

تخمین منحنی‌های شکست شبکه‌های هوایی فشارمتوسط جهت ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌های توزیع نیروی برق در معرض تهدید تند باد (مطالعه موردی: استان مازندران)

مسعود صادقی خمایی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر-دانشگاه شهید

بهشتی

محمد صادق سپاسیان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر-دانشگاه شهید

بهشتی

چکیده — به دلیل گرمایش جهانی و با توجه به تغییرات اقلیمی، بلایای طبیعی با شدت و گستره بیشتری در طول چند دهه گذشته رخ داده و انتظار می‌رود بر شدت و تعداد و بازه زمانی وقوع این رخدادها در آینده افزوده شود. منحنی‌های شکست‌پذیری برای محاسبه احتمالات خرابی شبکه هوایی توزیع در برابر تند بادهای بکارگرفته می‌شوند به منظور استفاده از منحنی‌های شکست در ارزیابی آسیب‌پذیری لازم است توابع و مدل‌های ریاضی این منحنی‌ها به عنوان یک ابزار قابل کاربرد در ارزیابی و مدل‌سازی تاب‌آوری شبکه‌های برق‌رسانی استخراج گردد. این مقاله با استفاده از برازش داده‌های تجربی موجود و گردآوری شده از بانک داده‌های یکی از شرکت‌های توزیع برق (استان مازندران) و سازمان هواشناسی اقدام به استخراج مدل ریاضی و منحنی شکست‌پذیری شبکه هوایی فشار متوسط نموده و در ادامه این توابع مورد اعتبارسنجی قرار گرفته و دقت آن توسط یکی از معیارهای ریاضی نیکویی برازش بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی — تاب‌آوری؛ تندباد؛ نیکویی برازش؛ منحنی شکست‌پذیری

۱. مقدمه

شبکه‌های برق رسانی، به دلیل وابستگی سایر زیرساختها به انرژی برق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند و به این دلیل سیاست‌گذاران در عرصه‌های مختلف کاهش آسیب‌پذیری شبکه‌های برق رسانی را جهت استمرار بخشی به فعالیت سایر زیرساختها به هنگام وقوع بحران برنامه‌ریزی می‌نمایند. مفهوم تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت، با مجموعه‌ای از صفات از جمله ایستادگی در برابر صدمات وارده، بازیابی سریع و قابلیت سازگاری و درس‌آموزی از رخدادها تبیین شده است و چارچوب مفهومی تاب‌آوری بر پایه همین مفاهیم توصیف شده است که پنج مشخصه کلیدی تحت عناوین: استحکام، کفایت منابع، افزونگی، بازیابی و قابلیت سازگاری در آن بطور برجسته‌ای قابل مشاهده است.

ارزیابی تاب‌آوری شبکه‌های برق غالباً شامل دو اقدام کلی زیر می‌باشد:

- ارزیابی کارایی و واکنش سیستم برق‌رسانی در مواجهه با تهدید وارده جهت ارزیابی پایداری.

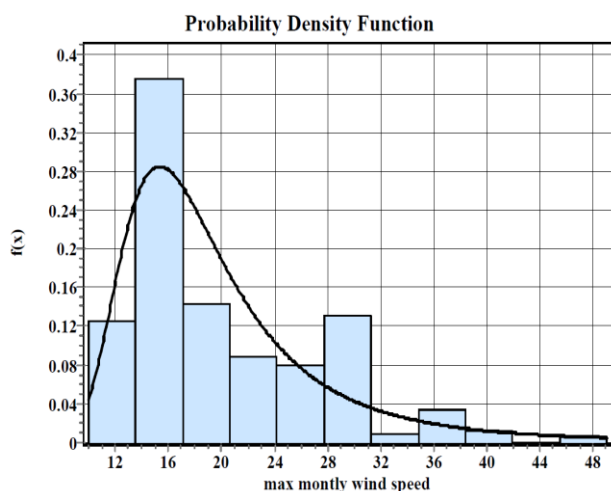
- مدل‌سازی بازیابی برای سنجش قابلیت بازیافت و ترمیم

سریع سیستم به حالت عملکرد عادی.

