# ارائه روش جدید ارزیابی قابلیت اطمینان در شبکه‌های فعال

صلاح محمدی[۱]، دانشجوی دکتری؛ جمال مشتاق[۲]، دانشیار؛ هیمن گل پیرا[۳]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران – selahmohammadi@gmail.com
۲- دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران -j.moshtagh@uok.ac.ir
۳- دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران - hemin.golpira@uok.ac.ir

**چکیده:** روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌طور گسترده در ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. بزرگ‌ترین مزیت این روش سادگی و انعطاف‌پذیری آن برای اعمال به هر سیستمی است. در مقابل، حجم زیاد محاسبات و نتایج غیردقیق از معایب این روش هستند. در این کار، یک روش جدید ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان در شبکه‌های فعال پیشنهاد شده است. این روش ترکیبی از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و روش تحلیلی است. این روش برخلاف روش‌های شبیه‌سازی دارای جواب یکتا است. با توجه به اینکه، هدف از ارائه این روش جدید ارزیابی قابلیت اطمینان، پر کردن خلأهای موجود در روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو است، درنتیجه روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو ترتیبی با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای اثبات کارایی روش جدید، ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان باس۲ RBTS[۱] حالت شبکه غیرفعال و شبکه فعال (باس ۲ و ۴ RBTS اصلاح شده شامل منابع تولید پراکنده و ذخیره کننده انرژی) با استفاده از روش جدید و روش مونت‌کارلو انجام شده و با همدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از این دو روش نشان می‌دهد که روش جدید نتایج دقیقی دارد و زمان اجرای کمتری نسبت به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو دارد.

**واژه‌های کلیدی:** شبیه‌سازی مونت‌کارلو، روش جدید ارزیابی قابلیت اطمینان، ریزشبکه، شبکه فعال، باس ۲ RBTS، باس ۴ RBTS، شاخص‌های قابلیت اطمینان، منابع تولید پراکنده، ذخیره کننده انرژی.

# A New Method for Reliability Evaluation of Active Networks

S. Mohammadi[1], PhD Student; J. Moshtagh[2], Associate Professor; H. Golpîra[3], Assistant Professor

1- Faculty Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, Email: selahmohammadi@gmail.com
2- Faculty Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, Email: j.moshtagh@uok.ac.ir
3- Faculty Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, Email: hemin.golpira@uok.ac.ir

**Abstract:** Monte Carlo simulation method is widely used in reliability evaluation of distribution networks. The most important advantage of this method is their simplicity and flexibility to apply to any system. In contrast, large volumes of calculations and inaccurate results are the disadvantages of this method. In this paper, a new method for evaluating reliability indices in active networks is proposed. This method is a combination of Monte Carlo simulation method and analytical method. Unlike the simulation methods, it has a unique answer. Considering that, the purpose of this new method for reliability evaluation is filling gaps in the Monte Carlo simulation method, As a result, the Monte Carlo method will be examined in more detail. To prove the effectiveness of this method, evaluation of reliability indices for bus 2 of RBTS in an inactive network state and in active network state (modified RBTS Bus 2 and 4, including distributed generation resources and Energy storage) using new method and Monte Carlo method have been done and compared with each other. Results of these two methods show that the new method has accurate results and its implementation time is less than the Monte Carlo method.

**Keywords:** Monte Carlo simulation, new reliability evaluation method, microgrid, active network, bus 2 RBTS, bus 4 RBTS, reliability indices, distributed generation resources, energy storage.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۱
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۹
نام نویسنده مسئول: جمال مشتاق
نشانی نویسنده مسئول: ایران – سنندج - بلوار پاسداران - دانشگاه کردستان - دانشکده مهندسی – گروه مهندسی برق

## ۱- مقدمه

عملکرد یک سیستم قدرت توسط قابلیت اطمینان آن سنجیده می‌شود. ارزیابی دقیق و سریع قابلیت اطمینان از مهم‌ترین چالش‌های طراحان و بهره‌برداران سیستم‌های قدرت بوده است. مدل‌های ریاضی محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان، می‌توانند با روش‌های تحلیلی مستقیم یا با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی حل شوند. اگرچه راه‌حل‌های تحلیلی دقیق هستند، گاهی اوقات استفاده از آن‌ها برای سیستم‌های قدرت بزرگ دشوار است. درحالی‌که روش‌های شبیه‌سازی تنها تخمینی از شاخص‌های قابلیت اطمینان را ارائه می‌دهند، در مقابل، انعطاف‌پذیری بیشتری در برخورد با شرایط و سیستم‌های پیچیده فراهم می‌کنند. مبنای اکثر روش‌های شبیه‌سازی فعلی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو است. روش مونت‌کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه نتایج استفاده می‌کند.

کاربرد روش‌های شبیه‌سازی مونت‌کارلو و پیشنهاد استفاده از آن‌ها در ارزیابی قابلیت اطمینان، به حدود هفت دهه قبل برمی‌گردد. به‌طوری که قابلیت اطمینان سیستم و برآورد $MTTF^{۲}$ در سال ۱۹۶۰ با استفاده از روش مونت‌کارلو انجام شد [۱]. در این کار حدود اطمینان سیستم با توجه به داده‌های المان‌های سیستم، با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو تعیین شد. کار تحقیقاتی [۲] تکنیک‌های تحلیلی و مونت‌کارلو را برای به دست آوردن حدود اطمینان با در نظر گرفتن فرضیات ضروری و شرایط استفاده از آن‌ها، موردبحث قرار داده است. در مرجع [۳] فرآیندی برای به دست آوردن محدودیت‌های اطمینان سیستم پیچیده، برای خطاهای با توزیع نمایی، نرمال، گاما، لگاریتمی و وایبل طراحی شده است. در مرجع [۴] یک روش تخمین قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده بر مبنای مونت‌کارلو ارائه شده است. در مقاله [۵] محققین یک روش مونت‌کارلو جدید را برای ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم پیچیده بزرگ ارائه داده‌اند. در این تحقیق با استفاده از دو تکنیک کاهش واریانس، خطای روش مونت‌کارلو کاهش یافته است.

در مرجع [۶] یک روش جدید مونت‌کارلو برای ارزیابی احتمال بالاترین رخداد درخت خطا، بر اساس تکنیک کاهش واریانس ارائه شده است. در مرجع [۷] یک روش ترکیبی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های انتقال و تولید در مقیاس بزرگ ارائه شده است. در این کار به‌منظور افزایش دقت محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان، روش مونت‌کارلو بر اساس نمونه‌برداری تصادفی با روش تحلیلی ترکیب شده است. این روش برای ارزیابی سیستم‌های تولیدی چندحالته قابل استفاده است. در مقاله [۸] نویسندگان چارچوبی کلی را برای ترکیب مدل‌های تحلیلی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو بررسی کرده‌اند و شاخص‌های احتمالی المان‌ها را که توسط مدل تحلیلی قابل تفسیر هستند، از طرح نمونه‌گیری مونت‌کارلو به دست آورده‌اند. در مرجع [۹] نویسندگان، توسعه و استفاده از منحنی بار سالانه را برای هر باس بار در سیستم ترکیبی تولید و انتقال بررسی کرده‌اند. همچنین روش مونت‌کارلو ترتیبی را برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم پیچیده بررسی کرده‌اند. برای افزایش کارایی روش، تکنیک‌های کاهش واریانس را مورد استفاده قرار داده‌اند. با ظهور بحث منابع تولید پراکنده و به دنبال آن ریزشبکه‌ها، استفاده از الگوریتم مونت‌کارلو در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها گسترده‌تر شده است [۱۰]. در کار تحقیقاتی [۱۱] برای کاهش حجم محاسبات از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو غیر ترتیبی بر مبنای تکنیک بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. نویسندگان در مقاله [۱۲] روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو ترتیبی بر مبنای اعداد شبه تصادفی را برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های فعال پیشنهاد کرده‌اند. در مقاله [۱۳] یک روش مونت‌کارلو چند مرحله‌ای ترتیبی برای تخمین قابلیت اطمینان سیستم توزیع ارائه شده است. این روش بر مبنای تکنیک‌های کاهش واریانس عمل می‌کند و زمان شبیه‌سازی در مقایسه با روش مونت‌کارلو به میزان زیادی (۹۵ درصد) کاهش پیدا کرده است. این روش روی یک شبکه غیرفعال کوچک آزمایش شده است و نتایج حاصل از آن تفاوت ناچیزی با نتایج روش مونت‌کارلو دارد.

در کار تحقیقاتی [۱۴] نویسندگان روش مونت‌کارلو سریع‌تر شده را برای کاهش زمان شبیه‌سازی روش مونت‌کارلو ارائه داده‌اند. این روش که روی یک شبکه فعال کوچک شامل ۳ ریزشبکه تست شده است، دقت نتایج آن تا حدود ۹۷ درصد شبیه روش مونت‌کارلو است. در مقاله [۱۵] یک روش جدید ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان برای یک ریزشبکه متصل به شبکه پیشنهاد شده است. این روش که بر اساس روش مونت‌کارلو ترتیبی و روش اختلاف آنتروپی بنا شده است، حداقل ۶ برابر سریع‌تر از روش مونت‌کارلو است و نتایج آن تا حدود ۹۴ درصد با نتایج روش مونت‌کارلو تطابق دارد. این کار روی یک شبکه فعال فرضی شامل چهار ریزشبکه تست شده است. هدف تمام روش‌های ارائه شده در تحقیقات قبلی، کاهش زمان شبیه‌سازی و درنتیجه آن کاهش خطا بوده است؛ اما این هدف تحقق نیافته است؛ زیرا استفاده از تکنیک‌های کاهش واریانس بیشتر در شبکه‌های غیرفعال مورد استفاده قرار می‌گیرد و روش‌هایی که برای شبکه‌های فعال ارائه شده است، اکثراً روی شبکه‌های توزیع کوچک تست شده‌اند و کارایی آن‌ها در شبکه‌های فعال بزرگ مورد سؤال است. از طرفی هم نتایج آن‌ها در بهترین حالت ممکن همان نتایج روش مونت‌کارلو است و مشابه آن دارای تغییرات است. درواقع مشکل نتایج غیردقیق در ذات روش‌های شبیه‌سازی است و نتایج حاصل از آن‌ها همواره دارای خطا است.

در این کار، یک روش جدید ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان در شبکه‌های فعال پیشنهاد شده است. در این روش به‌جای ثابت گرفتن دوره شبیه‌سازی، تعداد خطا در سال برای تمام المان‌ها ثابت در نظر گرفته خواهد شد. همچنین به‌جای اینکه خطاها به‌صورت تصادفی در دوره‌های مختلف زمانی سال توزیع شوند، با توجه به سناریو موردنظر و به‌صورت هدفمند توزیع می‌شوند. نظر بر اینکه، هدف از ارائه این روش برطرف کردن مشکلات روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو است، درنتیجه در این کار روش مونت‌کارلو با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، ابتدا دقت روش مونت‌کارلو برای دو نرخ خطای متفاوت

در دوره‌های شبیه‌سازی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس نحوه توزیع خطا در دوره‌ها و بازه‌های مختلف زمانی برای روش مونت‌کارلو بررسی می‌شود. در ادامه، شاخص‌های ارزیابی قابلیت اطمینان باس ۲ RBTS در حالت غیرفعال با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌دست‌آمده است و با نتایج روش تحلیلی مقایسه شده است. در بخش ۴ روش جدید ارزیابی قابلیت اطمینان ارائه شده است. برای بررسی کارایی این روش، ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان باس ۲ در حالت شبکه غیرفعال و فعال (باس ۲ و ۴ RBTS اصلاح شده) با استفاده از این روش انجام شده است و با نتایج حاصل از روش مونت‌کارلو و روش تحلیلی، مقایسه شده است.

## ۲- روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو

به‌طورکلی دو روش اساسی در مونت‌کارلو برای ارزیابی قابلیت اطمینان وجود دارد. روش ترتیبی و روش غیر ترتیبی. در روش غیر ترتیبی از وضعیت تمام اجزای سیستم نمونه‌برداری می‌شود و وضعیت سیستم گسسته با زمان به دست می‌آید. در رویکرد پیوسته، دوره در حال کار و دوره از کار افتاده تمام اجزای سیستم شبیه‌سازی می‌شود و یک دوره عملیاتی با ترکیب تمام دوره‌های المان‌ها به دست می‌آید. روش غیر ترتیبی حجم محاسباتی کمتری دارد اما شاخص‌های قابلیت اطمینان را نمی‌توان به‌صورت مستقیم به دست آورد. در روش پیوسته حجم محاسبات زیاد است اما شاخص‌های قابلیت اطمینان را می‌توان به‌صورت مستقیم به دست آورد. در سال‌های اخیر از هر دو روش برای ارزیابی قابلیت اطمینان استفاده شده است؛ اما در اکثر کارها از روش شبیه‌سازی ترتیبی استفاده شده است و این روش کارایی بیشتری دارد. در این کار روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو ترتیبی مورد بررسی قرار می‌گیرد. روند اجرای این روش به‌صورت زیر است [۱۶].

