مطالعه تاب آوری سیستم های قدرت تحت تاثیر تغییرات شدید آب و هوا و اقلیم

محسن رجبی فومشی[۱]، مهشید کلانتری[۲]، سروش عبدالملکی[۳]، حسن رجبی فومشی[۴]، محسن ژاله[۵]، عماد حسنی ملکشاه[۶]

[۱] مدیر عامل شرکت توسعه دهندگان آسمان فرید، مازندران، قائمشهر، Tadafuav@gmail.com

[۲] کارشناس ارشد الکترونیک، واحد تحقیق و توسعه، شرکت توسعه دهندگان آسمان فرید، مازندران، قائمشهر، mahshid.kalantarii@gmail.com

[۳] کارشناس ارشد صنایع، واحد تحقیق و توسعه، شرکت توسعه دهندگان آسمان فرید، مازندران، قائمشهر، soroushabdolmalaki92@gmail.com

[۴] کارشناس ارشد برق، نیروگاه شهید سلیمی، مازندران، نکا، foomeshi@gmail.com

[۵] کارشناس ارشد مکانیک، واحد تحقیق و توسعه، شرکت توسعه دهندگان آسمان فرید، مازندران، قائمشهر، mohsenzhale19911@gmail.com

[۶] کارشناس ارشد مکانیک، واحد تحقیق و توسعه، شرکت توسعه دهندگان آسمان فرید، مازندران، قائمشهر، emadhasani1993@gmail.com

چکیده

یک محرکه ا صلی برای تو سعه سیستم‌های انرژی پایدارتر، کاهش اثرات تغییرات اقلیمی ا ست که می‌تواند نا شی از افزایش تعدد تغییرات، شدت تغییرات و مدت‌زمان تغییرات شدید آب‌وهوایی باشد. در میان سایر اثرات، آب‌وهوای شدید دارای تأثیر قابل‌توجهی روی زیر ساخت‌های ا سا سی ا ست و یکی از دلایل ا صلی اختلال‌های سرتا سری برق در کل دنیا شناخته می شود. در واقع، قطع برق نا شی از آب‌وهوا اغلب تأثیر قابل‌توجهی دا شته و مدت‌زمان زیادی نیز به طول می‌انجامد، از این رو، افزایش انعطاف‌پذیری شبکه در مقابل این‌چنین رخدادهایی مطلوب ا ست. در این را ستا، این مقاله ابتدا در مورد اثرات تغییرات آب‌وهوا و اقلیم روی قابلیت اطمینان و بهره‌برداری مؤلفه‌های سیستم قدرت بحث می‌کند. از آنجایی که مدل‌سازی اثر تغییرات آب‌وهوایی یک هدف دشوار است، به خاطر ماهیت غیرقابل‌پیش‌بینی و تصـــادفی آن، روش‌های موجود ارائه می‌گردد تا درک بهتری از روش‌های اصـــلی مدل‌ســـازی ارائه دهد و چالش‌ها و پیش‌نیازهای ارزیابی اثرات جوی را روی تعدد و مدت‌زمان خامو شی‌های سیستم قدرت بر شمارد. سپس، مفهوم نوظهور تاب‌آوری در مورد سیستم قدرت به‌عنوان یک زیر ساخت حیاتی مورد بحث قرار می‌گیرد که شامل طرح‌های حفاظتی مختلف برای تقویت انعطاف‌پذیری سیستم‌های قدرت در مقابل رخدادهای شدید آب‌وهوایی است.

کلمات کلیدی

تغییرات اقلیمی، خاموشی‌های سیستم قدرت، قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیر، تاب‌آوری، آب‌وهوا

۱- مقدمه

محرکه ا صلی تو سعه سیستم‌های پایدار انرژی، کاهش اثرات تغییرات اقلیمی است که شامل وقوع حوادث شدید آب‌وهوایی می‌شود. در میان ســـایر اثرات، شـــرایط حاد آب‌وهوایی مانند تندرها و طوفان‌ها یکی از اصـــلی‌ترین دلایل اختلالات برق در ســـراســـر جهان به شـــمار می‌روند. به‌عنوان مثال، در ایالات‌متحده، هزینه ســـالانه خاموشـــی‌های مربوط به آب‌وهوا از ۲۰ تا ۵۵ میلیارد دلار ا ست [۱] و روند وقایعی از این د ست نشان می‌دهد که تعدد آن‌ها در ۳۰ سال گذ شته با افزایش چشمگیری در دهه ۲۰۰۰ روبرو بوده اســـت [۲]. این وقایع مخرب را می‌توان بر اســـاس تعداد مشـــترکین قطع شـــده و مدت‌زمان و تعدد این رویداد به د سته‌های مختلف، یعنی تأثیرات ناچیز، متو سط، جدی، عمده و شدید طبقه‌بندی کرد [۳]. در حقیقت، آب‌وهوای شـــدید از ســـال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ تقریباً ۸۰٪ قطع برق را در مقیاس بزرگ باعث شده ا ست [۲]. پیش‌بینی می شود تغییرات آب‌وهوا باعث افزایش بیشتر تعدد، شدت و

مدت‌زمان وقایع شدید آب‌وهوایی شود [۴] که عمدتاً نا شی از افزایش مداوم غلظت گازهای گلخانه‌ای (GHG) است.