که در هر دو بخش کاربرد منحنی احتمالاتی شکست‌پذیری از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. هدف اصلی مطالعات انجام شده در این مقاله، بررسی تاثیر آسیب‌های وارد بر شبکه ناشی از آسیب وارده بر شبکه‌های هوایی است. و استخراج منحنی‌های شکست و آسیب‌پذیری در این مقاله از طریق روش برازش داده‌های تجربی و اطلاعات تاریخی انجام گرفته است.

در مروری بر ادبیات مرتبط با موضوع فوق ملاحظه می‌گردد که بخش قابل توجهی از پژوهش‌های انجام شده به یکی از دو اقدام کلی ذکر شده، یعنی ارزیابی واکنش سیستم یا مدل‌سازی بازیابی پرداخته‌اند از جمله مراجع [۳، ۲، ۱] به طور همزمان موضوع واکنش و بازیابی سیستم را مورد توجه قرار داده‌اند که این موضوع نیازمند درک صحیح و دقیق چگونگی اثرگذاری تهدید بر عملکرد و کارایی سیستم قدرت می‌باشد.

مدل شکست‌پذیری که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است در اصل از مفهوم کلی قابلیت اطمینان ساختاری برگرفته شده [۴] و ابزار مناسبی جهت تحلیل مستقل هر تجهیز در برابر



شکل ۱: منحنی توزیع چگالی احتمال حداکثر سرعت باد ماهیانه در بازه حدود چهار دهه (برداشت شده از ایستگاه هواشناسی)

جدول ۱: اطلاعات مربوط به طوفان‌های شدید حادث شده

جهت وزش	سرعت تند باد (m/s)		امور عملیاتی
	طوفان به تاریخ	طوفان به تاریخ	
شمال‌غرب- غرب	۲۲	۳۵	قائم‌شهر
شمال‌غرب- غرب	۲۶	۳۰	شمال بابل
شمال‌غرب- غرب	۲۸	۳۱	شمال ساری

۳. استخراج منحنی شکست و آسیب‌پذیری

منحنی شکست و آسیب‌پذیری از طریق برازش به دست می‌آید، برازش به مفهوم پیش‌بینی و بیان تغییرات یک متغیر بر اساس تغییرات متغیر دیگر می‌باشد. در برازش داده‌ها و استخراج منحنی‌های شکست‌پذیری از تابع نمایی مطابق رابطه ۱ استفاده شده است دلیل اصلی انتخاب این تابع کیفیت داده‌های متغیرهای برازش شونده می‌باشد بطوریکه مشاهده می‌شود روند تغییرات درصد مشترکین خارج از سرویس در رابطه با تغییرات متغیر ورودی (سرعت باد) روندی شتابان و افزایش‌دهنده می‌باشد، و بطور طبیعی در برازش داده‌ها، زمانی از توابع نمایی استفاده می‌شود که نرخ تغییر متغیر پیش‌بینی شونده در رابطه با متغیر ورودی، دارای روند شتابدار افزایش‌دهنده یا کاهش‌دهنده باشد. دلیل دیگر انتخاب تابع نمایی کاربرد گسترده آن در منابع قبلی است.

$$P_x = A_x \times e^{B_x \times V_w} \quad (1)$$

تهدید می‌باشد. منحنی‌های شکست بیانگر احتمال خرابی یک جزء در برابر اثر یک تهدید می‌باشند که با به‌کارگیری این منحنی‌ها و شبیه‌سازی مونت‌کارلو [۵] می‌توان به تخمین صحیحی از میزان خسارت وارده به شبکه برق در معرض تهدید طوفان نایل آمد [۶].