- تولید عدد تصادفی u (کمتر از یک و بزرگ‌تر از ۰)
- به دست آوردن مقدار $TTF$[۳] (زمان لازم تا وقوع خطا) و $TTR$[۴] (زمان لازم برای تعمیر) برای هر المان مطابق روابط ۱ و ۲

$$TTF = -\frac{1}{\lambda} Ln(u) \qquad (۱)$$

$$TTR = -\frac{1}{\mu} Ln(u) \qquad (۲)$$

- در این روابط λ نرخ خرابی و μ نرخ تعمیر المان است.
- مشخص کردن المانی که دارای کمترین میزان $TTF$ است.
- مشخص کردن مدت زمان وقفه ($R_{ij}$) و شمارش تعداد وقفه‌ها (Ni) در هر نقطه بار i در اثر رخداد j
- اگر زمان شبیه‌سازی کمتر از سال‌های مشخص شده شبیه‌سازی اســـت به مرحله اول برمی‌گردیم در غیر این صـــورت به مرحله ۶ می‌رویم.
- محاسبه نرخ خطای متوسط مورد انتظار و زمان وقفه سالانه نقطه بار i
- محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان کل سیستم توزیع

در این کار روش مونت‌کارلو از دو جنبه مورد بررسی قرار می‌گیرد: ۱- دقت این روش ۲- نحوه توزیع خطا در این روش

### ۲-۱- دقت روش مونت‌کارلو

برای بررسی دقت این روش، دو المان با نرخ خطاهای مختلف در نظر گرفته شده است و با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو مقدار نرخ خطای متوسط آن‌ها محاسبه شده است. جدول ۱ دقت این روش را برای دوره‌های مختلف و دو نرخ خطای ۰/۰۱۵ و ۰/۱ نشان می‌دهد. مقادیر حداکثر و حداقل تعداد خطا در پانصد تکرار به‌دست‌آمده است و احتمالاً با تعداد تکرارهای بیشتر این مقادیر تغییر خواهند کرد. در این جدول مقدار درصد خطا ( $E_r$ ) از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$E_r = max\left(\left|\frac{N_E - N_R}{N_R}\right| \times 100\right) \qquad (۳)$$

در این رابطه $N_E$ تعداد خطا در دوره شبیه‌سازی، $N_R = \lambda \times N$، $\lambda$ نرخ متوسط خطا و N دوره شبیه‌سازی است. در دوره هزار ساله ماکزیمم درصد خطا برای نرخ خطای ۰/۰۱۵ برابر ۱۰۰ درصد است‌که این مقدار برای نرخ خطای ۰/۱ برابر ۳۴ درصد است. اما در دوره یک میلیون ساله این مقدار برای نرخ خطای ۰/۰۱۵ برابر ۳/۳۴ درصد و برای نرخ خطای ۰/۱ برابر ۵/۵ درصد است. ملاحظه می‌شود که در دوره‌های زمانی کم، خطای شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای نرخ خطای کمتر، زیاد است. با افزایش مدت زمان شبیه‌سازی، درصد خطا در هر دو حالت کاهش می‌یابد. اما این کاهش برای نرخ خطای کمتر، بیشتر است. با افزایش دوره شبیه‌سازی در نرخ خطای زیاد، درصد خطا به‌کندی کاهش می‌یابد.

### ۲-۲- نحوه توزیع خطا در روش مونت‌کارلو

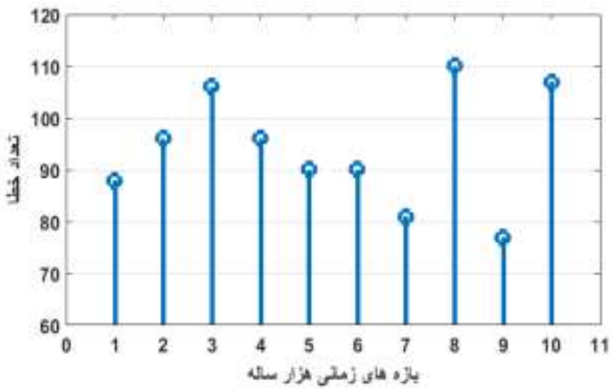
در اینجا برای بررسی نحوه توزیع خطا در روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، سه حالت مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد: ۱. نحوه توزیع خطا در بازه‌های مختلف زمانی ۲. نحوه توزیع ماهانه خطا ۳. نحوه توزیع ساعتی خطا

جدول ۱: دقت روش مونت‌کارلو برای دوره‌های زمانی مختلف و دو نرخ خطای ۰/۰۱۵ و ۰/۱

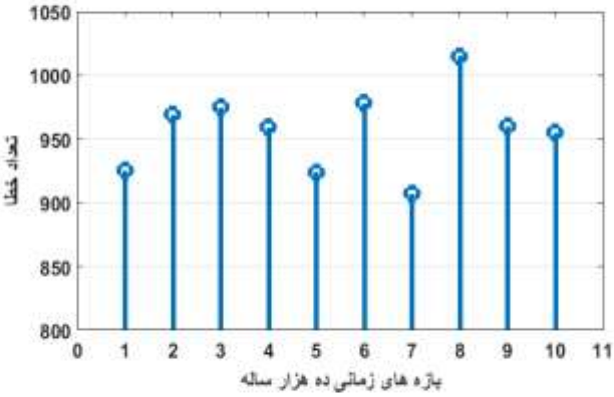
| نرخ خطا | $\lambda$ = ۰/۰۱۵ | | | | $\lambda$ = ۰/۱ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| دوره‌های زمانی شبیه‌سازی | ۱۰۰۰ | ۱۰۰۰۰ | ۱۰۰۰۰۰ | ۱۰۰۰۰۰۰ | ۱۰۰۰ | ۱۰۰۰۰ | ۱۰۰۰۰۰ | ۱۰۰۰۰۰۰ |
| حداکثر تعداد خطا | ۳۰ | ۱۸۳ | ۱۵۸۶ | ۱۵۲۰۸ | ۱۲۳ | ۱۰۸۸ | ۹۸۰۸ | ۹۶۱۷۴ |
| حداقل تعداد خطا | ۳ | ۱۱۵ | ۱۳۶۹ | ۱۴۴۹۹ | ۶۶ | ۸۶۵ | ۹۲۶۸ | ۹۴۴۱۳ |
| ماکزیمم درصد خطا | ۱۰۰ | ۲۳/۳۴ | ۸/۷۳ | ۳/۳۴ | ۳۴ | ۱۳/۵ | ۷/۳۲ | ۵/۵ |

### ۲-۲-۱- نحوه توزیع خطا در بازه‌های مختلف زمانی

برای بررسی نحوه توزیع خطا در بازه‌های مختلف زمانی، ۲ دوره مختلف زمانی، ده هزار ساله و یک‌صد هزار ساله در نظر گرفته شده است. هر یک از این دوره‌های زمانی به ده بازه زمانی تقسیم شده است و تعداد خطا در هر بازه زمانی برای نرخ خطای ۰/۱ به‌دست‌آمده است. شکل‌های ۱ و ۲ نحوه توزیع خطا را در دوره‌ها و بازه‌های مختلف زمانی برای نرخ خطای ۰/۱ نشان می‌دهد. در دوره زمانی ده هزار ساله، کمترین تعداد خطا در بازه زمانی ۹ (سال ۸۰۰۱ تا ۹۰۰۰) و بیشترین تعداد خطا در بازه زمانی ۸ (سال ۸۰۰۱ تا ۷۰۰۱) رخ داده است. در دوره زمانی یک‌صد هزار ساله، کمترین تعداد خطا در بازه زمانی ۷ (سال ۶۰۰۰۱ تا ۷۰۰۰۰) و بیشترین تعداد خطا در بازه زمانی ۸ (سال ۷۰۰۰۱ تا ۸۰۰۰۰) رخ داده است. اختلاف بین بیشترین و کمترین تعداد خطا در دوره ده هزار ساله، ۲۳ خطا و در دوره یک‌صد هزار ساله، برابر ۱۰۸ خطا است.



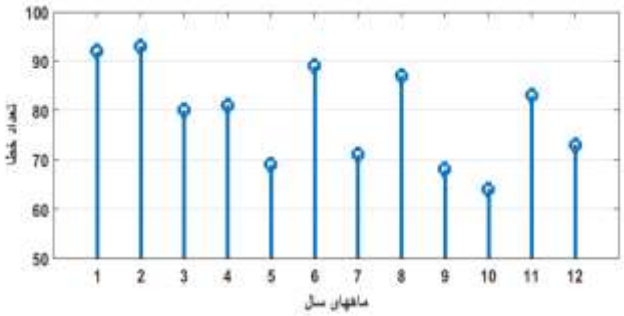

**شکل ۱: نحوه توزیع خطا در یک دوره ده هزار ساله**



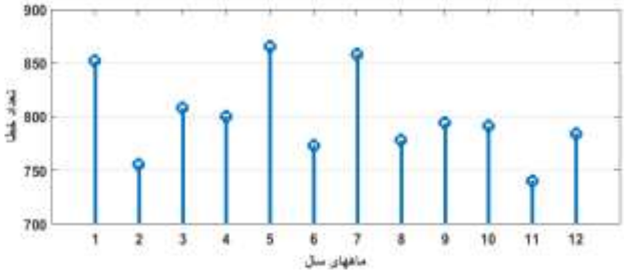

**شکل ۲: نحوه توزیع خطا در یک دوره صد هزار ساله**

### ۲-۲-۲- نحوه توزیع ماهانه خطا

شکل‌های ۳ و ۴ نحوه توزیع ماهانه خطا را در دوره‌های مختلف زمانی برای نرخ خطای ۰/۱ نشان می‌دهند. در دوره ده هزار ساله کمترین تعداد خطا در ماه ۱۰ (دی‌ماه) اتفاق افتاده است و بیشترین تعداد خطا در ماه ۲(اردیبهشت‌ماه) رخ داده است. در دوره یک‌صد هزار ساله کمترین تعداد خطا در ماه ۱۱ (بهمن‌ماه) اتفاق افتاده است و بیشترین تعداد خطا در ماه ۵ (مردادماه) رخ داده است. اختلاف بین بیشترین و کمترین تعداد خطا در دوره ده هزار ساله ۲۹ خطا و در دوره یک‌صد هزار ساله برابر ۱۲۵ خطا است.



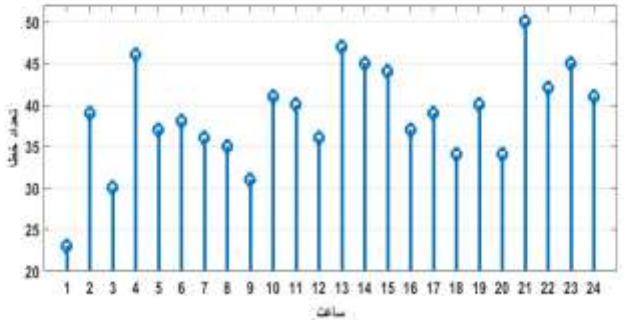

**شکل ۳: نحوه توزیع ماهانه خطا در یک دوره ده هزار ساله**



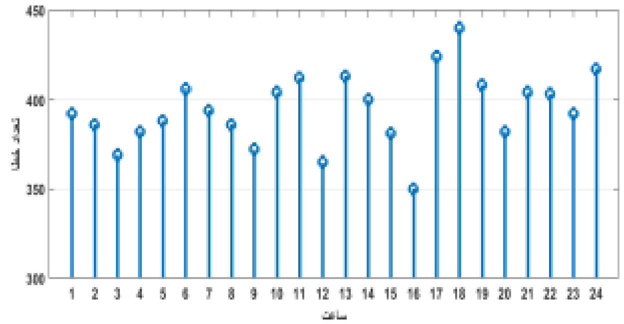

**شکل ۴: نحوه توزیع ماهانه خطا در یک دوره یک‌صد هزار ساله**

### ۲-۲-۳- نحوه توزیع ساعتی خطا

شکل‌های ۵ و ۶ نحوه توزیع ساعتی خطا را در دوره‌های مختلف زمانی برای نرخ خطای ۰/۱ نشان می‌دهند.




**شکل ۵: نحوه توزیع ساعتی خطا در یک دوره ده هزار ساله**



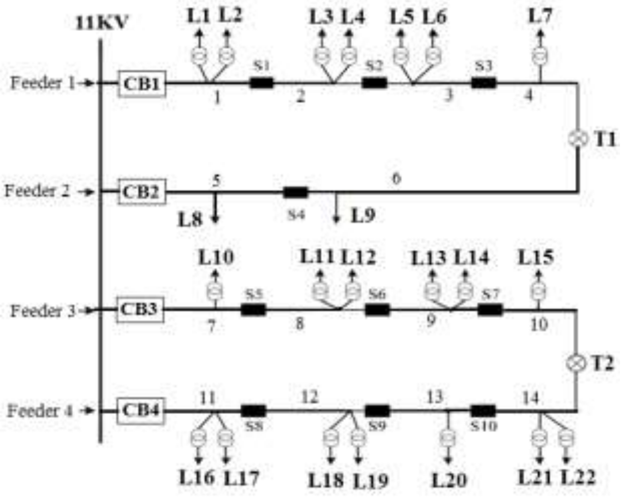

**شکل ۶: نحوه توزیع ساعتی خطا در یک دوره یک‌صد هزار ساله**

در دوره ده هزار ساله کمترین تعداد خطا در ساعت ۱ اتفاق افتاده است و بیشترین تعداد خطا در ساعت ۲۱ رخ داده است. در دوره یک‌صد هزار ساله کمترین تعداد خطا در ساعت ۱۶ اتفاق افتاده است و بیشترین

تعداد خطا در ساعت ۱۸ رخ داده است. اختلاف بین بیشترین و کمترین تعداد خطا در دوره ده هزار ساله ۲۷ خطا و در دوره یک‌صد هزار ساله برابر ۶۵ خطا است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این قسمت می‌توان گفت که: الف ) توزیع خطا در دوره‌ها و بازه‌های مختلف زمانی از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند ب) با افزایش دوره‌های زمانی، توزیع خطا یکنواخت‌تر خواهد شد اما توزیع خطا در بازه‌های مختلف زمانی یکسان نخواهد شد. ج) تعداد خطا در این روش به دوره‌های زمانی و نرخ خطا بستگی دارد. با توجه به اینکه توزیع خطا در بازه‌های مختلف زمانی متفاوت است درنتیجه روش مونت‌کارلو برای ارزیابی قابلیت اطمینان در شبکه‌هایی که دارای منابع و بارهای متغیر است دارای خطای زیادی خواهد بود.