سیستم‌های برق از جمله زیرساخت‌های مهم جوامع مدرن هستند، بنابراین تقویت انعطاف‌پذیری آن‌ها در برابر آب‌وهوای شدید و هرگونه چالش‌های آینده که ممکن است به دلیل تغییر آب‌وهوا به وجود آید، بسیار مهم است. شبکه‌های انرژی آتی باید با کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، پاک‌تر شوند تا میزان و تأثیر تغییرات آب‌وهوا را کاهش دهند، اما باید در برابر شوک‌های خارجی غیر قابل پیش‌بینی مانند آب‌وهوای شدید نیز مقاومت کنند. این هدف، به توسعه شبکه‌های به‌اصطلاح «کم کربن» منجر می‌شود که هم اهداف کاهش کربن را شامل می‌شود و هم اهداف افزایش انعطاف‌پذیری را در خود جای می‌دهد، همان‌طور که در [۵] بحث شده است.

مدل‌سازی تأثیر آب‌وهوا بر قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است و درنتیجه روش‌های بی‌شماری در دهه‌های گذشته ارائه شده است. در این مقاله، مروری بر این روش‌ها به‌منظور درک روش‌های اصلی مدل‌سازی، محدودیت‌ها و چالش‌ها در ارزیابی تأثیر آب‌وهوا بر تعداد دفعات و شدت خاموشی سیستم قدرت ارائه شده است. علاوه بر این، در این مقاله اقدامات مربوط به بهبود انعطاف‌پذیری شبکه در مقابل بروز فجایع طبیعی، آمادگی و عکس العمل سیستم ارائه شده است. این اقدامات را می‌توان در دسته پیشگیرانه و اصلاحی کوتاه‌مدت، یعنی قبل از بروز (مثلاً روزها یا هفته‌ها)، در حین بروز رخداد و بعد از رخداد آب‌وهوایی تقسیم کرد. اقدامات پیشگیرانه بلندمدت مربوط به برنامه‌ریزی و تقویت شبکه برای انطباق و مقاومت در برابر وقایع آب‌وهوایی آینده است.

سپس، در این مطالعه یک چارچوب تحقیقاتی کلی برای مدل‌سازی با هدف توسعه مطالعات مرتبط با تاب‌آوری سیستم در مقابل آب‌وهوا ارائه شده است. به طور کلی، در چنین مطالعاتی سه مدل مورد نیاز است، یعنی مدل آب‌وهوا، مدل مؤلفه‌های سیستم و مدل خود سیستم. این مدل‌ها برای تخمین شاخص‌های انعطاف‌پذیری سیستم که تحت تأثیر آب‌وهوا قرار دارند، با هم در تعامل هستند.

۲- تأثیر تغییرات آب‌وهوایی و اقلیمی بر مؤلفه‌های سیستم قدرت

وقایع شدید آب‌وهوا تأثیر چشمگیری بر قابلیت اطمینان و عملکرد مؤلفه‌های الکتریکی دارد و به نوبه خود تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری کل زیرساخت‌های برق را تحت تأثیر قرار داده و میزان آن نیز به شدت آب‌وهوا بستگی دارد [۶]:

- درجه حرارت بالا و موج گرما قابلیت انتقال خطوط انتقال را محدود کرده و باعث افزایش تلفات انرژی و خرابی خط می‌شود.
- وزش باد شدید در هنگام طوفان می‌تواند منجر به بروز خطا و آسیب به خطوط انتقال و توزیع هوایی شود، یا باعث آوار شدن خطوط یا حتی سقوط دکل‌ها در شرایط وزش باد شدید گردد.
- موج سرما، برف سنگین و انباشت یخ نیز می‌تواند باعث خرابی خطوط فرعی و دکل‌ها شود. در شرایط انجماد، ممکن است یخ و برف روی عایق‌ها جمع شود و عایق‌ها را مسدود کرده و مسیر هدایت برق را فراهم کند و درنتیجه خطاهایی را به وجود می‌آید.
- برخورد صاعقه به کابل‌های هوایی یا در نزدیکی آن نیز می‌تواند باعث ایجاد خطای اتصال کوتاه شود، این امر باعث عملکرد سیستم حفاظت الکتریکی و قطع ارتباط خطوط خواهد شد. این‌گونه خطاها معمولاً زودگذر هستند و به همین دلیل به سرعت تحت سرویس قرار می‌گیرند. با این وجود، ولتاژ ناشی از برخورد صاعقه ممکن است در امتداد خط منتقل شده و باعث آسیب به تجهیزات، مانند بالههای ترانسفورماتور شود.
- باران و یخزدگی برای خطوط انتقال هوایی خطر خاصی محسوب نمی‌شود، بلکه تجهیزات جانبی پست، از قبیل سوئیچ‌ها و محفظه‌های کنترل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اما ترکیب باران با رگبارهای شدید یا رعدوبرق می‌تواند تهدیدی جدی برای خطوط هوایی باشد.

همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود که تأثیر آب‌وهوای شدید می‌تواند حوادث مستقیمی را در پی داشته باشد، ازجمله سقوط دکل به دلیل وزش باد شدید، یا حوادث غیرمستقیم مؤثر بر عملکرد طبیعی اجزای الکتریکی، مانند گرما و موج سرما.

۳- ارزیابی اثرات آب‌وهوا بر عملکرد و پیامدهای انعطاف‌پذیری سیستم قدرت

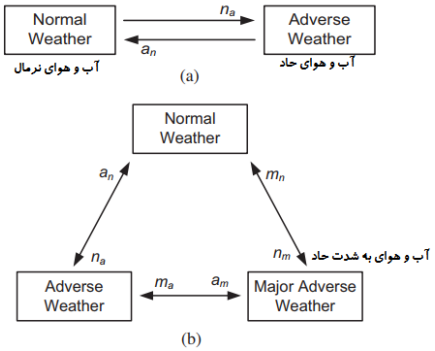
مدل سازی تأثیر آب‌وهوا بر قابلیت اطمینان و عملکرد اجزای سیستم قدرت و در مقابل روی انعطاف پذیری زیرساخت‌های برق به دلیل ماهیت تصادفی و غیرقابل‌پیش‌بینی آب‌وهوا، امری دشوار است. در این بخش مروری بر روش های موجود در این زمینه برای شناسایی رویکردها، چالش‌ها و محدودیت‌های مدل‌سازی ارائه شده است.

۳-۱- روش مدلسازی مارکوف

اکثر روش‌های موجود در مقالات برای ارزیابی تأثیر آب‌وهوا روی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت از تکنیک‌های تحلیلی استفاده می‌کنند که روش مارکوف در میان آن‌ها، تکنیک غالب تحلیلی است. مفاهیم اصلی مربوط به خرابی‌های ناشی از آب‌وهوا اولین بار در [۷] معرفی شد. در [۸]، یک مدل آب‌وهوای دو حالته برای مدل‌سازی پدیده تجمیع خرابی در تجهیزات موازی (شکل a۱) ارائه شده است. مفهوم «تجمیع خرابی به دلیل آب‌وهوای نامطلوب» به افزایش شدید میزان خرابی قطعات و

احتمال هم‌زمانی خرابی قطعات در شرایط بسیار حاد، مانند آب‌وهوای نامطلوب اشاره دارد. این شرایط نباید با حالت معمول یا خرابی‌های مرسوم اشتباه گرفته شود.

پروسه مارکوف توسط *Billinton* و *Bollinger* در [۷] مورد استفاده قرار گرفته است تا تأثیر آب‌وهوا را در پیکربندی‌های موازی ساده ارزیابی کند، در این پروسه، از مدل آب‌وهوای دو حالته برای نشان دادن تأثیر تجمیع خرابی استفاده شده است. مدل آب‌وهوا دو حالته متداول‌ترین مدل [۹] است که عمدتاً به دلیل سادگی آن است. با استفاده از این مدل، شرایط آب‌وهوایی به دو حالت طبیعی و نامطلوب تقسیم می‌شوند. نرخ خرابی و تعمیر در هر شرایط آب‌وهوایی متفاوت اما ثابت است. این مسئله، دو مجموعه شاخص قابلیت اطمینان را نتیجه می‌دهد که می‌توان با احتمال انتقال بین دو حالت آب‌وهوا آن‌ها را سنجید.



