

پستار

پلتفرم مدل سازی ریسک مخاطرات طبیعی و خرابی آبخاری زیر ساخت

توسعه دهندگان:

❖ **محمد رضا علیپور** (لیسانس الکترونیک - دانشگاه زنجان - کاردان ارتباطات رادیویی هلال احمر استان زنجان)

❖ **محمد رضا حاتمی** (لیسانس مهندسی سیستم های سخت افزاری - دانشگاه علمی کاربردی تبریز | فوق لیسانس مدیریت خط مشی - دانشگاه آزاد اسلامی زنجان - کارشناس ارتباطات رادیویی هلال احمر استان زنجان - مسئول کنترل و هماهنگی عملیات (EOC) هلال احمر استان زنجان)

❖ **نگین قهرمانی** (دانشجوی روانشناسی - دانشگاه آزاد اسلامی زنجان - دبیر باشگاه آموزش و رسانه (باور) هلال احمر استان زنجان)

زیرساخت‌های حیاتی در شرایط متغیر آب و هوایی، بیش از هر زمان دیگری در معرض خطرات طبیعی قرار دارند. برای درک و مدیریت ریسک، خرابی‌های آبخاری در شبکه‌های زیرساختی بزرگ، دنیای واقعی و تأثیر آن‌ها بر مردم باید در نظر گرفته شود. با پل زدن به روش‌های تثبیت‌شده در جوامع مدل‌سازی زیرساخت و ریسک، یک پلتفرم مدل‌سازی منبع باز ایجاد می‌کنیم که یک مدل سیستم زیرساختی وابسته مبتنی بر شبکه را در سطح جهانی سازگار و صریح ادغام می‌کند: پینار! این مدل آسیب‌های زیرساختی را جمع‌آوری می‌کند، آبخارهای خرابی را پایش می‌کند و اختلالات خدمات اساسی را برای جمعیت وابسته تخمین می‌زند. این پروژه به طور انعطاف‌پذیر در مناطق بزرگ با اطلاعات مخاطرات، قرار گرفتن در معرض و آسیب‌پذیری در دسترس عموم، برای هر مجموعه‌ای از شبکه‌های زیرساخت، خطرات و جغرافیای مورد علاقه عمل می‌کند. در یک مطالعه موردی معتبر برای طوفان مایکل در سال ۲۰۱۸ در سه ایالت ایالات متحده، این مدل، پویایی خرابی آبخاری را در بین شش شبکه زیرساخت بازتولید کرد و یک نقشه فضایی جدید ارائه کرد که در آن مردم احتمالاً اختلالاتی را در دسترسی به مراقبت‌های بهداشتی، از دست دادن نیرو و سایر خدمات حیاتی تجربه می‌کردند. رویکرد تعمیم یافته ما اجازه می‌دهد تا دیدگاهی در مورد خطرات زیرساختی و تأثیرات اجتماعی آنها در مناطقی که اطلاعات دقیق و ارزیابی خطر به طور سنتی کمیاب است، فراهم کند، و فعالیت های بشردوستانه را از طریق تجزیه و تحلیل نقاط حساس و چارچوب‌های سیاست به طور یکسان اطلاع‌رسانی می‌کند.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی ریسک - مخاطرات طبیعی - زیرساخت‌های حیاتی - خرابی‌های آبخاری - اختلالات خدمات اولیه - سیستم سیستم‌ها - اختلالات امدادرسانی در سوانح

اختصارات:

- BS: حالت پایه
- CI: زیرساخت حیاتی
- DS: حالت مختل شده
- NH: خطر طبیعی

۱. معرفی

هنگامی که مخاطرات طبیعی، زیرساخت‌های حیاتی (CIها) را مختل می‌کنند، شکست آنها می‌تواند برای سلامت عمومی، ایمنی، امنیت، رفاه و فعالیت‌های اقتصادی مضر باشد. چه به دلیل زلزله در خوی و بم و ترکیه، سیل در شمال غرب کشور یا طوفانی که ایالات متحده را درنوردید، زندگی همگان را مختل می‌کند: از دست دادن برق و خدمات مخابراتی ممکن است با سیستم حمل و نقل ناکارآمد و آسیب رساندن به بیمارستان‌ها همراه شود و از مداخله به موقع امدادگران اورژانس و هلال‌احمر جلوگیری کند. روستاهایی که برای روزها غیرقابل دسترس هستند، مسیرهای تخلیه را قطع می‌کنند، یا کودکان، مدرسه را تا هفته‌ها رها می‌کنند.

از آنجایی که سرمایه‌گذاری‌های زیرساختی در بالاترین سطح خود قرار دارند، سیستم‌های CI در سراسر جهان بیش از هر زمان دیگری در معرض خطرات طبیعی قرار دارند، روندی که در شرایط آب و هوایی در حال تغییر بیشتر تشدید می‌شود. این تهدید برای حمل و نقل هوایی، جاده‌ای و ریلی به طور یکسان است، همچنین تولید برق را در معرض خطر قرار می‌دهد و باعث ضرر سالانه میلیاردها دلار آمریکا در چندین بخش CI می‌شود.

از آنجایی که تأثیرات اجتماعی شکست‌های CI بسیار فراتر از حوزه فنی است، مدیریت زیرساخت‌های انعطاف‌پذیر به یکی از حوزه‌های اصلی نگرانی برای سیاست‌گذاران تبدیل شده است: CIها «مستقیم یا غیرمستقیم بر دستیابی به همه اهداف توسعه پایدار تأثیر می‌گذارند» و ممکن است تا ۸۸ درصد افزایش یابد. کاهش خسارات CI و اختلالات خدمات اساسی بخشی از دستور کارهای چارچوب سندای برای کاهش خطر بلایا، برنامه کمیسیون اروپا برای حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی (EPCIP) و بیست و ششمین کنفرانس تغییرات آب و هوایی سازمان ملل متحد (COP26) را تشکیل می‌دهد. اگرچه از نظر دامنه و ماهیت متفاوت است، اما سه چالش کلیدی CIها در یک زمینه اجتماعی-فنی تکراری هستند: دانش در مورد میزان قرار گرفتن CIها در معرض خطرات طبیعی، به ویژه در جنوب جهانی و خاورمیانه، کافی نیست. وابستگی متقابل بین CIهای مختلف اغلب به خوبی درک نمی‌شود، و تجزیه و تحلیل و در نتیجه مدیریت سیستماتیک اثرات آبشاری ناشی از خرابی‌های CI دشوار است. سختی تجربه شده از خرابی‌های CI به درجه و مدت زمان اختلال در خدمات اساسی بستگی دارد، با این حال ارتباط بین آسیب‌های زیرساختی، در نتیجه قطع خدمات و جمعیت آسیب دیده ساده نیست.

گرفتن پاسخ سیستم‌های CI وابسته به هم به مخاطرات طبیعی، و مطالعه تأثیرات خرابی آنها بر جمعیت، تلاشی است که در تقاطع مدل‌سازی ریسک مخاطرات طبیعی (NH)، مدل‌سازی زیرساخت و تحقیقات آسیب‌پذیری اجتماعی قرار دارد. به طور سنتی، این مشکلات با پرسش‌ها و روش‌های پژوهشی خاص جامعه مورد بررسی قرار می‌گرفتند:

خطرات NH از طریق تأثیر متقابل مخاطرات مربوط به آب و هوا و آب و هوا، قرار گرفتن در معرض (زیرساخت) دارایی‌ها، کالاها و افراد در معرض این خطرات و آسیب‌پذیری‌های خاص آنها ظاهر می‌شوند (IPCC 2014). بنابراین، تأثیر مدل‌سازی مبتنی بر رویداد معمولاً بر این سه مؤلفه برای محاسبه خسارات دارایی‌های قابل انتظار به مؤسسه‌های سرمایه‌گذاری به عنوان نماینده ریسک مستقیم متکی است. تلاش‌ها برای گرفتن سطوح ریسک برای CI در سطح جهانی اغلب با در دسترس بودن داده‌ها به چالش کشیده می‌شوند، اما برای برخی از خطرات و بخش‌های CI مانند جاده، راه‌آهن، فرودگاه‌ها و تولید برق انجام شده است. علیرغم اذعان به اهمیت پذیرش رویکرد تفکر سیستمی برای انعطاف‌پذیری، تمرکز غالب مدل‌سازان ریسک NH بر روی «ریسک مقیاس دارایی» اغلب از درک وابستگی‌های متقابل CI و «ریسک‌های مقیاس شبکه» کوتاه است. به این ترتیب، روش‌های ارزیابی ریسک در جامعه هنوز با ویژگی‌های CI تنظیم نشده است.