## ۳- به دست آوردن شاخص‌های قابلیت اطمینان در باس ۲ با استفاده از روش مونت‌کارلو

شکل ۷ باس ۲ RBTS را نشان می‌دهد. باس ۲ دارای ۴ فیدر، ۲۲ نقاط بار، ۲۰ ترانسفورماتور، ۱۴ سکشن فرعی، ۱۰ سوییچ غیر اتوماتیک و ۴ مدار شکن است. داده‌های این شبکه در پیوست ۱ آمده است [۱۷].




**شکل ۷: شبکه توزیع باس ۲ RBTS**

در این بخش شاخص‌های قابلیت اطمینان این شبکه در حالت غیرفعال با استفاده از روش مونت‌کارلو و روش تحلیلی به‌دست‌آمده است و با همدیگر مقایسه شده‌اند. دوره شبیه‌سازی در روش مونت‌کارلو برابر یک‌صد هزار سال در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی سوییچ‌ها دستی هستند و زمان لازم برای بازکردن و یا بستن هر سوییچ یک ساعت است. فیدر یک با فیدر دو و همچنین فیدر سه با فیدر چهار از طریق سوییچ‌های T1 و T2 به ترتیب باهم در ارتباط هستند. درنتیجه اگر فیدر یک از طریق باس بار اصلی نتواند به شبکه سراسر دسترسی داشته باشد، از طریقT1 و فیدر دو به شبکه متصل خواهد شد به همین ترتیب فیدر دو هم از طریق T1 به شبکه متصل خواهد شد. برای فیدرهای سه و چهار هم تغذیه جایگزین باس بار اصلی با استفاده از T2 فراهم است. در

جدول ۲ نتایج ارزیابی شاخص‌های پایه قابلیت اطمینان (متوسط نرخ خطا در سال = $\lambda$، مقدار متوسط عدم دسترسی سالیانه برحسب ساعت =U و مدت زمان قطعی برحسب ساعت = r) در نقاط بار با استفاده از روش مونت‌کارلو نشان داده شده است و با نتایج روش تحلیلی مقایسه شده است.

**جدول ۲: نتایج ارزیابی شاخص‌های پایه قابلیت اطمینان برای باس ۲ و مقایسه آن‌ها با نتایج روش تحلیلی**

| نقاط بار | ($\lambda$ ) خطا در سال | (r) ساعت | (u) ساعت در سال | درصد اختلاف در ($\lambda$ ) | درصد اختلاف در (r) | درصد اختلاف در (u) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| فیدر ۱ | | | | | | |
| ۱ | ۰/۲۳۴۷ | ۱۵/۳۴۹۲ | ۳/۶۰۲۰ | -۱/۹۱۴۳ | ۲/۷۱۴۲ | ۰/۷۴۷۹ |
| ۲ | ۰/۲۴۷۰ | ۱۴/۳۱۹۰ | ۳/۵۳۶۹ | -۲/۰۷۷۳ | -۰/۷۷۶۸ | -۲/۸۳۸۰ |
| ۳ | ۰/۲۴۷۱ | ۱۴/۹۵۹۶ | ۳/۶۹۷۰ | -۲/۰۲۹۷ | ۳/۶۶۲۲ | ۱/۵۵۸۱ |
| ۴ | ۰/۲۳۴۳ | ۱۵/۶۰۴۰ | ۳/۶۵۶۳ | -۲/۰۶۰۶ | ۴/۴۱۹۲ | ۲/۲۶۷۵ |
| ۵ | ۰/۲۴۵۸ | ۱۴/۵۸۸۷ | ۳/۵۸۵۳ | -۲/۵۷۲۸ | ۱/۰۹۲۳ | -۱/۵۰۸۷ |
| ۶ | ۰/۲۴۳۰ | ۱۴/۶۷۲۴ | ۳/۵۶۵۸ | -۲/۳۹۷۶ | ۰/۸۱۱۹ | -۱/۶۰۵۱ |
| ۷ | ۰/۲۴۶۳ | ۱۴/۷۷۴۶ | ۳/۶۳۸۷ | -۲/۳۶۶۷ | ۳/۴۸۹۲ | ۱/۰۳۹۹ |
| فیدر ۲ | | | | | | |
| ۸ | ۰/۱۳۵۰ | ۳/۸۸۷۲ | ۰/۵۲۴۸ | -۳/۳۹۱۸ | ۰/۰۸۹۴ | -۳/۳۰۵۴ |
| ۹ | ۰/۱۳۵۶ | ۳/۶۱۲۶ | ۰/۴۹۰۰ | -۲/۹۳۳۸ | ۰/۲۲۰۷ | -۲/۷۱۹۶ |
| فیدر ۳ | | | | | | |
| ۱۰ | ۰/۲۳۸۸ | ۱۵/۰۳۵۱ | ۳/۵۹۰۷ | -۱/۹۰۹۳ | -۲/۱۳۲۶ | -۴/۰۰۱۱ |
| ۱۱ | ۰/۲۴۷۸ | ۱۴/۴۲۹۶ | ۳/۵۷۶۱ | -۲/۲۶۷۶ | ۰/۴۸۵۶ | -۱/۷۹۳۰ |
| ۱۲ | ۰/۲۵۲۶ | ۱۴/۲۳۴۶ | ۳/۵۹۶۲ | -۲/۱۵۲۶ | ۵/۸۰۲۲ | ۳/۵۲۴۷ |
| ۱۳ | ۰/۲۵۰۱ | ۱۴/۲۱۰۶ | ۳/۵۵۴۲ | -۱/۹۴۲۵ | ۲/۶۴۴۱ | ۰/۶۵۰۲ |
| ۱۴ | ۰/۲۵۴۳ | ۱۴/۰۶۶۹ | ۳/۵۷۷۱ | -۲/۷۵۹۳ | -۱/۶۹۹۳ | -۴/۴۱۱۷ |
| ۱۵ | ۰/۲۳۹۵ | ۱۴/۸۶۱۵ | ۳/۵۵۸۶ | -۲/۲۶۸۰ | -۰/۴۸۹۲ | -۲/۷۴۶۱ |
| فیدر ۴ | | | | | | |
| ۱۶ | ۰/۲۴۴۱ | ۱۳/۸۵۴۹ | ۳/۳۸۱۹ | -۳/۲۳۴۹ | -۳/۹۹۲۷ | -۷/۰۹۸۴ |
| ۱۷ | ۰/۲۳۴۲ | ۱۴/۵۳۸۶ | ۳/۴۰۴۴ | -۳/۴۳۹۲ | -۱/۸۳۴۸ | -۵/۲۱۰۹ |
| ۱۸ | ۰/۲۳۶۳ | ۱۵/۰۸۷۲ | ۳/۵۶۴۸ | -۲/۵۶۴۹ | ۲/۲۳۹۸ | -۰/۳۸۲۶ |
| ۱۹ | ۰/۲۴۸۸ | ۱۴/۷۲۹۷ | ۳/۶۶۴۳ | -۲/۶۳۴۱ | ۳/۲۹۱۹ | ۰/۵۷۱۲ |
| ۲۰ | ۰/۲۴۷۸ | ۱۴/۵۲۸۲ | ۳/۶۰۰۵ | -۳/۰۰۲۰ | ۱/۸۷۹۰ | -۱/۱۷۹۴ |
| ۲۱ | ۰/۲۴۵۲ | ۱۴/۱۹۸۲ | ۳/۴۸۱۴ | -۲/۷۹۴۸ | -۰/۱۸۸۵ | -۲/۹۷۸۱ |
| ۲۲ | ۰/۲۴۶۷ | ۱۴/۴۰۳۱ | ۳/۵۵۳۲ | -۳/۴۴۴۲ | ۲/۰۹۴۲ | -۱/۴۲۲۱ |

داده‌هایی که در جدول ۲ ثبت شده است، حاصل میانگین ۵ بار شبیه‌سازی روش مونت‌کارلو است. در فیدر یک بیشترین اختلاف بین روش شبیه‌سازی با روش تحلیلی در محاسبه مدت زمان قطعی است که برابر ۴/۴۱۹ درصد، در فیدر دو بیشترین اختلاف در محاسبه مقدار متوسط نرخ خطا است که برابر ۳/۳۹- درصد، در فیدر سه بیشترین اختلاف در محاسبه مدت زمان قطعی است که برابر ۵/۸- درصد و در فیدر چهار بیشترین اختلاف در محاسبه مدت زمان عدم دسترسی سالیانه است که برابر ۷/۰۹- درصد است و بیشترین مقدار خطای روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو در این قسمت است. این نتایج نشان می‌دهد با وجود اینکه دوره شبیه‌سازی خیلی زیاد در نظر گرفته شده است اما خطای برابر ۷ درصد در نتایج وجود دارد. البته با تکرارهای بیشتر ممکن است این نتایج تغییر کنند. جدول ۳ نتایج ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان نقاط بار باس ۲ با استفاده از روش مونت‌کارلو و اختلاف آن‌ها را با نتایج تحلیلی نشان می‌دهد. شاخص‌هایی که در این شبیه‌سازی به‌دست‌آمده‌اند عبارت‌اند از: ۱. شاخص متوسط فراوانی قطع برق سیستم (*SAIFI*[۵]) که از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۸].

$$SAIFI(i)=\frac{\sum_{i=1}^{22}\lambda_i N_i}{\sum_{i=1}^{22} N_i} \qquad (۴)$$

۲. شاخص متوسط مدت قطع برق سیستم (*SAIDI*[۶]) مطابق رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

$$SAIDI(i)=\frac{\sum_{i=1}^{22}U_i N_i}{\sum_{i=1}^{22} N_i} \qquad (۵)$$

۳. شاخص متوسط مدت قطع برق مشترک (*CAIDI*[۷]) مطابق رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

$$CAIDI(i)=\frac{\sum_{i=1}^{22}U_i N_i}{\sum_{i=1}^{22}\lambda_i N_i} \qquad (۶)$$

۴. شاخص انرژی تأمین نشده (*ENS*[۸]) از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$ENS(i)=\sum_{i=1}^{22}L_i U_i \qquad (۷)$$

در این روابط i تعداد نقاط بار، $N_i$ تعداد مشتری‌ها در نقطه بار i، $U_i$ مدت‌زمان خاموشی سالیانه و $L_i$ متوسط بار متصل شده به نقطه بار i است. در این حالت بیشترین تفاوت نتایج شبیه‌سازی با نتایج تحلیلی در محاسبه *SAIFI* به میزان ۲/۷۹- درصد است. این نتایج نشان می‌دهد که روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو در ارزیابی قابلیت اطمینان شاخص‌هایی که تعداد بیشتری المان در آن‌ها دخالت دارند، دقت بیشتری دارد.

## ۴- روش جدید ارزیابی قابلیت اطمینان

در بخش‌های قبلی مشاهده کردیم که در روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو چون دوره شبیه‌سازی ثابت است درنتیجه تعداد خطاها برای المان‌های با نرخ متوسط خطای مختلف، متفاوت خواهد بود و برای المان با نرخ متوسط خطای کمتر، تعداد نمونه‌ها در سال کمتر خواهد بود. همچنین توزیع خطا در روش مونت‌کارلو به‌صورت متعادل نیست و در بعضی ماه‌ها، روزها یا ساعت‌های سال خطا بیشتر اتفاق می‌افتد و در بعضی ماه‌ها، روزها یا ساعت‌های سال خطا کمتر رخ می‌دهد. این مسائل باعث می شوند که روش مونت‌کارلو در شبکه‌های توزیع با منابع و بارهای متغیر با زمان دارای خطای بیشتری باشد. از طرفی به دلیل ماهیت تصادفی بودن تعداد خطاها، ممکن است که مقادیر آن‌ها در هر شبیه‌سازی برای هر المان با حالت دیگر متفاوت باشد و این باعث می‌شود که نتایج ارزیابی قابلیت اطمینان با استفاده از این روش دقیق نباشد و در ارزیابی‌های مختلف جواب‌های مختلف به دست آید.