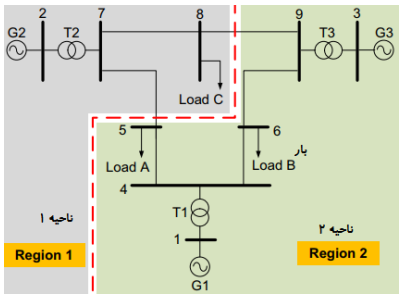
شکل (۱) : مدل‌های آب‌وهوایی مارکوف (a) مدل دو حالته آب‌وهوا (b) مدل سه حالته آب‌وهوا

همان‌طور که در [۱۰] استدلال شده است، شاخص‌های قابلیت اطمینان به دست آمده با استفاده از مدل آب‌وهوایی دو حالت بسیار خوش‌بینانه است. درنتیجه، وضعیت آب‌وهوایی سومی تحت عنوان هوای نامساعد حاد، در [۱۱] بر اساس استاندارد *IEEE 346* اضافه شده است تا بتواند تغییرات شدت آب‌وهوا را بهتر مدل‌سازی کند (شکل b۱). یک نمودار فضای حالت کلی برای مدل آب‌وهوایی چندحالته مارکوف در [۱۲] ارائه شده است که مطابق با این نمودار، حتی مدل آب‌وهوایی سه حالت نیز ممکن است برای نمایش دامنه وسیع شرایط آب‌وهوا ناکافی باشد.

۳-۲- نکاتی در مورد نواحی آب و هوایی

معمولاً فرض بر این است که سیستم در هر زمان معین با مدل‌سازی شرایط آب‌وهوایی به‌عنوان یک رخداد ساکن، در معرض شرایط آب‌وهوایی یکسان قرار می‌گیرد. این فرض، پیچیدگی روش مدل‌سازی را کاهش می‌دهد زیرا جنبه‌های آب‌وهوایی منطقه‌ای در آن در نظر گرفته نشده است. این یک فرض معتبر برای سیستم‌های توزیع است زیرا یک منطقه جغرافیایی کوچکی را پوشش می‌دهد و معمولاً در هر زمان معین، سیستم در معرض شرایط آب‌وهوایی یکسانی قرار دارد. با این حال، در مطالعات انعطاف‌پذیری سیستم انتقال که یک منطقه جغرافیایی بزرگی را پوشش می‌دهد، این فرض کاربرد ندارد و رخداد آب‌وهوا در طول شبکه انتقال به‌صورت متوالی با زمان تغییر می‌کند. *Billinton* و *Wenyuan* [۱۳] نشان می‌دهند که این فرض سبب می‌شود که در مدل‌سازی مسئله مورد مطالعه و در تخمین شاخص‌های عدم‌کفایت سیستم در شرایط بدبینانه، اشتباه صورت گیرد.

تقسیم شبکه به مناطق آب‌وهوایی مختلف، روشی دقیق‌تر و عملی‌تر است. تقسیم دلخواه سیستم تست قابلیت اطمینان ۹ باس *IEEE* به دو منطقه آب‌وهوایی در شکل (۲) نشان داده شده است. آب‌وهوا در هر منطقه یکسان فرض می‌شود، اما بین نواحی مختلف، طی زمان و مکان تغییر می‌کند. استفاده از مناطق آب‌وهوایی به مدل‌سازی یک رویداد آب‌وهوایی به روشی واقع‌گرایانه‌تر کمک می‌کند و تخمین انعطاف‌پذیری منطقه را در برابر رخدادهای نوسانی آب‌وهوا، ساده‌تر می‌نماید.



شکل (۲) : تقسیم یک شبکه برق به نواحی آب‌وهوایی

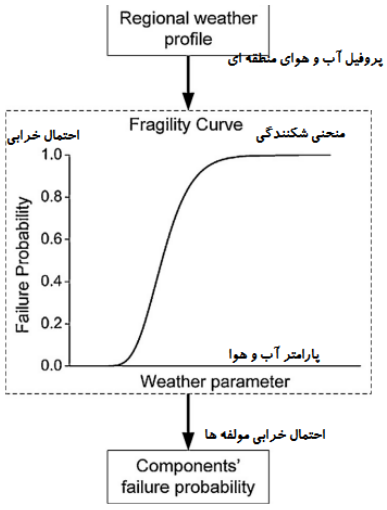
۳-۳- مدلسازی تأثیر آب‌وهوا روی نرخ خرابی مؤلفه‌های سیستم قدرت

محیطی که تجهیزات انتقال و توزیع در آن قرار دارد، تأثیر قابل‌توجهی روی قابلیت اطمینان آن‌ها و به‌ویژه روی میزان خرابی آن‌ها خواهد داشت. علاوه بر این، ممکن است که یک خط انتقال طولانی از مناطق مختلف آب‌وهوایی عبور کند و شرایط آب‌وهوایی مختلفی را در هر منطقه تجربه کند. به‌عنوان مثال، خطوط ۵-۷ و ۸-۹ از شکل ۲ از دو منطقه آب‌وهوایی عبور می‌کنند. بنابراین، تأثیر آب‌وهوا در سراسر خط انتقال از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت خواهد بود. تعیین نرخ خرابی قطعات تحت تأثیر آب‌وهوا با دقت بالا در مدل‌سازی تأثیر آب‌وهوا بر کل زیرساخت‌های انرژی از اهمیت حیاتی برخوردار است.