در تحقیقات زیرساختی، وابستگی‌های متقابل CI و خرابی‌های آبشاری از زمان کار اصلی رینالدی و همکارانش بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. و رویکردهای مدل‌سازی آنها به چندین روش پیشرفته که به طور جامع در Ouyang خلاصه شده است، همگرا شده

است. به‌ویژه در مطالعاتی که از رویکردهای شبکه (جریان) استفاده می‌کنند، تحقیق در مورد آبشارهای شکست اغلب با انگیزه رویدادهای NH به عنوان محرک‌ها انجام می‌شود. با این حال، بیشتر تحقیقات در این حوزه برخی از گرایش‌های زیر را به اشتراک می‌گذارند: سیستم‌های بررسی‌شده عمدتاً در مقیاس کوچک هستند، نشان‌دهنده شهرهای متوسط یا محله‌های اجتماعی هستند و پویایی را برای یک زیرسیستم از دو نوع زیرساخت نشان می‌دهند که در آن سیستم‌های برق، حمل و نقل و مخابرات بسیار بیشتر از امکانات اجتماعی مانند مدارس یا بیمارستان‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. داده‌های CI اغلب مبتنی بر بسترهای آزمایشی مصنوعی و کاملاً تعریف‌شده یا متناسب با داده‌های (گاهی اختصاصی) در دست هستند که عمدتاً در ایالات متحده، اروپا و اقیانوسیه مستقر هستند. سناریوهای خرابی اغلب بر حذف تصادفی یا جزء به جزء تمرکز می‌کنند یا اشکال سبک شده را بدون ردپای خطر واقعی نشان می‌دهند. از این رو، دامنه مطالعه و مکانیسم‌های ماشه در تحقیقات CI موجود، لزوماً برای ثبت بزرگی و گستره فضایی رویدادهای NH در دنیای واقعی و سیستم‌های CI طراحی نشده‌اند.

در نهایت، گفتمان فنی در مورد شکست‌های CI، که در آن معیارهای تأثیر عمدتاً بر معیارهای عملکرد عملکردی تمرکز می‌کنند، به اندازه کافی به حوزه آسیب‌پذیری‌های اجتماعی مرتبط نیست. جدای از مطالعات موردی تجربی با استفاده از حساب‌های رسانه‌های چاپی، تنها چند مطالعه مدل‌سازی پیامدهای شکست CI را برای (گروه‌های مختلف اجتماعی-اقتصادی) افراد بررسی کرده‌اند.

علیرغم پیشرفت‌ها در مقابله با این فضای مشکل مشترک، سیلوها همچنان پابرجا هستند که الهام‌بخش چندین چارچوب نظری و تلطیف‌شده در مورد ریسک‌های سیستماتیک CI در سطح تحلیل ملی هستند. با پیروی از این منطق، هدف ما این است که عملاً یک مدل ضربه‌ای منعطف و منبع باز را پیاده‌سازی کنیم که الگوهای فضایی افرادی را که دچار اختلالات خدمات اولیه ناشی از خرابی‌های آبشاری CI ناشی از خطر طبیعی می‌شوند، تخمین می‌زند. در راستای Zio، که بر نیاز به ادغام دیدگاه‌های مدل‌سازی مختلف برای ثبت پیچیدگی‌های خرابی سیستم CI تأکید می‌کند، ما نشان می‌دهیم که چگونه می‌توان با ترکیب روش‌ها و پلتفرم‌های تعیین‌شده توسط محققان CI و مدل‌سازان ریسک NH، هم‌افزایی ایجاد کرد. تمرکز طراحی این مدل تأثیر بدون درز به ویژه بر تجزیه و تحلیل سریع سیستم‌های زیرساختی بزرگ، وابسته به هم، در دنیای واقعی و جمعیت وابسته در مناطق مختلف جغرافیایی، که در معرض انواع مختلف مخاطرات طبیعی قرار دارند و در آن‌ها فقط دانش فرآیندی محدودی دارند، قرار می‌گیرد. داده‌ها ممکن است در دسترس باشد. از این رو تصور می‌شود که تخمین‌های تأثیر تولید شده با این رویکرد، ارزیابی‌های سریع نقاط حساس را در طول واکنش‌های اضطراری، یا به‌عنوان یک معیار بین‌ملی و انسان محور از خطر برای اهداف سیاست در چارچوب‌های بین‌المللی، اطلاع‌رسانی می‌کند.

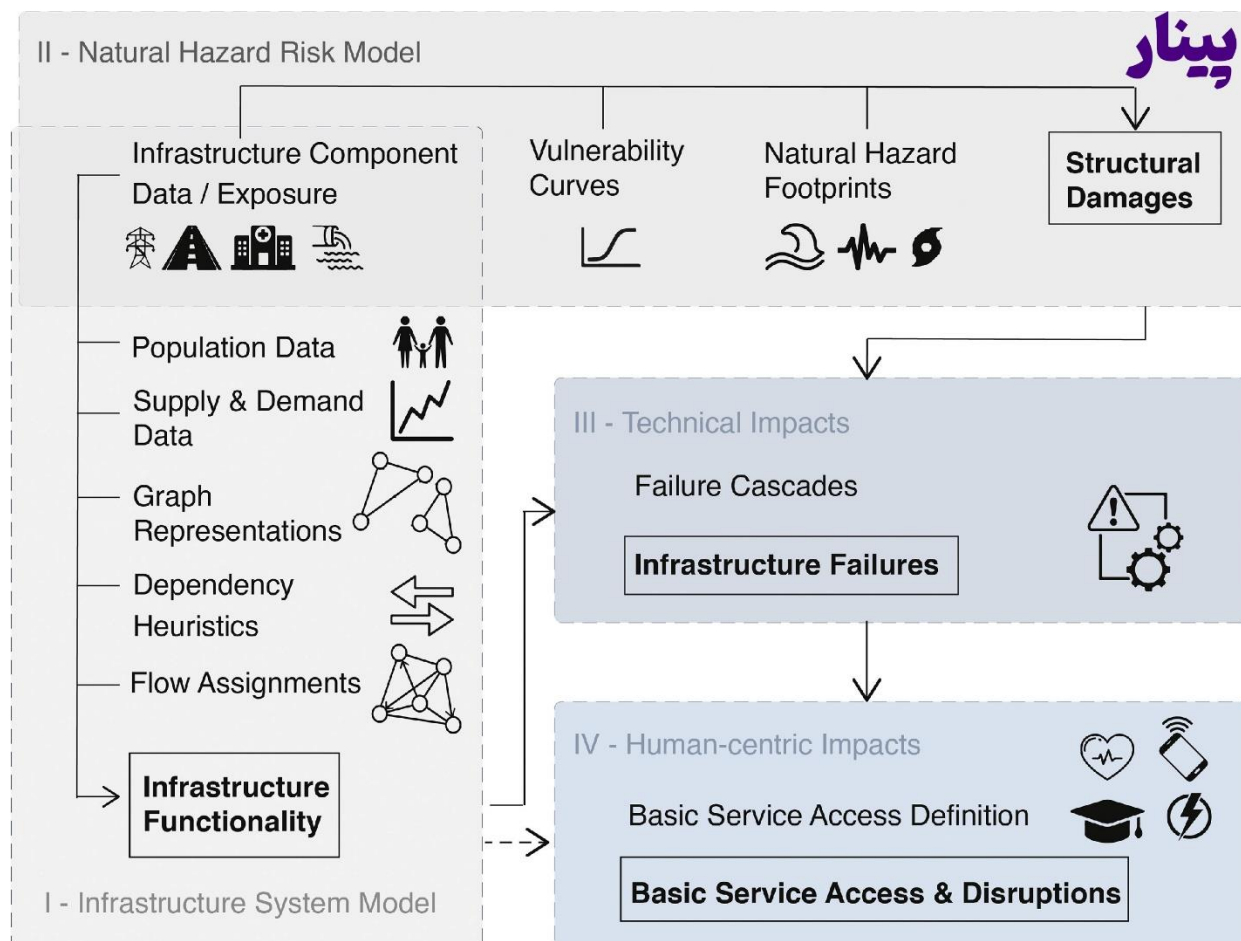
بخش ۲ چارچوب مفهومی را توصیف می‌کند که برای برآورده کردن معیارهای طراحی فوق‌الذکر و اجرای ملموس آن به‌عنوان یک فرمول «سیستم سیستم‌ها» برای شبکه‌های زیرساخت تعبیه‌شده در پلتفرم مدل‌سازی ریسک منبع باز پینار ساخته شده است.

بخش ۳ به طور مثال نشان می‌دهد که چگونه این مدل می‌تواند خدمات اطلاعاتی را در عواقب فاجعه با استفاده از یک مطالعه موردی در دنیای واقعی از برخورد طوفان مایکل به فلوریدا پانهندل ارائه دهد.

تحلیل سناریو انجام می‌شود و خروجی‌های مدل با استفاده از گزارش‌های رسمی و گزارش‌های رسانه‌های چاپی اعتبارسنجی می‌شوند، تا بحث گسترده‌تری در مورد محاسن و توازن این رویکرد در بخش ۴، و بررسی کفایت آن برای استفاده در ارزیابی ریسک، پاسخ اضطراری، برنامه‌ریزی انطباقی و سیاست‌گذاری را تسهیل کند.

۲. روش‌ها

فریمورک در شکل ۱ مراحل مفهومی اصلی را نشان می‌دهد که برای محاسبه اختلالات خدمات اساسی از خرابی‌های آبخاری زیرساخت ناشی از خطرات طبیعی، با ورودی‌های مورد نیاز و خروجی‌های اصلی توسعه یافته است.



شکل ۱. چارچوب توسعه یافته برای مدل‌سازی جمعیتی که با اختلالات خدمات اساسی از آبخارهای خرابی زیرساخت‌های ناشی از خطرات طبیعی مواجه می‌شوند. این چهار مرحله در یک پلتفرم واحد به هم متصل می‌شوند و شامل مدل‌سازی سیستم زیرساخت (I)، مدل‌سازی ریسک خطر طبیعی (II)، و دو لایه نتایج صریح فضایی - تأثیرات بر اجزای زیرساخت (III) و جمعیت وابسته (IV) است. خروجی‌های اصلی هر مرحله به صورت پررنگ در کادر قرار دارند.

