

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

رساله دکتری مهندسی برق قدرت

# رؤیت‌پذیری مقید به امنیت شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن محدودیت‌های مخابراتی

نگارنده: امیر بشیان

استاد راهنما

دکتر محسن اصیلی

اساتید مشاور

دکتر امیدرضا معروضی

دکتر امجد انوری مقدم

**تقدیم به پدر و مادر عزیزم**

## تعهد نامه

اینجانب امیر بشیان دانشجوی دوره کارشناسی دکتری رشته مهندسی برق قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه رؤیت پذیری مقید به امنیت شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن محدودیت‌های مخابراتی تحت راهنمایی جناب آقای دکتر محسن اصیلی متعهد می‌شوم.

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



تاریخ: بهمن ۳۹۸

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . 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 نمی‌باشد.

## چکیده

اندازه‌گیری کمیت‌های شبکه هوشمند، یکی از مهم‌ترین مسائل در بررسی شبکه‌های قدرت الکتریکی است. پایش شبکه قدرت برای استفاده بهینه از آن و جلوگیری از خطاهای احتمالی اجتناب‌ناپذیر است. دستگاه‌های اندازه‌گیری فازوری یکی از مهم‌ترین قسمت‌های سیستم پایش فراگیر می‌باشد. جایابی بهینه دستگاه‌های PMU<sup>1</sup> از مهم‌ترین مسائل در برنامه ریزی سیستم قدرت بوده است. همین‌طور، زیرساخت مخابراتی که عضو جدایی‌ناپذیر سیستم WAMS<sup>2</sup> می‌باشد، باید به‌منظور انتقال اطلاعات به مرکز کنترل برای تخمین حالت سیستم، بهینه شود. بنابراین، بهینه‌سازی جداگانه سیستم قدرت و سیستم مخابراتی، منجر به جواب بهینه سراسری سیستم WAMS نخواهد شد. به‌منظور تخمین حالت صحیح و پایدار سیستم، ابتدا می‌بایست سیستم اندازه‌گیری رؤیت‌پذیر باشد.

در این رساله، روشی برای رؤیت‌پذیری پایه و همچنین رؤیت‌پذیری مقید به امنیت در سیستم WAMS برای جایابی بهینه دستگاه‌های PMU و زیرساخت مخابراتی آن پیشنهاد شده است. برای این منظور، ترکیبی از حس‌گرهای بی‌سیم EHSN<sup>3</sup> و PPSN<sup>4</sup> به‌عنوان زیرساخت مخابراتی سیستم پایش و کنترل فراگیر پیشنهاد شده است تا ارتباط مخابراتی دستگاه‌های PMU به صورتی ساده‌تر و ارزان‌تر نسبت به سیستم مخابراتی سنتی ایجاد گردد. برای افزایش امنیت مشاهده‌پذیری سیستم، جایابی بهینه ایمن در برابر بروز خطای دستگاه‌های PMU در کنار جایابی حس‌گرهای بی‌سیم با در نظر گرفتن ضریب قابلیت اطمینان آن‌ها، ارائه و فرمول‌بندی شده است. تابع هدف، حداقل سازی هزینه سیستم با در نظر گرفتن قیود سیستم قدرت و سیستم مخابراتی می‌باشد. روش‌های ارائه‌شده، روی شبکه‌های نمونه پیاده‌سازی شده‌اند تا کاربردی بودن، اثربخشی و همچنین امکان سنجی روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج شبیه‌سازی‌ها روی شبکه‌های نمونه توزیع IEEE نشان دهنده کارایی روش پیشنهادی و کم شدن هزینه سیستم پایش فراگیر نسبت به روش‌های پیشین می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** سیستم پایش فراگیر، دستگاه‌های اندازه‌گیری فازوری، حسگرهای بی‌سیم، رؤیت‌پذیری مقید به امنیت،

رؤیت‌پذیری پایه

<sup>1</sup> Phasor Measurement Unit

<sup>2</sup> Wide Area Measurement System

<sup>3</sup> Energy-harvesting Sensor Node

<sup>4</sup> Plug-in Powered Sensor Node

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- 1) Bashian, M. Assili, A. Anvari-Moghaddam and O. R. Marouzi, "Co-optimal PMU and communication system placement using hybrid wireless sensors," Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 19, DOI:10.1016/j.segan.2019.100238, September 2019.
- 2) Bashian, M. Assili, A. Anvari-Moghaddam, João P. S. Catalão. "Optimal Design of a Wide Area Measurement System Using Hybrid Wireless Sensors and Phasor Measurement Units ", Electronics 2019, 8(10), 1085; <https://doi.org/10.3390/electronics8101085>.
- 3) Amir Bashian, M. Assili. "Investigating the observability and non-technical losses in distribution networks considering wireless sensors", Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC), 2018.
- 4) A. Bashian, M. Assili, A. Anvari-Moghaddam, "Optimal Placement of PMUs and Related Sensor-based Communication Infrastructures for Full Observability of Distribution Networks ", IEEE Power and Energy Society, General Meeting 2020, Accepted.

## فهرست مطالب

د	فهرست شکلها.....
ه	فهرست جداول.....
و	فهرست علائم:.....
۱	<b>فصل اول : پیشگفتار .....</b>
۱-۱	۱-۱- تعریف مسأله .....
۲-۱	۲-۱- انگیزه رساله .....
۳-۱	۳-۱- اهداف تحقیق .....
۴-۱	۴-۱- نوآوری رساله .....
۹	<b>فصل دوم : مروری بر رؤیت‌پذیری در سیستم پایش فراگیر .....</b>
۹-۱	۱-۱- مقدمه .....
۱۰-۲	۲-۲- تعریف سیستم پایش و کنترل فراگیر .....
۱۲-۲	۳-۲- واحدهای اندازه‌گیری فازوری.....
۱۶-۲	۴-۲- رؤیت‌پذیری شبکه قدرت .....
۱۶-۲	۱-۴-۲- تحلیل رؤیت‌پذیری به روش توپولوژیکی.....
۱۷-۲	۲-۴-۲- رؤیت‌پذیری شبکه قدرت با استفاده از PMU ها به روش توپولوژیکی.....
۲۱-۲	۵-۲- معرفی شبکه حس گر بی‌سیم .....
۲۴-۲	۶-۲- انواع حس‌گرهای بی‌سیم .....
۲۶-۲	۷-۲- قابلیت اطمینان حس‌گرهای بی‌سیم .....
۲۷-۲	۱-۷-۲- قابلیت اطمینان حس‌گرهای بی‌سیم .....
۲۸-۲	۲-۷-۲- قابلیت اطمینان لینک بی‌سیم .....
۲۹-۲	۸-۲- مروری بر تاریخچه رؤیت‌پذیری سیستم قدرت .....
۳۰-۲	۱-۸-۲- بهینه‌سازی سیستم پایش فراگیر .....
۴۲-۲	۲-۸-۲- بهینه‌سازی سیستم پایش فراگیر با در نظر گرفتن سیستم مخابراتی.....

۴۴ ..... ۹-۲- جمع بندی

## فصل سوم : جایابی بهینه دستگاههای PMU و سیستم مخابراتی به وسیله حس گرهای بی سیم ترکیبی .. ۴۵

۴۵ ..... ۱-۳- مقدمه

۴۶ ..... ۲-۳- جایابی بهینه دستگاههای PMU

۴۷ ..... ۳-۳- سیستم مخابراتی

۵۰ ..... ۴-۳- مشاهده پذیری سیستم مخابراتی

۵۵ ..... ۵-۳- قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی

۵۷ ..... ۶-۳- تابع هدف پیشنهادی

۶۰ ..... ۷-۳- شبیه سازی روی شبکه های نمونه

۶۱ ..... ۱-۷-۳- شبکه نمونه ۱۱ باسه با حل همزمان شبکه قدرت و مخابرات

۶۵ ..... ۲-۷-۳- شبکه نمونه ۱۱ باسه با حل غیر همزمان شبکه قدرت و مخابرات

۶۵ ..... ۳-۷-۳- شبکه نمونه ۳۷ باسه

۶۸ ..... ۸-۳- نتیجه گیری

## فصل چهارم : رؤیت پذیری پایه سیستم پایش فراگیر با در نظر گرفتن باسهای تزریق صفر و دستگاههای

### اندازه گیر قدیمی ..... ۶۹

۶۹ ..... ۱-۴- مقدمه

۷۰ ..... ۲-۴- استراتژی های مشاهده پذیری در سیستم اندازه گیری فراگیر

۷۰ ..... ۱-۲-۴- مشاهده پذیری پایه

۷۱ ..... ۲-۲-۴- مشاهده پذیری مقید به امنیت

۷۱ ..... ۳-۴- فرمول بندی مشاهده پذیری پایه

۷۲ ..... ۱-۳-۴- جایابی بهینه دستگاههای اندازه گیر فازوری با در نظر گرفتن باسهای تزریق صفر

۲-۳-۴- جایابی بهینه دستگاههای اندازه گیر فازوری با در نظر گرفتن دستگاههای اندازه گیری

۷۷ ..... قدیمی

۷۸ ..... ۳-۳-۴- سیستم مخابراتی و قیود آن در مشاهده پذیری پایه

۷۹ ..... ۴-۴- تابع هدف پیشنهادی برای مشاهده پذیری پایه



- ۴-۵- شبیه سازی روی شبکه‌های نمونه ..... ۸۱
- ۴-۵-۱- شبکه نمونه استاندارد ۱۳ باسه با در نظر گرفتن باسهای تزریق صفر ..... ۸۲
- ۴-۵-۲- شبکه نمونه ۳۷ باسه ..... ۸۵
- ۴-۶- نتیجه گیری ..... ۸۶

### **فصل پنجم : رؤیت پذیری مقید به امنیت سیستم پایش فراگیر با در نظر گرفتن محدودیت‌های**

- مخابراتی ..... ۸۹**
- ۵-۱- مقدمه ..... ۸۹
- ۵-۲- رؤیت پذیری مقید به امنیت ..... ۹۰
- ۵-۲-۱- افزایش قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی ..... ۹۰
- ۵-۲-۲- جایگذاری با امنیت در برابر بروز خطا دستگاههای PMU ..... ۹۱
- ۵-۳- تابع هدف پیشنهادی ..... ۹۳
- ۵-۴- شبیه سازی روی شبکه‌های نمونه ..... ۹۵
- ۵-۴-۱- شبکه نمونه استاندارد ۱۳ باسه ..... ۹۵
- ۵-۴-۲- شبکه نمونه استاندارد ۳۷ باسه ..... ۹۶
- ۵-۵- نتیجه گیری ..... ۹۹

### **فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات ..... ۱۰۱**

- ۶-۱- نتیجه گیری ..... ۱۰۱
- ۶-۲- پیشنهادات ..... ۱۰۴
- مراجع: ..... ۱۰۵

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: پیکربندی یک واحد اندازه‌گیری فازوری ..... ۱۳
- شکل ۲-۲: شبکه نمونه شعاعی ..... ۱۴
- شکل ۳-۲: شبکه نمونه شعاعی ..... ۱۵
- شکل ۴-۲: شبکه توزیع ۸ باسه نمونه ..... ۱۹
- شکل ۵-۲: محل نصب گره‌های حس‌گر بی‌سیم در شبکه توزیع ۸ باسه ..... ۲۱
- شکل ۶-۲: ساختمان داخلی یک واحد حس‌گر ..... ۲۲
- شکل ۷-۲: مودهای ارتباطی گره‌های حس‌گر: a: تک‌گامی، b: چندگامی ..... ۲۴
- شکل ۸-۲: نمونه‌ای از حس‌گرهای EHSN ..... ۲۶
- شکل ۹-۲: شبکه نمونه ۶ باسه ..... ۳۱
- شکل ۱۰-۲: شبکه نمونه دستگاه‌های اندازه‌گیری شار ..... ۳۸
- شکل ۱۱-۲: شبکه نمونه ۹ باسه ..... ۳۹
- شکل ۱۲-۲: شبکه نمونه ۹ باسه ایمن شده در اثر خروج یک PMU ..... ۳۹
- شکل ۱۳-۲: شماتیک اجزای لازم اندازه‌گیری در هر باس ..... ۴۰
- شکل ۱۴-۲: ساختار استفاده از امواج مایکروویو به‌عنوان سیستم مخابراتی ..... ۴۴
- شکل ۱-۳: سیستم مخابراتی پیشنهادی ..... ۵۰
- شکل ۲-۳: شبکه مش حس‌گر بی‌سیم ..... ۵۱
- شکل ۳-۳: شبکه نمونه ۸ باسه ..... ۵۲
- شکل ۴-۳: قابلیت اطمینان لینک ارتباطی در حس‌گرهای EHSN ..... ۵۶
- شکل ۵-۳: فلوجارت روش پیشنهادی ..... ۵۹
- شکل ۶-۳: شبکه نمونه ۱۱ باسه ..... ۶۱
- شکل ۷-۳: جایابی بهینه PMU ها و حس‌گرهای بی‌سیم در شبکه نمونه ۱۱ باسه ..... ۶۴
- شکل ۸-۳: شبکه نمونه ۳۷ باسه ..... ۶۷
- شکل ۱-۴: استراتژی‌های مشاهده پذیری ..... ۷۲
- شکل ۲-۴: شبکه نمونه ۶ باسه ..... ۷۳
- شکل ۳-۴: شبکه نمونه ۳ باسه ..... ۷۸
- شکل ۴-۴: فلوجارت مشاهده پذیری پایه ..... ۸۳
- شکل ۵-۴: شبکه نمونه ۱۳ باسه IEEE ..... ۸۲
- شکل ۱-۵: فلوجارت روش پیشنهادی ..... ۹۷

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲: شاخص‌های افزونگی برای شبکه نمونه ۶ باسه ..... ۳۳
- جدول ۱-۳: پارامترهای انتخابی برای الگوریتم ژنتیک ..... ۶۱
- جدول ۲-۳: اطلاعات شبکه ۱۱ باسه ..... ۶۲
- جدول ۳-۳: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۱۱ باسه ..... ۶۴
- جدول ۴-۳: راه حل‌های ممکن جایابی بهینه PMU برای شبکه ۱۱ باسه ..... ۶۵
- جدول ۵-۳: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۱۱ باسه ..... ۶۶
- جدول ۶-۳: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۳۷ باسه ..... ۶۷
- جدول ۱-۴: پارامترهای انتخابی برای الگوریتم ژنتیک ..... ۸۲
- جدول ۲-۴: راه حل‌های جایابی بهینه PMU برای شبکه ۱۳ باسه IEEE ..... ۸۴
- جدول ۳-۴: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۱۳ باسه ..... ۸۵
- جدول ۴-۴: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۳۷ باسه ..... ۸۶
- جدول ۱-۵: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۱۳ باسه برای رؤیت پذیری پایه ..... ۹۵
- جدول ۲-۵: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۱۳ باسه برای رؤیت پذیری مقید به امنیت ..... ۹۶
- جدول ۳-۵: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۳۷ باسه برای رؤیت پذیری پایه ..... ۹۶
- جدول ۴-۵: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۳۷ باسه برای رؤیت پذیری مقید به امنیت ..... ۹۸

**WAMS:** Wide Area Measurement System  
**PMU:** Phasor Measurement Unit  
**SCADA:** Supervisory Control and Data Acquisition  
**EHSN:** Energy-harvesting Sensor Node  
**PPSN:** Plug-in Powered Sensor Node  
**BPSN:** Battery-powered Sensor Node  
**SBO:** Security-based Observability  
**EBO:** Economic-Based Observability  
**PDC:** Phasor Data Concentrator  
**EMS:** Energy Management System  
**CM:** Conventional Measurements  
**IM:** Injection Measurement  
**VM:** Voltage Measurement  
**PFM:** Power Flow Measurement  
**SOPFM:** Set of Power Flow Measurement  
**SE:** State Estimation  
**OSI:** Open System Inter-connection  
**LF:** Load Flow  
**OPF:** Optimal Power Flow  
**LF:** Load Forecast  
**SR:** Sensing Range  
**TR:** Transmission Range  
**MEMS:** Microelectromechanical System  
**OPP:** Optimal PMU Placement  
**ILP:** Integer Linear Programming  
**MILP:** Mixed Integer Linear Programming  
**BCGA:** Binary-coded Genetic Algorithm  
**ZIB:** Zero-Injection Bus  
**SOZIB:** Set of Zero-injection Bus  
**BOI:** Bus Observability Index  
**SORI:** System Observability Redundancy Index  
**BRI:** Bus Reliability Index  
**BILP:** Binary Integer Linear Programming  
**FZIB:** Fully Zero Injection Buses  
**PZIB:** Partially Zero Injection Buses  
**IM:** Incident Matrix  
**CO:** Communication Observability  
**GPS:** Global Positioning System

## فصل اول

### پیشگفتار

#### ۱-۱- تعریف مسأله

جهت اطلاع از کمیت‌های سیستم قدرت، انجام تخمین حالت از مقادیر اندازه‌گیری شده در سیستم ضروری است. به‌منظور تخمین حالت صحیح سیستم، ابتدا می‌بایست سیستم اندازه‌گیری رؤیت‌پذیر باشد. بنابراین رؤیت‌پذیری سیستم قدرت، شرط لازم برای تخمین حالت است. رؤیت‌پذیری کامل سیستم به وسیله ارسال کمیت‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری سیستم قدرت، به‌وسیله زیرساخت مخابراتی انجام می‌پذیرد.

مسأله مورد نظر در این رساله، بررسی رؤیت‌پذیری مقید به امنیت و همچنین رؤیت‌پذیری پایه سیستم قدرت با توجه به محدودیت‌های زیرساخت مخابراتی تعریف شده می‌باشد. زیرساخت مخابراتی تعریف شده در این تحقیق، ترکیبی از حسگرهای بیسیم است. بنابراین، بهینه‌سازی تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری فازوری (PMU)<sup>۱</sup> و همچنین حسگرهای بیسیم با توجه به قیود رؤیت‌پذیری سیستم قدرت و مخابراتی، تابع هدف اصلی این رساله می‌باشد.

---

<sup>۱</sup> Phasor Measurement Unit

## ۱-۲- انگیزه رساله

یکی از مهم‌ترین مباحث در سیستم‌های قدرت، مسئله اندازه‌گیری کمیت‌های شبکه است. برای این منظور، باید کنترل و نظارت دقیق بر شبکه انتقال و توزیع انرژی انجام پذیرد. پایش شبکه قدرت برای استفاده بهینه از آن و جلوگیری از خطاهای احتمالی، بسیار مهم است. در شبکه قدرت، همیشه نمی‌توان همه کمیت‌های شبکه را مانند ولتاژ و جریان را اندازه‌گیری کرد. به این دلیل و همچنین هزینه بالای تجهیزات اندازه‌گیری، استفاده از تخمین حالت امری اجتناب‌ناپذیر است. در سیستم‌های اسکادای (SCADA)<sup>۱</sup> قدیمی، قابلیت ارتباط دستگاه‌های اندازه‌گیری به صورت بهنگام<sup>۲</sup> بسیار سخت بوده یا غیرممکن است و همچنین به دلیل زیاد بودن تعداد پست‌ها، امکان نصب این تجهیزات بر روی تمام باسهای شبکه میسر نیست.

در شبکه‌های توزیع درصد قابل توجهی از انرژی تولیدشده در نیروگاه‌ها، در مسیر تولید تا مصرف تلف می‌شود. آنچه به عنوان تلفات در شبکه‌های توزیع در نظر گرفته می‌شود، تفاوت بین انرژی تحویل‌شده به شبکه و مقدار انرژی است که فروخته می‌شود و برای آن صورت حساب صادر می‌گردد. لذا باید به حداکثر سازی صحت صدور صورت حساب، توجه کرد.

برخلاف شبکه فوق توزیع و انتقال که تمام کمیت‌های آن‌ها قابل اندازه‌گیری است، در شبکه توزیع به دلیل گستردگی و پیچیدگی بسیار زیاد و همچنین ناکافی بودن دستگاه‌های اندازه‌گیری، تمامی مقادیر آن قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد. بنابراین، باید تخمینی از کمیت‌های شبکه انجام پذیرد.

اولین قدم در برنامه تخمین حالت، بررسی رؤیت‌پذیری سیستم است. با توجه به نبود اطلاعات جامع و لحظه‌ای از مقادیر باس‌های شبکه توزیع به دلیل کمبود دستگاه اندازه‌گیری با چالش مشاهده ناپذیری این نوع از شبکه‌ها مواجه هستیم. بنابراین مدیریت شبکه با کمک از روش‌های تخمین حالت و به‌کارگیری آن در اتوماسیون شبکه توزیع، قابلیت نظارت و کنترل سیستم را بهبود می‌بخشد.

<sup>۱</sup> Supervisory Control and Data Acquisition

<sup>۲</sup> Synchronous

تعداد بهینه دستگاه‌های اندازه‌گیری و طریقه ارتباط مخابراتی آن‌ها جهت انتقال کامل و صحیح اطلاعات به مرکز کنترل، بسیار با اهمیت است. رؤیت‌پذیری کامل سیستم به وسیله ارسال کمیت‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری سیستم قدرت، به‌وسیله زیرساخت مخابراتی انجام می‌پذیرد. به همین دلیل نیازمند ایجاد یک بستر مخابراتی هستیم که تمام مقادیر کمیت‌های باس‌ها را به مرکز کنترل ارسال کند. لذا استفاده از یک سیستم مخابراتی کارا و ایمن و همچنین با نصب آسان و هزینه کم از اولویتهای برنامه‌ریز شبکه می‌باشد.

با توجه به اهمیت تخمین حالت و همچنین پیش شرط انجام آن در شبکه توزیع که بررسی رؤیت‌پذیری سیستم می‌باشد، موضوع این رساله بررسی رؤیت‌پذیری مقید به امنیت در شبکه‌های توزیع با توجه به محدودیت‌های مخابراتی انتخاب شده است. برای تعریف زیرساخت مخابراتی در سیستم ارائه شده، از شبکه حس‌گر بی‌سیم استفاده گردیده است. در واقع پیشنهاد روشی برای رؤیت‌پذیری کامل سیستم قدرت و سیستم مخابراتی با هزینه کمتر و زیرساخت ساده‌تر نسبت به روشهای موجود، انگیزه اصلی این تحقیق می‌باشد. توجه به این نکته ضروری است که پیشنهاد یک زیرساخت جدید شبکه را با قیود جدیدی روبرو می‌کند. لذا در این رساله، سعی شده است که قیود ضروری در جهت رؤیت‌پذیری سیستم با توجه به حفظ امنیت و قابلیت اطمینان سیستم آن در نظر گرفته شود. در ادامه اهداف تحقیق و همچنین نوآوری‌های ارائه شده در آن بیان خواهد شد.

### ۱-۳- اهداف تحقیق

سیستم پایش و کنترل فراگیر (WAMS<sup>۱</sup>) در سیستم‌های هوشمند امروزی گسترش چشمگیری داشته است. این سیستم‌ها از سه بخش اساسی تشکیل شده‌اند: جمع‌آوری اطلاعات، انتقال اطلاعات و پردازش اطلاعات. دو بخش اول به‌وسیله دستگاه‌های اندازه‌گیری و سیستم ارتباط مخابراتی انجام می‌شود.

قسمت اصلی سیستم پایش و کنترل فراگیر، دستگاه‌های اندازه‌گیری فازوری است. این دستگاه‌ها با قابلیت اتصال به سیستم (GPS<sup>۲</sup>) قابلیت هم‌زمان‌سازی اطلاعات اندازه‌گیری شده را دارا می‌باشند. ارتباط اطلاعات اندازه‌گیری شده به مرکز کنترل به‌وسیله سیستم مخابراتی انجام می‌شود که معمولاً در

<sup>۱</sup> Wide Area Measurement Systems

<sup>۲</sup> Global Positioning System

سیستم‌های موجود از کابل‌های فیبر نوری برای این منظور استفاده شده است. با توجه به هزینه بالای زیرساخت مخابراتی، نمی‌توان این سیستم را در هزینه تمام‌شده سیستم WAMS نادیده گرفت. توجه به این نکته ضروری است که بهینه‌سازی هزینه سیستم اندازه‌گیری دستگاه‌های اندازه‌گیری بدون در نظر گرفتن سیستم مخابراتی آن‌ها، صحیح نبوده و به بهترین جواب ممکن نخواهد رسید.

در این رساله، برای زیرساخت مخابراتی سیستم WAMS، از حس‌گرهای بی‌سیم استفاده شده است. هزینه کمتر این حس‌گرها و همچنین نصب ساده‌تر آن‌ها نسبت به سیستم قدیمی فیبر نوری، قابلیت تحقیق بیشتر در این زمینه را پررنگ‌تر می‌کند. شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم این قابلیت را به سیستم می‌دهد که انتقال اطلاعات اندازه‌گیری شده به وسیله PMU ها به راحتی و به صورت ارزان، صورت پذیرد. کاهش هزینه انتقال اطلاعات به مرکز کنترل توسط سیستم مخابراتی پیشنهادی نسبت به سیستم موجود با توجه به هزینه بالای واحدهای اندازه‌گیری فازوری، با در نظر گرفتن رؤیت‌پذیری شبکه قدرت و شبکه مخابرات، بسیار مهم است. از این رو تعداد و موقعیت دستگاه‌های اندازه‌گیری فازوری، نوع ارتباط مخابراتی و انتقال کامل اطلاعات اندازه‌گیری شده به مرکز کنترل مورد توجه قرار می‌گیرد.

دستگاه‌های اندازه‌گیری فازوری به کمک تجهیزات اندازه‌گیری فازوری خود، اندازه‌گیری ولتاژ باس‌ها و جریان خطوط شبکه را انجام می‌دهند. مکان‌یابی محل نصب PMU ها بر مبنای رؤیت‌پذیری شبکه قدرت انجام می‌گیرد. اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط این اندازه‌گیرها به وسیله جایابی بهینه حس‌گرهای بی‌سیم به مرکز کنترل فرستاده می‌شود. برخلاف شبکه‌های انتقال و فوق توزیع که با توجه به تعداد باس‌های کمتر، اندازه‌گیری همه کمیت‌ها مقدور است، در شبکه توزیع با تعداد باس‌های به مراتب بیشتری روبرو بوده و رؤیت پذیر نمودن شبکه مشکل‌تر و پرهزینه‌تر است. بر همین مبنای برنامه‌ریزی شبکه به دنبال حداقل تعداد اندازه‌گیرها و نیز بستر مخابراتی مناسب بوده تا با هزینه کم، اطلاعات اندازه‌گیری شده به مرکز کنترل ارسال گردد.

با توجه به ساختار و ماهیت حس‌گرهای هوشمند، استفاده از حس‌گرهای با فناوری بالاتر و قابلیت اطمینان بیشتر در سیستم قدرت الزامی به نظر می‌رسد. همچنین به دلیل اهمیت بالای اطلاعات اندازه‌گیری شده در سیستم قدرت به منظور پایش شبکه، قابلیت اطمینان و امنیت سیستم از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا در این رساله سعی شده است رؤیت‌پذیری مقید به امنیت در شبکه‌های توزیع



به وسیله دستگاه‌های اندازه‌گیری PMU و همچنین حس‌گرهای بی‌سیم به‌عنوان زیرساخت مخابراتی مورد بررسی قرار گیرد و روشی برای تحلیل آن ارائه گردد.

مسئله مورد نظر این رساله عبارت است از: بررسی رؤیت‌پذیری مقید به امنیت و رؤیت‌پذیری پایه در شبکه قدرت با توجه به محدودیت‌های مخابراتی زیر ساخت معرفی شده.

خروجی‌های مورد هدف در این رساله عبارت‌اند از:

۱- جایابی بهینه دستگاه‌های اندازه‌گیری (PMU) و همچنین اجزای مخابراتی با توجه به قیود مخابراتی و قدرتی سیستم

۲- ارائه روشی برای رؤیت‌پذیری مقید به امنیت شبکه به‌وسیله سیستم مخابراتی و PMU ها با توجه به محدودیت‌های مخابراتی

با توجه به خروجی‌های مورد هدف در این رساله و همچنین تعریف زیرساخت قدرت و مخابراتی که عبارت است از دستگاه‌های PMU و حسگرهای بی‌سیم، می‌بایست به شکل مطلوب، بستر برای رؤیت-پذیری مقید به امنیت با توجه به امکانات موجود فراهم گردد. لذا در قسمت بعد، نوآوری‌ها و قیود پیشنهادی جهت حل مساله و همچنین ساختار تعریف مساله بیان خواهد شد.

## ۱-۴- نوآوری رساله

در این رساله، روشی جهت رؤیت‌پذیری پایه و همچنین رؤیت‌پذیری مقید به امنیت در سیستم WAMS برای جایابی بهینه دستگاه‌های PMU و زیرساخت مخابراتی آن پیشنهاد شده است. برای این منظور، ترکیبی از حس‌گرهای بی‌سیم EHSN<sup>1</sup> و PPSN<sup>2</sup> به‌عنوان زیرساخت مخابراتی سیستم پایش فراگیر پیشنهاد شده است تا ارتباط مخابراتی دستگاه‌های PMU به صورتی ساده‌تر و ارزان‌تر نسبت به سیستم مخابراتی سنتی ایجاد گردد. استفاده از حسگرهای بی‌سیم در سیستم قدرت، چالش مشاهده پذیری سیستم مخابرات را به سیستم اعمال می‌کند. لذا، برای ارتباط با مرکز کنترل، باید ابتدا سیستم مخابراتی نیز مشاهده پذیر گردد. بنابراین، برای مکان‌یابی این حسگرها، قید مشاهده پذیری نیز به سیستم افزوده می‌شود.

<sup>1</sup> Energy-harvesting Sensor Node

<sup>2</sup> Plug-in Powered Sensor Node

برای افزایش امنیت رؤیت‌پذیری سیستم، جایابی بهینه ایمن در برابر بروز خطای دستگاه‌های PMU همزمان با جایابی حس‌گرهای بی‌سیم با در نظر گرفتن ضریب قابلیت اطمینان آن‌ها، ارائه و فرمول‌بندی شده است. تابع هدف، حداقل سازی هزینه سیستم با در نظر گرفتن قیود سیستم قدرت و سیستم مخابراتی است. برای رسیدن به نتایجی بهتر و با هزینه کمتر، تأثیر باس‌های تزریق صفر و باس‌های شعاعی در تابع هدف به صورت قید در نظر گرفته شده است.

بر اساس مسائل مطرح‌شده، و برای نیل به هدف این رساله که عبارت است از رؤیت‌پذیری مقید به امنیت شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن محدودیت‌های مخابراتی، باید دقت شود که استفاده از هر وسیله جدید در سیستم، نیازمند زیرساخت مناسب و بررسی مخاطرات خود این وسیله جدید نیز می‌باشد. بنابراین در این رساله سعی بر این است که مسائل مربوط به خود این سیستم جدید مورد ارزیابی قرار گرفته تا با توجه به این مسئله، بتواند از قابلیت‌های آن استفاده مفید صورت گیرد. حس‌گرهای بی‌سیم، قابلیت ارتباط با یکدیگر را دارند که این مسئله کاربردهای بسیار زیادی دارد. بنابراین استفاده از این ایده در شبکه توزیع می‌تواند بسیار مفید و راهگشا باشد.

در حل مسئله مذکور، جنبه‌های مختلفی از قیود شبکه وجود دارد که باید مورد ارزیابی قرار گیرد. مهم‌ترین بخش‌هایی که می‌بایست مرحله به مرحله بررسی گردد عبارت‌اند از:

- بررسی رؤیت‌پذیری شبکه توزیع به وسیله دستگاه‌های اندازه‌گیری PMU
  - نحوه ارتباط PMU ها به وسیله حس‌گرهای بی‌سیم
  - بررسی محدودیت‌های حس‌گرهای بی‌سیم در انجام رؤیت‌پذیری شبکه
  - بررسی امنیت رؤیت‌پذیری سیستم توزیع در صورت بروز حوادث احتمالی
  - جایابی بهینه دستگاه‌های PMU و حسگرهای بی‌سیم ترکیبی به صورت همزمان
  - بررسی رؤیت‌پذیری شبکه در صورت خطا در دستگاه‌های اندازه‌گیری PMU با قید قابلیت اطمینان در شبکه حسگرهای بی‌سیم به صورت توأم
  - ارائه روشی برای رؤیت‌پذیری مقید به امنیت شبکه قدرت و مخابرات با کمترین هزینه
- همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، در موارد بالا سعی بر آن است که ابعاد مختلفی آر کاربرد و امنیت دستگاه‌های اندازه‌گیری و بستر مخابراتی مورد ارزیابی قرار گیرد تا در صورت استفاده از آن‌ها در شبکه

توزیع، با کمترین خطا مواجه گردد. همچنین، بهینه سازی همزمان شبکه قدرت و مخابرات، به کمتر شدن هزینه کلی سیستم کمک خواهد کرد.

در این رساله، در فصل دوم، مروری بر رؤیت‌پذیری در سیستم پایش فراگیر بیان خواهد شد. در این فصل، ابتدا تعریف و مفهوم رؤیت‌پذیری در شبکه قدرت بیان خواهد شد. سپس به بررسی حس‌گرهای بی‌سیم و کاربردها و انواع آن‌ها پرداخته می‌شود. در قسمت بعد، به مرور کارهای صورت گرفته در زمینه جایابی بهینه دستگاه‌های PMU به منظور رؤیت‌پذیری سیستم پایش فراگیر و سیستم‌های مخابراتی پیشنهادی پرداخته می‌گردد. سپس در فصل سوم، مدل پیشنهادی در این رساله برای جایابی بهینه هم‌زمان دستگاه‌های PMU و حس‌گرهای ترکیبی بی‌سیم ارائه می‌شود. در فصل چهارم، مفهوم ارائه شده برای رؤیت‌پذیری پایه مورد بحث و ارزیابی قرار می‌گیرد. در نهایت، در فصل پنجم، رؤیت‌پذیری مقید به امنیت تعریف و فرمول‌بندی شده و نتایج آن با رؤیت‌پذیری پایه مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. همچنین، نتیجه گیری و پیشنهادات این رساله در فصل ششم بیان خواهد شد.



