوم**

### **روش‌شناسی و آشنایی با ابزارها**

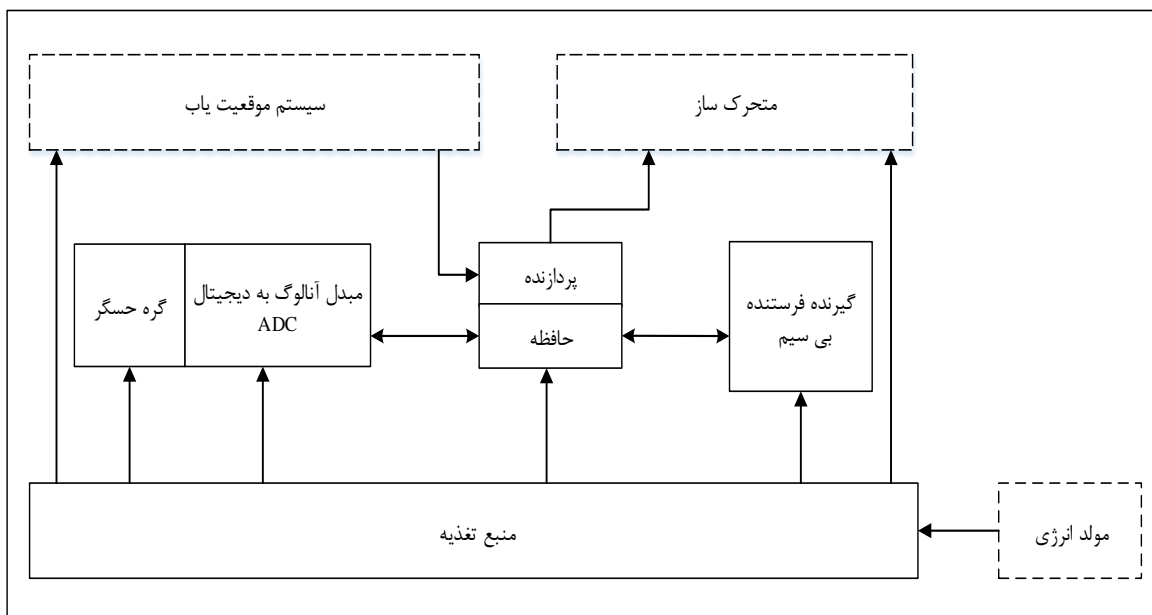
## فصل ۲- روش‌شناسی و آشنایی با ابزارها

در این فصل ابتدا به معرفی شبکه حسگر بی‌سیم و کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف پرداخته می‌شود. سپس به معرفی واحدهای اندازه‌گیری فازوری، چگونگی و دقت اندازه‌گیری این تجهیزات پرداخته و به کاربرد آن‌ها در رویت‌پذیر نمودن شبکه قدرت اشاره می‌شود، بدین صورت که با جایی بهینه این واحدهای اندازه‌گیری فازوری، کمترین تعداد لازم و موقعیت قرارگیری آن‌ها برای رویت‌پذیری شبکه قدرت تعیین می‌شود. در ادامه فصل نیز به فرآیند تخمین حالت، لزوم بکارگیری آن با وجود برنامه پخش بار و فرمول‌بندی یک مسئله تخمین حالت با یکی از روش‌های رایج یعنی روش حداقل مربعات وزن‌دار پرداخته می‌شود. با توجه به این‌که در این پژوهش تمرکز بر اندازه‌گیرهای فازوری است، در انتهای فصل یک مسئله تخمین حالت در صورتی که تنها از واحدهای اندازه‌گیری فازوری برای اندازه‌گیری کمیت‌های مختلف شبکه استفاده شود تشریح و فرمول‌بندی می‌شود.

### ۲-۱- شبکه حسگر بی‌سیم

شبکه حسگر بی‌سیم نوعی شبکه بی‌سیم است که از مجموعه‌ای از قطعات کوچک و فشرده به نام گره حسگر تشکیل شده است. هر گره توانایی‌های خاصی هم‌چون اندازه‌گیری شرایط محیطی، ذخیره و پردازش اطلاعات و نیز ارتباط بی‌سیم با گره‌های مجاور خود را دارد [۵۱]، [۵۰]. این گره‌ها در یک محیط پراکنده می‌شوند. هدف از پراکنده کردن این گره‌ها در محیط، بدست آوردن اطلاعاتی در مورد شرایط محیطی از جنبه‌های مختلف می‌باشد. ساختار یک واحد حسگر از پنج واحد کلی تشکیل شده است: گره حسگر، واحد پردازش، واحد دریافت و ارسال (فرستنده-گیرنده)، واحد مدیریت انرژی یا همان واحد منبع تغذیه و در نهایت تجهیزات جانبی [۵۲]. شکل ۲-۱ دیاگرام شماتیک ساختمان یک واحد حسگر را نشان می‌دهد.





شکل ۱-۲: ساختمان داخلی یک واحد حسگر [۵۲]

تجهیزات جانبی مانند سیستم موقعیت‌یاب، واحد متحرک‌ساز و تولید توان بسته به کاربرد گره می‌تواند وجود داشته باشد. منبع تغذیه معمولاً یک باتری کوچک با انرژی محدود است. در واحد حسگر، اطلاعات آنالوگ حسگر توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال به واحد پردازش ارسال می‌شود. واحد پردازش که شامل حافظه نیز می‌باشد، اطلاعات دریافتی از حسگر را پردازش می‌کند و از طریق واحد فرستنده به دیگر گره‌ها می‌فرستد.

از کاربردهای شبکه حسگر می‌توان به مراقبت‌های پزشکی در بیمارستان‌ها، موارد امنیتی هم‌چون مراقبت‌های نظامی، مانیتورینگ محیط اطراف از راه دور، مانیتورینگ طبیعت، ردیابی هدف و غیره اشاره کرد. برای مثال برای بررسی تحرکات انجام گرفته در محیط از حسگرهای شتاب استفاده می‌شود (مانند تشخیص زمین لرزه)، برای شنود صدا در محیط حسگرهای صدا به کار می‌رود، برای ردیابی دود در محیطی مانند جنگل از حسگرهای دود کمک گرفته، به منظور مانیتورینگ محیط از حسگرهای تصویری بهره برده و از حسگرهای رطوبتی نیز برای اندازه‌گیری میزان رطوبت هوا استفاده می‌شود، [۵۳]، [۵۰]

[۵۴].

هر گره حسگر در شبکه دارای دو وظیفه است؛ یکی فرستادن اطلاعات جمع‌آوری شده توسط حسگر خود گره و دیگری فرستادن اطلاعات دریافتی از گره‌های مجاور به سمت گره مقصد در نقش مسیریاب. به طور معمول انرژی صرف شده برای اندازه‌گیری کمیت در مقایسه با انرژی مصرفی به منظور برقراری ارتباط با دیگر گره‌ها کمتر می‌باشد. شبکه‌هایی که در آن‌ها عمل مسیریابی انجام نمی‌شود شبکه تک‌گامی<sup>۱</sup> و شبکه‌هایی که این عمل در آن‌ها انجام می‌گیرد شبکه چندگامی<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند [۵۵]. نحوه ارتباط گره‌ها با یکدیگر و با گره مرجع در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. در شبکه‌های تک‌گامی هر گره به طور مستقیم با گره مرجع در ارتباط است که برای گره‌های با فاصله نسبتاً زیاد با گره مرجع این نوع ارتباط و انتقال داده خیلی سخت می‌باشد. اما در شبکه‌های چندگامی هر گره با گره‌های مجاور خود نیز در ارتباط بوده و برای انتقال داده به گره مرجع از سایر گره‌ها بهره می‌برد. علاوه بر این، ترکیب این دو نوع ارتباط نیز در شبکه‌ها وجود دارد. بر این اساس اغلب شبکه‌های حسگر بی‌سیم از نوع شبکه‌های چندگامی یا ترکیبی هستند. ارتباط گره‌ها به صورت بی‌سیم و از طریق امواج رادیویی، مادون قرمز یا امواج نوری دیگر است که البته بیشتر از ارتباط رادیویی استفاده می‌شود.

شبکه‌های حسگر بی‌سیم مزیت‌های مختلفی دارد. از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ارزان بودن شبکه، مصرف کم و قابلیت اطمینان بالا در ارسال اطلاعات به صورتی که با از دست رفتن یکی از گره‌ها امکان ایجاد مسیرهای دیگر برای ارسال اطلاعات وجود دارد (در اصطلاح شبکه حسگر بی‌سیم نقطه به نقطه<sup>۳</sup> نیست).

استفاده از این سیستم در شبکه‌های توزیع انرژی هنوز مورد توجه کافی قرار نگرفته است. از آنجا که طول عمر گره‌ها به علت محدودیت انرژی منبع تغذیه کوتاه است، معمولاً عمر شبکه حسگر بی‌سیم

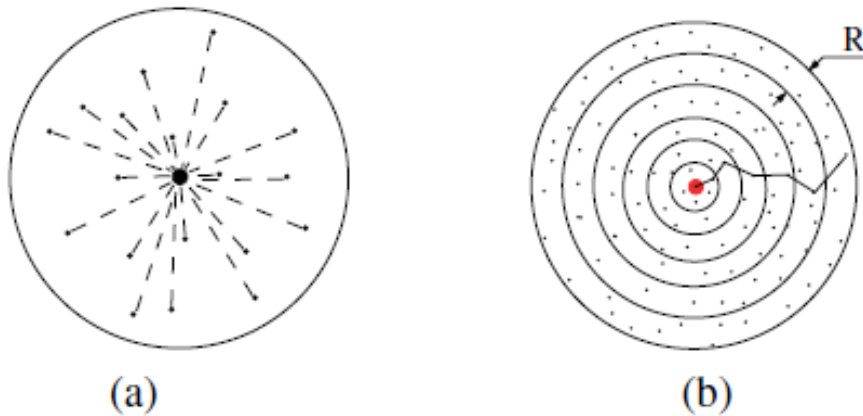
---

<sup>1</sup> single hop

<sup>2</sup> multi hop

<sup>3</sup> point to point

کوتاه است [۵۵]. از طرفی مزیت سیستم‌های توزیع است که مشکل محدودیت انرژی منبع تغذیه گره‌ها وجود نخواهد داشت.



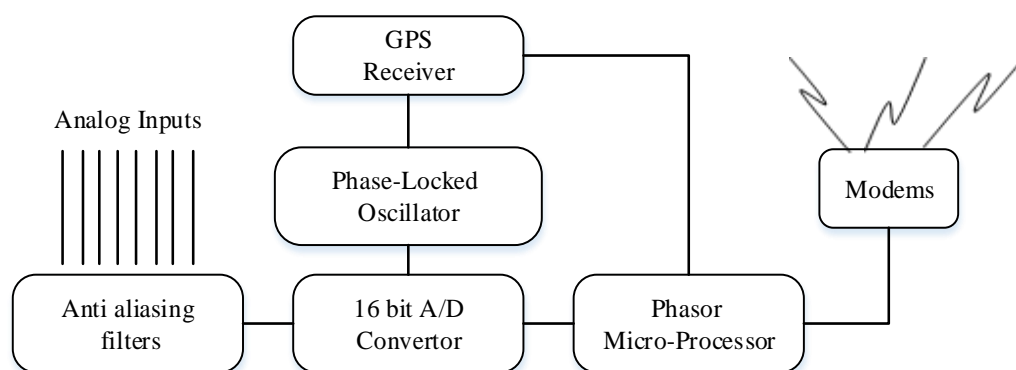
شکل ۲-۲: مودهای ارتباطی گره‌های حسگر: (a) تک‌گامی، (b) چندگامی [۵۵]

## ۲-۲- واحدهای اندازه‌گیری فازوری

اندازه‌گیری‌های انجام شده در یک سیستم اسکادا دارای چند نقطه ضعف می‌باشد؛ این اندازه‌گیری‌ها در یک بازه زمانی (تا چند ثانیه) انجام گرفته و بین آن‌ها مقداری اختلاف زمانی وجود دارد لذا همزمان نیستند. علاوه بر این نرخ نمونه‌برداری اندازه‌گیری‌ها کم بوده و هم‌چنین بازه زمانی بروز شدن آن‌ها هر ۴ تا ۵ دقیقه است و در نتیجه از دقت کافی برخوردار نیستند [۵۶], [۲۳]. در نهایت این‌که با توجه به عدم اندازه‌گیری زاویه در این اندازه‌گیری‌ها، فازور ولتاژ و جریان وجود ندارد. با توجه به این مشکلات می‌توان نتیجه گرفت اطلاعات مانیتور شده در یک سیستم اسکادا نمی‌تواند اطلاعات لحظه‌ای و دقیقی از شبکه را در اختیار اپراتور شبکه قرار دهد. از این‌رو اپراتور اطلاع دقیق از شرایط دینامیکی شبکه نخواهد داشت. از طرف دیگر بدلیل ارتباط غیرخطی بین اندازه‌گیری‌ها و متغیرهای حالت شبکه، تخمین حالت شبکه غیرخطی شده و برای یافتن نقطه همگرایی نیاز به حل معادلات تکراری زیادی خواهد بود.

سیستم جدیدی که تلاش شده تا فاقد نواقص سیستم اسکادا باشد، مانیتورینگ، حفاظت و کنترل گسترده<sup>۱</sup> سیستم نام دارد. جزء اصلی این سیستم واحد اندازه‌گیری فازوری است که قادر به اندازه‌گیری فازورهای ولتاژ و جریان با دقت بسیار بالا (کمتر از ۰/۱ درصد) و سرعت بسیار بالا (تا ۶۰ نمونه در ثانیه) می‌باشد و برای همزمان‌سازی اندازه‌گیری‌ها از سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS<sup>۲</sup>) استفاده می‌کند [۵۷].

قسمت‌های مختلف یک واحد اندازه‌گیری فازوری در شکل ۳-۲ مشاهده می‌شود که مربوط به اولین واحدهای اندازه‌گیری فازوری ساخته شده در دانشگاه ویرجینیا می‌باشد [۴۸]. گرچه لازم به یادآوری است که ساخت این واحدهای اندازه‌گیری فازوری معمولاً متناسب با نوع کاربرد است.



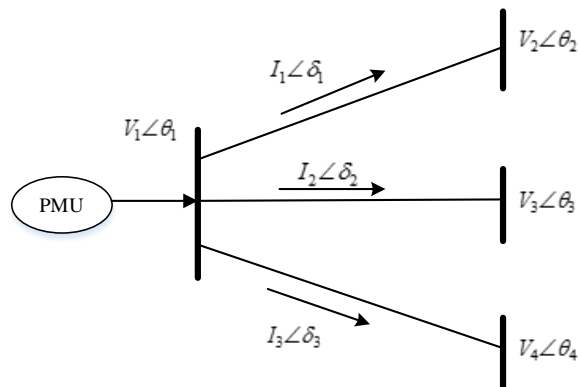
شکل ۳-۲: پیکربندی یک واحد اندازه‌گیری فازوری [۶۰]-[۵۸]

یک واحد اندازه‌گیری فازوری نصب شده در یک باس شبکه مطابق شکل ۴-۲، قادر است فازور ولتاژ باس و جریان شاخه‌های متصل به آن باس را اندازه بگیرد. در واقع ورودی‌های آنالوگ همان ولتاژها و جریان‌های بدست آمده از سیم‌پیچ‌های ثانویه ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان هستند. در اندازه‌گیری کمیت‌های مختلف شبکه، اختلاف زمانی استاندارد که برای سنکرون بودن دو اندازه‌گیری در نظر

<sup>1</sup> Wide Area Monitoring, Protection and Control

<sup>2</sup> Global Positioning System

گرفته می‌شود می‌بایست محدود به  $1\mu s$  باشد که در شبکه با فرکانس  $50$  هرتز معادل با  $0.018$  درجه است [۵۷].



شکل ۲-۴: واحد اندازه‌گیری فازوری متصل به یک باس

همان‌گونه که مشاهده می‌شود با نصب یک واحد اندازه‌گیری فازوری، به راحتی می‌توان علاوه بر ولتاژ باس به کمیت‌های دیگر شبکه نظیر جریان‌ها رسید. با توجه به این قابلیت واحدهای اندازه‌گیری فازوری، در مقایسه با اندازه‌گیری‌های معمول شبکه قدرت با تعداد PMU به مراتب کمتری می‌توان کلیه کمیت‌های شبکه را محاسبه نمود.

واحدهای اندازه‌گیری فازوری علاوه بر نقش داشتن در رویت‌پذیری و تخمین حالت، در یافتن محل وقوع خطا در خطوط انتقال، ارزیابی زمان واقعی پایداری گذرای سیستم قدرت، حفاظت، رله‌گذاری تطبیقی، پایش حرارتی خطوط انتقال و پایداری ولتاژ نیز استفاده می‌شوند.

## ۲-۳- رویت‌پذیری شبکه قدرت

به منظور کنترل و نظارت کامل، در یک شبکه قدرت تنها در صورتی می‌توان به کمک اطلاعات بدست آمده توسط واحدهای اندازه‌گیری فازوری نصب شده فرآیند تخمین حالت را انجام داد که شبکه قدرت در حضور این واحدهای اندازه‌گیری فازوری رویت‌پذیر باشد. در حقیقت پیش از پرداختن به فرآیند تخمین حالت باید بررسی کرد که آیا با اندازه‌گیری‌های انجام گرفته در قسمت‌های مختلف شبکه

و نیز آگاهی از وضعیت توپولوژیکی شبکه، این فرآیند قابل اجرا خواهد بود یا نه؟ بدین منظور رویت‌پذیری شبکه قدرت مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

اندازه‌گیری‌های انجام شده در شبکه توسط واحدهای اندازه‌گیری فازوری انجام می‌گیرد. با توجه به این‌که هزینه تمام شده برای نصب این واحدهای اندازه‌گیری قابل توجه می‌باشد، از این‌رو تنها در تعدادی از باس‌های شبکه اندازه‌گیر (واحد حسگر بی‌سیم که شامل واحد اندازه‌گیری فازوری نیز می‌باشد) نصب می‌شود که مجموع هزینه نصب این واحدهای حسگر بی‌سیم در این باس‌ها کل هزینه صورت گرفته را تشکیل می‌دهد. بنابراین دو هدف مهمی که در بحث جایابی واحدهای حسگر بی‌سیم در یک شبکه قدرت به طور همزمان مطرح است، یکی رویت‌پذیری شبکه قدرت و دیگری کاهش هزینه تمام شده می‌باشد.

به منظور تحلیل رویت‌پذیری یک شبکه قدرت، در مجموع چهار روش تحلیل معرفی شده است که عبارتند از روش جبری، روش توپولوژیکی، روش عددی و روش ترکیبی. در این بین دو روش تحلیل عددی و توپولوژیکی به نسبت روش‌های دیگر از اهمیت بیشتری برخوردارند. در ادامه به توضیح این دو روش پرداخته می‌شود:

## ۲-۳-۱- تحلیل رویت‌پذیری به روش عددی

چنانچه به منظور تخمین حالت سیستم از روش حداقل مربعات وزن‌دار استفاده شود، بردار متغیرهای حالت طبق رابطه (۱-۲) بدست می‌آید.  $R$  ماتریس کوواریانس مربوط به خطاهای اندازه‌گیری است.

$$X^{est} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} Z \quad (1-2)$$

که در این رابطه، عبارت  $G = H^T R^{-1} H$  ماتریس بهره (گین) نام دارد و در ادامه فصل معرفی خواهد شد.

برای رویت‌پذیری سیستم قدرت می‌بایست مرتبه ماتریس بهره برابر با بعد بردار حالت سیستم باشد. به عبارتی مرتبه ماتریس بهره برابر با تعداد متغیرهای حالت سیستم یعنی  $(2N-1)$  باشد [۶۲]، [۶۱]. در سیستم‌های با ابعاد بزرگ، به جهت پراکندگی بالای ماتریس‌ها استفاده از این روش با مشکلاتی همراه است، لذا به طور معمول از روش تحلیل توپولوژیکی استفاده می‌شود.

### ۲-۳-۲- تحلیل رویت‌پذیری به روش توپولوژیکی

در این روش در ابتدا شبکه قدرت با یک گراف مدل می‌شود. باس‌های شبکه همان گره‌ها و خطوط شبکه همان شاخه‌های (یال‌های) گراف هستند. در این روش در حضور واحدهای اندازه‌گیری فازوری از قوانین زیر استفاده می‌شود:

۱- برای باس‌های دارای واحد اندازه‌گیری فازوری، فازور ولتاژ مشخص می‌باشد. هم‌چنین فازور جریان خطوط متصل به این باس‌ها نیز مشخص است.

۲- با توجه به معلوم بودن فازور ولتاژ هر باس دارای واحد اندازه‌گیری فازوری و جریان خطوط متصل به آن باس، می‌توان با بکارگیری قانون اهم فازور ولتاژ باس‌های متصل مجاور را بدست آورد.

۳- با مشخص بودن فازور ولتاژ دو باس متصل بهم، براحتی می‌توان فازور جریان خط واصل را محاسبه نمود.

۴- برای یک باس تزریق جریان صفر در صورتی که فازور جریان کلیه خطوط متصل به باس جز یکی مشخص باشد، می‌توان با بکارگیری قانون جریان کیرشهف جریان آن خط را نیز محاسبه کرد. البته قابل ذکر است که در شبکه توزیع باس تزریق جریان صفر وجود ندارد.