در مرحله اول، یک مدل سیستم زیرساخت، حالات عملکردی زیرساخت‌های حیاتی وابسته به هم را با استفاده از اطلاعات جغرافیایی ارجاع‌شده بر روی اجزای زیرساخت، جمعیت وابسته، اکتشافات وابستگی و داده‌های عرضه و تقاضا محاسبه می‌کند. رویکرد مدل‌سازی به کار گرفته شده بر منطق فرمول‌بندی «سیستم سیستم‌ها» متکی است، که در آن سیستم‌های CI به عنوان شبکه‌های توپولوژیکی سلسله مراتبی که از طریق وابستگی‌های بین یکدیگر به هم مرتبط هستند، تلقی می‌شوند. اتکا به تئوری شبکه پیچیده و محاسبات ساده‌تر جریان، پیچیدگی مدل‌های فیزیکی کامل را کاهش می‌دهد، با این حال به عنوان یک جایگزین همه‌کاره، گویا و کارآمد از نظر داده‌ها نشان داده شده است که قادر به ثبت دینامیک در مقیاس بزرگ سیستم است. در مرحله دوم، آسیب‌های ساختاری به اجزای زیرساخت از رد پای خطر صریح فضایی و منحنی‌های آسیب‌پذیری متناسب با استفاده از پلت فرم ارزیابی ریسک پینار محاسبه می‌شوند. شخصیت منبع باز مرحله III نتایج حاصل از محاسبات آسیب ساختاری را به مدل سیستم زیرساخت برمی‌گرداند، که باعث ایجاد خرابی‌های آبخاری در امتداد وابستگی‌های زیرساختی می‌شود. نتایج این مرحله نقص فنی در سطح سیستم‌های زیرساختی

است. در مرحله ۴، اثرات فنی خرابی‌های CI به اثرات انسان محور ترجمه می‌شود. اختلالات ناشی از دسترسی به خدمات اولیه برای همه خدمات ارائه شده توسط سیستم‌های CI مورد مطالعه، برای جمعیت وابسته محاسبه می‌شود.

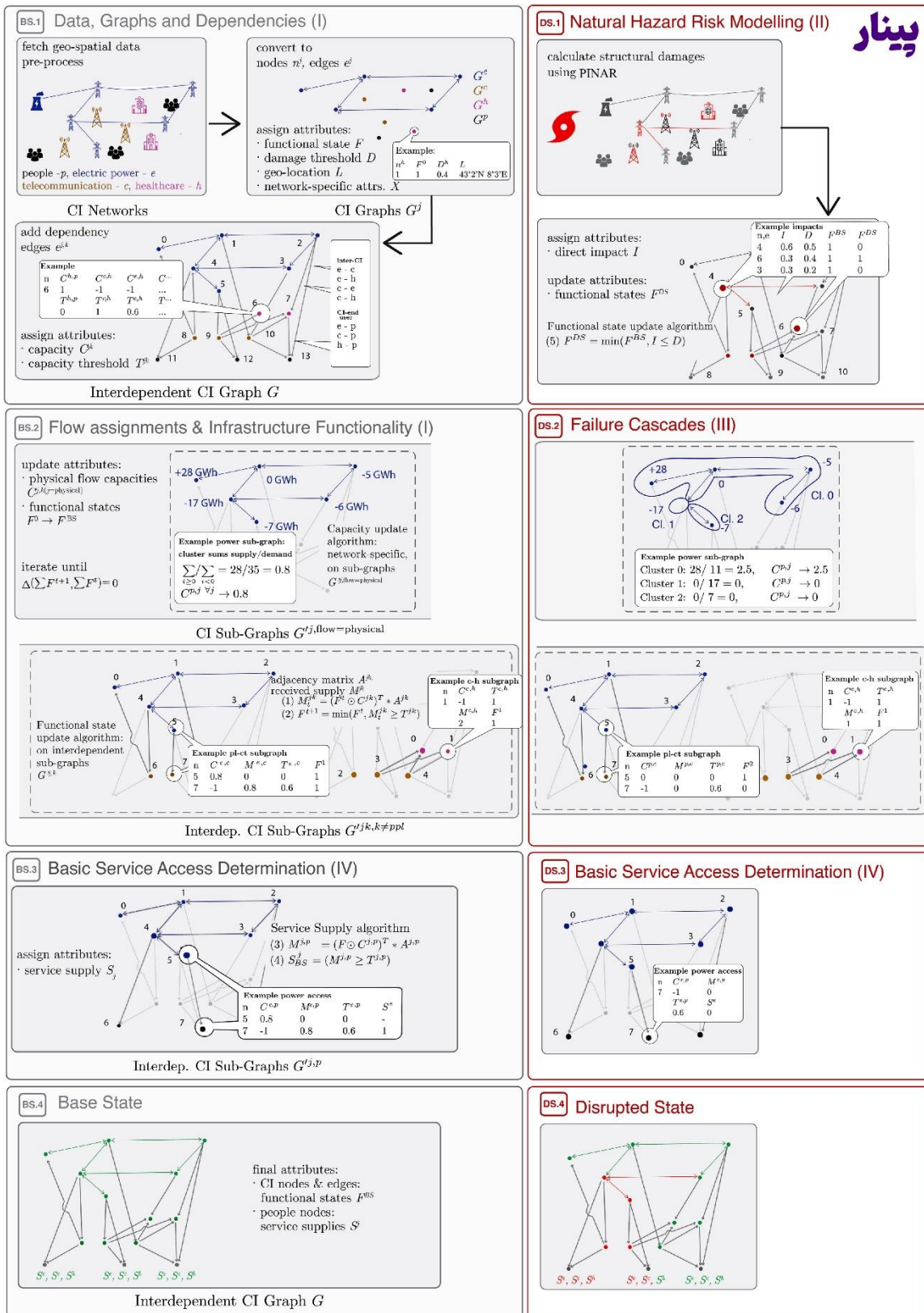
بخش‌های زیر جزئیات پیاده‌سازی فریمورک را توضیح می‌دهند. در حالی که بر انتخاب‌های مفهومی که برای متحد کردن مدل‌ها از جوامع مدل‌سازی خطرات طبیعی و زیرساخت‌ها انجام شده‌اند، تأکید می‌شود، توضیحات فنی خاصی با اشاره به پیاده‌سازی پایه کد منبع باز عملی در صورت لزوم ارائه می‌شود.

۲.۱. مرحله اول: مدل سیستم زیرساخت

۲.۱.۱. الزامات داده: اجزای زیرساخت، جمعیت، عرضه و تقاضا

داده‌های جغرافیایی شبکه‌های CI - که از این پس به نمایش فضایی زیرساخت‌های واقعی مانند مکان مدارس، جاده‌ها یا نیروگاه‌های برق اشاره دارد - و جمعیت باید در سطح جزء (یعنی دارایی) برای منطقه مورد علاقه یک کشور، ایالت یا منطقه شهری بزرگتر تهیه شود. در چارچوب مدل‌سازی، منابع داده ارائه‌شده توسط کاربر ممکن است جذب شوند یا داده‌های با وضوح بالا را می‌توان از طریق جستجوهای خودکار از ارائه‌دهندگان داده منبع باز مانند OpenStreetMap و پروژه WorldPop به دست آورد. مرحله اول کاهش پیچیدگی و استانداردسازی سپس شامل محدود کردن اجزای ساختاری متنوع در هر شبکه CI به چند بلوک یا مؤلفه اصلی است. برای مثال، شبکه راه را می‌توان به تقاطع‌ها (گره‌ها) و خیابان‌ها (لبه‌ها) تقلیل داد، بدون اینکه تفاوت بیشتری بین انواع جاده‌ها، پل‌ها یا تونل‌ها قائل شود (جدول B.1 برای مثال انتخاب جزء غیر تجویزی برای شش نوع اصلی شبکه‌های CI در قطعنامه‌های مختلف). علاوه بر این، داده‌های عرضه و تقاضای شبکه‌های CI و کاربران نهایی آنها، به عنوان مثال آمار تولید و مصرف برق برای شبکه برق، همانطور که توسط آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) ارائه شده است، ممکن است در صورت موجود جمع‌آوری شود. با این حال، همانطور که در سراسر بخش ۲ نشان داده خواهد شد، برای رویکرد ارائه شده ضروری نیست.

به عنوان یک مثال تلطیف‌شده در ادامه توضیحات مدل، شبکه‌های ارتباطات سیار (c)، برق (e) و سلامت (h) را در نظر می‌گیریم که از طریق مهم‌ترین اجزای آنها (به ترتیب، برج‌های سلولی، نیروگاه‌ها، خطوط انتقال، قطب‌ها و بیمارستان‌ها) و سلول‌های شبکه جمعیت (p) نشان‌دهنده کاربران نهایی همانطور که در شکل ۲، پانل BS.1 نشان داده شده است. مقادیر ساختگی نیروگاه و آمار مصرف سرانه برق برای نشان دادن موردی از در دسترس بودن داده‌های تقاضا و عرضه گنجانده شده است، در حالی که چنین آماری در اینجا برای همه شبکه‌های CI دیگر در دسترس نیست.