## فصل دوم

### مروری بر رؤیت‌پذیری در سیستم پایش فراگیر<sup>۱</sup>

#### ۲-۱- مقدمه

افزایش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی و مطرح‌شدن پدیده تجدید ساختار در شبکه‌های قدرت و مسائل جدید حاصل از آن‌ها، باعث افزایش تمایل بهره‌برداران شبکه‌های قدرت به استفاده از سیستم WAMS به جای سیستم SCADA شده است. یکی از مباحث مهم در سیستم WAMS، کاهش هزینه‌های جابجایی بهینه PMU ها و همچنین کاهش هزینه شبکه ارتباطی مربوط به آن‌ها است. در این فصل ابتدا، اصول اساسی سیستم WAMS و همچنین ساختار اجزای تشکیل‌دهنده آن مورد بحث قرار می‌گیرد. سپس رؤیت‌پذیری سیستم قدرت با توجه به استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیر فراگیر بیان خواهد شد. در قسمت بعد، با توجه اینکه در این رساله از حسگرهای بیسیم به عنوان زیرساخت مخابراتی استفاده شده است، به معرفی این حسگرها پرداخته می‌شود. ابتدا ساختار این حسگرها و برخی از کاربردهای آن‌ها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در قسمت بعد قابلیت اطمینان و ظرفیت این حسگرها جهت استفاده به عنوان زیرساخت مخابراتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همان‌گونه که می‌دانیم، اطلاعات

---

<sup>1</sup> Wide Area Measurement System

برداشت‌شده در سیستم قدرت ارزش بالایی دارند و به‌منظور پایداری شبکه باید این اطلاعات به‌طور کامل و دقیق به مرکز کنترل برسد. لذا زیرساخت مخابراتی باید به‌گونه‌ای باشد که اطمینان کامل از رسیدن اطلاعات به مرکز کنترل حاصل شود.

بعد از بررسی زیرساخت مخابراتی و قدرت در سیستم پایش فراگیر، به بررسی روش‌های ارائه‌شده برای رؤیت‌پذیری شبکه قدرت پرداخته خواهد شد. در ابتدای استفاده از دستگاه‌های PMU و قابلیت بالای این دستگاه‌ها، موضوع رؤیت‌پذیری شبکه با استفاده از این وسیله جدید، جذابیت بسیاری برای محققان پیدا کرد و روش‌های مختلفی بر اساس حداقل‌سازی هزینه پایش شبکه ارائه شد. تابع هدف ارائه‌شده به‌طور کلی شامل حداقل‌سازی هزینه نصب PMU ها با توجه به رؤیت‌پذیری شبکه بوده است. قیدهای مختلفی از جمله باس‌های تزریق صفر، تعدادهای کانال‌های دستگاه اندازه‌گیری، حضور دستگاه‌های اندازه‌گیر سنتی در سیستم و یا افزونگی (Redundancy) مشاهده‌پذیری به تابع هدف اضافه شده است که در بخش‌های بعدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

## ۲-۲- تعریف سیستم پایش و کنترل فراگیر

یکی از مسائل مهم در بعد بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، حفظ امنیت آن است. اولین قدم در راه ارزیابی امنیت سیستم، نمایش شرایط بهره‌برداری فعلی آن بوده است؛ به‌نحوی که پس از بررسی آن، تصمیم‌های احتمالی لازم جهت حفظ شرایط عملکرد مطلوب گرفته شود [۱]. سیستم SCADA به علت هم‌زمان نبودن اندازه‌گیری‌ها نمی‌تواند شرایط بهره‌برداری فعلی سیستم را به‌خوبی نمایش دهد [۲]. از طرف دیگر، افزایش مصرف انرژی الکتریکی و مطرح‌شدن بازار در سیستم قدرت باعث شده است که شبکه‌های قدرت در حدود خود بهره‌برداری شود؛ به‌گونه‌ای که باعث به‌وجود آمدن مشکلاتی در عملکردهای پایشی، کنترلی و حفاظتی سیستم SCADA شده‌اند. در نتیجه علاقه زیادی برای استفاده از فناوری‌های کنترل و پایش هم‌زمان کمیت‌های شبکه وجود دارد. این فناوری‌ها به‌عنوان سیستم پایش و کنترل فراگیر (WAMS) شناخته می‌شوند [۳]. کل سیستم WAMS می‌تواند در سه تابع مختلف تعریف شود [۴]:

۱- جمع‌آوری اطلاعات

۲- انتقال اطلاعات

۳- پردازش اطلاعات

وسایل اندازه‌گیری و سیستم ارتباطی به همراه سیستم مدیریت انرژی (EMS)<sup>۱</sup> این توابع را انجام می‌دهند. در بخش اول، دستگاه‌های اندازه‌گیری که در کل شبکه توزیع شده‌اند مسئول آماده کردن اطلاعات خام شبکه هستند. مهم‌ترین بخش از سیستم WAMS را دستگاه‌های PMU انجام می‌دهند [۵]. اما دستگاه‌های اندازه‌گیری قدیمی هم می‌توانند در سیستم WAMS به رؤیت‌پذیری سیستم کمک کنند. از جمله آن‌ها می‌توان به IM<sup>۲</sup>، VM<sup>۳</sup> و PFM<sup>۴</sup> اشاره کرد [۶].

در بخش دوم، یک زیرساخت مخابراتی باید در کل شبکه ایجاد شود تا اطلاعاتی که مهیا کرده‌اند را جمع‌آوری کند. تأخیر و کیفیت داده‌هایی که از دستگاه‌های اندازه‌گیری منتقل می‌شوند، بستگی به قابلیت و ساختار زیرساخت ارتباطی دارد [۷]. معمولاً سیستم مخابراتی به صورت سیستم باز مدل لایه‌ای (OSI)<sup>۵</sup> استفاده و طراحی می‌گردد. در این ساختار لایه بالایی فرض می‌کند که لایه پایینی به طور کامل کار می‌کند، بدون اینکه در مورد عملکرد آن چیزی بداند. این موضوع باعث کاهش پیچیدگی‌های استانداردسازی آن‌ها می‌شود. مدل مرجع OSI دربردارندهٔ هفت لایه است: لایه فیزیکی، لایه لینک داده، لایه شبکه، لایه انتقال، لایه جلسه، لایه ارائه و لایه کاربرد [۸].

آخرین بخش WAMS که عمدتاً با بسته‌های نرم‌افزاری سروکار دارد، به عنوان سیستم مدیریت انرژی شناخته می‌شود. این سیستم با توجه به اطلاعات دریافتی، بهره‌برداری، کنترل و بهینه‌سازی سیستم قدرت را انجام می‌دهد. برخی از عملیات انجام شده روی داده‌ها در EMS عبارت‌اند از: پخش بار (LF)<sup>۶</sup>، تخمین حالت (SE)<sup>۷</sup>، پخش بار بهینه (OPF)<sup>۸</sup>، پیش‌بینی بار (LF)<sup>۹</sup> [۹].

<sup>1</sup> Energy Management System

<sup>2</sup> Injection Measurement

<sup>3</sup> Voltage Measurement

<sup>4</sup> Power Flow Measurement

<sup>5</sup> Open System Inter-connection

<sup>6</sup> Load Flow

<sup>7</sup> State Estimation

<sup>8</sup> Optimal Power Flow

<sup>9</sup> Load Forecast

تاکنون تحقیقات درباره WAMS، بیشتر معطوف به بحث جایابی بهینه PMU بوده است که از روش‌های مختلفی نیز برای این منظور استفاده شده است. این روش‌ها را می‌توان در دو دسته کلی، روش‌های تحلیلی و روش‌های بهینه‌سازی تکاملی تقسیم‌بندی کرد. در روش‌های تحلیلی، مسئله جایابی بهینه PMU ها در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح بیان می‌شود [۱۰]. از این‌رو، تعریف مناسب قیودی که ارضای هدف مدنظر مسئله را تضمین نماید، نقشی اساسی در دستیابی به پاسخ بهینه مسئله ایفا می‌کند. بنابراین، تفاوت میان این روش‌ها در چگونگی بیان قیود موردنیاز مسئله بهینه‌سازی است. از میان روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری نیز که تاکنون برای حل مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور استفاده شده است، می‌توان به جستجوی تابو (Tabu Search)، بهینه‌سازی گروهی ذرات ( Binary particle swarm) و الگوریتم زیستی (Genetic algorithm) اشاره کرد [۱۱]. تمامی این روش‌ها، تنها به مسئله جایابی بهینه PMU ها می‌پردازند. بنابراین توجهی به سایر بخش‌ها و طراحی WAMS ندارند. به‌ندرت در مقالات دیده می‌شود که به‌طور هم‌زمان همه بخش‌های WAMS در نظر گرفته شده باشد و بهینه‌سازی در آن‌ها انجام شود. در واقع در تمام موارد یاد شده، تنها به قسمت اول سیستم پایش فراگیر که همان اندازه‌گیری کمیت‌های شبکه است پرداخته می‌شود.

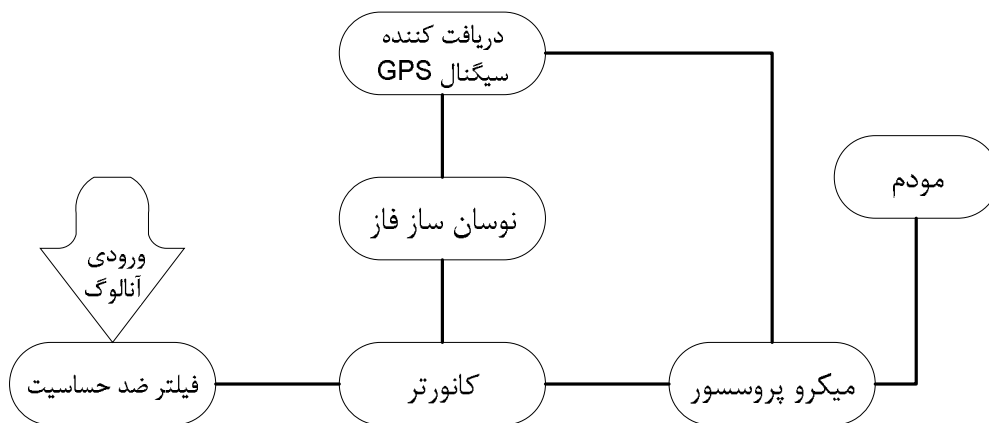
### ۲-۳- واحدهای اندازه‌گیری فازوری

اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در یک سیستم اسکادا دارای چند نقطه‌ضعف است. این اندازه‌گیری‌ها معمولاً به صورتی انجام می‌گیرند که 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 بنابراین در نتیجه از دقت کافی برخوردار نیستند [۱۲]. در نهایت اینکه با توجه به عدم اندازه‌گیری زاویه در این اندازه‌گیری‌ها، فازور ولتاژ و جریان را نخواهیم داشت. 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 [۱۳].

سیستم جدیدی که تلاش شده تا فاقد نواقص سیستم اسکادا باشد، سیستم WAMS 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) است و برای هم‌زمان‌سازی اندازه‌گیری‌ها از سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) استفاده می‌شود [۱۴]. قسمت‌های مختلف یک واحد اندازه‌گیری فازوری در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود که مربوط به اولین واحدهای اندازه‌گیری فازوری ساخته‌شده است [۱۵]. گرچه لازم به یادآوری است که ساخت این واحدهای اندازه‌گیری فازوری معمولاً متناسب با نوع کاربرد است.



شکل ۱-۲: پیکربندی یک واحد اندازه‌گیری فازوری

با دارا بودن اطلاعات اندازه‌گیری‌شده در نقاط مشخص شده، می‌توان با به‌کارگیری روابط ریاضی، کلیه شبکه را رؤیت پذیر نمود. دستگاه‌های اندازه‌گیری PMU با توجه به توانایی اندازه‌گیری فازور ولتاژ باس و جریان‌های متصل به آن، باعث صرفه‌جویی قابل توجهی در تعداد دستگاه‌های موردنیاز به‌منظور تخمین حالت شبکه می‌گردند. رؤیت‌پذیری در شبکه قدرت جهت تخمین حالت بسیار مهم می‌باشد و برای رسیدن به نتیجه مطلوب لازم است تعداد اندازه‌گیری‌ها از تعداد مجهولات مسئله بیشتر باشد. به سیستمی رویت‌پذیر می‌گویند که بتوان تمامی متغیرهای حالت سیستم را محاسبه کرد. در سیستم قدرت، باید حداقل تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده برای رویت‌پذیر کردن سیستم موجود باشد. این تعریف، برای شبکه انتقال و توزیع صادق است. از همین رو در این بخش به ارائه روشی جهت مشاهده‌پذیر کردن شبکه با استفاده از واحد اندازه‌گیری PMU پرداخته می‌شود [۱۶].

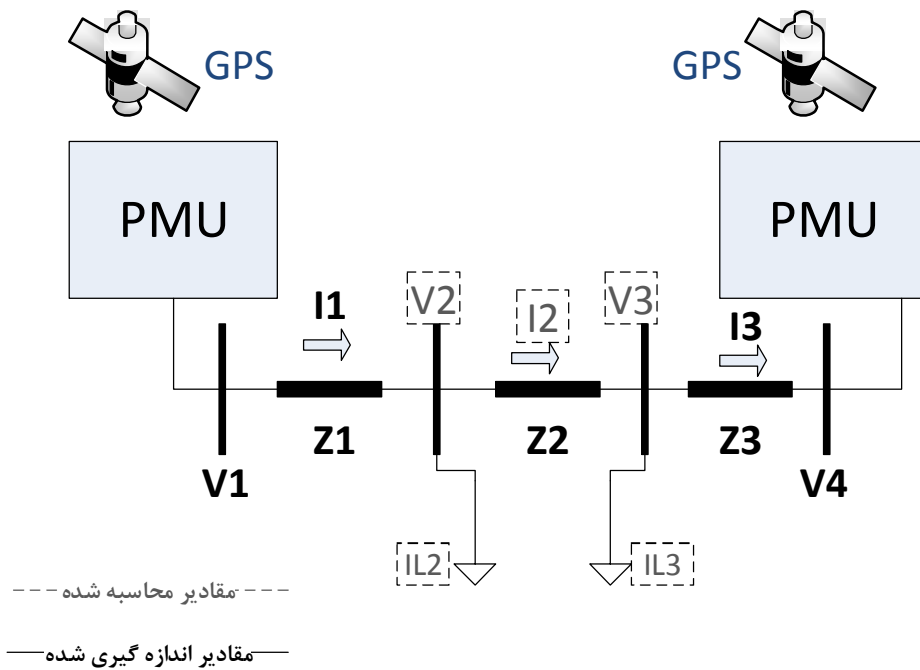
با نصب دستگاه اندازه‌گیری PMU در هر باس اطلاعات زیر به مرکز ارسال می‌گردد:

- فازور ولتاژ باس

- فازور جریان ورودی به باس

- فازور جریان خروجی از باس

با استفاده از اطلاعات فوق می توان کل شبکه را با حداقل اندازه گیری رؤیت پذیر نمود. با فرض اینکه هر واحد PMU قادر به اندازه گیری فازور ولتاژ باس و فازور جریان شاخه های متصل به آن باشد، به وسیله شکل ۲-۲ به شرح مثالی جهت محاسبه ولتاژ و جریان گره ها و شاخه های متصل به آن پرداخته می شود.



شکل ۲-۲: شبکه نمونه شعاعی

همان طور که ملاحظه می شود، در شبکه قدرت، بجای نصب دستگاه اندازه گیری در هر باس تنها با نصب دو عدد PMU در باس های شماره ۱ و ۴ می توان کلیه شبکه را به شرح زیر رؤیت پذیر نمود. با استفاده از باس هایی که ولتاژ و جریان های آنها توسط PMU قرائت شده است ولتاژ و جریان کلیه باس ها قابل محاسبه می باشد. به عنوان مثال، برای شکل ۲-۲ مطابق روابط (۱-۲) تا (۵-۲) عمل می شود.

$$V_2 = V_1 - Z_1 * I_1 \quad (۱-۲)$$

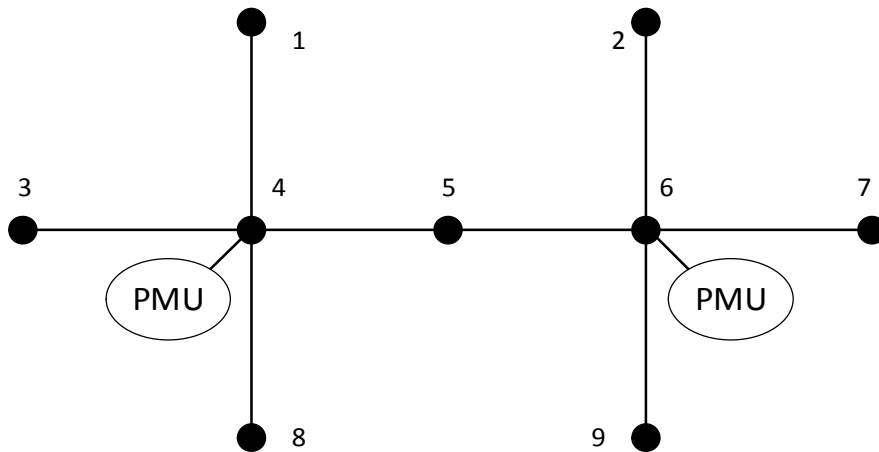
$$V_3 = V_4 + Z_3 * I_3 \quad (۲-۲)$$

$$I_2 = \frac{V_2 - V_3}{Z_2} \quad (۳-۲)$$

$$I_{L2} = I_1 - I_2 \quad (۴-۲)$$

$$I_{L3} = I_2 - I_3 \quad (۵-۲)$$

که در این روابط ولتاژ باس،  $V_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) و ولتاژ باس،  $I_i$  ( $i=1,2,3$ ) جریان باس،  $Z_i$  ( $i=1,2,3$ ) امپدانس خط می باشد. همچنین  $I_{L2}$ ،  $I_{L3}$  به ترتیب بار در باس ۲ و ۳ است. همان طور که ملاحظه می شود بر اساس قوانین کیرشهف به راحتی شبکه را بر مبنای PMU می توان رؤیت پذیر کرد. بدین صورت که در شبکه نمونه شکل ۲-۲، با اندازه گیری کمیت های  $V_1$ ،  $I_1$ ،  $V_4$ ،  $I_3$  سایر مجهولات شبکه از جمله  $V_2$ ،  $I_2$ ،  $V_3$ ،  $I_{L2}$ ،  $I_{L3}$  محاسبه می گردد. این خاصیت مهم PMU ها است که با توجه به قابلیت اندازه گیری همزمان زاویه کمیت های شبکه، تعداد دستگاه اندازه گیری کمتری نسبت به دستگاه های اندازه گیری معمولی نیاز است. به طور خلاصه می توان گفت که حضور هر PMU در یک باس، آن باس و تمام باس های مجاور را رؤیت پذیر خواهد کرد. روابط مربوط به این موضوع در قسمت بعد به تفصیل بیان خواهد شد. برای اینکه سودمند بودن این موضوع را بهتر متوجه شویم به شکل ۲-۳ توجه نمایید.



شکل ۲-۳: شبکه نمونه شعاعی

با نصب دو PMU در دو باس های ۴ و ۶ شبکه، می توان تمام باس های شبکه را در صورت کافی بودن کانال های ورودی دستگاه اندازه گیری رؤیت پذیر کرد. در نتیجه، با نصب تنها دو دستگاه اندازه گیری، کل شبکه قابل اندازه گیری خواهد بود.

## ۲-۴- رؤیت‌پذیری شبکه قدرت

به‌منظور کنترل و نظارت کامل، در یک شبکه قدرت تنها در صورتی می‌توان به کمک اطلاعات به‌دست‌آمده توسط واحدهای اندازه‌گیری فازوری نصب‌شده فرآیند تخمین حالت را انجام داد که شبکه قدرت در حضور این واحدهای اندازه‌گیری فازوری رؤیت‌پذیر باشد. در حقیقت پیش از پرداختن به فرآیند تخمین حالت باید بررسی کرد که آیا با اندازه‌گیری‌های انجام‌گرفته در قسمت‌های مختلف شبکه و نیز آگاهی از وضعیت توپولوژیکی شبکه، این فرآیند قابل اجرا خواهد بود یا نه؟ بدین منظور رؤیت‌پذیری شبکه قدرت مورد تحلیل قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در شبکه توسط واحدهای اندازه‌گیری فازوری انجام می‌گیرد. با توجه به اینکه هزینه تمام‌شده برای نصب این واحدهای اندازه‌گیری قابل توجه است، از این‌رو تنها در تعدادی از باس‌های شبکه اندازه‌گیر نصب می‌شود که مجموع هزینه نصب این واحدهای اندازه‌گیری در این باس‌ها کل هزینه صورت گرفته را تشکیل می‌دهد. بنابراین دو هدف مهمی که در بحث جایابی واحدهای PMU در یک شبکه قدرت به‌طور هم‌زمان مطرح است، یکی رؤیت‌پذیری شبکه قدرت و دیگری کاهش هزینه تمام‌شده است. به‌منظور تحلیل رؤیت‌پذیری یک شبکه قدرت، در مجموع چهار روش تحلیل معرفی شده است که عبارت‌اند از روش جبری، روش توپولوژیکی، روش عددی و روش ترکیبی [۱۷]. در این بین، روش توپولوژیکی به نسبت روش‌های دیگر از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و اکثر محققین با توجه به حجم کمتر محاسبات مورد نیاز، از این روش برای تحلیل رؤیت‌پذیری استفاده می‌کنند. در ادامه به توضیح این روش پرداخته می‌شود.

### ۲-۴-۱- تحلیل رؤیت‌پذیری به روش توپولوژیکی

در این روش در ابتدا شبکه قدرت با یک گراف مدل می‌شود. باس‌های شبکه همان گره‌ها و خطوط شبکه همان شاخه‌های گراف هستند. در این روش در حضور واحدهای اندازه‌گیری فازوری از قوانین زیر استفاده می‌شود [۱۸].

- ۱- برای باس‌های دارای واحد اندازه‌گیری فازوری، فازور ولتاژ مشخص است. 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 به‌کارگیری قانون اهم فازور ولتاژ باس‌های متصل مجاور را به دست آورد.

۳- با مشخص بودن فازور ولتاژ دو باس متصل به هم، به راحتی 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 به‌کارگیری قانون جریان کیرشهف جریان آن خط را نیز محاسبه کرد. در این رساله به منظور جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری در شبکه قدرت مشابه اکثر مراجع از روش توپولوژیکی استفاده می‌شود.

## ۲-۴-۲- رؤیت‌پذیری شبکه قدرت با استفاده از PMU ها به روش توپولوژیکی

همان‌گونه که در قسمت قبل اشاره شد، اهداف کلی مدنظر در بحث جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری در شبکه قدرت عبارت‌اند از [۱۹]:

۱- استفاده از کمترین تعداد وسایل اندازه‌گیری.

۲- برقرار بودن رؤیت‌پذیری شبکه با وسایل اندازه‌گیری مذکور.

برای فرمول‌بندی این بخش، هزینه صورت گرفته به‌عنوان تابع هدف و رؤیت‌پذیری شبکه قدرت به‌عنوان قید در نظر گرفته می‌شود. یک شبکه قدرت در صورتی به‌طور کامل رؤیت‌پذیر است که همه باس‌های آن رؤیت‌پذیر باشند. بنابراین در ابتدا رؤیت‌پذیری یک باس شبکه قدرت تعریف می‌شود.

**تعریف:** یک باس شبکه قدرت از دیدگاه شبکه قدرت رؤیت‌پذیر است اگر یک PMU به همراه تجهیزات اندازه‌گیری فازوری روی آن باس یا یکی از باس‌های متصل به آن باس وجود داشته باشد. بنابراین وجود PMU در یک باس تمامی باس‌های متصل به آن را رؤیت‌پذیر می‌کند. در نتیجه نحوه اتصالات باس‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. این اتصالات در ماتریس تلاقی گره مشخص است [۲۰]. اگر تعداد باس‌های شبکه برابر  $n$  باشد، ماتریس تلاقی گره  $n \times n$  بوده و عبارت است از:

$$A_{i,j} = \begin{cases} 1 & (i=j) \text{ or } (i \text{ is connected to } j) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6-2)$$

همچنین حضور یا عدم حضور دستگاه PMU در یک باس به صورت ریاضی به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{if a PMU is installed at bus } i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7-2)$$

با توجه به روابط فوق، جابجایی بهینه دستگاه‌های PMU به صورت زیر تعرف می‌گردد:

$$\text{Min } C \cdot X \quad (8-2)$$

*s.t.*

$$AX \geq u \quad (9-2)$$

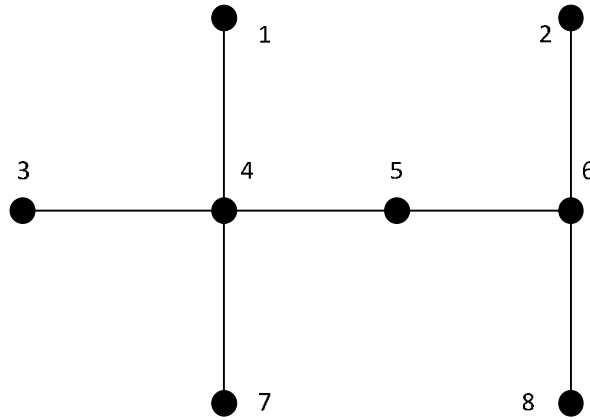
که در آن،  $C$  هزینه خرید و نصب یک دستگاه PMU است که به صورت رابطه ۱۰-۲ تعریف می‌گردد.

$$C = [C_1, C_2, \dots, C_N] \quad (10-2)$$

تمام متغیرهای  $X$  در یک بردار  $X$  جاگذاری می‌شوند که وجود یا عدم وجود PMU را مشخص می‌کند و همچنین بردار  $u$  یک ماتریس همانی است.

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_N \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11-2)$$

برای مشاهده‌پذیری کامل شبکه، در رابطه (۲-۹) باید برای هر باس بزرگ‌تر یا مساوی یک شود. این به معنی این است که هر باس حداقل به وسیله یک عدد PMU مشاهده‌پذیر باشد. برای مثال شبکه توزیع ۸ باسه فرضی شکل ۲-۴ در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲-۴: شبکه توزیع ۸ باسه نمونه

برای این شبکه ماتریس تلاقی گره به صورت معادلات ۲-۱۲ است.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

جایگذاری هر سطر این ماتریس در قید مسئله، رؤیت‌پذیری باس متناظر با آن سطر را بررسی می‌کند. برای مثال با ضرب سطر چهارم (مربوط به باس ۴) ماتریس A در بردار X، قید رؤیت‌پذیری مربوط به باس ۴ به دست می‌آید.

$$x_1 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 \geq 1 \quad (2-13)$$

با توجه به این نامساوی وجود حداقل یک واحد حس‌گر در یکی از باس‌های ۱،۳،۴،۵ یا ۷ سبب رؤیت‌پذیری باس ۴ خواهد شد. تمامی قیود این مسئله که مربوط به باس‌های مختلف می‌شود در رابطه (۱۴-۲) آمده است.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{bus1: } x_1 + x_4 \geq 1 \\ \text{bus2: } x_2 + x_6 \geq 1 \\ \text{bus3: } x_3 + x_4 \geq 1 \\ \text{bus4: } x_1 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 \geq 1 \\ \text{bus5: } x_4 + x_5 + x_6 \geq 1 \\ \text{bus6: } x_2 + x_5 + x_6 + x_8 \geq 1 \\ \text{bus7: } x_4 + x_7 \geq 1 \\ \text{bus8: } x_6 + x_8 \geq 1 \end{array} \right. \quad (14-2)$$

با توجه به اینکه مسئله فوق یک مسئله بهینه‌سازی خطی با متغیرهای باینری است، برای حل آن از جعبه‌ابزارهای محیط نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> یا برنامه گمز<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. نتیجه بدست آمده به صورت بردار ۱۵-۲ می‌باشد.

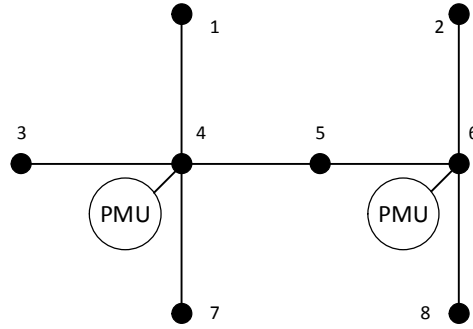
$$X = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15-2)$$

با توجه به نتیجه به‌دست‌آمده برای شبکه توزیع ۸ باسه با نصب دو PMU مطابق شکل ۲-۵ در باس‌های ۴ و ۶، کل شبکه قدرت رؤیت‌پذیر می‌شود.

<sup>۱</sup> MATLAB

<sup>۲</sup> GAMS





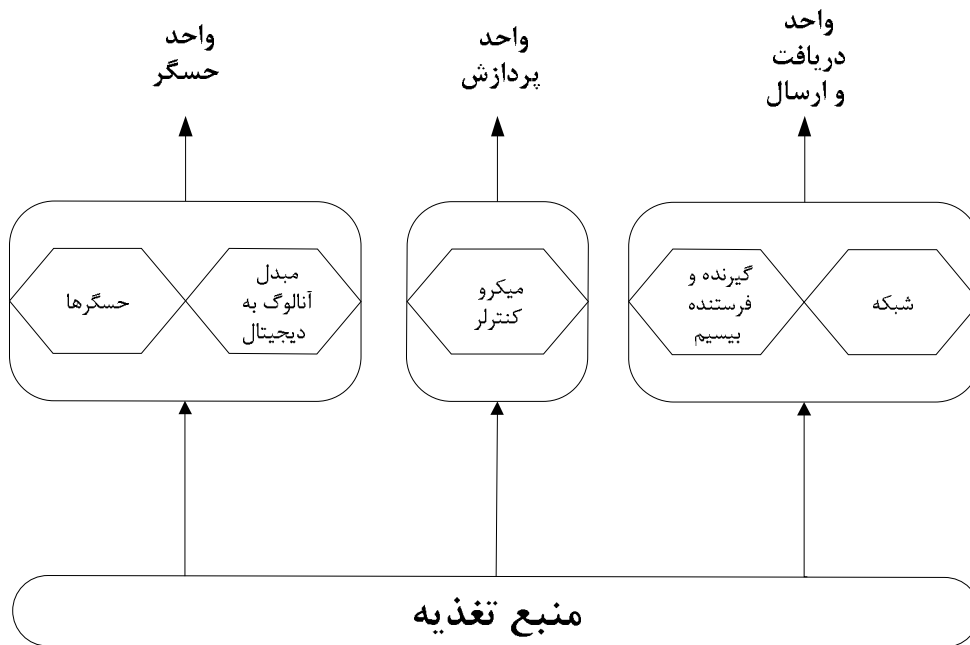
شکل ۲-۵: محل نصب گره‌های حس گر بی‌سیم در شبکه توزیع ۸ باسه

## ۲-۵- معرفی شبکه حس گر بی‌سیم

شبکه‌های بی‌سیم از هزاران دستگاه کوچک ارزان قیمت تشکیل شده است که قادر به انجام محاسبات، پردازش و ارتباط هستند. به عبارت دیگر اطلاعات در آن‌ها پردازش می‌گردید و همچنین حس گر‌ها با یکدیگر ارتباط دارند و اطلاعات درون یک شبکه به هم پیوسته انتقال می‌یابد و در صورت قطع یک مسیر اطلاعات از سایر مسیرها انتقال پیدا می‌کند. این فناوری دارای کاربردهای مختلفی از جمله صنایع [۲۲]، شهر هوشمند [۲۳]، عمران [۲۴]، پزشکی [۲۵]، خانه‌های هوشمند [۲۶]، مدیریت بحران و غیره است [۲۷].

شبکه حس گر بی‌سیم، نوعی شبکه بی‌سیم است که از مجموعه‌ای از قطعات کوچک و فشرده به نام گره حس گر 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. این گره‌ها در یک محیط پراکنده می‌شوند. هدف از پراکنده کردن این گره‌ها در محیط، به دست آوردن اطلاعاتی در مورد شرایط محیطی از جنبه‌های مختلف می‌باشد. ساختار یک گره حس گر از پنج واحد کلی تشکیل شده است: واحد حس گر، واحد پردازش، واحد دریافت و ارسال (فرستنده-گیرنده)، واحد مدیریت انرژی یا همان واحد منبع تغذیه و در نهایت تجهیزات جانبی [۲۸]. شکل ۲-۶، اجزای تشکیل دهنده یک واحد حس گر را نشان می‌دهد.

تجهیزات جانبی مانند سیستم موقعیت‌یاب، واحد متحرک ساز 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 هست، اطلاعات دریافتی از حس‌گر را پردازش می‌کند و از طریق واحد فرستنده به دیگر گره‌ها می‌فرستد [۲۹]-[۳۰].



شکل ۲-۶: ساختمان داخلی یک واحد حس‌گر

هر گره حس‌گر در شبکه دارای دو وظیفه اصلی است. یکی از این وظایف عبارت است از فرستادن اطلاعات جمع‌آوری‌شده توسط خود حس‌گر؛ یعنی خود حس‌گر از محیط اطلاعات را جمع می‌کند و به حس‌گر دیگر می‌فرستد. وظیفه دیگر دریافت اطلاعات از گره‌های مجاور و فرستادن آن به گره‌های دیگر می‌باشد. در واقع در این حالت، حس‌گر به عنوان مسیریاب (روتر<sup>۱</sup>) عمل می‌کند. به‌طور معمول انرژی صرف شده برای اندازه‌گیری کمیت در مقایسه با انرژی مصرفی به‌منظور برقراری ارتباط با دیگر گره‌ها

<sup>۱</sup> Router

کمر است. شبکه‌هایی که در آن‌ها عمل مسیریابی انجام نمی‌شود شبکه تک گامی<sup>۱</sup> و شبکه‌هایی که مسیریابی در آن‌ها انجام می‌گیرد شبکه چندگامی<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند.