در این پایان نامه به منظور جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری در شبکه قدرت مشابه اکثر مراجع از روش توپولوژیکی استفاده می‌شود.

## ۲-۳-۳- رویت‌پذیری شبکه قدرت با استفاده از PMUها به روش توپولوژیکی

همان‌گونه که اشاره شد اهداف کلی مدنظر در بحث جایابی بهینه واحدهای حسگر بی‌سیم در شبکه قدرت عبارتند از:

۱- استفاده از کمترین تعداد وسایل اندازه‌گیری که معادل با صرف حداقل هزینه است.

۲- برقرار بودن رویت‌پذیری شبکه با وسایل اندازه‌گیری مذکور.

برای فرمول‌بندی این بخش، هزینه صورت گرفته به عنوان تابع هدف و رویت‌پذیری شبکه قدرت به عنوان قید در نظر گرفته می‌شود. یک شبکه قدرت در صورتی به طور کامل رویت‌پذیر است که همه باس‌های آن رویت‌پذیر باشند. بنابراین در ابتدا رویت‌پذیری یک باس شبکه قدرت تعریف می‌شود:

تعریف: یک باس شبکه قدرت از دیدگاه شبکه قدرت رویت‌پذیر است اگر یک واحد حسگر به همراه تجهیزات اندازه‌گیری فازوری روی آن باس یا یکی از باس‌های متصل به آن باس وجود داشته باشد. بنابراین وجود واحد حسگر در یک باس تمامی باس‌های متصل به آن را رویت‌پذیر می‌کند. در نتیجه نحوه اتصالات باس‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. این اتصالات در ماتریس تلاقی گره-گره مشخص است. در صورتی که تعداد باس‌های شبکه  $N_{bus}$  باشد، ماتریس تلاقی گره-گره یک ماتریس  $N_{bus} \times N_{bus}$  خواهد بود که به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$A_{i,j} = \begin{cases} 1 & (i = j) \text{ OR } (i \text{ connected to } j) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-2)$$

برای مدل کردن مسئله، به هر باس یک متغیر  $x_i$  نسبت داده می‌شود که وضعیت نصب یا عدم

نصب واحد حسگر در آن باس را نشان داده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{with wireless sensor} \\ 0 & \text{without wireless sensor} \end{cases} \quad (3-2)$$



مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود [۲۶], [۷], [۳]:

$$\begin{aligned} \text{Min } WX \\ \text{s.t. } AX \geq b \end{aligned} \quad (۴-۲)$$

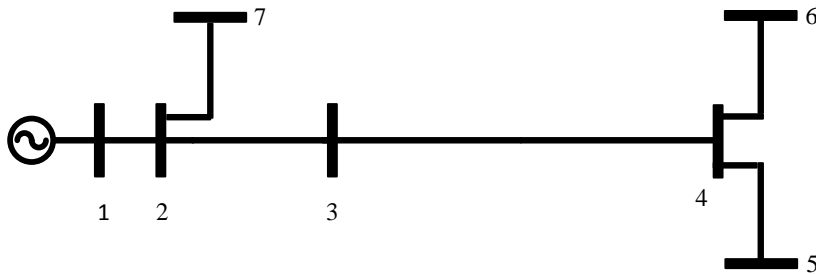
در مسئله فوق  $W$  بردار هزینه مربوط به خرید و نصب واحدهای حسگر بی‌سیم است. درایه متناظر با باس‌های فاقد واحد حسگر صفر می‌باشد. در این پایان‌نامه هزینه تمام شده برای همه واحدها یکسان و برابر با ۱ فرض می‌شود.

$$W = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_N] \quad N = N_{bus} \quad (۵-۲)$$

$X$  بردار شامل تمامی متغیرهای  $x_i$  و مجهول مسئله است و  $b$  نیز ماتریس واحد است.

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

برای مثال شبکه توزیع ۷ باسه فرضی شکل ۵-۲ در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۵-۲: شبکه توزیع ۷ باسه نمونه

برای این شبکه ماتریس تلاقی گره گره به صورت زیر می‌باشد.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

جایگذاری هر سطر این ماتریس در قید مسئله، رویت‌پذیری باس متناظر با آن سطر را بررسی می‌کند. برای مثال با ضرب سطر دوم (مربوط به باس ۲) ماتریس A در بردار X، قید رویت‌پذیری مربوط به باس ۲ بدست می‌آید.

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_7 \geq 1 \quad (6-2)$$

با توجه به این نامساوی وجود حداقل یک واحد حسگر در یکی از باس‌های ۱، ۲، ۳ یا ۷، سبب رویت‌پذیری باس ۲ خواهد شد.

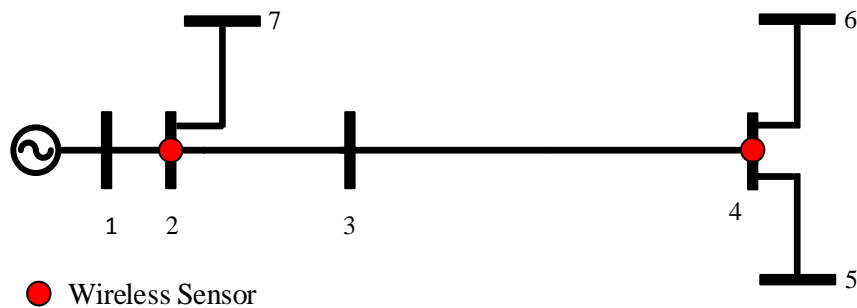
تمامی قیود این مساله که مربوط به باس‌های مختلف می‌شود در رابطه (۷-۲) آمده است:

$$\left\{ \begin{array}{l} bus1: x_1 + x_2 \geq 1 \\ bus2: x_1 + x_2 + x_3 + x_7 \geq 1 \\ bus3: x_2 + x_3 + x_4 \geq 1 \\ bus4: x_3 + x_4 + x_5 + x_6 \geq 1 \\ bus5: x_4 + x_5 \geq 1 \\ bus6: x_4 + x_6 \geq 1 \\ bus7: x_2 + x_7 \geq 1 \end{array} \right. \quad (7-2)$$

با توجه به این که مسئله فوق یک مسئله بهینه‌سازی خطی با متغیرهای باینری است، برای حل آن از جعبه‌ابزارهای محیط نرم‌افزار متلب استفاده می‌شود. نتیجه بدست آمده به صورت زیر است:

$$X = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

با توجه به نتیجه بدست آمده برای شبکه توزیع ۷ باسه با نصب دو واحد حسگر مطابق شکل ۶-۲ در باس‌های ۲ و ۴ کل شبکه قدرت رویت پذیر می‌شود.



شکل ۶-۲: محل نصب گره‌های حسگر بی‌سیم در شبکه توزیع ۷ باسه

## ۴-۲- تخمین حالت

سیستم‌های قدرت بوسیله اپراتورهای سیستم از مرکز کنترل بهره‌برداری می‌شوند. هدف اصلی اپراتور سیستم حفظ سیستم در حالت امن نرمال بعنوان شرایط عملکرد در طول بهره‌برداری روزانه است. تحقق این هدف نیازمند مانیتورینگ پیوسته شرایط سیستم، شناسایی حالت بهره‌برداری و تعیین اقدامات پیشگیرانه لازم در مواجهه با شرایط ناامن سیستم می‌باشد. این مجموعه اقدامات به تجزیه و تحلیل امنیت سیستم بازمی‌گردد.

گام اول در تجزیه و تحلیل امنیت سیستم، مانیتور کردن حالت بهره‌برداری جاری سیستم است که شامل بدست آوردن داده‌های اندازه‌گیری شده از تمام قسمت‌های سیستم و سپس پردازش آن‌ها به منظور تعیین وضعیت سیستم می‌باشد.

دستگاه‌های اندازه‌گیری ممکن هست هم از نوع آنالوگ و هم دیجیتال باشند. پست‌های فوق توزیع توسط ادواتی که واحدهای پایانه دوردست (RTU) نامیده می‌شوند مجهز شده‌اند، که انواع اندازه‌گیری-های انجام گرفته از شبکه را جمع‌آوری کرده و به مرکز کنترل ارسال می‌کنند. اخیراً ادوات الکترونیکی هوشمند (IED<sup>1</sup>) جایگزین یا مکملی برای RTUهای موجود شده‌اند.

اطلاعات دریافتی از دستگاه‌های اندازه‌گیری در مرکز کنترل شامل توان عبوری خط، ولتاژ باس و دامنه جریان خط، خروجی‌های ژنراتور، بارها و اطلاعات حالت سوئیچ بریکرها، موقعیت تپ ترانسفورماتورها و مقدار ظرفیت بانک خازنی می‌باشد. این داده‌های خام و اندازه‌گیری شده توسط تخمین‌گر به منظور فیلتر کردن نویز دستگاه‌های اندازه‌گیری و خطاهای بزرگ آشکارشده پردازش می‌شوند [1].

اطلاعات فراهم شده توسط سیستم اسکادا، ممکن نیست همیشه به علت خطاها در دستگاه‌های اندازه‌گیری، خطاهای دورسنجی، نویز ارتباطات و ... معتبر باشد. از این گذشته ممکن است که مجموعه دستگاه‌های اندازه‌گیری اجازه استخراج مستقیم از حالت بهره‌برداری AC سیستم را نداشته باشند. مثلاً زوایای فاز ولتاژ باس به طور معمول اندازه‌گیری نمی‌شوند. گذشته از این، ممکن است از لحاظ اقتصادی دور سنجی برای تمام دستگاه‌های اندازه‌گیری، حتی اگر آن‌ها از مبدل‌ها در پست‌ها در دسترس باشند، شدنی نباشند.

تخمین حالت عمل تخصیص مقدار به یک متغیر حالت نامعلوم سیستم بر مبنای معیاری خاص است که به کمک اندازه‌گیری از آن سیستم انجام می‌گیرد. تخمین حالت یک سیستم بر اساس روش‌های آماری انجام گرفته که با حداقل یا حداکثر کردن معیاری خاص به تخمین مقادیر واقعی متغیرهای حالت می‌پردازد. یک تخمین‌گر حالت قادر است خطاهای کوچک موجود را صاف کند، خطاهای فاحش

---

<sup>1</sup> Intelligent Electronic Devices

را تشخیص داده و آشکار نماید و نیز اطلاعاتی را که بر هر دلیل وجود ندارد با مقادیر مناسب پر کند. کاربرد این ویژگی در شرایطی است که به طور مثال کانال‌های مخابراتی که اطلاعات اندازه‌گیری شده را به مرکز کنترل ارسال می‌کنند خراب باشند یا اندازه‌گیرها عمل اندازه‌گیری را انجام ندهند. سه معیار رایج به منظور تخمین حالت معیار حداکثر شباهت<sup>۱</sup>، معیار حداقل مربعات وزن‌دار<sup>۲</sup> و معیار حداقل واریانس<sup>۳</sup> است. هدف در این معیارها حداقل کردن مجموع مربعات اختلاف بین مقادیر تخمینی و مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد [۱].

در سیستم‌های قدرت، متغیرهای حالت شامل مقادیر ولتاژ و زوایای نسبی فاز در گره‌های سیستم می‌باشند. اندازه‌گیری‌هایی مورد نیاز است تا بتوان عملکرد سیستم را در وضعیت بلادرنگ هم برای کنترل قابلیت اطمینان و هم برای قیود موجود در توزیع اقتصادی بار، تخمین زد. ورودی به یک تخمین‌گر شامل اندازه‌گیری‌های ناقص از مقادیر ولتاژ و توان، توان موهومی یا توان ظاهری است. تخمین‌گر بدین صورت طراحی می‌شود که بهترین تخمین را از مقادیر ولتاژ و زوایای فاز در اختیار قرار دهد.

در یک سیستم قدرت در صورت مشخص بودن فازور ولتاژ کلیه باس‌ها برآحتی می‌توان اطلاعات دیگر سیستم از قبیل جریان خطوط، جریان بارها، توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط و توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی باس‌ها را محاسبه کرد. فازور ولتاژ باس‌های سیستم را می‌توان با برنامه پخش بار محاسبه نمود. سوالی که مطرح می‌شود این است که چرا با وجود برنامه پخش بار و رسیدن به تمامی اطلاعات سیستم به سراغ برنامه تخمین حالت می‌روند؟ در ادامه به این پرسش پاسخ داده می‌شود.

---

<sup>1</sup> Maximum Likelihood

<sup>2</sup> Weighted Least Squares

<sup>3</sup> Minimum Variance

## ۲-۴-۱- ضرورت استفاده از برنامه تخمین حالت با وجود برنامه پخش بار

برنامه پخش بار را می‌توان پایه و اساس هر نوع ارزیابی امنیت زمان واقعی و کاربردهای زمان واقعی سیستم قدرت دانست. این برنامه با تعیین برخی پارامترهای مهم سیستم موجب افزایش نظارت، کنترل مناسب و دقیق‌تر و همچنین بهره‌برداری بهینه‌تر از سیستم قدرت می‌شود. یک برنامه پخش بار بر مبنای مجموعه‌ای از ورودی‌ها هم‌چون اطلاعات امیدانس خطوط، ولتاژ باس‌های دارای ژنراتور و توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی باس‌ها به محاسبه مجهولات سیستم از قبیل فازور ولتاژ باس‌ها، فازور جریان شاخه‌ها و توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط می‌پردازد. برای اندازه‌گیری ورودی‌های مورد نیاز برنامه پخش بار به تعداد زیادی واحد<sup>۱</sup> RTU و نیز یک زیرساخت مخابراتی برای ارسال داده‌ها به سیستم اسکادا نیاز می‌باشد که از نظر اقتصادی هزینه بالایی را متحمل می‌شود. دقت اندازه‌گیری‌های انجام گرفته و نیز دقت ارسال داده‌ها از طریق زیرساخت مخابراتی، در میزان صحت و دقت خروجی‌های برنامه پخش بار بسیار مهم و تاثیرگذار می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت برنامه پخش بار از اندازه‌گیری‌هایی بعنوان ورودی استفاده می‌کند که ممکن است دقت بالایی نداشته باشند و یا حتی برخی از این اندازه‌گیری‌ها به طور کل بدلیل نقص یا خرابی سیستم مخابراتی موجود قابل دریافت نباشند. بنا به این دلایل نمی‌توان از برنامه پخش بار بعنوان یک ابزار قدرتمند بلادرنگ به منظور کنترل و نظارت دقیق بر سیستم قدرت استفاده نمود. با توجه به مشکلات مذکور در بکارگیری برنامه پخش بار، محققان برآن شدند تا ابزاری فراهم کنند که علاوه بر اندازه‌گیری‌های مورد استفاده در برنامه پخش بار از سایر اندازه‌گیری‌های انجام گرفته در شبکه هم‌چون ولتاژ باس‌ها، توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی باس‌ها، توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط، وضعیت بریکرهای شبکه و تپ ترانسفورماتورها نیز استفاده نماید.

---

<sup>۱</sup> Remote Terminal Unit

ایده تخمین حالت در سیستم‌های قدرت برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ توسط فرد پیشنهاد شد [۶۳]. در روش‌های ابتدایی مورد استفاده برای تخمین حالت اندازه‌گیری‌ها که شامل دامنه ولتاژ باس و توان‌های اکتیو و راکتیو خطوط بود توسط سیستم اسکادا به مرکز کنترل ارسال و در آنجا محاسبات مربوط به تخمین حالت انجام می‌شد. گرچه این روش هنوز هم مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی مشکلات و کمبودهای قابل توجهی دارد. همزمان نبودن اندازه‌گیری‌های انجام شده در نقاط مختلف شبکه از یک طرف و سرعت و پهنای باند پائین سیستم مخابراتی مورد استفاده برای ارسال داده‌ها نیز از طرف دیگر باعث می‌شود که دقت تخمین حالت به صورت قابل توجهی کاهش یابد. بنابراین با توجه به احتمال وقوع تغییرات در شبکه در فاصله زمانی مربوط به عدم همزمانی اندازه‌گیری‌ها و نیز ارسال داده‌ها به مرکز کنترل می‌توان گفت تخمین حالت در چنین شرایطی نمی‌تواند حالت واقعی لحظه‌ای سیستم را بیان کند. لذا این تخمین نمی‌تواند در بیان حالت دائمی سیستم از دقت کافی برخوردار باشد.

## ۲-۴-۲- فرمول بندی مسئله تخمین حالت

برای یک شبکه  $n$  باسه، چنانچه مجموعه مقادیر اندازه‌گیری‌های انجام گرفته در شبکه قدرت با بردار  $Z$ ، مقدار واقعی کمیت‌هایی که تخمین زده می‌شوند (بردار متغیرهای حالت) با بردار  $x$  و خطای اندازه‌گیری‌ها با بردار  $e$  نشان داده شود، می‌توان رابطه کمیت‌های اندازه‌گیری شده و متغیرهای حالت سیستم را توسط رابطه (۸-۲) بیان نمود [۶۴]، [۶۰]، [۱].

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} = h(x) + e \quad (8-2)$$

$$x^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

$$h^T = [h_1(x), h_2(x), \dots, h_m(x)]$$

$$e^T = [e_1, e_2, \dots, e_m]$$

که  $h_i(x)$  تابعی غیرخطی است که اندازه‌گیری  $i$  را به بردار حالت  $x$  مرتبط می‌کند.

انحراف استاندارد مربوط به هر وسیله اندازه‌گیری با  $\sigma_i$  نشان داده می‌شود که معرف دقت اندازه‌گیری آن وسیله است. معمولاً فرض می‌شود که خطاهای اندازه‌گیری از یکدیگر مستقل بوده و دارای میانگین صفر هستند، بنابراین:

$$E(e_i) = 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (9-2)$$

$$E[e_i e_j] = 0 \quad \forall i, j \quad (10-2)$$

با توجه به این دو خاصیت و بر اساس روابط (9-2) و (10-2)، ماتریس کوواریانس به صورت رابطه (12-2) می‌باشد:

$$\text{cov}(e) = E[e.e^T] = \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2\} = R \quad (11-2)$$

همان‌گونه که مشخص است ماتریس  $R$  یک ماتریس قطری است که درایه‌های قطر اصلی مجذور انحراف معیار استاندارد متناظر با هر یک از اندازه‌گیری‌ها می‌باشد. در روش حداقل مربعات وزن‌دار، برای رسیدن به جواب تابع هدف رابطه (12-2) حداقل می‌شود:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(x))^2}{R_{ii}} = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (12-2)$$

برای یافتن مینیمم، شرط بهینگی مرتبه اول بررسی می‌شود:

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x) R^{-1} [z - h(x)] = 0 \quad (13-2)$$

که در آن  $H$  ماتریس ژاکوبین با ابعاد  $m \times n$  و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H(x) = \left[ \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right] \quad (14-2)$$

با بسط تابع غیرخطی  $g(x)$  با استفاده از بسط تیلور حول بردار حالت  $x^k$  و با چشم‌پوشی از عبارات مرتبه بالا:



$$g(x) = g(x^k) + G(x^k)(x - x^k) + \dots = 0 \quad (15-2)$$

با حذف جملات مرتبه بالا، برای حل تابع هدف از راه حل تکراری گوس نیوتون استفاده می‌شود:

$$x^{k+1} = x^k - [G(x^k)]^{-1} \cdot g(x^k) \quad (16-2)$$

که در آن،  $k$  اندیس تکرار و  $x^k$  بردار حالت جواب در تکرار  $k$ ام می‌باشد.  $G(x)$  نیز ماتریس بهره نام دارد و به صورت رابطه (17-2) بیان می‌گردد.

$$G(x^k) = \frac{\partial g(x^k)}{\partial x} = H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot H(x^k) \quad (17-2)$$

در هر یک از تکرارها، به حل مجموعه معادلات خطی زیر می‌پردازیم:

$$\Delta X^k = [G(X^k)]^{-1} \cdot H^T(X^k) \cdot R^{-1} \cdot [Z - h(X^k)] = [G(X^k)]^{-1} \cdot H^T(X^k) \cdot R^{-1} \cdot \Delta Z^k \quad (18-2)$$

در این روابط  $\Delta x^k = x^{k+1} - x^k$  است. بنابراین حالت‌های تخمینی به صورت زیر بدست خواهند آمد:

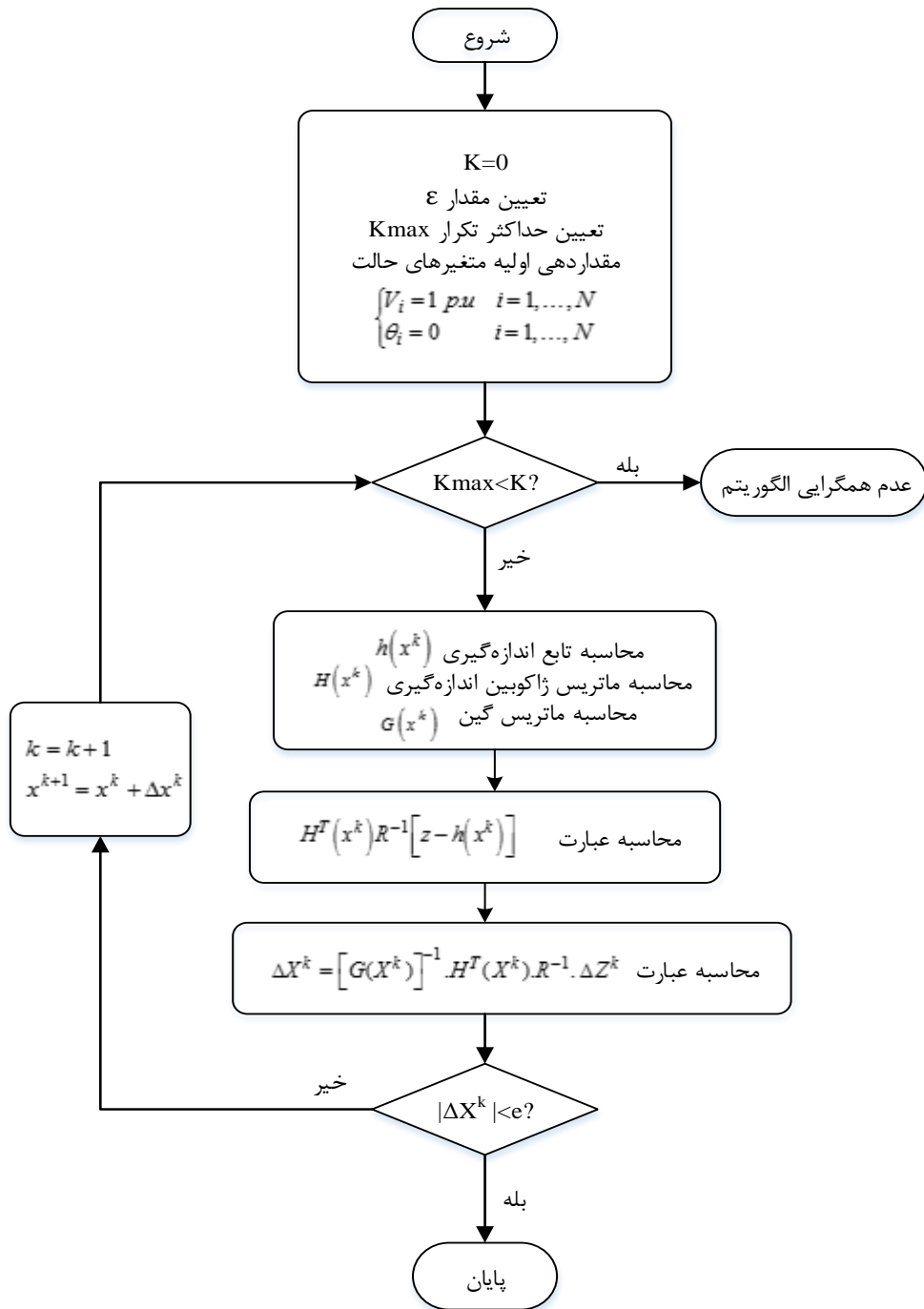
$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (19-2)$$

معیار همگرایی برای این معادلات برقراری شرط توقف زیر است:

$$\text{Max} |\Delta X^k| < \varepsilon \quad (20-2)$$

## ۲-۴-۳- فلوجارت الگوریتم مسئله تخمین حالت با روش حداقل مربعات وزن دار

برای انجام تخمین حالت به روش حداقل مربعات وزن دار، یک حدس اولیه برای بردار حالت  $x^0$  زده می‌شود. در این حدس اولیه معمولاً ولتاژ تمام باس‌ها ۱ پریونیت و همفاز با یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند. فلوجارت الگوریتم تکرار برای تخمین حالت حداقل مربعات وزن دار در شکل ۲-۷ آمده است:



شکل ۲-۷: فلوجارت روش تخمین حالت WLS [۱]

## ۲-۴-۴- ماتریس ژاکوبین اندازه‌گیری

با وجود این که هدف در این پایان‌نامه بررسی تخمین حالت برای شبکه توزیع در حضور واحدهای

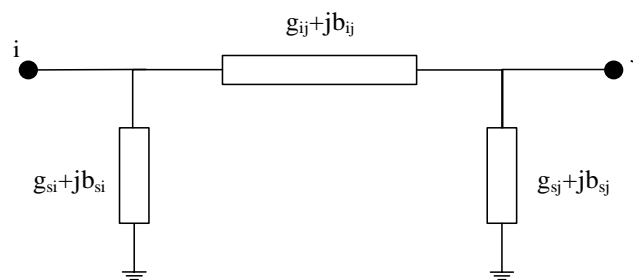
اندازه‌گیری فازوری می‌باشد، ابتدا به تخمین حالت یک سیستم در حضور اندازه‌گیرهای معمول پرداخته

و در انتها به تخمین حالت شبکه توزیع در حالتی که تنها از واحدهای اندازه‌گیری فازوری به منظور اندازه‌گیری استفاده شود پرداخته می‌شود.

در یک سیستم قدرت انواع مختلف اندازه‌گیری‌ها وجود دارد، اما به طور معمول دامنه ولتاژ باس‌ها، توان‌های انتقالی خطوط، توان‌های تزریقی باس‌ها و دامنه جریان خطوط (البته به نسبت بقیه کمتر) اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری‌ها را می‌توان بر حسب متغیرهای حالت با استفاده از مختصات قطبی و یا مختصات قائم بیان نمود. برای یک سیستم  $N$  باسه به طور معمول باس شماره ۱ بعنوان باس مرجع انتخاب و زاویه فاز آن برابر با صفر فرض می‌شود. بنابراین بردار متغیرهای حالت  $x$  شامل  $2N-1$  عنصر خواهد بود که شامل  $N$  دامنه ولتاژ باس و نیز  $N-1$  زاویه فاز ولتاژ باس می‌شود. در این صورت بردار متغیرهای حالت چنین خواهد بود:

$$x^T = [\theta_2 \ \theta_3 \ \dots \ \theta_N \ |V_1| \ |V_2| \ \dots \ |V_N|] \quad (21-2)$$

با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام گرفته در شبکه و با فرض مدل دوقطبی نوع  $\pi$  برای خطوط شبکه می‌توان روابط مربوط به هر یک از اندازه‌گیری‌ها را بیان کرد.



شکل ۸-۲: مدل دوقطبی نوع  $\pi$  خطوط شبکه

➤ توان اکتیو و راکتیو تزریقی باس  $i$ :

$$P_i = |V_i| \sum_{j \in N_i} |V_j| (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (22-2)$$

$$Q_i = |V_i| \sum_{j \in N_i} |V_j| (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (23-2)$$

➤ توان اکتیو و راکتیو انتقالی از باس  $i$  به باس  $j$ :

$$P_{ij} = |V_i|^2 (g_{si} + g_{ij}) - |V_i||V_j| (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (24-2)$$

$$Q_{ij} = -|V_i|^2 (b_{si} + b_{ij}) - |V_i||V_j| (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (25-2)$$

در این روابط:

$N_i$  مجموعه شامل شماره باس‌هایی است که مستقیماً به باس  $i$  متصل شده‌اند.

$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ ، اختلاف زاویه ولتاژ باس‌های  $i$  و  $j$  است.

$G_{si} + jB_{si}$ ، امین عنصر مختلط ماتریس ادمیتانس است.

$g_{ij} + jb_{ij}$ ، ادمیتانس سری خط بین باس‌های  $i$  و  $j$  است.

$g_{sj} + jb_{sj}$ ، ادمیتانس شنت متصل به باس  $i$  شکل ۸-۲ است.

ساختار ماتریس ژاکوبین  $H$  نیز به صورت زیر است [۶۰]، [۱]:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial V_{mag}}{\partial |V|} \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial |V|} \\ \frac{\partial P_{flow}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{flow}}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q_{flow}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{flow}}{\partial |V|} \end{bmatrix} \quad (26-2)$$

که  $V_{mag}$  دامنه ولتاژ،  $P_{inj}$  و  $Q_{inj}$  به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی،  $P_{flow}$  و  $Q_{flow}$  نیز به ترتیب

توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از باس  $i$  به سمت باس  $j$  می‌باشد. توضیح هر یک از عناصر ماتریس

ژاکوبین در ادامه آمده است:

➤ عناصر ماتریس ژاکوبین مربوط به اندازه‌گیری‌های دامنه ولتاژ باس‌ها:

$$\frac{\partial |V_i|}{\partial |V_i|} = 1, \quad \frac{\partial |V_i|}{\partial |V_j|} = 0, \quad \frac{\partial |V_i|}{\partial \theta_i} = 0, \quad \frac{\partial |V_i|}{\partial \theta_j} = 0 \quad (27-2)$$

➤ عناصر ماتریس ژاکوبین مربوط به اندازه‌گیری‌های توان اکتیو تزریقی:

$$\frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| (-G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) - |V_i|^2 B_{ii} \quad (28-2)$$

$$\frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta_j} = |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (29-2)$$

$$\frac{\partial P_{inj}}{\partial |V_i|} = \sum_{j=1}^N |V_j| (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + 2|V_i| G_{ii} \quad (30-2)$$

$$\frac{\partial P_{inj}}{\partial |V_j|} = |V_i| (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (31-2)$$

➤ عناصر ماتریس ژاکوبین مربوط به اندازه‌گیری‌های توان راکتیو تزریقی:

$$\frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - |V_i|^2 G_{ii} \quad (32-2)$$

$$\frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta_j} = -|V_i| |V_j| (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (33-2)$$

$$\frac{\partial Q_{inj}}{\partial |V_i|} = \sum_{j=1}^N |V_j| (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - 2|V_i| B_{ii} \quad (34-2)$$

$$\frac{\partial Q_{inj}}{\partial |V_j|} = |V_i| (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (35-2)$$

➤ عناصر ماتریس ژاکوبین مربوط به اندازه‌گیری‌های توان اکتیو انتقالی:

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} = |V_i| |V_j| (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (36-2)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} = -|V_i| |V_j| (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (37-2)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial |V_i|} = -|V_j| (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) + 2|V_i| (g_{ij} + g_{si}) \quad (38-2)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial |V_j|} = -|V_i| (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (39-2)$$

➤ عناصر ماتریس ژاکوبین مربوط به اندازه‌گیری‌های توان راکتیو انتقالی:

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} = -|V_i||V_j|(g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (۴۰-۲)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} = |V_i||V_j|(g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (۴۱-۲)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial |V_i|} = -|V_j|(g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) - 2|V_i|(b_{ij} + b_{si}) \quad (۴۲-۲)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial |V_j|} = -|V_i|(g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (۴۳-۲)$$

## ۲-۵- تخمین حالت تنها با استفاده از PMUها

پیشرفت پرشتاب سیستم‌های مخابراتی از یکسو و هم‌چنین معرفی واحدهای اندازه‌گیری فازوری سنکرون تحت عنوان PMUها در کنار سیگنال همزمانی GPS از سوی دیگر، کنترل و پایش شبکه‌های قدرت را با تحول عظیمی روبرو کرده است. چنان‌چه در یک شبکه قدرت از اندازه‌گیری‌های معمولی استفاده نشده و تمامی اندازه‌گیری‌های انجام گرفته، اندازه‌گیری‌های مربوط به PMUهایی باشد که به منظور رویت‌پذیری شبکه قدرت جایابی شده‌اند می‌توان فرآیند تخمین حالت را راحت‌تر انجام داد. در این حالت با استفاده از اندازه‌گیری‌های فازوری ولتاژ و جریان می‌توان با حل یک مسئله تخمین حالت خطی به همه متغیرهای حالت و در نتیجه کلیه کمیت‌های شبکه دست یافت. بردار متغیرهای حالت و کمیت‌های اندازه‌گیری شده را می‌توان در سیستم مختصات قائم (مختصات دکارتی) بیان نمود. در این حالت اندازه‌گیری ولتاژ ( $V = |V| \angle \theta$ ) به صورت  $V = E + jF$  و اندازه‌گیری جریان  $I = |I| \angle \delta$  به صورت  $I = C + jD$  بیان می‌گردد [۶۴].

در شکل ۲-۸، ادمیتانس سری خط  $(g_{ij} + jb_{ij})$  و ادمیتانس شنت آن  $(g_{si} + jb_{si})$  می‌باشد. جریان

عبوری خط را می‌توان برحسب تابعی از ولتاژها بیان کرد:

$$I_{ij} = [(V_i - V_j)(g_{ij} + jb_{ij})] + [V_i(g_{sj} + jb_{sj})] = [(g_{ij} + jb_{ij}) + (g_{sj} + jb_{sj})]V_i - (g_{ij} + jb_{ij})V_j \quad (۴۴-۲)$$

همان‌طور که قبلاً گفته شد بردار اندازه‌گیری  $Z$  به صورت  $Z = h(x) + e$  بیان می‌شود که در آن  $X$

بردار حالت،  $h(X)$  ماتریس شامل معادلات خطی و  $e$  بردار خطا است. در مختصات دکارتی:

$$Z = (H_{re} + jH_{im})(E + jF) + e \quad (45-2)$$

که در آن:

$$Z = A + jB \quad (46-2)$$

$$H = H_{re} + jH_{im} \quad (47-2)$$

$$X = E + jF \quad (48-2)$$

بنابراین می‌توان  $A$  و  $B$  را چنین بیان کرد:

$$\begin{cases} A = H_{re} \times E - H_{im} \times F \\ B = H_{im} \times E - H_{re} \times F \end{cases} \quad (49-2)$$

که در فرم ماتریسی به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{re} & -H_{im} \\ H_{im} & H_{re} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ F \end{bmatrix} + e \quad (50-2)$$

بردار متغیرهای حالت را می‌توان با حل معادله (۵۱-۲)، به فرم مختصات دکارتی  $X^{est} = X_{re}^{est} + jX_{im}^{est}$

تخمین زد:

$$X^{est} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} Z \quad (51-2)$$

$$X^{est} = \begin{bmatrix} X_{re}^{est} \\ X_{im}^{est} \end{bmatrix} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \quad (52-2)$$

بدین ترتیب می‌توان به متغیرهای حالت سیستم که همان ولتاژ فازوری باس‌های شبکه هستند

دست یافت. با داشتن ولتاژ فازوری باس‌ها نیز براحتی می‌توان به سایر کمیت‌های شبکه شامل جریان

خطوط، جریان بارها، توان انتقالی خطوط و ... رسید.





## **فصل سوم**

**طرح و اثبات قضیه سطح اتصال و رویت پذیر کردن**

**شبکه مخابرات**

## فصل ۳ – طرح و اثبات قضیه سطح اتصال و رویت پذیر کردن شبکه مخابرات

در این فصل ابتدا به کمک تئوری گراف و به منظور بررسی سطح اتصال گره‌ها، قضیه سطح اتصال طرح و به اثبات ریاضی آن به کمک اصل استقرای ریاضی پرداخته می‌شود. این قضیه در حقیقت گره‌های جزیره شده در یک گراف را مشخص می‌کند. در ادامه فصل با مش بندی ناحیه جغرافیایی که شبکه قدرت در آن قرار دارد و به کمک قضیه سطح اتصال به طرح مسئله بهینه‌سازی به منظور رویت پذیری شبکه مخابرات پرداخته و با حل این مسئله بهینه‌سازی، کفایت یا عدم کفایت تعداد واحدهای حسگر نصب شده‌ی بدست آمده در فصل قبل برای رویت پذیری شبکه مخابرات بررسی شده و در صورت عدم کفایت این گره‌ها، کمترین تعداد گره روتر (مسیریاب) مورد نیاز محاسبه می‌شود. در انتهای فصل نیز محدودیت‌های جغرافیایی در بحث رویت پذیری شبکه مخابرات مدل سازی خواهد شد.

### ۳-۱- تعیین سطح اتصال گره‌ها بر مبنای تئوری گراف

یک شبکه دارای  $N$  گره و  $L$  شاخه را می‌توان با گراف  $G$  بیان نمود که ماتریس تلاقی گره با شاخه آن به صورت زیر تشکیل می‌شود.

$$T = [t_{n,l}]_{N \times L} \quad (1-3)$$
$$t_{n,l} = \begin{cases} 1 & \text{if line } l \text{ connected to node } n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

اتصال دو گره بدین صورت تعریف می‌شود که دو گره دلخواه از گراف  $G$  بهم متصل هستند اگر مسیری روی شاخه‌های گراف وجود داشته باشد که دو گره را به یکدیگر متصل نماید.

**تعریف سطح اتصال بین دو گره:** اگر دو گره  $i$  و  $j$  با یکدیگر متصل باشند، تعداد گره‌های متمایز روی کوتاه‌ترین مسیر بین دو گره، سطح اتصال بین دو گره تعریف و با  $Nc_{i,j}$  نمایش داده می‌شود که:

$$0 \leq Nc_{i,j} \leq N - 2 \quad (2-3)$$

در ادامه با استفاده از ماتریس T ماتریس‌های تلاقی گره با گره به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$M_1 = [m_{1,j}]_{N \times N} = \text{sign}(T \times T') \quad (3-3)$$

$$M_n = [m_{n,j}]_{N \times N} = \text{sign}(M_{n-1} \times M_1) \quad n = 2, \dots, N \quad (4-3)$$

از این ماتریس‌ها جهت تعیین سطح اتصال بین دو گره در لم زیر استفاده می‌شود. تابع علامت بدین صورت تعریف می‌شود که برای مقادیر مثبت برابر با ۱ و برای سایر مقادیر برابر با ۰ است.

لم: برای گراف G با ماتریس تلاقی گره با شاخه T

✓ اگر  $m_{n,i,j} = 1$  باشد، گره i با حداکثر  $n-1$  گره میانی متمایز به گره j متصل می‌شود.

$$Nc_{i,j} \leq n - 1 \quad \text{یعنی}$$

✓ اگر  $m_{n,i,j} = 0$  باشد، در صورتی که گره i به گره j متصل باشد سطح اتصال بین دو

گره بزرگتر از  $n-1$  می‌باشد. یعنی  $Nc_{i,j} > n - 1$

اثبات:

برای اثبات از اصل استقرای ریاضی استفاده می‌شود. بنابراین ابتدا صحت لم برای  $n=1$  اثبات می‌شود.

سپس اگر فرض شود لم برای  $n=k$  صادق باشد، نشان داده می‌شود که برای  $n=k+1$  نیز صدق می‌کند.

گام اول:  $n=1$

درایه سطر i و ستون j ماتریس  $M_1$  برابر است با:

$$m_{1,i,j} = \text{sign} \left( [t_{i,1} \quad t_{i,2} \quad \dots \quad t_{i,L}] \begin{bmatrix} t'_{1,j} \\ t'_{2,j} \\ \vdots \\ t'_{L,j} \end{bmatrix} \right) \quad (5-3)$$

رابطه (5-3) را می‌توان به صورت (6-3) بازنویسی نمود:

$$m_{1,j} = \text{sign} \left( \sum_{l=1}^L t_{i,l} \times t'_{l,j} \right) \quad (6-3)$$

از آن جا که  $t'_{l,j} = t_{j,l}$  پس:

$$m_{1,j} = \text{sign} \left( \sum_{l=1}^L t_{i,l} \times t_{j,l} \right) \quad (7-3)$$

درایه‌های ماتریس  $M_1$  می‌توانند مقادیر ۱ یا ۰ باشند.

### حالت اول:

در این حالت فرض می‌شود که درایه فرضی ماتریس  $M_1$  برابر با صفر باشد:

$$\begin{aligned} \text{if } m_{1,j} = 0 &\Rightarrow \sum_{l=1}^L t_{i,l} \times t_{j,l} = 0 \\ &\Rightarrow t_{i,l} \times t_{j,l} = 0 \quad \forall l \\ &\Rightarrow \nexists l: t_{i,l} \times t_{j,l} = 1 \end{aligned} \quad (8-3)$$

بنابراین مطابق تعریف ماتریس تلاقی گره و شاخه اگر  $m_{1,j} = 0$  باشد در مجموعه شاخه‌های متصل به گره  $i$  و مجموعه شاخه‌های متصل به گره  $j$  خط مشترکی وجود ندارد. یعنی دو باس به صورت مستقیم با یک خط به یکدیگر متصل نیستند. به عبارت دیگر در صورت متصل بودن دو گره، سطح اتصال آن‌ها بالاتر از ۰ می‌باشد.

### حالت دوم:

در این حالت فرض می‌شود که درایه فرضی ماتریس  $M_1$  برابر با یک باشد:

$$\text{if } m_{1,j} = 1 \Rightarrow \sum_{l=1}^L t_{i,l} \times t_{j,l} \geq 1 \Rightarrow \exists l: t_{i,l} \times t_{j,l} = 1 \quad (9-3)$$

بنابراین اگر  $m_{1,j} = 1$  باشد در مجموعه خطوط متصل به گره  $i$  و مجموعه خطوط متصل به گره  $j$  حداقل یک خط مشترک  $l$  وجود دارد. یعنی دو گره به صورت مستقیم (بدون گره میانی متمایز) با یک خط بهم متصل هستند. به عبارت دیگر سطح اتصال گره  $i$  و  $j$  برابر ۰ می‌باشد.

بنابراین درایه‌های غیر قطری ماتریس  $M_1$  بیان‌گر اتصال مستقیم بین دو گره گراف می‌باشد. از این رو ماتریس  $M_1$  را می‌توان بعنوان ماتریس تلاقی گره با گره تعریف نمود.