۲. ویژگی‌های اقلیمی و سرعت باد در منطقه مورد

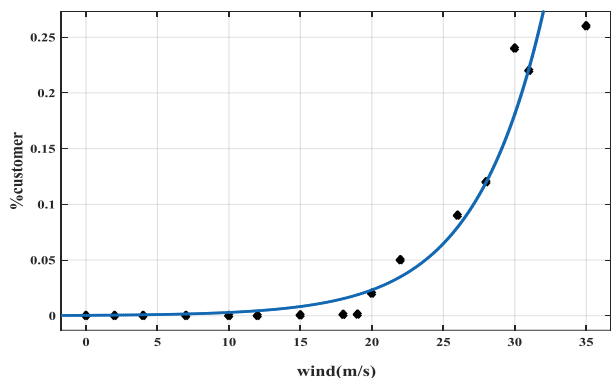
مطالعه

استان مازندران در شمال کشور ایران و با وسعتی معادل ۲۳۷۵۶ کیلومتر مربع واقع شده و به لحاظ اقلیمی دارای آب و هوای معتدل و مرطوب (معروف به معتدل خزری) می‌باشد.

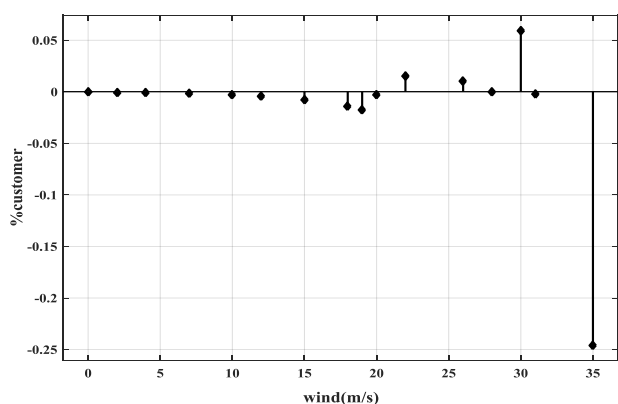
با ملاحظه نشریه شماره ۴۵۶ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی که گستره توزیع سرعت‌های باد را در مناطق مختلف کشور به سه دسته تفکیک نموده است ملاحظه می‌گردد که اقلیم مازندران در طبقه‌بندی مناطق بادخیز که حداکثر سرعت باد بیش از ۴۰ متر بر ثانیه در آن می‌وزد قرار داشته که بیانگر شرایط بادخیزی و مواجهه شبکه‌های برق با تهدید تندباد و طوفان می‌باشد [۷].

جهت تامین اطلاعات و آمار تاریخی با هدف استخراج منحنی‌های شکست، اطلاعات حداکثر سرعت باد (بادهای با زمان وزش بیش از سه ثانیه) به طور ساعت به ساعت استخراج و حداکثر سرعت باد ماهیانه ایستگاه‌های هواشناسی استان مازندران در طول چند دهه جمع‌آوری و مورد بررسی قرار گرفته است و مطابق شکل ۱ منحنی توزیع چگالی احتمال حداکثر سرعت باد به وسیله برازش آماری و نرم افزار تحلیلگر آماری در منطقه مورد مطالعه استخراج گردیده‌مچنین سوابق و اطلاعات مربوط به وقوع طوفان در دو رخداد جوی مطابق جدول ۱ جمع‌آوری گردید.

با توجه به موارد ذکر شده فوق امورهای عملیاتی قائمشهر، شمال بابل و شمال ساری به دلیل نزدیکی و هم‌جواری آن‌ها و همسان بودن رژیم آب و هوایی و مشابهت در ابعاد مختلف ذکر شده فوق به عنوان مناطق مورد مطالعه انتخاب گردیدند.



شکل ۲: منحنی آسیب پذیری مشترکین تحت تاثیر تهدید باد نمودار مقدار پسماند داده‌های تجربی حاصل از برازش، مربوط به درصد مشترکین خارج از سرویس



شکل ۳: نمودار مقدار پسماند داده‌های تجربی حاصل از برازش، مربوط به درصد مشترکین خارج از سرویس

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2)$$

SSE عبارتست از مجموع مربعات خطا، y_i عبارتست از مقدار داده‌های تجربی، \bar{y} عبارت از مقدار داده‌های تخمین زده شده در برازش، \bar{y} مقدار متوسط داده‌های تجربی و چنان‌که ملاحظه می‌گردد مقادیر بدست آمده در جدول ۳ از وضعیت قابل قبولی برخوردار می‌باشد.