۲.۱.۲. نمایش‌های نموداری

اجزای زیرساخت از این رو به نمودارهای جهت دار متشکل از گره‌ها و یال‌ها تبدیل می‌شوند. در چارچوب مدل‌سازی، الگوریتم‌های پاکسازی و تبدیل مربوطه ارائه شده‌اند. در مثال ما، نیروگاه و قطب‌های شبکه قدرت با گره‌ها و خطوط برق به عنوان لبه نشان داده می‌شوند، در حالی که نمودارهای شبکه‌های ارتباطی و مراقبت‌های بهداشتی فقط از گره‌ها تشکیل شده‌اند (شکل ۲، پانل BS.1 را ببینید). این نمایش‌های رسمی از این پس به عنوان CI گراف G^i نامیده می‌شوند که J نوع سیستم است (به عنوان مثال G^e برای نمودار CI توان الکتریکی است). علاوه بر این، موقعیت جغرافیایی L ، حالت عملکردی اولیه F^0 و آستانه آسیب خاص زیرساخت D^i به عنوان ویژگی برای همه عناصر (گره‌ها و لبه‌ها) در هر گراف CI تنظیم شده است. F^0 برای همه عناصر روی ۱ تنظیم شده است. D^i کسر آسیب ساختاری را نشان می‌دهد که پس از آن یک جزء عملکرد خود را از دست می‌دهد و یک مفهوم ساده کننده برای استخراج حالت‌های عملکردی از آسیب است. آستانه‌ها به طور دلخواه در این مثال برای اهداف کاملاً گویا تنظیم شده‌اند. شبکه جمعیت به طور مشابه با یک گراف حاوی گره با تعداد افراد و موقعیت جغرافیایی به عنوان ویژگی‌های گره نشان داده می‌شود.

۲.۱.۳. وابستگی هیورستیک

با خروج از یک بررسی گسترده در مدل‌های وابستگی متقابل CI، فهرستی از ۱۲۰ وابستگی عملکردی و منطقی بین مؤلفه‌های ۱۱ شبکه مختلف CI جمع‌آوری شد (به مواد تکمیلی مراجعه کنید) و در شش قاعده عمومی که به آنها وابستگی هیورستیک گفته می‌شود ادغام شد:

- ۱- اکثر شبکه‌های CI به منبع تغذیه الکتریکی، (خنک کننده) تامین آب و فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT) وابسته هستند.
- ۲- امکانات میزبانی مردم (مانند بیمارستان‌ها، مدارس، نیروگاه‌ها) به دسترسی مسیرها بستگی دارد.
- ۳- وابستگی‌ها را می‌توان به دو دسته دارای خصوصیات اضافی دسته‌بندی کرد، جایی که چندین منبع می‌توانند پشتیبانی لازم را فراهم کنند (مانند دسترسی مخابراتی از هر سلول قابل دسترسی)، یا منحصر به فرد بودن، که در آن پشتیبانی از یک منبع منحصر به فرد ارائه می‌شود (مثلاً تامین برق از نزدیکترین خط برق).
- ۴- وابستگی‌ها از نظر فاصله محدود هستند (به عنوان مثال، یک برج سلولی واقع در ۵۰۰ کیلومتری خدمات مربوطه را ارائه نمی‌دهد، همچنین بیمارستانی که ۱۵۰۰ کیلومتر در سراسر کشور است ارائه نمی‌دهد).
- ۵- وابستگی‌ها ممکن است مستلزم یک جریان فیزیکی مداوم بین منبع و هدف (مانند آب، برق) باشند، اما می‌توانند از طریق یک اتصال دودویی و منطقی تقریب شوند.
- ۶- جمعیت (کاربران نهایی) برای سرویس‌گیری به CI وابستگی دارند، نه برعکس.

این قوانین به عنوان اولین نقطه شروع برای شناسایی مجموعه‌ای از شبکه‌های CI که احتمالاً بین آنها وابستگی‌های عملکردی وجود دارد، و برای ترسیم مجموعه‌ای از متغیرها که می‌توانند به الگوریتم جستجوی وابستگی کمی وارد شوند، خدمت می‌کنند: منبع، هدف، آستانه فاصله، افزونگی، دسترسی و جریان مسیر این متغیرهای وابستگی-جستجو، که با جزئیات بیشتر در جدول ۱ توضیح داده شده‌اند، می‌توانند پارامتری شوند و به صورت دستی با مطالعه موردی در دست تنظیم شوند. سپس الگوریتم چارچوب مدل‌سازی، یال‌های هدایت شده e^{ik} (وابستگی‌ها) را بین هر گره‌ای از جفت‌های گراف (G^i, G^k) CI قرار می‌دهد که شرایط وابستگی مشخص شده در پارامترهای متغیرهای توصیف شده را برآورده می‌کنند. در مثال تلطیف شده شکل ۲، پانل BS.1 ("گراف CI وابسته به هم")، یک لیست وابستگی جفت شبکه CI را نشان می‌دهد که به طور کلی فرض می‌شود وابستگی‌ها را نشان می‌دهند (زیر لایه سفید). برای مثال، بیمارستان‌ها (هدف) احتمالاً به توان الکتریکی (منبع) وابسته هستند، که برای گره بیمارستانی ۶ به طور منحصر به فرد از گره برق ۳ (بدون افزونگی) تامین می‌شود، با توجه به اینکه نقطه عرضه به اندازه کافی نزدیک بود (فاصله > آستانه فاصله).

متغیر	توضیحات
منبع	پشتیبانی از مولفه CI
هدف	وابسته به مولفه CI
آستانه فاصله	حداکثر فاصله برای ایجاد پیوند بین دو گره توسط دایره‌ای در اطراف هدف با شعاع مربوطه در صورت عدم نیاز به دسترسی تعیین می‌شود، در غیر این صورت کوتاه‌ترین مسیر از طریق لبه‌های مسیر که گره‌های منبع و هدف را به هم متصل می‌کند نباید از آستانه تعیین شده تجاوز کند.
افزونگی	اینکه آیا یک گره هدف به تمام گره‌های CI از نوع منبع در یک آستانه فاصله مشخص (TRUE) و یا فقط به نزدیکترین آن‌ها (FALSE) متصل است.
دسترسی به مسیر	اینکه آیا یک مسیر باید بین منبع و هدف وجود داشته باشد یا خیر.
جریان	اینکه جریان از طریق لبه وابستگی توسط یک متغیر پیوسته و با اطلاعات فیزیکی ("فیزیکی"، مانند ظرفیت خورشه قدرت)، یا توسط یک متغیر باینری ("منطقی") اطلاع داده می‌شود، که نشان می‌دهد می‌توان وضعیت عملکردی منبع را بر اساس آن تأمین کرد یا خیر.

جدول ۱. متغیرهای مورد نیاز برای الگوریتم وابستگی-جستجو بین نمودارهای CI. «منبع» و «هدف» اجزای شبکه CI سیستم‌های مختلف هستند که قبلاً از روش‌های هیوریستیک توضیح داده شده در بالا شناسایی شده‌اند. مقادیر خاص برای متغیرها ممکن است به عنوان کافی برای مطالعه موردی در دست پر شود.

الگوریتم جستجوی وابستگی به همان اندازه امکان تخصیص کاربران نهایی به شبکه‌های CI را در غیاب داده‌های مشتری دقیق‌تر و در عین حال اغلب اختصاصی‌تر ارائه‌دهندگان ابزار فراهم می‌کند. سپس نمودار جمعیت هدف زیرساخت - جفت کاربر نهایی (G^j) برای هر نوع زیرساخت مربوطه G^p است. بنابراین الگوریتم منجر به ایجاد یک گراف CI وابسته G از تمام نمودارهای CI و نمودار جمعیت می‌شود. این در شکل ۲، پانل BS.1 ("گراف CI وابسته به هم") نشان داده شده است. به عنوان مثال، گره ۱۲ خوشه جمعیت (منبع)، به هریک (فراوانی) از برج‌های سلولی (هدف) در آستانه فاصله تعیین شده برای ارائه ارتباطات سیار وابسته است، که توسط گره برج سلولی ۱۲ انجام می‌شود.

در مرحله بعد، برای هر ترکیبی از جفت منبع-هدف jk که برای آن یال‌های e^{lk} در نمودار CI وابسته به هم ایجاد شده‌اند، ویژگی‌های ظرفیت C^{jk} و آستانه ظرفیت T^{jk} به همه گره‌ها اختصاص داده می‌شوند. بسته به اینکه یک گره منبع (۱)، نزول (۱-) یا هیچ یک (۰) برای جریان از شبکه CI از نوع l به نوع k باشد، C^{jk} به مقادیر گسسته مقداردهی اولیه می‌شود. T^{jk} (۰، ۱) نشان می‌دهد که چه درصدی از یک واحد جریان استاندارد شده از l باید به یک جزء از نوع k برسد تا عملکردی باقی بماند. گره بیمارستانی سفارشی ۶ در شکل ۲، پانل BS.1 ("گراف CI وابسته به هم") به توان الکتریکی (e) و مخابرات (c) بستگی دارد و خدمات مراقبت‌های بهداشتی را به مردم ارائه می‌دهد (p)، و از این رو C^{eh} و $C^{ch}=-1$ ، در حالی که $C^{hp}=1$. برای اینکه بیمارستان در این مثال کارایی خود را حفظ کند، باید حداقل ۰.۶ واحد برق استاندارد شده از طریق پیوند(های) وابستگی خود ($T^{eh}=0.6$)، ۱ واحد دسترسی مخابراتی ($T^{ch}=1$) و ۰ واحد مراقبت بهداشتی دریافت کند زیرا خود بیمارستان، ارائه دهنده این سرویس است ($T^{hp}=0$). وابستگی‌های جغرافیایی به طور ضمنی در چارچوب از طریق صراحت فضایی همه نمایش‌ها به حساب می‌آیند.