گام دوم:  $n = k$

فرض می‌شود لم برای  $M_k$  صادق است، آن‌گاه:

$$M_{k+1} = \text{sign} (M_k \times M_1) \quad (10-3)$$

درایه سطر  $i$  و ستون  $j$  ماتریس  $M_{k+1}$  برابر است با:

$$m_{k+1,i,j} = \text{sign} \left( [m_{k,i,1} \quad m_{k,i,2} \quad \dots \quad m_{k,i,N}] \begin{bmatrix} m_{1,j} \\ m_{2,j} \\ \vdots \\ m_{N,j} \end{bmatrix} \right) \quad (11-3)$$

رابطه (11-3) را می‌توان به صورت (12-3) بازنویسی نمود:

$$m_{k+1,i,j} = \text{sign} \left( \sum_{n=1}^N m_{k,i,n} \times m_{1,n,j} \right) \quad (12-3)$$

درایه‌های ماتریس  $M_{k+1}$  می‌توانند مقادیر 1 یا 0 باشند.

### حالت اول:

اگر  $m_{k+1,i,j} = 0$  باید اثبات کرد که سطح اتصال بین دو گره  $i$  و  $j$  بزرگتر از  $k$  است. یعنی گره فرضی  $n$  به طوری که با سطح اتصال 0 به گره  $j$  و با سطح اتصال  $k-1$  و یا کمتر به گره  $i$  متصل باشد وجود ندارد. جهت اثبات این ادعا از برهان خلف استفاده می‌شود.

### فرض خلف:

فرض می‌شود  $m_{k+1,i,j} = 0$  و گره فرضی  $n$  وجود دارد به طوری که با سطح اتصال 0 به گره  $j$  و از طرفی همان گره با سطح اتصال  $k-1$  و یا کمتر به گره  $i$  متصل باشد.

$$\begin{aligned}
&\Rightarrow \exists n : m_{1_{n,j}} = 1 \ \& \ m_{k_{i,n}} = 1 \\
&\Rightarrow \exists n : m_{k_{i,n}} \times m_{1_{n,j}} = 1 \\
&\Rightarrow \sum_{n=1}^N m_{k_{i,n}} \times m_{1_{n,j}} \geq 1 \tag{۱۳-۳} \\
&\Rightarrow m_{k+1_{i,j}} = \text{sign} \left( \sum_{n=1}^N m_{k_{i,n}} \times m_{1_{n,j}} \right) \neq 0
\end{aligned}$$

بنابراین رابطه (۱۳-۳) با فرض اولیه  $m_{k+1_{i,j}} = 0$  دارای تناقض است و فرض خلف باطل و لم برای حالت اول اثبات می شود.

### حالت دوم:

اگر  $m_{k+1_{i,j}} = 1$  باشد، در این صورت رابطه زیر برقرار است:

$$\begin{aligned}
&\text{if } m_{k+1_{i,j}} = 1 \Rightarrow \sum_{n=1}^N m_{k_{i,n}} \times m_{1_{n,j}} \geq 1 \tag{۱۴-۳} \\
&\Rightarrow \exists n : m_{1_{n,j}} = 1 \ \& \ m_{k_{i,n}} = 1
\end{aligned}$$

یعنی وجود دارد گره فرضی  $n$  به طوری که با سطح اتصال  $\bullet$  (مستقیم و بدون گره میانی) به گره  $z$  و با سطح اتصال  $k-1$  و یا کمتر به گره  $i$  متصل باشد. پس با حضور گره  $n$  سطح اتصال بین دو گره  $i$  و  $z$  حداکثر به عدد  $k$  افزایش می یابد. لذا لم برای حالت دوم نیز اثبات می شود.

بنابراین با اثبات این دو حالت، لم اثبات می شود. حال به کمک این لم قضیه سطح اتصال بیان و با استفاده از برهان خلف اثبات می گردد:

قضیه: در گراف  $G$  با  $N$  گره و  $L$  شاخه، ماتریس  $M_{N-1}$  برای تشخیص گره های جزیره شده قابل استفاده است به گونه ای که برای دو گره دلخواه و متمایز  $i$  و  $z$ ، اگر  $m_{N-1_{i,j}} = 0$  باشد آن گاه هیچ مسیری بین دو گره  $i$  و  $z$  وجود ندارد. یعنی این دو گره از یکدیگر جزیره می باشند.

برای اثبات این قضیه از برهان خلف استفاده می شود.

فرض خلف: فرض می‌شود  $m_{N-1,i,j} = 0$  بوده و دو گره به هم متصل می‌باشند.

اگر  $m_{N-1,i,j} = 0$  باشد، مطابق با لم مطرح شده:

$$Nc_{i,j} > N - 2 \quad (۱۵-۳)$$

از طرفی طبق تعریف سطح اتصال بین دو گره، چنانچه دو گره  $i$  و  $j$  به هم متصل باشند در این صورت:

$$Nc_{i,j} \leq N - 2 \quad (۱۶-۳)$$

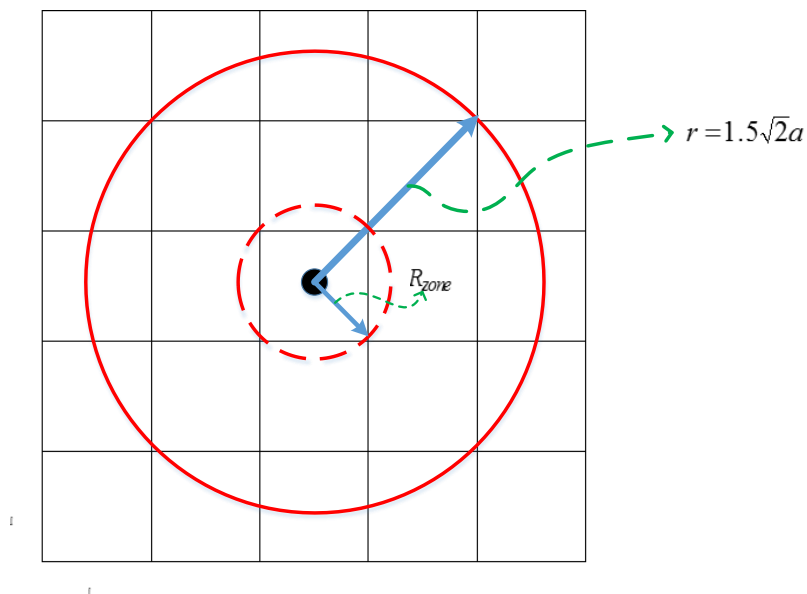
بنابراین به دلیل تناقض روابط (۱۵-۳) و (۱۶-۳) فرض خلف باطل و قضیه اثبات می‌شود.

### ۲-۳- رویت‌پذیر کردن شبکه مخابرات

در ادامه به مش‌بندی ناحیه جغرافیایی که شبکه توزیع مورد مطالعه در آن واقع شده است پرداخته و با استفاده از قضیه سطح اتصال، یک مسئله بهینه‌سازی با هدف رویت‌پذیر کردن شبکه مخابرات طرح می‌شود. ضمن این‌که تأثیر محدودیت‌های جغرافیایی در این مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود.

### ۱-۲-۳- مش‌بندی ناحیه جغرافیایی

ناحیه جغرافیایی که شبکه توزیع مورد مطالعه در آن واقع شده به ناحیه‌هایی با مساحت برابر تقسیم شده و طول ضلع هر ناحیه با  $a$  نشان داده می‌شود. توجه شود که در استقرار واحدهای حسگر در ناحیه‌های مختلف از یک تقریب استفاده شده و واحد حسگر در مرکز ناحیه فرض می‌شود. با توجه به ابعاد جغرافیایی معمولاً مش‌بندی به‌گونه‌ای انجام می‌شود که وجود واحد حسگر در یک ناحیه، رویت‌پذیری ناحیه‌های مجاورش را نتیجه دهد. براین اساس و با توجه به شکل ۱-۳ می‌توان رابطه‌ای بین طول ضلع هر ناحیه و شعاع برد هر واحد حسگر بی‌سیم بدست آورد.



شکل ۳-۱: رابطه شعاع برد واحد حسگر و طول ضلع هر ناحیه

اگر شعاع برد واحد حسگر  $r$  باشد، با توجه به رویت پذیر شدن تمام ناحیه‌های مجاور یک ناحیه دارای واحد حسگر می‌توان رابطه آن با  $a$  را چنین نوشت:

$$R_{zone} = \sqrt{2} \times a \Rightarrow r = 1.5 \times R_{zone} = 1.5 \times (\sqrt{2} \times a) \quad (۱۷-۳)$$

این رابطه در واقع مقدار حداقلی شعاع برد واحد حسگر را با توجه به طول هر ناحیه بیان می‌کند. به این معنا که:

$$r \geq 1.5 \times (\sqrt{2} \times a) \Rightarrow a \leq \frac{r}{1.5 \times \sqrt{2}} \quad (۱۸-۳)$$

در صورتی که شعاع برد واحد حسگر  $r$  باشد، رابطه (۱۸-۳) بیان‌گر حداکثر مقدار ممکن برای  $a$  می‌باشد. برای افزایش دقت مشبندی ناحیه جغرافیایی می‌توان  $a$  را اعداد کوچکتر از رابطه (۱۸-۳) فرض نمود. با کاهش مقدار  $a$  که معادل با افزایش تعداد ناحیه‌های مشبندی است می‌توان مقدار تقریب استفاده شده در قرارگیری هر واحد حسگر در مرکز ناحیه مربوط را کاهش داد.

چنان‌چه عرض و طول ناحیه جغرافیایی مورد مطالعه به ترتیب  $W_1$  و  $W_2$  باشد، تعداد ناحیه‌های عرضی و طولی در مشبندی به صورت زیر بدست خواهد آمد:



$$n_1 = \left[ \frac{W_1}{a} \right] + 1 \quad (19-3)$$

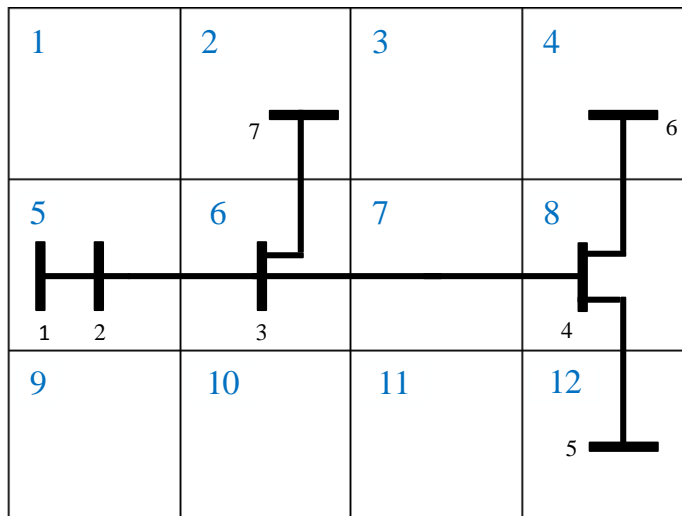
$$n_2 = \left[ \frac{W_2}{a} \right] + 1 \quad (20-3)$$

که در آن  $n_1$  تعداد ناحیه‌های عرضی و  $n_2$  تعداد ناحیه‌های طولی می‌باشد. تعداد کل ناحیه‌های مش‌بندی نیز برابر با حاصل ضرب تعداد ناحیه‌های عرضی و طولی است.

$$N_{zone} = n_1 \times n_2 \quad (21-3)$$

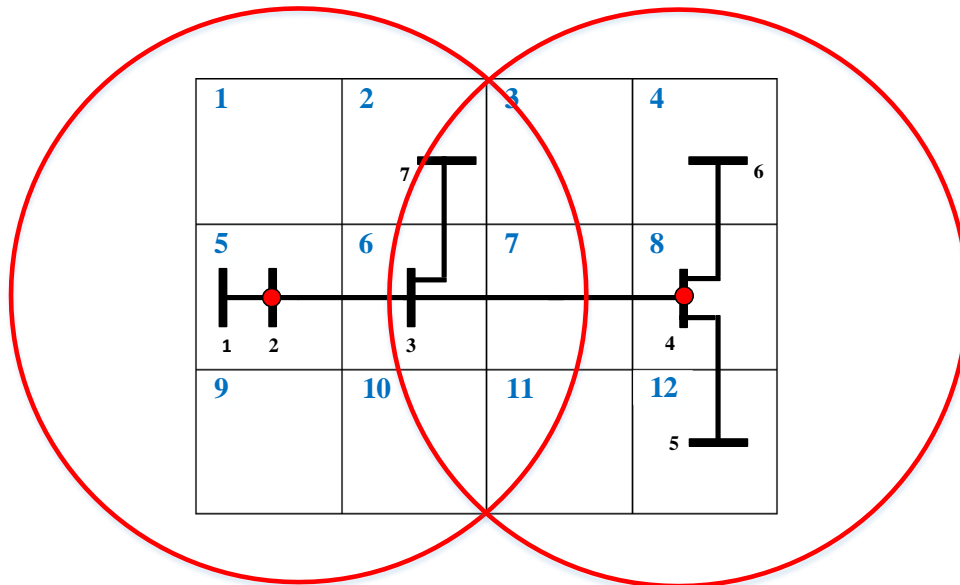
برای مثال فرض می‌شود شبکه توزیع ۷ باسه شکل ۲-۵ در یک ناحیه جغرافیایی فرضی مانند شکل ۲-۳ قرار دارد. واحدهای حسگر در دسترس نیز دارای شعاع برد ۱ کیلومتر هستند. بنابراین طول ضلع هر ناحیه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$r = 1.5 \times (\sqrt{2} \times a) \Rightarrow 1 = 1.5 \times \sqrt{2} \times a \Rightarrow a = 471m \quad (22-3)$$



شکل ۲-۳: مش‌بندی ناحیه جغرافیایی شبکه توزیع ۷ باسه

با توجه به شکل ۲-۳ واحدهای حسگر مورد نیاز برای رویت‌پذیری شبکه قدرت که در فصل قبل بدست آمد، در ناحیه‌های مورد نظر قرار گرفته و شکل ۳-۳ حاصل می‌شود.



شکل ۳-۳: قرارگیری واحدهای حسگر در ناحیه جغرافیایی شبکه توزیع ۷ باسه به منظور رویت پذیری شبکه قدرت

با توجه به شعاع برد واحدهای حسگر و طول هر ناحیه جغرافیایی و مطابق شکل ۳-۳ مشخص است که دو واحد حسگر در شعاع برد یکدیگر نبوده و در نتیجه اطلاعات واحد حسگر واقع در باس شماره ۴ به واحد حسگر مرجع واقع در باس شماره ۲ نمی‌رسد. بنابراین باید واحدهای حسگر (گره‌های حسگر) دیگری در ناحیه جغرافیایی قرار گیرند که به عنوان گره واسط و در نقش مسیریاب قرار گرفته و اطلاعات واحد حسگر باس شماره ۴ را به واحد حسگر مرجع برسانند. تعداد بهینه، موقعیت قرارگیری و خصوصیات این گره‌های واسط مورد بحث می‌باشد.

### ۳-۲-۲- طرح مسئله بهینه‌سازی

در گام اول مسئله جایابی بهینه واحدهای حسگر بی‌سیم (که شامل واحد اندازه‌گیری فازوری نیز می‌شوند) در یک شبکه توزیع با شرط رویت‌پذیری آن شبکه مطرح و با حل مسئله بهینه‌سازی (۲-۴) باس‌های دارای واحد حسگر مشخص گردید.

طبق تعریف به هر واحد حسگر بی سیم نصب شده در هر یک از باس‌های شبکه قدرت گره مخابراتی گفته می‌شود. هر کدام از این گره‌ها دارای شعاع برد مشخصی هستند که البته این مقادیر در این پایان‌نامه برابر فرض شده‌اند. از این به بعد منظور از گره حسگر همان واحد حسگر می‌باشد.

برای کنترل کامل بر متغیرهای مختلف شبکه و اتخاذ تصمیم‌های به موقع و مناسب در مرکز کنترل، لازم است اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط هر کدام از گره‌های مخابراتی به مرکز برسد. از طرفی برای برقراری ارتباط و انتقال اطلاعات بین هر دو گره مخابراتی، لازم است دو گره در شعاع یکدیگر قرار داشته باشند. در ادامه به تعریف رویت‌پذیری هر گره حسگر در شبکه مخابراتی پرداخته می‌شود:

**تعریف:** یک گره مخابراتی از دیدگاه شبکه مخابرات رویت‌پذیر است اگر مسیری بین آن گره با گره مرجع که در آن داده‌ها جمع‌آوری می‌شود وجود داشته باشد. به عبارتی گره مخابراتی رویت‌پذیر است اگر نسبت به گره مرجع جزیره نباشد.

در این صورت با توجه به فاصله گره‌های مخابراتی از هم و نیز برد آن‌ها دو حالت را می‌توان بررسی کرد: حالت اول: برای رویت‌پذیری همه گره‌های مخابراتی، همان تعداد گره مخابراتی مشخص شده در گام اول کافی هستند.

حالت دوم: برای رویت‌پذیری همه گره‌ها، گره‌های مخابراتی موجود کفایت نمی‌کنند. در این صورت، به گره‌های مخابراتی جدیدی نیاز است. تعداد بهینه این گره‌های مورد نیاز و محل قرارگیری آن‌ها مورد بحث می‌باشد.

وظیفه گره‌های مخابراتی جدید کمک به برقراری ارتباط بین همه گره‌های مخابراتی قبلی با گره مرجع است. به عبارتی این گره‌ها تنها نقش مسیریاب را در شبکه مخابراتی بازی می‌کنند و نیازی به اندازه‌گیری کمیت‌های مختلف ندارند. از طرفی در حالت کلی اندازه‌گیرها به دو گروه تقسیم می‌شوند؛ یک گروه هم عمل اندازه‌گیری را انجام داده و هم این‌که اقدام به ارسال اطلاعات بدست آمده به سایر

گره‌ها می‌کنند، اما گروه دیگر که از آن‌ها به روتر (router) یا مسیریاب نیز نام برده می‌شود تنها اقدام به دریافت و ارسال اطلاعات به گره‌های دیگر کرده و قادر به اندازه‌گیری نیستند. قاعدتاً روترها با توجه به همراه نداشتن واحد اندازه‌گیری فازوری ارزان‌تر از گروه اول هستند. بنابراین برای رسیدن به رویت‌پذیری شبکه مخابراتی در صورت نیاز به گره‌های مخابراتی جدید، با توجه به قیمت پائین‌تر از روترها استفاده می‌شود.

یکی از گره‌ها به عنوان گره مرجع انتخاب می‌شود. با توجه به این که هدف انتقال اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط اندازه‌گیرها به گره مرجع می‌باشد، این انتقال می‌تواند به صورت مستقیم و بدون واسطه یا به صورت غیرمستقیم و با واسطه انجام گیرد. با کمی دقت در حدود شعاع برد گره‌های مخابراتی و فاصله جغرافیایی آن‌ها از هم، مشخص می‌شود که احتمال برقراری ارتباط مستقیم بین همه گره‌ها با گره مرجع بسیار ناچیز است و این اتفاق به ندرت رخ می‌دهد. برای بررسی امکان برقراری ارتباط گره‌ها با هم علاوه بر شعاع برد گره‌ها، نیاز است فاصله جغرافیایی آن‌ها نیز در اختیار باشد. با در اختیار داشتن این اطلاعات، الگوریتمی طراحی می‌شود که به کمک آن بتوان امکان برقراری ارتباط تمامی گره‌ها با گره مرجع را بررسی کرد.

بردار  $R$  به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که محل قرارگیری واحدهای حسگر (بدست آمده در مسئله رویت‌پذیری شبکه قدرت) را در ناحیه جغرافیایی مشخص می‌کند. بنابراین بردار  $R$  به تعداد ناحیه‌های بدست آمده در مش‌بندی درایه خواهد داشت. در بردار  $R$  درایه متناظر با ناحیه‌های دارای گره مخابراتی برابر با شعاع برد گره و سایر درایه‌ها که مربوط به نواحی فاقد گره مخابراتی می‌باشند صفر هستند.

$$R = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ \dots \ r_n]_{1 \times N_{zone}}$$

(۲۳-۳)

$$r_i = \begin{cases} r & \text{with wireless sensor} \\ 0 & \text{without wireless sensor} \end{cases}$$

بعنوان مثال برای شبکه توزیع ۷ باسه با توجه به شکل ۳-۳، بردار R با فرض شعاع برد یک کیلومتری

برای همه گره‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود: ( $r=1 km$ )

$$R=[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

فاصله ناحیه‌های مختلف با یکدیگر در ماتریسی مربعی مانند ماتریس L مشخص می‌شود. ابعاد این

ماتریس وابسته به تعداد ناحیه‌های مش‌بندی و برابر با  $N_{zone} \times N_{zone}$  می‌باشد.

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \quad (24-3)$$

دو ناحیه فرضی i و j در صورت برقراری همزمان دو شرط زیر با هم در ارتباط هستند:

۱- هر دو ناحیه دارای گره مخابراتی باشند. به عبارتی  $r_i \neq 0$  &  $r_j \neq 0$ .

