

## مطالعات احتمالاتی ولتاژ در شبکه توزیع با حضور تولیدات پراکنده بادی با در نظر گرفتن مدل‌های استاتیکی بار با توزیع احتمال گاما

مقداد تورانداز کناری<sup>۱\*</sup>، محمدصادق سپاسیان<sup>۲</sup>، مهرداد ستایش نظر<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشکده برق، پردیس عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

m\_tourandaz@sbu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده برق، پردیس عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

m\_sepasian@sbu.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده برق، پردیس عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

m\_setayesh@sbu.ac.ir

چکیده: باتوجه به رشد روزافزون تولیدات پراکنده و بارهای جدید نظیر اتومبیل‌های الکتریکی در شبکه‌های توزیع و توسعه این شبکه‌ها، مسئله ارزیابی احتمالاتی این سیستم‌ها به موضوعی جدی تبدیل شده است. به همین منظور، این مقاله از یک الگوریتم پخش بار احتمالاتی (PLF) برای بررسی اثرات عدم قطعیت در شبکه‌های توزیع استفاده می‌کند. این روش بر پایه شبیه‌سازی مونت کارلو ارائه شده که مزیت اصلی آن دقت بسیار فراوان آن است. روش مورد استفاده قادر به بررسی اثر تولیدات پراکنده بر ولتاژ شبکه توزیع است. با بررسی انواع مدل تولیدات پراکنده، بهترین مدل برای استفاده در مسئله پیشنهادی مورد توجه قرار گرفته است. برای ارزیابی دقیق تر مسئله، انواع مدل‌های بار استاتیکی در مدل PLF در نظر گرفته شده است. در فرایند حل، با بررسی انواع روش‌های پخش بار پسر-پیشرو (که مناسب‌ترین روش‌های پخش بار در شبکه‌های توزیع هستند)، روش مناسب برای استفاده در مسئله PLF به کار رفته است. این روش بر پایه جمع توانی بنا شده است. توزیع احتمال گوسی و گاما برای بار و مدل وایبل برای باد نیز در مسئله PLF در نظر گرفته شده است. در نهایت، رهیافت پیشنهادی روی شبکه توزیع استاندارد IEEE اجرا شده و نتایج در چهار سناریوی مختلف، بررسی و تحلیل گردیده است. تأثیر مکان و میزان تزریق تولیدات بادی، نوع متغیرهای تصادفی بار، مدل‌های بار توان ثابت، امپدانس ثابت و جریان ثابت و تغییر واریانس توزیع‌های احتمال ورودی، در سناریوهای مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی ولتاژ، پخش بار احتمالاتی، توزیع احتمال گاما، تولیدات پراکنده بادی، شبکه‌های توزیع، شبیه‌سازی مونت کارلو، مدل بار استاتیکی.

## ۱. مقدمه

از شبیه سازی مونت کارلو<sup>۴</sup> است. این روش، با استفاده از تکنیک های نمونه گیری خاص مانند نمونه گیری تصادفی ساده<sup>۵</sup> و نمونه گیری تصادفی طبقه ای<sup>۶</sup> از متغیرهای تصادفی ورودی نمونه برداری کرده و با اجرای مسئله پخش بار، مقادیر نمونه ای را برای متغیرهای خروجی به دست می آورد. با اجرای چندین باره نمونه گیری، نمونه اعداد زیادی برای هر متغیر خروجی حاصل می شود. در چنین وضعیتی می توان با استفاده از نمونه های حاصل و روش های برازش، تابع چگالی احتمال یا تابع توزیع تجمعی<sup>۷</sup> متغیرهای خروجی را به دست آورد. مقالات زیادی از روش مونت کارلو برای حل PLF در سیستم های انتقال و توزیع استفاده کرده اند [۵].

در روش تحلیلی، مسئله پخش بار حول نقطه کار سیستم، خطی می شود. سپس با استفاده از تکنیک های ریاضی مانند همگشت<sup>۸</sup>، تابع چگالی احتمال متغیرهای حالت یا خروجی حاصل می شوند [۶]. در دسته دیگری از روش های تحلیلی، با استفاده از گشتاور یا انباشتک<sup>۹</sup> متغیرهای ورودی، گشتاور یا انباشتک متغیرهای خروجی حاصل شده و براساس آن، توابع احتمال خروجی حاصل می شوند. روش های بر پایه انباشتک براساس نوع تکنیک تخمین PDF خروجی (از روی انباشتک) از هم متمایز می شوند. از جمله این رهیافت ها می توان به روش های گرم-شارلیه<sup>۱۰</sup> [۷ و ۸]، حداکثر آنتروپی<sup>۱۱</sup> [۸] و کورنیش-فیشر<sup>۱۲</sup> [۹] اشاره کرد. اگرچه این روش ها عمدتاً زمان محاسباتی کمتری نسبت به روش های عددی دارند، دو ضعف عمده شان عبارت است از: پیچیدگی ریاضی و خطای محاسباتی آن ها نسبت به روش های عددی.

تاکنون روش های متعددی برای ارزیابی احتمالاتی ولتاژ شبکه های توزیع پیشنهاد شده است. مرجع [۱۰] از منطق فازی برای ارزیابی شبکه های توزیع استفاده کرده است. مقالاتی نیز از روش های سری زمانی بدین منظور بهره برده اند [۱۱]. در مرجع [۱۲]، یک روش پخش بار احتمالاتی ابتکاری با در نظر گرفتن رفتار تصادفی منابع انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. این روش برای شبکه های شعاعی و مش شده ضعیف به کار می رود. مرجع [۱۳] نیز یک روش تحلیلی بر پایه تئوری شواهد و انتشار مشترک<sup>۱۳</sup> را برای ارزیابی عدم قطعیت در پخش بار احتمالاتی ارائه کرده است. به علاوه، برخی مقالات برای بررسی اثر

با توسعه سیستم های قدرت و وقوع تجدید ساختار در آن ها، افزایش کارایی و بهره برداری بهینه از این سیستم ها به موضوعی مهم تبدیل شده است. آلودگی های زیست محیطی ناشی از سوخت های فسیلی و لزوم افزایش کارایی تولید انرژی، این سیستم ها را به سمت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به جای سوخت های فسیلی سوق داده است. در عمل، استفاده از منابع تجدیدپذیر، اغلب در سطح شبکه توزیع توسعه یافته است. امروزه، مهم ترین عدم قطعیت های شبکه های توزیع جدید مربوط به تولید توسط انرژی های تجدیدپذیر، مصارف بار و پیشامدهای شبکه هستند. در بستر چنین تحولات محیطی و کارکردی، آنالیز و تحلیل شبکه توزیع اهمیت بیشتری یافته و مسئله ارزیابی ولتاژ، در سیستم های توزیع نیز مورد توجه محققان قرار گرفته است، به طوری که برخی از مشکلات ولتاژ، بارگذاری خطوط و ترانس های توزیع، ناشی از افزایش بارهای خاص و تولیدات پراکنده<sup>۱</sup> و پیش بینی ناپذیر بودن رفتار آن ها در شبکه است.

به دلیل اینکه میزان تولید توان در منابع پراکنده تجدیدپذیر، ثابت نیست و با تغییرات جوی و آب و هوایی تغییر می کند، ارزیابی شبکه توزیع با حضور چنین منابعی امری پیچیده است [۱]. پخش بار احتمالاتی<sup>۲</sup> یکی از روش های ارزیابی ولتاژ در سیستم توزیع با حضور DG است. در این روش، متغیرهای توان بار و تولیدات پراکنده به طور مجزا به صورت تابع چگالی احتمال<sup>۳</sup> در نظر گرفته شده و توابع توزیع احتمال شار خطوط و ولتاژ شین ها- متأثر از تمامی متغیرهای تصادفی ورودی - حاصل می شوند. پخش بار احتمالاتی می تواند مسائل تصادفی سیستم توزیع را حل کرده و تابع چگالی احتمال ولتاژ و رفتار حالت ماندگار سیستم را در حالت بهره برداری یا یک دوره از برنامه ریزی سیستم توصیف کند. به طور کلی، این روش نتایج قانع کننده ای برای ارزیابی پروفیل ولتاژ سیستم توزیع ارائه می دهد [۲]. لازمه استفاده از این روش، در اختیار داشتن تخمین احتمالاتی بارهای شبکه در دوره های کوتاه مدت یا بلند مدت، با توجه به امکانات در دسترس است [۳].

پخش بار احتمالاتی نخستین بار توسط بورکوفسکا برای مطالعات سیستم قدرت پیشنهاد شده است [۴]. پس از آن، این روش در زمینه های مختلف در سیستم به کار گرفته شد. به طور کلی، پخش بار احتمالاتی از سه روش قابل حل است: روش عددی، روش تحلیلی و روش ترکیبی. متداول ترین روش عددی برای حل مسئله PLF، استفاده

4. Monte Carlo Simulation (MCS)
5. Simple Random Sampling
6. Stratified Random Sampling
7. Cumulative Distribution Function (CDF)
8. Convolution
9. Cumulant
10. Gram-Charlier
11. Maximum Entropy
12. Cornish-Fisher
13. Evidence Theory and Joint Propagation

1. Distributed Generation (DG)
2. Probabilistic Load Flow (PLF)
3. Probability Density Function (PDF)

مسئله پخش بار قطعی، می تواند در PLF به صورت احتمالاتی آنالیز شود. با این حال، این موضوع درباره متغیرهای بار، تولید و توپولوژی متداول ترند. با اجرای پخش بار احتمالاتی می توان خروجی های مسئله، مثل ولتاژ و توان عبوری از خطوط را به صورت احتمالاتی تعیین کرد. در چنین شرایطی، وضعیت شبکه توزیع از دید پروفیل یا پایداری ولتاژ به صورت احتمالاتی قابل ارزیابی خواهد بود. امروزه، آنالیز مناسب ولتاژ در حال تبدیل شدن به یکی از دغدغه های اصلی در مطالعات بهره برداری سیستم توزیع است [۲۱].