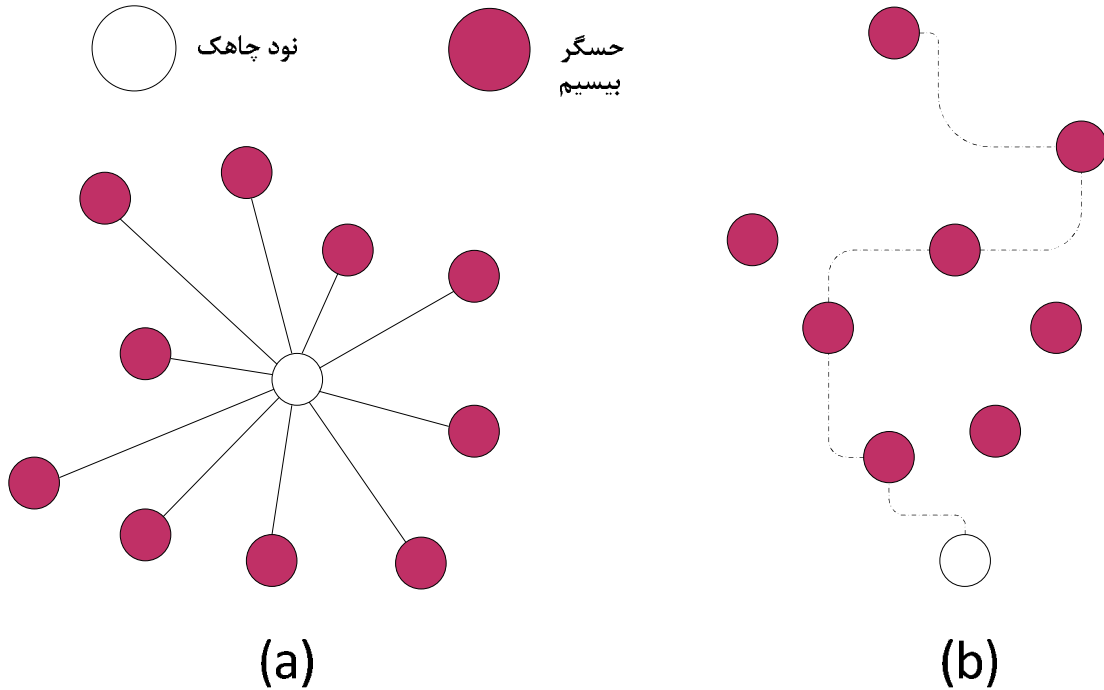
در شبکه‌های تک گامی هر گره به‌طور مستقیم با گره مرجع در ارتباط است که برای گره‌های با فاصله نسبتاً زیاد با گره مرجع این نوع ارتباط و انتقال داده خیلی سخت است. اما در شبکه‌های چندگامی هر گره با گره‌های مجاور خود نیز در ارتباط بوده و برای انتقال داده به گره مرجع از سایر گره‌ها بهره می‌برد. علاوه بر این، ترکیب این دو نوع ارتباط نیز در شبکه‌ها وجود دارد. بر این اساس اغلب شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم از نوع شبکه‌های چندگامی یا ترکیبی هستند. 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. نحوه ارتباط گره‌ها با یکدیگر و با گره مرجع در شکل ۲-۷ نشان داده شده است.

در راه‌اندازی و استقرار این شبکه‌ها با موانع و محدودیت‌های ذیل روبرو می‌شویم که عبارت‌اند از [۳۱]:

- ۱- مشکلات سخت افزاری
- ۲- قابلیت اطمینان
- ۳- قیمت تمام شده
- ۴- شرایط محیطی
- ۵- توان مصرفی حسگرها
- ۶- توپولوژی
- ۷- امنیت و مداخلات

<sup>۱</sup> Single Hob

<sup>۲</sup> Multi Hob



شکل ۲-۷: مودهای ارتباطی گره‌های حس‌گر: a: تک‌گامی، b: چندگامی

یکی از مسائل عمده در بهره‌برداری از شبکه‌های حسگر بیسیم، طول عمر آنها می‌باشد که معمولاً کوتاه است. با توجه به طول عمر کم حسگرها، موقعیت قرار گرفتن آنها در شبکه از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. مثلاً در گره‌ای که در فاصله کمی از چاهک قرار دارد و از کارافتادن آن باعث از کارافتادن شبکه می‌شود، باید تمهیدات بیشتری برای افزایش طول عمر آن در نظر گرفت [۳۲].

همچنین موضوع امنیت در برخی کاربردها بخصوص در کاربردهای نظامی از اهمیت بسیار بالاتری برخوردار است. بیسیم بودن این حسگرها، سیستم را در مقابل مداخلات آسیب‌پذیرتر می‌کند.

## ۲-۶- انواع حس‌گرهای بی‌سیم

حس‌گرهای بی‌سیم بسته به نوع استفاده می‌تواند از انواع مختلفی تشکیل شده باشد. این حس‌گرها در حالت پایه از باتری تشکیل شده‌اند. با توجه به اینکه تعویض باتری بسیار سخت و یا تا حدودی غیرممکن است، تمام شدن عمر باتری مساوی با تمام شدن عمر حس‌گر تلقی می‌شود. لذا نحوه مصرف باتری تابع مصرف انرژی حس‌گرها و همچنین حداقل‌سازی مصرف از جذاب‌ترین موارد مورد تحقیق به شمار

می‌آید. اینکه مصرف حس‌گرها چگونه مدیریت شود تا حداکثر عمر را داشته باشد نیاز به بهینه‌سازی مصرف انرژی با توجه به کارایی این حس‌گرها دارد.

به حس‌گرهایی که فقط با باتری کار می‌کنند حس‌گرهای بر پایه باتری (BPSN)<sup>1</sup> می‌گویند [۳۳]، [۳۴]. برای حداقل کردن مصرف این حس‌گرها می‌توان حالت‌های مختلف کاری برای آن‌ها تعریف کرد تا همیشه در حالت حداکثر مصرف انرژی قرار نگیرند.

حس‌گرهای بی‌سیم در سه حالت کاری طراحی می‌شوند:

Sleep: حس‌گر در وضعیت آماده‌به‌کار است (حداکثر زمان کاری در این حالت است).

Wake up: به سرعت حس‌گر آماده به کار می‌شود.

Active: فعال بودن حس‌گر و ارسال مطمئن اطلاعات.

بر این اساس این حس‌گرها همیشه در حالت active قرار ندارند و وقتی فعال می‌شوند که نیاز به انتقال اطلاعات باشد. بنابراین، می‌توان انرژی مصرفی آن‌ها را بهینه‌سازی کرد.

اما در سیستم قدرت نیاز به حس‌گرهایی با عمر بیشتر و قابلیت اطمینان بالاتر داریم. نوع دیگری از حس‌گرهای بی‌سیم امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند که می‌توانند از محیط به جذب انرژی بهره‌مند شوند. این حس‌گرها انرژی‌هایی مثل لرزش در محیط، باد یا انرژی خورشید را جذب کرده و آن را تبدیل به انرژی الکتریکی قابل مصرف خود می‌کنند. بدین صورت عمر مفید آن‌ها بسیار بیشتر از حالت قبل خواهد بود. به این حس‌گرها، حس‌گرهای جمع‌کننده انرژی از محیط (EHSN)<sup>2</sup> می‌گویند. بنابراین در این مدل حس‌گر، عمر مفید آن‌ها می‌تواند نسبت به حالت BPSN افزایش چشمگیری داشته باشد. توجه به این نکته ضروری است که قیمت این حس‌گرها نسبت به حس‌گرهای پایه باتری بیشتر است و بسته به اهمیت کاربرد می‌تواند به کار گرفته شود [۳۵].

حس‌گرهای EHSN معمولاً هم باتری دارند و هم دارای قابلیت جذب انرژی از محیط هستند. بنابراین عمر این حس‌گرها بسیار بیشتر از حس‌گرهای معمولی است و می‌تواند گزینه مناسبی جهت استفاده

<sup>1</sup> Battery-powered Sensor Node

<sup>2</sup> Energy-harvesting Sensor Node

در سیستم قدرت باشد. در شکل ۸-۲ نمونه از حس گرهای EHSN نمایش داده شده است که قیمت آن در حدود ۱۲۰ دلار می باشد [۳۶].



شکل ۸-۲: نمونه‌ای از حس گرهای EHSN [۳۶]

## ۲-۷- قابلیت اطمینان حس گرهای بی سیم

با توجه به اهمیت اطلاعات در سیستم قدرت، قابلیت اطمینان زیرساخت مخابراتی برای رسیدن اطلاعات به صورت کامل به مرکز کنترل بسیار مهم است. در سیستم مخابراتی معمول که شبکه فیبر نوری است، قابلیت اطمینان شبکه با توجه به زیرساخت پرهزینه آن نسبتاً قابل قبول است. اما در شبکه حس گرهای بی سیم، این مسئله باید مورد بحث قرار گیرد. در این قسمت قابلیت اطمینان شبکه حس گرهای بی سیم مورد بررسی قرار می گیرد. لازم به ذکر است که هر حس گر یک برد حس کننده ( $SR^1$ ) و یک برد فرستنده ( $Tr^2$ ) دارد. یعنی تا یک برد مشخص قابلیت برداشت اطلاعات و تا یک برد مشخص قابلیت ارسال اطلاعات را دارد [۳۷].

قابلیت اطمینان در شبکه حس گرهای بی سیم شامل دو قسمت است:

- قابلیت اطمینان حس گرها
- قابلیت اطمینان لینک بی سیم

<sup>1</sup> Sensing Range

<sup>2</sup> Transmission Range

روابط مربوط به هر بخش در ادامه مطرح خواهد شد.

## ۲-۷-۱- قابلیت اطمینان حس‌گرهای بی‌سیم

قابلیت اطمینان هر دو حس‌گر BPSN و EHSN در دو حالت روتر ( $R_r$ ) و کامل ( $R_{fullfunc}$ ) به صورت زیر است [۳۳]:

$$R_r(t) = R_{EF}(t) R_{ra}(t) R_{mc}(t) \quad (۱۶-۲)$$

$$R_{fullfunction}(t) = R_{EF}(t) R_{ra}(t) R_{mc}(t) R_{ms}(t) \quad (۱۷-۲)$$

که در این روابط:

$R_{ra}$ : قابلیت اطمینان واحد رادیویی

$R_{mc}$ : قابلیت اطمینان میکرو کنترلر

$R_{ms}$ : قابلیت اطمینان سیستم MEMS<sup>۱</sup>

$R_{EF}$ : قابلیت اطمینان واحد انرژی الکتریکی

قابلیت اطمینان واحد انرژی الکتریکی برای حس‌گرهای EHSN و BPSN متفاوت است. این عبارت برای EHSN به‌قرار زیر است:

$$R_{EF}(t) = R_{meh}(t) R_{pc}(t) R_{es}(t) R_{pm}(t) \quad (۱۸-۲)$$

که در این روابط:

$R_{meh}$ : قابلیت اطمینان واحد جمع‌کننده انرژی از محیط

$R_{pc}$ : قابلیت اطمینان واحد تهویه انرژی

$R_{es}$ : قابلیت اطمینان ذخیره‌ساز انرژی

<sup>۱</sup> Microelectromechanical System

$R_{pm}$ : قابلیت اطمینان مدیریت انرژی

قابلیت اطمینان واحد انرژی الکتریکی برای BPSN عبارت است از:

$$R_{EF}(t) = R_{ba}(t)R_{pm}(t) \quad (۱۹-۲)$$

که در این روابط:

$R_{ba}$ : قابلیت اطمینان باتری

$R_{pm}$ : قابلیت اطمینان مدیریت انرژی

### ۲-۷-۲- قابلیت اطمینان لینک بی‌سیم

قابلیت اطمینان لینک ارتباطی عبارت است از احتمال اینکه مسیر مطمئنی بین حس‌گرهای بی‌سیم وجود داشته باشد. برای دو مدل حس‌گر EHSN و BPSN این عبارت متفاوت است. در حس‌گرهای EHSN، قابلیت اطمینان به فاصله بین دو حس‌گر مرتبط است درحالی‌که در حس‌گرهای BPSN، قابلیت اطمینان تابع زمان می‌باشد.

قابلیت اطمینان برای حس‌گرهای EHSN تابع فاصله بین فرستنده و گیرنده بوده و به صورت رابطه (۲-۲۰) بیان می‌گردد [۳۳].

$$R = \frac{1}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{10 \log(d / tr)}{\sqrt{2 \log(10\psi)}} \right) \right] \quad (۲۰-۲)$$

$$\psi = \frac{\sigma}{\eta} \quad \text{if} \quad \frac{d}{tr} \leq 1$$

که:

erf: تابع احتمال خطا

tr: برد فرستنده

d: فاصله بین دو حس‌گر



σ: انحراف از معیار

η: تلفات مسیر

رابطه قابلیت اطمینان لینک ارتباطی برای حس‌گرهای BPSN شبیه به رابطه (۲-۲۰) است با این تفاوت که در آن به جای tr از یک عبارت وابسته به زمان استفاده می‌شود. برد فرستنده (tr) برای این حس‌گرها عبارت است از:

$$tr_{\max}(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t(t) \cdot G_t \cdot G_r}{P_r}} \quad (2-21)$$

که:

λ: طول موج

G<sub>t</sub>: گین آنتن فرستنده

G<sub>r</sub>: گین آنتن گیرنده

P(t)=I(t)×V(t): مصرف باتری BPSN

بر این اساس، قابلیت اطمینان لینک ارتباطی در حس‌گرهای BPSN وابسته به زمان است. بنابراین این حس‌گرها گزینه مناسبی برای شبکه قدرت نیستند و حس‌گرهای EHSN می‌توانند عملکرد بهتری نسبت به این حس‌گرها داشته باشند.

## ۲-۸- مروری بر تاریخچه رؤیت‌پذیری سیستم قدرت

در ابتدای استفاده از دستگاه‌های PMU و قابلیت بالای این دستگاه‌ها، موضوع رؤیت‌پذیری شبکه با استفاده از این وسیله جدید، جذابیت بسیاری برای محققان پیدا کرد و روش‌های مختلفی بر اساس حداقل‌سازی هزینه پایش شبکه ارائه شد. تابع هدف ارائه‌شده به‌طور کلی شامل حداقل‌سازی هزینه نصب PMU ها با توجه به رؤیت‌پذیری شبکه بوده است. قیدهایی مختلفی از جمله باس‌های تزریق صفر،

تعدادهای کانال‌های دستگاه اندازه‌گیری، حضور دستگاه‌های اندازه‌گیر سنتی در سیستم و یا افزونگی<sup>۱</sup> مشاهده‌پذیری، امنیت سیستم در صورت خروج دستگاه‌های اندازه‌گیری و یا خطوط به تابع هدف اضافه شده است که در بخش‌های بعدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین در بعضی از تحقیق‌های صورت گرفته، قابلیت اطمینان دستگاه‌های اندازه‌گیری مورد ارزیابی قرار گرفته است.

اخیراً در تابع هدف بهینه‌سازی سیستم WAMS، هزینه نصب سیستم مخابراتی در کنار دستگاه‌های اندازه‌گیری PMU مورد ارزیابی قرار گرفته است. زیرا با حضور سیستم مخابراتی قدیمی، هزینه تمام‌شده فقط به سیستم قدرت مربوط نبوده و سیستم مخابراتی نیز هزینه قابل‌توجهی در کنار آن دارا است. بنابراین جواب بهینه سراسری سیستم WAMS بدون در نظر گرفتن سیستم مخابراتی به دست نمی‌آید. لذا، مقالاتی که در این زمینه در سال‌های اخیر منتشر شده‌اند در ادامه بررسی خواهد شد.

## ۲-۸-۱- بهینه‌سازی سیستم پایش فراگیر

در مقالات و تحقیق‌های صورت گرفته در سال‌های اخیر، هدف اکثر محققین حداقل‌سازی هزینه سیستم WAMS با قید مشاهده‌پذیری سیستم قدرت است. درواقع جایابی بهینه دستگاه‌های PMU یا OPP<sup>۲</sup> با قید مشاهده‌پذیر شدن سیستم قدرت با حداقل هزینه ممکن، تابع هدف این تحقیقات است. روش‌های ارائه‌شده به دو دسته کلی روش‌های ریاضی و روش‌های ابتکاری تقسیم می‌گردد. برنامه‌ریزی خطی (ILP)<sup>۳</sup> یکی از عمومی‌ترین روش‌های حل در مسئله در دسته اول است. از میان روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری نیز که تاکنون برای حل مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور استفاده شده است، می‌توان به جستجوی تابو [۳۸]، بهینه‌سازی گروهی ذرات [۳۹] و الگوریتم زیستی [۴۰] اشاره کرد. همچنین سناریوهای مختلفی برای مشاهده‌پذیری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که می‌توان از آن جمله به افزونگی [۱۱]، امنیت [۴۱] و دسترس‌پذیری اطلاعات [۷] اشاره کرد.

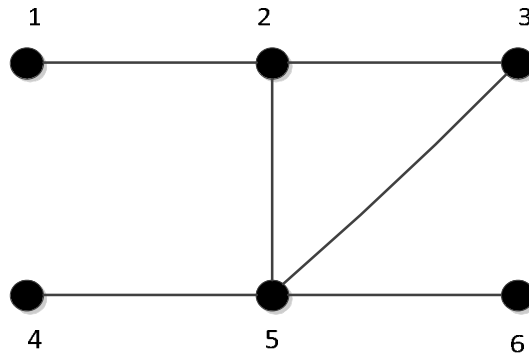
در مرجع [۴۲]، یک روش بهینه‌سازی خطی برای جایابی بهینه PMU ها ارائه شده که در آن، تأثیر باس‌های تزریق صفر به‌صورت خطی بیان شده است. در این حالت، برای باس‌هایی که با باس تزریق

<sup>1</sup> Redundancy

<sup>2</sup> Optimal PMU Placement

<sup>3</sup> Integer Linear Programming

صفر در ارتباط هستند از یک متغیر کمکی استفاده می‌شود. بر اساس مدل ارائه‌شده در این مقاله، از مجموع باس‌هایی که با باس تزریق صفر در ارتباط هستند، اگر همه به‌جز یکی مشاهده‌پذیر باشند، آن باس نیز مشاهده‌پذیر خواهد بود. مجموع باس‌هایی که به باس تزریق صفر متصل می‌باشند با  $B$  نشان داده می‌شوند. به‌عنوان مثال به شبکه شش باسه شکل ۲-۹ دقت کنید.



شکل ۲-۹: شبکه نمونه ۶ باسه

در صورتی که هیچ‌کدام از باس‌ها ZIB نباشند، حداقل دو عدد PMU برای رؤیت‌پذیر کردن شبکه لازم است.

در این شبکه دو عدد PMU می‌تواند در باس‌های ۵ و ۲ قرار گیرد. حال فرض کنید باس ۲ یک ZIB باشد. در این حالت مجموعه  $B$  که عبارت است از باس‌هایی که به باس ۲ متصل هستند برابر است با:

$$B_2 = \{1, 2, 3, 5\} \quad (22-2)$$

از مجموعه ۴ باس ۱، ۲، ۳ و ۵، مشاهده‌پذیری ۳ باس برای کل سیستم کافی است. برای این منظور متغیر جدیدی با نام  $u$  تعریف می‌گردد.

$$\sum_{k \in B_i} u_k \geq |B| - 1 \quad \forall i \in Z \quad (23-2)$$

که در آن  $Z$  مجموعه باس‌های تزریق صفر است. بنابراین در شکل ۱ که باس ۲ یک ZIB است، معادله زیر به کل معادلات سیستم اضافه می‌شود:

$$u_1 + u_2 + u_3 + u_5 \geq 3 \quad (24-2)$$

نامعادله بالا به این معنی است که از ۴ باس ۱ و ۲ و ۳ و ۵، مشاهده‌پذیری ۳ باس برای مشاهده‌پذیری کل سیستم کافی است. با قرار دادن یک عدد PMU در باس ۵، از مجموعه B فقط باس ۱ مشاهده‌پذیر است. اما، با توجه به اینکه رابطه (۲۴-۲) ارضا می‌گردد، همه باس‌ها مشاهده‌پذیر بوده و بنابراین تنها با یک عدد PMU در باس ۵ تمام شبکه مشاهده‌پذیر می‌گردد. به‌وسیله این مثال مشخص می‌شود که با در نظر گرفتن باس‌های ZIB، تعداد PMU های لازم برای مشاهده‌پذیری شبکه کاهش می‌یابد. فرمول‌بندی کلی برای مسئله OPP با در نظر گرفتن باس‌های تزریق صفر بر اساس مرجع [۴۲] به‌صورت زیر است:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (25-2)$$

$$\text{s.t. } AX \geq u \quad (26-2)$$

$$u_j = 1 \quad \forall j \notin B_1 \cup B_2 \dots \cup B_z \quad (27-2)$$

$$\sum_{k \in B_i} u_k \geq |B_i| - 1 \quad \forall i \in Z \quad (28-2)$$

همچنین همان‌طور که در شکل ۲-۹ مشاهده می‌کنید، اگر باس ZIB برای سیستم در نظر گرفته نشود، دو عدد PMU و دو جواب ممکن برای مسئله پیدا می‌شود. در حالت کلی برای حل مسئله OPP، معمولاً چند جواب ممکن وجود دارد. یعنی PMU ها می‌توانند در باس‌های ۵ و ۱ و یا در باس‌های ۵ و ۲ جاگذاری شوند. اما کدام جواب بهتر است؟ برای این منظور شاخصی تعریف شده است که با توجه به اینکه هر باس توسط تعداد بیشتری دستگاه اندازه‌گیری مشاهده‌پذیر شود، جواب بهتر را انتخاب می‌کند. به این شاخص، شاخص مشاهده‌پذیری باس (BOI)<sup>۱</sup> می‌گویند که نشان می‌دهد هر باس توسط چند دستگاه PMU مشاهده‌پذیر می‌شود. به مجموع تمام BOI ها در تمام باس‌ها شاخص افزونگی

<sup>۱</sup> Bus Observability Index

مشاهده پذیری سیستم (SORI<sup>1</sup>) می گویند. همچنین در مرجع [۴۲] شاخص SORI به صورت زیر تعریف می گردد:

$$SORI = \sum_{i=1}^n BOI_i \quad (2-29)$$

که در آن n تعداد باس های شبکه است. به عنوان مثال در جدول ۱-۲ ملاحظه می گردد که مجموع جواب دوم دارای SORI بالاتر و برابر ۹ است در حالی که این شاخص برای مجموعه جواب اول برابر ۷ است. هر چه این شاخص بیشتر باشد به این معنی است که با حذف یا از دست رفتن یک PMU، تعداد باسهای بیشتری رؤیت پذیر می ماند و بهتر است. به عنوان مثال، در مجموعه جواب اول، اگر PMU در باس ۵ از بین برود، فقط باس های ۱ و ۲ مشاهده پذیر می ماند. ولی در مجموعه جواب دوم، اگر PMU در باس ۵ از بین برود، باس های ۱، ۲، ۳ و ۵ همچنان مشاهده پذیر هستند. در نتیجه این شاخص، با قابلیت اطمینان سیستم می تواند در ارتباط باشد.

جدول ۱-۲: شاخص های افزونگی برای شبکه نمونه ۶ باسه

دوم	اول	مجموعه جواب	
PMU در باس های ۲ و ۵	PMU در باس های ۱ و ۵		باس
۱	۱	BOI	۱
۲	۲		۲
۲	۱		۳
۱	۱		۴
۲	۱		۵
۱	۱		۶
۹	۷	SORI	

<sup>1</sup> System Observability Redundancy Index

در مرجع [۴۳]، برای حل مسئله OPP، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در این مقاله نویسندگان سعی در افزایش سرعت الگوریتم برای رسیدن به جواب و همچنین جلوگیری از تولید جواب‌های تکراری دارند.

در مرجع [۴۴]، روشی برای مشاهده‌پذیری شبکه قدرت بر اساس قابلیت اطمینان اجزای سیستم ارائه شده است. در این مقاله سعی شده است که جواب‌های متعدد برای مسئله OPP به‌وسیله الگوریتم ژنتیک به دست آید. همچنین یک شاخص کلی برای قابلیت اطمینان در این مقاله بیان شده است. در واقع در این مقاله، برای احتمال خرابی اجزای PMU، شاخصی شبیه شاخص SORI تعریف شده است. در این تحقیق، برای هر کدام از اجزایی که در انتقال اطلاعات به مرکز کنترل نقش دارند، ضریب قابلیت اطمینان تعریف شده است. این اجزا عبارت‌اند از: PMU، PT، CT، لینک مخابراتی و خط انتقال. ضریب قابلیت اطمینان برای هر باس به نام (BRI<sup>۱</sup>) نام‌گذاری شده است. همچنین برای کل سیستم شاخصی به نام (OSRI) تعریف می‌گردد که حداکثرسازی آن برای انتخاب بهترین جواب هدف این تحقیق است.

$$OSRI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N BRI_i \quad (۳۰-۲)$$

در مرجع [۴۵]، مدلی برای جایابی بهینه ترکیبی از میکرو PMU های تک فاز و سه فاز ارائه شده است. برای حل این مدل، از برنامه‌ریزی خطی اعداد باینری (BILP<sup>۲</sup>) استفاده شده است. همچنین برای استفاده کامل از تأثیر باس‌های تزریق صفر، از دو مدل (FZIB<sup>۳</sup>) و (PZIB<sup>۴</sup>) استفاده شده است. در مراجع [۴۶] و [۴۷]، به بررسی دقیق‌تر باس‌های تزریق صفر در شرایط خاص پرداخته شده است. برای این منظور، چند قاعده ارائه شده که با استفاده از آن‌ها می‌توان در حالت‌های خاص به بررسی این باس‌ها پرداخت. این قوانین را می‌توان به‌صورت ذیل دسته‌بندی کرد:

۱- اگر یک باس با هیچ باس ZIB در تماس نباشد، معادله  $f_i$  در آن بدون تغییر باقی می‌ماند.

<sup>۱</sup> Bus Reliability Index

<sup>۲</sup> Binary Integer Linear Programming

<sup>۳</sup> Fully Zero Injection Buses

<sup>۴</sup> Partially Zero Injection Buses

۲- در یک مجموعه باس متصل به ZIB ها، اگر همه باس‌ها (n تعداد باس) به‌جز یک باس مشاهده‌پذیر باشد، بقیه باس‌ها هم مشاهده‌پذیر است.

$$\sum_{i=1}^n f_i \geq n - 1 \quad (31-2)$$

۳- اگر یک باس بین دو یا تعداد بیشتری ZIB قرار بگیرد، در واقع بین m تا ZIB باشد، و مجموع باس‌های متصل به ZIB ها و آن باس برابر n باشد، برای مشاهده‌پذیری کل سیستم باس‌ها کافی است که n-m عضو مشاهده‌پذیر باشد:

$$\sum_{i=1}^n f_i \geq n - m \quad (32-2)$$

۴- اگر تعداد m باس ZIB به هم متصل باشند، و مجموع باس‌های متصل به هم برابر n باشد، برای مشاهده‌پذیری همه باس‌ها کافی است که n-m عضو مشاهده‌پذیر باشد:

$$\sum_{i=1}^n f_i \geq n - m \quad (33-2)$$

پس از نوشتن معادلات در این حالت، به ماتریس جدید سیستم می‌رسیم. یعنی ماتریس A و B که نحوه اتصال باس‌ها را مشخص می‌کنند متفاوت خواهند شد:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (34-2)$$

$$A^{\text{new}} X \geq b^{\text{new}} \quad (35-2)$$

برای مشاهده‌پذیری سیستم می‌توان معادلات سیستم را گسترده‌تر نوشت به این صورت که با در نظر گرفتن باس‌های ZIB در حالت نرمال معادلات زیر قابل استفاده و کارا می‌باشند:

$$f_i = \sum_{j \in SB} a_{ij} x_j + \sum_{j \in SB} a_{ij} z_j y_{ij} \quad (36-2)$$

$$\sum_{i \in SB} a_{ij} y_{ij} = z_j \quad j \in SB \quad (37-2)$$

$$f_i \geq 1 \quad i \in SB \quad (38-2)$$

که آن نشان دهنده باسهای ZIB و  $y_{ij}$  متغیر باینری کمکی برای حل معادلات است. همچنین  $f_i$  تابع مشاهده‌پذیری و  $a_{ij}$  ماتریس اتصال شبکه است.

در مرجع [48]، مشاهده‌پذیری سیستم قدرت با حضور دستگاه‌های اندازه‌گیری قدیمی به‌خصوص دستگاه‌های اندازه‌گیری شار (PFM)<sup>1</sup> و در صورت بروز خطاهای مختلف بررسی شده است. حضور دستگاه‌های اندازه‌گیری PFM در شبکه شبیه باس‌های تزریق صفر است. بدین‌صورت که اگر بین دو باس، یک دستگاه PFM وجود داشته باشد، رؤیت‌پذیری یکی از باس‌ها به‌وسیله شبکه، برای رؤیت‌پذیری کل سیستم کافی است:

$$f_i + f_j \geq 1 \quad (39-2)$$

رابطه (39-2) مؤید کافی بودن رؤیت‌پذیری یکی از باس‌ها برای رؤیت‌پذیری کامل سیستم است. حال به‌منظور افزایش امنیت سیستم و در صورت خارج شدن یک PMU، می‌خواهیم سیستم مشاهده‌پذیر باقی بماند برای این منظور باید از خاصیت باس‌های تزریق صفر استفاده کرد تا تعداد PMU‌های مورد نیاز کمتر شود. رابطه‌ای که می‌توان برای این منظور استخراج کرد به‌صورت زیر است:

$$f_i + \sum_{j \in SB} a_{ij} y_{ij} \geq 2 \quad i \in SB \quad (40-2)$$

که در آن SB مجموعه باسهای شبکه می‌باشد. در مورد باس‌های شعاعی (باس‌هایی که فقط به یک باس متصل هستند) لازم نیست که امنیت در PMU در این باس‌ها برقرار باشند و اگر خط منتهی به این باس‌ها و یا PMU در این باس‌ها قطع شد، این باس جزیره شده و عدم دریافت اطلاعات در آن به بقیه سیستم اندازه‌گیری خللی وارد نمی‌کند. پس در این باس‌ها می‌توان رابطه (40-2) را اصلاح کرد.

<sup>1</sup> Power Flow Measurement



$$f_i + \sum_{j \in SB} a_{ij} y_{ij} \geq 1 \quad i \in \text{Radial Bus} \quad (41-2)$$

به این نکته نیز دقت شود که اگر اتصال یک باس شعاعی با کل سیستم قطع شود اندازه‌گیری مهمی وجود ندارد. زیرا این باس یا باس بار است که با قطع اتصال آن بار صفر شده و یا باس ژنراتور است که باز هم با توجه به قطع از شبکه، تریپ داده شده است. در مرجع [۶]، سعی شده است مدل مجتمع از تأثیر باس‌های ZIB و همچنین دستگاه‌های اندازه‌گیری قدیمی ارائه شود. اساس مدل ارائه‌شده بر خطی سازی سیستم می‌باشد. همان‌طور که می‌دانید، دستگاه‌های اندازه‌گیری قدیمی می‌توانند در سیستم WAMS به رؤیت‌پذیری سیستم کمک کند. از جمله آن‌ها می‌توان به IM<sup>۱</sup>، VM<sup>۲</sup> و PFM<sup>۳</sup> اشاره کرد. برای هر کدام از این دستگاه‌ها، روشی به منظور خطی‌سازی و دخیل کردن آن‌ها به محاسبات ارائه شده است.

در استفاده از دستگاه‌های PFM نکته خاصی در این مقاله وجود دارد. بدین صورت که اگر در یک باس، چند دستگاه PFM به هم تداخل کنند، آیا لازم است معادلات آن‌ها به صورت جداگانه نوشته شود یا خیر؟ با توجه به رابطه کلی ارائه شده برای اندازه‌گیرهای PFM، بین هر دو باس که یک دستگاه اندازه‌گیر وجود دارد یک مجموعه (SOPFM<sup>۴</sup>) تشکیل می‌شود که باید با رابطه زیر نوشته شود:

$$SOPFM = \{i, j\} \rightarrow f_i + f_j \geq 1 \quad (42-2)$$

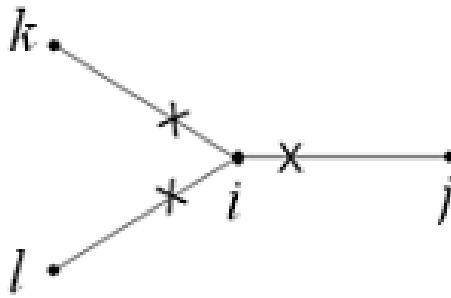
حال به شکل ۲-۱۰ توجه کنید. در این شکل در باس i سه دستگاه PFM با هم وجود دارند و ظاهراً باید سه مجموعه معادله نوشته شود.

<sup>1</sup> Injection Measurement

<sup>2</sup> Voltage Measurement

<sup>3</sup> Power Flow Measurement

<sup>4</sup> Set of Power Flow Measurement



شکل ۲-۱۰: شبکه نمونه دستگاه‌های اندازه‌گیری شار

ولی در واقع کافی است که سه معادله باهم ادغام شده و یک معادله به دست آید:

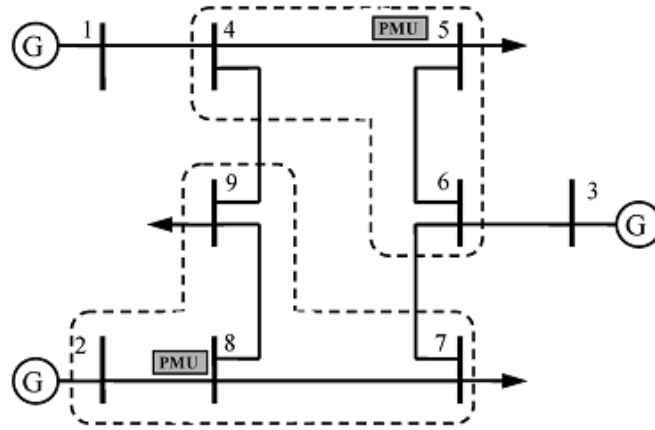
$$\left. \begin{aligned} SOPFM_1 = \{i, j\} &\rightarrow f_i + f_j \geq 1 \\ SOPFM_2 = \{i, k\} &\rightarrow f_i + f_k \geq 1 \\ SOPFM_3 = \{i, l\} &\rightarrow f_i + f_l \geq 1 \end{aligned} \right\} \rightarrow f_i + f_l + f_k + f_j \geq 1 \quad (۴۳-۲)$$

در این حالت تعداد PMU کمتری می‌تواند برای مشاهده‌پذیری شبکه استفاده گردد. به‌عنوان مثال، در حالتی که سه معادله جداگانه نوشته شود، حتماً باید یک عدد PMU در باس  $i$  نصب شود تا هر سه معادله ارضا گردد. ولی با ادغام معادلات، دستگاه PMU در هر کدام از باس‌های  $i, j, k, l$  می‌تواند نصب شود و محدودیت کمتری به بهینه‌سازی شبکه تحمیل می‌گردد.