۲- گره مخابراتی واقع در هر کدام از ناحیه‌ها در شعاع برد گره مخابراتی واقع در ناحیه دیگر قرار

داشته باشد. به عبارتی  $r_i \geq L_{i,j}$  &  $r_j \geq L_{i,j}$ .

با بررسی این دو شرط می‌توان ارتباط هر دو ناحیه فرضی i و j را مطابق رابطه (۲۵-۳) بررسی کرد و

به ماتریسی رسید که ارتباط ناحیه‌های مختلف با یکدیگر را نشان می‌دهد.

$$\begin{cases} r_i \neq 0 \\ r_j \neq 0 \\ r_i \geq L_{i,j} \\ r_j \geq L_{i,j} \end{cases} \Rightarrow M_{i,j} = R_i \times R_j \times (r_i \geq L_{i,j}) \times (r_j \geq L_{i,j}) \quad (25-3)$$

با توجه به فرض برابری شعاع برد همه واحدهای حسگر بیان ماتریسی رابطه (۲۵-۳) به صورت زیر

می‌باشد. ماتریس M، ماتریس تلاقی گره گره مخابراتی نامیده می‌شود.

$$M_{i,j} = R_i \times R_j \times (r_i \geq L_{i,j}) \times (r_j \geq L_{i,j}) \xrightarrow{r_i=r_j} M = R' \times R \times (r \geq L) \quad (26-3)$$

از طرفی همان گونه که در بخش تئوری گراف اشاره شد ماتریس تلاقی گره گره همان ماتریس  $M_1$  است. بنابراین:

$$M_1 = M = R' \times R \times (r \geq L) \quad (27-3)$$

بعنوان مثال برای شبکه توزیع ۷ باسه، ماتریس تلاقی گره گره مخابراتی چنین است:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

برای بررسی رویت پذیری شبکه مخابراتی از قضیه سطح اتصال استفاده می شود.

طبق تعریف، شبکه مخابراتی زمانی رویت پذیر است که تمامی گره های مخابراتی با گره مرجع در ارتباط باشند. به عبارتی این گره ها نسبت به گره مرجع در حالت جزیره نباشند. با توجه به قضیه سطح اتصال برای تشخیص گره های جزیره از ماتریس  $M_{n-1}$  استفاده می شود.

با توجه به رابطه (۳-۴) به ازای  $n$  های مختلف می توان چنین نوشت:

$$\begin{aligned} \text{if } n=2 &\Rightarrow M_2 = \text{sign}(M_1 \times M_1) = \text{sign}(M_1^2) \\ \text{if } n=3 &\Rightarrow M_3 = \text{sign}(M_2 \times M_1) = \text{sign}(M_1^3) \\ &\vdots \\ \text{if } n=n-1 &\Rightarrow M_{n-1} = \text{sign}(M_{n-2} \times M_1) = \text{sign}(M_1^{n-1}) \end{aligned} \quad (28-3)$$

شماره ناحیه‌ای که گره مرجع در آن قرار دارد با S بیان می‌شود. اگر Z مجموعه شامل کل ناحیه‌های دارای گره مخابراتی (مورد نیاز برای رویت‌پذیری شبکه قدرت) تعریف شود، برای رویت‌پذیری شبکه مخابراتی کافی است رابطه زیر برقرار باشد. این رابطه در واقع شرط رویت‌پذیری گره j توسط گره S را بیان می‌کند.

$$M_{n-1s,j} = 1 \quad \forall j \in Z \quad (29-3)$$

اگر این شرط برقرار باشد، شبکه مخابراتی رویت‌پذیر است. در غیر این صورت برای رویت‌پذیر شدن شبکه مخابراتی نیاز به نصب تعدادی روتر در برخی ناحیه‌ها وجود دارد. در نهایت می‌توان مسئله بهینه‌سازی را به صورت زیر فرمول‌بندی کرد:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_i R_i \\ \text{s.t.} \quad & M_{n-1s,j} = 1 \quad \forall j \in Z \\ & R_j = 1 \quad \forall j \in Z \end{aligned} \quad (30-3)$$

برای حل این مسئله و رسیدن به تعداد روتر بهینه و موقعیت مناسب نصب آن‌ها در ناحیه جغرافیایی، از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. بعنوان مثال برای شبکه توزیع ۷ باسه، ماتریس  $M_{n-1}$  به صورت زیر است:

$$M_{n-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

همان گونه که در ماتریس  $M_{n-1}$  مشاهده می شود شرط رویت پذیری برقرار نیست.

$$\begin{cases} M_{n-1}(5,5) = 1 \\ M_{n-1}(5,8) = 0 \end{cases}$$

به کمک الگوریتم ژنتیک مسئله بهینه سازی (۳-۳۰) برای شبکه توزیع ۷ باسه حل می شود. در نتیجه مشخص می شود که برای رویت پذیری شبکه مخابراتی تنها به یک روتر نیاز است که موقعیت نصب آن نیز در ناحیه جغرافیایی شماره ۶ می باشد. با حضور یک روتر در ناحیه ۶، ماتریس  $M_{n-1}$  به صورت زیر خواهد بود:

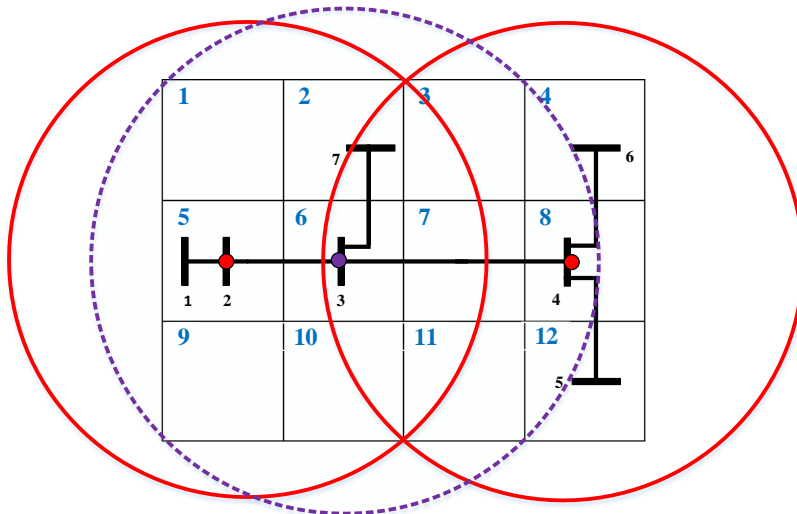
$$M_{n-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

در ماتریس  $M_{n-1}$  مشاهده می شود که شرط رویت پذیری شبکه مخابراتی برقرار است، یعنی:

$$\begin{cases} M_{n-1}(5,5) = 1 \\ M_{n-1}(5,8) = 1 \end{cases}$$

همان گونه که در شکل ۳-۴ نیز مشاهده می شود که با قرار گرفتن یک روتر در ناحیه شماره ۶، امکان انتقال اطلاعات از باس شماره ۴ به باس مرجع برقرار شده و بنابراین شبکه مخابراتی رویت پذیر می گردد.





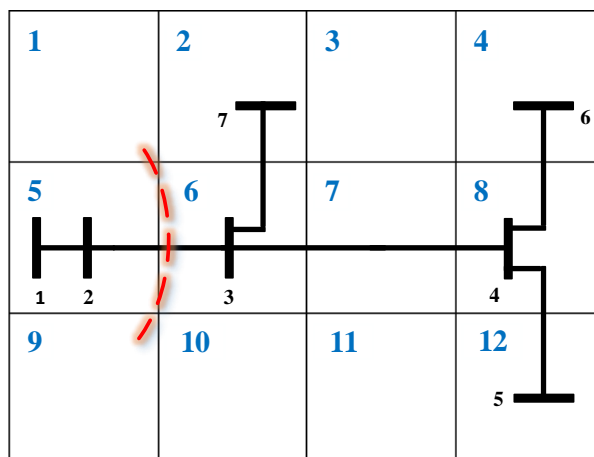
شکل ۳-۴: رویت‌پذیری شبکه مخابراتی با قرارگیری روتر در ناحیه ۶

### ۳-۳- مدل کردن محدودیت‌های جغرافیایی

در برخی از شبکه‌های توزیع بین ناحیه‌های مختلف موانع طبیعی مثل ساختمان‌های بلند وجود دارد. این موانع از برقراری ارتباط گره‌های حسگر با هم جلوگیری می‌کنند. بنابراین این گره‌ها برای برقراری ارتباط با هم باید از دیگر گره‌ها به عنوان واسط کمک بگیرند. این موضوع می‌تواند باعث افزایش کمترین تعداد گره‌های مورد نیاز برای رویت‌پذیری شبکه مخابراتی شود. برای مدل کردن این موانع در مسئله کافی است فاصله بین این چنین ناحیه‌هایی در ماتریس  $L$  بی‌نهایت فرض شود. در این صورت دو ناحیه هرگز قادر به برقراری ارتباط با هم نیستند.

$$L_{i,j} = \begin{cases} L_{i,j} & \text{بدون مانع} \\ \infty & \text{با مانع} \end{cases} \quad (3-31)$$

بعنوان مثال فرض می‌شود که در شبکه توزیع ۷ باسه بین ناحیه‌های ۵ و ۶ مانعی طبیعی وجود داشته باشد. بنابراین در ماتریس  $L$  فاصله ناحیه ۵ با نواحی ۶، ۷ و ۸ بی‌نهایت فرض می‌شود.



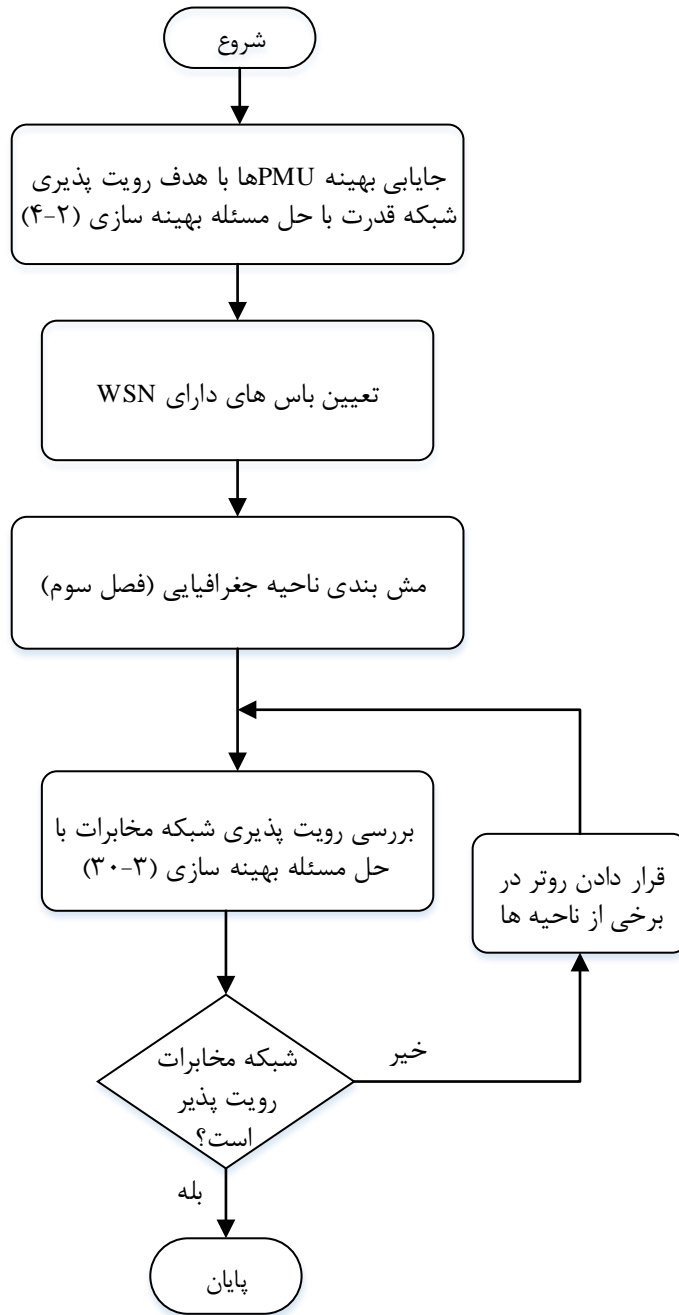
شکل ۳-۵: شبکه ۷ باسه در حضور مانع طبیعی بین ناحیه‌های ۵ و ۶

در این صورت با حل مسئله بهینه‌سازی (۳-۳۰)، چند مجموعه جواب بدست می‌آید که در تمامی آن‌ها نیاز به دو روتر وجود دارد. اختلاف این مجموعه جواب‌ها در موقعیت قرار گرفتن این دو روتر در ناحیه‌های جغرافیایی است.

جدول ۳-۱: مجموعه جواب‌های ممکن قرارگیری روترها در شبکه توزیع ۷ باسه

مجموعه جواب	ناحیه های قرارگیری روتر	
۱	۶	۹
۲	۶	۱۰
۳	۲	۴
۴	۲	۶
۵	۲	۳
۶	۲	۷
۷	۱۰	۱۱
۸	۱۰	۱۲

در انتهای این فصل با توجه به مراحل طی شده به منظور رویت‌پذیر کردن شبکه مخابرات، می‌توان فلوچارت شکل ۳-۶ را بدین منظور طراحی کرد. باید دقت داشت که روند اضافه کردن روترهای جدید به ناحیه‌های مختلف و بررسی رویت‌پذیری در هر حالت توسط الگوریتم ژنتیک انجام می‌گیرد.



شکل ۳-۶: فلوچارت پیشنهادی برای رویت پذیر کردن شبکه مخابرات



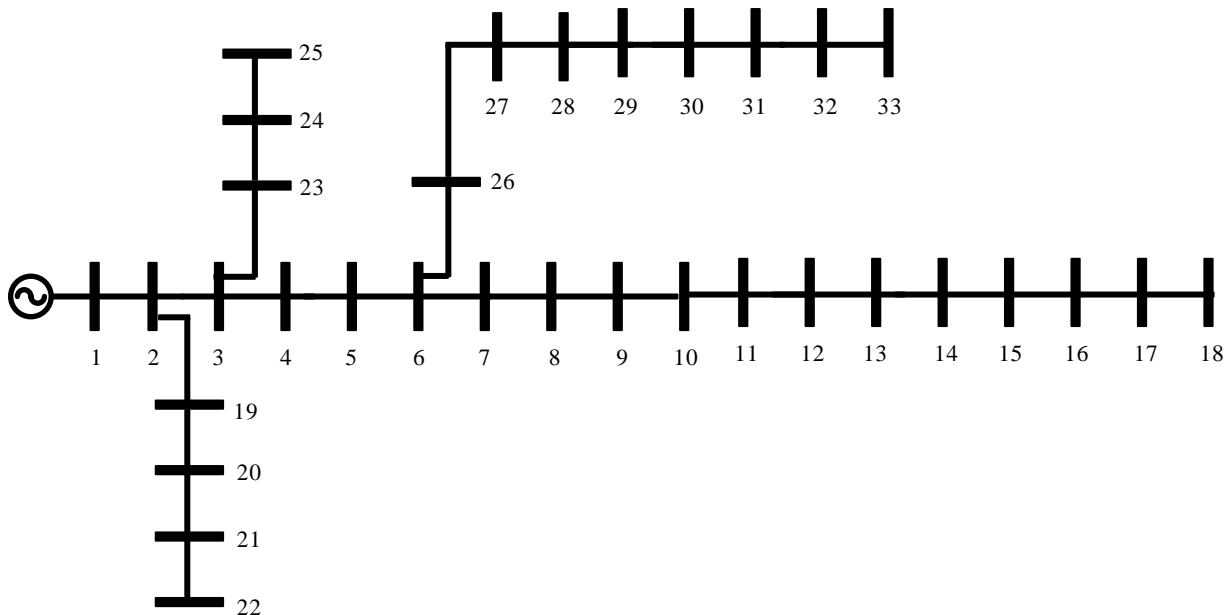
## فصل چهارم

### شبیه‌سازی و نتایج

## فصل ۴- شبیه‌سازی و نتایج

### ۴-۱- شبکه مورد مطالعه

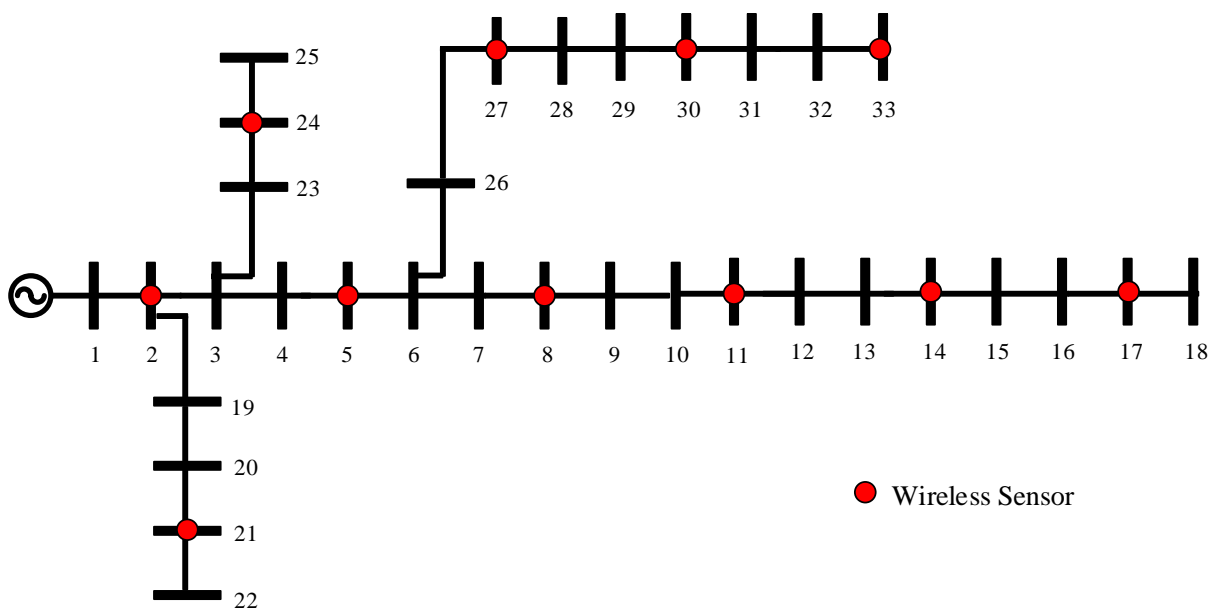
در این بخش به بررسی مباحث مطرح شده در فصول قبلی شامل رویت‌پذیری شبکه قدرت، رویت‌پذیری شبکه مخابرات و نیز بررسی رویت‌پذیری در حضور مانع طبیعی مثل یک ساختمان بلند، پخش بار به روش پیشرو پسرو و در نهایت انجام فرآیند تخمین حالت بر روی شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE پرداخته می‌شود. اطلاعات مربوط به این شبکه در پیوست ۲ آمده است.



شکل ۴-۱: شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE

### ۴-۲- رویت‌پذیری شبکه قدرت

اگر مکان‌یابی واحدهای حسگر بی‌سیم به منظور دست‌یابی به رویت‌پذیری شبکه قدرت برای شبکه توزیع ۳۳ باسه انجام شود، در مجموع ۱۱ واحد حسگر مورد نیاز خواهد بود. مکان بهینه نصب واحدهای حسگر مطابق شکل ۴-۲ باس‌های شماره ۲، ۵، ۸، ۱۱، ۱۴، ۱۷، ۲۱، ۲۴، ۲۷، ۳۰ و ۳۳ می‌باشد.



شکل ۴-۲: محل قرارگیری واحدهای حسگر بی‌سیم در شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE

### ۴-۳- رویت‌پذیری شبکه مخابراتی

برای مدل‌سازی این بخش، فرض می‌شود که واحدهای حسگر موجود دارای شعاع برد ۱ کیلومتر باشند. با توجه به این شعاع برد، طول ناحیه‌ها بدست می‌آید.

$$r = 1.5 \times (\sqrt{2} \times a) \xrightarrow{r=1km} a = 471m \quad (۱-۴)$$

با داشتن عرض و طول ناحیه جغرافیایی می‌توان مش‌بندی را انجام داد و تعداد ناحیه‌های عرضی و طولی را بدست آورد.

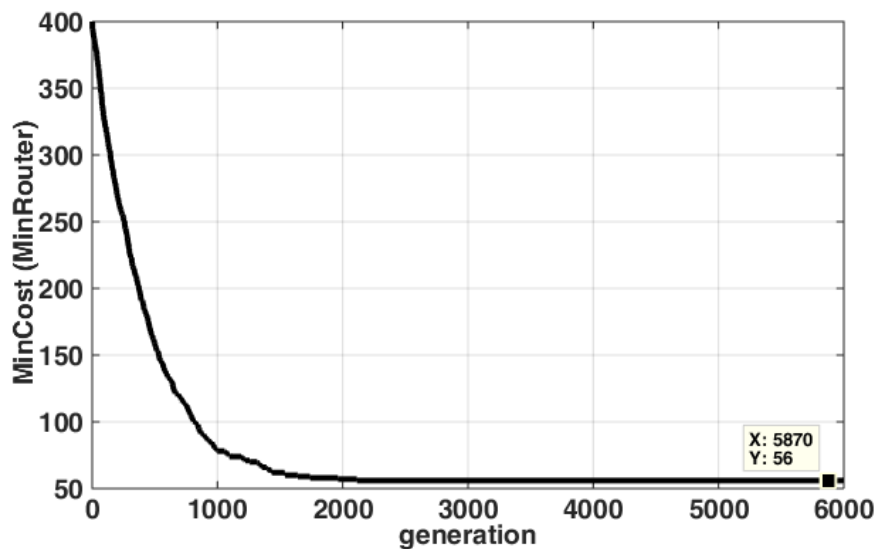
$$\begin{cases} W_1 = 9.88 \text{ km} \\ W_2 = 19.45 \text{ km} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} n_1 = \left[ \frac{W_1}{a} \right] + 1 = \left[ \frac{9.88}{0.471} \right] + 1 = 21 \\ n_2 = \left[ \frac{W_2}{a} \right] + 1 = \left[ \frac{19.28}{0.471} \right] + 1 = 41 \end{cases} \quad (۲-۴)$$

که  $n_1$  و  $n_2$  به ترتیب تعداد ناحیه‌های عرضی و طولی می‌باشد.