مبنای اولیه مسئله PLF، پخش بار است. به طور کلی معادلات پخش به صورت زیر قابل بیان هستند:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^m V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^m V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

که در آن  $P_i$  و  $Q_i$  به ترتیب توان اکتیو و راکتیو<sup>۴</sup> تزریقی در شین  $i$ ،  $V_i$  و  $\delta_i$  دامنه و زاویه ولتاژ شین  $i$ ،  $\delta_{ij}$  تفاوت بین زوایای ولتاژ شین های  $i$  و  $j$ ،  $G_{ij}$  و  $B_{ij}$  به ترتیب بخش حقیقی و موهومی عنصر مرتبط در ماتریس ادمیتانس و  $m$  تعداد کل شین ها هستند.

بنابر دلایلی نظیر نسبت مقاومت به راکتانس بالا، ساختار شعاعی شبکه، وجود منابع تولید پراکنده و عدم تعادل بار در شبکه های توزیع، پخش بار معمول در شبکه های انتقال ممکن است در شبکه توزیع کارآمد نباشند. عدم همگرایی یکی از مشکلات اصلی به کارگیری این نوع پخش بارها در شبکه توزیع است. از این رو، استفاده از روش های مختلف پخش بار که برای شبکه توزیع مناسب باشند، امری متداول است. انواع این پخش بارها در بخش بعد دسته بندی شده اند.

## ۱.۲. انواع روش های پخش بار توزیع

در این بخش، انواع روش های پخش بار قطعی در شبکه های توزیع بررسی می شوند.

### ۱.۱.۲. تکنیک های برپایه جاروب های پسر-پیشرو

این تکنیک به طور تکراری، جریان یا شار خطوط و ولتاژ شین ها را محاسبه می کند. در جاروب پسر، تخمین های جریان یا شار توان از شین انتها به ابتدا جمع زده می شوند. در جاروب پیشرو، نتایج جاروب پسر برای تخمین ولتاژ استفاده می شوند. جاروب ها ادامه می یابند تا اینکه خطای محاسبه در هر مرحله نسبت به مرحله قبل به مقدار حداقل برسد [۲۲]. روش جاروب پسر-پیشرو روشی بسیار راهگشا برای

همبستگی بین متغیرهای تصادفی بر پارامترهای شبکه از پخش بار احتمالاتی استفاده کرده اند [۱۴]. در این زمینه اثرات همبستگی بین بارها [۱۵ و ۱۶]، تولیدات بادی [۱۶ و ۱۷] و سلول های خورشیدی<sup>۱</sup> [۱۷] مورد مطالعه قرار گرفته اند. ضمن اینکه اثر عدم قطعیت های PV [۱۸ و ۱۹] و شارژ اتومبیل های الکتریکی [۱۹] بر پارامترهای شبکه توزیع نیز در مطالعات پخش بار احتمالاتی مورد مطالعه قرار گرفته اند.

روش های پخش بار به کار گرفته شده برای ارزیابی پارامترهای شبکه توزیع، عمدتاً بر پخش بار نیوتن-رافسون استوارند. عیب اساسی این روش ها مشکل همگرایی آن ها در شبکه های توزیع است [۲۰]. برای غلبه بر این مشکل، مقال حاضر از روش جاروب پسر-پیشرو<sup>۲</sup> برای حل مسئله PLF استفاده کرده است. به علاوه در بیشتر مقالات، مدل توان ثابت با توزیع نرمال برای بار فرض شده است که موجب سادگی حل مسئله می گردد، اما در این مقاله برای تحلیل کامل تر شبکه توزیع، مدل بار استاتیکی با توزیع های نرمال و گاما برای بار در نظر گرفته شده است. بنابراین نوآوری های اصلی این مقاله نسبت به کارهای گذشته عبارتند از: ۱. استفاده از روش جاروب پسر-پیشرو به جای روش نیوتن-رافسون در حل پخش بار احتمالاتی با شبیه سازی مونت کارلو؛ ۲. استفاده از مدل بار استاتیکی با توزیع گاما در ساختار مسئله PLF. مقاله پیش رو، یک تحلیل و مطالعه جامع از ارزیابی ولتاژ شبکه های توزیع در حضور تولیدات پراکنده ارائه می دهد. در این مطالعه، تأثیرات مکان، ظرفیت و تعداد DG و تأثیر مدل های مختلف بار بر ولتاژ شبکه مورد بررسی قرار گرفته اند. تحلیل پیشنهادی دارای مزایای زیر است:

۱. قابل بسط به همه روش های پخش بار توزیع است؛ ۲. قابلیت در نظر گرفتن همبستگی بین تولیدات پراکنده و بارها را دارد؛ ۳. می توان هر نوع تابع چگالی احتمالی را به عنوان ورودی به آن اعمال کرد؛ ۴. روش دقیق و بدون خطاست؛ ۵. مدل احتمالاتی انواع تولیدات پراکنده را می توان اعمال کرد؛ ۶. با توجه به نوع پخش بار مورد استفاده، همگرایی روش تضمین شده است.

## ۲. پخش بار احتمالاتی و مدل پیشنهادی مقاله

با در اختیار داشتن مدل های احتمالاتی بارها، تولیدات پراکنده و سایر عناصر شبکه توزیع، یکی از بهترین روش های تعیین پارامترهای خروجی شبکه، استفاده از پخش بار احتمالاتی است. با در نظر گرفتن مستقیم عدم قطعیت در روال حل پخش بار قطعی<sup>۳</sup> سستی، مسئله پخش بار احتمالاتی حاصل می شود. از نظر تئوری، هر مقدار بیان شده در یک

1. Photovoltaic (PV)
2. Backward/Forward Sweep Method
3. Deterministic Load Flow (DLF)

شبکه، دربرگیرنده ماتریس ادمیتانس دوبخشی پراکنده<sup>۷</sup> و تزریق جریان معادل است. این الگوریتم می تواند برای سیستم های متعادل و غیرمتعادل شعاعی، مش یا ترکیبی استفاده شود.

### ۳.۱.۲. روش نیوتن رافسون اصلاحی یا شبه نیوتن<sup>۸</sup>

در این روش، از الگوریتم گرادیان نزولی<sup>۹</sup> برای محاسبات پخش بار استفاده می شود، به طوری که با ترکیب مدل کامل شبکه و معکوس کردن ماتریس گرادیان، معادلات پخش بار سیستم تعیین می شوند [۲۷]. این امر ممکن است موجب افزایش زمان و تکرار مسئله شود. به علاوه، الگوریتم کلی مسئله، پیچیده است. نرخ همگرایی کند نیز یکی دیگر از نقاط ضعف این روش است.

### ۴.۱.۲. سایر روش ها

سایر الگوریتم های حل پخش بار توزیع عبارت است از: روش های بر پایه جبران سازی<sup>۱۰</sup> [۲۸]، روش ماتریس امپدانس حلقه<sup>۱۱</sup> [۲۹] و روش های مستقیم<sup>۱۲</sup> مانند روش بر پایه ماتریس تزریق شین به جریان شاخه و ماتریس جریان شاخه به ولتاژ شین<sup>۱۳</sup> [۳۰]. در این مقاله، روش پسر-پیشرو با استفاده از جمع توانی مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۲.۲. روش مونت کارلو بر پایه جاروب پسر-پیشرو توانی

به طور کلی، معادلات غیرخطی پخش بار به صورت زیر قابل بیان هستند:

$$\begin{aligned} X &= g(W) \\ Z &= h(X) = h(g(W)) \end{aligned} \quad (۳)$$

که در آن،  $W$  بردار ورودی (توان تزریقی گره ها)،  $Z$  بردار خروجی (شار خطوط)،  $X$  بردار حالت (دامنه و زاویه ولتاژها) و  $g$  و  $h$  به ترتیب توابع توان گره ها و شار خطوط هستند.

در این مقاله، در پخش بار مورد استفاده برای مسئله PLF، در گام پسر، توان های معادل برای هر شاخه توسط جمع توان های پایین دست شین محاسبه می شوند:

$$S_n = S_j + S_{loss_n} + \sum_{m \in M} S_m \quad (۴)$$

که  $S_n$  توان شاخه  $n$ ،  $j$  شین انتهایی شاخه  $n$ ،  $S_j$  توان مصرفی بار متصل به شین  $j$ ،  $S_{loss_n}$  تلفات کل شاخه  $n$ ،  $M$  مجموعه شاخه های

محاسبه پخش بار فیدرهای توزیع شعاعی متعادل و نامتعادل است. این روش معمولاً برای صحت سنجی دیگر الگوریتم ها استفاده می شود. انواع روش های جاروب پسر-پیشرو عبارت است از:

#### الف. روش های جمع جریانی<sup>۱</sup>

روش کرسٹینگ<sup>۲</sup> [۲۳] که به عنوان روش تکرار نردبانی اصلاح شده شناخته می شود، شامل جاروب های پیشرو و پسر در شبکه است که از قوانین جریان و ولتاژ کرشهف تبعیت می کنند. در جاروب پسر که از شین انتها به ابتدا آغاز می شود، با استفاده از ولتاژهای به روز شده، جمع جریانی انجام می شود. در جاروب پیشرو نیز، محاسبه افت ولتاژ با استفاده از جریان انجام می شود.

#### ب. روش های جمع توانی<sup>۳</sup>

در این روش، در جاروب پسر با کمک محاسبه تلفات خطوط، شار اکتیو و راکتیو هر شاخه توسط جمع جبری توان های بار و تلفات شاخه ها محاسبه می شوند. در تکرار پیشرو، ولتاژ شین ها به روزرسانی می شوند. این روش به صورت های متفاوتی در مراجع مختلف پیشنهاد شده است [۲۴]. روش جمع توانی قادر است مدل های مختلف واحدهای تولید پراکنده را در نظر بگیرد.