در مرجع [۹]، خط انتقال به بخش‌هایی تقسیم می‌شود که طبق فرض به شکل سری به هم وصل هستند. بر اساس بخش‌بندی خط در هر منطقه آب‌وهوایی و بر اساس فاکتور استرس خرابی برای بخش‌های موجود در شرایط هوای نامطلوب، ضرایب نرخ خرابی برای سیستم اعمال

می‌شود. نرخ خرابی کلی خط پس از آن، با جمع نرخ خرابی بخش‌های مختلف خط تعیین می‌شود، زیرا فرض بر این است که در بخش‌های خط با هم سری هستند. *Liu* و *Singh* [۱۴] از روش میانگین وزنی استفاده کرده‌اند تا ضریب افزایشی نرخ خرابی (*IMFR*) را برای هر قطعه خط تعیین کنند که خود این ضریب به بخش‌بندی خط در هر منطقه آب‌وهوا بستگی دارد. *Barben* [۱۵] فرض کرده است که هر بخش خط می‌تواند به طور مستقل خراب شود و برای جلوگیری از انتشار قطعی‌های مکانیکی یا برقی به بخش‌های مجاور هر بخش به شکل خاص، طراحی شده است. از این رو، با جمع نرخ خرابی بخش‌های مختلف خط، نرخ خرابی کل خط به طور ساده محاسبه می‌شود.

یک روش دیگر، تخمین نرخ خرابی هر بخش در هر منطقه آب‌وهوایی و سپس انتخاب بدترین (بالاترین) نرخ خرابی به‌عنوان نماینده خط است. همچنین، می‌توان از مفهوم منحنی‌های شکنندگی استفاده کرد که بیانگر احتمال خرابی هر یک از مؤلفه‌های سیستم، مانند خطوط انتقال و دکل یا مراکز توزیع، برای هر پارامتر منفرد یا ترکیبی از پارامترهای آب‌وهوایی، مانند سرعت باد و شدت صاعقه است. شکل منحنی‌ها به تأثیر پارامتر آب‌وهوا روی احتمال خرابی قطعه بستگی دارد. این منحنی‌های شکنندگی برای هر پارامتر آب‌وهوایی، عمومی هستند و با تمام مناطق آب‌وهوا مطابقت دارند. برای به دست آوردن احتمال خرابی ناحیه‌ای تحت تأثیر آب‌وهوا برای مؤلفه‌های سازنده خط، پروفیل آب‌وهوایی منطقه‌ای در این منحنی‌ها الگوسازی می‌شود (شکل ۳). این منحنی‌ها می‌توانند از طریق مدل‌سازی با در نظر گرفتن فاکتورهای آب‌وهوایی که بر نرخ خرابی اجزا تأثیر می‌گذارد، ازجمله سرعت باد، ارتفاع و جهت یا استفاده از داده‌های تجربی واقعی برای تعیین نرخ خرابی قطعات در شرایط مختلف آب‌وهوایی، ساخته شوند.

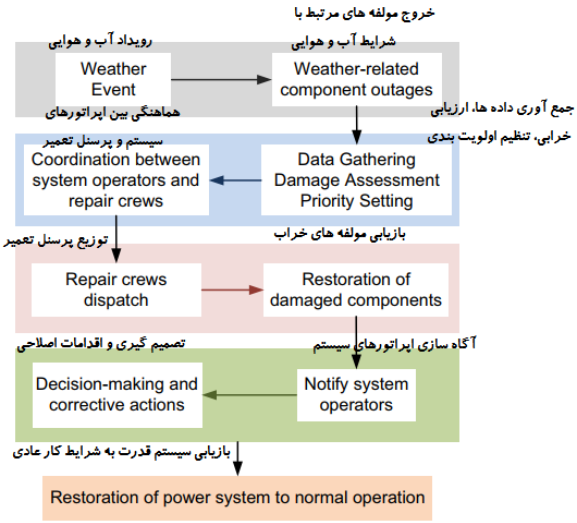


شکل (۳) : تعیین احتمال خرابی مؤلفه‌های با استفاده از منحنی‌های شکنندگی

۳-۴- تأثیر آب‌وهوا روی زمان بازیابی

شکل (۴) پروسه بازیابی اجزای آسیب دیده در شرایط آب‌وهوایی و بازیابی سیستم برق را به شرایط کار عادی نشان می‌دهد. به دنبال یک وضعیت آب‌وهوا، می‌بایست داده‌هایی برای ارزیابی خسارت‌ها جمع‌آوری شده و اولویت‌بندی شروع پروسه بازیابی سیستم تنظیم گردد. سپس اپراتورهای سیستم برای بازیابی (تعمیر) اجزای آسیب دیده با پرسنل تعمیرات هماهنگ شده و به دنبال آن اقدامات اصلاحی توسط اپراتورهای سیستم برای بازیابی سیستم به شرایط کار عادی انجام می‌گیرد.