برای برطرف کردن این مسائل در روش مونت‌کارلو، روش جدید ارزیابی قابلیت اطمینان ارائه خواهد شد. در این روش، برای اینکه تعداد خطاها در سال برای تمام المان‌ها یکسان باشد، دوره شبیه‌سازی متناسب

**جدول ۳: نتایج ارزیابی شاخص‌های نقطه بار باس ۲ و اختلاف آن‌ها با نتایج تحلیلی**

| شماره فیدر | *SAIFI* | *SAIDI* | *CAIDI* | *ENS* | درصد اختلاف در SAIFI | درصد اختلاف در SAIDI | درصد اختلاف در CAIDI | درصد اختلاف در ENS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰/۲۴۴۰ | ۳/۵۴۹۲ | ۱۴/۵۴۶۲ | ۱۲/۸۶۱۸ | -۱/۶۱۲۴ | -۱/۹۱۲۰ | -۰/۳۰۴۵ | -۲/۳۵۵۳ |
| ۲ | ۰/۱۳۶۵ | ۰/۵۱۰۹ | ۳/۷۴۴۱ | ۱/۰۹۴۹ | -۲/۳۵۴۲ | -۲/۳۵۶۴ | -۰/۰۰۲۳ | -۲/۴۱۹۳ |
| ۳ | ۰/۲۴۴۶ | ۳/۵۹۳۵ | ۱۴/۶۹۱۱ | ۱۱/۰۲۸۳ | -۲/۱۱۵۱ | -۰/۸۳۴۷ | ۱/۳۰۸۱ | -۱/۵۶۱۵ |
| ۴ | ۰/۲۴۰۲ | ۳/۵۵۹۵ | ۱۴/۸۱۹۴ | ۱۲/۱۳۷۴ | -۲/۷۸۸۲ | -۱/۲۶۴۴ | ۱/۵۶۷۵ | -۰/۹۰۶۱ |
| کل سیستم | ۰/۲۴۲۸ | ۳/۵۶۴۱ | ۱۴/۶۷۱۹ | ۳۷/۱۲۲۴ | -۲/۱۷۵۷ | -۱/۳۴۲۵ | ۰/۸۳۹۸ | -۱/۶۵۱۳ |

با نرخ متوسط خطای المان در نظر گرفته خواهد شد. همچنین برخلاف روش مونت‌کارلو که خطا را به‌صورت تصادفی در بازه‌ها و دوره‌های مختلف زمانی تقسیم می‌کند، تعداد خطاها با توجه به میزان نرخ متوسط خطا و دوره شبیه‌سازی، به‌صورت هدفمند در بازه‌های زمانی مختلف تقسیم می‌شوند. این روش ترکیبی از روش شبیه‌سازی و روش تحلیلی است و الگوریتم اجرای آن به‌صورت زیر است:

- واردکردن داده‌های شبکه
- محاسبه توان منابع تولید پراکنده و نقاط بار
- مشخص کردن نرخ متوسط خطای المان‌ها ( $\lambda(k)$ )
- مشخص کردن تعداد خطای المان‌ها ( $F_{\lambda(k)}$ ) با توجه سناریوهای موردنظر
- به دست آوردن دوره زمانی شبیه‌سازی لازم ( $N(k)$ ) برای هر المان ($k$) با استفاده از رابطه زیر:

$$N(k)=\frac{F_{\lambda(k)}}{\lambda(k)} \tag{۸}$$

- تقسیم خطا به‌صورت هدفمند در بازه‌های مختلف زمانی

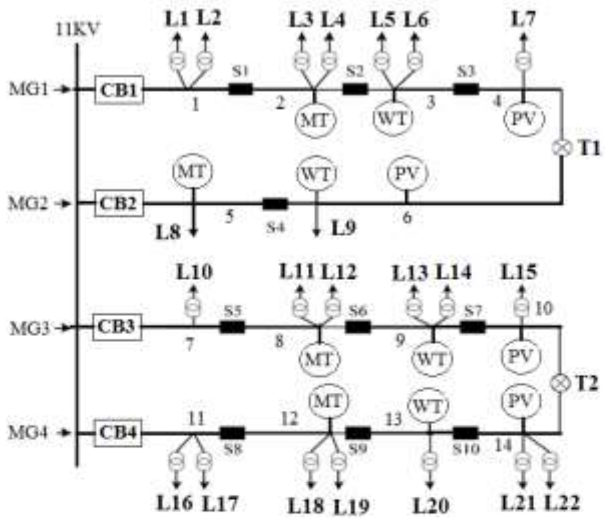
(درصورتی‌که لازم باشد می‌توان خطا را دریک بازه بیشتر یا کمتر در نظر گرفت).

- حال با توجه به اینکه مکان و زمان وقوع خطای هر المان مشخص است، می‌توان شاخص‌های قابلیت اطمینان را برای هر نقطه بار، به روش تحلیلی به دست آورد.
- به دست آوردن شاخص‌های قابلیت اطمینان
- نتایج به‌دست‌آمده را بر دوره زمانی شبیه‌سازی ( $N(k)$ ) تقسیم می‌کنیم.

برای بررسی صحت و کارایی این روش، ابتدا این روش روی باس ۲ غیرفعال آزمایش شد و نتایج حاصل از آن دقیقاً برابر همان نتایج روش تحلیلی به دست آمد. برای بررسی کارایی آن در شبکه‌های فعال، باس ۲ مطابق شکل ۸ به چهار ریزشبکه تبدیل شده است (هر فیدر به‌عنوان یک ریزشبکه فرض شده است) و ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان این شبکه فعال با استفاده از این روش در بخش 5-4 انجام شده است. این ریزشبکه‌ها از همدیگر مستقل هستند و هیچ ارتباطی با هم ندارند. هر ریزشبکه دارای چهار واحد نیروگاه گازی، دو واحد نیروگاه بادی، دو مجموعه سلول‌های فتوولتائیک و مجموعه باتری است.

## ۴-۱- مدل توان تولیدی به‌وسیله توربین‌های بادی

توان تولیدی توسط توربین‌های بادی وابسته به‌سرعت باد است و به‌صورت تصادفی با زمان تغییر می‌کند. مقدار متوسط سرعت ماهانه باد در دوره ۲۵ ساله، برای ایستگاه زرینه اوباتو از سازمان هواشناسی کشور گرفته شده است. برای پیش‌بینی توان توربین‌های بادی باید الگوی وزش باد در منطقه مشخص باشد [۱۹]. در این کار از توزیع وایبل برای نمایش سرعت باد استفاده شده است.




**شکل ۸: شبکه توزیع اصلاح شده باس ۲ RBTS**

در حالت عادی این ریزشبکه‌ها توانایی تأمین توان مورد نیاز خود را دارند. داده‌های این ریزشبکه‌ها در پیوست ۱ آمده است. برای بررسی این شبکه فعال در ادامه مدل المان‌های شبکه موردبحث قرار می‌گیرد.
تابع چگالی احتمال توزیع وایبل به‌صورت زیر است [۲۰].

$$f_{\vartheta}(\vartheta)=\left\{\frac{\beta}{\alpha}\times\left(\frac{\vartheta}{\alpha}\right)^{\beta-1}\times exp\left(-\left(\frac{\vartheta}{\alpha}\right)^{\beta}\right)\vartheta\ge 0\right. \tag{۹}$$

در این رابطه $\beta$، درجه عدم قطعیت را مدل می‌کند. $\alpha$، مقدار امید ریاضی و مد را توصیف می‌کند. $\vartheta$، سرعت باد است. توان تولید شده توسط توربین بادی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$P_{WT}=\begin{cases}0 & 0\le\vartheta\le\vartheta_{ci}\\ P_{WT,rated}\,\dfrac{\vartheta-\vartheta_{ci}}{\vartheta_{rated}-\vartheta_{ci}} & \vartheta_{ci}\le\vartheta\le\vartheta_{rated}\\ P_{WT,rated} & \vartheta_{rated\le\vartheta\le\vartheta_{co}}\end{cases} \tag{۱۰}$$

در این رابطه$\vartheta$، سرعت باد،$P_{WT,rated}$ توان نامی توربین بادی، $Vci$ حداقل سرعت باد لازم برای توربین، $Vco$ حداکثر سرعت بادی که در آن توربین قادر به تولید توان است و $V_{rated}$ سرعت نامی باد است.

## ۴-۲- مدل توان تولیدی توسط سلول‌های فتوولتائیک

توان خروجی توسط سلول‌های فتوولتائیک بستگی به تابش خورشیدی دارد و میزان زیادی عدم قطعیت دارد. این توان به عوامل زیادی بستگی دارد مانند جهت سلول‌های فتوولتائیک، روز، ماه و شرایط محیطی. تابع چگالی احتمال بتا که بیشتر برای مدل‌سازی احتمالات انتشار خورشید استفاده می‌شود به‌صورت زیر است.

$$f(R)=\frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}R^{\alpha-1}(1-R)^{\beta} \tag{۱۱}$$

توان خروجی سلول‌های فتوولتائیک از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۰].

$$P_{PV}(R)=\begin{cases} P_{r,pv}\dfrac{R^2}{R_{STD}R_C} & 0\le R\le R_C \\ P_{r,pv}\dfrac{R}{R_{STD}} & R_C\le R\le R_{STD} \\ P_{r,pv} & R_{STD}\le R_C \end{cases} \qquad (۱۲)$$

در این روابط $\alpha$ و $\beta$ پارامترهای شکل توزیع بتا، R انتشار خورشیدی، RC نقطه انتشار خاص، $R_{STD}$ انتشار خورشیدی در شرایط استاندارد و *Pr,pv* توان نامی سلول فتوولتائیک است. داده‌های ماهانه مربوط به تابش انرژی خورشیدی برای منطقه زرینه اوباتو از سایت [۲۱] گرفته شده است.

## ۴-۳- مدل بار

مقدار بار با توجه به تغییرات فصلی و شرایط آب و هوایی تغییر می‌کند. مدل بار متغیر با زمان‌بر اساس داده‌های تاریخی به‌صورت زیر است [۲۰].

$$Li\ (t)\ =\ Lp\ (i)\ w\ (m)\ w\ (h) \qquad (۱۳)$$

در این رابطه $\omega(h)$ ضریب بار ساعتی، $\omega(m)$ ضریب بار ماهیانه و $L_{P(i)}$ مقدار پیک بار در نقطه بار i است. این ضرایب در پیوست ۲ آمده است.

## ۴-۴- وضعیت شارژ و دشارژ باتری‌ها

در زمانی که توان منابع تولید پراکنده بی شتر از توان بار ا ست، باتری‌ها شارژ می‌شوند [۲۲].

$$P_{charge}=\sum P_{DG}-\sum P_{Load} \qquad (۱۴)$$

درزمانی که توان منابع تولید پراکنده کمتر از توان بار اســـت، باتری‌ها دشارژ می‌شوند.

$$P_{dcharge}=\sum P_{Load}-\sum P_{DG} \qquad (۱۵)$$

توان شارژ و دشارژ خازن در محدوده ظرفیت باتری‌ها است.

$$0<\mathrm{P_{charge}},\ \mathrm{P_{dcharge}}<\mathrm{P_{max}} \qquad (۱۶)$$

زمانی که انرژی باتری به محدوده ظرفیت رزرو می‌رســـد، باتری انرژی تحویل نمی‌دهد.

$$E_{Reserve}<E_{Remain}+E_{charge}-E_{dcharge}<E_{max} \qquad (۱۷)$$

## ۴-۵- نتایج عددی در شبکه فعال (باس ۲ RBTS اصلاح شده)

در این بخش شاخص‌های قابلیت اطمینان در یک شبکه فعال (باس ۲ RBTS اصلاح شده) با استفاده از روش مونت‌کارلو و روش جدید به‌دست‌آمده و با همدیگر مقایسه شده‌اند. برای محاسبه شاخص‌ها در روش جدید، ابتدا توان منابع تولید پراکنده و نقاط بار محاسبه خواهد شد. سپس نرخ خطای المان‌ها محاسبه خواهد شد. بعد $F_{\lambda(k)}$ با توجه به سناریوهای موردنظر محاسبه خواهد شد. روش‌های زیادی برای تولید سناریو وجود دارد که در اینجا مدنظر ما نیست. بهترین حالت ممکن این است که تعداد خطای تمام المان را طوری در نظر بگیریم که در تمام ساعات سال خطا رخ بدهد. در این حالت تمام حالت‌های ممکن در نظر گرفته خواهد شد و دوره شبیه‌سازی خیلی بزرگ خواهد بود. اما در اینجا مشکل روش مونت‌کارلو (زمان زیاد اجرای شبیه‌سازی) را نداریم و زمان اجرای شبیه‌سازی کمتر از روش مونت‌کارلو است. چون در اینجا تعداد

**جدول ۴: نتایج ارزیابی شاخص‌های پایه قابلیت اطمینان برای باس ۲ اصلاح شده با استفاده از روش مونت‌کارلو و مقایسه با نتایج روش جدید**