#### ج. روش های جمع ادمیتانسی<sup>۴</sup>

دراگسلاو و همکاران روش جمع ادمیتانسی را برای آنالیز پسر-پیشرو معرفی کرده اند [۲۵]. این روش برای شبکه های شعاعی و مش ضعیف<sup>۵</sup> مناسب است. درحالتی که همه بارها از نوع ادمیتانس ثابت باشند، این روش، سریع تر از سایر روش هاست و نیازی به تکرار ندارد. مزیت این روش با افزایش بارهای شبکه افزایش می یابد. در قسمت پسر، با شروع از گره ها و شاخه های انتهایی به سمت شاخه های ابتدا، ادمیتانس های خطوط و بارها جمع زده می شوند. در بخش پیشرو، ادمیتانس ها برای ارزیابی ولتاژ شین ها مورد استفاده قرار می گیرند. براساس این ولتاژها، مقادیر تزریق توان و جریان به روزرسانی شده و روند قبل تا رسیدن به یک وضعیت مشخص ادامه می یابد.

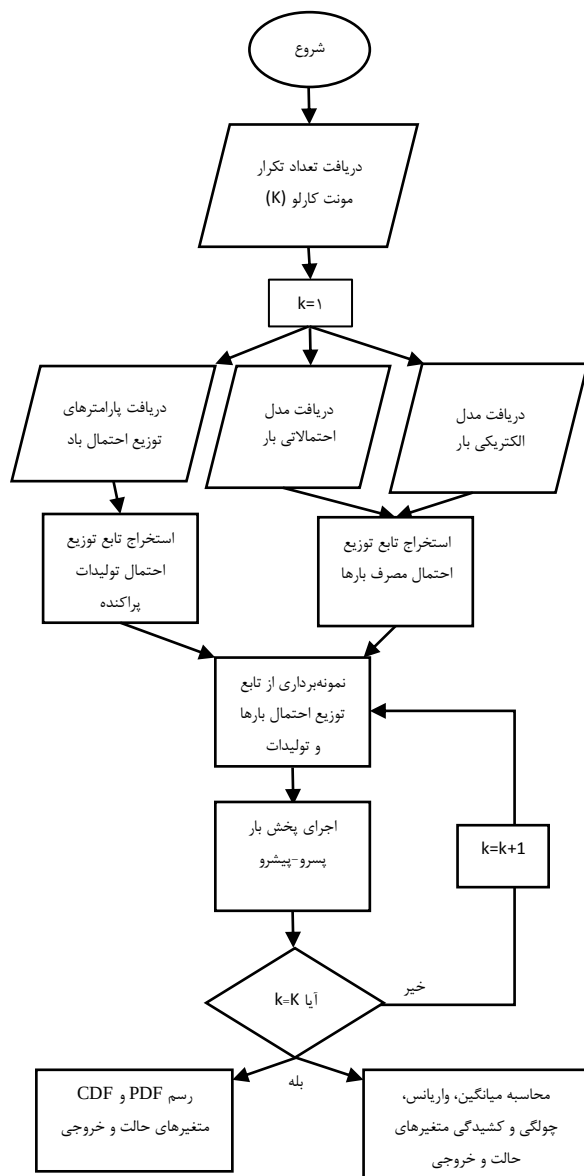
### ۲.۱.۲. روش ماتریس امپدانس تلویحی<sup>۶</sup>

این رهیافت که به روش گوس بر پایه ماتریس امپدانس شین نیز موسوم است، روش گوس را از طریق معادله ماتریس امپدانس شین برای حل تکراری جریان شاخه ها استفاده می کند [۲۶]. روش گوس به طور سنتی برای حل پخش بار شبکه های مش استفاده می شود. حل کامل معادلات

7. Sparse Bifactor Y Bus Matrix  
8. Modified Newton or Newton Like Methods  
9. Gradient Descent Scheme  
10. Compensation-Based Technique  
11. Loop Impedance Matrix Method  
12. Direct Methods  
13. BIBC/BCBV Matrix Method

1. Current Summation Method  
2. Kersting  
3. Power Summation Method  
4. Admittance Summation Methods  
5. Weakly Meshed  
6. Implicit Z-Bus Method

توزیع احتمالاتی که می‌تواند اطلاعات بار، شرایط محیطی و عدم قطعیت‌ها را مدل کند، در اختیار خواهد بود. این تابع می‌تواند عوامل تأثیرگذار و عدم قطعیت‌های بار را به‌عنوان متغیرهای تصادفی مدل‌سازی کند. بنابراین مدل رفتاری بار براساس اطلاعات آماری، یک مدل بار احتمالاتی خواهد بود. تحقیقات نشان می‌دهند که بارهای با ساختار تصادفی بر عواملی چون ولتاژ فیدرها، بارگذاری و عمر ترانس‌های توزیع، بارگذاری خطوط و کابل‌ها، تلفات انرژی و توان، عدم تعادل، اعوجاج هارمونیکی و کیفیت توان تأثیرگذارند [۳۱]. بنابراین استفاده از مدل احتمالاتی برای رفتار بارهای شبکه توزیع - طوری که بتواند رهیافتی برای تحلیل شبکه ارائه دهد - امری ضروری است.



شکل (۱): طرح‌واره مربوط به روش پخش بار احتمالاتی

متصل به شین  $j$  و  $S_m$  توان شاخه  $m$  است. در جاروب پیشرو، از شین اسلک به سمت شین انتهایی، جریان شاخه  $n$ ،  $J_n$  محاسبه می‌شود:

$$J_n = \left( \frac{S_n}{V_i} \right)^* \quad (5)$$

که  $V_i$  ولتاژ شین ارسال شاخه  $n$  است. در این مرحله، ولتاژ هر شین به‌روزرسانی می‌شود:

$$V_j = V_i - Z_n \times J_n \quad (6)$$

که  $Z_n$  امپدانس سری شاخه  $n$  است. تلفات توان در هر شاخه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{loss_n} = (V_i - V_j) \times J_n^* \quad (7)$$

اختلاف دامنه ولتاژ در هر تکرار نسبت به تکرار قبل، می‌تواند به‌عنوان معیار همگرایی الگوریتم مورداستفاده قرار گیرد:

$$\Delta V_r^k = |V_r^k| - |V_r^{k-1}|, \quad r=1,2,\dots,R \quad (8)$$

که در آن  $R$ ، تعداد کل شین‌های شبکه و  $\Delta V_r^k$  خطای حاصل در تکرار  $k$ ام برای شین  $r$ ام است.

برای در نظر گرفتن DG بادی در مدل پخش بار، می‌توان برای شین مربوطه، مدل توان ثابت را در نظر گرفت. در این مدل، توربین بادی مانند یک بار منفی رفتار می‌کند. به همین صورت، مدل شین ژنراتوری نیز می‌تواند برای تولید پراکنده مورداستفاده قرار گیرد. بحث کامل‌تر در این زمینه در بخش ۴ آمده است.

در این مقاله، از روش مونت کارلو برای محاسبات پخش بار احتمالاتی استفاده شده است. در این روش، با تکرار پخش بار، نمونه‌های خروجی مسئله پخش بار به‌دست آمده و سپس PDF و CDF ولتاژ شین‌ها از روی نمونه‌های حاصل محاسبه می‌شوند. به بیان دقیق‌تر، در روش مونت کارلو با توجه به نوع توزیع احتمال شین‌ها (که ناشی از عدم قطعیت بار و تولیدات پراکنده است)،  $N$  مقدار نمونه برای بردار توان تزریقی تولید می‌شود. سپس،  $N$  مقدار برای بردار حالت محاسبه می‌شود. در نهایت،  $N$  مقدار برای بردار خروجی حاصل شده و PDF و CDF متغیرهای حالت و خروجی از طریق منحنی هیستوگرام<sup>۱</sup> و روش‌های برازش منحنی محاسبه می‌شوند. شکل (۱) طرح‌واره روش به‌کار گرفته شده در این مقاله را نشان می‌دهد.

### ۳. مدل بار

برای ارزیابی شبکه توزیع، یکی از فاکتورهای موردنیاز، استفاده از مدل‌های بار مناسب است. به‌صورت کلی مدل‌سازی بار به دو صورت احتمالاتی و قطعی انجام‌شدنی است. در رویکرد احتمالاتی، یک تابع

### ۱.۳. مدل الکتریکی بار برای مسئله PLF

در یک فیدر شعاعی توزیع، اگر ولتاژ سمت ارسال و پارامترهای امپدانس خط ثابت باشند، آنگاه تغییرات ولتاژ سمت دریافت تنها به مدل بار سیستم وابسته خواهد بود. بارها در هر لحظه از زمان به صورت توان‌های اکتیو و راکتیو متصل به شبکه توزیع و به شکل تابعی از تغییرات ولتاژ شین مدل می‌شوند [۲۱]. برای تحلیل مناسب ولتاژ شبکه‌های توزیع شعاعی، می‌توان از مدل بار استاتیکی استفاده کرد. در این مدل، همه بارها و خازن‌های موازی توسط مؤلفه‌های توان اکتیو و راکتیو بیان می‌شوند. تأثیر تغییرات ولتاژ بر بار، به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$P_i = P_i^o |V_i|^k \quad (9)$$

$$Q_i = Q_i^o |V_i|^k$$

که در آن  $P_i^o$  و  $Q_i^o$  توان نامی بار شین نام هستند. مقدار  $k$  براساس مشخصه‌های بار تغییر می‌کند.  $k=0$  بار توان ثابت،  $k=1$  بار جریان ثابت و  $k=2$  بار امپدانس ثابت را نشان می‌دهند.