با توجه به تعداد ناحیه‌های عرضی و طولی، تعداد کل ناحیه‌ها برابر با ۸۶۱ می‌باشد.

$$N_{zone} = n_1 \times n_2 = 21 \times 41 = 861 \quad (3-4)$$

بنابراین بردار R دارای ۸۶۱ درایه است که با توجه به مش‌بندی صورت گرفته، درایه‌های شماره ۷، ۱۹، ۳۱، ۱۲۵، ۲۸۸، ۲۹۱، ۲۹۹، ۳۰۵، ۳۱۳، ۳۲۶ و ۶۵۷ که مربوط به ناحیه‌های دارای واحد حسگر می‌باشند برابر با ۱ و سایر درایه‌ها ۰ هستند. با تشکیل ماتریس L که ماتریسی با ابعاد ۸۶۱×۸۶۱ می‌باشد و با توجه به فرض برابری شعاع برد همه واحدهای حسگر بی‌سیم، ماتریس  $M_1$  و در نتیجه ماتریس  $M_{n-1}$  تشکیل می‌شود. مطابق انتظار ۱۱ واحد حسگر ابتدایی رویت‌پذیری شبکه مخابرات را نتیجه نمی‌دهند. به کمک الگوریتم ژنتیک و با حل مسئله بهینه‌سازی (۳-۳۰) مطابق شکل ۳-۴ مشخص می‌شود که برای دستیابی به رویت‌پذیری شبکه مخابراتی علاوه بر ۱۱ واحد حسگر ابتدایی، به ۵۶ روتر نیاز خواهد بود. قابل توجه است که الگوریتم ژنتیک در نسل‌های ابتدایی از حدود ۴۰۰ روتر شروع کرده و با افزایش نسل‌ها از حدود نسل ۲۰۰۰ به بعد به عدد ۵۶ همگرا می‌شود.



شکل ۳-۴: تعداد روتر مورد نیاز برای رویت‌پذیری شبکه مخابراتی



موقعیت قرارگیری این ۵۶ روتر در جدول ۴-۱ آمده است:

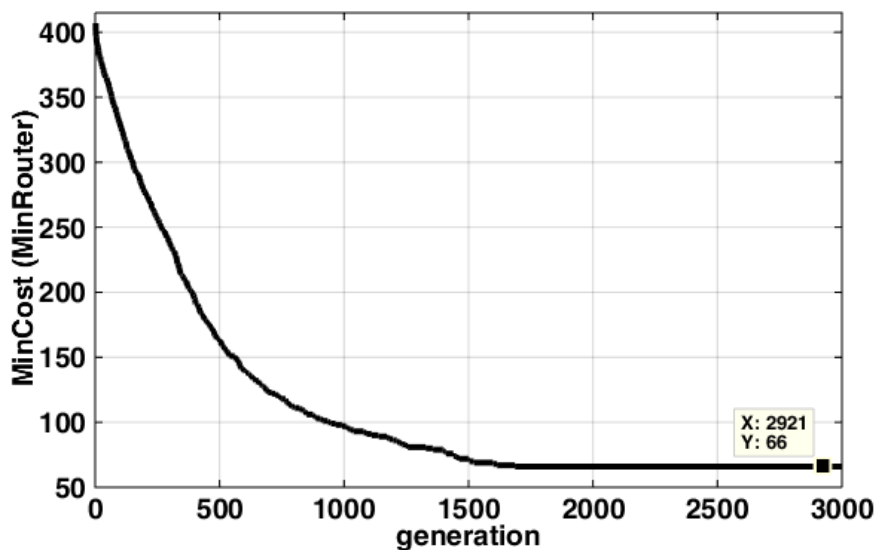
جدول ۴-۱: موقعیت قرارگیری روترها در شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE

شماره ناحیه	شماره روتر	شماره ناحیه	شماره روتر	شماره ناحیه	شماره روتر	شماره ناحیه	شماره روتر
۴۹۵	۴۳	۳۱۲	۲۹	۲۰۲	۱۵	۴۹	۱
۵۳۶	۴۴	۳۱۵	۳۰	۲۰۴	۱۶	۶۰	۲
۵۴۹	۴۵	۳۲۰	۳۱	۲۱۹	۱۷	۷۳	۳
۵۷۶	۴۶	۳۲۹	۳۲	۲۲۱	۱۸	۱۱۴	۴
۵۸۱	۴۷	۳۳۱	۳۳	۲۲۳	۱۹	۱۱۵	۵
۵۸۲	۴۸	۳۶۰	۳۴	۲۲۴	۲۰	۱۱۷	۶
۵۸۴	۴۹	۳۸۷	۳۵	۲۲۶	۲۱	۱۲۷	۷
۵۸۵	۵۰	۳۹۷	۳۶	۲۲۸	۲۲	۱۲۹	۸
۵۸۷	۵۱	۴۱۳	۳۷	۲۳۰	۲۳	۱۳۱	۹
۵۸۹	۵۲	۴۲۷	۳۸	۲۳۷	۲۴	۱۴۲	۱۰
۶۲۰	۵۳	۴۳۹	۳۹	۲۵۱	۲۵	۱۵۸	۱۱
۶۲۱	۵۴	۴۴۰	۴۰	۲۵۹	۲۶	۱۶۰	۱۲
۶۵۸	۵۵	۴۴۲	۴۱	۲۷۹	۲۷	۱۶۹	۱۳
۶۶۰	۵۶	۴۶۷	۴۲	۲۸۶	۲۸	۱۹۶	۱۴

### ۴-۳-۱- مدل کردن محدودیت‌های جغرافیایی

با قرار گرفتن مانعی طبیعی بین دو گره مخابراتی علیرغم قرار گرفتن آن‌ها در شعاع برد یکدیگر، از برقراری ارتباط بین آن‌ها ممانعت می‌شود و این دو گره برای ارتباط با هم نیاز به گره‌های واسط دارند. بنابراین می‌توان با اطمینان گفت برای رویت‌پذیر شدن شبکه مخابراتی در حالت وجود موانع طبیعی نسبت به حالت بدون موانع، تعداد روترهای مورد نیاز کمتر نیست. به عبارتی در حضور موانع طبیعی یا همان تعداد روترهای حالت بدون مانع طبیعی کافی است یا نیاز به افزودن روتر وجود دارد. برای مدل کردن، فرض می‌شود که مانعی بین ناحیه‌های ۲۸۸ و ۲۸۹ وجود داشته باشد (ناحیه شماره ۲۸۸ همان ناحیه مرجع است که گره مرجع در آن قرار دارد) که بر این اساس با اجرای الگوریتم ژنتیک، تعداد

روترهای مورد نیاز برای رویت‌پذیری شبکه مخابرات مطابق منحنی شکل ۴-۴ به ۶۶ همگرا می‌شود. در این مسئله نیز الگوریتم ژنتیک از حدود ۴۰۰ عدد روتر شروع و با افزایش نسل‌ها، از حدود نسل ۲۰۰۰ به بعد به ۶۶ روتر همگرا می‌شود.



شکل ۴-۴: تعداد روتر مورد نیاز برای رویت‌پذیری شبکه مخابراتی در حضور مانع طبیعی

همان‌گونه که مشاهده می‌شود با قرار گرفتن مانع طبیعی جلوی ناحیه مرجع، برای رسیدن به رویت‌پذیری شبکه مخابراتی به تعداد روتر بیشتری (۶۶) نسبت به حالت بدون مانع (۵۶) نیاز است. موقعیت قرارگیری این روترها در ناحیه جغرافیایی در جدول ۴-۲ آمده است. البته باید اشاره کرد که مقدار این افزایش تعداد روتر به تعداد و محل قرارگیری موانع طبیعی وابسته است.

جدول ۴-۲: موقعیت قرارگیری روترها در شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE در حضور مانع طبیعی

شماره ناحیه	شماره روتر	شماره ناحیه	شماره روتر	شماره ناحیه	شماره روتر	شماره ناحیه	شماره روتر
۴۵۱	۵۲	۳۱۰	۳۵	۱۶۹	۱۸	۲۹	۱
۴۶۵	۵۳	۳۱۲	۳۶	۱۷۱	۱۹	۳۵	۲
۴۸۶	۵۴	۳۲۲	۳۷	۱۷۹	۲۰	۳۷	۳
۴۸۸	۵۵	۳۲۴	۳۸	۱۹۰	۲۱	۳۸	۴
۵۳۰	۵۶	۳۳۰	۳۹	۲۰۴	۲۲	۵۸	۵
۵۳۲	۵۷	۳۳۸	۴۰	۲۰۹	۲۳	۶۰	۶
۵۴۶	۵۸	۳۴۵	۴۱	۲۱۳	۲۴	۶۹	۷
۵۴۷	۵۹	۳۴۸	۴۲	۲۱۵	۲۵	۷۳	۸
۵۸۰	۶۰	۳۶۲	۴۳	۲۳۱	۲۶	۷۵	۹
۵۸۲	۶۱	۳۶۹	۴۴	۲۴۵	۲۷	۸۹	۱۰
۵۸۴	۶۲	۳۸۶	۴۵	۲۵۹	۲۸	۹۷	۱۱
۵۸۶	۶۳	۳۸۸	۴۶	۲۶۱	۲۹	۹۸	۱۲
۶۵۹	۶۴	۴۲۰	۴۷	۲۶۳	۳۰	۱۰۸	۱۳
۶۶۱	۶۵	۴۲۲	۴۸	۲۸۷	۳۱	۱۰۹	۱۴
۶۶۲	۶۶	۴۲۳	۴۹	۲۸۹	۳۲	۱۲۰	۱۵
		۴۴۴	۵۰	۲۹۷	۳۳	۱۲۲	۱۶
		۴۵۰	۵۱	۳۰۸	۳۴	۱۶۷	۱۷

#### ۴-۴- پخش بار شبکه ۳۳ باسه

با توجه به این که معیار عملکرد مناسب برنامه تخمین حالت مقایسه حالت‌های تخمینی با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده می‌باشد و از طرفی برای شبکه توزیع ۳۳ باسه مورد مطالعه اطلاعات اندازه‌گیری شده ولتاژ، جریان و توان در دسترس نیست از پخش بار استفاده می‌شود. در واقع خروجی‌های برنامه پخش بار مبنای واقعی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین به کمک پخش بار جاروب پیشرو پسر، مقدار

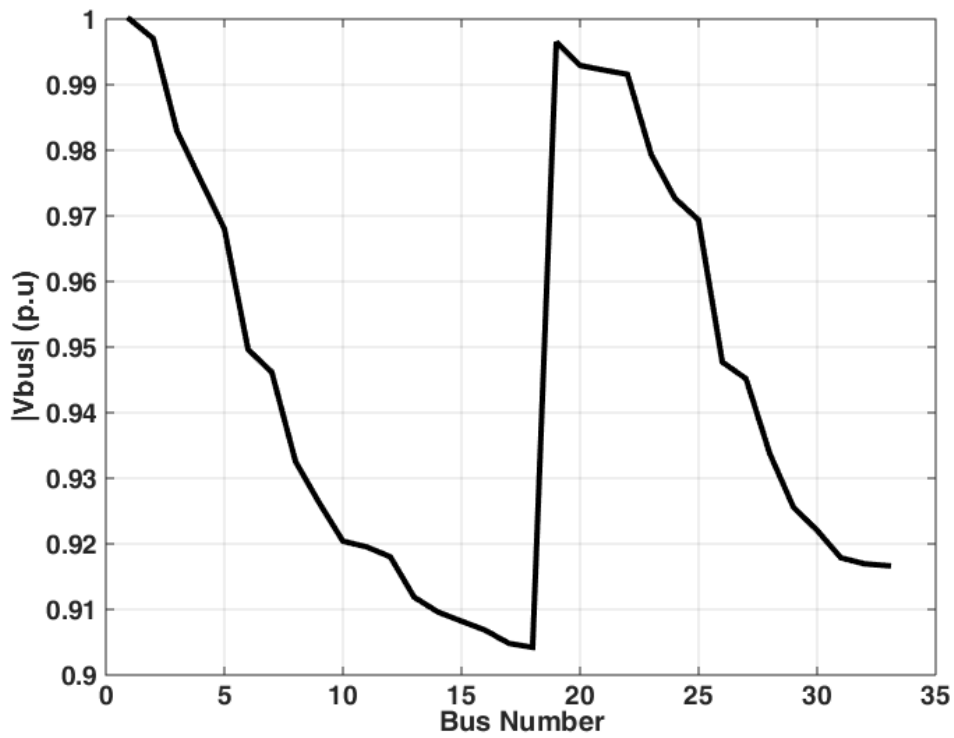
ولتاژها، جریان‌ها و توان‌های شبکه محاسبه می‌شود. نتایج حاصل از پخش بار پیشرو پسر و برای شبکه ۳۳ باسه IEEE در جدول ۳-۴ آمده است.

جدول ۳-۴: نتایج حاصل از پخش بار شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE

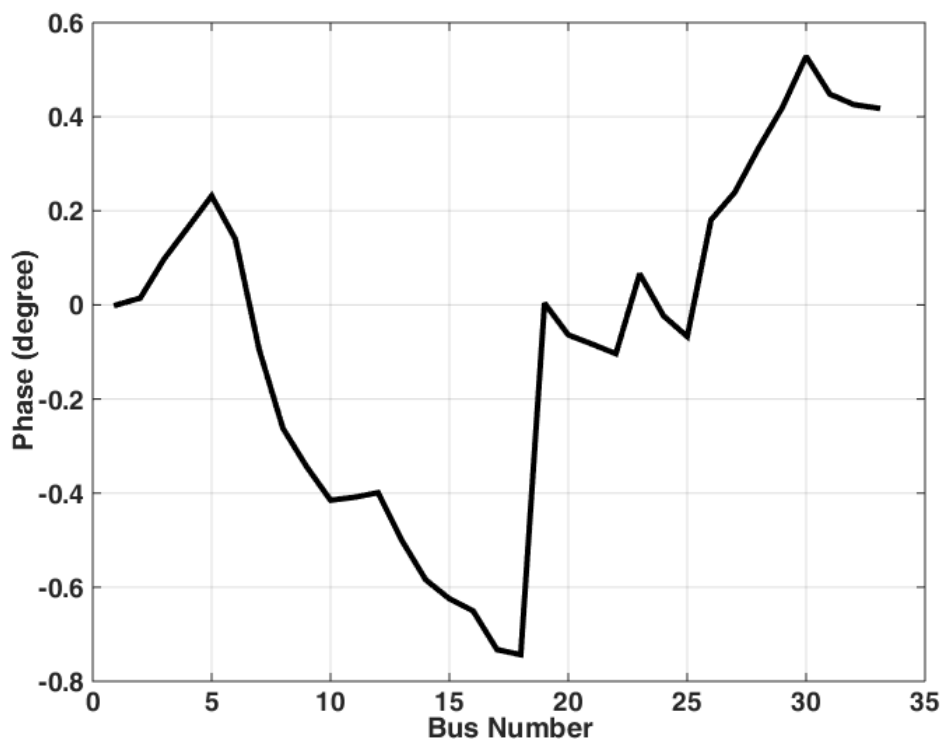
شماره باس	دامنه ولتاژ باس (پریونیت)	زاویه ولتاژ باس (درجه)	شماره باس	دامنه ولتاژ باس (پریونیت)	زاویه ولتاژ باس (درجه)
۱	۱	۰	۱۸	۰/۹۰۴۲	-۰/۷۴۳۴
۲	۰/۹۹۷۰	۰/۰۱۴۷	۱۹	۰/۹۹۶۵	۰/۰۰۳۸
۳	۰/۹۸۲۹	۰/۰۹۷۵	۲۰	۰/۹۹۲۹	-۰/۰۶۳۸
۴	۰/۹۷۵۵	۰/۱۶۴۲	۲۱	۰/۹۹۲۲	-۰/۰۸۳۳
۵	۰/۹۶۸۱	۰/۲۳۱۸	۲۲	۰/۹۹۱۶	-۰/۱۰۳۸
۶	۰/۹۴۹۶	۰/۱۳۹۵	۲۳	۰/۹۷۹۴	۰/۰۶۶۳
۷	۰/۹۴۶۲	-۰/۰۹۵۰	۲۴	۰/۹۷۲۷	-۰/۰۲۳۱
۸	۰/۹۳۲۶	-۰/۲۶۲۳	۲۵	۰/۹۶۹۴	-۰/۰۶۷۲
۹	۰/۹۲۶۳	-۰/۳۴۴۲	۲۶	۰/۹۴۷۷	۰/۱۸۰۷
۱۰	۰/۹۲۰۴	-۰/۴۱۵۱	۲۷	۰/۹۴۵۲	۰/۲۳۹۲
۱۱	۰/۹۱۹۵	-۰/۴۰۸۸	۲۸	۰/۹۳۳۸	۰/۳۳۳۳
۱۲	۰/۹۱۸۰	-۰/۳۹۹۰	۲۹	۰/۹۲۵۶	۰/۴۱۹۶
۱۳	۰/۹۱۱۹	-۰/۵۰۰۶	۳۰	۰/۹۲۲۱	۰/۵۲۸۴
۱۴	۰/۹۰۹۶	-۰/۵۸۴۱	۳۱	۰/۹۱۷۹	۰/۴۴۸۰
۱۵	۰/۹۰۸۲	-۰/۶۲۴۷	۳۲	۰/۹۱۷۰	۰/۴۲۵۸
۱۶	۰/۹۰۶۸	-۰/۶۵۰۵	۳۳	۰/۹۱۶۷	۰/۴۱۸۳
۱۷	۰/۹۰۴۸	-۰/۷۳۲۶			

پروفیل ولتاژ و زاویه ولتاژ باس‌های شبکه ۳۳ باسه بدست آمده از برنامه پخش بار به روش پیشرو

پسر و در ادامه آمده است:



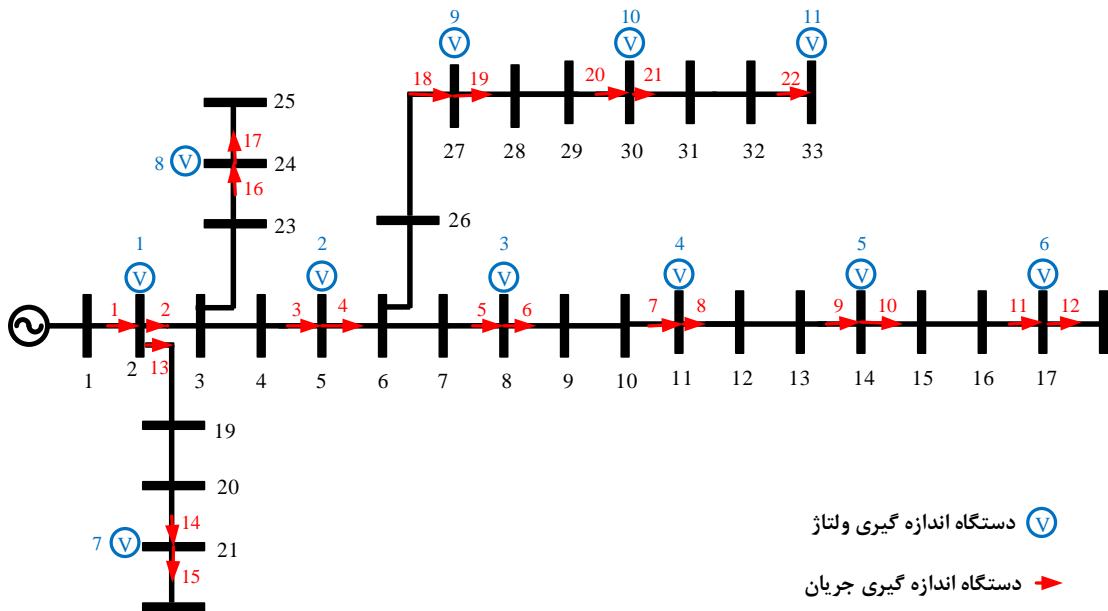
شکل ۴-۵: دامنه ولتاژ باس‌های شبکه ۳۳ باسه IEEE حاصل از پخش بار



شکل ۴-۶: زاویه ولتاژ باس‌های شبکه ۳۳ باسه IEEE حاصل از پخش بار

#### ۴-۵- تخمین حالت شبکه ۳۳ باسه

با توجه به نتیجه بدست آمده برای جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری به منظور رویت‌پذیری شبکه قدرت، ابتدا ۱۱ واحد حسگر بی‌سیم در باس‌های مورد نظر مستقر می‌شود. با توجه به این‌که هر واحد حسگر ولتاژ فازوری باس و جریان فازوری شاخه‌های متصل به آن باس را اندازه‌گیری می‌کند، کدام از این واحدهای حسگر مطابق شکل ۴-۷ به دستگاه‌های اندازه‌گیری ولتاژ و جریان تقسیم می‌شود. بنابراین با توجه به موقعیت قرارگیری واحدهای حسگر در باس‌های شبکه، در کل ۱۱ اندازه‌گیر ولتاژ و ۲۲ اندازه‌گیر جریان وجود دارد.