در مرجع [۴۹]، روشی برای بروز خطاهای احتمالی در سیستم ارائه شده است که این خطاها می‌تواند خطای از دست رفتن یک PMU و یا یک خط باشد. نتایج نشان می‌دهد که خروج یک عدد PMU معمولاً ضربه بیشتری به سیستم وارد می‌کند و برای امن کردن سیستم در مورد خروج PMU ها نسبت به خروج خط انتقال، باید تعداد بیشتری لوازم اندازه‌گیری در نظر گرفت. البته این تفاوت تعداد بیشتر در شبکه‌های بزرگ جلوه‌گر می‌گردد. شبکه ۹ باسه در شکل ۲-۱۱ را در نظر بگیرید. در این شبکه باس‌های ۴، ۶، ۸، ZIB تعریف شده‌اند. ملاحظه می‌گردد که با روش ارائه‌شده در این مقاله، تنها با دو عدد PMU در باس‌های ۵ و ۸، سیستم کاملاً مشاهده‌پذیر می‌گردد. بدین صورت که باس‌های {۲ و ۴ و ۵ و ۶ و ۷ و ۸ و ۹} مستقیماً به‌وسیله دستگاه‌های PMU مشاهده‌پذیر می‌گردند. اما باس ۳ به‌وسیله اثر ZIB در باس ۶ مشاهده‌پذیر می‌گردد. همان‌طور که در معادله (۲۳-۲) نشان داده شد، مجموعه B برای باس ۶ می‌تواند به‌صورت زیر نوشته شود:

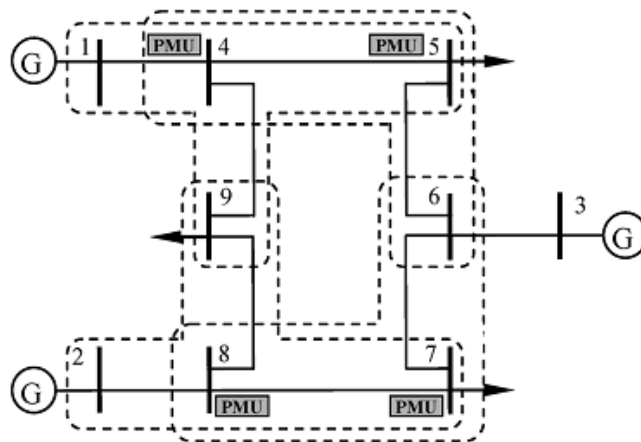
$$B_6 = \{3, 5, 6, 7\} \quad (44-2)$$

از مجموع این چهار باس، سه باس ۵، ۶ و ۷ مشاهده‌پذیر می‌باشند و بر اساس تعاریف بیان‌شده، باس دیگر نیز بر اثر تأثیر ZIB مشاهده‌پذیر گشته و در نتیجه باس ۳ نیز مشاهده‌پذیر می‌شود. همچنین باس ۱ نیز به‌وسیله اثر ZIB باس ۴ مشاهده‌پذیر می‌گردد.



شکل ۲-۱۱: شبکه نمونه ۹ باسه [۴۹]

بر اساس روش ارائه‌شده در این مقاله، اگر بخواهیم شبکه ۹ باسه را در صورت خروج یک عدد PMU امن کنیم (N-1 contingency)، تعداد چهار عدد PMU به‌صورت شکل ۲-۱۲ نیاز خواهد بود.



شکل ۲-۱۲: شبکه نمونه ۹ باسه ایمن شده در اثر خروج یک PMU [۴۹]

در این حالت ملاحظه می‌گردد که در صورت خروج هر کدام از PMU ها، شبکه به‌وسیله سه دستگاه دیگر مشاهده‌پذیر خواهد بود.

در مرجع [۵۰]، مشاهده پذیری سیستم در صورت خروج احتمالی هر کدام از اجزای سیستم بررسی شده است. در این تحقیق در واقع یک احتمال مشاهده پذیری برای هر باس تعریف شده است. رابطه‌ای که برای هر باس تعریف شده است به صورت زیر است:

$$PO_s = A_s^{V_m} A_s^{PMU} A_s^{Link} \quad (۴۵-۲)$$

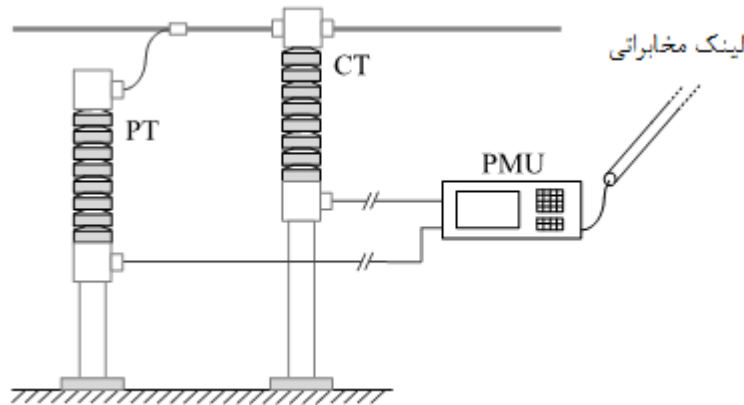
که در این رابطه:

$A_s^{V_m}$ : دسترس پذیری اندازه‌گیر ولتاژ در باس s

$A_s^{PMU}$ : دسترس پذیری PMU در باس s

$A_s^{link}$ : دسترس پذیری لینک مخابراتی برای PMU در باس s

شماتیکی از اجزایی که برای مشاهده پذیری در هر باس نیاز است در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۳: شماتیک اجزای لازم اندازه‌گیری در هر باس [۵۰]

همچنین اگر باس r به حضور PMU در باس s مشاهده پذیر شده باشد، اندازه‌گیر جریان بین دو باس r و s و همچنین خط ارتباطی بین دو باس نیز باید به معادله (۴۵-۲) اضافه گردد و رابطه به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$PO_r = A_s^{V_m} A_s^{PMU} A_s^{Link} A_{rs}^{CM} A_{rs}^{line} \quad (۴۶-۲)$$

که در این رابطه:

$A_{rs}^{CM}$ : دسترس‌پذیری اندازه‌گیر جریان در خط RS

$A_{rs}^{line}$ : دسترس‌پذیری خط RS

در مرجع [۵۱]، برای اجتناب از روابط و قوانین (۲-۳۱) تا (۲-۳۵) که مربوط به باس‌های ZIB است، سعی شده است که یک رابطه جامع برای این مسئله پیدا شود. این رابطه را می‌توان به‌طور کلی به همه باس‌های شبکه تعمیم داد و جواب بهینه را به‌وسیله (MILP<sup>۱</sup>) به دست آورد. در مرجع [۵۲]، بهینه‌سازی در صورت بروز خطا برای میکرو PMU ها در یک ریزشبکه ارائه شده است.

در مراجع شماره [۴۲] تا [۵۲]، عمدتاً به حداقل سازی تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری PMU با توجه به قیود مختلفی مانند باس تزریق صفر (ZIB<sup>۲</sup>)، دستگاه‌های اندازه‌گیری قدیمی (CM<sup>۳</sup>)، افزونگی مشاهده‌پذیری سیستم، قابلیت اطمینان مشاهده‌پذیری و امنیت سیستم اندازه‌گیری پرداخته شده است. در تمام این مراجع، روشهایی با توجه به هدف بهینه‌سازی تحقیق‌های مربوطه ارائه گردیده است. اما، تاثیر شبکه مخابراتی در بهینه‌سازیهای صورت گرفته اعمال نشده است.

در مرجع [۵۳]، یک بهینه‌سازی robust برای جایی بهینه PMU ها و به‌منظور افزونگی n-k ارائه شده است. این برنامه مشاهده‌پذیری سیستم را برای خروج تعداد k عدد دستگاه PMU تضمین می‌کند. همچنین تأثیر باس‌های تزریق صفر و اندازه‌گیرهای قدیمی در سیستم در نظر گرفته شده است. در این تحقیق سعی شده است که یک برنامه دوسطحی به یک برنامه خطی یک سطحی تبدیل شود.

در مرجع [۵۴]، سعی شده است تعداد خطا در خطوط انتقال در حالت N-2 بررسی شود. در این تحقیق تأثیر اندازه‌گیرهای قدیمی در محاسبات سیستم لحاظ شده است. برای حل این مسئله از MILP استفاده شده است. همچنین در مرجع [۵۵]، محدودیت کانالهای خروجی دستگاه‌های PMU برای بهینه‌سازی

<sup>۱</sup> Mixed Integer Linear Programming

<sup>۲</sup> Zero-Injection Bus

<sup>۳</sup> Conventional Measurements

مسئله در نظر گرفته شده است. در این مقاله نیز مشاهده‌پذیری در صورت بروز خطا در شبکه قدرت لحاظ شده است.

در مراجع ذکرشده، سعی شده است که جایابی بهینه PMU ها در سیستم قدرت با قیود مختلف بیان شود. نتایج و تحقیقات خوبی در مقالات ارائه‌شده به‌عمل‌آمده است. اما در این مقالات، تأثیر شبکه مخابرات در بهینه‌سازی سیستم WAMS نادیده گرفته شده است. به همین منظور، بعضی از محققین سعی کردند به جواب بهینه سراسری در این موضوع دست پیدا کنند. لذا، شبکه مخابرات را برای بهینه‌سازی سیستم در نظر گرفته و تابع هدف با توجه به این موضوع دست‌خوش تغییراتی شده است. در قسمت بعد به بررسی روش‌های ارائه‌شده برای این منظور پرداخته می‌شود.

## ۲-۸-۲- بهینه‌سازی سیستم پایش فراگیر با در نظر گرفتن سیستم مخابراتی

همان‌طور که بیان شد، در این قسمت به بررسی سیستم مخابراتی در کنار سیستم قدرت جهت بهینه‌سازی WAMS مبادرت می‌شود. در مقالات ارائه‌شده در این زمینه، معمولاً کابل‌های فیبر نوری برای زیرساخت مخابراتی در نظر گرفته شده است.

در مرجع [۵۶]، برای دو قسمت اول از WAMS یعنی اندازه‌گیری سیستم قدرت به‌وسیله PMU ها و همچنین رساندن اطلاعات اندازه‌گیری شده به مرکز کنترل، یک مدل کلی و تلفیقی طراحی شده است. این مقاله شالوده کار بسیاری از محققین بعدازآن بوده و ایده‌ای جالب در این زمینه مطرح نموده است. در این تحقیق، هر دو سیستم قدرت و مخابرات هم‌زمان بهینه‌شده و برای حل آن از یک برنامه‌الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

در این مقاله، هزینه زیرساخت مخابراتی شامل دو قسمت است:

$$Cost_{total} = Cost_{passive} + Cost_{active} \quad (۴۷-۲)$$

هزینه غیرفعال<sup>۱</sup> در این سیستم شامل هزینه سویچ‌ها و روترهای مخابراتی است. هزینه فعال<sup>۲</sup> نیز شامل هزینه طول خطوط ارتباطی مخابراتی می‌باشند. برای سیستم مخابراتی و سیستم قدرت، تابع هدف هم‌زمان زیر تشکیل شده است:

$$\begin{cases} \text{Min } Cost_{PMU} + Cost_{OPGW} \\ s.t. \begin{cases} OBS (PMU) > 1 \\ OPGW \text{ links, } PMU \rightarrow \text{connected} \end{cases} \end{cases} \quad (48-2)$$

که در آن:

$Cost_{PMU}$ : هزینه تمام PMU های نصب‌شده در شبکه

$Cost_{OPGW}$ : هزینه نصب سیستم مخابراتی

با بهینه‌سازی هم‌زمان یادشده، می‌توان به جواب بهینه‌تری برای کل سیستم مخابراتی و قدرت دست پیدا کرد. همچنین مقالات دیگری به بهبود روش ارائه‌شده در این مقاله پرداخته‌اند.

در مرجع [۵۷]، نویسندگان در کنار بهینه‌سازی هم‌زمان سیستم مخابراتی و قدرت، به جابجایی بهینه کنترل مرکزی (PDC) پرداختند. در این مقاله از الگوریتم Dijkstra برای یافتن کمترین فاصله بین دو باس استفاده شده است. با استفاده از روش این مقاله، نتایج به‌دست‌آمده از مرجع [۵۶] بهبود یافته است.

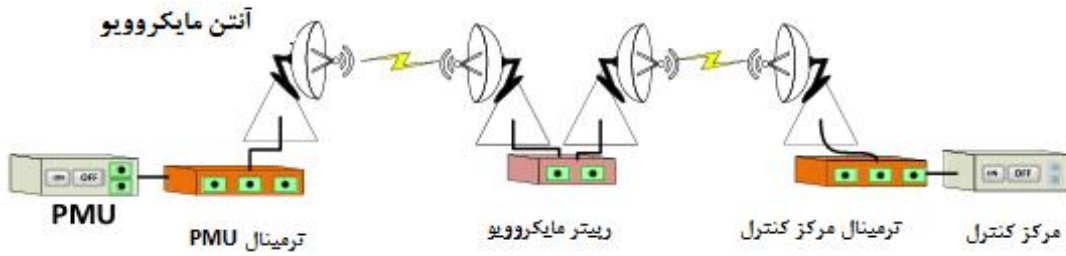
در مرجع [۱]، از روش جستجوی همسایگی متغیر<sup>۴</sup> برای رسیدن به جواب بهینه سراسری استفاده شده است. همچنین در مرجع [۵۸]، به‌عنوان یک جایگزین به‌جای استفاده از فیبر نوری، از فناوری مایکروویو برای این منظور استفاده شده است. تمرکز این تحقیق بر حداقل‌سازی تأخیر انتشار امواج است. ساختار معرفی‌شده در این مقاله برای سیستم قدرت و مخابراتی در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Passive

<sup>2</sup> Active

<sup>3</sup> Phasor Data Concentrator

<sup>4</sup> Variable Neighbourhood Search



شکل ۲-۱۴: ساختار استفاده از امواج مایکروویو به‌عنوان سیستم مخابراتی [۵۸]

در مرجع [۱۴]، هزینه پهنای باند به سیستم اضافه شده است و کمترین هزینه تنها به پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر مخابراتی محدود نمی‌شود. بلکه، ممکن است یک مسیر طولانی‌تر هزینه مخابراتی کمتری با توجه به هزینه پهنای باند داشته باشد.

## ۲-۹- جمع بندی

در این فصل ساختار تشکیل دهنده سیستم WAMS مورد بحث و ارزیابی قرار گرفت. سپس رؤیت‌پذیری سیستم قدرت با توجه به قیود شبکه، ارائه گردید. در قسمت بعد، با توجه به اینکه در این رساله از حسگرهای بیسیم برای زیرساخت مخابراتی استفاده خواهد شد، به معرفی ساختار این حسگرها و انواع آنها پرداخته شده است. همان‌گونه که می‌دانیم، اطلاعات برداشت‌شده در سیستم قدرت ارزش بالایی دارند و به‌منظور پایداری شبکه باید این اطلاعات به‌طور کامل و دقیق به مرکز کنترل برسد. لذا زیرساخت مخابراتی باید به‌گونه‌ای باشد که اطمینان کامل از رسیدن اطلاعات به مرکز کنترل حاصل شود. بنابراین روابط قابلیت اطمینان این حسگرها مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

بعد از بررسی زیرساخت مخابراتی و قدرت در سیستم پایش فراگیر، به بررسی روش‌های ارائه‌شده برای رؤیت‌پذیری شبکه قدرت پرداخته شد. در انتهای فصل، روش‌های ارائه‌شده جدید به منظور تلفیق شبکه قدرت و مخابراتی برای رسیدن به جواب بهتر ارائه شده است. در فصل بعد، روش ارائه‌شده در این رساله برای جابجایی بهینه دستگاه‌های PMU و زیرساخت مخابراتی پیشنهادی به صورت همزمان ارائه خواهد گردید.



## فصل سوم

# جایابی بهینه دستگاههای PMU و سیستم مخابراتی به وسیله حس گرهای بی سیم ترکیبی

### ۳-۱- مقدمه

همان طور که در فصول قبل بیان شد، زیرساخت مخابراتی در اکثر شبکه‌های قدرت، شبکه فیبر نوری می‌باشد. ایجاد زیرساخت با هزینه سنگین در این سیستم مخابراتی، توجه به سیستم‌های جایگزین را توجیه پذیرتر می‌کند. انگیزه اصلی این رساله، ایجاد بستر جدید و جایگزین و بررسی چالش‌های آن به عنوان سیستم مخابراتی در ارتباط دستگاههای PMU با یکدیگر و با مرکز کنترل می‌باشد.

در این رساله، برای زیر ساخت مخابراتی سیستم WAMS، از حس گرهای بی سیم استفاده شده است. هزینه کمتر این حس گرها و همچنین نصب ساده‌تر آنها نسبت به سیستم قدیمی فیبر نوری، قابلیت تحقیق بیشتر در این زمینه را پررنگ‌تر می‌کند. شبکه‌های حس گر بی سیم این قابلیت را به سیستم می

دهد که انتقال اطلاعات اندازه گیری شده به وسیله PMU ها به راحتی و به صورت ارزان، صورت پذیرد. کاهش هزینه اندازه گیری با توجه به هزینه بالای واحدهای اندازه گیری فازوری به منظور رؤیت پذیری شبکه قدرت و همچنین کاهش هزینه تجهیزات مخابراتی به منظور رؤیت پذیری شبکه مخابرات بسیار مهم است. از اینرو تعداد دستگاههای اندازه گیری فازوری، موقعیت مناسب آنها، نوع ارتباط مخابراتی و انتقال کامل اطلاعات اندازه گیری شده به مرکز کنترل مورد توجه قرار می گیرد.

در این فصل با توجه به قابلیت‌ها و ضعف‌های حس گرهای بی سیم، سیستم مخابراتی برای استفاده مفیدتر در شبکه قدرت تعریف شده است. برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی، ترکیبی از حس گرهای EHSN و PPSN استفاده شده است. همچنین تابع هدف برای حداقل سازی همزمان هزینه سیستم قدرت و مخابراتی با استفاده از حس گرهای نامبرده پیشنهاد شده است.

### ۳-۲- جایابی بهینه دستگاههای PMU

همان طور که در فصول قبلی بیان شد، با توجه به هزینه بالای دستگاههای اندازه گیری، از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست که این دستگاهها در تمام باسهای شبکه نصب گردد. در نتیجه، باید حداقل تعداد این دستگاهها با توجه به قید مشاهده پذیری سیستم مورد نصب قرار گیرد.

همانطور که در فصل قبل بیان شد، یک باس از لحاظ سیستم قدرت مشاهده پذیر است اگر روی آن باس یا یک باس مجاور آن دستگاه اندازه گیری نصب شود. بر طور خلاصه، حضور یک دستگاه PMU برای مشاهده پذیری یک باس و تمام باسهای همسایه آن کافی است. در نتیجه نحوه اتصالات باسها مورد توجه قرار می گیرد. این اتصالات در ماتریس تلاقی گره گره مشخص است.

مساله بهینه سازی جایابی دستگاههای PMU به صورت زیر فرمول بندی می شود:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (1-3)$$

$$\text{s.t. } f_i \geq 1 \quad i \in I \quad (2-3)$$

که در آن  $n$  تعداد باسها و  $w$  هزینه خرید و نصب یک دستگاه PMU می باشد.  $f_i$  تابع مشاهده پذیری در هر باس می باشد که به صورت رابطه (۳-۳) بیان می گردد.

$$f_i = \sum_{j \in I} A_{i,j} \cdot x_j \quad \forall i \in I \quad (3-3)$$

که  $A$  ماتریس تلاقی گره گره می باشد. در صورتی که تعداد باسهای شبکه برابر  $n$  باشد، ماتریس تلاقی گره گره یک ماتریس  $n \times n$  خواهد بود که به صورت زیر تشکیل می شود:

$$A_{n \times n}(i, j) = \begin{cases} 1 & i = j \\ 1 & \text{if bus } i \text{ and } j \text{ are connected} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4-3)$$

برای مدل کردن مساله، به هر باس یک متغیر  $x_i$  نسبت داده می شود که وضعیت نصب یا عدم نصب PMU در آن باس را نشان می دهد و به صورت زیر تعریف می شود:

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{with PMU} \\ 0 & \text{without PMU} \end{cases} \quad (5-3)$$

تمام متغیرهای  $x$  در یک ماتریس  $X$  جاگذاری می شوند که وجود یا عدم وجود PMU را مشخص می کند:

$$X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \quad (6-3)$$

برای مشاهده پذیری کامل شبکه، در رابطه (۲-۳) باید برای هر باس تابع  $f_i$  بزرگ تر یا مساوی یک شود. این به معنی این است که هر باس حداقل به وسیله یک عدد PMU مشاهده پذیر باشد.

### ۳-۳- سیستم مخابراتی

شبکه حس گرهای بی سیم (WSN) به مجموعه ای از حس گرهای کوچک و در ارتباط با یکدیگر اطلاق می گردد که قابلیت دریافت و ارسال اطلاعات به نقطه مشخصی را دارا می باشند. این حس گرها، در محیط جاگذاری شده تا اطلاعات مناسب را دریافت و جهت انجام هدف خاصی به مرکز کنترل ارسال

کنند. همان طور که در فصل دوم بیان شد، این حس گرها می توانند در نقش روتر نیز عمل کنند. یعنی اطلاعات را از حس گر کناری دریافت و به حس گر بعدی ارسال کنند.

حس گرهای بی سیم بسته به نوع استفاده می تواند از انواع مختلفی تشکیل شده باشد. این حس گرها در حالت پایه از باتری تشکیل شده است. با توجه به اینکه تعویض باتری بسیار سخت و یا تا حدودی غیر ممکن می باشد، تمام شدن عمر باتری مساوی با تمام شدن عمر حس گر تلقی می گردد. اینکه مصرف حس گرها چگونه مدیریت شود تا حداکثر عمر را داشته باشد نیاز به بهینه سازی مصرف انرژی با توجه به کارایی این حس گرها دارد. به حسگرهایی که فقط با باتری کار می کنند حس گرهای بر پایه باتری (BPSN)<sup>1</sup> می گویند.

اما در سیستم قدرت نیاز به حسگرهایی با عمر بیشتر و قابلیت اطمینان بالاتر داریم. نوع دیگری از حس گرهای بی سیم امروزه مورد استفاده قرار می گیرند که می توانند از محیط به جذب انرژی بهره مند شوند. همانطور که در فصل دوم بیان شد، به این حس گرها، حس گرهای EHSN<sup>2</sup> می گویند. افزایش عمر این حسگرها نسبت به حسگرهای BPSN با توجه به قابلیت جذب انرژی از محیط، از مهمترین مشخصه های آنها می باشد. توجه به این نکته ضروری است که قیمت این حس گرها نسبت به حسگرهای پایه باتری بیشتر است و بسته به اهمیت کاربرد می تواند به کار رود. حس گرهای EHSN معمولاً هم باتری دارند و هم قابلیت جذب از محیط. بنابراین می توانند گزینه مناسبی جهت استفاده در سیستم قدرت باشند.

با توجه به مسائل مطرح شده، در این رساله، تلفیقی از حس گرهای EHSN و PPSN<sup>3</sup> برای استفاده در سیستم قدرت در نظر گرفته شده است. در حس گرهای PPSN، تغذیه حس گر به وسیله برق انجام می شود. در واقع در این نوع از حس گرها، نیازی به باتری یا منبع انرژی تجدید پذیر وجود ندارد و انرژی مصرفی آنها به وسیله برق تأمین می شود.

<sup>1</sup> Battery-powered Sensor Node

<sup>2</sup> Energy-harvesting Sensor Node

<sup>3</sup> Plug-in Powered Sensor Node

برخلاف حس گرهای BPSN که مصرف انرژی وابسته به زمان دارند، حس گرهای EHSN و PPSN تابع زمان نبوده و عملکرد آنها تابع فاصله بین حس گرها می باشد. با توجه به اینکه اطلاعات ارسالی سیستم قدرت بسیار با اهمیت بوده و قابلیت تعویض حس گرها در زمان کوتاه وجود ندارد، از حس گرهای EHSN و PPSN جهت زیر ساخت مخابراتی پیشنهادی استفاده خواهد شد. برای ایجاد بستر مخابراتی با هزینه کمتر و قابلیت اطمینان بیشتر، در باسهایی که دستگاههای PMU قرار دارد، از حس گرهای PPSN استفاده می شود. با توجه به حضور PMU در این باسها، تغذیه این حس گرها از این دستگاه اندازه گیری تأمین خواهد شد. در بقیه نقاط که نیاز به حس گرهای روتر باشد، از حس گرهای EHSN استفاده خواهد شد. این حس گرها گران تر از حس گرهای PPSN می باشند، ولی با توجه به اینکه در نقاط نصب آنها، انرژی برق وجود ندارد، ناگزیر به استفاده از آنها خواهیم بود [۵۹].

بنابراین، برای جمع بندی موارد مطرح شده، ساختار زیرساخت مخابراتی به این صورت است که دو گروه کلی باس و حس گر در سیستم معرفی شده وجود دارد [۶۰]:

۱- نقاطی که روی آنها PMU وجود دارد که در آنها از PPSN استفاده می شود.

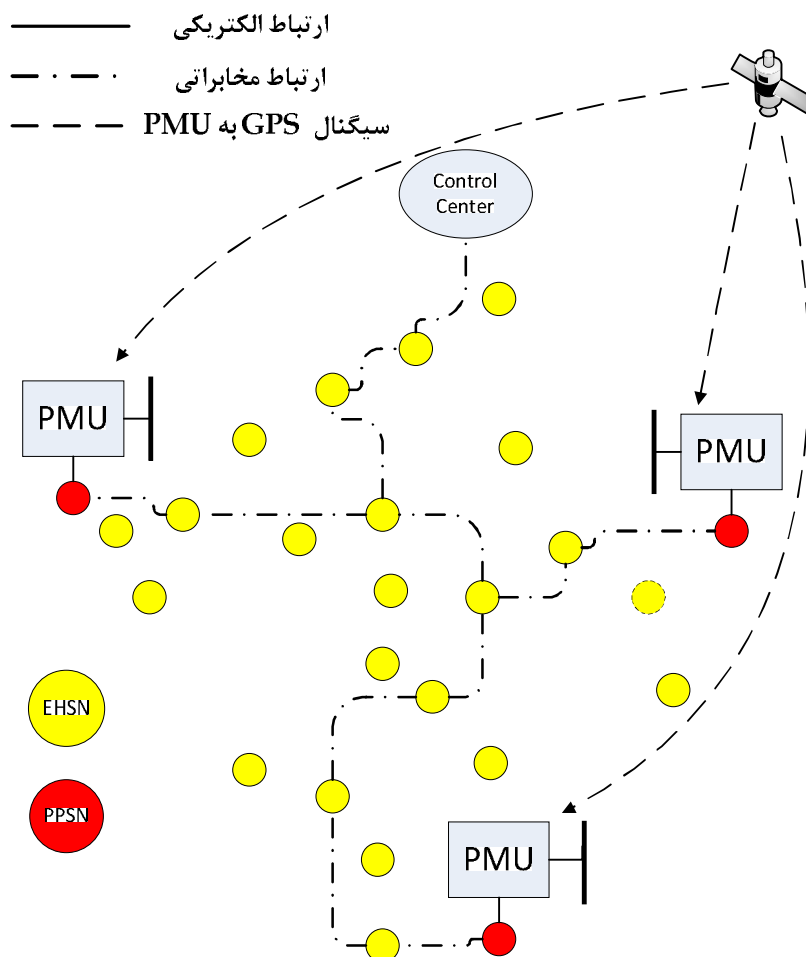
۲- نقاطی که PMU وجود ندارد که در آنها از EHSN استفاده می شود.

ساختار شبکه مخابراتی پیشنهادی به صورت شکل ۳-۱ می باشد. همانطور که در شکل ۳-۱ ملاحظه می شود، از بین حس گرهای موجود، بهترین و کم هزینه ترین مسیر انتخاب می شود. حس گرهای قرمز رنگ در شکل حس گرهای PPSN و حس گرهای زرد رنگ، حس گرهای EHSN می باشند. در سیستم مخابراتی تعریف شده دو فرض وجود دارد:

۱- حس گرهای بی سیم قابلیت انتقال صحیح اطلاعات برداشت شده توسط PMU ها به مرکز کنترل را دارا هستند.

۲- پهنای باند حس گرها برای انتقال صحیح اطلاعات برداشت شده PMU ها کافی است.

در این سیستم مخابراتی جدید، بر خلاف سیستم پیشین که نیازی به بررسی مشاهده پذیری نداشت، آنالیز مشاهده پذیری نیاز می باشد. در نتیجه در قسمت بعد، به بررسی مشاهده پذیری زیر ساخت مخابراتی و فرمول بندی آن پرداخته می شود.



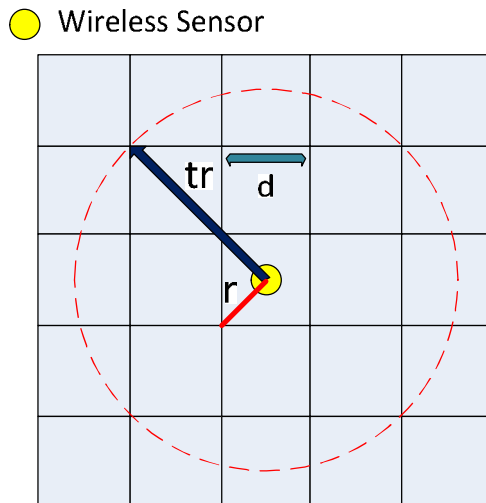
شکل ۳-۱: سیستم مخابراتی پیشنهادی

### ۳-۴- مشاهده پذیری سیستم مخابراتی

بعد از برداشت اطلاعات توسط دستگاههای PMU، این اطلاعات باید توسط سیستم مخابراتی به مرکز کنترل برسد. در سیستم فیبر نوری، نیازی به تحلیل مشاهده پذیری سیستم مخابراتی نمی باشد. ولی در شبکه حس گرهای بی سیم، مانند سیستم قدرت، تحلیل مشاهده پذیری لازم است. در واقع باید مشخص شود که اطلاعات برداشت شده به مرکز کنترل برسد. برای مشاهده پذیری سیستم مخابراتی، می توان تعریف مقابل را ارائه داد: یک گره در سیستم مخابراتی مشاهده پذیر است اگر مسیری بین آن گره و گره مرجع وجود داشته باشد.

در این رساله، گره مرجع، مرکز کنترل در نظر گرفته می شود. در واقع گره مخابراتی شامل حس گر بی سیم مشاهده پذیر است اگر نسبت به مرکز کنترل جزیره نباشد.

برای تحلیل مشاهده پذیری سیستم مخابراتی، یک شبکه مش بر اساس طول و عرض ناحیه جغرافیایی شبکه توزیع تولید می شود. حس گر بی سیم می تواند در مرکز هر ناحیه از شبکه مش قرار داده شود. به عنوان مثال شبکه مش شکل ۲-۳ را در نظر بگیرید. در این شبکه یک حس گر در مرکز یک ناحیه قرار دارد. شبکه مش به گونه ای طراحی می شود که حضور یک حس گر در مرکز یک ناحیه، ناحیه های اطراف را بتواند پوشش دهد.



شکل ۲-۳: شبکه مش حس گر بی سیم

همانطور که در شکل ۲-۳ مشاهده می شود،  $d$  طول هر ناحیه و  $tr$  برد فرستنده حس گرهای بی سیم می باشد. با داشتن برد حس گرها، می توان طول هر ناحیه را با رابطه زیر مشخص کرد [۲۸]:

$$r = \frac{\sqrt{2}}{2} d \rightarrow tr = 3r = \frac{3\sqrt{2}}{2} d \rightarrow d = \frac{2}{3\sqrt{2}} tr \quad (۷-۳)$$

اگر طول و عرض ناحیه جغرافیایی شبکه توزیع برابر  $W_1$  و  $W_2$  باشد، تعداد مناطق طولی و عرضی شبکه مش برابر است با:

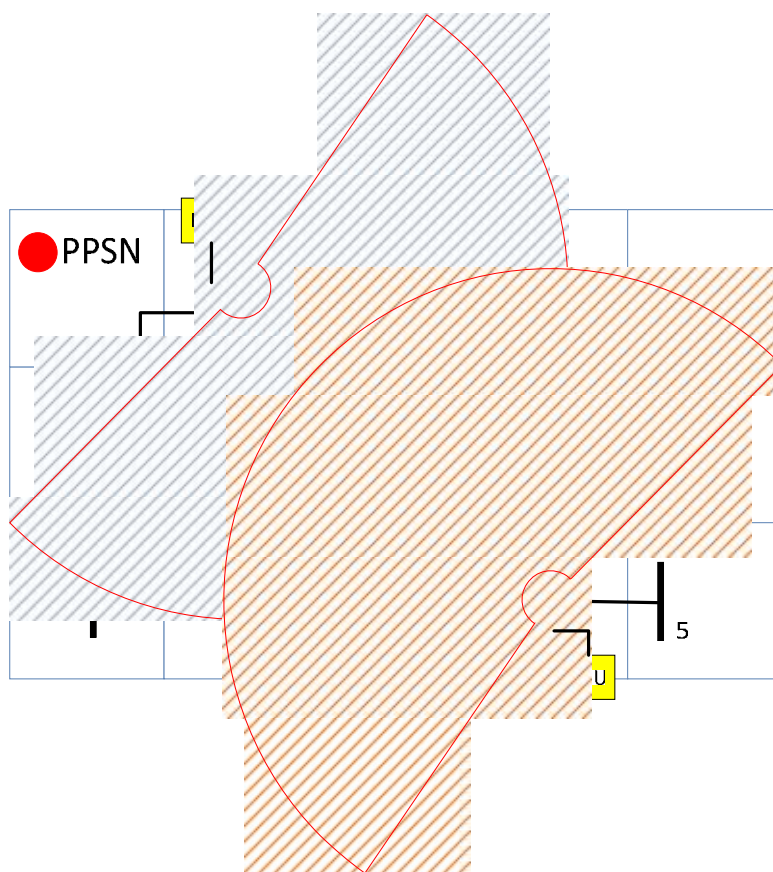
$$n_1 = \left\lceil \frac{W_1}{d} \right\rceil + 1 \quad (۸-۳)$$

$$n_2 = \left\lceil \frac{W_2}{d} \right\rceil + 1$$

بنابراین، تعداد نواحی کلی مش برابر است با:

$$N_T = n_1 \times n_2 \quad (۹-۳)$$

به منظور ایجاد دید بهتر نسبت به تفاوت مشاهده پذیری سیستم قدرت و سیستم مخابراتی، مثالی بررسی می‌گردد. شبکه ۸ باسه شکل ۳-۳ را در نظر بگیرید. برای مشاهده پذیری این شبکه از دید قدرت، حضور دو دستگاه PMU در باسهای ۴ و ۸ کافی است.