۲.۱.۴. تخصیص جریان و عملکرد زیرساخت

ترکیب جریان‌های کالا علاوه بر توپولوژی یک سیستم، برای ثبت عملکردهای سیستم به اندازه کافی ضروری است. با این حال، شبکه‌های CI وابسته به هم مستلزم جریان‌هایی در داخل شبکه‌های فردی (به عنوان مثال برق در شبکه برق)، و در سراسر شبکه‌ها (مانند برق‌رسانی به بیمارستان‌ها) هستند. علاوه بر این، جریان‌ها ماهیت‌های مختلفی دارند و شامل کالاهای فیزیکی (آب، برق و غیره) و همچنین وابستگی‌های منطقی (اتصال به ارتباطات سیار) می‌شوند. برای مقابله با این تنوع، جریان‌های داخلی در شبکه‌های CI و جریان‌ها در امتداد وابستگی‌های بین شبکه‌های CI به طور جداگانه بررسی می‌شوند. سپس نتایج به حالت‌های عملکردی باینری و مقادیر ظرفیت نرمال شده برای انسجام در تمام شبکه‌ها ترجمه می‌شوند. به طور رسمی، آن محاسبات بر روی زیرگراف‌های گراف CI وابسته قبلی ایجاد شده G انجام می‌شوند که از این پس به عنوان G^i و G^{jk} نامیده می‌شوند. زیرگرافها به ترتیب تمامی عناصر زیرساختی نوع i و انواع j و k و لبه‌های پیوند دهنده e^{jk} را در بر می‌گیرند، با این حال ارجاع خود را به نمودار فراگیر G نیز حفظ می‌کنند، که از این رو به روز می‌شود. شکل ۲، پانل BS.2 یک تصویر بصری از چنین زیرگراف‌هایی را ارائه می‌دهد.

جریان‌های درون شبکه‌ها: برای شبکه‌هایی با جریان‌های داخلی بین منابع و عناصر سینک، الگوریتم‌های تخصیص جریان نوع زیرساخت، که به‌طور انعطاف‌پذیری بر اساس داده‌ها و دانش موجود تنظیم شده‌اند، برای به‌روزرسانی تمام ویژگی‌های ظرفیت C^{jk} در زیرگراف‌های مربوطه G^i استفاده می‌شوند. شکل ۲، پانل BS.2 (سمت چپ) این رویه را برای شبکه قدرت نشان می‌دهد، که تنها شبکه‌ای است که جریان‌های کالای داخلی را در این مثال تلطیف شده در بر می‌گیرد. در غیاب دانش بیشتر سیستم جدا از تقاضا (داده‌های مصرف سرانه)، عرضه (داده‌های تولید نیروگاه) و توپولوژی شبکه، از رویکرد خوشه‌ای استفاده می‌شود. برای هر خوشه در G^e (در اینجا فقط یک خوشه وجود دارد)، نسبت عرضه (۲۸ گیگاوات ساعت) به تقاضا (۳۵ گیگاوات ساعت) محاسبه می‌شود و به عنوان یک مقدار ظرفیت نسبی جدید C^{ek} (در اینجا ۰.۸) به همه گره‌ها در آن خوشه این را می‌توان به عنوان سیستم قدرتی که در $100\% C^*$ ظرفیت مورد نیاز خود کار می‌کند خوانده شود. حالت‌های عملکردی اجزاء F در این مکانیسم بدون تغییر باقی می‌مانند.

جریان در سراسر شبکه‌ها: هدف این مرحله تعیین عملکرد F هر گره زیرساخت وابسته در گراف CI وابسته به هم بر اساس ظرفیت‌های موجود از سایر گره‌های زیرساخت پشتیبانی است. برای هر نوع وابستگی منحصر به فرد j^k (به عنوان مثال، قدرت-ارتباط، $k=c, j=e$) در G ، زیرگراف G^{jk} استخراج می‌شود. یک متغیر عرضه دریافتی M^{jk} برای هر گره در G^{jk} محاسبه می‌شود. M^{jk} معادل مجموع ظرفیت‌هایی است که C^{jk} در گره‌های هدف k از گره‌های منبع عملکردی i از طریق یک لبه e^{jk} دریافت می‌کند، و بنابراین در گره‌های نوع i صفر است. از نظر فنی، این انتشار جریان بر روی ماتریس مجاورت فقط با استفاده از ضرب ماتریس محاسبه می‌شود، که از نظر محاسباتی حتی برای شبکه‌های بزرگ نیز کارآمد است. اگر M^{jk} کوچکتر از آستانه ظرفیت تعیین شده قبلی T^{jk} باشد، یک گره عملکرد خود را از دست می‌دهد ($F=0$). شکل ۲، پانل BS.2 (سمت راست) این روش را به صورت رسمی (معادل ۱) و (۲) و به صورت گرافیکی در زیرگراف برق-ارتباطات موبایل، که مستلزم یک جریان متغیر فیزیکی و پیوسته است، نشان می‌دهد، و در تلفن همراه زیرگراف ارتباطات-مراقبت‌های بهداشتی، تقریبی شده توسط یک جریان متغیر باینری (منطقی): گره برج سلولی شماره ۷ مجموعاً ۰.۸ واحد انرژی نرمال شده M^{ec} را از منابع برقی که به آن متصل است دریافت می‌کند، که بیشتر از آستانه ظرفیت است (در اینجا روی $T^{ec} = 0.6$ تنظیم کنید). از این رو عملکردی باقی می‌ماند ($F=1$). گره بیمارستانی شماره ۱ $M^{ch} = 2$ واحد منطقی از منابع را از هر دو برج سلولی که به آن متصل است دریافت می‌کند. از آنجایی که این مقدار از واحدهای مورد نیاز (منطقی) تأمین برج سلولی ($T^{ch} = 1$) فراتر می‌رود، بیمارستان نیز عملکردی باقی می‌ماند ($F=1$).

از آنجایی که حلقه‌های وابستگی (وابستگی‌های متقابل) می‌توانند در بین شبکه‌های CI وجود داشته باشند، روش‌های تخصیص جریان داخلی و بین شبکه‌ای به طور مکرر تکرار می‌شوند تا زمانی که هیچ تغییری در متغیر عملکردی در هیچ یک از عناصر در گراف CI وابسته به هم وجود نداشته باشد.

۲.۲. مرحله دوم: مدل ریسک مخاطره طبیعی

در حالی که چندین پلتفرم برای مدل‌سازی مخاطرات طبیعی وجود دارد، نرم‌افزار منبع باز پینار تنها ابزاریست که به‌طور رایگان برای ارزیابی مخاطرات طبیعی و پشتیبانی از ارزیابی گزینه‌های سازگاری در دسترس است. رویکرد مدل‌سازی مبتنی بر رویداد پینار، از جمله برای انجام مطالعات ریسک طوفان‌ها و زلزله‌ها بر روی دارایی‌ها در سراسر جهان، برای تشخیص اثرات ناشی از سیل رودخانه‌ها در آب و هوای متغیر و جابجایی افراد، و در زمینه وسیع‌تر اقتصاد استفاده شده است. مطالعات سازگاری با اقلیم این چارچوب امکان ارزیابی ریسک کاملاً احتمالی را بر اساس تعریف ریسک IPCC به عنوان تابعی از خطر، قرار گرفتن در معرض خطر و آسیب پذیری فراهم می‌کند.

۲.۲.۱. خطر

خطر یک نمایش صریح فضایی از شدت یک رویداد فیزیکی طبیعی است، مانند سرعت باد مرجع جغرافیایی برای طوفان یا ارتفاع آب برای سیل. برای مثال، ردپای خطر می‌تواند بر اساس سوابق تاریخی، پیش‌بینی‌ها یا پیش‌گویی‌های اقلیمی باشد، یا به صورت مصنوعی برای ایجاد مجموعه‌های احتمالی ایجاد شود. در پینار، ماژول‌های خطر برای طوفان، سیل، آتش‌سوزی، زلزله، رانش زمین، بهم‌ریختگی و امواج گرما در مراحل مختلف بلوغ در دسترس هستند، اما می‌توانند از طریق داده‌های شطرنجی یا برداری که توسط کاربر دریافت می‌شوند نیز ارائه شوند.

۲.۲.۲. در معرض خطر بودن

در معرض خطر بودن به اطلاعات ارجاع داده شده جغرافیایی یا داده‌های جمعیتی اشاره دارد که در منطقه معین قرار دارند. در پینار، ماژول‌های معرض خطر بودن، برای بازایی مجموعه داده‌های دارایی شبکه‌بندی شده جهانی، زیرساخت‌های حیاتی از OpenStreetMap و داده‌های جمعیت شبکه‌بندی شده با وضوح بالا در دسترس هستند. داده‌های ارائه شده توسط کاربر در قالب‌های شطرنجی یا برداری به همان اندازه می‌توانند جذب شوند. اکسپوژرها به یک تخصیص ارزش برای گرفتن ارزش بالقوه در معرض خطر نیاز دارند، مانند مقادیر اقتصادی (دلار) از پیش محاسبه شده برای LitPop، و طول‌ها، مساحت‌ها یا به سادگی وحدت برای اجزای زیرساخت (مثلاً ۱۰۰ متر برای یک بخش جاده یا ۱ برای تسهیلات مراقبت‌های بهداشتی).