از آنجایی که حل پخش بار به نوع بارهای اکتیو و راکتیو بستگی دارد، در این مقاله، می‌توان در ساختار PLF، انواع مدل‌های بار را در نظر گرفت. نکته مهم این است که برای بارهای جریان ثابت و امپدانس ثابت، توان‌های اکتیو و راکتیو باید در هر تکرار و باتوجه به تغییرات ولتاژ مجدداً محاسبه شوند. برای استفاده از مدل بار ترکیبی نیز می‌توان سه مدل موردنظر را توسط رابطه زیر ترکیب کرد:

$$P_i = P_i^o (d_1 + d_2 |V_i| + d_3 |V_i|^2) \quad (10)$$

$$Q_i = Q_i^o (e_1 + e_2 |V_i| + e_3 |V_i|^2)$$

ثوابت  $(d_1, e_1)$ ،  $(d_2, e_2)$  و  $(d_3, e_3)$  به ترتیب مربوط به بارهای توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت هستند. برای مثال، برای یک بار امپدانس ثابت، ضرایب  $(d_3, e_3)$  غیرصفر و سایر ضرایب صفر هستند. در صورتی که حداقل دو دسته از ضرایب غیر صفر باشند، مدل بار به صورت ترکیبی حاصل می‌شود.

### ۲.۳. مدل احتمالاتی بار برای مسئله PLF

مدل احتمالاتی بار و تولیدات پراکنده بادی در این مقاله مورد توجه قرار گرفته‌اند. مصرف بارها در شبکه توزیع به طور معمول توسط توزیع گوسی<sup>۱</sup> (یا نرمال) مدل می‌شود. با این حال، توزیع گوسی چندمتغیره و روند میانگین سیار خودکاهشی استاندارد<sup>۲</sup> نیز برای این بارها پیشنهاد شده‌اند [۳۲]. در این مقاله، برای بهبود ساختار

مدل‌سازی احتمالاتی بارهای شبکه توزیع در مطالعات ولتاژ، علاوه بر توزیع گوسی، توزیع گاما<sup>۳</sup> نیز مورد توجه قرار گرفته است. این توزیع، یک تابع احتمال پیوسته دو پارامتری مهم است. تابع گاما به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۳]:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (11)$$

که در آن،  $\alpha$  پارامتر شکل<sup>۴</sup> و مثبت و  $x$  متغیر تصادفی است. PDF توزیع گاما برای هر بار براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۳]:

$$f(x; \lambda, \alpha) = \frac{\lambda}{\Gamma(\alpha)} (\lambda x)^{\alpha-1} e^{-\lambda x}, \quad x \geq 0 \quad (12)$$

که در آن  $\lambda > 0$ ، پارامتر مقیاس<sup>۵</sup> و  $f(x)$  تابع چگالی احتمال متغیر  $x$  است. برای به دست آوردن پارامترهای شکل و مقیاس برای هر شین می‌توان با استفاده از روش‌های آماری یا پیش‌بینی بار، مقادیر میانگین<sup>۶</sup>  $(E(x))$  و واریانس  $(\sigma^2)$  هر شین بار را تعیین کرده و سپس با کمک روابط زیر، مقادیر مربوط به دو پارامتر توزیع گاما را محاسبه کرد:

$$\begin{cases} \lambda = \frac{E(x)}{\sigma^2}, \\ \alpha = \frac{[E(x)]^2}{\sigma^2} \end{cases} \quad (13)$$

تابع توزیع تجمعی یک متغیر تصادفی گاما نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F(x; \lambda, \alpha) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^{\lambda x} x^{\alpha-1} e^{-x} dx, & x > 0 \end{cases} \quad (14)$$

توزیع گاما چند خاصیت مهم و کاربردی دارد که عبارت‌اند از:  
الف. تابع توزیع احتمال آن فقط برای مقادیر مثبت متغیر تصادفی غیرصفر است.

ب. مقدار حداکثر تابع توزیع احتمال با مقدار میانگین آن متفاوت است (بالعکس توزیع نرمال).

ج. به ازای  $\alpha=1$  توزیع نمایی<sup>۷</sup> به دست می‌آید. اگر  $\alpha$  به سمت بی‌نهایت میل کند، توزیع گاما به توزیع نرمال متقارن تبدیل می‌شود، در حالی که به ازای  $0 < \alpha < 1$  توزیع به شدت نامتقارن و به شکل  $J$  خواهد بود. همچنین به ازای مقادیر عدد صحیح مثبت برای  $\alpha$ ، توزیع ارلانگ<sup>۸</sup> به دست می‌آید.

3. Gamma Distributions

4. Shape Parameter

5. Scale Parameter

6. Mean

7. Exponential Distribution

8. Erlang

1. Gaussian Distribution

2. Standard Autoregressive Moving-Average (ARMA) Process

## ۴. مدل تولیدات پراکنده بادی

همان‌طور که ذکر شد، در این مقاله، دو نوع عدم قطعیت در نظر گرفته شده است: عدم قطعیت در تقاضای بار و عدم قطعیت مرتبط با توان خروجی توربین بادی.

تغییرات تصادفی سرعت باد بر توان خروجی تولیدی ژنراتورهای بادی تأثیر می‌گذارد. بنابراین، برای تعیین تابع چگالی احتمال تولیدات پراکنده بادی، باید باد را یک متغیر تصادفی در نظر گرفت.

## ۱.۴. مدل الکتریکی تولیدات پراکنده بادی

از نظر الکتریکی، برای مطالعات پخش بار، باتوجه به نوع DG، نحوه بهره‌برداری از آن و نحوه اتصال آن به شبکه (مستقیم یا غیرمستقیم)، تولیدات پراکنده را می‌توان به صورت‌های مختلف مدل‌سازی کرد:

الف. توان اکتیو-راکتیو ثابت (ضریب توان ثابت): مناسب برای DGهای بر پایه مبدل‌های الکترونیک قدرت یا DGهای با ژنراتور القایی قفس‌سنجایی<sup>۱</sup> یا ژنراتور سنکرون با کنترل‌کننده ضریب توان و تحریک ولتاژ یا با کنترل‌کننده‌های توان اکتیو-راکتیو.

ب. توان راکتیو متغیر: برای DGهای با ژنراتور القایی.

ج. ولتاژ ثابت: برای DGهای بزرگ کنترل‌شدنی.

در این مقاله از مدل آخر برای توربین بادی استفاده شده است.

استفاده از این مدل در مقالات معمول است [۳۴].

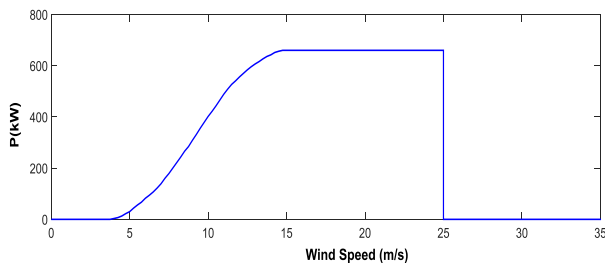
## ۲.۴. مدل احتمالاتی تولیدات پراکنده بادی

بهترین روش برای مدل‌سازی تغییرات سرعت باد، استفاده از توزیع وایبل<sup>۲</sup> است [۳۵]. مدل ریاضی این PDF به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f(v) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{v}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{v}{\alpha}\right)^{\beta}}, \quad (\beta > 0, \alpha > 0, v > 0), \quad (15)$$

که در آن،  $v$  سرعت باد،  $\beta$  پارامتر شکل و  $\alpha$  پارامتر مقیاس تابع توزیع وایبل هستند. مقادیر مربوط به توزیع وایبل را می‌توان باتوجه به اطلاعات گذشته درخصوص باد در منطقه موردنظر به دست آورد. توان خروجی توربین بادی نیز یک متغیر تصادفی، وابسته به سرعت باد است. بنابراین، با داشتن توزیع احتمال باد و با استفاده از منحنی توان تولیدی توربین بادی (منحنی توان نمونه یک توربین ۶۶۰ کیلوواتی در شکل ۲ نشان داده شده است. اطلاعات این توربین بادی از نرم‌افزار SAM 2015<sup>۳</sup> [۳۶] برداشت شده است) یا از رابطه ریاضی مربوط به آن، می‌توان توان توربین را محاسبه کرد.

$$P(v) = \begin{cases} \frac{P_r}{V_r - V_{ci}} \times (v - V_{ci}), & V_{ci} \leq v \leq V_r \\ P_r, & V_r \leq v \leq V_{co} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (16)$$



شکل (۲): منحنی توان خروجی بر حسب سرعت باد برای یک توربین ۶۶۰ کیلوواتی مدل Vestas V47 660

مطابق شکل (۲) و رابطه (۱۶)، تولید توان توسط توربین بادی به ازای یک حداقل سرعت  $V_{ci}$  آغاز می‌شود. در بخش اول، توان خروجی با سرعت رابطه خطی دارد. با افزایش سرعت به میزان سرعت نامی  $V_r$ ، توان خروجی به مقدار ثابت نامی  $P_r$  می‌رسد. با افزایش مجدد سرعت، توان همچنان ثابت باقی می‌ماند تا اینکه با رسیدن سرعت به مقدار بیش از حداکثر سرعت  $V_{co}$ <sup>۵</sup>، بنابر دلایل مربوط به ایمنی، توان خروجی ژنراتور صفر می‌شود.

## ۵. مطالعه موردی

به منظور ارزیابی کارایی روش، مطالعات عددی روی سیستم توزیع شعاعی ۳۳ شینه IEEE انجام شده است. دیاگرام تک خطی این سیستم در شکل (۳) نمایش داده شده است. ولتاژ شین مرجع ۱۲/۶۶ کیلوولت معادل ۱ پریونیت<sup>۶</sup> است. سایر اطلاعات مربوط به سیستم در مرجع [۳۷] آمده است.