| نقاط بار | (λ) خطا در سال | (r) ساعت | (u) ساعت در سال | درصد اختلاف در (λ) | درصد اختلاف در (r) | درصد اختلاف در (u) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ریزشبکه ۱ | | | | | | |
| ۱ | ۰/۲۵۵۶ | ۱۵/۹۰۹۹ | ۴/۰۶۶۴ | -۴/۰۰۳۸ | ۳/۱۹۰۲ | -۰/۹۴۱۳ |
| ۲ | ۰/۲۶۷۹ | ۱۵/۱۵۵۳ | ۴/۰۵۹۵ | -۴/۰۷۸۸ | ۱/۴۸۸۷ | -۲/۶۵۰۸ |
| ۳ | ۰/۲۶۸۹ | ۱۴/۴۹۹۰ | ۳/۸۹۸۸ | -۳/۷۰۶۴ | ۱/۸۵۶۷ | ۱/۹۱۸۵- |
| ۴ | ۰/۲۳۵۱ | ۱۵/۴۲۸۳ | ۳/۶۲۶۷ | -۱/۷۴۷۱ | ۳/۲۴۴۰ | ۱/۴۴۰۲ |
| ۵ | ۰/۲۶۴۹ | ۱۴/۰۶۶۷ | ۳/۷۲۶۵ | -۲/۱۵۳۳ | ۱/۷۹۰۹ | -۰/۴۰۰۹ |
| ۶ | ۰/۲۶۱۰ | ۱۳/۹۴۵۹ | ۳/۶۳۹۶ | -۲/۴۰۰۹ | ۰/۴۱۵۶ | -۱/۹۹۵۳ |
| ۷ | ۰/۲۷۰۲ | ۱۳/۶۵۹۵ | ۳/۶۹۰۹ | -۳/۳۴۱۱ | ۲/۲۵۳۹ | -۱/۱۶۲۵ |
| ریزشبکه ۲ | | | | | | |
| ۸ | ۰/۱۴۹۰ | ۴/۴۹۳۲ | ۰/۶۶۹۶ | -۴/۰۱۲۹ | -۵/۷۶۵۲ | -۹/۵۴۶۸ |
| ۹ | ۰/۱۷۴۵ | ۴/۲۲۱۸ | ۰/۷۳۶۵ | -۲/۱۲۶۲ | -۷/۶۱۲۷ | -۹/۵۷۷۱ |
| ریزشبکه ۳ | | | | | | |
| ۱۰ | ۰/۲۶۱۵ | ۱۵/۳۵۲۳ | ۴/۰۱۵۱ | -۱/۶۴۳۵ | ۰/۱۴۹۲ | -۱/۴۹۶۸ |
| ۱۱ | ۰/۲۷۰۰ | ۱۳/۸۸۶۱ | ۳/۷۴۹۷ | -۲/۰۳۸۸ | -۲/۵۹۹۱ | -۴/۵۸۴۹ |
| ۱۲ | ۰/۲۷۵۳ | ۱۴/۱۲۶۲ | ۳/۸۸۹۲ | -۱/۲۸۳۶ | -۰/۱۶۲۴ | -۱/۴۴۳۹ |
| ۱۳ | ۰/۲۷۲۰ | ۱۳/۱۷۲۳ | ۳/۵۸۲۶ | -۱/۲۵۹۸ | -۲/۳۴۳ | -۳/۵۷۳۳ |
| ۱۴ | ۰/۲۷۵۵ | ۱۳/۴۴۳۰ | ۳/۷۰۳۵ | -۱/۱۴۸۲ | ۰/۴۰۰۸ | -۰/۷۵۲ |
| ۱۵ | ۰/۲۶۷۱ | ۱۳/۸۲۰۲ | ۳/۶۹۱۹ | -۱/۶۷۸۳ | ۰/۹۲۰۸ | -۰/۷۷۳ |
| ریزشبکه ۴ | | | | | | |
| ۱۶ | ۰/۲۴۴۹ | ۱۵/۵۱۱۷ | ۳/۷۹۸۳ | -۲/۹۲۵۷ | ۲/۰۲۲۵ | -۰/۹۶۲۴ |
| ۱۷ | ۰/۲۶۱۸ | ۱۵/۸۳۸۱ | ۴/۱۴۵۸ | -۵/۵۳۵۹ | ۴/۱۱۹۶ | -۱/۶۴۴۳ |
| ۱۸ | ۰/۲۶۰۴ | ۱۴/۶۲۸۰ | ۳/۸۰۹۶ | -۶/۰۱۵۹ | ۱/۱۵۶۲ | -۴/۹۲۹۳ |
| ۱۹ | ۰/۲۷۴۵ | ۱۴/۲۲۸۰ | ۳/۹۰۳۲ | -۵/۳۸۷۸ | ۱/۳۱۰۲ | -۴/۱۴۸۲ |
| ۲۰ | ۰/۲۷۱۵ | ۱۳/۵۷۳۲ | ۳/۶۸۴۹ | -۲/۵۲۰۶ | ۰/۲۷۴۴ | -۲/۲۵۳۲ |
| ۲۱ | ۰/۲۹۱۷ | ۱۳/۳۹۰۰ | ۳/۹۰۵۹ | -۲/۰۹۷۷ | ۳/۹۲۵۹ | ۱/۷۴۵۸ |
| ۲۲ | ۰/۲۹۴۶ | ۱۲/۶۹۹۳ | ۳/۷۴۰۸ | -۲/۱۳۶۲ | -۰/۰۹۷۳ | -۲/۲۳۱۵ |

خطا و زمان وقوع خطا برای هر المان مشخص است و نیازی به حلقه‌های زیادی که در روش مونت‌کارلو برای همین منظور وجود دارد، نیست. با این فرض که تعداد خطای تمام المان‌ها برابر تعداد ساعت‌های سال باشد درنتیجه $F_{\lambda(k)}=8760$ خواهد شد. در ادامه، با توجه به اینکه تعداد خطا و زمان وقوع آن برای هر المان مشخص است، با استفاده از روش تحلیلی می‌توان تمام شاخص‌های قابلیت اطمینان را به دست آورد. در پایان

**جدول ۵: نتایج ارزیابی شاخص‌های نقاط بار برای باس ۲ اصلاح شده با استفاده از روش مونت‌کارلو و مقایسه با نتایج روش جدید**

| شماره ریزشبکه | SAIFI | SAIDI | CAIDI | ENS | درصد اختلاف در SAIFI | درصد اختلاف در SAIDI | درصد اختلاف در CAIDI | درصد اختلاف در ENS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰/۲۶۴۱ | ۳/۹۹۶۷ | ۱۵/۱۳۳۲ | ۱۳/۵۲۴۵ | -۳/۸۹۳ | -۱/۸۲۷ | ۲/۱۴۷ | -۲/۹۷ |
| ۲ | ۰/۱۶۱۷ | ۰/۷۰۳۱ | ۴/۳۴۶۹ | ۱/۵۰۳۵ | -۳/۰۵۷ | -۹/۵۵۷ | -۶/۷۶۰ | -۶/۵۷ |
| ۳ | ۰/۲۶۸۸ | ۳/۸۸۰۸ | ۱۴/۴۳۷۵ | ۱۱/۷۹۴۴ | -۱/۶۸۲ | -۲/۴۸۵ | -۰/۸۴۰ | -۰/۲۸ |
| ۴ | ۰/۲۶۵۷ | ۳/۹۴۶۵ | ۱۴/۸۵۳۲ | ۱۲/۷۱۲۷ | -۵/۵۴۵ | -۳/۴۷۵ | ۲/۱۷۶ | -۳/۲ |
| کل سیستم | ۰/۲۶۶۰ | ۳/۹۳۸۴ | ۱۴/۸۰۶۰ | ۳۹/۵۳۵۲ | -۳/۷۲۷۸ | -۲/۵۸۷۲ | ۱/۱۸۵ | -۲/۴ |

**جدول ۶: نتایج ارزیابی انرژی تأمین نشده برای باس ۲ اصلاح شده با استفاده از روش مونت‌کارلو و مقایسه با روش جدید**

| شاخص قابلیت اطمینان | ENS (مگاوات) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| دوره شبیه‌سازی | دورهٔ ده هزار ساله | | | | دورهٔ پنجاه هزار ساله | | | |
| شماره ریزشبکه | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ |
| حداکثر مقدار | ۱۴/۴۲۸۲ | ۱/۶۱۵۳ | ۱۲/۲۲۸۶ | ۱۳/۵۱۷۵ | ۱۴/۱۱۲۹ | ۱/۶۱۰۳ | ۱۱/۹۸۴۶ | ۱۳/۲۱۱۲ |
| حداقل مقدار | ۱۳/۳۲۵۲ | ۱/۵۲۵۰ | ۱۱/۱۹۷۳ | ۱۲/۲۸۴۳ | ۱۳/۴۹۴۵ | ۱/۵۶۰۹ | ۱۱/۴۹۳۴ | ۱۲/۷۷۳۷ |
| درصد اختلاف | ۷/۹۶۱۲ | ۵/۶۶۰۰ | ۸/۷۴۲۴ | ۹/۴۹۷۴ | ۴/۴۵۷۰ | ۳/۰۹۳۸ | ۴/۱۶۰۷ | ۳/۳۳۹۳ |
| میانگین | ۱۳/۸۵۴۷ | ۱/۵۹۵۴ | ۱۱/۷۹۶۴ | ۱۲/۹۸۴۵ | ۱۳/۸۷۴۶ | ۱/۵۹۶۷ | ۱۱/۸۰۵۶ | ۱۳/۱۰۱۴ |
| روش جدید | ۱۳/۹۳۸۱ | ۱/۶۰۹۳ | ۱۱/۸۲۷۴ | ۱۳/۱۳۲۷ | ۱۳/۹۳۸۱ | ۱/۶۰۹۳ | ۱۱/۸۲۷۴ | ۱۳/۱۳۲۷ |
| درصد اختلاف | -۰/۵۹۸۳ | -۰/۸۶۳۷ | -۰/۲۶۲۱ | -۱/۱۲۸۴ | -۰/۴۵۵۵ | -۰/۷۸۲۹ | -۰/۱۸۴۳ | -۰/۲۳۸۳ |

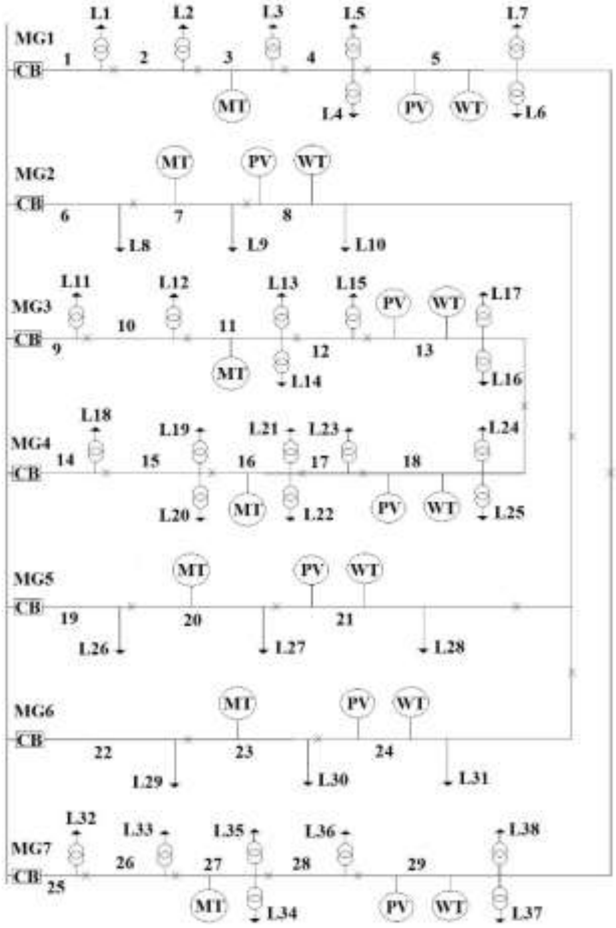
شاخص‌های به‌دست‌آمده را بر دوره شبیه‌سازی المان‌ها تقسیم می‌کنیم. جدول ۴ نتایج حاصل از روش مونت‌کارلو و مقایسه آن‌ها با نتایج حاصل از روش جدید را برای شاخص‌های پایه قابلیت اطمینان نشان می‌دهد. نتایجی که در این جدول برای روش مونت‌کارلو آمده است، میانگین نتایج حاصل از ۵ بار شبیه‌سازی است. در این حالت مدت دوره شبیه‌سازی برای روش مونت‌کارلو برابر ۵۰ هزار سال است. در قسمت نرخ متوسط خط بیشترین درصد اختلاف در نقطه بار ۱۸ به میزان ۶/۰۱۵۹- درصد، در قسمت مدت زمان خاموشی و مدت زمان عدم دسترسی سالیانه، بیشترین درصد اختلاف در نقطه بار ۹ به ترتیب ۷/۶۱۲۷- و ۹/۵۷۷۱- درصد است. ملاحظه می‌شود که درصد اختلاف‌ها در روش مونت‌کارلو در این قسمت نسبت به نتایج همین روش در شبکه غیرفعال بیشتر شده است. همچنین بیشترین تغییرات مربوط به ریزشبکه ۲ است که دلیل عمده آن کم بودن تعداد المان‌های نقاط بار در این ریزشبکه نسبت به ریزشبکه‌های دیگر است. در جدول ۵ نتایج ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان نقاط بار، برای باس ۲ اصلاح شده حاصل از روش مونت‌کارلو نشان داده شده است و با نتایج روش جدید مقایسه شده است. در قسمت محاسبه *SAIFI* بیشترین درصد اختلاف در ریزشبکه ۴ به میزان ۵/۵۴، در بخش SAIDI،*CAIDI* و *ENS* بیشترین درصد اختلاف در ریزشبکه ۲ به میزان به ترتیب ۹/۵۵-،۶/۷۶- و ۶/۵۷- است. مشاهده می‌شود که در این بخش هم نتایج حاصل از روش مونت‌کارلو با شبکه فعال، درصد اختلاف بیشتری نسبت به نتایج همین روش با شبکه غیرفعال دارد و بیشترین درصدهای اختلاف مربوط به ریزشبکه ۲ است. می‌توانیم نتیجه بگیریم که دقت روش مونت‌کارلو در شبکه‌های فعال کمتر از دقت همین روش برای شبکه‌های غیرفعال است.

برای بررسی صحت روش جدید در محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه فعال، روش مونت‌کارلو در تکرارهای بیشتر و برای دوره‌های زمانی مختلف روی شبکه فعال مذکور اجرا شد و نتایج حاصل از آن در جدول ۶ آمده است. برای جلوگیری از افزایش تعداد صفحات مقاله، فقط یک شاخص قابلیت اطمینان (مقدار انرژی تأمین نشده) برای بررسی انتخاب شده است. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که میانگین نتایج حاصل از بیست بار شبیه‌سازی روش مونت‌کارلو، به سمت مقادیر روش جدید همگرا خواهد شد و بیشترین درصد خطا برابر ۱/۱۲- است. البته این میزان خطا در دوره پنجاه هزار ساله برابر ۰/۷۸۲۹- درصد است. قطعاً با تکرارهای بیشتر این درصدهای خطا کمتر خواهد شد و این دلیل بر دقیق بودن روش جدید در محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان در شبکه‌های فعال است. ماکزیمم ۹/۴۹ درصد اختلاف بین مقادیر حداکثر و حداقل انرژی تأمین نشده نسبت به مقدار میانگین در شبیه‌سازی مونت‌کارلو نشان می‌دهد که نتایج حاصل از این روش دارای ثبات نیست و تغییر می‌کنند. هرچند این مقدار در دوره پنجاه هزار ساله به ۴/۴۵ درصد رسیده است ولی هرگز صفر نخواهد شد.