شکل ۴-۷: دستگاه‌های اندازه‌گیری موجود در شبکه ۳۳ باسه IEEE توسط واحدهای حسگر بی‌سیم

با توجه به این‌که مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری ( $Z_{meas}$ ) در دسترس نیست، از مقادیر بدست آمده در پخش بار ( $Z_{real}$ ) استفاده می‌شود. برای این کار انحراف معیار دستگاه‌های اندازه‌گیری نیز مد نظر قرار داده شده و ماتریس ( $Z_{meas}$ ) که یک ماتریس  $۶۶ \times ۱$  می‌باشد تشکیل داده می‌شود.

$$Z_{meas} = Z_{real} + (rand \times \sigma) \quad (4-4)$$

ساختار ماتریس  $Z_{meas}$  به صورت زیر می باشد:

$$Z_{meas} = \begin{bmatrix} [V_{bus_{real}}]_{11 \times 1} \\ [V_{bus_{imag}}]_{11 \times 1} \\ [I_{br_{real}}]_{22 \times 1} \\ [I_{br_{imag}}]_{22 \times 1} \end{bmatrix}_{66 \times 1} \quad (5-4)$$

ماتریس کوواریانس یک ماتریس قطری  $66 \times 66$  است که همه درایه های قطری آن مجذور انحراف معیار دستگاه های اندازه گیری و همگی برابر با  $10^{-8} \times 8$  فرض می شود. با توجه به دقت اندازه گیری بالای واحدهای اندازه گیری فازوری انحراف معیار این دستگاه های اندازه گیری خیلی کوچک است.

در این مسئله، متغیرهای حالت ولتاژ مختلط باس ها هستند. بردار متغیرهای حالت به دو بخش قسمت حقیقی و قسمت موهومی ولتاژ مختلط باس ها تقسیم می شود.

$$X = \begin{bmatrix} [V_{re}]_{33 \times 1} \\ [V_{im}]_{33 \times 1} \end{bmatrix}_{66 \times 1} \quad (6-4)$$

ماتریس  $H$  که رابطه بین کمیت های اندازه گیری شده و متغیرهای حالت را بیان می کند، یک ماتریس  $66 \times 66$  است.

$$H = \begin{bmatrix} [H_{V_{bus_{re}}}]_{11 \times 66} \\ [H_{V_{bus_{im}}}]_{11 \times 66} \\ [H_{I_{br_{re}}}]_{22 \times 66} \\ [H_{I_{br_{im}}}]_{22 \times 66} \end{bmatrix}_{66 \times 66} \quad (7-4)$$

بنابراین با توجه به رابطه (4-8) به تخمین بردار متغیرهای حالت پرداخته می شود:

$$X^{est} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} Z \quad (8-4)$$

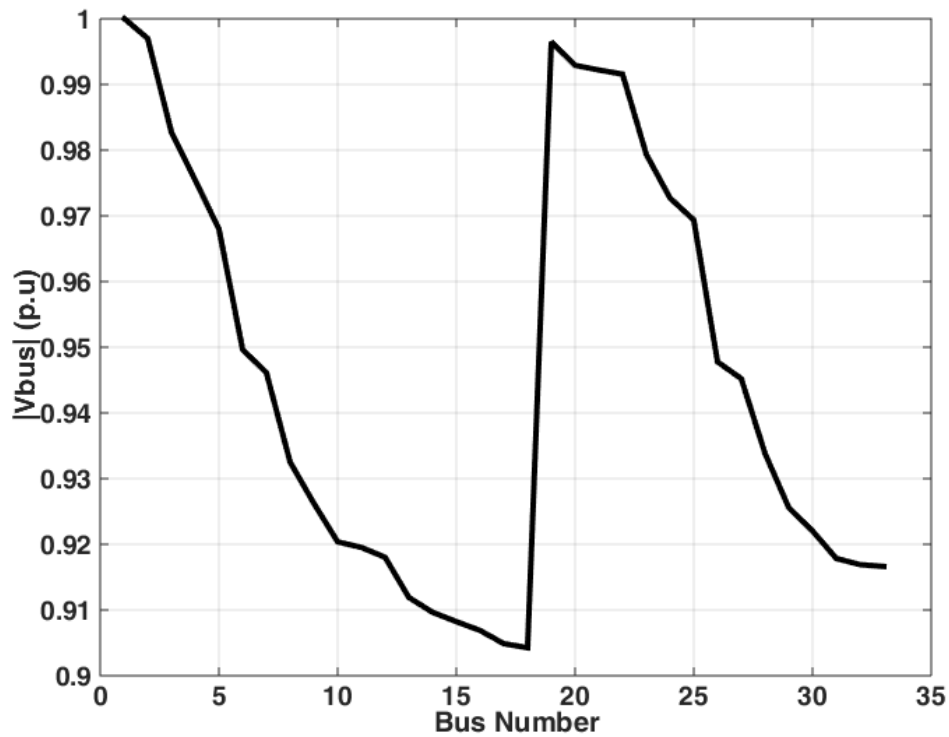
نتایج حاصل از تخمین حالت خطی برای شبکه ۳۳ باسه IEEE در جدول ۴-۴ آمده است:

جدول ۴-۴: مقدار تخمین زده شده دامنه و زاویه ولتاژ باس‌های شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE

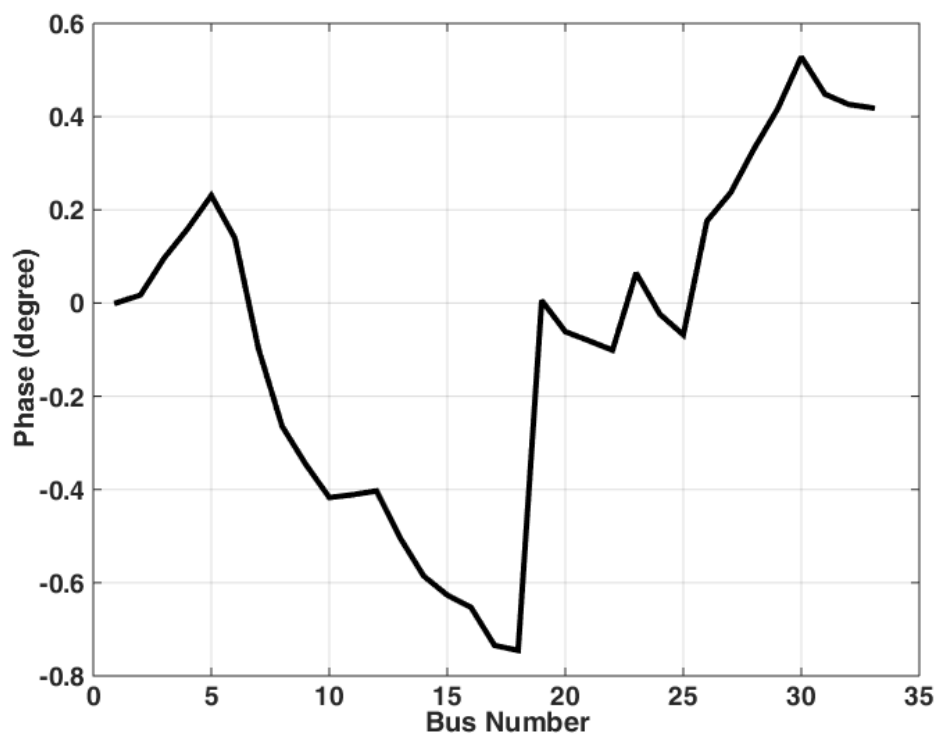
شماره باس	دامنه ولتاژ باس (پریونیت)	زاویه ولتاژ باس (درجه)	شماره باس	دامنه ولتاژ باس (پریونیت)	زاویه ولتاژ باس (درجه)
۱	۱	۰/۰۰۰۶	۱۸	۰/۹۰۴۳	-۰/۷۴۵۳
۲	۰/۹۹۷۰	۰/۰۱۷۲	۱۹	۰/۹۹۶۵	۰/۰۰۵۶
۳	۰/۹۸۲۷	۰/۰۹۶۴	۲۰	۰/۹۹۲۹	-۰/۰۶۱۴
۴	۰/۹۷۵۴	۰/۱۵۹۶	۲۱	۰/۹۹۲۲	-۰/۰۸۰۸
۵	۰/۹۶۸۰	۰/۲۳۰۸	۲۲	۰/۹۹۱۶	-۰/۱۰۱۱
۶	۰/۹۴۹۶	۰/۱۳۹۰	۲۳	۰/۹۷۹۴	۰/۰۶۴۶
۷	۰/۹۴۶۱	-۰/۰۹۷۹	۲۴	۰/۹۷۲۷	-۰/۰۲۳۶
۸	۰/۹۳۲۵	-۰/۲۶۴۲	۲۵	۰/۹۶۹۴	-۰/۰۶۸۳
۹	۰/۹۲۶۲	-۰/۳۴۵۸	۲۶	۰/۹۴۷۸	۰/۱۷۶۱
۱۰	۰/۹۲۰۴	-۰/۴۱۷۳	۲۷	۰/۹۴۵۲	۰/۲۳۶۴
۱۱	۰/۹۱۹۵	-۰/۴۱۱۳	۲۸	۰/۹۳۳۸	۰/۳۳۱۴
۱۲	۰/۹۱۸۰	-۰/۴۰۳۱	۲۹	۰/۹۲۵۶	۰/۴۱۶۹
۱۳	۰/۹۱۱۹	-۰/۵۰۳۸	۳۰	۰/۹۲۲۰	۰/۵۲۸۲
۱۴	۰/۹۰۹۶	-۰/۵۸۵۸	۳۱	۰/۹۱۷۹	۰/۴۴۸۲
۱۵	۰/۹۰۸۲	-۰/۶۲۶۷	۳۲	۰/۹۱۶۹	۰/۴۲۶۳
۱۶	۰/۹۰۶۹	-۰/۶۵۲۶	۳۳	۰/۹۱۶۶	۰/۴۱۸۸
۱۷	۰/۹۰۴۹	-۰/۷۳۴۵			

پروفیل ولتاژ و زاویه ولتاژ باس‌های شبکه بدست آمده از برنامه تخمین حالت نیز در ادامه آمده است:



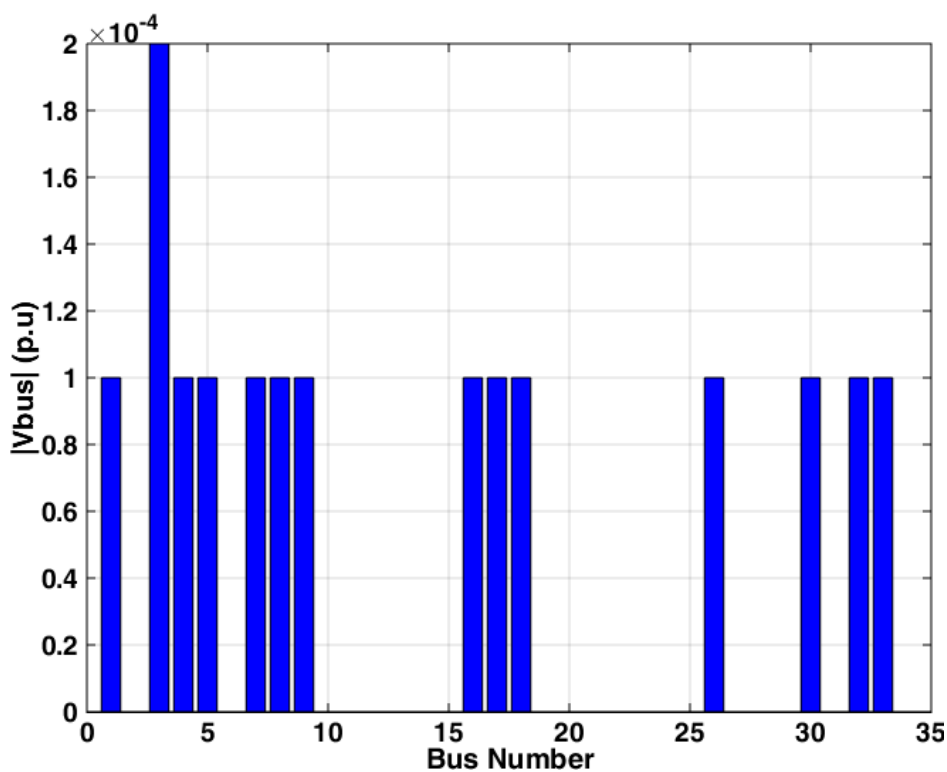


شکل ۴-۸: دامنه ولتاژهای تخمین زده شده باس‌های شبکه ۳۳ باسه IEEE

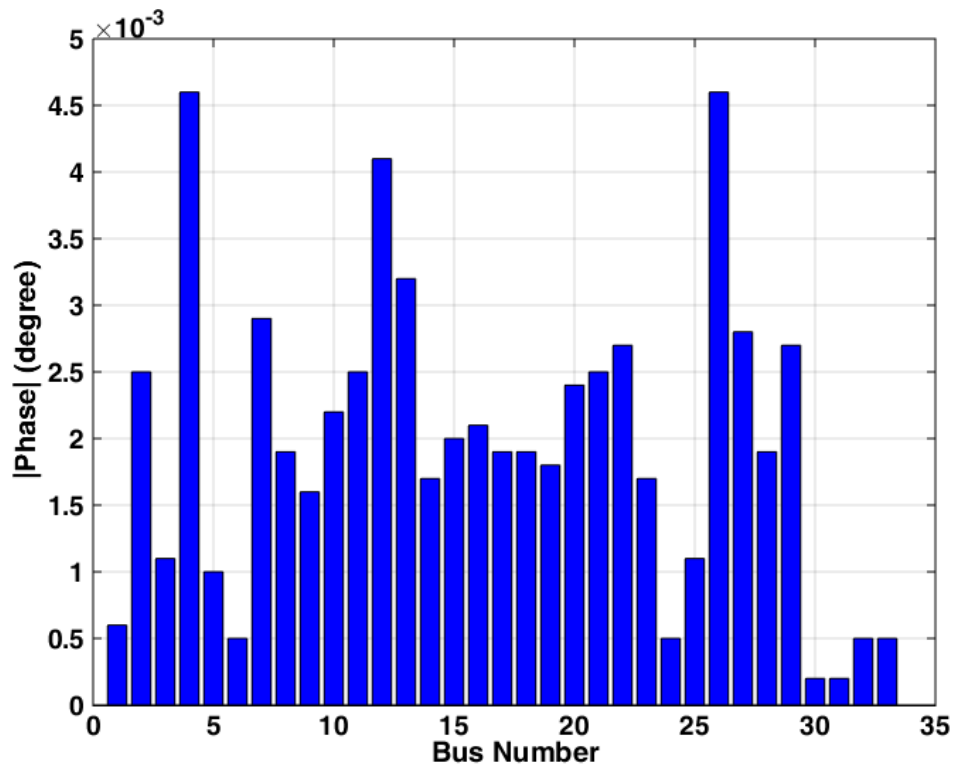


شکل ۴-۹: زاویه ولتاژهای تخمین زده شده باس‌های شبکه ۳۳ باسه IEEE

برای اطمینان از صحت و دقت بالای مقادیر تخمینی برای اندازه و زاویه ولتاژ باس‌ها، مقدار خطای آن‌ها نسبت به مقادیر حاصل از پخش بار محاسبه شده و در شکل ۴-۱۰ و شکل ۴-۱۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حداکثر خطا در تخمین اندازه و زاویه ولتاژ باس‌ها به ترتیب برابر با ۰/۰۲ درصد و ۰/۵ درصد می‌باشد. بنابراین مقادیر تخمینی از دقت بالایی برخوردار هستند که این میزان دقت با توجه به دقت بالای واحدهای اندازه‌گیری فازوری مورد انتظار می‌باشد.



شکل ۴-۱۰: مقدار خطای تخمین حالت برای اندازه ولتاژ باس‌های شبکه



شکل ۴-۱۱: مقدار خطای تخمین حالت برای زاویه ولتاژ باس های شبکه



## فصل پنجم

### نتیجه گیری و پیشنهادات

## فصل ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

### ۵-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه به معرفی شبکه حسگر بی‌سیم و کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف، معرفی واحدهای اندازه‌گیری فازوری، خصوصیات خاص آن‌ها در اندازه‌گیری زاویه ولتاژ و جریان و کاربرد آن‌ها در مسئله تخمین حالت به منظور نظارت، مدیریت و کنترل لحظه‌ای بر شبکه پرداخته شد. با توجه به این‌که هر واحد حسگر خود دارای واحد اندازه‌گیری فازوری نیز می‌باشد، مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری با هدف رویت‌پذیری شبکه قدرت مطرح و با حل آن تعداد بهینه واحدهای حسگر بی‌سیم و موقعیت قرارگیری آن‌ها در باس‌های شبکه مشخص شد. مسئله تخمین حالت شبکه توزیع در حالتی که تنها از واحدهای اندازه‌گیری فازوری به منظور رویت‌پذیری شبکه قدرت استفاده شود فرمول‌بندی شد. نتایج حاصل از تخمین حالت بر روی شبکه ۳۳ باسه IEEE، دقت بالای تخمین را نشان داد که با توجه به دقت بالای اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط واحدهای اندازه‌گیری فازوری قابل پیش‌بینی نیز بود.

با توجه به هدف اصلی این پایان‌نامه یعنی تعامل رویت‌پذیری شبکه قدرت و رویت‌پذیری شبکه مخابرات، پس از رویت‌پذیر شدن شبکه قدرت و تعیین باس‌های دارای واحد حسگر، برای رویت‌پذیر کردن شبکه مخابرات با استفاده از تئوری گراف قضیه سطح اتصال برای اولین بار مطرح و به کمک اصل استقرای ریاضی به اثبات آن پرداخته شد. با توجه به موقعیت جغرافیایی شبکه توزیع، فاصله باس‌ها، موقعیت قرارگیری واحدهای حسگر مورد نیاز برای رویت‌پذیری شبکه قدرت و نیز شعاع برد واحدهای حسگر و با استفاده از قضیه سطح اتصال ارائه شده الگوریتمی طراحی شد که با مش‌بندی ناحیه جغرافیایی و طرح یک مسئله بهینه‌سازی مناسب به بررسی رویت‌پذیری شبکه مخابراتی می‌پردازد.

بدین صورت که اگر گره‌های حسگر بدست آمده به منظور رویت‌پذیری شبکه قدرت، برای رویت‌پذیری شبکه مخابراتی کافی نباشند تعدادی گره مسیریاب (روتر) در برخی نواحی نصب خواهد شد.

علاوه بر این محدودیت‌های جغرافیایی موجود در شبکه توزیع نظیر ساختمان‌های بلند که از ارتباط واحدهای حسگر بی‌سیم با یکدیگر جلوگیری می‌کنند نیز مدل شد. در نهایت الگوریتم ارائه شده روی شبکه فرضی ۷ باسه و ۳۳ باسه IEEE پیاده‌سازی شد که نتایج حاصل بیان‌گر کارایی مناسب این الگوریتم می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده در شبکه توزیع فرضی ۷ باسه، علاوه بر دو واحد حسگر مورد نیاز برای رویت‌پذیری شبکه قدرت، به دو مسیریاب برای رویت‌پذیر شدن شبکه مخابرات نیاز می‌باشد.

بر اساس نتایج بدست آمده در شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE برای رویت‌پذیری شبکه قدرت نیاز به نصب حداقل ۱۱ گره حسگر می‌باشد. با توجه به ابعاد ناحیه جغرافیایی و شعاع برد واحدهای حسگر مشخص شد که این تعداد گره حسگر رویت‌پذیری شبکه مخابرات را نتیجه نمی‌دهد. بنابراین نیاز به نصب تعدادی مسیریاب وجود دارد. با حل مسئله بهینه‌سازی طرح شده به کمک الگوریتم ژنتیک مشخص شد که برای رویت‌پذیر شدن شبکه مخابرات حداقل به ۵۶ مسیریاب نیاز است. در نهایت برای بررسی تأثیر محدودیت‌های جغرافیایی بر تعداد مسیریاب‌ها، با مدل کردن یک مانع طبیعی بین دو ناحیه از شبکه مشخص شد که به ۶۶ مسیریاب نیاز است. این افزایش تعداد مسیریاب‌ها بیان‌گر آن است که در حضور موانع طبیعی، یا همان تعداد مسیریاب مورد نیاز در حالت بدون مانع کافی است یا نیاز به افزودن مسیریاب وجود دارد، که البته این موضوع بستگی به تعداد موانع طبیعی و موقعیت قرارگیری آن‌ها در ناحیه جغرافیایی دارد.