مرجع [۳۸] مکان‌های کاندیدا برای نصب DG در این شبکه را بررسی کرده است. برای بهبود حد امنیت ولتاژ سیستم، شین ۳۳ به عنوان بهترین شین معرفی شده است. درضمن، این مرجع با استفاده از پخش بار تداومی نشان داده که دومین مکان مناسب برای نصب DG، شین ۱۸ است؛ زیرا حساس‌ترین شین به فروپاشی ولتاژ بعد از شین ۳۳ است. بنابراین در این مقاله، این دو شین برای نصب DG انتخاب شده‌اند.

4. Cut-In Wind Speed  
5. Cut-Off Wind Speed  
6. Per-Unit

1. Squirrel-Cage  
2. Weibull PDF  
3. System Advisor Model



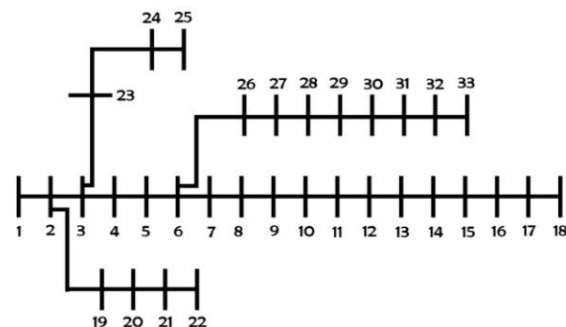
شکل می‌توان دید، بدون حضور DG، مقدار موردانتظار ولتاژ در شین‌های ۲۶ تا ۳۳ و ۶ تا ۱۸ کمتر از حد مجاز (۰/۹۵ پرینیت) است. باین‌حال، با نصب DG در شین ۳۳، تنها ولتاژ شین‌های ۱۲ تا ۱۸ در محدوده غیرمجاز باقی می‌ماند. با قرار دادن توربین بادی در شین ۱۸ نیز میانگین ولتاژ همه شین‌ها به‌جز شین‌های ۲۹ تا ۳۳ در محدوده مجاز خواهد بود. از شکل (۴) می‌توان دریافت که با نصب همزمان دو تولید بادی در شین‌های ۱۸ و ۳۳، احتمال میانگین مسئله بیان می‌دارد که همه ولتاژها در محدوده مجاز ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پرینیت خواهند بود.

شکل (۵) منحنی CDF ولتاژ شین ۱۸ را برای حالت‌های مختلف نمایش می‌دهد. مطابق این شکل، با نصب توربین بادی در شین ۱۸، ولتاژ این شین تغییرات زیادی را نسبت به حالت عدم وجود DG خواهد داشت. باوجوداین، با نصب توربین در شین ۳۳ نیز مقادیر میانگین، واریانس، چولگی<sup>۲</sup> (معیار تقارن توزیع احتمال) و کشیدگی<sup>۳</sup> (معیار کشیدگی و میزان پیک توزیع) شین ۱۸ و در نتیجه منحنی CDF آن تغییرات محسوسی خواهد داشت. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش تعداد توربین‌ها، فاصله اطمینان<sup>۴</sup> (فاصله اطمینان بازه‌ای را تخمین می‌زند که تابع احتمال در میان دو عدد مشخص قرار می‌گیرد؛ به عبارت دیگر، فاصله‌ای را ارائه می‌کند که با احتمال مشخص، تابع توزیع در آن فاصله قرار می‌گیرد) مربوط به متغیر تصادفی ولتاژ افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، عدم قطعیت ولتاژ افزایش می‌یابد.

مطابق شکل (۴) می‌توان دریافت که دامنه ولتاژ شین‌های ۱۹ تا ۲۲ با نصب DG در شین‌های مختلف تغییر چندانی نمی‌کند. دلیل این امر، حساسیت پایین این شین‌ها نسبت به تزریق توان در شین‌های ۱۸ و ۳۳ است. برای بررسی بهتر این موضوع، CDF ولتاژ شین ۲۰ برای چهار حالت مختلف سناریو ۱ در شکل (۶) رسم شده است. به روشنی می‌توان دریافت که وجود DG در دو گره مختلف، تأثیری بر ساختار کلی منحنی تابع تجمعی این شین ندارد. باین‌حال، با اضافه شدن توربین بادی، تغییرات اندکی در مقادیر آماری متغیر ولتاژ ایجاد می‌شود که می‌توان این مسئله را از روی دُم‌ها<sup>۵</sup> و میزان انحنای تابع توزیع تجمعی شکل (۶) دریافت.

## ۲.۵. سناریو ۲: تأثیر مدل احتمالاتی بار گاما

در این حالت، برای ارزیابی شبکه در حالتی که بارها توزیع غیرگوسی دارند، توزیع گاما برای بارها در نظر گرفته شده و ضریب توان توربین



شکل (۳): سیستم تست استاندارد ۳۳ شینه IEEE

اطلاعات مربوط به توربین بادی از اطلاعات واقعی از شرکت برق کشور فرانسه<sup>۱</sup> استخراج شده است [۳۹]. برای این توربین، مقادیر پارامترهای مربوط به صورت زیرند:

$$\alpha = 8.49 \quad \beta = 1.49, \quad P_r = 2 \text{ MW}, \quad V_{ci} = 5 \text{ m/s}, \\ V_r = 12.5 \text{ m/s}, \quad V_{co} = 25 \text{ m/s}$$

برای به دست آوردن PDF توان بادی، براساس روال پیشنهادی بخش ۴، نمونه‌گیری تصادفی از توزیع وایبل سرعت باد صورت گرفته است. سپس با استفاده از منحنی توان خروجی توربین (شکل ۲) یک منحنی هیستوگرام برای توان خروجی ژنراتور فراهم شده است. سپس منحنی حاصل توسط یک منحنی PDF پیوسته تقریب زده شده است. براین‌اساس، برای توان خروجی ژنراتور، یک توزیع نرمال با مقادیر میانگین ۰/۱۲۲۵ پرینیت و انحراف از معیار ۰/۰۰۲۵ پرینیت (در مبنای ۱۰۰ مگاوات) تخمین زده شده است. ضریب توان DG برای همه سناریوها به‌جز سناریوی ۲، ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

برای بررسی کارآمدی روش در حالت‌های مختلف، چهار سناریو تعریف شده و مسئله PLF با کمک روش بیان‌شده بر مبنای شبیه‌سازی مونت کارلو با ۲۰۰۰۰ نمونه حل شده است.

## ۱.۵. سناریو ۱: تأثیر حضور، عدم حضور، تعداد و مکان DG

در این سناریو، همه بارها به صورت توزیع نرمال در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر موردانتظار و انحراف از معیار بارها براساس مقادیر واقعی بار در ساعت ۱۲ ظهر یک روز تابستانی حاصل شده‌اند [۳۷]. سطح نفوذ تولیدات پراکنده به‌ازای ورود هر DG، ۳۳ درصد در نظر گرفته شده است.

شکل (۴) مقادیر میانگین ولتاژ برای این شبکه را برای چهار حالت مقایسه می‌کند: بدون حضور DG، با نصب DG در شین ۳۳، نصب در شین ۱۸ و نصب در دو شین ۱۸ و ۳۳. همان‌طور که در این

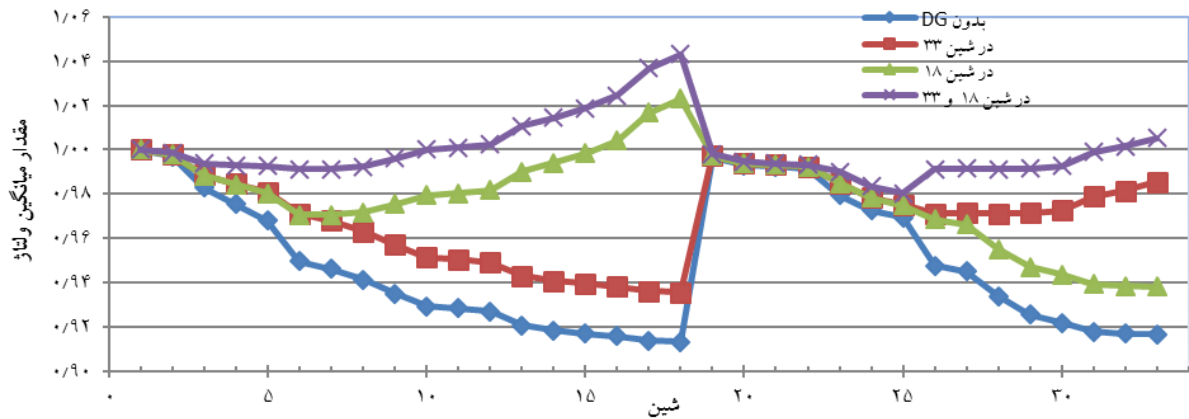
2. Skewness  
3. Kurtosis  
4. Confidence Interval  
5. Tails

1. Electricity of France (EDF)

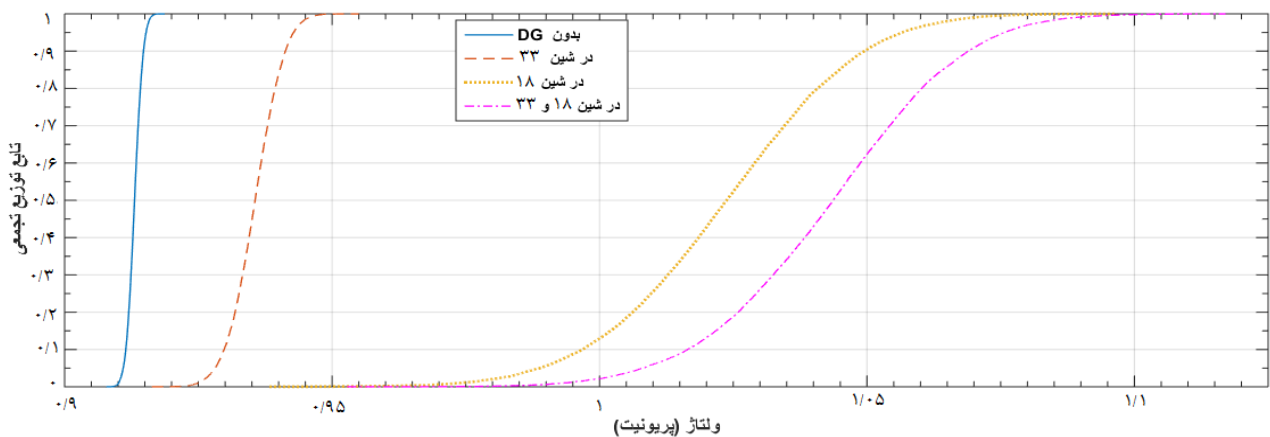


مقادیر میانگین، واریانس، چولگی و کشیدگی برای شین‌های منتخب ۶، ۱۶ و ۳۳ در جدول (۱) نشان داده شده است. طبق این جدول، مقدار میانگین ولتاژ برای هر سه شین با اضافه شدن توربین بادی، افزایش می‌یابد. ضمن اینکه مقدار واریانس ولتاژ شین‌ها نیز به‌طور محسوس افزایش می‌یابد.