با این وجود، این روش بازیابی و زمان آن پس از یک رویداد آب‌وهوایی به عوامل مختلفی ازجمله شدت و محل وقوع آن، در دسترس بودن قطعات یدکی و پرسنل تعمیر و دسترسی به مناطق آسیب دیده بستگی دارد. بنابراین، مشابه نرخ خرابی، تعیین زمان بازیابی تحت تأثیر شرایط آب‌وهوایی برای افزایش دقت خروجی مدل‌سازی، بسیار مهم است.



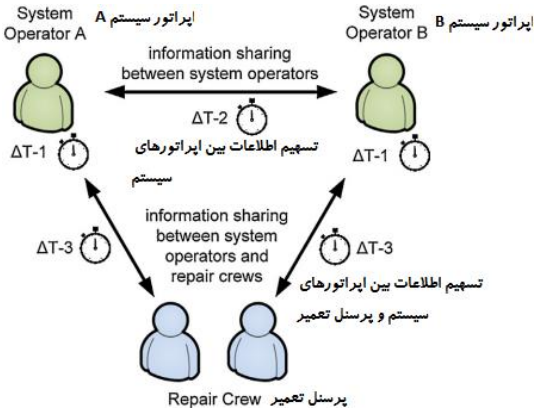
شکل (۴) : پروسه بازیابی در شرایط اضطراری آب‌وهوایی

روش‌های مختلفی برای حل این مشکل در مقالات وجود دارد. در مراجع [۱۱،۱۴] فرض شده است که هیچ‌گونه تعمیری در شرایط هوای بد نمی‌توان انجام داد زیرا اعزام پرسنل تعمیرات خیلی خطرناک است. با توجه به اینکه نیرو و منابع انسانی در شرایط آب‌وهوای شدید توسط شرکت‌های برق مورد استفاده قرار می‌گیرند، در شرایط عادی از نرخ تعمیر برابر با ۱، در شرایط عادی استفاده می‌شود. *Billinton* [۱۵] و *Singh* [۱۶] سه سناریوی تعمیر را با استفاده از مدل‌های آب‌وهوای دو حالته و سه حالته بر اساس شکل (۱) استفاده کرده‌اند: سناریوی بدون تعمیر در هوای نامطلوب، سناریوی زمان تعمیر برابر در هوای معمولی و نامساعد و سناریوی زمان تعمیر ۱/۵ برابر در شرایط هوای عادی. نتیجه‌گیری این مقاله این است که همان‌طور که انتظار می‌رود، فرض عدم تعمیر در آب‌وهوای نامطلوب سبب افزایش مدت‌زمان قطعی سیستم می‌شود.

۳-۵- تأثیر تاب‌آوری انسانی در شرایط اضطراری آب‌وهوا

زیرساخت‌های اساسی سیستم قدرت را می‌توان به‌عنوان یک سیستم، زیرمجموعه سیستمی دیگر در نظر گرفت که پاسخ انسانی برای آن بسیار مهم است. مقابله با شرایط اضطراری آب‌وهوا مستلزم مشارکت اپراتورهای سیستم به‌منظور نظارت و فائق آمدن بر شرایط تحول سیستم است. بنابراین، آگاهی، تصمیم‌گیری و پاسخ اپراتورهای سیستم، نقش اساسی در حفظ انعطاف‌پذیری سیستم در هنگام بروز رخدادهای آب‌وهوایی دارد. در این زمینه، «تاب‌آوری انسانی» از اهمیت حیاتی برخوردار است. در همین راستا، *Mallak* [۱۷] شش عامل را برمی‌شمرد که سطح تاب‌آوری انسانی را معین می‌کند که عبارت‌اند از جستجوی راه‌کار هدفمند، اجتناب، درک مهم، وابستگی به نقش، اعتماد به منابع و دسترسی به منابع.

می‌توان نشان داد که این مؤلفه‌های تعیین‌کننده مقاومت و تاب‌آوری انسانی را می‌توان به‌راحتی در شرایط پاسخ انسان (خصوصاً توسط اپراتورهای سیستم) تحت شرایط حاد سیستم الگوسازی نمود. در حقیقت، اپراتورهای سیستم در شرایط اضطراری سیستم و آب‌وهوا می‌بایست با حجم بالایی از داده‌ها و هشدارها مواجه شوند. با این حال، این اپراتورها نیز چالش‌ها و محدودیت‌های خاصی ازنظر پردازش اطلاعات دارند که ممکن است روی توانایی آن‌ها در درک و تفسیر داده‌های ارائه شده به شیوه‌ای مؤثر و به‌موقع تأثیر بگذارد. این مسئله روی واکنش آن‌ها در برابر وقایع الکتریکی تأثیر می‌گذارد و برای انعطاف‌پذیری شبکه عاملی مضر است. مدلی جامع در مرجع [۱۸] برای نمایش تأثیر مدت‌زمان پاسخگویی اپراتورها در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت ارائه شده است. علاوه بر این، *Panteli* و همکارانش [۱۹] نشان داده‌اند که آگاهی و واکنش اپراتورها نسبت به وضعیت نامشخص یک رویداد الکتریکی، به طور قابل‌توجهی بر احتمال خاموشی متوالی و قطع مشترک، تأثیر می‌گذارد. با این وجود، تأثیر پاسخ نامناسب اپراتورها در شرایط اضطراری آب‌وهوا در مرجع [۶۵] ارزیابی نشده است.