۲.۲.۳. آسیب پذیری

آسیب‌پذیری که تابع ضربه یا منحنی شکنندگی نیز نامیده می‌شود، یک نقشه‌برداری خاص از شدت خطر به میزان آسیب قابل انتظار است. منحنی‌های آسیب‌پذیری برای بادهای طوفان گرمسیری در سهام دارایی‌های اقتصادی عمومی در پینار برای ۹ منطقه جهان کالیبره شده‌اند، در حالی که ماژول عملکرد ضربه اختصاصی همچنین اجازه می‌دهد تا عملکردهای خاص مخاطرات و مؤلفه‌های زیرساختی را که از نوشتجات گرفته شده است، مشخص کنید، مانند دستورالعمل‌های فنی HAZUS ارائه شده توسط آژانس مدیریت اضطراری فدرال ایالات متحده (FEMA).

۲.۲.۴. ریسک (آسیب‌های سازه‌ای)

محاسبات ریسک در پینار با پوشش مکانی خطر و قرار گرفتن در معرض و نقشه‌برداری اثرات از طریق تابع ضربه مربوطه انجام می‌شود. از آنجایی که بیشتر نوردهی‌های زیرساختی در اصل در قالب‌های خطی یا چندضلعی قرار می‌گیرند، چنین اشکالی با وضوح‌های تعریف‌شده توسط کاربر به مرکزها درون‌یابی می‌شوند و پس از محاسبات ضربه دوباره به شکل اصلی خود جمع می‌شوند. از این رو، در اینجا، ریسک بر حسب آسیب ساختاری تخمینی به تمام مواجهه‌های زیرساختی اندازه‌گیری می‌شود، که به نوبه خود با توجه به متریک ارزش مربوطه (به عنوان کسر آسیب یا کل طول/مساحت تحت تأثیر) بیان می‌شود. مقادیر آسیب ساختاری محاسبه‌شده سپس به عنوان ویژگی A («ضربه») به هر عنصر مربوطه در نمودار CI وابسته G اختصاص داده می‌شود. برای تصویری از محاسبات خطر طوفان استوایی در خطوط برق، برج‌های سلولی و امکانات بهداشتی، به شکل ۲ پانل DS.1 مراجعه کنید.

۲.۳. مرحله سوم: اثرات فنی (شکست‌های زیرساختی)

برای هر عنصر در نمودار وابسته به هم، ضربه به مؤلفه مربوطه محاسبه شده با پینار به عنوان ویژگی A اختصاص داده می‌شود. حالت عملکردی F یک عنصر روی صفر تنظیم می‌شود اگر ضربه A از آستانه آسیب D که در شکل ۲، پانل DS.1 نشان داده شده است، بیشتر شود.

این تغییر در حالت‌های عملکردی می‌تواند یک خرابی آبشاری در نمودار را از طریق تغییرات جریان داخلی و ناشی از وابستگی ایجاد کند. به منظور انتشار اختلال، ظرفیت‌ها و ویژگی‌های عملکردی همه اجزای CI با اعمال الگوریتم شرح داده شده در بخش ۲.۱.۴ به طور مکرر تا زمانی که یک حالت پایدار جدید به دست آید، به روز می‌شوند. در مثال ما که در پانل DS.2 در شکل ۲ نشان داده شده است، چندین آبشار رخ می‌دهد: نمودار قدرت در نتیجه خرابی اولیه یک گره و یک عنصر لبه به سه خوشه تقسیم می‌شود که به موجب آن دو خوشه (CI. 1 و CI. 2) با قطع شدن اتصال به نیروگاه بدون ظرفیت باقی می‌مانند ($C^{ek}=0$). وابستگی‌های متقابل بین شبکه‌های CI این اختلالات را بیشتر منتشر می‌کند (برج سلولی شماره ۷ به یک گره برق بدون ظرفیت متصل است، بنابراین ناکارآمد می‌شود؛ بیمارستان شماره ۱ هنوز ۱ واحد منبع تغذیه دریافت می‌کند - به جای ۲ واحدی که قبلاً دریافت می‌کرد - از برج‌های سلولی پشتیبانی می‌کند، که مانع از شکست می‌شود).

۲.۴. مرحله چهارم: تأثیرات انسان‌محور (دسترسی به خدمات اولیه و خراب‌کاری‌ها)

مرحله آخر محاسبه دسترسی به سرویس اولیه (و خراب‌کاری‌ها، به ترتیب) برای طیف وسیعی از خدمات در گره‌های جمعیت است. دسترسی به خدمات اولیه، طبق تعریف ۱ سازمان ملل، از طریق تلاقی دو عامل تضمین می‌شود:

۱. عملکرد CI (مؤلفه) مسئول ارائه یک سرویس

۲. مفهوم دسترسی به CI (مؤلفه)

در اینجا، ما عملکرد را از طریق حالت‌های عملکردی عناصر گراف زیرساخت تعریف می‌کنیم. دسترسی یا از طریق در دسترس بودن مسیر جاده‌ای تحت اللفظی بین کاربر نهایی و زیرساخت (مانند بیمارستان‌ها برای خدمات مراقبت‌های بهداشتی) یا از طریق پوشش منطقه‌ای در اطراف محل زیرساخت (مانند دکل‌های تلفن همراه برای خدمات ارتباطی سیار) تعریف می‌شود. خلاصه کیفی پارامترهای دسترسی به سرویس پایه برای شش سرویس بررسی شده در این کار در جدول ۲ آورده شده است.

خدمات پایه	توضیحات
پویایی	اتصال عملکردی به یک عنصر از مسیر دست‌نخورده در یک آستانه فاصله مشخص.
برق	اتصال عملکردی به یک خوشه برق دست‌نخورده که بالاتر از یک نسبت ظرفیت مشخص است.
مراقبت‌های بهداشتی	وجود یک مسیر جاده دست‌نخورده در زیر آستانه فاصله معین تا یک تأسیسات فعال.
تحصیلات	وجود یک مسیر جاده دست‌نخورده در زیر آستانه فاصله معین تا یک تأسیسات فعال.
ارتباطات سیار	اتصال عملکردی به یک برج سلولی دست‌نخورده در یک آستانه فاصله مشخص.
آب آشامیدنی	اتصال عملکردی به یک تصفیه‌خانه فاضلاب دست‌نخورده در آستانه فاصله معین.

جدول ۲. مثال هایی برای شرایط دسترسی به خدمات اولیه که می‌توانند در مدل سیستم زیرساخت پیاده‌سازی شوند.

الگوریتم کمی دسترسی به سرویس اولیه در قیاس با الگوریتم تخصیص جریان و تعیین عملکرد در مرحله قبل پیاده‌سازی شده است. برای هر ترکیب منحصر به فرد زیرساخت-جمعیت جفت z, p ، که برای آن یال‌های وابستگی e^p در گراف CI وابسته به هم وجود دارد، زیرگراف G^{jp} شامل G^j ، G^p و e^p استخراج می‌شود. خدمات دریافتی M^{jp} به عنوان مجموع ظرفیت‌های گره‌های زیرساخت منبع که به گره‌های جمعیت می‌رسند محاسبه می‌شوند (معادل ۳ و ۴ در شکل ۲، پانل BS.3 را ببینید). سپس به هر گره جمعیت (هدف) یک ویژگی سرویس S^j اختصاص داده می‌شود که نشان‌دهنده سرویس ارائه شده توسط CI نوع j است. سرویس قابل دسترسی است ($S^j=1$) اگر M^{jp} از آستانه ظرفیت T^{jp} فراتر رود و علاوه بر این، شرایط دسترسی را برآورده کند (جدول ۲-۳ را مشاهده کنید)، در غیر این صورت $S^j=0$. در حالی که شرایط دسترسی مبتنی بر پوشش به طور ضمنی از طریق (عدم) وجود یک یال وابستگی محاسبه می‌شود، شرایط تحت اللفظی (دسترسی به جاده) به صراحت در نمودار CI وابسته G از طریق الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر بررسی می‌شود و فاصله مسیر بین گره جمعیت و گره تسهیلات را محاسبه می‌کند. پانل BS.3 در شکل ۲ این روش را با مثال دسترسی به توان الکتریکی نشان می‌دهد، که در آن گره جمعیت شماره ۷ $M^{ep}=0.8$ واحد نرمال شده توان دریافت می‌کند، که از آستانه ظرفیت ($T^{ep}=0.6$) فراتر می‌رود و از این رو سرویس قابل دسترسی است ($S^e=1$).

نمودار CI وابسته به هم با ویژگی‌های حالت عملکردی F در عناصر زیرساخت و ویژگی‌های سرویس S در گره‌های جمعیت، از این رو حالت پایه را تعریف می‌کند. پانل BS.4 در شکل ۲ این موضوع را برای سه شبکه زیرساخت و سه نوع سرویس مربوطه در شبکه جمعیت (دسترسی به نیروی برق S^e ، دسترسی به اطلاعات اولیه S^c و دسترسی مراقبت‌های بهداشتی S^h) نشان می‌دهد.

هنگامی که خرابی‌های مؤلفه CI مشخص شد، دسترسی به سرویس اولیه همانطور که توضیح داده شد دوباره محاسبه می‌شود. برای مثال سبک داده شده در مورد دسترسی به برق جمعیت، که منجر به یک وضعیت جدید و مختل می‌شود، به تصویر پانل DS.3 در شکل ۲ مراجعه کنید (پانل DS.4 در شکل ۲).