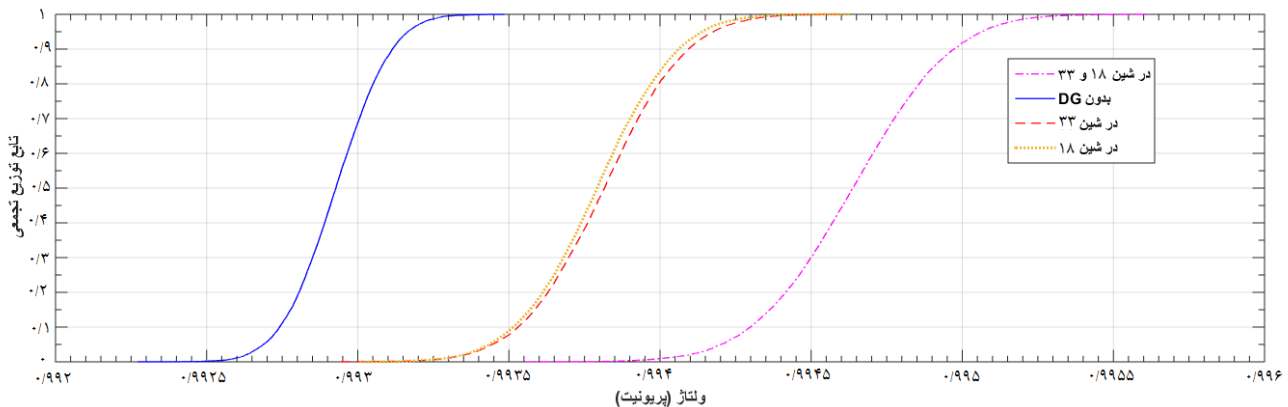
یک فرض شده است. فرض شده است که مقادیر میانگین برای هر توزیع، معادل بارگذاری نامی و پارامتر شکل برابر ۱۰ باشد. شکل‌های (۷) و (۸) منحنی‌های توزیع تجمعی ولتاژ شین ۳۰ را در حالت عدم حضور و حضور DG نشان می‌دهند. با مقایسه این دو شکل می‌توان تأثیر نصب توربین بادی بر ولتاژ این شین را مشاهده کرد. میانگین و فاصله اطمینان ولتاژ شین در حالت نصب تولید بادی افزایش یافته است.



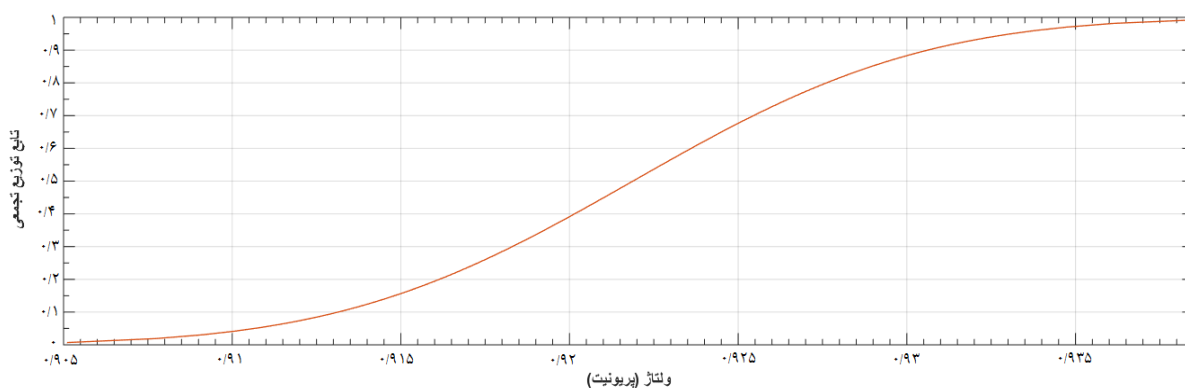
شکل (۴): مقدار مورد انتظار برای دامنه ولتاژ شین‌ها در حالت‌های مختلف نصب DG



شکل (۵): CDF ولتاژ شین ۱۸ در حالت‌های مختلف حضور و عدم حضور DG



شکل (۶): CDF ولتاژ شین ۲۰ در حالت‌های مختلف حضور و عدم حضور DG



شکل (۷): منحنی CDF ولتاژ شین ۳۰ بدون DG

برای بررسی اثرات مدل‌های بار، مقدار دامنه و انحراف معیار ولتاژ سیستم برای سه مدل بار مقایسه شده است. در شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، مقادیر میانگین و انحراف از معیار ولتاژ برای شین‌های سیستم برای حالت‌های حضور و عدم حضور DG نمایش داده شده است. تفاوت مقادیر به خصوص در شین‌های دارای افت ولتاژ زیاد (شین‌های ۱۳ تا ۱۸) مشهودتر است. بیشترین انحراف از معیار در شین‌های نزدیک به شین ۳۳ مشاهده می‌شود. از سوی دیگر، انحراف از معیار ولتاژ شین‌ها در شرایط بار توان ثابت بیشترین مقدار و برای بار امپدانس ثابت کمترین مقدار است. CDF ولتاژ شین ۱۷ برای انواع بارهای استاتیکی در شکل (۱۳) آمده است. بار امپدانس ثابت بیشترین مقدار میانگین ولتاژ و بار توان ثابت کمترین مقدار را دارد. می‌توان دریافت که ولتاژ این شین در حالت امپدانس ثابت دارای بهترین وضعیت است. ضمن اینکه بار جریان ثابت نیز وضعیت بهتری نسبت به بار توان ثابت دارد.

به‌طور کلی، هم از نظر مقدار موردانتظار ولتاژ و هم از لحاظ میزان عدم قطعیت، بهترین وضعیت را بار امپدانس ثابت و بدترین وضعیت را بار توان ثابت داراست.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، ارزیابی و تحلیل کامل ولتاژ شبکه‌های توزیع شعاعی در حضور تولیدات پراکنده بادی ارائه شد. برای این منظور، از پخش بار پسر-پیشرو برای حل مسئله PLF به روش MCS استفاده شد. مدل احتمالاتی بار با استفاده از توزیع گاما و روابط کاربردی آن بیان شد. از نظر الکتریکی نیز بارها به صورت بارهای توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت مدل‌سازی شدند. به‌علاوه با در نظر گرفتن مدل وایبل برای رفتار احتمالاتی باد، مدل توان تولیدی توربین بادی استخراج شد. سپس نتایج اجرای روش، بر روی شبکه توزیع ۳۳ شینه IEEE در چهار سناریوی مختلف، تحلیل و ارزیابی گردید و این نتایج

چولگی منفی کوچک، نشان‌دهنده یک دم بسیار کوچک به سمت چپ است. ضمناً با افزودن DG، باتوجه به نزدیک شدن مقدار کشیدگی به عدد ۳ (مقدار کشیدگی یک توزیع نرمال، ۳ است)، توزیع احتمال ولتاژ شین‌ها بیش از پیش به توزیع نرمال نزدیک می‌شوند. نتایج سناریو ۲، کارایی روش در حالت توزیع‌های غیرگوسی را اثبات می‌کند.

## ۳.۵. سناریو ۳: تأثیر انحراف از معیار بار

در این سناریو، تأثیرات تغییر انحراف از معیار و واریانس بارها بر ولتاژ سیستم، مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور، دو حالت مفروض باهم مقایسه شده‌اند: حالت بار پایه بدون DG، حالت بار بدون DG با دو برابر شدن انحراف از معیار بارها.

شکل (۹) انحراف از معیار بار شین‌های مختلف سیستم را برای این دو حالت مقایسه می‌کند. با دو برابر شدن مقادیر انحراف معیار ورودی، انحراف معیار ولتاژ شین‌ها نیز تقریباً دو برابر می‌شود. بنابراین به همان نسبت، واریانس ولتاژ شین‌ها نیز تغییر خواهد کرد. بنابراین، در یک شبکه توزیع، عدم قطعیت ولتاژ شین‌ها با افزایش عدم قطعیت توان مصرفی بارها افزایش خواهد یافت.