شکل (۵) : تاخیر ناشی از انسان در شرایط اضطراری آب‌وهوایی

بنابراین، علاوه بر تأخیر در زمان تعمیر به دلیل شرایط آب‌وهوایی، پاسخ انسانی نیز می‌تواند باعث تأخیر در پروسه تعمیر مؤلفه‌های آسیب دیده و بازیابی سیستم به حالت عادی شود. بنابراین، منابع اصلی تأخیر مربوط به انسان در شرایط اضطراری آب‌وهوا (شکل ۵) عبارت‌اند از:

- توسعه آگاهی و تصمیم‌گیری در مورد وضعیت فردی در مراکز کنترل (OT-1).
- هماهنگی و تسهیم اطلاعات بین عوامل سیستم، یعنی اپراتورهای سیستم (OT-2) و پرسنل تعمیرات (OT-3).

حتی با اینکه توسعه فناوری‌های مانیتورینگ و ارتباطی هوشمند، بهبود آگاهی از وضعیت و تسهیم اطلاعات را بین عوامل سیستم ممکن ساخته است، اما باز هم ممکن است به دلیل خرابی، محدودیت و یا طراحی سیستم‌های اطلاعاتی یا اپراتورهای فردی و خطاهای پرسنل تعمیر، اقدامات اصلاحی یا پیشگیرانه به‌موقع اجرا نشود و یا تأثیر مطلوبی را در شبکه نداشته و مقاومت شبکه را به خطر بیندازند. بنابراین بررسی این عوامل در مطالعات مربوط به تاب‌آوری سیستم بسیار مهم است.

۳-۶- دلایل مستقل و مشترک خرابی‌ها

سیستم‌های قدرت به طور سنتی برای مقاومت در برابر خاموش (معیار امنیتی «*N-1*») طراحی شده‌اند، اما خاموشی‌های چندگانه (معیار امنیتی «*N-k*») در آن در نظر گرفته نشده است. با این وجود، این امکان وجود دارد که اگر شدت و یا مدت‌زمان خاموشی بسیار زیاد باشد، حوادث آب‌وهوایی منجر به قطع هم‌زمان چندین بخش از سیستم شود. نمونه‌ای از خرابی‌های متعدد و قطع برق از یک مدار خط انتقال به دلیل سقوط یک دکل انتقال در مرجع [۱۵] بحث شده است. این دلیل، یک علت مشترک در نظر گرفته می‌شود که در مراجع [۱۵،۱۹] نیز ارزیابی شده است. خرابی‌های دارای علل مشترک، تهدید بزرگی برای مقاومت سیستم محسوب می‌شوند، زیرا این دلایل مقاومت سیستم را در برابر قطعی‌های جدید به طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهند و همچنین امکانات و منابع موجود را برای مقابله با اختلال مورد نظر، محدود می‌سازند.

بنابراین می‌بایست در مطالعات تاب‌آوری مرتبط با شرایط آب‌وهوا، خرابی‌های ناخواسته، مستقل و مشترک در نظر گرفته شوند. از این رو می‌توان اقدامات کمکی را برای کاهش تأثیر این رویدادها انجام داد، مانند ساخت دکل‌های انتقال با مواد مستحکم‌تر.

۳-۷- مواجه با عدم قطعیت‌های اصلی مدل‌سازی

وجود عدم قطعیت‌های مدل‌سازی هنگام ارزیابی تأثیر آب‌وهوا روی تاب‌آوری سیستم‌های قدرت اجتناب‌ناپذیر است، مانند برنامه‌های بازیابی و تأخیر بالقوه ناشی از پاسخ انسانی که می‌تواند دقت خروجی مدل‌سازی را کاهش دهد. این عدم قطعیت‌ها عمدتاً به دلیل کمبود اطلاعات و رفتار غیرقابل‌پیش‌بینی شرایط آب‌وهوا است. یک روش معمول برای مواجه با

این عدم قطعیت‌های مدل‌سازی، انجام تحلیل حساسیت به‌منظور ارزیابی تأثیر فرضیات در مدل‌سازی آب‌وهوا است. می‌توان از روش‌های مختلفی مانند روش رنج گسترده [۲۰] برای این منظور استفاده کرد. به‌عنوان مثال، در مرجع [۱۳] درصد خرابی در شرایط آب‌وهوای نامطلوب برای ارزیابی تأثیر آن بر انرژی مورد انتظار تأمین نشده (*EENS*) سیستم بر اساس روش رنج گسترده در نظر گرفته شده است. زمان تعمیر در مرجع [۷] متغیر است تا تأثیر آن بر نرخ خرابی سیستم بررسی گردد.