شکل ۳-۳: شبکه نمونه ۸ باسه



در این شبکه فرض می شود که باس شماره ۸ به عنوان مرکز کنترل انتخاب می شود. حال اگر فاصله بین دو باس ۴ و ۸ از برد حس گر PPSN نصب شده بیشتر باشد، دو حس گر در شعاع دید یکدیگر قرار نمی گیرند و اطلاعات نمی تواند از باس ۴ به باس ۸ ارسال گردد. بنابراین این سیستم از لحاظ مخابراتی مشاهده پذیر نمی باشد در حالی که از دید سیستم قدرت مشاهده پذیر است. ملاحظه می گردد که باس ۶ در شعاع دید مشترک دو حس گر قرار دارد، در نتیجه یک عدد حس گر EHSN باید در این نقطه به عنوان روتر استفاده شود تا شبکه از دید سیستم مخابراتی نیز رؤیت پذیر گردد.

در شبکه های نمونه بزرگ تر با توجه به افزایش ابعاد مساله، نیاز به یک برنامه بهینه سازی برای حل مساله می باشد. برای این منظور از یک برنامه ژنتیک الگوریتم باینری (BCGA)<sup>۱</sup> استفاده می شود که جایابی بهینه حس گرهای بی سیم را با توجه به جایابی بهینه دستگاههای PMU انجام دهد. کروموزوم ابتدایی بر اساس جایابی اولیه دستگاههای PMU تشکیل می شود. همانطور که گفته شد، فرض می شود که در هر باس که یک عدد PMU قرار دارد یک عدد PPSN نیز جاسازی می شود. بنابراین تعداد ژنهای اولین کروموزوم (CR) برابر تعداد کل نواحی مش (N<sub>T</sub>) می باشد و در نقطه ای که PPSN قرار دارد عنصر شماره ۱ و در خانه های دیگر عدد صفر قرار می گیرد.

$$CR = [SN_1 \ SN_2 \ SN_3 \ \dots \ SN_n]_{1 \times N_T} \quad (10-3)$$

$$SN_i = \begin{cases} 1 & \text{with PPSN} \\ 0 & \text{without PPSN} \end{cases}$$

که در آن SN عبارت است از حضور حس گر در هر ناحیه. به عنوان مثال در شبکه نمونه ۸ باسه شکل ۳-۳، تعداد ۱۵ مش وجود دارد و بردار CR می تواند به شکل زیر تشکیل شود:

$$CR = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]_{1 \times 15} \quad (11-3)$$

ملاحظه می گردد که در خانه های شماره ۲ و ۱۴ که حس گر PPSN وجود دارد، عدد ۱ قرار داده می شود.

<sup>1</sup> Binary-coded Genetic Algorithm

برای ساخت جمعیت اولیه، ماتریس فواصل برای شبکه مش تولید می شود. این ماتریس در واقع فاصله هر ناحیه را مشخص می کند. این ماتریس به صورت رابطه (۱۲-۳) می باشد.

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

که در آن عنصر  $L_{ij}$  فاصله ناحیه  $i$  و ناحیه  $j$  در شبکه مش را نشان می دهد. دو ناحیه  $i$  و  $j$  در ارتباط مخابراتی با هم قرار دارند به این شرط که اولاً در هر دو ناحیه حس گر وجود داشته باشد (  $tr_i \neq 0$  and  $tr_j \neq 0$  )، ثانیاً برد  $tr$  هر حس گر در هر ناحیه، ناحیه دیگر را نیز پوشش دهد (  $tr_i \geq L_{ij}$  or  $tr_j \geq L_{ij}$  ).

برای مشخص کردن ارتباط بین نواحی مختلف مخابراتی، ماتریسی به نام ماتریس تلاقی ( $IM$ ) مطابق رابطه (۱۳-۳) بیان می شود.

$$IM_{i,j} = CR_i \times CR_j \times (tr_i \geq L_{i,j}) \times (tr_j \geq L_{j,i}) \quad (13-3)$$

اندازه این ماتریس برابر  $N_T \times N_T$  می باشد و تعداد باسهای شبکه  $n$  می باشد. بر اساس این ماتریس، ماتریس مشاهده پذیری مخابراتی ( $CO$ ) تشکیل می شود که به صورت زیر است [۲۸]:

$$CO = sign(IM^{n-1}) \quad (14-3)$$

این ماتریس ارتباط نودهای مختلف مخابراتی با گره مرجع را نشان می دهد. اگر گره مرجع را با  $s$  نشان دهیم و مجموعه همه نودهای مخابراتی برابر مجموعه  $Z$  باشد، برای مشاهده پذیری کامل سیستم مخابراتی، رابطه (۱۵-۳) باید برای همه نودهای مخابراتی صادق باشد.

$$CO_{s,j} = 1 \quad \forall j \in Z \quad (15-3)$$

<sup>1</sup> Incident Matrix

برای ارضای رابطه بالا با کمترین هزینه، می بایست حداقل تعداد حس گرهای EHSN به کار گرفته شود تا شبکه مخابراتی نیز علاوه بر شبکه قدرت مشاهده پذیر شود. برای این منظور، تابع هدف با قید لازم فرمول بندی می شود که در قسمت های بعد بیان خواهد شد.

### ۳-۵- قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی

برای سیستم پیشنهادی به منظور زیر ساخت مخابراتی که ترکیبی از دو دسته سنسور PPSN و EHSN می باشد، باید قابلیت اطمینان قابل قبول بهره بردار سیستم ایجاد شود. برای این منظور، قابلیت اطمینان به صورت یک قید می تواند در تابع هدف قرار داده شود. لذا در این قسمت، به بررسی این موضوع پرداخته خواهد شد.

همان طور که در قسمت ۲-۷ بیان شد، قابلیت اطمینان در حس گرهای WSN شامل دو قسمت می باشد: قابلیت اطمینان حس گر و قابلیت اطمینان لینک مخابراتی. در این رساله، قابلیت اطمینان لینک مخابراتی در تابع هدف مورد ارزیابی قرار می گیرد.

قابلیت اطمینان لینک ارتباطی عبارت است از احتمال اینکه مسیر مطمئنی بین حس گرهای بی سیم وجود داشته باشد. برای دو مدل حس گر EHSN و BPSN این عبارت متفاوت است. در حس گرهای EHSN، قابلیت اطمینان به فاصله بین دو حس گر مرتبط می باشد در حالی که در حس گرهای BPSN، قابلیت اطمینان تابع زمان می باشد.

قابلیت اطمینان برای حس گرهای EHSN و PPSN تابع فاصله بین فرستنده و گیرنده بوده و به صورت زیر می باشد:

$$R = \frac{1}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{10 \log(d / tr)}{\sqrt{2} \log(10\psi)} \right) \right] \quad (3-16)$$

$$\psi = \frac{\sigma}{\eta} \quad \text{if} \quad \frac{d}{tr} \leq 1$$

که در این رابطه:

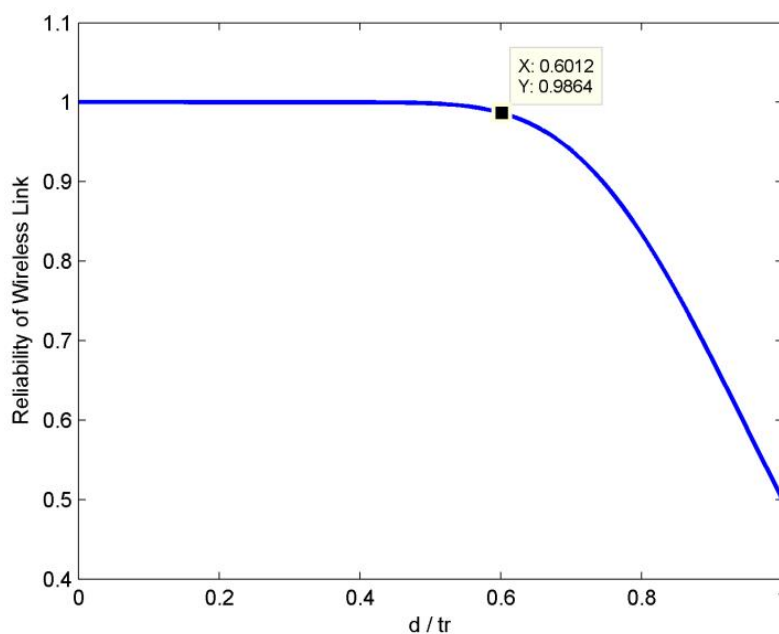
$t_r$ : برد فرستنده

$d$ : فاصله بین دو حس گر

$\sigma$ : انحراف از معیار

$\eta$ : تلفات مسیر

اگر فاصله بین دو حس گر از  $t_r$  بیشتر شود، احتمال رسیدن اطلاعات صفر خواهد بود و قابلیت اطمینان صفر می‌باشد. در نتیجه بر اساس رابطه (۳-۱۶)، در حس گرهای EHSN و PPSN، قابلیت اطمینان لینک ارتباطی تابع فاصله دو حس گر بوده و از قید زمان مبراست. شکل ۳-۴ قابلیت اطمینان لینک ارتباطی برای حس گرهای EHSN را نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که اگر فاصله بین دو حس گر از از حدود  $0.6$  برد فرستنده ( $t_r$ ) بیشتر شود، قابلیت اطمینان به صورت نمایی افت می‌کند. پس برای قابلیت اطمینان بالاتر، باید حس گرها را نزدیک‌تر به هم قرار داد [۵۹]. بنابراین، در این رساله، قابلیت اطمینان لینک ارتباطی برای EHSN و PPSN یکسان بوده و از رابطه (۳-۱۶) قابل محاسبه است.



شکل ۳-۴: قابلیت اطمینان لینک ارتباطی در حس گرهای EHSN

### ۳-۶- تابع هدف پیشنهادی

در قسمت‌های قبلی، مدل سیستم قدرت و سیستم مخابراتی ارائه گردید. در سیستم WAMS، همان طور که هزینه سیستم قدرت مهم است، هزینه سیستم مخابراتی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. برای رسیدن به جواب بهینه برای این سیستم، باید بهینه سازی همزمان این دو سیستم انجام شود.

تابع هزینه شامل حداقل سازی هزینه سیستم قدرت و سیستم مخابرات با توجه به قیود مشاهده پذیری هر دو سیستم و همچنین قید قابلیت اطمینان می‌باشد. در واقع در این تابع پیشنهادی، هدف حداقل سازی هزینه و حداکثر سازی قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی می‌باشد.

در این رساله، تابع هزینه به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Total\ Cost = Cost_{PMU} + Cost_{WSN} \quad (17-3)$$

که در آن  $Cost_{PMU}$  شامل هزینه نصب دستگاههای PMU و همچنین  $Cost_{WSN}$  هزینه حس گرهای بی سیم به کار رفته در سیستم مخابراتی می‌باشد. افزایش قابلیت اطمینان، هزینه سیستم را افزایش خواهد داد. در نتیجه، این موضوع به صورت یک قید در تابع هزینه بیان می‌شود و بسته به اینکه چقدر قابلیت اطمینان اهمیت دارد، این قید تغییر می‌کند. بنابراین تابع هدف کلی می‌تواند به صورت روابط (۱۸-۳) تا (۲۱-۳) نوشته شود.

$$Min \left\{ \left( \sum_{i=1}^n c_i X_i \right) + P_P \times N_P + P_E \times N_E \right\} \quad (18-3)$$

St.

$$AX \geq 1 \quad (19-3)$$

$$CO_{n-1_s, j} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (20-3)$$

$$Re_j \geq T \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (21-3)$$

که در آن:

$C_i$ : هزینه نصب PMU

$X_i$ : وضعیت نصب یا عدم نصب دستگاه PMU در باس

$n$ : تعداد باسهای شبکه

$P_P$ : هزینه حس گرهای PPSN

$N_P$ : تعداد حس گرهای PPSN

$P_E$ : هزینه حس گرهای EHSN

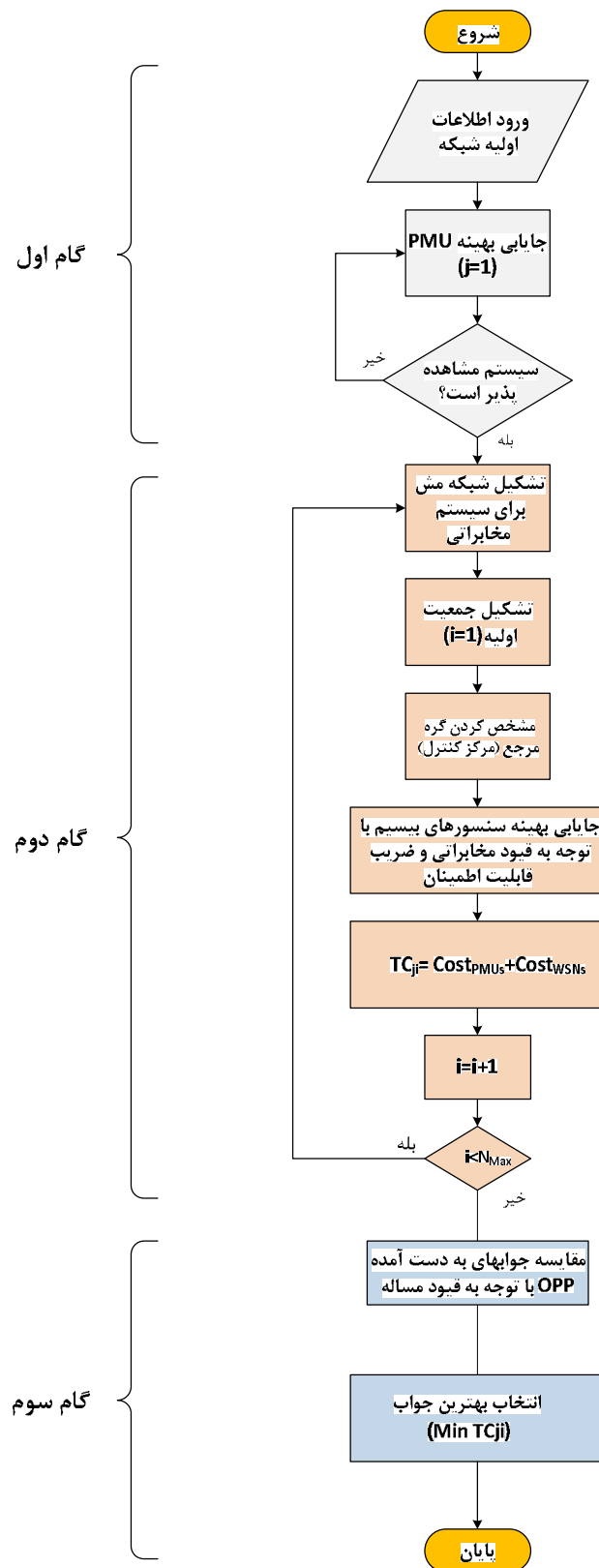
$N_E$ : تعداد حس گرهای EHSN

$m$ : تعداد کل حس گرهای بی سیم

$Re_j$ : قابلیت اطمینان لینک مخابراتی در حس گر شماره  $j$

رابطه (۳-۱۸) مجموع هزینه کل سیستم مخابرات و قدرت می باشد. رابطه (۳-۱۹) قید مشاهده پذیری سیستم قدرت است که در بخش (۳-۲) بیان شد. رابطه (۳-۲۰) قید مشاهده پذیری سیستم مخابراتی است که در قسمت (۳-۴) عنوان گردید. همچنین رابطه (۳-۲۱) بیان گر قید قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی می باشد که در بخش (۳-۵) تعریف شد. بسته به اهمیت قابلیت اطمینان حس گرها، ضریب  $T$  در این معادله می تواند بین  $0/6$  تا  $1$  تغییر کند. اگر قابلیت اطمینان برای ما بسیار مهم باشد، این ضریب برابر  $1$  قرار داده می شود و هزینه سیستم به همان ترتیب افزایش پیدا می کند.

فلوچارت روش پیشنهادی در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. در این فلوچارت، گام اول نشان دهنده برنامه OPP با قید مشاهده پذیری برای نصب حداقل PMU ها می باشد که آیا این شرط ارضا می شود یا خیر. در گام دوم، حداقل تعداد حس گرهای مورد نیاز برای رساندن کامل اطلاعات به مرکز کنترل بررسی می شود. در این قسمت، قید مشاهده پذیری سیستم مخابراتی و همچنین قید قابلیت اطمینان آن بررسی می گردد.



شکل ۳-۵: فلوچارت روش پیشنهادی

در گام آخر، تمام راه حل‌های بدست آمده برای سیستم قدرت و سیستم مخابرات به صورت همزمان مورد مقایسه قرار می‌گیرد. همان طور که می‌دانیم، جواب بهینه برنامه OPP گاهی بیشتر از یک جواب منحصر بفرد دارد. در نتیجه تمام جوابهای ممکن و شبکه‌های مخابراتی پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا بهترین جواب سراسری که شامل حل همزمان سیستم قدرت و مخابرات می‌باشد انتخاب گردد.

### ۳-۷- شبیه سازی روی شبکه‌های نمونه

در این قسمت، به منظور امتحان قابلیت‌ها و همچنین آنالیز روش پیشنهادی، این روش روی دو شبکه نمونه پیاده سازی می‌گردد. در واقع استفاده از حس گرهای ترکیبی بی سیم به عنوان زیرساخت مخابراتی سیستم WAMS، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. یک شبکه نمونه ۱۱ باسه و همچنین شبکه استاندارد ۳۷ باسه IEEE برای این منظور استفاده شده است. در شبکه نمونه ۱۱ باسه، حل مساله به دو صورت انجام گرفته است. در حالت اول، شبکه قدرت و مخابرات به صورت همزمان بهینه سازی می‌شود. در حالت دوم، ابتدا شبکه قدرت بهینه سازی شده و سپس شبکه مخابرات بر اساس جواب شبکه قدرت، بهینه می‌گردد. برای حل مساله از الگوریتم ژنتیک باینری (BCGA) استفاده شده است. پارامترهای این مساله به وسیله آزمون و خطا به دست آمده است تا بتواند به جواب قانع کننده‌ای دست پیدا کرد. این پارامترها در جدول ۳-۱ برای دو سیستم تست نشان داده شده است.

در این جدول،  $P_c$  نشان دهنده احتمال ترکیب<sup>۱</sup> و همچنین  $P_m$  احتمال جهش<sup>۲</sup> می‌باشد. برای انجام ترکیب به منظور تولید نسل بعدی با احتمالهای مختلف تلفیقی از باز ترکیبی تک نقطه ای<sup>۳</sup>، باز ترکیبی دو نقطه ای<sup>۴</sup> و همچنین باز ترکیبی یکنواخت<sup>۵</sup> استفاده شده است. و همچنین استفاده شده است. برای جهش از جهش یکنواخت<sup>۶</sup> استفاده شده است. همچنین برای انتخاب نخبه در این الگوریتم، بهترین جواب<sup>۷</sup> در هر نسل، مستقیماً به نسل بعدی انتقال پیدا کرده است.

<sup>1</sup> Crossover

<sup>2</sup> Mutation

<sup>3</sup> Single point crossover

<sup>4</sup> Double point crossover

<sup>5</sup> Uniform crossover

<sup>6</sup> Uniform mutation

<sup>7</sup> Individual



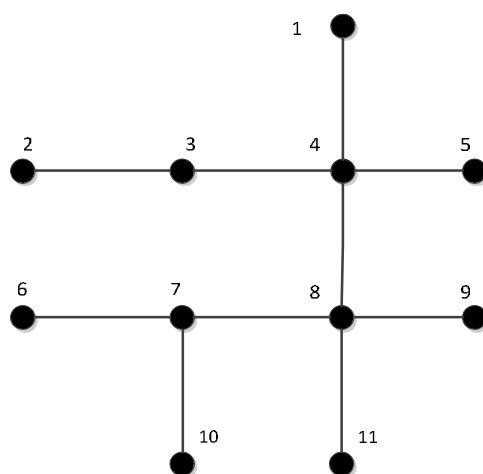
همان طور که می دانیم، انتخاب تعداد اعضای جمعیت با توجه به حجم محاسباتی و اندازه فضای جستجو انتخاب می گردد. در این رساله، این عدد با اجرای برنامه به دفعات برای یک شبکه مشخص و رسیدن به نتیجه مناسب انتخاب شده است.

جدول ۳-۱: پارامترهای انتخابی برای الگوریتم ژنتیک

شبکه	اندازه جمعیت	$P_C$	$P_M$
۱۱ باسه	۱۰۰	۰/۸	۰/۳
۳۷ باسه IEEE	۱۵۰	۰/۷۵	۰/۳۵

### ۳-۷-۱- شبکه نمونه ۱۱ باسه با حل همزمان شبکه قدرت و مخابرات

شبکه نمونه ۱۱ باسه در شکل ۳-۶ نشان داده شده است. همچنین اطلاعات فاصله بین نودهای آن در جدول ۳-۲ آورده شده است. در این حالت، دوشبکه قدرت و مخابرات به صورت همزمان بهینه می گردد. بهینه سازی همزمان مساله، جواب بهینه سراسری را برای مساله OPP در باسهای ۳، ۴، ۷، ۸ نتیجه خواهد داد. بر اساس جایگاه بهینه دستگاههای PMU، جایابی بهینه حسگرهای بیسیم مطابق روابط ذکر شده در قسمت ۳-۴ حاصل می گردد که در ادامه شرح داده خواهد شد. با توجه به معادلات (۳-۱۸) تا (۳-۲۱)، بهینه سازی همزمان سیستم قدرت و مخابراتی انجام می شود و بهترین جایگاه دستگاههای PMU و همچنین حس گرهای بی سیم مشخص می گردد.



شکل ۳-۶: شبکه نمونه ۱۱ باسه

جدول ۳-۲: اطلاعات شبکه ۱۱ باسه

از گره	به گره	طول (متر)
۴	۳	۲۲۸
۴	۵	۲۲۸
۳	۲	۱۳۶
۱	۴	۲۲۰
۷	۱۰	۱۸۰
۴	۸	۹۱۳
۸	۷	۱۳۶
۸	۱۱	۱۸۲
۷	۶	۱۳۶
۸	۹	۲۲۸

براساس مسائل بیان شده، در هر باس که یک PMU نصب می‌شود، یک عدد PPSN نیز نصب می‌شود. اگر در این شبکه tr برابر ۱۵۰ متر انتخاب گردد، با توجه به ابعاد شبکه نمونه، حس گرهای PPSN در شعاع دید یکدیگر قرار نمی‌گیرند و نمی‌توانند اطلاعات را به مرکز کنترل برسانند. در این شبکه، فرض می‌گردد که مرکز کنترل در باس ۴ قرار دارد. توجه به این نکته ضروری است که تغییر جایگاه مرکز کنترل، نتایج متفاوتی ایجاد خواهد کرد. در ادامه، برنامه بهینه سازی جهت بدست آوردن تعداد بهینه سنسورهای EHSN به عنوان روتر اجرا گردد. بدین منظور، ابتدا شبکه مش تشکیل می‌شود. با توجه به اطلاعات شبکه نمونه، طول و عرض ناحیه جغرافیایی به ترتیب برابر ۱۳۱۵ و ۵۹۲ متر می‌باشد. بنابراین با توجه به معادلات (۳-۷) تا (۳-۹)، طول شبکه مش و تعداد ناحیه‌های آن برابر با رابطه (۳-۲۲) است.

$$d = 70.17 m$$

$$n_1 = \left\lceil \frac{W_1}{d} \right\rceil + 1 = \frac{592}{47.6} + 1 = 9$$

(۳-۲۲)

$$n_2 = \left\lceil \frac{W_2}{d} \right\rceil + 1 = \frac{1315}{47.6} + 1 = 19$$

$$N_T = n_1 \times n_2 = 171$$

با توجه به اینکه شبکه مش ۱۷۱ عضو دارد، کروموزوم تشکیل شده نیز ۱۷۱ ژن خواهد داشت. در خانه‌هایی که دستگاه PPSN قرار دارد، عدد یک و در بقیه خانه‌ها، عدد صفر گذاشته می‌شود. با توجه

به روابط (۳-۱۲) تا (۳-۱۵)، حداقل تعداد سنسورهای روتر EHSN با توجه به قید مشاهده پذیری سیستم مخابراتی، به وسیله الگوریتم ژنتیک باینری بدست می آید. نتایج بهینه سازی به وسیله BCGA در جدول ۳-۳ نشان داده شده است. این بهینه سازی در دو حالت انجام می شود:

۱- با قابلیت اطمینان بالا ( $T=1$ )

۲- با قابلیت اطمینان متوسط ( $T=0.6$ )

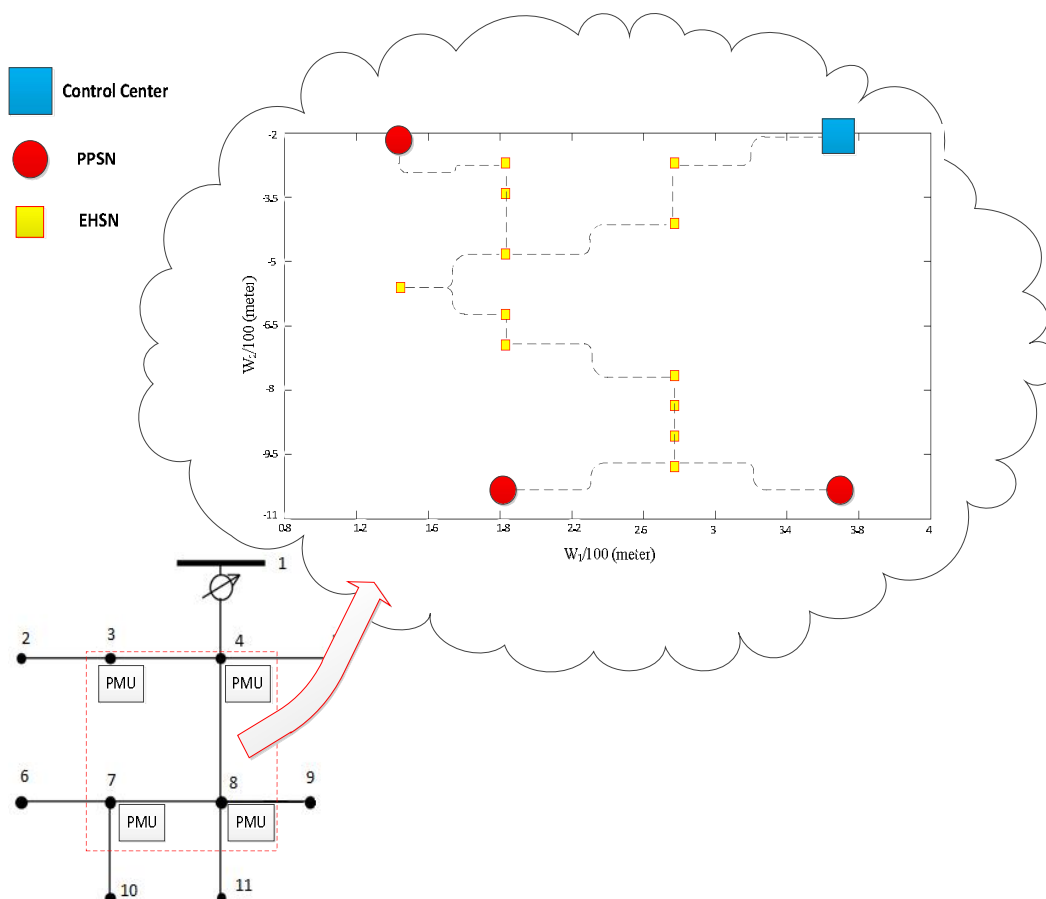
در این سیستم، هزینه خرید و نصب هر دستگاه PMU برابر ۴۰,۰۰۰ دلار [۵۷] و هر عدد حس گر PPSN و EHSN به ترتیب برابر ۱۲۰ و ۱۵۰ دلار فرض شده است [۳۶]. همچنین، حس گرهای EHSN که به صورت روتر استفاده می شوند نیاز به زیرساخت دارند که این عدد برای هر حس گر برابر ۱۵۰ دلار فرض شده است. ولی حسگرهای PPSN با توجه به اینکه در کنار دستگاههای PMU نصب می گردند، نیاز به زیر ساخت ندارند. در نتیجه هزینه کلی هر حس گر PPSN و EHSN برابر ۱۲۰ و ۳۰۰ دلار می باشد.

با توجه به جدول ۳-۳ مشخص می شود که با افزایش ضریب قابلیت اطمینان، تعداد حس گرهای EHSN لازم افزایش پیدا می کند و در نتیجه هزینه کلی سیستم نیز بیشتر می شود. برای اینکه دید بهتری نسبت به جواب به دست آمده پیدا شود، جواب بهینه در حالت ( $T=1$ ) در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. در این شکل نحوه ارتباط مخابراتی حس گرهای PPSN و همچنین روترهای لازم که EHSN می باشند به تصویر کشیده شده است.

نتایج نشان می دهد که قابلیت اطمینان بالاتر هزینه سیستم را افزایش خواهد داد. ولی این افزایش نسبت به هزینه کلی سیستم بسیار کم بوده و لذا استفاده از سیستم مخابراتی با قابلیت اطمینان بالا را توجیه پذیرتر می کند. نکته بسیار مهم در نتایج شبیه سازی، هزینه بسیار کم سیستم مخابراتی نسبت به هزینه سیستم قدرت می باشد. به عنوان مثال در حالت  $T=1$ ، هزینه سیستم قدرت ۱۶۰,۰۰۰ دلار است. در حالی که هزینه زیرساخت مخابراتی فقط ۴,۰۸۰ دلار می باشد. بنابراین در این روش پیشنهادی، هزینه زیر ساخت مخابراتی در حدود ۳ درصد هزینه کلی سیستم می باشد که در مقایسه با شبکه های مخابراتی فیبر نوری بسیار کمتر است.

جدول ۳-۳: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۱۱ باسه

حالت اول (ضریب قابلیت اطمینان $T=0.6$ )			
هزینه کلی (دلار)	شماره ناحیه (برای نصب EHSN)	شماره باس (برای نصب PPSN)	شماره باس (برای نصب PMU)
۱۶۲,۲۸۰	۴۰,۵۸,۷۶,۹۴,۱۱۲,۱۳۰	۳,۴,۷,۸	۳,۴,۷,۸
حالت دوم (ضریب قابلیت اطمینان $T=1$ )			
هزینه کلی (دلار)	شماره ناحیه (برای نصب EHSN)	شماره باس (برای نصب PPSN)	شماره باس (برای نصب PMU)
۱۶۴,۰۸۰	۴۹,۵۰,۵۸,۶۸,۷۶,۸۴,۹۴,۱۰۳,۱۱۳,۱۲۴,۱۳۱,۱۴۰	۳,۴,۷,۸	۳,۴,۷,۸



شکل ۳-۷: جایابی بهینه PMU ها و حس گرهای بی سیم در شبکه نمونه ۱۱ باسه

### ۳-۷-۲- شبکه نمونه ۱۱ باسه با حل غیر همزمان شبکه قدرت و مخابرات

در این حالت، دو شبکه قدرت و مخابراتی به صورت جداگانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. یعنی ابتدا شبکه قدرت بهینه شده و سپس شبکه مخابراتی جایابی می‌گردد. پس از حل مساله OPP، دو جواب بهینه برای جایابی بهینه دستگاههای PMU بدست می‌آید. این دو جواب در جدول ۳-۴ نشان داده شده است. به هر کدام از جوابهای بدست آمده در این شبکه، یک راه حل اطلاق می‌گردد. سپس برای هر کدام از این راه حلها، جایابی بهینه حسگرهای بیسیم انجام می‌شود.

جدول ۳-۴: راه حلهای ممکن جایابی بهینه PMU برای شبکه ۱۱ باسه

مکان نصب PMU	راه حل
۲،۴،۷،۸	۱
۳،۴،۷،۸	۲

نتایج این جایابی‌ها در جدول ۳-۵ نشان داده شده است. توجه به این نکته ضروری است که راه حل دوم OPP، یعنی جاگذاری PMU ها در باسهای ۳،۴،۷،۸ اقتصادی‌تر از حالت اول می‌باشد. این راه حل در واقع همان راه حل بهینه سراسری بدست آمده در قسمت ۳-۷-۱ می‌باشد. اما، نکته مهم در این مساله این است که در شبکه‌های بزرگتر، حل غیر همزمان مساله، ما را به جواب بهینه سراسری نمی‌رساند. زیرا جوابهای بسیار زیادی برای جایابی بهینه دستگاههای اندازه‌گیری PMU بدست می‌آید که نمی‌توان برای هر کدام جواب بهینه سیستم مخابراتی را یافت. در ضمن، در شبکه‌هایی با فواصل بزرگتر که منجر به افزایش بسیار زیاد حسگرهای بیسیم می‌شود، هزینه شبکه مخابراتی در مقابل سیستم قدرت افزایش یافته که این امر منجر به تغییر جایابی بهینه دستگاههای PMU خواهد شد.