جدول ۵: محاسبه معیار نیکویی برازش منحنی آسیب پذیری مشترکین تحت تاثیر تهدید باد

مقدار محاسبه شده معیار	معیار نیکویی برازش
3.93×10^{-3}	SSE

در رابطه $V_w, 1$ سرعت باد و A_x و B_x ضرایب مربوط شکست و وقفه در سرویس برق‌رسانی می‌باشد که بطور معمول از طریق تجربی و با بررسی داده‌های تاریخی به دست می‌آیند. در جدول شماره ۲ اطلاعات خسارات وارده به شبکه‌های برق امور قائمشهر، شمال بابل و شمال ساری در رابطه با طوفان‌های به تاریخ ۸۷/۷/۷ و ۹۵/۶/۱۲ درج گردیده است. داده‌های ثبت شده در دو بحران ذکر شده در ترکیب با اطلاعات شرایط معمول تشکیل دهنده داده‌های لازم برازش جهت استخراج منحنی‌های شکست و آسیب‌پذیری هستند.

جدول ۲: داده‌های تاریخی خسارات وارد شده در دو بحران مورد بررسی

امور عملیاتی	خسارات وارده	طوفان به تاریخ ۹۵/۶/۱۲	طوفان به تاریخ ۸۷/۷/۷
قائم‌شهر	درصد مشترکین تحت تاثیر	۲۶	۵
	سرعت تند باد	۳۵	۲۲
شمال بابل	درصد مشترکین تحت تاثیر	۲۴	۹
	سرعت تند باد	۳۰	۲۶
شمال ساری	درصد مشترکین تحت تاثیر	۲۲	۱۲
	سرعت تند باد	۳۱	۲۸

بر پایه اطلاعات موجود و به وسیله برازش با روش غیرخطی حداقل مربعات، تقویت شده با روش لیون برگ مارکوارت ، مطابق شکل ۲ برازش انجام و صحت و دقت آن به وسیله تحلیل پسماند شکل ۳ و معیارهای نیکویی برازش مطابق رابطه ۲ مورد تحقیق و اعتبارسنجی قرار گرفته است و در نهایت تابع نمایی شکست پذیری شبکه فشارمتوسط هوایی بر اساس مشترکین خارج شده از سرویس با بکارگیری روش توصیف شد استخراج گردیده است.

شده در مناطق همگون می‌باشد. در عین حال با بدست آمدن تابع ریاضی آسیب پذیری مشترکین امکان بهره‌گیری از این مدل‌های ریاضی جهت بررسی تاب‌آوری و واکنش شبکه‌های توزیع در برابر تهدید طبیعی طوفان فراهم گردید که بطور معمول این توابع به عنوان یکی از ورودی‌های روش مونت‌کارلو جهت ارزیابی و پیش‌بینی رخداد-های آتی قابل به‌کارگیری می‌باشد.

منابع

- [1] M. Ouyang and L. Dueñas-Osorio, "Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems," *Structural Safety*, vol. 48, pp. 15-24, 2014.
- [2] R. Francis and B. Bekera, "A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 121, pp. 90-103, 2014.
- [3] G. P. Cimellaro, A. M. Reinhorn and M. Bruneau, "Framework for analytical quantification of disaster resilience," *Engineering Structure*, vol.32, no. 11, pp. 3639-3649, 2010.
- [4] F. Casciati and L. Faravelli, "Fragility Analysis of Complex Structural Systems," *Research Studies Press*, Taunton, MA, 1991.
- [۵] امیرحسین فرجی، مقدار تورانداز کناری، محمدصادق سپاسیان و مهرداد ستایش‌نظر، «ارزیابی احتمالاتی و لتاژ شبکه‌های توزیع فعال با در نظر گرفتن همبستگی بین واحدهای فتوولتائیک»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۳، صفحه ۱۱۶۱-۱۱۶۹، پاییز ۱۳۹۶.
- [6] S. Espinoza, M. Panteli, P. Mancarella and H. Rudnick, "Multi-Phase assessment and adaption of power systems resilience to natural hazards," *Electric Power System Research*, vol. 136, pp. 352-361, 2016.
- [۷] مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست‌ها، خطوط توزیع و انتقال طبقه بندی شرایط اقلیمی و محیطی، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، نشریه شماره ۴۶۵، ۱۳۸۷.