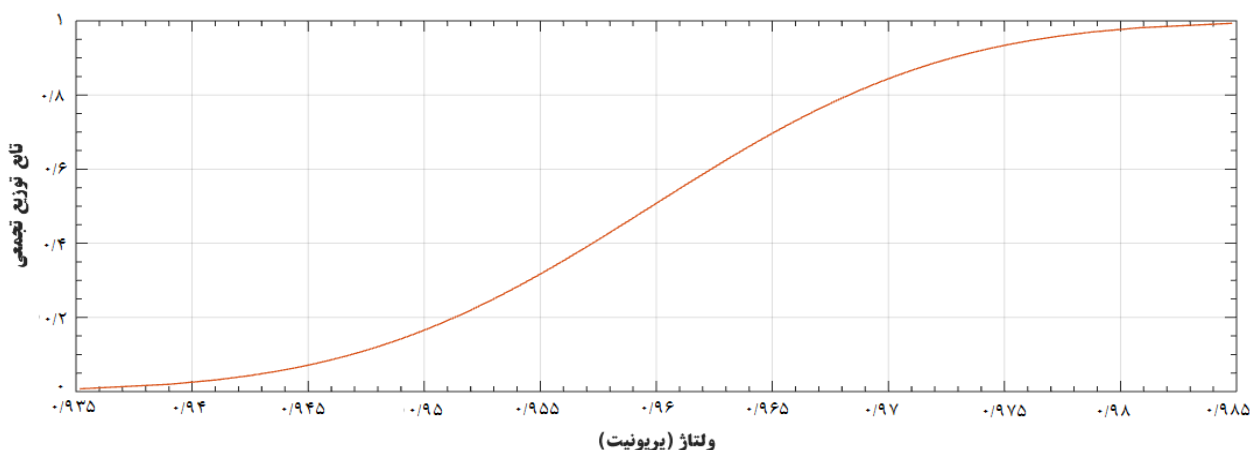
شکل (۱۰)، CDF ولتاژ شین ۲۰ را برای دو حالت با انحراف معیار متفاوت ورودی نشان می‌دهد. به‌خوبی می‌توان دریافت که فاصله اعتماد و انحراف از معیار ولتاژ این شین با افزایش انحراف از معیار متغیرهای ورودی بار، افزایش یافته است، درحالی‌که میانگین ولتاژ ثابت مانده است.

## ۴.۵. تأثیر مدل استاتیکی بار

در این سناریو، یک توربین بادی (با مشخصاتی که قبلاً ذکر شد) در شین ۳۳ نصب شده است.

حاصل شد: ۱. به طور کلی میانگین ولتاژ شین‌ها با افزایش تعداد و ضریب نفوذ DG افزایش می‌یابد؛ ۲. واریانس و در نتیجه عدم قطعیت ولتاژ شین‌ها با نصب DG افزایش می‌یابد؛ ۳. با افزایش انحراف از معیار بارها، انحراف از معیار ولتاژ نیز افزایش می‌یابد؛ ۴. چولگی و کشیدگی تابع توزیع ولتاژ به ازای توزیع گوسی بار (نسبت به توزیع

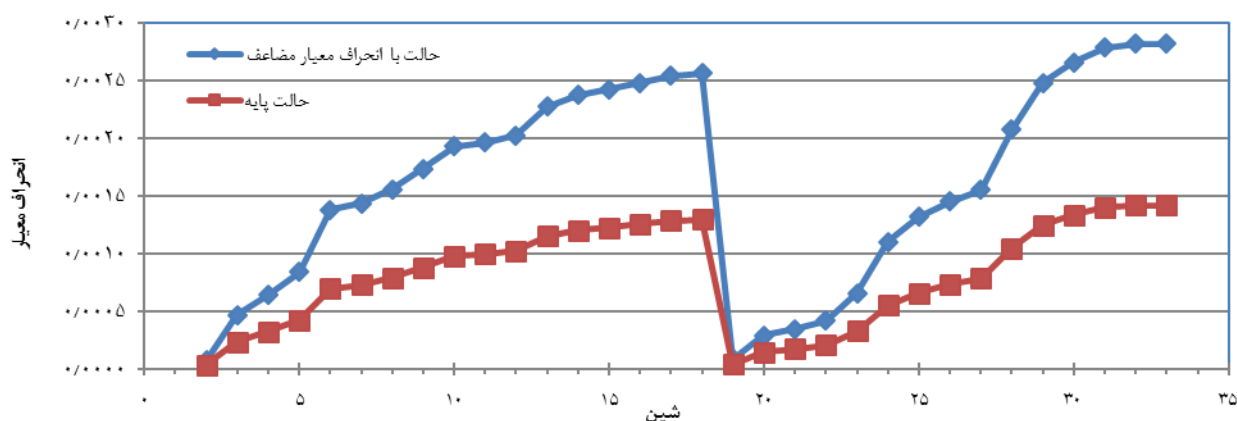
گاما برای بار) به توزیع نرمال نزدیک‌تر است؛ ۵. به ازای بار امیدانس ثابت، ولتاژ دارای بیشترین مقدار میانگین و کمترین عدم قطعیت است؛ ۶. به ازای بار توان ثابت، ولتاژ دارای کمترین مقدار میانگین و بیشترین عدم قطعیت است.



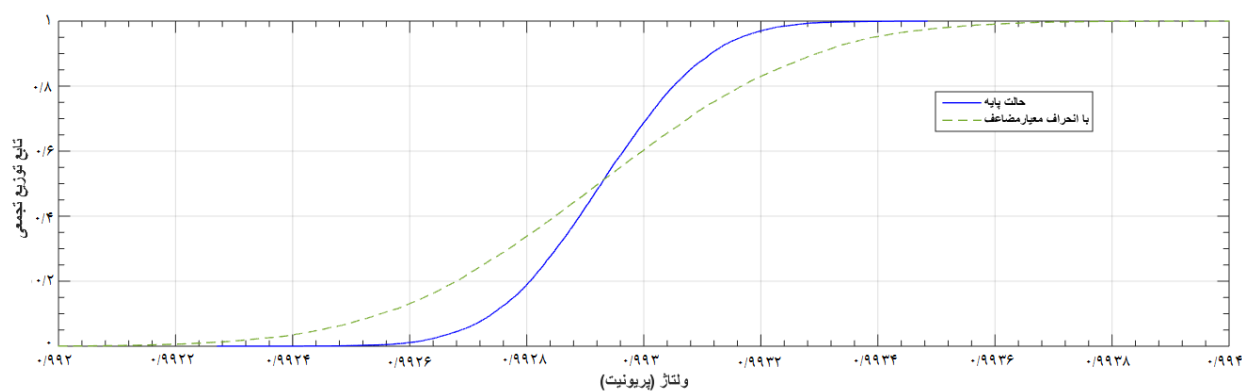
شکل (۸): منحنی CDF ولتاژ شین ۳۰ با DG

جدول (۱): مقادیر آماری خروجی ولتاژ شین‌های منتخب

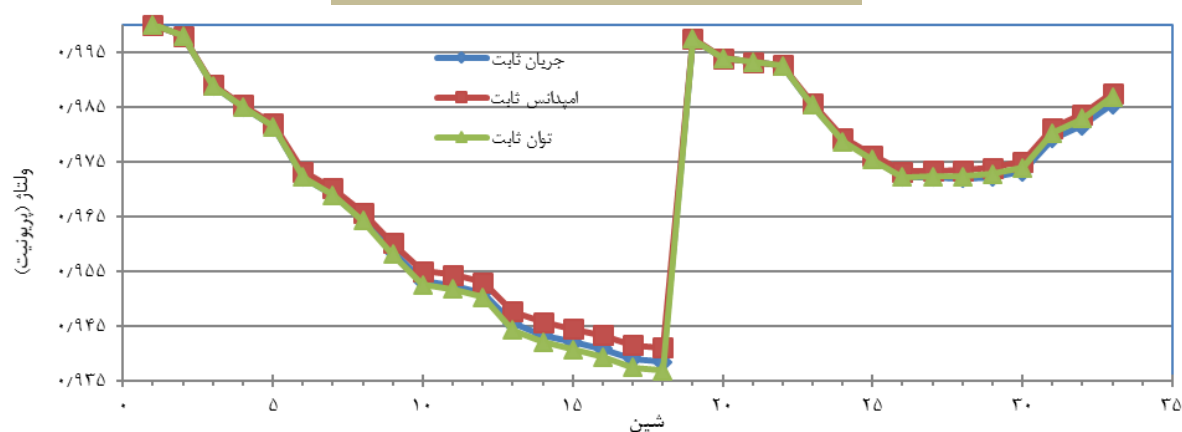
| شین | میانگین |        | واریانس                |                        | چولگی   |         | کشیدگی  |       |
|-----|---------|--------|------------------------|------------------------|---------|---------|---------|-------|
|     | بدون DG | با DG  | بدون DG                | با DG                  | بدون DG | با DG   | بدون DG | با DG |
| ۶   | ۰/۹۴۹۵  | ۰/۹۶۶۰ | $1/184 \times 10^{-5}$ | $2/233 \times 10^{-5}$ | -۰/۲۴۹۱ | -۰/۱۳۱۷ | ۳/۱۸۹   | ۳/۰۳۴ |
| ۱۶  | ۰/۹۱۵۷  | ۰/۹۳۲۶ | $3/012 \times 10^{-5}$ | $4/062 \times 10^{-5}$ | -۰/۱۹۹۳ | -۰/۱۹۲۶ | ۳/۱۱۲   | ۳/۰۵۴ |
| ۳۳  | ۰/۹۱۶۵  | ۰/۹۶۶۴ | $5/247 \times 10^{-5}$ | $1/520 \times 10^{-4}$ | -۰/۳۴۳۱ | -۰/۱۴۱۰ | ۳/۲۰۲   | ۳/۰۵۱ |