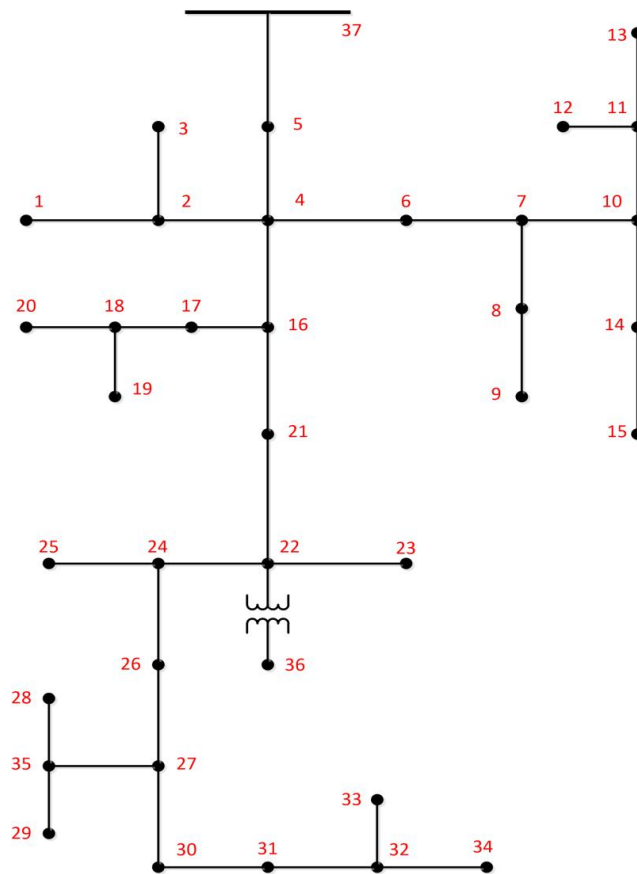
### ۳-۷-۳- شبکه نمونه ۳۷ باسه

شبکه نمونه ۳۷ باسه توزیع IEEE در شکل ۳-۸ نشان داده شده است. در این شبکه برای سادگی بیشتر، نودها از ۱ تا ۳۷ نامگذاری شده است. در این شبکه نیز  $tr=150m$  می‌باشد بنابراین بر اساس اطلاعات جغرافیای شبکه  $d=70.17$ ,  $n_1=11$ ,  $n_2=24$ ,  $N_T=264$  مرکز کنترل در باس ۳۷ انتخاب شده است. خروجی شبیه سازی در جدول ۳-۶ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که در

حالت اول ( $T=0.6$ )، تعداد ۱۶ عدد EHSN برای مشاهده پذیری سیستم مخابراتی کافی است. ولی این عدد در حالت دوم ( $T=1$ ) برابر ۳۱ می باشد. بنابراین طبق انتظار، افزایش ضریب قابلیت اطمینان برابر با افزایش هزینه سیستم خواهد بود. نتایج شبیه سازی در شبکه های نمونه کاهش هزینه شبکه مخابراتی حس گرهای بی سیم در سیستم WAMS را تأیید می کند. همان گونه که در جداول ۳-۵ و ۳-۶ ملاحظه می شود، هزینه شبکه مخابراتی به نسبت شبکه قدرت بسیار کمتر می باشد.

جدول ۳-۵: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۱۱ باسه

حالت اول (ضریب قابلیت اطمینان $T=0.6$ )				
هزینه کلی (دلار)	شماره ناحیه (برای نصب EHSN)	شماره باس (برای نصب PPSN)	شماره باس (برای نصب PMU)	راه حل
۱۶۲.۸۸۰	۳۸.۴۰.۶۰.۷۸.۹۶.۱۰۴.۱۱۲.۱۳۰	۲.۴.۷.۸	۲.۴.۷.۸	۱
۱۶۲.۲۸۰	۴۰.۵۸.۷۶.۹۴.۱۱۲.۱۳۰	۳.۴.۷.۸	۳.۴.۷.۸	۲
حالت دوم (ضریب قابلیت اطمینان $T=1$ )				
هزینه کلی (دلار)	شماره ناحیه (برای نصب EHSN)	شماره باس (برای نصب PPSN)	شماره باس (برای نصب PMU)	راه حل
۱۶۴.۳۸۰	۴۷.۵۰.۵۷.۵۸.۶۶.۷۵.۸۵.۹۳.۱۰۲.۱۱۲.۱۲۱.۱۳۱.۱۴۰	۲.۴.۷.۸	۲.۴.۷.۸	۱
۱۶۴.۰۸۰	۴۹.۵۰.۵۸.۶۸.۷۶.۸۴.۹۴.۱۰۳.۱۱۳.۱۲۴.۱۳۱.۱۴۰	۳.۴.۷.۸	۳.۴.۷.۸	۲



شکل ۳-۸: شبکه نمونه ۳۷ باسه

جدول ۳-۶: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۳۷ باسه

حالت اول (ضریب قابلیت اطمینان $T=0.6$ )			
هزینه کلی (دلار)	شماره ناحیه (برای نصب EHSN)	شماره باس (برای نصب PPSN)	شماره باس (برای نصب PMU)
۴۸۶،۲۴۰	۲۶،۴۸،۶۶،۷۷،۸۷،۹۲،۹۶،۱۰۴،۱۰۸،۱۱۴ ۱۳۶،۱۵۸،۱۹۲،۲۱۴،۲۲۴،۲۳۶	۲،۴،۸،۱۱،۱۴،۱۸،۲۲،۲۴، ۳۱،۳۲،۳۵،۳۷	۲،۴،۸،۱۱،۱۴،۱۸،۲۲،۲۴، ۳۱،۳۲،۳۵،۳۷
حالت دوم (ضریب قابلیت اطمینان $T=1$ )			
هزینه کلی (دلار)	شماره ناحیه (برای نصب EHSN)	شماره باس (برای نصب PPSN)	شماره باس (برای نصب PMU)
۴۹۰،۷۴۰	۱۵،۲۷،۳۴،۳۷،۳۹،۴۳،۴۷،۵۱،۵۳،۵۸،۶۲،۶۳،۷۵ ۸۱،۸۷،۹۳،۹۹،۱۰۳،۱۱۳،۱۲۳،۱۴۶،۱۵۶،۱۶۸،۱۹۰ ۲۰۲،۲۱۱،۲۱۲،۲۱۳،۲۲۵،۲۳۷،۲۴۸	۲،۴،۸،۱۱،۱۴،۱۸،۲۲،۲۴، ۳۱،۳۲،۳۵،۳۷	۲،۴،۸،۱۱،۱۴،۱۸،۲۲،۲۴، ۳۱،۳۲،۳۵،۳۷

به عنوان مثال در شبکه ۳۷ باسه و در حالت دوم، هزینه شبکه قدرت ناشی از جایگذاری PMU ها برابر ۴۸۰،۰۰۰ دلار است. در حالی که هزینه سیستم مخابراتی شامل حس گرهای PPSN و EHSN برابر ۱۰،۷۴۰ دلار است. در حالی که نتایج مرجع [۵۷] نشان می‌دهد که هزینه سیستم مخابراتی در مقابل سیستم قدرت قابل ملاحظه می‌باشد. به عنوان مثال، در روش ارائه شده در مرجع [۵۷] روی شبکه نمونه ۳۰ باسه IEEE، هزینه اندازه‌گیری شبکه قدرت به وسیله دستگاه‌های PMU برابر ۲۸۰،۰۰۰ دلار است. اما، هزینه سیستم مخابراتی به وسیله فیبر نوری برابر ۵۵۶،۰۰۰ دلار می‌باشد که نشان دهنده هزینه دو برابری سیستم مخابراتی نسبت به سیستم قدرت می‌باشد.

همچنین با توجه به هزینه کم این سیستم مخابراتی نسبت به سیستم قدرت، بهتر است که قابلیت اطمینان بالاتر برای بهره برداری سیستم انتخاب شود. به عنوان مثال در جدول ۳-۶، تفاوت قیمت حالت اول و دوم حدود ۴۵۰۰ دلار می‌باشد که به نسبت هزینه کل سیستم WAMS هزینه بسیار کمی است.

### ۳-۸- نتیجه‌گیری

در این فصل ترکیبی از حسگرهای بیسیم به عنوان زیرساخت مخابراتی سیستم پایش فراگیر مورد استفاده قرار گرفته است. هزینه کمتر و نصب آسانتر این حسگرها نسبت به شبکه مخابراتی فیبر نوری، انگیزه استفاده از آنها را به عنوان شبکه مخابراتی بیشتر کرده است. برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی، ترکیبی از حس گرهای EHSN و PPSN استفاده شده است. همچنین تابع هدف برای حداقل سازی همزمان هزینه سیستم قدرت و مخابراتی با استفاده از دستگاه‌های PMU و همچنین حس گرهای نامبرده ارائه شده است.

نتایج شبیه سازی روی دو شبکه نمونه، هزینه بسیار کمتر شبکه مخابراتی پیشنهادی نسبت به شبکه قدرت را نشان می‌دهد. البته توجه به این نکته ضروری است که هزینه تعمیرات و نگهداری زیرساخت مخابراتی پیشنهادی باید در صورت پیاده سازی، به هزینه این سیستم افزوده گردد.



## فصل چهارم

# رؤیت پذیری پایه سیستم پایش فراگیر با در نظر گرفتن باسهای تزریق صفر و دستگاههای اندازه گیر قدیمی

### ۴-۱- مقدمه

در فصل قبل، جایابی بهینه دستگاههای اندازه گیری PMU و همچنین زیر ساخت مخابراتی ارائه شده در این رساله مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، ترکیبی از حس گرهای بی سیم PPSN و EHSN استفاده شد تا قابلیت اطمینان سیستم افزایش پیدا کند.

در این فصل ابتدا مفهوم رؤیت پذیری پایه و همچنین رؤیت پذیری مقید به امنیت تشریح خواهد شد. سپس فرمول بندی و تابع هدف رؤیت پذیری پایه بیان خواهد شد. برای فرمول بندی این مساله، تأثیر باسهای تزریق صفر (ZIB)<sup>۱</sup> و همچنین دستگاههای اندازه گیر قدیمی (CM)<sup>۲</sup> نیز بررسی خواهد شد.

---

<sup>۱</sup> Zero-injection Bus

<sup>۲</sup> Conventional Measurement

باسه‌های ZIB، باسهایی هستند که تزریق توان یا بار در آنها وجود ندارد. دلیل استفاده از باس تزریق صفر و اندازه گیرهای قدیمی در سیستم WAMS، کاهش دستگاههای PMU لازم برای مشاهده پذیری سیستم می‌باشد. در واقع حضور ZIB و CM در بررسی سیستم، باعث کاهش دستگاههای اندازه گیر مورد نیاز می‌باشد. بنابراین به اقتصادی‌تر شدن رؤیت پذیری سیستم WAMS کمک خواهد شد.

توجه به این نکته ضروری است که رؤیت پذیری پایه، حداقل امنیت ممکن در سیستم قدرت و مخابراتی را خواهد داشت. در واقع، هدف رؤیت پذیر کردن سیستم WAMS با حداقل تعداد PMU و حس گر بی‌سیم می‌باشد و قیود قابلیت اطمینان و امنیت در سطح پایینی ارائه می‌گردد.

#### ۴-۲-۱ استراتژی‌های مشاهده پذیری در سیستم اندازه گیری فراگیر

سیستم WAMS برای رفع نقصهای سیستم قدیمی SCADA گسترش یافته است. در واقع این سیستم، به منظور افزایش قابلیت اطمینان مشاهده پذیری سیستم و همچنین جلوگیری از حوادث احتمالی تولید و برنامه ریزی شده است. بنابراین امنیت خود این سیستم اندازه گیری برای بهره بردار سیستم مهم است.

در این رساله، دو مفهوم و استراتژی برای مشاهده پذیری ارائه شده است:

۱- مشاهده پذیری پایه (EBO)

۲- مشاهده پذیری مقید به امنیت (SBO)

در این قسمت، به بررسی هر کدام از این دو مفهوم پرداخته شده است.

#### ۴-۲-۱-۱ مشاهده پذیری پایه

مشاهده پذیری پایه به مفهوم مشاهده پذیر کردن سیستم قدرت و مخابرات با حداقل هزینه ممکن است. در واقع در این روش، تابع هدف برای مشاهده پذیری با قیودی مطرح خواهد شد که حداقل دستگاههای اندازه گیری PMU و EHSN و PPSN نیاز باشد. بنابراین، این کم هزینه بودن طراحی سیستم WAMS، منجر به کاهش امنیت اندازه گیری سیستم خواهد شد.

## ۴-۲-۲- مشاهده پذیری مقید به امنیت

در این حالت، بر خلاف مشاهده پذیری پایه، مشاهده پذیری سیستم اندازه گیری WAMS، تنها با هدف حداقل شدن هزینه انجام نمی‌شود. بلکه امنیت سیستم اندازه گیری نیز برای ما اهمیت دارد. در این رساله، برای افزایش امنیت سیستم اندازه گیری دو رویکرد وجود دارد:

۱- افزایش قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی تشکیل شده از حس‌گرهای بی‌سیم

۲- جاگذاری بهینه دستگاههای PMU به صورت ایمن در برابر بروز خطا (تحلیل N-1 حادثه<sup>۱</sup>)

در صورت پیاده سازی دو فاکتور فوق، تعداد دستگاههای اندازه گیری و حس‌گرهای بی‌سیم افزایش خواهد یافت که نتیجه آن افزایش هزینه سیستم خواهد بود. ولی، سیستم اندازه گیری ایمن‌تر و قابل اطمینان‌تر خواهد بود.

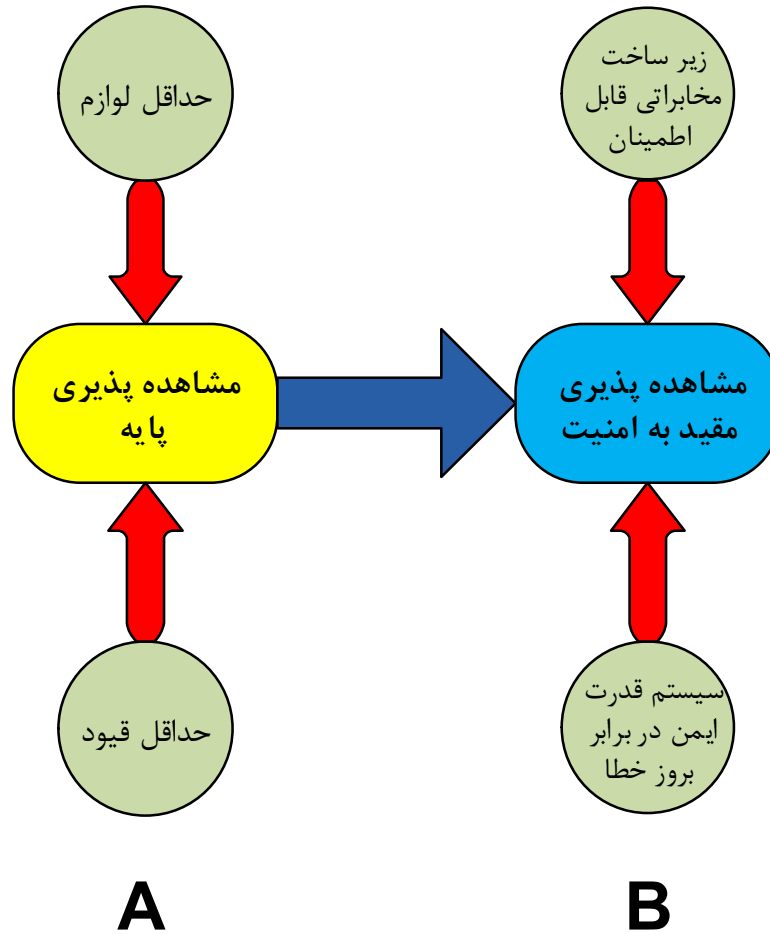
در شکل ۴-۱، استراتژی‌های مشاهده پذیری (A: مشاهده پذیری پایه و B: مشاهده پذیری مقید به امنیت) نشان داده شده است.

در این فصل، مشاهده پذیری پایه بیان می‌شود و در فصل بعد، مشاهده پذیری مقید به امنیت ارزیابی خواهد شد.

## ۴-۳- فرمول بندی مشاهده پذیری پایه

برای فرمول بندی مشاهده پذیری پایه، سعی بر این است تا باسهای تزریق صفر و همچنین اندازه گیرهای قدیمی نیز به سیستم اضافه گردد تا از تأثیر این اجزا برای کاهش دستگاههای اندازه لازم جهت مشاهده پذیری سیستم استفاده شود. بنابراین، ابتدا روابط مورد نیاز برای باسهای تزریق صفر و اندازه گیرهای قدیمی ارائه شده و سپس تابع هدف مربوطه تشکیل خواهد شد.

<sup>1</sup> N-1 Contingency



شکل ۴-۱: استراتژی‌های مشاهده پذیری

### ۴-۳-۱- جایابی بهینه دستگاههای اندازه گیر فازوری با در نظر گرفتن باسهای تزریق صفر

در این قسمت، برای جایابی بهینه دستگاههای PMU، از خاصیت باسهای تزریق صفر استفاده خواهد شد. در این باسها، تزریق توان و یا باری وجود ندارد. بنابراین می‌توان با توجه به این خاصیت، از تعداد دستگاههای اندازه‌گیری لازم کم کرد. همان گونه که در قسمت ۳-۲ بحث شد، برای حداقل کردن دستگاههای PMU، رابطه زیر را استفاده می‌کنیم:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (1-4)$$

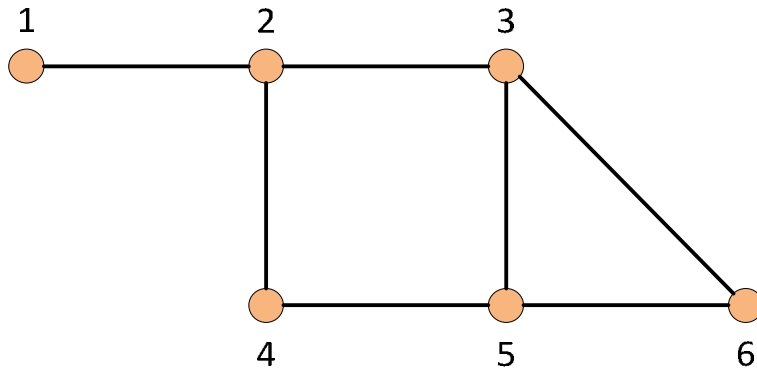
$$\text{s.t. } f_i \geq 1 \quad i \in I \quad (2-4)$$

$$f_i = \sum_{j \in I} A_{i,j} x_j \quad \forall i \in I \quad (3-4)$$

حال، می‌تواند از خاصیت باسه‌های تزریق صفر در معادلات بالا استفاده گردد. در واقع، حضور یک باس تزریق صفر باعث می‌شود که مشاهده پذیری  $n-1$  باس از مجموع این باس و باسه‌های مجاور آن، برای مشاهده پذیری کل سیستم (با  $n$  باس) کافی باشد. بنابراین، می‌توان رابطه زیر را برای تابع مشاهده پذیری ( $f_i$ ) در باسهایی که با باس تزریق صفر در ارتباط هستند بیان کرد:

$$\sum_{i=1}^n f_i \geq n - 1 \quad (4-4)$$

با یک مثال، فرمول بندی باسه‌های تزریق صفر را بررسی می‌کنیم. شبکه ۶ باسه شکل ۲-۴ را در نظر بگیرید. در این شبکه فرض می‌شود که باسه‌های ۴ و ۶، باس تزریق صفر می‌باشند.



شکل ۲-۴: شبکه نمونه ۶ باسه

توابع مشاهده پذیری ( $f_i$ ) برای هر باس به صورت زیر است:

$$\begin{cases} f_1 = x_1 + x_2 \geq 1 \\ f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \geq 1 \\ f_3 = x_2 + x_3 + x_5 + x_6 \geq 1 \\ f_4 = x_2 + x_4 + x_5 \geq 1 \\ f_5 = x_3 + x_4 + x_5 + x_6 \geq 1 \\ f_6 = x_3 + x_5 + x_6 \geq 1 \end{cases} \quad (5-4)$$

با توجه به روابط بالا، حداقل دو دستگاه PMU برای مشاهده پذیری سیستم لازم است که به عنوان مثال می‌تواند در باسهای ۲ و ۵ نصب شود. حال اگر تأثیر باسهای تزریق صفر را در نظر گرفته شود، با توجه به رابطه (۴-۴) و اینکه باسهای ۴ و ۶ تزریق صفر هستند، معادلات مشاهده پذیری (۴-۵) به صورت معادلات (۴-۶) تغییر می‌کنند.

$$\begin{aligned} f_1 &= x_1 + x_2 \geq 1 \\ ZIB_4 &= f_2 + f_4 + f_5 = x_1 + 2x_2 + 2x_3 + 3x_4 + 2x_5 + x_6 \geq 2 \quad (۴-۶) \\ ZIB_6 &= f_3 + f_5 + f_6 = x_2 + 3x_3 + x_4 + 3x_5 + 3x_6 \geq 2 \end{aligned}$$

مجموعه باسهای تزریق صفر را (SOZIB)<sup>۱</sup> نام گذاری می‌شود. بنابراین، این مجموعه برای باسهای ۴ و ۶ عبارت است از:

$$\begin{aligned} SOZIB_4 &= \{2, 4, 5\} \\ SOZIB_6 &= \{3, 5, 6\} \end{aligned} \quad (۷-۴)$$

با توجه به شکل، مشخص است که حضور یک دستگاه PMU در باس ۲، کل سیستم را مشاهده پذیر می‌کند. به این صورت که باسهای ۱، ۲، ۳، ۴ به صورت مستقیم مشاهده پذیر می‌شود. از مجموعه SOZIB<sub>4</sub>، باسهای ۲ و ۴ مشاهده پذیر هستند و با توجه به رابطه (۴-۴)، باس شماره ۵ نیز مشاهده پذیر می‌باشد. همچنین از مجموعه SOZIB<sub>6</sub>، باسهای ۳ و ۵ مشاهده پذیر بوده و در نتیجه باس ۶ نیز مشاهده پذیر می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن باسهای تزریق صفر، یک عدد دستگاه PMU برای مشاهده پذیری سیستم صرفه جویی شد.

اما آیا معادلات (۴-۶) جواب درستی به ما می‌دهد؟ از این معادلات مشخص است که اگر  $x_2=1$  باشد، هر دو نامعادله ارضا نمی‌شود و حضور یک دستگاه دیگر PMU در باسهای ۲ یا ۵ لازم است. یعنی این معادلات ما را به جواب بهینه نمی‌رساند. اما علت چیست؟ علت در باس شماره ۵ می‌باشد که بین دو باس ZIB قرار گرفته و در هر دو مجموعه قرار دارد. در حالی که لازم نیست این باس در هر دو مجموعه قرار گیرد و حضور آن در یک مجموعه کافیست. برای رفع نقض این موضوع، به قانون دیگری اشاره می‌

<sup>1</sup> Set of Zero-injection Bus

کنیم. به این صورت که اگر یک باس بین دو یا تعداد بیشتری ZIB قرار بگیرد، در واقع بین m تا ZIB باشد، و مجموع باسهای متصل به ZIB ها و آن باس برابر n باشد، برای مشاهده پذیری کل سیستم باسها کفایت که n-m عضو مشاهده پذیر باشد:

$$\sum_{i=1}^n f_i \geq (n - m) \quad (۸-۴)$$

به عنوان مثال در شکل ۴-۲، باس ۵ بین باسهای تزریق صفر ۴ و ۶ قرار دارد و مجموعه باس ۵ و باسهای ZIB و باسهای مجاور آنها به صورت رابطه (۴-۹) خواهد بود.

$$f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 \geq 3 \quad (۹-۴)$$

بنابراین معادلات (۴-۶) به صورت زیر تصحیح می شود:

$$\begin{aligned} f_1 &= x_1 + x_2 \geq 1 \\ f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 &= \\ x_1 + 3x_2 + 2x_3 + 3x_4 + 4x_5 + 3x_6 &\geq 3 \end{aligned} \quad (۱۰-۴)$$

که در معادلات (۴-۱۰) و قرار دادن  $X_2=1$ ، هر دو نامعادله ارضا شده و به جواب بهینه می رسیم.

بررسی معادلات مطرح شده در شبکه های بزرگ کمی مشکل می باشد، بنابراین در این رساله از معادلاتی استفاده می کنیم که کلی تر بوده و نیاز به تحلیل شبکه نداشته باشد. برای این منظور از روابط کمکی زیر استفاده می شود:

$$f_i \geq 1 + \sum_{j \in ZIB} a_{ij} z_i s_{ij} - z_i \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (۱۱-۴)$$

$$\sum_{j \in ZIB} a_{ij} y_{ij} = z_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (۱۲-۴)$$

$$\sum_{i \in SOZIB_k} a_{ij} s_{ij} = \sum_{i \in SOZIB_k} a_{ij} y_{ij} - 1 \quad k = 1, 2, \dots, n_z \quad (۱۳-۴)$$

$$s_{ij} \leq y_{ij} \quad \forall i \in Z \quad \forall j \in ZIB \quad (14-4)$$

که در آن  $S_{ij}$  و  $y_{ij}$  متغیرهای باینری کمکی هستند و  $ZIB$  مجموعه باسهای تزریق صفر می‌باشد.  $ZIB_k$  عبارت است از  $k$  امین عضو از مجموعه  $ZIB$  و  $n_z$  تعداد این مجموعه است.  $SOZIB_k$  مجموعه  $ZIB_k$  و باسهای اطراف آن می‌باشد. همچنین متغیر  $Z_i$  و مجموعه  $Z$  با استفاده از رابطه اجتماع زیر تعریف می‌شود:

$$Z = \bigcup_{k=1}^{n_z} SOZIB_k \quad (15-4)$$

$$\begin{cases} z_i = 0 & \text{if } i \notin Z \\ z_i = 1 & \text{if } i \in Z \end{cases} \quad (16-4)$$

به عنوان مثال در شکل ۲-۴، معادلات (۱۱-۴) تا (۱۶-۴) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} ZIB &= \{4,6\}, \quad n_z = 2, \quad SOZIB_1 = \{2,4,5\}, \\ SOZIB_2 &= \{3,5,6\} \rightarrow Z = \{2,3,4,5,6\} \end{aligned} \quad (17-4)$$

$$\begin{cases} f_1 = x_1 + x_2 \geq 1 \\ f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \geq S_{24} \\ f_3 = x_2 + x_3 + x_5 + x_6 \geq S_{36} \\ f_4 = x_2 + x_4 + x_5 \geq S_{44} \\ f_5 = x_3 + x_4 + x_5 + x_6 \geq S_{54} + S_{56} \\ f_6 = x_3 + x_5 + x_6 \geq S_{66} \end{cases} \quad (18-4)$$

$$y_{24} = 1, y_{44} = 1, y_{36} = 1, y_{66} = 1, y_{54} + y_{56} = 1 \quad (19-4)$$

$$\begin{cases} S_{24} + S_{44} + S_{54} = (y_{24} + y_{44} + y_{54}) - 1 \\ S_{36} + S_{56} + S_{66} = (y_{36} + y_{56} + y_{66}) - 1 \end{cases} \quad (20-4)$$

$$S_{24} \leq y_{24}, S_{44} \leq y_{44}, S_{54} \leq y_{54}, S_{36} \leq y_{36}, S_{56} \leq y_{56}, S_{66} \leq y_{66} \quad (21-4)$$



با حل معادلات (۴-۱۷) تا (۴-۲۱)، به جواب مطلوب یعنی جاگذاری یک دستگاه PMU در باس ۲ می‌رسیم.

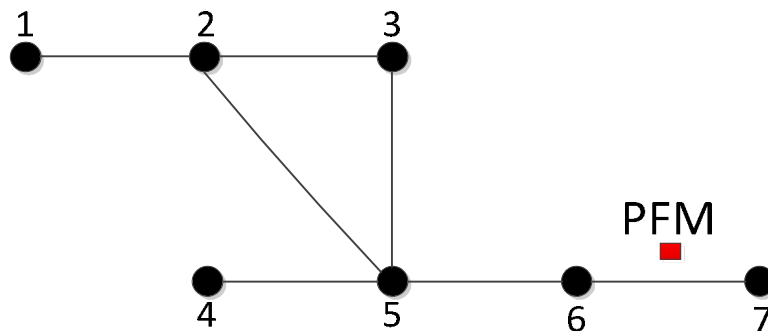
### ۴-۳-۲- جایابی بهینه دستگاههای اندازه گیر فازوری با در نظر گرفتن دستگاههای اندازه گیری قدیمی

دستگاههای اندازه گیری قدیمی، عبارت‌اند از دستگاههای اندازه گیری که در سیستم قدیمی SCADA وجود داشته است. از جمله آنها می‌توان به IM<sup>۱</sup>، VM<sup>۲</sup> و PFM<sup>۳</sup> اشاره کرد. در این رساله، تأثیر دستگاههای PFM در سیستم WAMS بررسی شده است.

با توجه به رابطه کلی ارائه شده برای اندازه گیرهای PFM، بین هر دو باس که یک دستگاه اندازه گیر وجود دارد، یک مجموعه (SOPFM<sup>۴</sup>) تشکیل می‌شود که باید با رابطه (۴-۲۲) نشان داده می‌شود.

$$SOPFM = \{i, j\} \rightarrow f_i + f_j \geq 1 \quad (۴-۲۲)$$

بنابراین، حضور این دستگاهها می‌تواند از تعداد دستگاههای PMU مورد نیاز کم کند. به عنوان مثال، شبکه ۷ باسه شکل ۴-۳ را در نظر بگیرید.



<sup>1</sup> Injection Measurement

<sup>2</sup> Voltage Measurement

<sup>3</sup> Power Flow Measurement

<sup>4</sup> Set of Power Flow Measurement

شکل ۴-۳: شبکه نمونه ۳ باسه

در این شبکه فرض کنید اگر باس ZIB و یا دستگاه PFM وجود نداشته باشد، حداقل ۳ دستگاه PMU برای رؤیت پذیری کامل آن نیاز است که می‌توانند در باسهای ۲، ۵ و ۶ جاگذاری شوند. حال فرض کنید باس ۲ یک باس تزریق صفر بوده و یک دستگاه PFM بین دو باس ۶ و ۷ قرار دارد. با توجه به اینکه:

$$SOZIB_2 = \{1, 2, 3, 5\} \quad (۲۳-۴)$$

حضور یک دستگاه PMU در باس ۵، برای مشاهده پذیری کل باسهای تزریق صفر باس ۲ کافی بوده و باس ۱ نیز مشاهده پذیر می‌شود. همچنین برای دستگاه PFM هم می‌توان معادله زیر را نوشت:

$$SOPFM = \{6, 7\} \rightarrow f_6 + f_7 \geq 1 \quad (۲۴-۴)$$

و رؤیت پذیری باس ۶ برای رؤیت پذیری کل سیستم کافی است. در نتیجه با تنها یک عدد PMU در باس ۵، و استفاده از خاصیت باسهای تزریق صفر و اندازه گیر PFM، دو عدد دستگاه PMU در سیستم صرفه جویی شد.

### ۴-۳-۳- سیستم مخابراتی و قیود آن در مشاهده پذیری پایه

سیستم مخابراتی مورد استفاده در این قسمت، همان سیستم مخابراتی استفاده شده در فصل پیش بدون در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان می‌باشد. یعنی تنها قید مشاهده پذیری سیستم مخابراتی که شامل حس‌گرهای ترکیبی EHSN و PPSN بوده است، در این تابع استفاده خواهد شد. لذا تعداد دستگاههای اندازه گیری حداقل مورد نیاز برای ارضای قید مشاهده پذیری سیستم خواهد بود. بنابراین در سیستم مخابراتی تنها از قید زیر که قید مشاهده پذیری تمام گره‌های مخابراتی به است استفاده خواهد شد:

$$CO_{n-1s,j} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (۲۵-۴)$$

#### ۴-۴- تابع هدف پیشنهادی برای مشاهده پذیری پایه

بر اساس مطالب عنوان شده، تابع هدف مشاهده پذیری پایه که با هدف کمترین هزینه ممکن در ازای مشاهده پذیری سیستم مخابراتی و قدرت ارائه گردیده است، پیشنهاد می‌گردد. به منظور استفاده هر چه بیشتر از امکانات موجود در شبکه قدرت، تأثیر باسهای تزریق صفر و اندازه گیرهای PFM نیز مد نظر قرار خواهد گرفت. توجه به این نکته ضروری است که در حل برنامه جاییابی بهینه PMU ها، معمولاً چند جواب ممکن برای مساله وجود دارد. در واقع بدون تحمیل هزینه اضافی به سیستم، می‌توان جوابی انتخاب کرد که قابلیت اطمینان مشاهده پذیری بالاتری داشته باشد.

همان طور که در قسمت ۲-۸-۱ بیان گردید، برای این منظور شاخص افزونگی مشاهده پذیری سیستم (SORI<sup>۱</sup>) تعریف شده است که با توجه به اینکه هر باس توسط تعداد بیشتری دستگاه اندازه گیری مشاهده پذیر شود، جواب بهتر را انتخاب می‌کند. شاخص SORI به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$SORI = \sum_{i=1}^n BOI_i \quad (26-4)$$

که در این رابطه، BOI<sup>۲</sup> شاخص مشاهده پذیری باس است. بنابراین، شاخص SORI نیز در قیود اضافه خواهد شد تا جوابهای بهتری انتخاب شود. در این قسمت نیز، تابع هزینه به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Total\ Cost = Cost_{PMU} + Cost_{WSN} \quad (27-4)$$

که در آن  $Cost_{PMU}$  شامل هزینه نصب دستگاههای PMU و همچنین  $Cost_{WSN}$  هزینه حس‌گرهای بی‌سیم به کار رفته در سیستم مخابراتی می‌باشد. بنابراین، تابع هزینه کل سیستم و قیود مربوط به آن به صورت زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$Min \left\{ \left( \sum_{i=1}^n c_i X_i \right) + P_P \times N_P + P_E \times N_E \right\} \quad (28-4)$$

St.