### ۴-۶- نتایج عددی در شبکه فعال (باس ۴ RBTS اصلاح شده)

شکل ۹ باس ۴ RBTS اصلاح شده را نشان می‌دهد. این باس دارای ۷ فیدر، ۳۸ نقاط بار، ۲۹ ترانسفورماتور، ۲۹ سکشن فرعی، ۲۷ سوییچ غیر اتوماتیک و ۷ مدار شکن است. داده‌های این شبکه در پیوست ۱ آمده است [۱۷]. مطابق شکل این باس به هفت ریزشبکه تبدیل شده است (هر فیدر به‌عنوان یک ریزشبکه فرض شده است) و ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان این شبکه فعال با استفاده از روش جدید و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو ترتیبی انجام شده است. در این حالت هم

ریزشبکه‌ها از همدیگر مستقل هستند و هیچ ارتباطی با هم ندارند. هر ریزشبکه دارای چهار واحد نیروگاه گازی، دو واحد نیروگاه بادی، دو مجموعه سلول‌های فتوولتائیک و مجموعه باتری است. در این حالت مدت دوره شبیه‌سازی برای روش مونت‌کارلو برابر ۵۰ هزار سال است. جدول ۷ نتایج حاصل از روش مونت‌کارلو و مقایسه آن‌ها با نتایج حاصل از روش جدید را برای شاخص‌های پایه قابلیت اطمینان نشان می‌دهد. نتایجی که در این جدول برای روش مونت‌کارلو آمده است، میانگین نتایج حاصل از ۵ بار شبیه‌سازی است.




**شکل ۹: شبکه توزیع اصلاح شده باس ۴ RBTS**

در قسمت نرخ متوسط خط، بیشترین درصد اختلاف بین روش جدید با روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو در نقطه بار ۲۹ به میزان ۲/۸۷۵۴- درصد و کمترین در نقطه بار ۲ به میزان ۰/۶۵۸۲- درصد است. در قسمت مدت زمان خاموشی، بیشترین اختلاف در نقطه بار ۲۴ به میزان ۶/۵۳۵۷ درصد و کمترین در نقطه بار ۲۸ به میزان ۰/۰۴۴۱ درصد است. در قسمت عدم دسترسی سالیانه، بیشترین اختلاف در نقطه بار ۱ به میزان ۵/۷۳۶۵- و کمترین در نقطه بار ۱۱ به میزان ۰/۰۶۹۹ درصد می‌باشد. مشاهده می‌شود که درصد خطا بین روش جدید و روش مونت‌کارلو در باس ۴ کمتر از باس ۲ می‌باشد چون در باس ۴ تعداد المان‌هایی که در محاسبه شاخص‌ها دخالت دارند نسبت به باس ۲ بیشتر است درنتیجه روش مونت‌کارلو دارای دقت بیشتری است. در جدول ۸ نتایج ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان نقاط بار، برای باس

**جدول ۷: نتایج ارزیابی شاخص‌های پایه قابلیت اطمینان برای باس ۴ اصلاح شده با استفاده از روش مونت‌کارلو و مقایسه با نتایج روش جدید**

| نقاط بار | خطا در سال ($\lambda$) | ساعت (r) | ساعت در سال (u) | درصد اختلاف در ($\lambda$) | درصد اختلاف در (r) | درصد اختلاف در (u) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰/۳۱۰۸ | ۱۳/۶۴۸۷ | ۴/۲۴۲۶ | ۱/۴۹۹۱- | ۴/۳۰۱۹- | ۵/۷۳۶۵- |
| ۲ | ۰/۳۲۰۶ | ۱۲/۷۷۷۵ | ۴/۰۹۶۴ | ۰/۶۵۸۲- | ۱/۱۱۰۰ | ۰/۴۴۴۵ |
| ۳ | ۰/۳۱۰۸ | ۱۲/۳۵۲۳ | ۳/۸۳۹۶ | ۰/۸۶۸۶- | ۳/۶۳۸۵ | ۲/۷۳۸۳ |
| ۴ | ۰/۳۲۳۸ | ۱۲/۳۴۴۰ | ۳/۹۹۷۵ | ۰/۹۵۱۱- | ۰/۰۴۴۵- | ۰/۹۹۵۱- |
| ۵ | ۰/۳۰۴۳ | ۱۲/۴۴۰۹ | ۳/۷۸۵۱ | ۱/۵۱۵۲- | ۴/۱۲۷۹- | ۵/۵۸۰۵- |
| ۶ | ۰/۳۰۷۵ | ۱۲/۴۹۹۶ | ۳/۸۴۳۶ | ۱/۰۶۶۷- | ۱/۴۲۲۷ | ۰/۳۴۰۸ |
| ۷ | ۰/۳۰۴۳ | ۱۲/۵۷۹۷ | ۳/۸۲۷۴ | ۱/۵۸۰۹- | ۰/۵۲۶۷- | ۲/۰۹۹۴- |
| ۸ | ۰/۲۰۸۴ | ۵/۱۳۶۹ | ۱/۰۷۰۳ | ۲/۶۲۰۴- | ۰/۷۶۲۵ | ۱/۸۷۷۹- |
| ۹ | ۰/۲۱۸۱ | ۴/۱۷۷۲ | ۰/۹۱۱۱ | ۱/۳۷۰۹- | ۰/۳۴۰۵ | ۱/۰۳۵۰- |
| ۱۰ | ۰/۲۲۱۴ | ۴/۳۰۲۷ | ۰/۹۵۲۴ | ۱/۴۶۳۷- | ۰/۳۳۰۴ | ۱/۱۳۸۱- |
| ۱۱ | ۰/۳۲۶۱ | ۱۳/۴۶۱۹ | ۴/۳۹۰۲ | ۱/۸۳۰۶- | ۱/۹۳۶۰ | ۰/۰۶۹۹ |
| ۱۲ | ۰/۳۲۲۹ | ۱۲/۹۴۳۱ | ۴/۱۷۹۰ | ۱/۴۸۰۵- | ۰/۱۰۵۱ | ۱/۳۷۶۹- |
| ۱۳ | ۰/۳۲۲۹ | ۱۲/۴۵۹۹ | ۴/۰۲۳۰ | ۰/۸۱۱۵- | ۳/۰۸۳۱ | ۲/۲۴۶۶ |
| ۱۴ | ۰/۲۸۴۸ | ۱۲/۷۶۱۲ | ۳/۶۳۳۸ | ۱/۵۱۳۶- | ۰/۶۶۵۹ | ۰/۸۵۷۸- |
| ۱۵ | ۰/۲۹۴۵ | ۱۲/۷۷۷۳ | ۳/۷۶۲۹ | ۱/۶۰۲۷- | ۲/۸۰۳۷ | ۱/۱۵۶۰ |
| ۱۶ | ۰/۲۹۴۵ | ۱۳/۰۳۸۳ | ۳/۸۳۹۸ | ۱/۷۴۵۳- | ۰/۷۱۱۹ | ۱/۰۴۵۹- |
| ۱۷ | ۰/۲۸۴۸ | ۱۳/۳۱۳۵ | ۳/۷۹۱۰ | ۱/۴۲۲۳- | ۰/۱۱۲۱- | ۱/۵۳۲۸- |
| ۱۸ | ۰/۳۳۶۰ | ۱۳/۱۴۷۹ | ۴/۴۱۸۲ | ۲/۴۹۰۸- | ۴/۵۱۲۳ | ۱/۹۰۹۲ |
| ۱۹ | ۰/۳۲۶۳ | ۱۲/۷۵۳۹ | ۴/۱۶۱۴ | ۲/۶۵۴۱- | ۰/۹۱۵۱ | ۱/۷۶۳۳- |
| ۲۰ | ۰/۳۳۶۰ | ۱۲/۵۲۹۰ | ۴/۲۱۰۲ | ۲/۰۷۴۲- | ۲/۸۱۳۵ | ۰/۶۸۱۰ |
| ۲۱ | ۰/۳۳۶۰ | ۱۱/۹۱۰۰ | ۴/۰۰۲۲ | ۲/۱۰۹۹- | ۱/۱۴۷۸- | ۳/۲۳۳۵- |
| ۲۲ | ۰/۳۱۴۰ | ۱۱/۸۳۱۲ | ۳/۷۱۵۰ | ۲/۸۵۳۵- | ۲/۲۲۶۳ | ۰/۶۹۰۷- |
| ۲۳ | ۰/۳۱۰۸ | ۱۲/۱۴۵۲ | ۳/۷۷۴۱ | ۲/۷۰۶۴- | ۱/۷۱۹۸ | ۱/۰۳۳۱- |
| ۲۴ | ۰/۳۱۰۸ | ۱۲/۱۰۷۳ | ۳/۷۶۲۳ | ۲/۶۱۶۳- | ۶/۵۳۵۷ | ۳/۷۴۸۵ |
| ۲۵ | ۰/۳۰۱۰ | ۱۲/۳۳۷۵ | ۳/۷۱۳۶ | ۲/۲۱۲۶- | ۲/۵۶۵۲- | ۴/۷۲۱۰- |
| ۲۶ | ۰/۲۰۵۸ | ۴/۶۳۹۸ | ۰/۹۵۴۷ | ۰/۶۸۰۴- | ۰/۳۰۲۱- | ۰/۹۸۰۴- |
| ۲۷ | ۰/۲۰۹۰ | ۳/۶۵۰۳ | ۰/۷۶۳۰ | ۰/۷۲۲۴- | ۰/۲۵۳۲- | ۰/۹۷۳۸- |
| ۲۸ | ۰/۱۹۶۰ | ۴/۱۲۴۷ | ۰/۸۰۸۵ | ۰/۹۱۳۲- | ۰/۰۴۴۱ | ۰/۸۶۹۵- |
| ۲۹ | ۰/۲۶۳۳ | ۶/۱۱۱۶ | ۱/۶۰۹۰ | ۲/۸۷۵۴- | ۱/۱۴۷۶ | ۱/۷۶۰۷- |
| ۳۰ | ۰/۲۷۳۰ | ۵/۳۵۷۶ | ۱/۴۶۲۷ | ۲/۷۷۶۳- | ۱/۵۸۸۵ | ۱/۲۳۱۹- |
| ۳۱ | ۰/۲۶۳۳ | ۵/۷۲۹۹ | ۱/۵۰۸۵ | ۲/۲۱۴۵- | ۱/۱۹۶۹ | ۱/۰۴۴۱- |
| ۳۲ | ۰/۳۵۷۱ | ۱۲/۱۰۶۴ | ۴/۳۲۳۱ | ۲/۱۲۸۳- | ۰/۱۲۴۱ | ۲/۰۰۶۹- |
| ۳۳ | ۰/۳۵۷۱ | ۱۲/۱۰۶۴ | ۴/۳۲۳۱ | ۲/۴۱۹۵- | ۰/۴۸۴۵ | ۱/۹۴۶۸- |
| ۳۴ | ۰/۳۴۴۱ | ۱۲/۳۷۴۹ | ۴/۲۵۸۱ | ۱/۴۲۹۹- | ۱/۵۶۱۱ | ۰/۱۰۹۰ |
| ۳۵ | ۰/۳۵۷۱ | ۱۲/۱۰۶۴ | ۴/۳۲۳۱ | ۲/۴۵۸۸- | ۱/۸۹۵۶ | ۰/۶۰۹۷- |
| ۳۶ | ۰/۲۸۸۰ | ۱۲/۷۲۷۹ | ۳/۶۶۵۶ | ۲/۳۶۱۱- | ۱/۳۱۰۷- | ۳/۶۴۰۸- |
| ۳۷ | ۰/۳۰۱۰ | ۱۲/۵۶۴۴ | ۳/۷۸۱۹ | ۲/۱۸۶۰- | ۲/۳۴۶۸ | ۰/۱۰۹۵ |
| ۳۸ | ۰/۲۸۸۰ | ۱۲/۹۰۵۸ | ۳/۷۱۶۹ | ۲/۳۴۰۳- | ۰/۳۳۹۵ | ۲/۰۰۸۷- |

۴ RBTS اصلاح شده حاصل از روش جدید نشان داده شده است و با نتایج حاصل از روش مونت‌کارلو مقایسه شده است. در قسمت محاسبه *SAIFI*، بیشترین درصد اختلاف در ریزشبکه ۵ به میزان ۲/۵۴- و

**جدول ۸: نتایج ارزیابی شاخص‌های نقاط بار برای باس ۴ اصلاح شده با استفاده از روش جدید و مقایسه با نتایج روش مونت‌کارلو**

| شماره ریزشبکه | SAIFI | SAIDI | CAIDI | ENS | درصد اختلاف در SAIFI | درصد اختلاف در SAIDI | درصد اختلاف در CAIDI | درصد اختلاف در ENS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰/۳۱۴۱ | ۳/۹۹۳۲ | ۱۲/۷۱۲۹ | ۱۳/۸۹۲۰ | -۲/۵۲۸۱ | -۲/۲۰۳۶ | ۳/۳۸۵۰ | ۰/۱۹۹۳ |
| ۲ | ۰/۲۱۵۹ | ۰/۹۷۸۰ | ۴/۵۲۸۷ | ۳/۳۸۹۴ | -۰/۹۷۷۱ | -۰/۹۵۵۴ | ۰/۰۳۵۰ | -۰/۸۹۸۲ |
| ۳ | ۰/۳۱۰۶ | ۴/۰۰۵۵ | ۱۲/۸۹۵۷ | ۱۳/۷۲۷۸ | -۱/۵۲۴۵ | -۱/۱۹۰۳ | -۰/۸۶۸۴ | -۱/۵۳۱۷ |
| ۴ | ۰/۳۲۶۶ | ۴/۰۵۱۴ | ۱۲/۴۰۳۲ | ۱۵/۹۹۸۷ | -۱/۸۳۸۰ | -۱/۹۸۶۷ | ۰/۴۴۶۵ | -۱/۰۰۹۰ |
| ۵ | ۰/۲۰۳۶ | ۰/۸۴۲۱ | ۴/۱۳۵۹ | ۲/۵۲۶۲ | -۲/۵۳۷۶ | -۱/۹۳۴۹ | ۰/۲۷۱۶ | -۲/۲۷۲۹ |
| ۶ | ۰/۲۶۶۵ | ۱/۵۲۶۷ | ۵/۷۲۸۵ | ۵/۳۳۴۵ | -۰/۵۹۲۸ | -۱/۳۴۶۲ | ۰/۱۷۴۲ | -۰/۴۱۸۳ |
| ۷ | ۰/۳۳۴۹ | ۴/۱۲۱۵ | ۱۲/۳۰۵۴ | ۱۴/۶۵۵۲ | -۱/۳۷۱۲ | ۰/۹۷۸۶ | ۰/۴۷۸۱ | -۰/۹۷۸۰ |
| کل سیستم | ۰/۲۸۱۸ | ۲/۷۸۸۳ | ۹/۲۴۴۳ | ۶۹/۵۲۳۹ | -۱/۶۲۸۸ | -۱/۱۳۶۹ | ۰/۷۰۴۲ | -۰/۸۵۹۵ |