۲.۵. عدم قطعیت‌های مدل و تست حساسیت

با توجه به تعداد مراحل متوالی مشخص شده در زنجیره مدل سازی ارائه شده، مفروضات مدل و انتخاب‌های بازنمایی در یک مرحله ممکن است تا حد زیادی بر نتایج نهایی تأثیر بگذارد. به منظور امکان ارزیابی چنین حساسیت‌هایی، جدول ۳ بحث مختصری در مورد نکات اصلی که عدم قطعیت‌های مدل معرفی شده‌اند، ارائه می‌کند.

مرحله	منبع	توضیحات
۱	نمایش سیستم CI	انتخاب‌های مربوط به اجزای CI شامل یا حذف شده، ساده‌سازی‌ها (به عنوان مثال، عدم تمایز بین خطوط انتقال با ولتاژهای مختلف، تقریب شبکه ارتباطی توسط برج‌های سلولی، شبکه آب توسط تصفیه‌خانه‌های آب)
	شناسایی وابستگی	انتخاب قوانین وابستگی (به عنوان مثال، هیوریستیک، که بین آنها وابستگی سیستم‌های CI وجود دارد)
	پارامترسازی وابستگی	انتخاب شرایط برای ایجاد وابستگی (یعنی آستانه‌های فاصله بین اجزای شناسایی شده از طریق هیوریستیک، الزامات مسیر، و غیره)
۲	ردپای خطر	وضوح، دقت مکانی و اعتبار بازنمایی، در هنگام ورود یا حذف خطرات فرعی (مانند میدان‌های بادی، موج طوفان و بارش‌های سیل آسا برای طوفان‌های استوایی) یا پدیده‌های چند خطره (رویدادهای مرکب).
	منحنی‌های آسیب‌پذیری	مفروضات مربوط به رابطه (قطعی) بین شدت خطر و آسیب اجزا.
	آستانه‌های عملکردی-آسیبی	مفروضات مربوط به رابطه (قطعی، مبتنی بر آستانه) بین آسیب‌های سازه‌ای و سطوح عملکرد اجزای حاصل.
۳	الگوریتم آبخاری	انتشار قطعی (سخت) خرابی‌ها در امتداد وابستگی‌ها، فرض بر اینکه هدف به دلیل شکست در منبع به شدت ناکارآمد می‌شود.
۴	وابستگی‌های کاربر نهایی	عدم قطعیت‌ها مشابه مرحله ۱ هستند.
	پارامترسازی خدمات پایه	

جدول ۳. محرک‌های عدم قطعیت مدل در تمام مراحل در زنجیره مدل‌سازی.

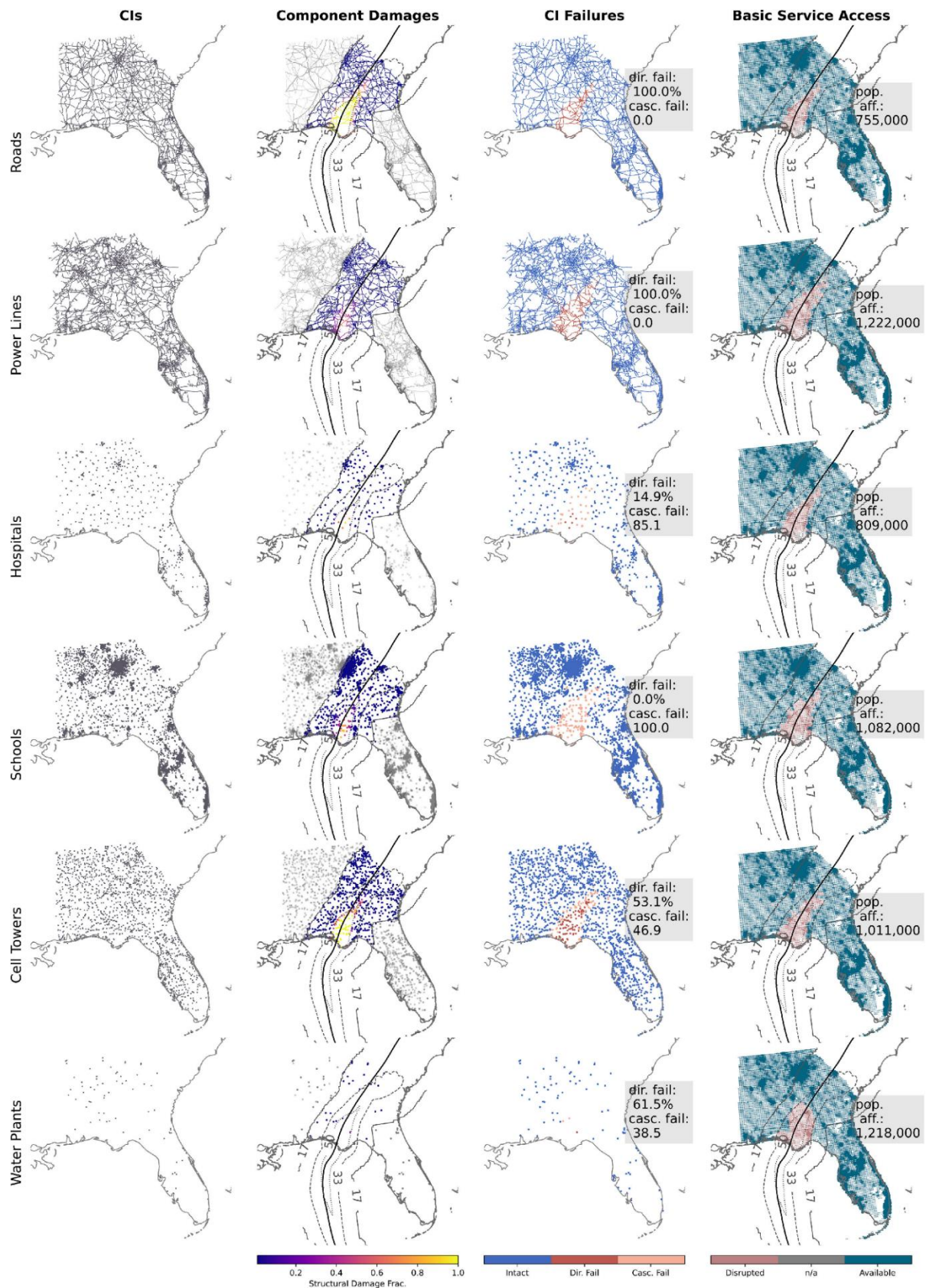
با توجه به پیچیدگی رویکرد ارائه شده، یک تحلیل یکباره با ساخت سناریوها به دست می‌آید، که در آن تنها یک مجموعه از پارامترها در محدوده‌های قابل قبول در یک زمان تغییر می‌کنند (مانند پارامترهای شرایط وابستگی، منحنی‌های آسیب‌پذیری و آستانه‌های عملکردی)، نقطه شروع خوبی برای شناسایی حساسیت‌های کلیدی در پاسخ‌های سیستم است. سپس می‌توان با تمرکز بر حساسیت‌های شناسایی شده، توصیف عمیق‌تر عدم قطعیت‌ها را انجام داد. کارهای زیادی را می‌توان مستقیماً در پینار با استفاده از ماژول "unsequa" انجام داد که روش‌های قابل استفاده آسانی را برای ارزیابی کمی عدم قطعیت جهانی و تجزیه و تحلیل حساسیت براساس نمونه‌گیری شبه مونت کارلو ارائه می‌دهد. علاوه بر این، رویکرد مدل‌سازی خطر احتمالی ممکن است به تخمین عدم قطعیت‌های بازنمایی در سمت ماشه کمک کند.

۳. کاربرد: خرابی‌های CI و اختلالات خدمات اولیه ناشی از طوفان مایکل

طوفان استوایی مایکل در ۷ اکتبر ۲۰۱۸ به فلوریدا Panhandle رسید و تأثیرات شدیدی را در سراسر فلوریدا، آلاباما و جورجیا ایجاد کرد، هم از نظر خسارت مستقیم دارایی (بیش از ۲۵ میلیارد دلار آمریکا) و هم از نظر تلفات جانی (حداقل ۴۳). و همچنین از نظر خرابی‌های CI (از جمله قطع برق و ارتباطات سیار که میلیون‌ها نفر را تحت تأثیر قرار می‌دهد). بر این اساس دو دلیل برای نمایش انتخاب شد. اسناد و مدارک کافی از رویداد اجازه اعتبارسنجی نتایج را می‌دهد و یک بررسی واقعیت در مورد کیفیت و محتوای اطلاعات مدل توسعه‌یافته ارائه می‌دهد. علاوه بر این، شدت مایکل تحت تأثیر بادهای شدید و موج طوفان در مقابل بارش‌های سیل‌آسا بود. بنابراین، می‌توان خطر را تنها با مدل‌سازی میدان بادی آن تقریب زد و همان را به عنوان مثالی گویا و در عین حال به اندازه کافی ساده معرفی کرد.