<sup>1</sup> System Observability Redundancy Index

<sup>2</sup> Bus Observability Index

$$f_i \geq 1 + \sum_{j \in ZIB} a_{ij} z_i s_{ij} - z_i \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (29-4)$$

$$\sum_{j \in ZIB} a_{ij} y_{ij} = z_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (30-4)$$

$$\sum_{i \in SOZIB_k} a_{ij} s_{ij} = \sum_{i \in SOZIB_k} a_{ij} y_{ij} - 1 \quad k = 1, 2, \dots, n_z \quad (31-4)$$

$$s_{ij} \leq y_{ij} \quad \forall i \in Z \quad \forall j \in ZIB \quad (32-4)$$

$$SORI \geq R_{\min} \quad (33-4)$$

$$\sum_{k \in SOPFM_i} f_k \geq 1 \quad \forall k \in CM \quad (34-4)$$

$$CO_{n-1_s, j} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (35-4)$$

که در آن:

$C_i$ : هزینه نصب و خرید PMU

$X_i$ : وضعیت نصب یا عدم نصب دستگاه PMU در باس

$n$ : تعداد باسهای شبکه

$P_P$ : هزینه حس گرهای PPSN

$N_P$ : تعداد حس گرهای PPSN

$P_E$ : هزینه حس گرهای EHSN

$N_E$ : تعداد حس گرهای EHSN

$m$ : تعداد کل حس گرهای بی سیم

رابطه (۲۸-۴) مجموع هزینه کل سیستم مخابرات و قدرت می‌باشد. رابطه (۲۹-۴) تا (۳۲-۴) قید مشاهده پذیری سیستم قدرت با در نظر گرفتن باسهای تزریق صفر می‌باشد که در بخش (۱-۳-۴) بیان شد. رابطه (۳۳-۴) بیان گر شاخص SORI می‌باشد که به وسیله ضریب  $R_{min}$  مشخص می‌شود. بدین صورت که بسته به اهمیت شاخص SORI، این ضریب کم و زیاد شده و به صورت یک قید در تابع هدف بیان می‌شود. رابطه (۳۴-۴) تأثیر اندازه گیرهای PFM می‌باشد که در بخش (۲-۳-۴) بیان شد. همچنین، رابطه (۳۵-۴) قید مشاهده پذیری سیستم مخابراتی است که در قسمت (۳-۴) عنوان گردید. بنابراین ساختار کلی تابع هدف مشاهده پذیری پایه در این قسمت بیان شد. فلوجارت روش پیشنهادی در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.

در این فلوجارت، گام اول نشان دهنده برنامه OPP با قید مشاهده پذیری و همچنین قیود باسهای تزریق صفر و شاخص SORI می‌باشد. در این قسمت با توجه به قید SORI، بهترین جواب از مجموعه جوابهای پیدا شده مساله OPP، برای بررسی در گام دوم که پیدا کردن جایابی بهینه حسگرهای بیسیم است وارد می‌شود. در گام دوم، قید مشاهده پذیری سیستم مخابراتی بررسی می‌گردد. در گام آخر، کم هزینه ترین جواب که با توجه به قیود قدرت و مخابرات انتخاب شده است، در خروجی نمایان می‌گردد.

#### ۴-۵- شبیه سازی روی شبکه‌های نمونه

در این قسمت، به منظور ارزیابی قابلیت‌ها و همچنین آنالیز روش پیشنهادی، این روش روی دو شبکه نمونه پیاده سازی می‌گردد. در واقع استفاده از حس گرهای ترکیبی بی سیم به عنوان زیرساخت مخابراتی سیستم WAMS، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

شبکه نمونه استاندارد ۱۳ باسه IEEE و همچنین شبکه استاندارد ۳۷ باسه IEEE برای این منظور استفاده شده است. برای حل مساله از الگوریتم ژنتیک باینری<sup>۱</sup> استفاده شده است. پارامترهای این مساله به وسیله آزمون و خطا به دست آمده است تا بتواند به جواب قانع کننده‌ای دست پیدا کرد. این پارامترها در جدول ۴-۱ برای دو سیستم تست نشان داده شده است.

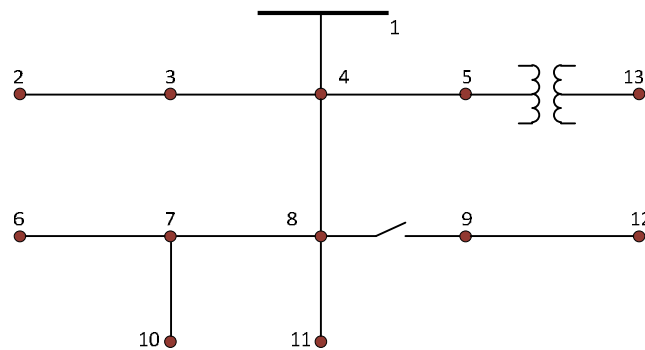
<sup>۱</sup> BCGA

جدول ۴-۱: پارامترهای انتخابی برای الگوریتم ژنتیک

شبکه	اندازه جمعیت	$P_C$	$P_M$
۱۳ باسه IEEE	۱۰۰	۰/۸	۰/۳
۳۷ باسه IEEE	۱۵۰	۰/۷۵	۰/۳۵

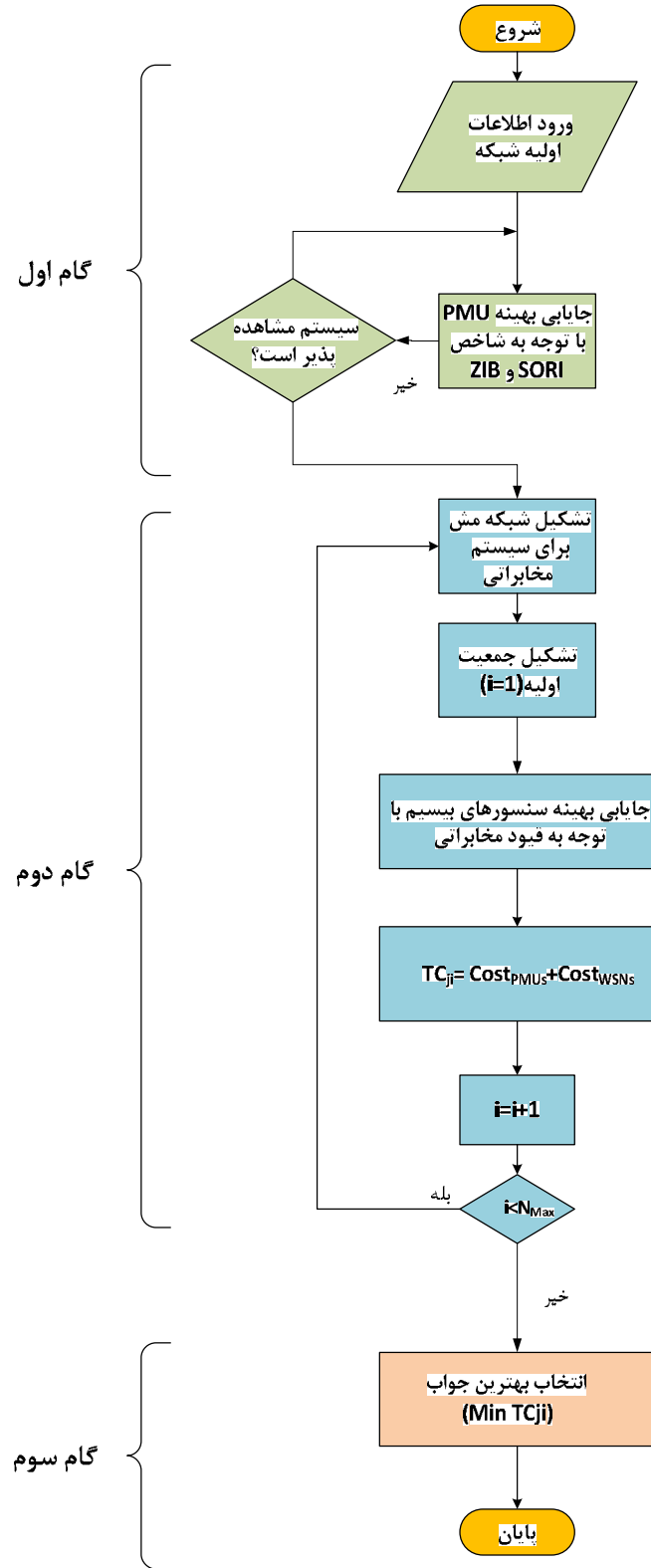
#### ۴-۵-۱- شبکه نمونه استاندارد ۱۳ باسه با در نظر گرفتن باسهای تزریق صفر

شبکه نمونه استاندارد ۱۳ باسه IEEE در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. در این شبکه، فرض براین است که باس ۵، یک ZIB می‌باشد.



شکل ۴-۵: شبکه نمونه استاندارد ۱۳ باسه IEEE

در این شبکه، اگر تأثیر باس تزریق صفر در نظر گرفته نشود، ۶ دستگاه PMU برای مشاهده پذیری کامل سیستم لازم است. اما با در نظر گرفتن باس ۵ به عنوان ZIB، این تعداد ۵ عدد می‌باشد. جواب‌های ممکن برای جایابی دستگاه‌های PMU و همچنین شاخص SORI هر جواب، در جدول ۴-۲ بیان شده است.



شکل ۴-۴: فلوجارت مشاهده پذیری پایه

جدول ۴-۲: راه حل های جایابی بهینه PMU برای شبکه ۱۳ باسه IEEE

راه حل	شماره باس (برای نصب PMU)	شاخص SORI
۱	۲،۴،۷،۸،۱۲	۱۹
۲	۳،۴،۷،۸،۱۲	۲۰
۳	۲،۴،۷،۸،۹	۲۰
۴	۳،۴،۷،۸،۹	۲۱
۵	۳،۴،۷،۹،۱۱	۱۸
۶	۲،۴،۷،۹،۱۱	۱۷
۷	۳،۴،۷،۱۱،۱۲	۱۶
۸	۲،۴،۷،۱۱،۱۲	۱۵

با توجه به رابطه (۴-۳۳)، اگر  $R_{min}=20$  در نظر گرفته شود، تنها راه حل های ۲،۳ و ۴ قابل استفاده می باشند. بدین صورت تابع این قید در تابع هدف مشخص می شود.

در هر باس که یک PMU نصب می شود، یک عدد PPSN نیز نصب می شود. اگر در این شبکه برد حسگرهای بیسیم<sup>۱</sup> برابر ۱۰۰ متر انتخاب گردد، حس گرهای PPSN نمی توانند اطلاعات را به مرکز کنترل برسانند. مرکز کنترل در این شبکه باس ۴ انتخاب شده است. با توجه به اطلاعات شبکه نمونه، طول و عرض ناحیه جغرافیایی به ترتیب برابر ۹۰۰ و ۴۰۰ متر می باشد. بنابراین با توجه به معادلات (۷-۳) تا (۹-۳)، طول شبکه مش و تعداد ناحیه های آن برابر است با:

$$d = 47.6 m$$

$$n_1 = \left\lceil \frac{W_1}{d} \right\rceil + 1 = \frac{400}{47.6} + 1 = 9 \quad (۴-۳۶)$$

$$n_2 = \left\lceil \frac{W_2}{d} \right\rceil + 1 = \frac{900}{47.6} + 1 = 19$$

$$N_T = n_1 \times n_2 = 171$$

با توجه به اینکه شبکه مش ۱۷۱ عضو دارد، کروموزوم تشکیل شده نیز ۱۷۱ ژن خواهد داشت. نتایج بهینه سازی به وسیله BCGA در جدول ۴-۳ نشان داده شده است. در این سیستم، هزینه خرید و

<sup>۱</sup> Transmission range (tr)



نصب هر دستگاه PMU برابر ۴۰,۰۰۰ دلار و هر عدد حس گر PPSN و EHSN به ترتیب برابر ۸۰ و ۱۰۰ دلار فرض شده است. همچنین، هزینه زیرساخت حس گرهای EHSN برابر ۱۵۰ دلار فرض شده است. در نتیجه هزینه کلی هر حس گر PPSN و EHSN برابر ۸۰ و ۲۵۰ دلار می باشد.

جدول ۴-۳: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۱۳ باسه

راه حل	شماره باس (برای نصب PMU)	شماره باس (برای نصب PPSN)	شماره ناحیه (برای نصب EHSN)	شاخص SORI	هزینه کلی (دلار)
۲	۳,۴,۷,۸,۱۲	۳,۴,۷,۸,۱۲	۴۰,۵۸,۶۷,۸۵,۹۵,۱۱۳,۱۲۳,۱۴۱,۱۵۱	۲۰	۲۰۲,۵۶۰
۳	۲,۴,۷,۸,۹	۲,۴,۷,۸,۹	۳۹,۵۷,۷۵,۹۳,۱۱۱,۱۲۹	۲۰	۲۰۱,۹۰۰
۴	۳,۴,۷,۸,۹	۳,۴,۷,۸,۹	۴۰,۵۸,۷۶,۹۴,۱۱۲,۱۳۰	۲۱	۲۰۱,۹۰۰

نتایج نشان می دهد که راه حل های ۳ و ۴ هزینه کمتری نسبت به راه حل ۲ دارند. اما، شاخص SORI در راه حل چهارم عدد ۲۱ می باشد و این جواب در واقع افزونگی مشاهده پذیری بیشتری دارد. بنابراین، این جواب به عنوان جواب بهینه انتخاب می شود.

#### ۴-۵-۲- شبکه نمونه ۳۷ باسه

شبکه نمونه ۳۷ باسه توزیع IEEE به مانند فصل قبل در نظر گرفته می شود با این تفاوت که باسهای ۵,۱۴ و ۱۶ باس تزریق صفر می باشند. در این شبکه  $tr=150m$  می باشد بنابراین بر اساس اطلاعات جغرافیای شبکه  $d=70.17$ ,  $n_1=11$ ,  $n_2=24$ ,  $N_T=264$  می باشد. مرکز کنترل در باس ۲ انتخاب شده است. خروجی شبیه سازی در جدول ۴-۴ در حالت با در نظر گرفتن باسهای تزریق صفر و بدون آن، نشان داده شده است. ملاحظه می گردد که در این حالت، تعداد ۱۱ دستگاه PMU و ۱۴ عدد EHSN برای مشاهده پذیری سیستم کافی خواهد بود. در حالی که در حالت نرمال و بدون در نظر گرفتن باسهای تزریق صفر، این تعداد ۱۲ دستگاه PMU و ۱۵ عدد EHSN می باشد. در این شبکه، همانند قسمت ۳-۷-۱، هزینه خرید و نصب هر دستگاه PMU برابر ۴۰,۰۰۰ دلار و هر عدد حس گر PPSN و EHSN به ترتیب برابر ۱۲۰ و ۳۰۰ دلار فرض شده است.

جدول ۴-۴: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۳۷ باسه

بدون در نظر گرفتن باسهای تزریق صفر				
شماره باس (برای نصب) (PMU)	شماره باس (برای نصب) (PPSN)	شماره ناحیه (برای نصب) (EHSN)	شاخص SORI	هزینه کلی (دلار)
۲،۴،۵،۸،۱۱،۱۴،۱۸،۲۲ ۲۴،۳۱،۳۲،۳۵	۲،۴،۵،۸،۱۱،۱۴،۱۸،۲۲ ۲۴،۳۱،۳۲،۳۵	۵۹،۶۶،۸۷،۸۸،۹۲،۹۴،۹۵،۱۱۴ ،۱۲۴،۱۴۶،۱۶۸ ۲۰۲،۲۲۳،۲۲۴،۲۳۶	۴۶	۴۸۵،۹۴۰
با در نظر گرفتن باسهای تزریق صفر				
شماره باس (برای نصب) (PMU)	شماره باس (برای نصب) (PPSN)	شماره ناحیه (برای نصب) (EHSN)	شاخص SORI	هزینه کلی (دلار)
۲،۴،۸،۱۱،۱۴،۱۸،۲۲،۲۴،۲۷، ۳۲،۳۵	۲،۴،۸،۱۱،۱۴،۱۸،۲۲،۲۴، ۲۷،۳۲،۳۵	۵۴،۶۳،۸۳،۸۸،۹۲،۹۴،۹۵،۱۱۸ ۱۲۶،۱۷۰،۱۹۲،۲۰۱،۲۲۶،۲۳۸	۴۵	۴۴۵،۵۲۰

ملاحظه می‌شود که با در نظر گرفتن باسهای تزریق صفر و همچنین عدم در نظر گیری قابلیت اطمینان بالا برای شبکه مخابراتی، هزینه کلی شبکه برابر ۴۴۵،۵۲۰ دلار می‌باشد. در حالی که نتایج جدول ۳-۵ نشان می‌دهد که هزینه کلی شبکه ۴۹۰،۷۴۰ دلار می‌باشد. بنابراین با کم کردن قیود شبکه و همچنین استفاده از حداکثر امکانات موجود، به اقتصادی تر شدن رؤیت پذیری شبکه کمک شده و هزینه تا جای ممکن کم می‌شود. در فصل بعد، امنیت رؤیت پذیری مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت و نتایج آن با نتایج این فصل مقایسه خواهد شد.

#### ۴-۶- نتیجه گیری

در این فصل مفهوم رؤیت پذیری پایه برای سیستم پایش فراگیر ارائه شد تا به وسیله آن بتوان با حداقل تعداد دستگاههای اندازه گیری و حسگرهای بیسیم، شبکه را مشاهده پذیر کرد. برای فرمول بندی این مساله و به منظور کاهش هزینه رؤیت پذیری، تأثیر باسهای تزریق صفر (ZIB) و همچنین دستگاههای اندازه گیر قدیمی (CM) در سیستم قدرت نیز بررسی شد. در واقع حضور ZIB و CM در بررسی سیستم، باعث کاهش دستگاههای اندازه گیر مورد نیاز می‌باشد. توجه به این نکته ضروری است که رؤیت پذیری پایه، حداقل امنیت ممکن در سیستم قدرت و مخابراتی را خواهد داشت. در واقع، هدف

رؤیت پذیر کردن سیستم WAMS با حداقل تعداد PMU و حس گر بی سیم می باشد و قیود قابلیت اطمینان و امنیت در سطح پایینی ارائه می گردد.

نتایج شبیه سازی روی شبکه نمونه ۳۷ باسه، هزینه رؤیت پذیری کمتر شبکه نسبت به حالتی که باسهای تزریق صفر در نظر گرفته نشود را نشان می دهد.



## فصل پنجم

# رؤیت پذیری مقید به امنیت سیستم پایش فراگیر با در نظر گرفتن محدودیت‌های مخابراتی

### ۵-۱- مقدمه

در فصل قبل، تفاوت رؤیت پذیری پایه و همچنین رؤیت پذیری مقید به امنیت (SBO<sup>1</sup>) تشریح شد. همچنین روابط و فرمول بندی رؤیت پذیری پایه سیستم WAMS بر اساس دستگاه‌های اندازه گیری PMU و ترکیبی از حس گرهای بی سیم PPSN و EHSN ارائه گردید.

در این فصل ابتدا مفهوم رؤیت پذیری مقید به امنیت تشریح خواهد شد. سپس فرمول بندی و تابع هدف این مدل بیان خواهد شد. برای فرمول بندی این مساله، تأثیر باسهای تزریق صفر (ZIB) و باسهای شعاعی<sup>۲</sup> بررسی خواهد شد. دلیل استفاده از باس تزریق صفر و باسهای شعاعی در سیستم WAMS، کاهش دستگاههای PMU لازم برای مشاهده پذیری سیستم می باشد.

---

<sup>1</sup> Security-based Observability

<sup>2</sup> Radial Buses

توجه به این نکته ضروری است که امنیت سیستم قدرت و قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی در رؤیت پذیری مقید به امنیت، افزایش خواهد یافت که این موضوع افزایش هزینه کلی سیستم را به دنبال دارد. بنابراین باید با توجه به نیازهای سیستم، سناریوی مناسب انتخاب گردد.

## ۵-۲- رؤیت پذیری مقید به امنیت

سیستم WAMS برای رفع نقصهای سیستم قدیمی SCADA گسترش یافته است. در واقع این سیستم، به منظور افزایش قابلیت اطمینان مشاهده پذیری سیستم و همچنین جلوگیری از حوادث احتمالی تولید و برنامه ریزی شده است. بنابراین امنیت خود این سیستم اندازه گیری برای بهره بردار سیستم مهم است.

رؤیت پذیری مقید به امنیت سیستم اندازه گیری، تنها با هدف حداقل شدن هزینه انجام نمی شود. بلکه امنیت سیستم اندازه گیری نیز برای ما اهمیت دارد. در این رساله، برای افزایش امنیت سیستم اندازه گیری دو رویکرد وجود دارد:

۱- افزایش قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی تشکیل شده از حس گرهای بی سیم EHSN و PPSN

۲- جاگذاری بهینه دستگاههای PMU به صورت ایمن در برابر بروز خطا (N-1 Contingency)

در صورت پیاده سازی دو عامل فوق، تعداد دستگاههای اندازه گیری و حس گرهای بی سیم افزایش خواهد یافت که نتیجه آن افزایش هزینه سیستم خواهد بود. ولی، سیستم اندازه گیری ایمن تر و قابل اطمینان تر خواهد بود. برای تشکیل روابط رؤیت پذیری مقید به امنیت، قیود جدیدی در سیستم تشکیل خواهد شد که در ادامه بیان می گردد. سپس تابع هدف این مساله بر اساس قیود تعریف شده ارائه می شود.

## ۵-۲-۱- افزایش قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی

همان طور که در قسمت ۳-۵ بیان شد، قابلیت اطمینان در حس گرهای WSN شامل دو قسمت می باشد: قابلیت اطمینان حس گر و قابلیت اطمینان لینک مخابراتی. در این رساله، به منظور بررسی مشاهده

پذیری مقید به امنیت سیستم WAMS، قابلیت اطمینان لینک مخابراتی در تابع هدف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

قابلیت اطمینان لینک ارتباطی عبارت است از احتمال اینکه مسیر مطمئنی بین حس‌گرهای بی‌سیم وجود داشته باشد. همانطور که در قسمت ۳-۵ بیان شد، قابلیت اطمینان برای حس‌گرهای EHSN و PPSN تابع فاصله بین فرستنده و گیرنده بوده و به صورت رابطه (۱-۵) نشان داده می‌گردد.

$$R = \frac{1}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{10 \log(d / tr)}{\sqrt{2} \log(10\psi)} \right) \right] \quad (1-5)$$

$$\psi = \frac{\sigma}{\eta} \quad \text{if } \frac{d}{tr} \leq 1$$

اگر فاصله بین دو حس‌گر از  $tr$  بیشتر شود، احتمال رسیدن اطلاعات صفر خواهد بود و قابلیت اطمینان صفر می‌باشد. در نتیجه بر اساس رابطه (۱-۵)، در حس‌گرهای EHSN و PPSN، قابلیت اطمینان لینک ارتباطی تابع فاصله دو حس‌گر بوده و از قید زمان مبراست. همان‌طور که در شکل ۳-۵ بیان شد، اگر فاصله بین دو حس‌گر از حد  $0.6$  برد فرستنده ( $tr$ ) بیشتر شود، قابلیت اطمینان به صورت نمایی افت می‌کند. پس برای قابلیت اطمینان بالاتر، باید حس‌گرها را نزدیک‌تر به هم قرار داد.

برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی در مشاهده پذیری مقید به امنیت، رابطه (۱-۵) به صورت یک قید در تابع هدف اضافه خواهد شد که این موضوع موجب افزایش تعداد حس‌گرهای روتر (EHSN) در شبکه خواهد شد.

## ۵-۲-۲- جایگذاری با امنیت در برابر بروز خطا دستگاههای PMU

در این قسمت، بر اساس اینکه امکان خروج دستگاههای اندازه‌گیری PMU در شبکه وجود دارد، آنالیز بروز خطا در ارزیابی N-1 حادثه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. توجه به این نکته ضروری است که با امنیت کردن سیستم در حالت N-1 باعث افزایش هزینه سیستم می‌گردد. زیرا تعداد دستگاههای PMU افزایش خواهد یافت که هزینه زیاد نصب این دستگاهها، یکی از قیود اساسی سیستم می‌باشد. ولی، برای داشتن تخمین حالت همیشگی از سیستم، امنیت سیستم اندازه‌گیری اجتناب‌ناپذیر است.

به منظور امنیت سیستم اندازه گیری، هر باس می‌بایست به وسیله حداقل دو دستگاه PMU یا باس تزریق صفر مشاهده پذیر شود تا خروج احتمالی یک دستگاه PMU، به مشاهده پذیری سیستم خدشه‌ای وارد نکند. البته می‌توان برای جلوگیری از افزایش زیاد هزینه سیستم، این قید را فقط برای باسهای مهم لحاظ کرد. رابطه زیر، قید امنیت خروج PMU ها در مشاهده پذیری سیستم را لحاظ خواهد کرد.

$$f_i \geq 2 + \left( \sum_{j \in ZIB} a_{ij} z_i s_{ij} - z_i \right) + \left( \sum_{j \in ZIB} a_{ij} z_i t_{ij} - z_i \right) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-5)$$

که در این رابطه،  $t_{ij}$  یک متغیر باینری کمکی مانند  $s_{ij}$  می‌باشد. علت استفاده از این متغیرهای کمکی، کمک به حل مساله بهینه سازی و افزایش انعطاف پذیری روابط ریاضی می‌باشد. همانند روابط (4-13) و (4-14)، برای متغیر  $t$  نیز باید قیودی به تابع هدف افزوده گردد.

$$\sum_{i \in SOZIB_k} a_{ij} t_{ij} = \sum_{i \in SOZIB_k} a_{ij} y_{ij} - 1 \quad k = 1, 2, \dots, n_z \quad (3-5)$$

$$t_{ij} \leq y_{ij} \quad \forall i \in Z \quad \forall j \in ZIB \quad (4-5)$$

در شبکه‌های توزیع، معمولاً باسهای شعاعی زیادی وجود دارد که می‌توانند تأثیر آنها در تابع هدف بررسی شود. در واقع برای اجتناب از افزایش زیاد تعداد دستگاههای PMU در شبکه، قید امنیت در این باسها رعایت نخواهد شد. باسهای شعاعی باسهایی هستند که فقط به یک باس متصل می‌باشند. بنابراین لازم نیست که این باسها الزاماً به وسیله دو دستگاه PMU مشاهده پذیر شوند. برای پیاده سازی این موضوع، می‌توان از قید زیر استفاده کرد:

$$r_i x_i = 0 \quad i \in I \quad (5-5)$$

در این رابطه، اگر باس  $i$  یک باس شعاعی باشد،  $r_i=1$  و در غیر این صورت  $r_i=0$  است. بنابراین اگر  $r_i=1$  باشد،  $x_i=0$  خواهد بود، یعنی دستگاههای PMU نباید در این باس نصب شود و بدین معنی می‌باشد که این باسها فقط توسط یک دستگاه PMU یا یک باس تزریق صفر مشاهده پذیر خواهد شد.



توجه به این نکته ضروری است که خروج باسهای شعاعی از شبکه تاثیری در مشاهده پذیری باقیمانده شبکه نخواهد داشت. در واقع اندازه گیری یک باس جزیره شده برای اپراتور شبکه مهم نخواهد بود و لازم نیست که این باسها به صورت خروج دستگاه PMU، ایمن گردند.

### ۵-۳- تابع هدف پیشنهادی

تابع هدف پیشنهادی برای مشاهده پذیری مقید به امنیت سیستم WAMS، عبارت است از حداقل سازی هزینه سیستم کل سیستم با توجه به قیود مخابراتی و قیود قدرت با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم مخابرات و ایمنی سیستم قدرت در صورت بروز خطا<sup>۱</sup> (حفظ قابلیت رویت پذیری سیستم با از دست رفتن یک دستگاه PMU). برای اجتناب از افزایش زیاد تعداد دستگاههای PMU، تأثیر باسهای تزریق صفر و باسهای شعاعی در این روابط لحاظ شده است. تابع هدف پیشنهادی به صورت زیر می باشد:

$$\text{Min} \left\{ \left( \sum_{i=1}^n c_i X_i \right) + P_P \times N_P + P_E \times N_E \right\} \quad (۶-۵)$$

St.

$$\geq 2 + \left( \sum_{j \in ZIB} a_{ij} z_i s_{ij} - z_i \right) + \left( \sum_{j \in ZIB} a_{ij} z_i t_{ij} - z_i \right) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (۷-۵)$$

$$\sum_{j \in ZIB} a_{ij} y_{ij} = z_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (۸-۵)$$

$$\sum_{i \in SOZIB_k} a_{ij} s_{ij} = \sum_{i \in SOZIB_k} a_{ij} y_{ij} - 1 \quad k = 1, 2, \dots, n_z \quad (۹-۵)$$

$$s_{ij} \leq y_{ij} \quad \forall i \in Z \quad \forall j \in ZIB \quad (۱۰-۵)$$

$$\sum_{i \in SOZIB_k} a_{ij} t_{ij} = \sum_{i \in SOZIB_k} a_{ij} y_{ij} - 1 \quad k = 1, 2, \dots, n_z \quad (۱۱-۵)$$

<sup>۱</sup> N-1 Security

$$t_{ij} \leq y_{ij} \quad \forall i \in Z \quad \forall j \in ZIB \quad (12-5)$$

$$r_i x_i = 0 \quad i \in I \quad (13-5)$$

$$CO_{n-1s,j} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (14-5)$$

$$Re_j \geq T \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (15-5)$$

رابطه (۵-۶) بیانگر حداقل دستگاههای لازم PMU و PPSN و همچنین EHSN برای سیستم اندازه گیری می باشد. روابط (۵-۷) تا (۵-۱۲) مربوط به جایابی بهینه دستگاههای PMU با قید امنیت (N-1) و همچنین در نظر گرفتن باسهای تزریق صفر می باشد که در بخش (۵-۲-۲) بیان شد. تأثیر باسهای شعاعی در سیستم به وسیله رابطه (۵-۱۳) بیان شده است. همان طور که در فصل سوم بیان شد، مشاهده پذیری سیستم مخابراتی که از حس گرهای بی سیم تشکیل شده است، می بایست مورد ارزیابی قرار گیرد. این قید توسط رابطه (۵-۱۴) در تابع هدف به کار گرفته شده است. همچنین قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی توسط رابطه (۵-۱۵) بیان شده است. بسته به اهمیت قابلیت اطمینان حس گرها، ضریب T در این معادله می تواند بین ۰/۶ تا ۱ تغییر کند. اگر قابلیت اطمینان برای ما بسیار مهم باشد، این ضریب برابر ۱ قرار داده می شود و هزینه سیستم به همان ترتیب افزایش پیدا می کند.

برای حل این مساله، جایابی بهینه دستگاههای PMU با قید امنیت (N-1) و همچنین در نظر گرفتن باسهای تزریق صفر و شعاعی (معادلات (۵-۷) تا (۵-۱۳)) انجام می شود. بنابراین، یک الگوریتم ژنتیک باینری (BCGA) برای بهینه سازی سیستم قدرت و مخابراتی و قید قابلیت اطمینان آن (معادلات (۵-۱۴) تا (۵-۱۵)) انجام خواهد شد.

فلوچارت روش پیشنهادی در شکل ۵-۱ نشان داده شده است که شامل سه قسمت اساسی می باشد. در قسمت اول، OPP<sup>۱</sup> مقید به امنیت اجرا خواهد شد. در مرحله بعد، جایابی بهینه حس گرهای بی سیم با توجه به نتایج شبکه قدرت به دست خواهد آمد. قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی در این قسمت لحاظ می شود. در قسمت سوم، نتایج بهینه شبکه قدرت و شبکه مخابراتی به عنوان جواب بهینه مشاهده

<sup>۱</sup> Optimal PMU Placement

پذیری مقید به امنیت به وسیله دستگاههای اندازه گیری PMU و حس گرهای PPSN و EHSN انتخاب خواهد شد.

#### ۵-۴- شبیه سازی روی شبکه‌های نمونه

در این قسمت، به منظور امتحان قابلیت‌ها و همچنین ارزیابی روش پیشنهادی، رؤیت پذیری مقید به امنیت روی دو شبکه نمونه فصل ششم پیاده سازی می‌گردد. شبکه نمونه استاندارد ۱۳ باسه IEEE و همچنین شبکه استاندارد ۳۷ باسه IEEE برای این منظور استفاده شده است. برای حل مساله از الگوریتم ژنتیک باینری استفاده شده است. نتایج شبیه سازی در هر شبکه، با رؤیت پذیری پایه فصل ششم مقایسه خواهد گردید.

#### ۵-۴-۱- شبکه نمونه استاندارد ۱۳ باسه

شبکه نمونه استاندارد ۱۳ باسه IEEE در شکل ۴-۴ فصل چهارم نشان داده شده است. در این شبکه، فرض براین است که باس ۵، یک باس تزریق صفر می‌باشد. در این شبکه، بهترین جواب برای رؤیت پذیری پایه به صورت جدول ۵-۱ به دست آمده است.

جدول ۵-۱: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۱۳ باسه برای رؤیت پذیری پایه

شبکه	شماره باس (برای نصب PMU)	شماره باس (برای نصب PPSN)	شماره ناحیه (برای نصب EHSN)	شاخص SORI	هزینه کلی (دلار)
۱۳ باسه	۳،۴،۷،۸،۹	۳،۴،۷،۸،۹	۴۰،۵۸،۷۶،۹۴،۱۱۲،۱۳۰	۲۱	۲۰۱،۹۰۰

حال برای بررسی رؤیت پذیری مقید به امنیت، باید معادلات (۵-۶) تا (۵-۱۵) برای این شبکه اجرا گردد. در شبکه ۱۳ باسه استاندارد IEEE، اگر تأثیر باسهای شعاعی در نظر گرفته نشود، تعداد ۱۲ عدد PMU برای مشاهده پذیری مقید به امنیت سیستم لازم است. ولی همانطور که بیان شد، در شبکه‌های توزیع لازم نیست که این باسها N-1 باشند و این مساله به کم شدن تعداد PMU های مورد نیاز کمک می‌کند. در این شبکه، باسهای ۱،۲،۶،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳ باس شعاعی هستند و مشاهده پذیری آنها تنها با یک دستگاه PMU یا باس تزریق صفر کافی است.

برای شبکه مخابراتی، ضریب قابلیت اطمینان در بالاترین سطح قرار می‌گیرد ( $T=1$ ). پارامترهای الگوریتم ژنتیک مانند فصل قبل انتخاب شده است. خروجی شبیه سازی انجام شده روی شبکه ۱۳ باسه برای رؤیت پذیری مقید به امنیت به صورت جدول ۵-۲ می‌باشد.