کمترین در ریزشـــبکه ۶ به میزان ۰/۵۹- اســـت. در بخش SAIDI، بیشترین درصد اختلاف در ریزشبکه ۱ به میزان ۲/۲- درصد و کمترین در ریزشبکه ۲ به میزان ۰/۹۵- درصد است. در بخش *CAIDI*، بیشترین درصـــد اختلاف در ریزشـــبکه ۱ به میزان ۳/۳۸ درصـــد و کمترین در ریزشـبکه ۲ به میزان ۰/۰۳۵ درصـد اسـت. در بخش *ENS*، بیشـترین درصـــد اختلاف در ریزشـــبکه ۳ به میزان به ترتیب ۱/۵۳- درصـــد و کمترین در ریزشبکه ۲ به میزان ۰/۴۲- درصد است. مشاهده می‌شود که در این حالت هم تفاوت نتایج حاصـــل از روش جدید با روش مونت‌کارلو کمتر از نتایج به‌دست‌آمده در باس ۲ است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این کار ابتدا روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو ترتیبی با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که اولاً، میزان دقت این روش به نرخ خطا و مدت زمان شبیه‌سازی بستگی دارد. ثانیاً، توزیع خطا در این روش در دوره‌ها و بازه‌های مختلف زمانی یکنواخت نیست و از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند. ثالثاً، توزیع غیریکنواخت خطا باعث ایجاد خطا در ارزیابی قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع به‌ویژه شبکه‌های فعال خواهد شد. درنتیجه نتایج حاصل از روش مونت‌کارلو در شبکه‌های غیرفعال دقت بیشتری نسبت به نتایج همین روش در شبکه‌های فعال دارد. برای برطرف کردن مسائل روش مونت‌کارلو، یک روش جدید ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان در شبکه‌های فعال ارائه شد. در این روش، با در نظر گرفتن تعداد خطای ثابت، دوره شبیه‌سازی متغیر و تقسیم یکنواخت خطا در بازه‌های مختلف زمانی، مشکلات روش مونت‌کارلو برطرف شده است. مقایسه نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از روش مونت‌کارلو در ارزیابی قابلیت اطمینان باس ۲ RBTS اصلاح شده، نشان می‌دهد که روش جدید دارای جواب یکتا، دقت بالا و نسبت به‌روش مونت‌کارلو سرعت اجرای بالاتری دارد. این روش جدید به‌خوبی می‌تواند خلأهای روش مونت‌کارلو را پوشش بدهد و برای ارزیابی قابلیت اطمینان در شبکه‌های فعال مورد استفاده قرار بگیرد. نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از روش مونت‌کارلو در ارزیابی قابلیت اطمینان باس ۴ RBTS اصلاح شده، نشان می‌دهد که اولاً روش مونت‌کارلو در شبکه‌های پیچیده‌تر و بزرگ‌تر نتایج بهتری دارد ولی اشکال این روش در این شبکه‌ها زیاد بودن حجم محاسبات است. ثانیاً روش پیشنهادی دارای نتایج دقیقی است و هیچ محدودیتی ندارد و می‌تواند برای ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع خیلی بزرگ هم مورد استفاده قرار گیرد.

## پیوست ۱

**داده‌های باس ۲ و ۴ RBTS**

| باس | تعداد مشتری | بار متوسط (مگاوات) | پیک‌بار (مگاوات) | نوع بار | شماره نقاط بار |
|---|---|---|---|---|---|
| باس ۲ | ۲۱۰ | ۰/۵۳۵ | ۰/۸۶۶۸ | مسکونی | ۱،۲،۳،۱۰،۱۱ |
| باس ۴ | ۲۲۰ | ۰/۵۴۵ | ۰/۸۸۶۹ | | ۱-۴،۱۱-۱۳،۱۸-۲۱ ۳۲-۳۵ |
| باس ۲ | ۲۰۰ | ۰/۴۵ | ۰/۷۲۹۱ | مسکونی | ۱۲،۱۷-۱۹ |
| باس ۴ | ۲۰۰ | ۰/۵ | ۰/۸۱۳۷ | | ۵،۱۴،۱۵،۲۲،۲۳،۳۶،۳۷ |
| باس ۲ | ۱ | ۰/۵۶۶ | ۰/۹۱۶۷ | اداری | ۴،۵،۱۳،۱۴،۲۰،۲۱ |
| باس ۲ | ۱۰ | ۰/۴۵۴ | ۰/۷۵ | تجاری | ۶،۷،۱۵،۱۶،۲۲ |
| باس ۴ | ۱۰ | ۰/۴۱۵ | ۰/۶۷۱۴ | | ۶،۷،۱۶،۱۷،۲۴،۲۵،۳۸ |
| باس ۲ | ۱ | ۱ | ۱/۶۲۷۹ | مصرف‌کننده کوچک | ۸ |
| باس ۴ | ۱ | ۱ | ۱/۶۳ | | ۸،۱۰،۲۶،۲۷،۲۸،۲۹،۳۰ |
| باس ۲ | ۱ | ۱/۱۵ | ۱/۸۷۲۱ | مصرف‌کننده کوچک | ۹ |
| باس ۴ | ۱ | ۱/۵ | ۲/۴۴۵ | | ۹/۳۱ |

| باس | نقاط بار | شماره فیدرهای اصلی | طول (کیلومتر) |
|---|---|---|---|
| باس ۲ | ۱،۴،۱۰،۱۵،۱۷،۱۸ | ۴،۶،۹،۱۴ | ۰،۶ |
| باس ۴ | ۱،۳،۸،۱۴،۱۷،۱۹،۲۵،۲۸،۲۹ ۳۱،۳۴،۳۸ | ۵،۸،۱۰،۱۳،۱۸،۲۰،۲۶ | |
| باس ۲ | ۶،۱۱،۱۳،۱۶،۲۱ | ۱،۲،۳،۵،۷،۱۰،۱۲،۱۳ | ۰،۷۵ |
| باس ۴ | ۲،۵،۷،۹،۱۲،۱۳،۱۵،۱۶،۱۸ ۲۰،۲۱،۲۳،۲۴،۲۶،۳۰ | ۱،۴،۹،۲۱،۲۲،۲۵،۲۷ ۲۸،۲۹ | |
| باس ۲ | ۲،۳،۵،۷،۸،۹،۱۲،۱۴،۱۹،۲۰،۲۲ | ۸،۱۱ | ۰،۸ |
| باس ۴ | ۴،۶،۸،۱۰،۱۱،۲۲،۲۷،۳۲،۳۳ ۳۵،۳۷ | ۲،۳،۶،۷،۱۱،۱۲،۱۴ ۱۵،۱۶،۱۷،۱۹،۲۳،۲۴ | |

| نرخ خطا و زمان تعمیر المان‌های باس ۲ و ۴ | | |
|---|---|---|
| المان | نرخ خطا (خطا در سال) | زمان لازم برای تعمیر |
| ترانسفورماتور | ۰/۰۱۵ | ۲۰۰ |
| خطوط | ۰/۰۶۵ | ۵ |
| توربین‌های گازی | ۰/۱۵ | ۱۲ |
| توربین‌های بادی | ۰/۱۸ | ۲۴ |
| انرژی خورشیدی | ۰/۱ | ۳۶ |

| ادامه داده های باس ۲ و ۴ | | | | |
|---|---|---|---|---|
| نوع منبع تولید پراکنده و ظرفیت آن در باس ۲ | | | | |
| شمارهٔ ریزشبکه | انرژی خورشیدی مگاوات | توربین‌های بادی مگاوات | توربین‌های گازی مگاوات | ظرفیت باتری‌ها مگاوات ساعت |
| ۱ | ۲×۱ | ۲×۰/۴۵ | ۴×۱/۵ | ۰/۸۵ |
| ۲ | ۲×۰/۵ | ۲×۰/۴۵ | ۴×۰/۸ | ۰/۹۵ |
| ۳ | ۲×۱ | ۲×۰/۵ | ۴×۱/۲۵ | ۱/۰۵ |
| ۴ | ۲×۱ | ۲×۰/۵ | ۴×۱/۵ | ۰/۹ |

| نوع منبع تولید پراکنده و ظرفیت آن در باس ۴ | | | | |
|---|---|---|---|---|
| شمارهٔ ریزشبکه | انرژی خورشیدی مگاوات | توربین‌های بادی مگاوات | توربین‌های گازی مگاوات | ظرفیت باتری‌ها مگاوات ساعت |
| ۱ | ۲×۱ | ۲×۰/۴۵ | ۴×۱/۵ | ۰/۶۵ |
| ۲ | ۲×۰/۵ | ۲×۰/۴۵ | ۴×۱/۵ | ۰/۹ |
| ۳ | ۲×۱ | ۲×۰/۵ | ۴×۱/۴۵ | ۱ |
| ۴ | ۲×۱ | ۲×۰/۵ | ۴×۱/۶ | ۱/۲ |
| ۵ | ۲×۱ | ۲×۰/۴۵ | ۴×۱/۲۵ | ۰/۶ |
| ۶ | ۲×۰/۵ | ۲×۰/۴۵ | ۴×۱/۵ | ۰/۹۵ |
| ۷ | ۲×۱ | ۲×۰/۵ | ۴×۱/۵ | ۱ |