رابطه ۳ مربوط به تابع نمایی منحنی برازش یافته شکل ۲ می‌باشد و این رابطه جهت انجام مطالعات آسیب پذیری معرفی و قابل به‌کارگیری است.

$$P_{customer} = \min(3.79 * 10^{-4} * e^{0.2056 * xi} . 1) \quad (3)$$

که در آن $P_{customer}$ عبارتست از احتمال تجمعی مشترکین از سرویس خارج شده یا تحت تاثیر قرار گرفته در برابر تهدید طوفان و xi سرعت وزش تند باد می‌باشد.

در مروری بر نتایج حاصله ملاحظه می‌شود که آستانه آسیب-پذیری مشترکین در بادی با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه می‌باشد و این موضوع حاکی از آستانه پایین آسیب پذیری و خروج از سرویس مشترکین در برابر تهدید باد می‌باشد همچنین ملاحظه می‌گردد که در حداکثر مقدار بروز آسیب که در سرعت ۳۵ متر بر ثانیه اتفاق افتاده است ۲۶٪ مشترکین تحت تاثیر خاموشی بلندمدت قرار گرفته‌اند که این موضوع حکایت از وجود ضعف و نبود پایداری شبکه‌های هوایی توزیع در برابر تهدید تندباد و طوفان می‌باشد. بر بررسی‌های میدانی و تحقیقات انجام شده در خصوص وقوع رخداد طوفان به تاریخ ۹۵/۶/۱۲ بیانگر وجود نقش تاثیرگذار شبکه‌های توزیع در تاب آوری شبکه برق‌رسانی می‌باشد، وجود اشکال در سیستم نگهداری و تعمیرات علی‌الخصوص ضعف جدی در شاخه‌زنی و پاک‌سازی شبکه، وجود ضعف در اتصالات الکتریکی، برخورد فازها به هم، سقوط و برخورد اشیاء خارجی به شبکه در کنار شکستگی پایه‌ها در شبکه‌های توزیع فشارمتوسط و فشارضعیف از عوامل تاثیرگذار در افزایش درصد مشترکین تحت تاثیر می‌باشند که منحنی آسیب پذیری مشترکین تحت تاثیر تهدید باد، تخمین مناسبی از میزان تاثیرگذاری این دست عوامل را فراهم می‌نماید. شبکه‌های فوق توزیع و انتقال نیز در کاهش تاب‌آوری کلی شبکه‌های برق‌رسانی تاثیرگذار می‌باشند که خارج از حوزه بررسی این مقاله می‌باشند ولی با توجه به مناسب بودن وضعیت طراحی، اجرا و بهره‌برداری و انطباق بیشتر آن با استانداردها، این شبکه‌ها از تاب آوری مطلوب‌تری به نسبت شبکه‌های توزیع برخوردار هستند.

۴. نتایج

در این مقاله با بهره‌گیری از داده‌های تاریخی و تجربی و با تکیه بر روش‌های برازش آماری، منحنی شکست‌پذیری پایه‌های شبکه‌های فشارمتوسط و منحنی آسیب‌پذیری مشترکین تحت تاثیر تند باد و طوفان استخراج گردید. تحلیل پسماند و معیارهای نیکویی برازش جهت اعتبارسنجی و تشخیص کیفیت منحنی‌های برازش شده به‌کار گرفته شد که نتایج حاصل بیانگر کیفیت مناسب برازش‌های انجام