جدول ۵-۲: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۱۳ باسه برای رؤیت پذیری مقید به امنیت

هزینه کلی (دلار)	شماره ناحیه (برای نصب EHSN)	شماره باس (برای نصب PPSN)	شماره باس (برای نصب PMU)	شبکه
۲۴۴،۴۸۰	۴۲،۴۶،۵۲،۵۹،۶۵،۷۱،۷۴،۸۰،۸۶،۹۴،۱۰۱،۱۰۸ ۱۱۵،۱۲۲،۱۲۷،۱۳۳	۳،۴،۵،۷،۸،۹	۳،۴،۵،۷،۸،۹	۱۳ باسه

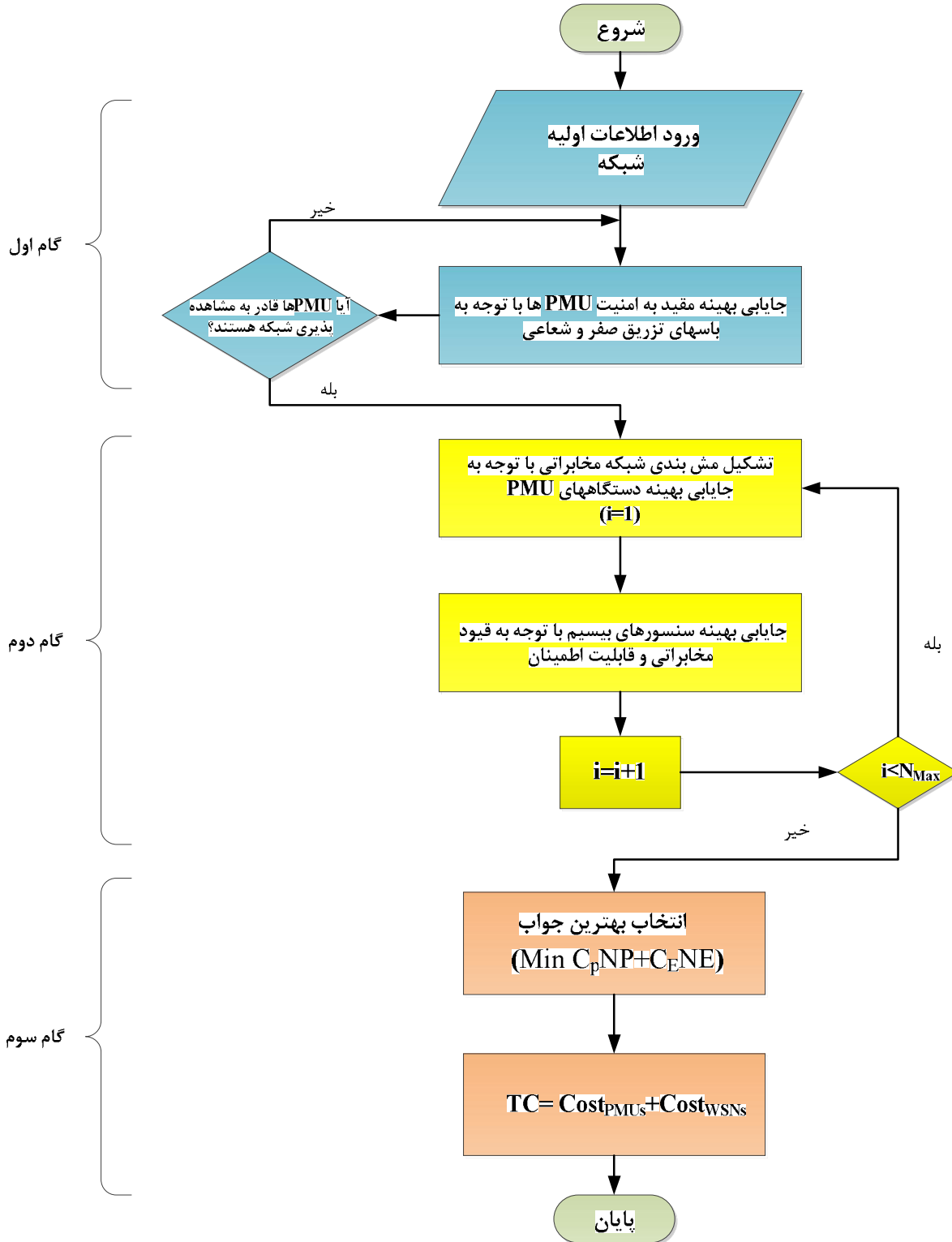
نتایج جدول ۵-۲ نشان می‌دهد که در این شبکه، رؤیت پذیری مقید به امنیت ۴۲،۵۸۰ دلار نسبت به حالت اقتصادی پر هزینه‌تر است. در واقع افزایش قیمت ۲۱ درصدی به شبکه تحمیل می‌گردد. ولی با انتخاب آن، مشاهده پذیری شبکه بسیار ایمن‌تر از حالت قبل می‌باشد. در واقع، برنامه ریز شبکه باید با توجه به نتایج شبیه سازی، بین این دو حالت تصمیم‌گیری کند.

#### ۵-۴-۲- شبکه نمونه استاندارد ۳۷ باسه

شبکه نمونه ۳۷ باسه توزیع IEEE به مانند فصل قبل در نظر گرفته می‌شود که در آن باسه‌های ۵،۱۴ و ۱۶ باس تزریق صفر می‌باشند. در این شبکه، فر شده است که مرکز کنترل در باس ۲ قرار دارد. خروجی شبیه سازی در حالت مشاهده پذیری پایه در جدول ۵-۳ در حالت با در نظر گرفتن باسه‌های تزریق صفر ارائه شده است. ملاحظه می‌گردد که در این حالت، تعداد ۱۱ دستگاه PMU، ۱۱ عدد PPSN و ۱۴ عدد EHSN برای مشاهده پذیری سیستم کافی خواهد بود.

جدول ۵-۳: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۳۷ باسه برای رؤیت پذیری پایه

هزینه کلی (دلار)	شاخص SORI	شماره ناحیه (برای نصب EHSN)	شماره باس (برای نصب PPSN)	شماره باس (برای نصب PMU)
۴۴۵،۵۲۰	۴۵	۵۴،۶۳،۸۳،۸۸،۹۲،۹۴،۹۵،۱۱۸ ۱۲۶،۱۷۰،۱۹۲ ۲۰۱،۲۲۶،۲۳۸	۲،۴،۸،۱۱،۱۴،۱۸،۲۲،۲۴، ۲۷،۳۲،۳۵	۲،۴،۸،۱۱،۱۴،۱۸،۲۲،۲۴،۲۷، ۳۲،۳۵



شکل ۵-۱: فلوچارت روش پیشنهادی

حال برای بررسی رؤیت پذیری مقید به امنیت، باید معادلات (۵-۶) تا (۵-۱۵) برای این شبکه اجرا گردد. برای شبکه مخابراتی، ضریب قابلیت اطمینان در بالاترین سطح قرار می‌گیرد ( $T=1$ ). پارامترهای الگوریتم ژنتیک مانند فصل قبل انتخاب شده است. خروجی شبیه سازی انجام شده روی شبکه ۳۷ باسه برای رؤیت پذیری مقید به امنیت با در نظر گرفتن باسهای شعاعی و تزریق صفر به صورت جدول ۴-۵ می‌باشد.

نتایج جدول ۴-۵ نشان می‌دهد که در این حالت، تعداد ۱۷ دستگاه PMU، ۱۷ عدد PPSN و ۳۸ عدد EHSN برای مشاهده پذیری سیستم نیاز است. بنابراین، رؤیت پذیری مقید به امنیت ۲۴۷،۹۲۰ دلار نسبت به جدول ۳-۵ که مشاهده پذیری پایه را نشان می‌دهد، پرهزینه‌تر است.

جدول ۴-۵: نتایج شبیه سازی برای شبکه ۳۷ باسه برای رؤیت پذیری مقید به امنیت

هزینه کلی (دلار)	شماره ناحیه (برای نصب EHSN)	شماره باس (برای نصب PPSN)	شماره باس (برای نصب PMU)
۶۹۳،۴۴۰	۱۶،۲۸،۳۴،۳۵،۵۳،۵۸،۶۵،۷۲،۷۷،۷۹،۸۲،۸۹،۹۱،۹۷،۱۰۵، ۱۱۳،۱۲۳،۱۳۴،۱۴۲،۱۵۶،۱۶۲،۱۶۹،۱۷۵،۱۸۲،۱۸۸،۱۹۳ ،۱۹۹،۲۰۲،۲۰۵،۲۰۹،۲۱۵،۲۲۱،۲۲۴،۲۲۹،۲۳۳،۲۳۹،۲۴۴ ۴،۲۴۸	۲،۴،۵،۷،۸،۱۰،۱۱ , ۱۴،۱۶،۱۷،۱۸،۲۲ ،۲۴،۲۷،۳۱،۳۲،۳	۲،۴،۵،۷،۸،۱۰،۱۱ ، ۱۴،۱۶،۱۷،۱۸،۲۲ ۲۴،۲۷،۳۱،۳۲،۳۵
		۵	

در واقع افزایش قیمت ۵۵ درصدی به شبکه تحمیل می‌گردد. ولی در ازای آن، مشاهده پذیری شبکه بسیار ایمن‌تر از حالت قبل می‌باشد. با بزرگتر شدن شبکه، هزینه رؤیت پذیری پایه افزایش می‌یابد. همچنین حجم محاسبات نیز به صورت نمایی بیشتر می‌شود. اما با توجه به اینکه این محاسبات آفلاین بوده و در هنگام برنامه ریزی شبکه انجام می‌شود، زمان انجام محاسبات برای برنامه ریز شبکه زیاد مهم نمی‌باشد.

با توجه به مسائل مطرح شده، برنامه ریز شبکه باید یکی از دو حالت مشاهده پذیری سیستم را انتخاب کند. اینکه چه میزان امنیت اندازه گیری شبکه مهم است، میزان سرمایه گذاری مشخص خواهد شد.

حتی می‌توان برنامه‌ای مابین دو حالت رؤیت پذیری پایه یا مقید به امنیت انتخاب کرد. به عنوان مثال، می‌توان فقط قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی یا فقط امنیت سیستم قدرت را انتخاب کرد.

## ۵-۵- نتیجه‌گیری

در این فصل مفهوم رؤیت پذیری مقید به امنیت تشریح شد. همچنین فرمول بندی و تابع هدف این مدل با توجه به قیود سیستم مخابراتی و سیستم قدرت بیان شد. برای فرمول بندی این مساله، تأثیر باسهای تزریق صفر و باسهای شعاعی بررسی شده اند تا از افزایش زیاد تعداد دستگاههای اندازه گیری PMU اجتناب گردد.

توجه به این نکته ضروری است که رؤیت پذیری مقید به امنیت، باعث افزایش هزینه سیستم اندازه گیری خواهد شد. اما، امنیت سیستم قدرت و قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی در این حالت افزایش خواهد یافت که این موضوع از دید بهره بردار سیستم بسیار مهم می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که قید امنیت در شبکه نمونه ۱۳ باسه، باعث افزایش ۲۱ درصدی هزینه کلی سیستم و در شبکه ۳۷ باسه، باعث افزایش ۵۵ درصدی آن می‌شود. بنابراین، انتخاب روش مناسب و همچنین اهمیت شبکه برای برنامه ریز شبکه، منجر به انتخاب و پیاده سازی سناریوی مناسب خواهد شد.





## فصل ششم

### نتیجه گیری و پیشنهادات

#### ۶-۱- نتیجه گیری

در شبکه توزیع، بهره بردار سیستم به دلیل گستردگی و پیچیدگی بسیار زیاد و همچنین کمبود دستگاههای اندازه گیری، قادر به رؤیت تمام مقادیر نیست. به همین دلیل نیازمند ایجاد شبکه مخابراتی هستیم که به صورت بهنگام، تمام مقادیر کمیت‌های باسها را به مرکز کنترل ارسال کند. همچنین این شبکه مخابرات باید دارای قابلیت اطمینان بالا باشد.

مساله اندازه گیری کمیت‌های شبکه، یکی از مهمترین مباحث در سیستم‌های توزیع هوشمند می‌باشد. این اندازه‌گیرها در شبکه قدرت، به منظور پایش شبکه برای استفاده بهینه از آن و جلوگیری از خطاهای احتمالی اجتناب ناپذیر است. در سیستم‌های قدیمی اسکادا، کمیت‌های اندازه‌گیری شده به صورت بهنگام به مرکز کنترل ارسال نمی‌شدند و در نتیجه، عمل تخمین حالت نمی‌توانست به صورت دقیق و کاربردی انجام شود. برای رفع این مشکل، از دستگاههای اندازه‌گیری فازوری که قابلیت ارتباط به‌هنگام دارند در

سیستم پایش فراگیر استفاده شده است. برای ارسال اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط دستگاههای PMU، نیاز به بستر مخابراتی بوده که وظیفه انتقال صحیح و کامل اطلاعات به مرکز کنترل را دارد.

برای ایجاد جواب بهینه در سیستم پایش فراگیر، نمی‌توان سیستم مخابراتی را از سیستم قدرت به‌صورت جداگانه در نظر گرفت. در اکثر تحقیقهای پیشین، تنها به بررسی سیستم اندازه‌گیری و بهینه کردن آن در شبکه قدرت مبادرت می‌گردد. اما، با توجه به شبیه‌سازیهای صورت گرفته در این رساله، باید شبکه‌های مخابراتی و قدرت به صورت همزمان بهینه گردد تا جواب بهینه سراسری حاصل گردد. در صورتی که دو شبکه قدرت و مخابراتی به صورت غیر همزمان بهینه گردد، راه‌حلهای مختلفی برای سیستم قدرت حاصل می‌شود که نمی‌توان تمامی آنها را در سیستم مخابراتی اعمال کرد و به جواب بهینه رسید.

در این رساله، برای زیر ساخت مخابراتی سیستم WAMS، از حس‌گرهای بی‌سیم استفاده شده است. هزینه کمتر این حس‌گرها و همچنین نصب ساده‌تر آنها نسبت به سیستم قدیمی فیبر نوری، قابلیت تحقیق بیشتر در این زمینه را پررنگ‌تر می‌کند. شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم این قابلیت را به سیستم می‌دهد که انتقال اطلاعات اندازه‌گیری شده به وسیله PMU‌ها به راحتی و به صورت ارزان، صورت پذیرد. کاهش هزینه اندازه‌گیری به منظور رؤیت پذیری شبکه قدرت و همچنین کاهش هزینه تجهیزات مخابراتی به منظور رؤیت پذیری شبکه مخابرات بسیار مهم است. بنابراین، تعداد دستگاههای اندازه‌گیری PMU و جایابی بهینه آنها، و همچنین نوع ارتباط مخابراتی این دستگاهها به منظور انتقال کامل اطلاعات اندازه‌گیری شده به مرکز کنترل باید مورد تحلیل و بهینه‌سازی قرار گیرد.

با توجه به قابلیت اطمینان نسبتاً پایین حس‌گرهای بی‌سیم، استفاده از حس‌گرهای با تکنولوژی بالاتر و قابلیت اطمینان بیشتر در سیستم قدرت الزامی به نظر می‌رسد. همچنین به دلیل اهمیت بالای اطلاعات اندازه‌گیری شده در سیستم قدرت به منظور پایش شبکه، قابل اطمینان و امنیت سیستم از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا در این رساله سعی شد رؤیت‌پذیری مقید به امنیت در شبکه‌های توزیع به وسیله دستگاههای اندازه‌گیری PMU و همچنین حس‌گرهای بی‌سیم به عنوان زیرساخت مخابراتی مورد بررسی قرار گیرد و روشی برای تحلیل آن ارائه گردد.

در این رساله، روشی برای رؤیت پذیری پایه و همچنین رؤیت پذیری مقید به امنیت در سیستم WAMS برای جایابی بهینه دستگاههای PMU و زیر ساخت مخابراتی آن پیشنهاد شد. برای این منظور، ترکیبی از حس گرهای بی سیم<sup>1</sup> EHSN و<sup>2</sup> PPSN به عنوان زیر ساخت مخابراتی سیستم پایش و کنترل فراگیر پیشنهاد شده است تا ارتباط مخابراتی دستگاههای PMU به صورتی ساده تر و ارزان تر نسبت به سیستم مخابراتی سنتی ایجاد گردید. برای افزایش امنیت مشاهده پذیری سیستم، جایابی بهینه ایمن در برابر بروز خطای دستگاههای PMU در کنار جایابی حس گرهای بی سیم با در نظر گرفتن ضریب قابلیت اطمینان آنها، ارائه و فرمول بندی شده است. تابع هدف، حداقل سازی هزینه سیستم با در نظر گرفتن قیود سیستم قدرت و سیستم مخابراتی می باشد. برای رسیدن به نتایجی بهتر و با هزینه کمتر، تأثیر باسهای تزریق صفر و باسهای شعاعی در تابع هدف به صورت قید در نظر گرفته شده است.

توجه به این نکته ضروری است که استفاده از هر وسیله جدید در سیستم، نیازمند زیر ساخت مناسب و بررسی مخاطرات خود این وسیله جدید نیز می باشد. بنابراین در این رساله سعی بر این است که قسمت اعظم مسائل مربوط به خود این سیستم جدید مورد ارزیابی قرار گیرد تا با توجه به این مساله، بتواند از قابلیت های آن استفاده مفید صورت پذیرد.

نتایج این رساله نشان دهنده کاهش هزینه شبکه مخابراتی حس گرهای بی سیم در سیستم WAMS نسبت به شبکه های مرسوم می باشد. بر اساس نتایج فصل پنجم، رؤیت پذیری مقید به امنیت نسبت به حالت اقتصادی که در فصل چهارم به دست آمد، پر هزینه تر است. ولی در ازای آن، مشاهده پذیری شبکه بسیار ایمن تر از حالت قبل می باشد. بنابراین، برنامه ریز شبکه باید یکی از دو حالت مشاهده پذیری سیستم را انتخاب کند. اینکه چه میزان امنیت اندازه گیری شبکه مهم است، میزان سرمایه گذاری مشخص خواهد شد. حتی می توان برنامه ای بین دو حالت رؤیت پذیری پایه یا مقید به امنیت انتخاب کرد. به عنوان مثال، می توان فقط قابلیت اطمینان سیستم مخابراتی یا فقط امنیت سیستم قدرت را انتخاب کرد.

<sup>1</sup> Energy-harvesting Sensor Node

<sup>2</sup> Plug-in Powered Sensor Node

## ۶-۲- پیشنهادات

با توجه به ارائه رؤیت پذیری مقید به امنیت در این رساله، نکاتی در آینده باید بررسی گردد که می تواند در پیاده سازی هرچه بهتر این رساله کمک کند. این نکات به صورت زیر می باشند:

- ✓ با توجه به اهمیت اطلاعات اندازه گیری شده در سیستم قدرت، تحقیقات بیشتر در زمینه ظرفیت تبادل اطلاعات در بستر مخابراتی حس گرهای بی سیم و کامل بودن اطلاعات ارسالی و دریافتی ضروری می باشد.
- ✓ یکی از مسائل مهم در ارتباط مخابراتی حس گرهای بی سیم، بحث پهنای باند این اجزا و حجم اطلاعات ارسالی می باشد. بنابراین، تحقیق بیشتر در مورد قابلیت استفاده از این حس گرها به عنوان زیر ساخت مخابراتی سیستم قدرت اجتناب ناپذیر می باشد.
- ✓ بحث امنیت شبکه حس گرهای بی سیم در برابر خرابی های احتمالی، از دیگر نکاتی است که می تواند مورد توجه قرار گیرد. زیرا، خرابی یک یا چند حسگر در مسیر ارسال اطلاعات، می تواند باعث عدم ارسال اطلاعات به مرکز کنترل گردد.
- ✓ با توجه به هزینه بالای سیستم اندازه گیری فراگیر، استفاده از اجزایی که هزینه اندازه گیری را برای سیستم قدرت کاهش دهد، از مسائل حیاتی و جذاب تحقیقاتی می باشد تا بتوان هزینه تخمین حالت و اندازه گیری کمیتهای سیستم را کم کرد.
- ✓ امنیت سایبری در ارسال اطلاعات بوسیله حسگرهای بیسیم، نسبت به سیستم مخابراتی فیبر نوری با چالش های بیشتری روبروست که باید مورد ارزیابی بیشتری قرار گیرد.

## مراجع:

- [1] M. A. R. S. Cruz, H. R. O. Rocha, M. H. M. Paiva, M. E. V. Segatto, E. Camby, and G. Caporossi, "An algorithm for cost optimization of PMU and communication infrastructure in WAMS," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 106, pp. 96–104, Mar. 2019.
- [2] S. S. Mousavi-Seyedi, F. Aminifar, and S. Afsharnia, "Parameter estimation of multiterminal transmission lines using joint PMU and SCADA data," *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2015.
- [3] Q. Li, T. Cui, Y. Weng, R. Negi, F. Franchetti, and M. D. Ilic, "An information-theoretic approach to PMU placement in electric power systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, 2013.
- [4] P. H. Gadde, M. Biswal, S. Brahma, and H. Cao, "Efficient Compression of PMU Data in WAMS," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 7, no. 5, pp. 2406-2413, Sep. 2016.
- [5] A. Ghasemkhani, H. Monsef, A. Rahimi-Kian, and A. Anvari-Moghaddam, "Optimal Design of a Wide Area Measurement System for Improvement of Power Network Monitoring Using a Dynamic Multiobjective Shortest Path Algorithm," *IEEE Syst. J.*, vol. 11, no. 4, pp. 2303–2314, Sep. 2015.
- [6] K. G. Khajeh, E. Bashar, A. M. Rad, and G. B. Gharehpetian, "Integrated Model Considering Effects of Zero Injection Buses and Conventional Measurements on Optimal PMU Placement," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 2, pp. 1006–1013, Mar. 2017.
- [7] J. Huang, N. E. Wu, and M. C. Ruschmann, "Data-availability-constrained placement of PMUs and communication links in a power system," *IEEE Syst. J.*, vol. 8, no. 2, pp. 483–492, 2014.
- [8] A. Ghasemkhani, A. Anvari-Moghaddam, J. M. Guerrero, and B. Bak-Jensen, "An efficient multi-objective approach for designing of communication interfaces in smart grids," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, Ljubljana, Slovenia*, 9-12 Oct. 2016.
- [9] N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Optimal PMU Placement for Numerical Observability Considering Fixed Channel Capacity-A Semidefinite Programming Approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 3328–3329, Jul. 2016.
- [10] X. Chen *et al.*, "Full coverage of optimal phasor measurement unit placement solutions in distribution systems using integer linear programming," *Energies*, Vol. 12(8), 1552, Apr. 2019.
- [11] M. Dalali and H. K. Karegar, "Optimal PMU placement for full observability of the power network with maximum redundancy using modified binary cuckoo optimisation algorithm," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 11, pp. 2817–2824, Aug. 2016.
- [12] D. Zhang, S. Lian, W. Tao, J. Liu, and C. Fang, "Operational reliability assessment of an interconnected power system based on an online updating external network equivalent model with boundary PMU," *Electronics*, Vol. 8(1), 49, Jan. 2019.
- [13] C. Zhang, Y. Jia, Z. Xu, L. L. Lai, and K. P. Wong, "Optimal PMU placement considering state estimation uncertainty and voltage controllability," *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 11, no. 18, pp. 4465 - 4475, Dec. 2017.

- [14] X. Zhu, M. H. F. Wen, V. O. K. Li, and K. C. Leung, "Optimal PMU-Communication Link Placement for Smart Grid Wide-Area Measurement Systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 4, pp. 4446–4456, Jul. 2019.
- [15] I. F. Akyildiz and E. P. Stuntebeck, "Wireless underground sensor networks: Research challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 4, no. 6, pp. 669–686, Nov. 2006.
- [16] S. Farooq, S. Hussain, S. Kiran, and T. Ustun, "Certificate Based Authentication Mechanism for PMU Communication Networks Based on IEC 61850-90-5," *Electronics*, vol. 7, no. 12, p. 370, Dec. 2018.
- [17] Z. Wu, X. Du, W. Gu, P. Ling, J. Liu, and C. Fang, "Optimal micro-PMU placement using mutual information theory in distribution networks," *Energies*, 2018.
- [18] Y. Liu *et al.*, "Wide-Area-Measurement System Development at the Distribution Level: An FNET/GridEye Example," *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2016.
- [19] P. Castello, C. Muscas, P. A. Pegoraro, and S. Sulis, "Active Phasor Data Concentrator performing adaptive management of latency," *Sustain. Energy, Grids Networks*, 2018.
- [20] H. Y. Su, F. M. Kang, and C. W. Liu, "Transmission Grid Secondary Voltage Control Method Using PMU Data," *IEEE Trans. Smart Grid*, 2018.
- [21] P. Arroyo, J. Lozano, and J. I. Suárez, "Evolution of wireless sensor network for air quality measurements," *Electronics.*, 2018.
- [22] H. Jung and I. H. Lee, "Secrecy Performance Analysis of Analog Cooperative Beamforming in Three-Dimensional Gaussian Distributed Wireless Sensor Networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, 2019.
- [23] X. Cui, X. Huang, Y. Ma, and Q. Meng, "A load balancing routing mechanism based on SDWSN in smart city," *Electronics.*, 2019.
- [24] M. Ayaz, M. Ammad-Uddin, I. Baig, and E. H. M. Aggoune, "Wireless sensor's civil applications, prototypes, and future integration possibilities: A review," *IEEE Sens. J.*, 2018.
- [25] X. Zhang, H. Jiang, L. Zhang, C. Zhang, Z. Wang, and X. Chen, "An energy-efficient asic for wireless body sensor networks in medical applications," *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, 2010.
- [26] G. Pau and V. M. Salerno, "Wireless sensor networks for smart homes: A fuzzy-based solution for an energy-effective duty cycle," *Electronics.*, 2019.
- [27] P. Park, S. C. Ergen, C. Fischione, C. Lu, and K. H. Johansson, "Wireless Network Design for Control Systems: A Survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 20, no. 2. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 978–1013, 01-Apr-2018.
- [28] M. A. H. A. R. Shirkhani, M. Assili, "State Estimation of Distribution network Based Wireless Sensor Network considering communication constraint," shahrood University of Technology, 2017.
- [29] P. Yeon, M. G. Kim, O. Brand, and M. Ghoovanloo, "Optimal design of passive resonating wireless sensors for wearable and implantable devices," *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 17, pp. 7460–7470, Sep. 2019.

- [30] H. Saghlatoon, R. Mirzavand, M. M. Honari, and P. Mousavi, "Sensor Antenna Transmitter System for Material Detection in Wireless-Sensor-Node Applications," *IEEE Sens. J.*, vol. 18, no. 21, pp. 8812–8819, Nov. 2018.
- [31] A. A. derakhshi; M. H. Abadi, "State Estimation of Distribution network Based Wireless Sensor Network in order to Identifi Losses," Hakim Sabzevari University, 2015.
- [32] V. Agarwal, R. A. Decarlo, and L. H. Tsoukalas, "Modeling Energy Consumption and Lifetime of a Wireless Sensor Node Operating on a Contention-Based MAC Protocol," *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 16, pp. 5153–5168, Aug. 2017.
- [33] A. E. Zonouz, L. Xing, V. M. Vokkarane, and Y. Sun, "Hybrid wireless sensor networks: A reliability, cost and energy-aware approach," *IET Wirel. Sens. Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 42–48, Apr. 2016.
- [34] W. Dargie, "A Quantitative Measure of Reliability for Wireless Sensor Networks," *IEEE Sensors Lett.*, vol. 3, no. 8, pp. 1–4, Jul. 2019.
- [35] M. El-Sherif, Y. Fahmy, and H. Kamal, "Lifetime maximisation of disjoint wireless sensor networks using multiobjective genetic algorithm," *IET Wirel. Sens. Syst.*, 2018.
- [36] "www.wireless-sensors.co.uk/" (accessed on 17 April 2019).
- [37] M. A. Mahmood, W. K. G. Seah, and I. Welch, "Reliability in wireless sensor networks: A survey and challenges ahead," *Computer Networks*. 2015.
- [38] N. C. Koutsoukis, N. M. Manousakis, P. S. Georgilakis, and G. N. Korres, "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, 2013.
- [39] A. Ahmadi, Y. Alinejad-Beromi, and M. Moradi, "Optimal PMU placement for power system observability using binary particle swarm optimization and considering measurement redundancy," *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 6, pp. 7263–7269, Jun. 2011.
- [40] H. H. Müller and C. A. Castro, "Genetic algorithm-based phasor measurement unit placement method considering observability and security criteria," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 1, pp. 270–280, Jan. 2016.
- [41] A. Asgari and K. G. Firouzjah, "Optimal PMU placement for power system observability considering network expansion and N - 1 contingencies," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 18, pp. 4216–4224, Oct. 2018.
- [42] D. Dua, S. Dambhare, R. K. Gajbhiye, and S. A. Soman, "Optimal multistage scheduling of PMU placement: An ILP approach," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 4, pp. 1812–1820, 2008.
- [43] F. Aminifar, C. Lucas, A. Khodaei, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal placement of phasor measurement units using immunity genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2009.
- [44] S. Kumar, B. Tyagi, V. Kumar, and S. Chohan, "Incremental PMU placement considering reliability of power system network using analytical hierarchical process," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 16, pp. 3900–3909, Sep. 2018.
- [45] M. Moradi-Sepahvand, E. Mashhour, and S. S. Mortazavi, "Optimal placement of a combination of single-phase and three-phase  $\mu$ PMUs for observability of smart

- distribution networks with asymmetrical structure,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 105, pp. 592–601, Feb. 2019.
- [46] E. Abiri, F. Rashidi, and T. Niknam, “An optimal PMU placement method for power system observability under various contingencies,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 25, no. 4, pp. 589–606, Apr. 2015.
- [47] F. Rashidi, E. Abiri, T. Niknam, and M. R. Salehi, “Optimal placement of PMUs with limited number of channels for complete topological observability of power systems under various contingencies,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2015.
- [48] M. Esmaili, K. Gharani, and H. A. Shayanfar, “Redundant observability PMU placement in the presence of flow measurements considering contingencies,” *IEEE Trans. Power Syst.*, 2013.
- [49] F. Aminifar, A. Khodaei, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Shahidehpour, “Contingency-constrained PMU placement in power networks,” *IEEE Trans. Power Syst.*, 2010.
- [50] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Shahidehpour, and A. Khodaei, “Observability enhancement by optimal PMU placement considering random power system outages,” *Energy Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 45–65, Mar. 2011.
- [51] A. Enshaee, R. A. Hooshmand, and F. H. Fesharaki, “A new method for optimal placement of phasor measurement units to maintain full network observability under various contingencies,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 89, pp. 1–10, Aug. 2012.
- [52] S. Teimourzadeh, F. Aminifa, and M. Shahidehpour, “Contingency-constrained optimal placement of micro-PMUs and smart meters in microgrids,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 2, pp. 1889–1897, Mar. 2019.
- [53] S. Nikkhah, J. Aghaei, B. Safarinejadian, and M. A. Norouzi, “Contingency constrained phasor measurement units placement with  $n - k$  redundancy criterion: A robust optimisation approach,” *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 12, no. 2, pp. 151–160, Mar. 2018.
- [54] S. Zhu, L. Wu, S. Mousavian, and J. H. Roh, “An optimal joint placement of PMUs and flow measurements for ensuring power system observability under N-2 transmission contingencies,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 95, pp. 254–265, Feb. 2018.
- [55] N. M. Manousakis and G. N. Korres, “Optimal Allocation of Phasor Measurement Units Considering Various Contingencies and Measurement Redundancy,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, pp. 1–1, Jul. 2019.
- [56] M. Shahraeini, M. S. Ghazizadeh, and M. H. Javidi, “Co-optimal placement of measurement devices and their related communication infrastructure in wide area measurement systems,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 684–691, 2012.
- [57] M. B. Mohammadi, R. A. Hooshmand, and F. H. Fesharaki, “A new approach for optimal placement of PMUs and their required communication infrastructure in order to minimize the cost of the WAMS,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 84–93, Jan. 2016.
- [58] B. Appasani and D. K. Mohanta, “Co-optimal placement of PMUs and their communication infrastructure for minimization of propagation delay in the WAMS,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 14, no. 5, pp. 2120–2132, May 2018.
- [59] A. Bashian, M. Assili, A. Anvari-Moghaddam, and O. R. Marouzi, “Co-optimal PMU and communication system placement using hybrid wireless sensors,” *Sustain. Energy, Grids*



*Networks*, vol. 19, Sep. 2019.

- [60] A. Bashian, M. Assili, A. Anvari-Moghaddam, and J. P. S. Catalão, “Optimal Design of a Wide Area Measurement System Using Hybrid Wireless Sensors and Phasor Measurement Units,” *Electronics*, vol. 8, no. 10, p. 1085, Sep. 2019.

**ABSTRACT:**

In smart networks, the problem of measuring and estimating the state of the system is vital. Power system monitoring is unavoidable for optimal operation and preventing the probable failures. Phasor measurement units (PMUs) is one of the most important parts of the wide area measurement system (WAMS). Also, optimal PMU placement (OPP) problem is one of the significant issues in the WAMS. Communication infrastructure, as an inseparable part of the wide area measurement system (WAMS), has to be optimally designed and placed to collect information from phasor measurement units (PMUs) and deliver them to control centers. Therefore, the power system observability cannot be obtained by employing only PMUs. In fact, in order to well estimate the state of the system, observability is a must.

In this thesis, a security-based observability (SBO) and economic-based observability (EBO) methods for the PMU and related communication infrastructure is proposed. A hybrid wireless sensor including plug-in powered sensor nodes (PPSNs) and energy harvesting sensor nodes (EHSNs) is proposed for connecting of PMUs throughout the system to enable a convenient and low cost communication media. The contingency-constraint optimal PMU placement and related sensor-based communication infrastructure are proposed and formulated. To increase the reliability of the CI, a reliability index for the wireless sensors is added as a constraint to the objective function. The objective function includes the total cost minimization subject to power system observability and communication constraints. The proposed method is evaluated on sample test systems to assess the applicability and effectiveness of the proposed algorithm compared to the conventional methods in this subject area. The results show the advantages of the method and reduction of WAMS total cost compare to the previous methods.

**KEYWORDS:** Wide area measurement system (WAMS), Phasor measurement unit (PMU), Wireless sensor, Security-based observability, Basic Observability.



**Faculty of Electrical and Robotic Engineering**

**PhD Dissertation**

**Security-Based Observability of Distribution Networks  
Considering communication constraints**

Supervisor

**Dr. Mohsen Assili**

Advisor

**Dr. Omid Reza Marouzi**

**Dr. Amjad Anvari-Moghadam**

By

**Amir Bashian**