## پیوست ۲

### ضرایب ماهانه، ساعتی و آخر هفته بارها

| ضرایب ماهانه و آخر هفته | | | | ضرایب ساعتی بار اداری | | | ضرایب ساعتی بار صنعتی | | | ضرایب ساعتی بار مسکونی | | | ضرایب ساعتی بار تجاری | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| اداری | صنعتی | مسکونی | تجاری | زمستان | تابستان | بهار و پاییز | زمستان | تابستان | بهار و پاییز | زمستان | تابستان | بهار و پاییز | زمستان | تابستان | بهار و پاییز | ساعت |
| ۰/۹۲۳۴ | ۰/۹۲۲۳ | ۰/۹۳۲۱ | ۰/۸۶۵۴ | ۰/۲۶۲۵ | ۰/۳۶۷۵ | ۰/۲۶۲۵ | ۰/۳۰۹۰ | ۰/۴۱۲۰ | ۰/۳۱۵۰ | ۰/۴۰۰۰ | ۰/۵۷۰۰ | ۰/۴۹۵۰ | ۰/۳۰۰۰ | ۰/۳۳۰۰ | ۰/۳۱۲۵ | ۰۰–۰۱ |
| ۰/۹۶۴۵ | ۰/۹۶۷۵ | ۰/۹۶۴۳ | ۰/۹۳۶۷ | ۰/۲۶۲۵ | ۰/۳۶۷۵ | ۰/۲۶۲۵ | ۰/۳۰۹۰ | ۰/۴۱۲۰ | ۰/۳۱۵۰ | ۰/۳۵۰۰ | ۰/۵۰۰۰ | ۰/۴۴۰۰ | ۰/۳۰۰۰ | ۰/۳۳۰۰ | ۰/۳۱۲۵ | ۰۱–۰۲ |
| ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰/۲۶۲۵ | ۰/۳۶۷۵ | ۰/۲۶۲۵ | ۰/۳۰۹۰ | ۰/۴۱۲۰ | ۰/۳۱۵۰ | ۰/۳۵۰۰ | ۰/۵۰۰۰ | ۰/۳۸۵۰ | ۰/۳۰۰۰ | ۰/۳۳۰۰ | ۰/۳۱۲۵ | ۰۲–۰۳ |
| ۰/۹۸۷۵ | ۰/۹۸۷۶ | ۰/۹۸۶۵ | ۰/۹۸ | ۰/۲۶۲۵ | ۰/۳۶۷۵ | ۰/۲۶۲۵ | ۰/۳۰۹۰ | ۰/۴۱۲۰ | ۰/۳۱۵۰ | ۰/۳۵۰۰ | ۰/۵۰۰۰ | ۰/۳۸۵۰ | ۰/۳۰۰۰ | ۰/۳۳۰۰ | ۰/۳۱۲۵ | ۰۳–۰۴ |
| ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰/۲۶۲۵ | ۰/۳۶۷۵ | ۰/۲۶۲۵ | ۰/۳۰۹۰ | ۰/۴۱۲۰ | ۰/۳۱۵۰ | ۰/۳۵۰۰ | ۰/۶۰۰۰ | ۰/۳۸۵۰ | ۰/۳۰۰۰ | ۰/۳۳۰۰ | ۰/۳۱۲۵ | ۰۴–۰۵ |
| ۱ | ۱ | ۰/۹۸۱۲ | ۱ | ۰/۲۶۲۵ | ۰/۳۶۷۵ | ۰/۳۱۵۰ | ۰/۳۰۹۰ | ۰/۴۳۶۰ | ۰/۴۱۰۰ | ۰/۴۰۰۰ | ۰/۶۵۰۰ | ۰/۴۴۰۰ | ۰/۳۰۰۰ | ۰/۳۳۰۰ | ۰/۳۱۲۵ | ۰۵–۰۶ |
| ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰/۴۱۵۰ | ۰/۵۷۵۰ | ۰/۵۲۵۰ | ۰/۴۱۲۰ | ۰/۷۷۶۰ | ۰/۷۳۵۰ | ۰/۵۰۰۰ | ۰/۷۰۰۰ | ۰/۵۵۰۰ | ۰/۴۱۰۰ | ۰/۴۵۰۰ | ۰/۴۳۷۴ | ۰۶–۰۷ |
| ۰/۹۵۶۴ | ۰/۹۶۷۵ | ۰/۹۶۴۳ | ۰/۷۸۹۲ | ۰/۶۸۷۵ | ۰/۸۳۴۶ | ۰/۷۸۷۵ | ۰/۷۲۱۰ | ۰/۸۶۰۰ | ۰/۸۰۰۰ | ۰/۶۵۰۰ | ۰/۷۵۰۰ | ۰/۶۶۰۰ | ۰/۶۸۰۰ | ۰/۷۰۰۰ | ۰/۶۸۷۴ | ۰۷–۰۸ |
| ۰/۹۴۵۶ | ۰/۹۲۳۱ | ۰/۹۲۳۲ | ۰/۹۱۲۴ | ۰/۷۶۷۵ | ۰/۸۷۲۵ | ۰/۷۸۷۵ | ۰/۸۲۴۰ | ۰/۸۸۴۰ | ۰/۸۴۰۰ | ۰/۵۰۰۰ | ۰/۷۵۰۰ | ۰/۵۵۰۰ | ۰/۸۵۰۰ | ۰/۹۰۰۰ | ۰/۷۷۴۹ | ۰۸–۰۹ |
| ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰/۸۱۷۵ | ۰/۹۱۷۵ | ۰/۸۶۲۵ | ۰/۸۲۴۰ | ۰/۹۸۸۰ | ۰/۸۴۰۰ | ۰/۵۰۰۰ | ۰/۸۰۰۰ | ۰/۶۰۵۰ | ۰/۸۵۰۰ | ۰/۹۵۰۰ | ۰/۹۴۰۰ | ۰۹–۱۰ |
| ۰/۹۸۶۷ | ۰/۹۸۶۷ | ۰/۹۸۷۶ | ۰/۹۳۴۶ | ۰/۸۵۷۵ | ۰/۹۹۷۵ | ۰/۸۹۲۵ | ۰/۸۲۴۰ | ۱ | ۰/۸۴۰۰ | ۰/۶۰۰۰ | ۰/۸۵۰۰ | ۰/۷۱۵۰ | ۰/۹۵۰۰ | ۰/۹۹۰۰ | ۰/۹۵۴۳ | ۱۰–۱۱ |
| ۰/۹۱۳۵ | ۰/۹۲۳۵ | ۰/۹۶۷۵ | ۰/۹۶۵۴ | ۰/۸۵۷۵ | ۰/۹۹۷۵ | ۰/۸۹۲۵ | ۰/۸۲۴۰ | ۱ | ۰/۸۴۰۰ | ۰/۶۵۰۰ | ۰/۹۰۰۰ | ۰/۸۲۵۰ | ۰/۹۵۰۰ | ۱ | ۰/۹۷۳۴ | ۱۱–۱۲ |
| آخر هفته | آخر هفته | آخر هفته | آخر هفته | ۰/۸۰۴۵ | ۰/۹۲۷۵ | ۰/۸۱۲۵ | ۰/۶۱۸۰ | ۱ | ۰/۸۴۰۰ | ۰/۷۵۰۰ | ۰/۹۰۰۰ | ۰/۸۸۰۰ | ۰/۸۵۰۰ | ۰/۹۰۰۰ | ۰/۹۶ | ۱۲–۱۳ |
| ۰/۲۵ کل ۲۴ ساعت | ۰/۲۵ کل ۲۴ ساعت | روزهای عادی | ۰/۳ کل ۲۴ ساعت | ۰/۵۱۲۴ | ۰/۶۴۵۲ | ۰/۵۴۶۲ | ۰/۳۶۴۵ | ۰/۵۲۸۰ | ۰/۴۲۵۰ | ۰/۸۰۰۰ | ۰/۹۵۰۰ | ۰/۹۱۰۰ | ۰/۵۳۰۰ | ۰/۶۰۰۰ | ۰/۵۵۳۲ | ۱۳–۱۴ |
| | | | | ۰/۸۱۱۷۵ | ۰/۸۷۶۵ | ۰/۸۳۲۵ | ۰/۸۱۲۳ | ۰/۹۸۸۰ | ۰/۸۴۰۰ | ۰/۷۳۰۰ | ۰/۹۷۰۰ | ۰/۸۵۰ | ۰/۴۳۵۰ | ۰/۵۰۰۰ | ۰/۴۷۶۵ | ۱۴–۱۵ |
| | | | | ۰/۹۱۷۵ | ۱ | ۰/۸۷۲۵ | ۰/۸۲۴۰ | ۱ | ۰/۸۵۰۰ | ۰/۵۰۰۰ | ۰/۹۸۰۰ | ۰/۶۰۵۰ | ۰/۵۸۰۰ | ۰/۷۵۰۰ | ۰/۶۲۴۹ | ۱۵–۱۶ |
| | | | | ۰/۹۲۷۵ | ۱ | ۰/۹۵۷۵ | ۰/۸۲۴۰ | ۱ | ۰/۸۴۰۰ | ۰/۵۵۰۰ | ۰/۹۰۰۰ | ۰/۶۶۰۰ | ۰/۷۵۰۰ | ۰/۹۸۰۰ | ۰/۷۶۸۷ | ۱۶–۱۷ |
| | | | | ۰/۹۲۵۵ | ۱ | ۰/۹۶۷۵ | ۰/۹۲۷۰ | ۱ | ۰/۸۹۲۵ | ۰/۶۵۰۰ | ۰/۹۰۰۰ | ۰/۷۷۰۰ | ۰/۸۶۰۰ | ۱ | ۰/۸۷۴۹ | ۱۷–۱۸ |
| | | | | ۰/۹۶۶۴ | ۱ | ۰/۹۶۷۵ | ۰/۹۲۷۰ | ۱ | ۰/۹۴۵۰ | ۰/۸۰۰۰ | ۰/۹۷۰۰ | ۰/۸۲۵۰ | ۰/۹۱۰۰ | ۱ | ۰/۹۲۴۱ | ۱۸–۱۹ |
| | | | | ۰/۹۸۶۵ | ۱ | ۰/۹۴۵۰ | ۰/۷۲۷۰ | ۰/۸۳۶۰ | ۰/۷۴۵۰ | ۰/۸۵۰۰ | ۱ | ۰/۸۸۰۰ | ۰/۹۵۰۰ | ۱ | ۰/۹۵۵۶ | ۱۹–۲۰ |
| | | | | ۰/۹۷۷۵ | ۰/۹۹۷۵ | ۰/۹۷۷۵ | ۰/۳۰۹۰ | ۰/۴۱۲۰ | ۰/۳۱۵۰ | ۰/۸۶۰۰ | ۱ | ۰/۸۸۰۰ | ۰/۹۵۰۰ | ۱ | ۰/۹۷۶۴ | ۲۰–۲۱ |
| | | | | ۰/۳۴۷۵ | ۰/۳۶۷۵ | ۰/۳۶۷۵ | ۰/۳۰۹۰ | ۰/۴۱۲۰ | ۰/۳۱۵۰ | ۰/۸۵۰۰۰ | ۰/۹۵۰۰ | ۰/۸۱۵۰ | ۰/۷۰۰۰ | ۰/۹۲۰۰ | ۰/۸۳۴۹ | ۲۱–۲۲ |
| | | | | ۰/۲۵۲۷ | ۰/۳۶۷۵ | ۰/۲۸۲۵ | ۰/۳۰۹۰ | ۰/۴۱۲۰ | ۰/۳۱۵۰ | ۰/۵۰۰۰ | ۰/۷۰۰۰ | ۰/۶۰۵۰ | ۰/۳۰۰۰ | ۰/۳۳۰۰ | ۰/۳۷۴۹ | ۲۲–۲۳ |
| | | | | ۰/۲۵۲۷ | ۰/۳۶۷۵ | ۰/۲۸۲۵ | ۰/۳۰۹۰ | ۰/۴۱۲۰ | ۰/۳۱۵۰ | ۰/۴۵۰۰ | ۰/۶۵۰۰ | ۰/۵۵۰۰ | ۰/۳۰۰۰ | ۰/۳۳۰۰ | ۰/۳۱۲۵ | ۲۳–۲۴ |

## ۶- مراجع


[1] D. S. Orkand, “A Monte Carlo method for determining lower confidence limits for system reliability on the basis of sample component data,” No. ORDBB-VC-4, PICATINNY ARSENAL DOVER NJ, 1960.

[2] T. L. Burnett and W. A. Beverly, “System reliability confidence limits,” In Proceedings of the Seventh National Symposium on Reliability and Quality Control, pp. 118-128, 1961.

[3] S. J. Kamat and M. W. Riley, “Determination of reliability using event-based Monte Carlo simulation,” IEEE Transactions on Reliability 24, no. 1, pp. 73-75, 1975.

[4] H. Kumamoto, K. Tanaka, K. Inoue, “Efficient evaluation of system reliability by Monte Carlo method,” IEEE Transactions on Reliability, Vol R-26, pp. 311-315, Dec 1977.

[5] H. Kumamoto, T. Tanaka, and K. Inoue, “A new Monte Carlo method for evaluating system-failure probability,” IEEE Transactions on Reliability, Vol. 36, pp. 63-69, 1987.

[6] R. Billinton and L. Wenyuan, “Hybrid approach for reliability evaluation of composite generation and transmission systems using Monte Carlo simulation and enumeration technique,” IEE Proceedings-C, Vol.138, No.3, May 1991.

[7] M.V.F. Pereira, M. E. P. Maceira, G. C. Oliveira, L. M. V. G. Pinto, “Combining analytical models and Monte Carlo techniques in probabilistic power system analysis,” IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No.1, Feb. 1992.

[8] L. L. Levy and A. H. Moore, “A Monte Carlo technique for obtaining system reliability confidence limits from component test data,” IEEE Transactions on Reliability, no. 2, pp. 69-72, 1967.

[9] A. Sankarakrishnan and R. Billinton, “Sequential Monte Carlo simulation for composite power system reliability analysis with time varying loads,” IEEE/PES 1995 Winter Meeting, New York, N. Y. IEEE, 1995.

[۱۰] امیرحسین فرجی، مقداد توراندار کناری، محمد صادق سپاسیان، مهرداد ستایش‌نظر، « ارزیابی احتمالاتی ولتاژ شبکه‌های توزیع فعال با درنظرگرفتن همبستگی بین واحدهای فتوولتائیک»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۳، صفحه ۱۱۶۱-۱۱۶۹، پاییز ۱۳۹۶

[11] R. A. Bakkiyaraj and N. Kumarappan, “Evaluation of composite reliability indices based on non-sequential Monte Carlo simulation and particle swarm optimization,” In Evolutionary Computation, 2010 IEEE Congress on, pp. 1-5, 2010.


## زیرنویس‌ها


[12] G. Celli, G., E. Ghiani, G. G. Soma, and F. Pilo, “Active distribution network reliability assessment with a pseudo sequential Monte Carlo method,” In PowerTech, Trondheim, IEEE, pp. 1-8, 2011.

[13] A. S. N. Huda and R. Živanović, “Distribution system reliability assessment using sequential multilevel Monte Carlo method,” In Innovative Smart Grid Technologies-Asia, IEEE, pp. 867-872, 2016.

[14] T. Yan, W. Tang, Y. Wang, and X. Zhang, “Reliability assessment of a multi-state distribution system with microgrids based on an accelerated Monte-Carlo method,” IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 12**,** pp. 3221 – 3229, 2018.

[15] R. Hanna, Ryan, V. R. Disfani, and J. Kleissl, “Reliability evaluation for microgrids using cross-entropy Monte Carlo simulation”, In 2018 IEEE International conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, pp. 1-6, 2018.

[16] R. Billinton, and P. Wang, “Teaching distribution system reliability evaluation using Monte Carlo simulation,” IEEE Transactions on Power Systems, pp. 397-403, 1999.

[17] R. N. Allan, R. Billinton, I. Sjarief, L. Goel, and K. S. So, “A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results,” IEEE Transactions on Power systems, Vol. 6, no. 2, pp. 813-820, 1991.

[18] R. N. Allan, Reliability Evaluation of Power Systems, Springer Science & Business Media, 2013.

[۱۹] مجید نیری پور، سعید حسنوند، حسین فلاح زاده ابرقوئی، « برنامه ریزی توسعه ظرفیت با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم به‌منظور تبدیل شبکه توزیع موجود به ریزشبکه»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۲، صفحه ۷۶۱-۷۷۴ تابستان ۱۳۹۶

[20] S. Hasanvand, M. Nayeripour, E. Waffenschmidt, and H. F. Abarghouei, “A new approach to transform an existing distribution network into a set of micro-grids for enhancing reliability and sustainability,” Applied Soft Computing, pp.120-134, 2017.

[21] Monthly average solar radiation data from NASA surface meteorology and solar energy program (SSE), 2017, http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/.

[22] S. Wang, Z. Li, L. Wu, M. Shahidehpour and Z. Li, “New metrics for assessing the reliability and economics of microgrids in distribution system,” IEEE Transactions on Power Systems, pp.2852-2861, 2013.


## زیرنویس‌ها

1 Roy Billinton Test System
2 Mean Time To Failure
3 Time To failure
4 Time To Repair
5 System Average Interruption Frequency Index
6 System Average Interruption Duration Index
7 Customer Average Interruption Duration Index
8 Energy Not Supplied