شکل (۹): انحراف از معیار ولتاژ شین‌ها برای دو حالت مختلف ورودی



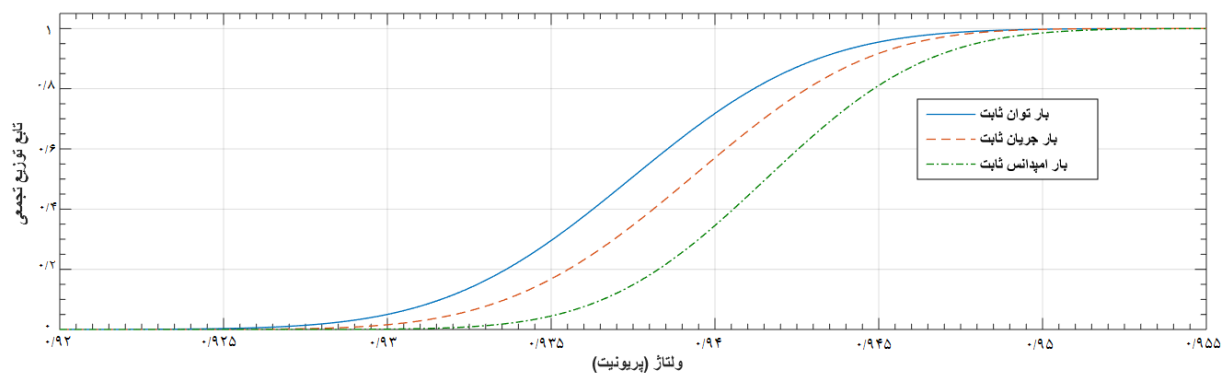
شکل (۱۰): CDF ولتاژ شین ۲۰ برای دو حالت مختلف ورودی



شکل (۱۱): مقادیر میانگین ولتاژ شین‌ها برای مدل‌های مختلف بار



شکل (۱۲): انحراف از معیار ولتاژ شین‌ها برای مدل‌های مختلف بار



شکل (۱۳): CDF ولتاژ شین ۱۷ برای مدل‌های مختلف بار

- [1] Chen, P. C., Salcedo, R., et al., "Analysis of Voltage Profile Problems due to the Penetration of Distributed Generation in Low-Voltage Secondary Distribution Networks", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 27, No. 4, 2012.
- [2] Su, C. L., "Stochastic Evaluation of Voltages in Distribution Networks with Distributed Generation using Detailed Distribution Operation Models", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 25, No. 2, pp. 786-795, 2010.
- [3] Rodrigues, A. B., Prada, R. B., da Silva, M. D. G., "Voltage Stability Probabilistic Assessment in Composite Systems: Modeling Unsolvability and Controllability Loss", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 25, No. 3, 2010.
- [4] Borkowska, B., "Probabilistic Load Flow", IEEE Trans. Power Appl. Syst., PAS-93, pp. 752-759, 1974.
- [5] Carpinelli, G., Caramia, P., Varilone, P., "Multi-Linear Monte Carlo Simulation Method for Probabilistic Load Flow of Distribution Systems with Wind and Photovoltaic Generation Systems", Renewable Energy, Vol. 76, pp. 283-295, 2015.
- [6] Allan, R., da Silva, A. L., Burchett, R., "Evaluation Methods and Accuracy in Probabilistic Load Flow Solutions", IEEE Trans. Power App. Syst., No. 5, pp. 2539-2546, 1981.
- [7] Zhang, P., Lee, S. T., "Probabilistic Load Flow Computation using the Method of Combined Cumulants and Gram-Charlier Expansion", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 676-682, 2004.
- [8] Williams, T., Crawford, C., "Probabilistic Load Flow Modeling Comparing Maximum Entropy and Gram-Charlier Probability Density Function Reconstructions", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 28, No. 1, 2013.
- [9] Usaola, J., "Probabilistic Load Flow in Systems with Wind Generation", IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 3, No. 12, pp. 1031-1041, 2009.
- [10] Pourahmadi-Nakhli, M., Seifi, A. R., Taghavi, R., "A Nonlinear-Hybrid Fuzzy/Probabilistic Load Flow for Radial Distribution Systems", Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 47, pp. 69-77, 2013.
- [11] Long, C., Farrag, M. E. A., Chengke, Z., Donald, M. H., "Statistical Quantification of Voltage Violations in Distribution Networks Penetrated by Small Wind Turbines and Battery Electric Vehicles", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 28, No. 3, 2013.
- [12] Nikmehr, N., Ravaninegh, S. N., "Heuristic Probabilistic Power Flow Algorithm for Microgrids Operation and Planning", IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 9, No. 11, pp. 985-995, 2015.
- [13] Aien, M., Rashidinejad, M., Fotuhi-Firuzabad, M., "On Possibilistic and Probabilistic Uncertainty Assessment of Power Flow Problem: A Review and a New Approach", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 37, pp. 883-895, 2014.
- [14] Chen, C., Wu, W., Boming, Z., Sun, H., "Correlated Probabilistic Load Flow using a Point Estimate Method with Nataf Transformation", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 65, pp. 325-333, 2015.
- [15] Villanueva, D., Feijóo, A. E., Pazos, J. L., "An Analytical Method to Solve the Probabilistic Load Flow Considering Load Demand Correlation using the DC Load Flow", Electric Power Systems Research, Vol. 110, pp. 1-8, 2014.
- [16] Gupta, N., "Probabilistic Load Flow with Detailed Wind Generator Models Considering Correlated Wind Generation and Correlated Loads", Renewable Energy, Vol. 94, pp. 96-105, 2016.
- [17] Ran, X., Miao, S., "Three-Phase Probabilistic Load Flow for Power System with Correlated Wind, Photovoltaic and Load", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 10, No. 12, pp. 3093-3101, 2016.
- [18] Kabir, M. N., Mishra, Y., Bansal, R. C., "Probabilistic Load Flow for Distribution Systems with Uncertain PV Generation", Applied Energy, Vol. 163, pp. 343-351, 2016.
- [19] Wua, C., Wenb, F., Lou, Y., Xin, F., "Probabilistic Load Flow Analysis of Photovoltaic Generation System with Plug-in Electric Vehicles", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 64, pp. 1221-1228, 2015.
- [20] Ruiz-Rodriguez, F. J., Hernandez, J. C., Jurado, F., "Probabilistic Load Flow for Photovoltaic Distributed Generation using the Cornish- Fisher Expansion", Elect. Power Syst. Res., Vol. 89, pp. 129-138, 2012.
- [21] Mahmoud, G. A., "Voltage Stability Analysis of Radial Distribution Networks using Catastrophe Theory", IET Gener. Trans. Distrib., Vol. 6, No. 7, pp. 612-618, 2012.
- [22] Janecek, E., Georgiev, D., "Probabilistic Extension of the Backward/Forward Load Flow Analysis Method", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 27, No. 2, pp. 695-704, 2012.
- [23] Kersting, W. H., Distribution System Modeling and Analysis, 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC, 2012.
- [24] Haque, M. H., "A General Load Flow Method for Distribution Systems", Electric Power Systems Research, Vol. 54, pp. 47-54, 2000.
- [25] Dragoslav, R., Taleski, R., "Two Novel Methods for Radial and Weakly Meshed Network Analysis", Electric Power Systems Research, Vol. 48, pp. 79-87, 1998.
- [26] Tsai-Hsiang, C., Mo-Shing, C., et al., "Distribution System Power Flow Analysis -a Rigid Approach", IEEE Trans. Power Del., Vol. 6, No. 3, pp. 1146-1152, 1991.
- [27] Masoum, A. S., Moses, P. S., Masoum, M. A. S., "Real-Time Coordination of Plug-in Electric Vehicle Charging in Smart Grids to Minimize Power Losses and Improve Voltage Profile", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 2, No. 3, pp.

- 456–467, 2011.
- [28] Augugliaro, A., Dusonchet, et al., "A Compensation-Based Method to Model PV Nodes in Backward/Forward Distribution Network Analysis", COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 481–493, 2007.
- [29] Tsai-Hsiang, C., Nien-Che, Y., "Loop Frame of Reference Based Three-Phase Power Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems", Electric power systems research, Vol. 80, pp. 799-806, 2010.
- [30] Teng, J. H., "Modelling Distributed Generations in Three-Phase Distribution Load Flow", IET Gen., Transm., Distrib., Vol. 2, No. 3, pp. 330–340, 2008.
- [31] Papadopoulos, P., Skarvelis-Kazakos, S., et al., "Electric Vehicles' Impact on British Distribution Networks", IET Electr. Syst. Transp., Vol. 2, No. 3, pp. 91–102, 2012.
- [32] Siano, P., Mokryani, G., "Probabilistic Assessment of the Impact of Wind Energy Integration into Distribution Networks", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 28, No. 4, 2013.
- [33] Taylor, H. M., Karlin, S., *An Introduction to Stochastic Modeling*, 3rd edition, Academic Press, 1998.
- [34] Divya, K. C., Rao, P. S. N., "Models for Wind Turbine Generating Systems and Their Application in Load Flow Studies", Electr. Power Syst. Res., Vol. 76, pp. 844–856, 2006.
- [35] Tourandaz Kenari, M., Sepasian, M. S., Setayesh Nazar, M., "Probabilistic Load Flow Computation using Saddle-Point Approximation", COMPEL-The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 36, No. 1, pp. 48-61, 2017.
- [36] Blair, N., Dobos, A. P., Freeman, J., Neises, T., Wagner, M., Ferguson, T., Gilman P, Janzou, S., *System Advisor Model*, sam 2014.1. 14: General description, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO., 2014.
- [37] Ruiz-Rodriguez, F. J., Hernandez, J. C., Jurado, F., "Probabilistic Load Flow for Radial Distribution Networks with Photovoltaic Generators", IET Renew. Power Gener., Vol. 6, No. 2, pp. 110-121, 2012.
- [38] Ettehadi, M., Ghasemi, H., Vaezzadeh, S., "Voltage Stability Based DG Placement in Distribution Network", IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 28, No. 1, pp. 171-178, 2013.
- [39] Vicente, W. C. B., Caire, R., Hadjsaid, N., "Probabilistic Load Flow for Voltage Assessment in Radial Systems with Wind Power", Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 41, pp. 27–33, 2012.