تحلیل حساسیت، به درک اهمیت و تأثیر هر جنبه و پارامتر مدل‌سازی بر خروجی مدل‌سازی کمک می‌کند. این امر نیز خود به جمع‌آوری مؤثرتر و منظم‌تر داده‌ها کمک کرده و درنهایت افزایش دقت و ارتباط منطقی میان ورودی و خروجی شبیه‌سازی را به دنبال دارد.

مراجع

[1] Campbell, R. J., Lowry, S. "*Weather-related power outages and electric system resiliency*." Washington, DC: Congressional Research Service, Library of Congress, 2012.

[2] Kenward, A., Raja, U. Blackout "*Extreme weather climate change and power outages*." Climate central, Vol. 10, pp. 1-23, 2014.

[3] Styles, T., Przysiecki, P., Archambault, G., Sosa, L., Toal, B., Magri, J., Cartter, M., "*Two Storm-Related Carbon Monoxide Poisoning Outbreaks—Connecticut*" Archives of environmental & occupational health, Vol. 70, Issue 5, pp. 291-296, 2015.

[4] House, W. "*Economic benefits of increasing electric grid resilience to weather outages*." Washington, DC: Executive Office of the President, 2013.

[5] Chaudry, M., Ekins, P., Ramachandran, K., Shakoor, A., Skea, J., Strbac, G., Wang, X. and Whitaker, J., "*Building a Resilient UK Energy System: Working Paper*." UK Energy Research Centre (UKERC), 2009.

[6] Ward, D. M., "The effect of weather on grid systems and the reliability of electricity supply." Climatic Change, Vol. 121, Issue 1, pp.103-113, 2013.

[7] Billinton, R., & Bollinger, K. E., "*Transmission system reliability evaluation using Markov processes*." IEEE Transactions on power apparatus and systems, Vol. 2, pp.538-547, 1968.

[8] Gaver, D. P., Montmeat, F. E., Patton, A. D. "*Power system reliability I-measures of reliability and methods of calculation.*" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 83, Issue 7, pp.727-737, 1964.

[9] Bhuiyan, M. R., Allan, R. N. "*Inclusion of weather effects in composite system reliability evaluation using sequential simulation.*" IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 141, Issue 6, pp.575-584, 1994.

[10] Billinton, R., Singh, G. D., "*Reliability assessment of transmission and distribution systems considering repair in adverse weather conditions.*" In IEEE CCECE2002. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings, Vol. 1, pp.88-93, 2002.

[11] Billinton, R., Singh, G. "*Application of adverse and extreme adverse weather: modelling in transmission and distribution system reliability evaluation.*" IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 153, Issue 1, pp.115-120, 2006.

[12] Billinton, R., Acharya, J. "*Consideration of multi-state weather models in reliability evaluation of transmission and distribution systems.*" In Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp.916-922, 2005.

[13] Billinton, R., Wenyuan, L. "*A novel method for incorporating weather effects in composite system adequacy evaluation.*" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, Issue 3, pp.1154-1160, 1991.

[14] Liu, Y., Singh, C. "*A methodology for evaluation of hurricane impact on composite power system reliability*." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, Issue 1, pp.145-152, 2010.

[15] Barben, R. "*Vulnerability assessment of electric power supply under extreme weather conditions (No. THESIS).*" EPFL., 2010.

[16] Billinton, R., & Bollinger, K. E., "*Transmission system reliability evaluation using Markov processes*." IEEE Transactions on power apparatus and systems, Vol. 2, pp.538-547, 1968.

[17] Mallak, L. A., "Measuring resilience in health care provider organizations." Health manpower management, Vol.1, pp. 55-71, 1998.

[18] Schläpfer, M., Kessler, T., Kröger, W. "*Reliability analysis of electric power systems using an object-oriented hybrid modeling approach.*" The Power Systems Computation Conference, 2012.

[19] Panteli, M., Crossley, P. A., Kirschen, D. S., Sobajic, D. J. "*Assessing the impact of insufficient situation awareness on power system operation*." IEEE Transactions on power systems, Vol. 28, Issue 3, pp. 2967-2977, 2013.

[20] American National Standards Institute., "*IEEE Guide for General Principles of Reliability Analysis of Nuclear Power Generating Station Safety Systems: An American National Standard*." IEEE, 1987.