## ۵-۲- پیشنهادات

با توجه به مباحث مطرح شده در این پایان‌نامه برای مطالعه بیشتر در این راستا و انجام کارهای بعدی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- بازیابی اطلاعات از دست رفته برخی واحدهای حسگر بی‌سیم: ممکن است اطلاعات برخی از واحدهای حسگر بی‌سیم بدلیلی هم‌چون خرابی تجهیزات اندازه‌گیری یا تجهیزات مخابراتی گره حسگر از دست برود، این امر می‌تواند رویت‌پذیری شبکه قدرت و مخابرات را مختل کند. بنابراین باید تدبیری اندیشید که بتوان با استفاده از اطلاعات دیگر گره‌های موجود در شبکه، شبکه را رویت‌پذیر کرده و فرآیند تخمین حالت را انجام داد.

۲- اندازه‌گیرهای بحرانی: اندازه‌گیرهای بحرانی در یک سیستم اسکادا اندازه‌گیری‌هایی هستند که با نبود آن‌ها رویت‌پذیری شبکه به طور کامل از بین می‌رود. مطالعه برای یافتن این اندازه‌گیرهای بحرانی در شبکه و جایگذاری توسط واحدهای اندازه‌گیری فازوری می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

۳- برد متغیر گره‌های حسگر بی‌سیم: در این پایان‌نامه شعاع برد تمامی گره‌های حسگر بی‌سیم برابر فرض شده‌اند. بعنوان پیشنهاد می‌توان این گره‌های حسگر را به دو گروه برد کوتاه و برد بلند تقسیم کرده و رویت‌پذیری شبکه مخابراتی را در این حالت بررسی کرد که در این صورت با توجه به قیمت متفاوت گره‌های حسگر برد کوتاه و برد بلند تابع هزینه دو قسمتی خواهد شد.

۴- تعریف افزونگی برای رویت‌پذیری شبکه مخابرات: می‌توان برای همه یا برخی از باس‌های حساس و مهم که دارای واحد اندازه‌گیری فازوری هستند افزونگی در ارسال اطلاعات به گره مرجع تعریف کرد که بتواند اطلاعات اندازه‌گیری شده خود را از طریق دو یا تعداد بیشتری مسیر به گره مرجع برساند. عبارت دیگر برای رویت‌پذیری مخابراتی چنین گره‌هایی حداقل تعداد مسیر رویت‌پذیری قائل شد.



## پیوست ۱: پخش بار پیشرو پسرو

در میان روش‌های پخش بار ارائه شده، روش پخش بار جاروب پیشرو پسرو بر مبنای ساختار شعاعی شبکه توزیع عمل می‌کند. دو مرحله مورد استفاده در این روش شامل جاروب پیشرو و جاروب پسرو می‌باشد.

### جاروب پیشرو

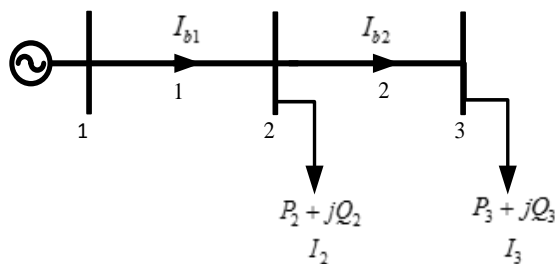
در این مرحله با داشتن جریان شاخه‌ها از تکرار قبلی و کمک گرفتن از ساختار شعاعی شبکه توزیع، ولتاژ باس‌ها از باس مرجع یا همان پست توزیع به سمت انتهای فیدر برورسانی می‌شود.

### جاروب پسرو

در این مرحله برخلاف مرحله قبل از سمت انتهای فیدر به سمت باس مرجع حرکت کرده و به کمک ولتاژهای بدست آمده در مرحله قبل جریان شاخه‌ها برورسانی می‌شود. با تکرار این دو مرحله پخش بار شبکه توزیع صورت می‌گیرد.

### تحلیل روش

به منظور تحلیل این نوع پخش بار شبکه فرضی زیر در نظر گرفته می‌شود که در آن شماره شاخه‌ها و باس‌ها مشخص است. ولتاژ باس‌ها با نماد  $V_n$ ، جریان بار باس‌ها با نماد  $I_n$  و جریان شاخه‌ها با نماد  $V_{bn}$  بیان شده است.



شکل ۱: شبکه شعاعی فرضی

در ابتدا ولتاژ همه باس‌ها ۱ پریونیت فرض می‌شود.

$$V_1 = V_2 = \dots = V_n = 1 \text{ p.u.} \quad (1)$$

با توجه به توان مصرفی بار در هر باس، جریان هر نقطه بار تعیین می‌شود. در صورتی که توان مصرفی بارها در اختیار نبود می‌توان از اطلاعات گذشته استفاده کرد.

$$I_n = \left( \frac{S_n}{V_n} \right)^* = \frac{P_n - jQ_n}{V_n^*} \quad (2)$$

با داشتن جریان بار در همه باس‌ها، از انتهای فیدر به سمت باس مرجع حرکت کرده و با اعمال قانون جریان گره (KCL) برای هر باس جریان تمامی شاخه‌های شبکه محاسبه می‌گردد.

$$I_{bn} = I_{b(n+1)} + I_{n+1} \quad (3)$$

پس از محاسبه جریان شاخه‌ها و با توجه به امپدانس آن‌ها ( $Z_n$ ) افت ولتاژ هر شاخه محاسبه می‌شود. با توجه به این که ولتاژ باس مرجع همواره ۱ پریونیت است از باس مرجع شروع و با داشتن افت ولتاژ شاخه‌ها ولتاژ باس‌های دیگر بروز می‌شود.

$$V_{n+1} = V_n - \Delta V_n = V_n - Z_n I_{bn} \quad (4)$$

حال مطابق رابطه ۳ جریان بار باس‌ها بروز می‌شود. ولتاژهای مورد استفاده در این رابطه برخلاف مرحله قبل ۱ پریونیت نبوده و ولتاژهای بروزسانی شده می‌باشد. با توجه به این جریان‌ها، جریان شاخه‌ها بروز شده و پس از محاسبه افت ولتاژ در هر شاخه مشابه قبل از سمت باس مرجع شروع و ولتاژ باس‌ها بروز می‌شود. همین روند تا برآورده شدن معیار همگرایی ادامه می‌یابد.

## پیوست ۲: اطلاعات شبکه ۳۳ باسه IEEE

اطلاعات مربوط به مقاومت و راکتانس خطوط و نیز بار موجود در باس‌های شبکه ۳۳ باسه IEEE در

جدول زیر آمده است.

جدول ۱: اطلاعات شبکه ۳۳ باسه IEEE

Sending bus	Receiving bus	R (Ohm)	X (Ohm)	Load at receiving bus	
				$P_L$ (KW)	$Q_L$ (KVAR)
1	2	0.0922	0.0470	100	60
2	3	0.4930	0.2511	90	40
3	4	0.3660	0.1864	120	80
4	5	0.3811	0.1941	60	30
5	6	0.8190	0.7070	60	20
6	7	0.1872	0.6188	200	100
7	8	0.7114	0.2351	200	100
8	9	1.0300	0.7400	60	20
9	10	1.0440	0.7400	60	20
10	11	0.1966	0.0650	45	30
11	12	0.3744	0.1238	60	35
12	13	1.4680	1.1550	60	35
13	14	0.5416	0.7129	120	80
14	15	0.5910	0.5260	60	10
15	16	0.7463	0.5450	60	20
16	17	1.2890	1.7210	60	20
17	18	0.7320	0.5740	90	40
2	19	0.1640	0.1565	90	40
19	20	1.5042	1.3554	90	40
20	21	0.4095	0.4784	90	40
21	22	0.7089	0.9373	90	40
3	23	0.4512	0.3083	90	50
23	24	0.8980	0.7091	420	200
24	25	0.8960	0.7011	420	200
6	26	0.2030	0.1034	60	25
26	27	0.2842	0.1447	60	25
27	28	1.0590	0.9337	60	20
28	29	0.8042	0.7006	120	70
29	30	0.5075	0.2585	200	600
30	31	0.9744	0.9630	150	70
31	32	0.3105	0.3619	210	100
32	33	0.3410	0.5302	60	40

- [1] A. Abur and A. Exposito Gomez, *Power System State Estimation*. 2004.
- [2] A. Hafeez, N. H. Kandil, B. Al-Omar, T. Landolsi, and A. R. Al-Ali, "Smart Home Area Networks Protocols within the Smart Grid Context," *J. Commun.*, vol. 9, no. 9, pp. 665–671, 2014.
- [3] B. Gou and R. G. Kavasseri, "Unified PMU Placement for Observability and Bad Data Detection in State Estimation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2573–2580, Nov. 2014.
- [4] H. G. Abood and V. Sreeram, "A review on phasor measurement units placement for state estimation studies," *2014 Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2014 - Proc.*, no. October, pp. 1–6, 2014.
- [5] G. Krumpholz, K. Clements, and P. Davis, "Power System Observability: A Practical Algorithm Using Network Topology," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-99, no. 4, pp. 1534–1542, Jul. 1980.
- [6] B. Gou, "Optimal Placement of PMUs by Integer Linear Programming," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1525–1526, 2008.
- [7] G. R. Tankasala, S. Sanisetty, and V. K. Vala, "Optimal Placement of Phasor Measurement Units for State Estimation using Artificial Intelligence Techniques," *International Journal*, 2012. .
- [8] G. N. Korres, P. S. Georgilakis, N. C. Koutsoukis, and N. M. Manousakis, "Numerical observability method for optimal phasor measurement units placement using recursive Tabu search method," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 7, no. 4, pp. 347–356, Apr. 2013.
- [9] N. M. Manousakis, G. N. Korres, and P. S. Georgilakis, "Optimal placement of phasor measurement units: A literature review," in *2011 16th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, 2011, pp. 1–6.
- [10] A. El-Zonkoly, "Optimal meter placement using genetic algorithm to maintain network observability," *Expert Syst. Appl.*, vol. 31, no. 1, pp. 193–198, Jul. 2006.
- [11] B. Milosevic and M. Begovic, "Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 69–75, Feb. 2003.
- [12] J. Peng, Y. Sun, and H. F. Wang, "Optimal PMU placement for full network observability using Tabu search algorithm," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 223–231, May 2006.
- [13] A. A. Fish, S. Chowdhury, and S. P. Chowdhury, "Optimal PMU placement in a power network for full system observability," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–8, 2011.

- [14] A. H. Al-Mohammed, M. A. Abido, and M. M. Mansour, "Optimal PMU placement for power system observability using differential evolution," in *2011 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, vol. 38, no. 6, pp. 277–282, 2011.
- [15] M. Hajian, A. M. Ranjbar, T. Amraee, and A. R. Shirani, "Optimal placement of phasor measurement units: Particle swarm optimization approach," *2007 Int. Conf. Intell. Syst. Appl. to Power Syst.*, no. 1, pp. 1–6, 2007.
- [16] J. Aghaei, A. Baharvandi, A. Rabiee, and M. A. Akbari, "Probabilistic PMU Placement in Electric Power Networks: An MILP-Based Multiobjective Model," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 11, no. 2, pp. 332–341, 2015.
- [17] J. S. Bhonsle and a S. Junghare, "A Novel Approach for the Optimal PMU Placement using Binary Integer Programming Technique," *Int. J. Electron. Eng.*, pp. 67–72, 2012.
- [18] S. M. Mahaei and M. T. Hagh, "Minimizing the number of PMUs and their optimal placement in power systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 83, no. 1, pp. 66–72, Feb. 2012.
- [19] W. Yuill, A. Edwards, S. Chowdhury, and S. P. Chowdhury, "Optimal PMU placement: A comprehensive literature review," in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011, pp. 1–8.
- [20] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Shahidehpour, and A. Khodaei, "Probabilistic Multistage PMU Placement in Electric Power Systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 2, pp. 841–849, Apr. 2011.
- [21] N. H. Abbasy and H. M. Ismail, "A Unified Approach for the Optimal PMU Location for Power System State Estimation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 806–813, May 2009.
- [22] B. K. Saha Roy, A. K. Sinha, and A. K. Pradhan, "An optimal PMU placement technique for power system observability," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 42, no. 1, pp. 71–77, Nov. 2012.
- [23] S. Chakrabarti and E. Kyriakides, "Optimal Placement of Phasor Measurement Units for Power System Observability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1433–1440, Aug. 2008.
- [24] V. N. A. Hesami, F. Khavari, "Optimal Placement of Phasor Measurement Units for Observability using Grenade Explosion Method," *25 Int. Power Syst. Conf.*, pp. 1–11, 2010.
- [25] X. Bei, Y. J. Yoon, and A. Abur, "Optimal Placement and Utilization of Phasor Measurements for State Estimation," *Psc*, no. August, pp. 1–6, 2005.
- [26] M. Korkali and A. Abur, "Placement of PMUs with channel limits," *2009 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. PES '09*, pp. 1–4, 2009.
- [27] S. Massoud Amin and B. F. Wollenberg, "Toward a smart grid: power delivery for the 21st century," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 3, no. 5, pp. 34–41, Sep. 2005.

- [28] H. Farhangi, "The path of the smart grid," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 18–28, Jan. 2010.
- [29] M. El Brak and M. Essaaidi, "Wireless sensor network in home automation network and smart grid," *Complex Syst. (ICCS), 2012 Int. Conf.*, pp. 1–6, 2012.
- [30] P. . Rodriguez, A. V. Timbus, R. . Teodorescu, M. . Liserre, and F. . Blaabjerg, "Flexible Active Power Control of Distributed Power Generation Systems During Grid Faults," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 5, pp. 2583–2592, Oct. 2007.
- [31] A. Willig, M. Kubisch, C. Hoene, and A. Wolisz, "Measurements of a wireless link in an industrial environment using an IEEE 802.11-compliant physical layer," *Ind. Electron. IEEE Trans.*, vol. 49, no. 6, pp. 1265–1282, 2002.
- [32] V. C. Gungor, O. B. Akan, and I. F. Akyildiz, "A Real-Time and Reliable Transport (RT) Protocol for Wireless Sensor and Actor Networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 16, no. 2, pp. 359–370, Apr. 2008.
- [33] B. Lu, T. Habetler, R. Harley, J. Gutierrez, and D. Durocher, "Energy evaluation goes wireless," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 13, no. 2, pp. 17–23, Mar. 2007.
- [34] Bin Lu and V. C. Gungor, "Online and Remote Motor Energy Monitoring and Fault Diagnostics Using Wireless Sensor Networks," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4651–4659, Nov. 2009.
- [35] Z. Guo *et al.*, "A Wireless Sensor Network for Monitoring Smart Grid Transmission Lines," pp. 0–5, 2014.
- [36] D. Yan, Ye; Qian, Yi; Sharif, Hamid; Tipper, "A Survey on Smart Grid Communication Infrastructures: Motivations, Requirements and Challenges," *Ieee Commun. Surv. Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 5–20, 2013.
- [37] D. Niyato, P. Wang, and E. Hossain, "Reliability analysis and redundancy design of smart grid wireless communications system for demand side management," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 19, no. 3, pp. 38–46, 2012.
- [38] S. Fan *et al.*, "A security protocol for wireless sensor networks designed for monitoring smart grid transmission lines," in *2014 23rd International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, 2014, pp. 1–7.
- [39] A. N. Nasipuri, R. C. Cox, J. C. Conrad, L. V. Van der Zel, R. Zel, and M. K. Bienvenido Rodriguez, "Design considerations for a large-scale wireless sensor network for substation monitoring," *Local Comput. Networks (LCN), 2010 IEEE 35th Conf.*, pp. 866–873, 2010.
- [40] N. Matta, R. Ranhim-Amoud, L. Merghem-Boulahia, and A. Jrad, "A Wireless Sensor Network for Substation Monitoring and Control in the Smart Grid," *2012 IEEE Int. Conf. Green Comput. Commun.*, pp. 203–209, 2012.
- [41] M. Erol-Kantarci and H. T. Mouftah, "Wireless Sensor Networks for Smart Grid Applications," *Electron. Commun. Photonics Conf. (SIECPC), 2011 Saudi Int.*, vol. 34, pp. 1–6, 2011.

- [42] M. Erol-Kantarci and H. T. Mouftah, "Using wireless sensor networks for energy-aware homes in smart grids," *Comput. Commun. (ISCC), 2010 IEEE Symp.*, pp. 456–458, 2010.
- [43] E. Efficiency and I. T. Program, "Reports on Industrial Controls , Information Processing , Automation , and Robotics," *Energy*, no. November, 2004.
- [44] V. C. Gungor and G. P. Hancke, "Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 10, pp. 4258–4265, 2009.
- [45] V. C. Gungor and F. C. Lambert, "A survey on communication networks for electric system automation," *Comput. Networks*, vol. 50, no. 7, pp. 877–897, 2006.
- [46] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks," *ACM SIGBED Rev.*, vol. 1, no. 2, pp. 3–8, 2004.
- [47] J. Heidemann, Wei Ye, J. Wills, A. Syed, and Yuan Li, "Research challenges and applications for underwater sensor networking," *IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. 2006. WCNC 2006.*, pp. 228–235, 2006.
- [48] I. F. Akyildiz and E. P. Stuntebeck, "Wireless underground sensor networks: Research challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 4, no. 6, pp. 669–686, 2006.
- [49] M. Li and Y. Liu, "Underground Structure Monitoring with Wireless Sensor Networks," *2007 6th Int. Symp. Inf. Process. Sens. Networks*, pp. 69–78, 2007.
- [50] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Comput. Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [51] I. Stojmenović, *Handbook of Sensor Networks*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [52] J. N. Al-Karaki and a. E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 11, no. 6, pp. 6–28, 2004.
- [53] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Comput. Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, Aug. 2008.
- [54] I. F. Akyildiz and M. C. Vuran, *Wireless Sensor Networks*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [55] V. Mhatre and C. Rosenberg, "Design guidelines for wireless sensor networks: Communication, clustering and aggregation," *Ad Hoc Networks*, vol. 2, no. 1, pp. 45–63, Jan. 2004.
- [56] R. Zivanovic and C. Cairns, "Implementation of PMU technology in state estimation: an overview," *AFRICON, 1996., IEEE AFRICON 4th*, vol. 2, pp. 1006–1011 vol.2, 1996.
- [57] X. Xie, Y. Xin, J. Xiao, J. Wu, and Y. Han, "WAMS applications in chinese power system," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 4, no. 1, pp. 54–63, 2006.

- [58] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. Boston, MA: Springer US, 2008.
- [59] S. Soni, S. Bhil, D. Mehta, and S. Wagh, "Linear state estimation model using phasor measurement unit (PMU) technology," *2012 9th International Conference Electrical Engineering, Computing Science Automatic Control*, pp. 1–6, 2012.
- [60] J. Chen, "Power System State Estimation Using Phasor Measurement Units," 2013.
- [61] B. Gou, "Jacobian Matrix-Based Observability Analysis for State Estimation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 348–356, Feb. 2006.
- [62] Bei Gou and A. Abur, "An improved measurement placement algorithm for network observability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 4, pp. 819–824, 2001.
- [63] F. Schweppe and J. Wildes, "Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 120–125, Jan. 1970.
- [64] Y. Ju. Yoon, "Study of the Utilization and Benefits of Phasor Measurement Units for Large Scale Power System State Estimation," *Simulation*, no. December, pp. 1–76, 2005.



**Abstract:**

Distribution System is an important part of a power system. Optimal operation of a distribution system needs to supervise and control accurately and completely. Thus, the measuring issue and state estimation have a great importance in new smart distribution grids. The measurement can be performed by the real-time measuring devices (PMUs) through a good communication infrastructure such as a Wireless Sensor Network (WSN). The first step in any analysis of state estimation is checking the observability of the system. It is very important to reduce measurement cost due to the high cost of PMUs used for observing the power network. Also the cost of communication equipment used for communication network observability should be decreased. So, the number of PMUs, their appropriate locations, type of the communication media and complete transfer of measurement data to the control center is noticeable.

The main objective of this thesis is to find a trade-off between the observability of distribution system and the cost of measurement and sending data through infrastructure of wireless sensor network. For this purpose, a theorem titled "Network Connectivity" was proposed and proved. Then for the first time, an optimization problem was introduced so that considered the necessary constraints of observability adequacy of the power system and the communication network. The cost of measurement infrastructure and sending data was considered as the objective function. Besides, the impact of geographical restrictions on the number of optimized wireless sensor nodes (for communication network observability) also was studied. Finally, the problem was implemented on the IEEE 33-bus distribution system and the results were presented.

**Keywords:** Phasor Measurement Unit (PMU), Wireless Sensor Network (WSN), Observability of power system, Network Connectivity Theorem, Observability of communication network, State Estimation (SE), Distribution system





**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Electrical Engineering and Robotic**

**M.Sc Thesis in Electrical Power Systems Engineering**

**Evaluation of Observability for State Estimation of Electrical  
Distribution Systems Considering Communication  
Infrastructure of Wireless Sensor Networks (WSNs)**

By: Reza Shirkhani

Supervisor:  
Dr Mohsen Assili

Advisor:  
Dr Mohammad Ebrahim Hajiabadi

February 2017