۳.۱. نمایش مدل

مرحله اول: مدل سیستم زیرساخت (عملکرد زیرساخت) ما سیستم مطالعه را به ایالت‌های فلوریدا، آلاباما و جورجیا که مستقیماً توسط بادهای شدید طوفان آسیب دیدند، تعیین می‌کنیم. علاوه بر جمعیت، سیستم ای زیرساختی در نظر گرفته شده عبارتند از: جاده‌های اصلی، خطوط انتقال نیرو، نیروگاه‌ها، برج‌های سلولی، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، موسسات بهداشتی و مدارس دولتی (برای نقشه‌های جغرافیایی شبکه‌های CI، ستون ۳ را ببینید). جزئیات مربوط به منابع داده، پیش‌پردازش و تولید نمودارهای CI فردی را می‌توان در پیوست B.1.1 یافت. منابع تولید و سینک‌های تقاضا در شبکه برق از آمار تولید نیروگاه و مصرف انرژی (پیوست B.1.2) به دست می‌آیند. برای تولید نمودار CI وابسته به هم، دوازده وابستگی متمایز در بین شبکه‌های CI (۶) و بین شبکه‌های CI و جمعیت (۶) شناسایی می‌شوند و همانطور که در پیوست B.1.3 نشان داده شده است، پارامتر می‌شوند. نمودار CI وابسته به هم متشکل از تقریباً ۸۰۰۰۰ گره و ۵۰۰۰۰۰ یال است که وابستگی‌ها اکثریت (۵۹٪) پیوندها را تشکیل می‌دهند (شکل B.1.1 را برای آمار دقیق نمودارها ببینید). جریان‌های شبکه محاسبه می‌شوند و حالت‌های عملکردی به همه اجزای زیرساخت در این پیکربندی قبل از فاجعه (که "حالت پایه" نامیده می‌شود) اختصاص داده می‌شوند، که در نتیجه همه عناصر گراف CI وابسته به هم کاربردی هستند. نرخ دسترسی به خدمات پایه جمعیت برای همه انواع خدمات در نظر گرفته شده در حالت پایه (دسترسی به تحرک، برق، آموزش، مراقبت‌های بهداشتی، ارتباطات سیار و آب آشامیدنی) از ۹۹٪ فراتر می‌رود.



شکل ۳. از خطرات طبیعی تا اختلالات خدمات اولیه در چهار مرحله. نمایشی برای طوفان مایکل ۱۸ در برخورد با پانه فلوریدا: داده‌های دارایی برای ۶ CI در سراسر FL. AL و GA استفاده شده در مدل CI (ستون 'CIs'), خسارات سازه‌ای ناشی از باد محاسبه شده با پینار ("خسارات جزء"), CI خرابی‌های آبشاری ناشی از اختلال اولیه، منجر به اجزای ناکارآمد عملکردی، ناکارآمد و آبشاری ("شکست‌های CI"), جمعیت متأثر از اختلالات سرویس اولیه به دنبال خرابی CI ("دسترسی به سرویس پایه"، الف: دسترسی به تحرک، ب: برق، ج: مراقبت‌های بهداشتی، د: آموزش، ه: ارتباطات سیار، و: آب آشامیدنی خطوط خطوط کانتور مسیر TC و میدان باد (m/s) در ستون‌های ۲ و ۴ برای مرجع رسم شده‌اند.

مرحله دوم: مدل ریسک خطر طبیعی (آسیب‌های ساختاری) داده‌های مسیر برای طوفان استوایی مایکل از پروژه بین‌المللی بهترین مسیر برای نظارت بر آب و هوا (IBTrACS) به دست آمده است. میدان باد (شکل B.2) از ماژول طوفان گرمسیری پینار، با توجه به پارامترسازی در محاسبه شده است. برای همه زیرساخت‌ها به جز نیروگاه‌ها که برای خرابی طراحی نشده‌اند، وارد پینار شده است. تمام شبکه‌های CI برای محاسبات تأثیر به لایه‌های اکسپوژر تبدیل می‌شوند. خسارات سازه‌ای با استفاده از ماژول ضربه پینار محاسبه می‌شود و ارقام ضربه مستقیم همانطور که در شکل ۳، ستون "خسارت اجزا" نشان داده شده است، به دست می‌آید.

مرحله سوم: تأثیرات فنی (شکست‌های زیرساختی) بخش‌های آسیب‌های ساختاری همه اجزای زیرساخت با اعمال مقادیر آستانه ویژه زیرساخت به حالت‌های عملکردی باینری ترجمه می‌شوند (ضمیمه پ.۳.۱). از این رو، خرابی‌های مولفه، الگوریتم خرابی آبخاری را در ماژول سیستم‌های زیرساخت، هم در شبکه‌های مجزای CI و هم در امتداد وابستگی‌های بین شبکه‌های CI آغاز می‌کند. تحت مشخصات سیستم داده شده، تنها شبکه قدرت دارای یک مکانیسم آبخاری داخلی است، زیرا شامل گره‌های منبع تعیین شده (نیروگاه)، گره‌های سینک (گره‌های خط برق با تقاضای مشتری) و گره‌های انتقال (همه گره‌های دیگر خطوط برق) است. یک رویکرد خوشه‌ای برای ثبت این رفتار شکست انتخاب شد، که در آن همه اجزای یک خوشه عملکردی باقی‌مانده زمانی که ظرفیت تولید به زیربخش معینی از تقاضا می‌رسد، ناکارآمد می‌شوند (در اینجا برای اهداف نمایشی روی ۶۰٪ تنظیم شده است). آبخارهای شکست ناشی از وابستگی در تمام شبکه‌های CI در نمودار CI وابسته به هم تجربه می‌شوند. نتایج در شکل ۳، "شکست‌های CI" نشان داده شده‌اند، که در آن خرابی‌های اولیه و ساختاری ناشی از آسیب و خرابی‌های آبخاری با کد رنگ مربوطه مشخص شده‌اند.

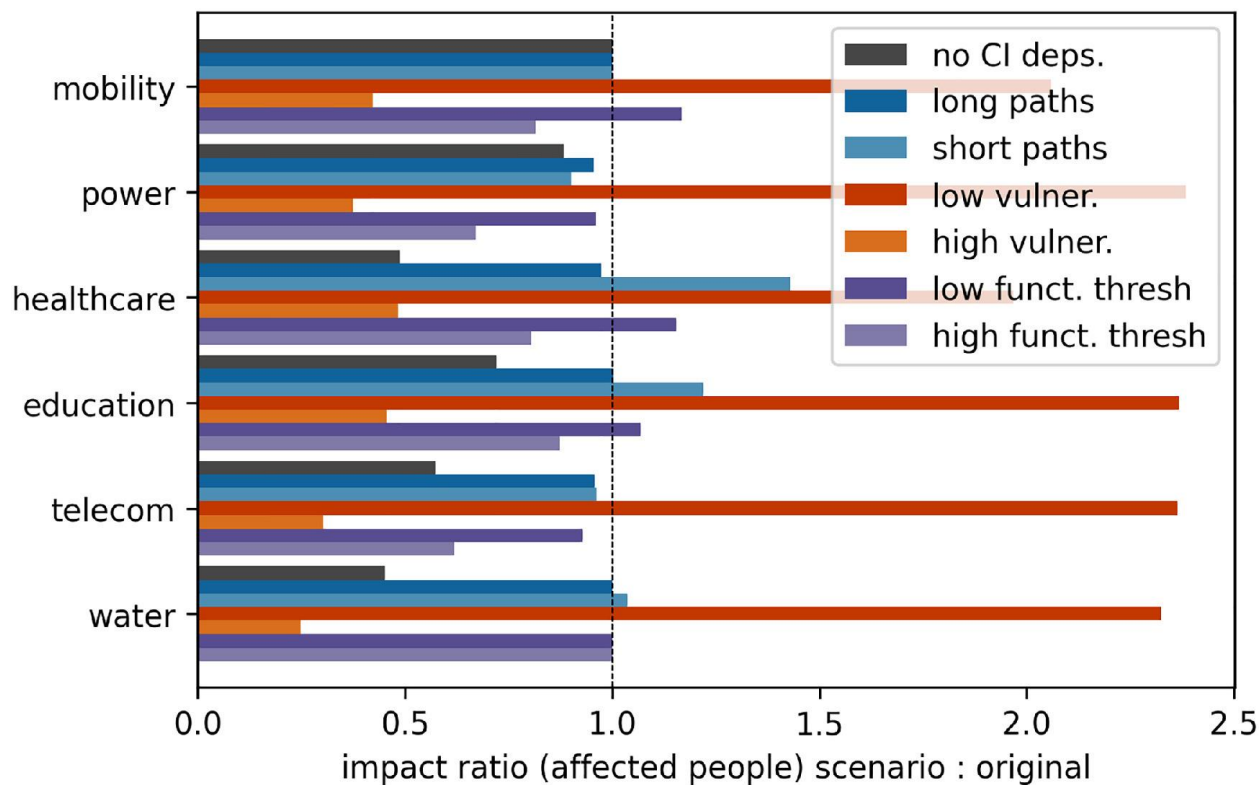
مرحله چهارم: تأثیرات انسان‌محور (اختلال‌های سرویس اولیه) به دنبال الگوریتم خرابی آبخاری، دسترسی به خدمات اساسی برای همه گره‌های جمعیت در گراف CI وابسته به هم محاسبه می‌شود. برای وابستگی‌های محدود به مسیر جاده (به عبارت دیگر دسترسی به مراقبت‌های بهداشتی و آموزش)، این شامل محاسبه مجدد در دسترس بودن مسیر و مسافت سفر است. شکل ۳، "دسترسی به خدمات پایه" نتایج اختلال در دسترسی به تحرک، برق، مراقبت‌های بهداشتی، آموزش، ارتباطات سیار و آب آشامیدنی را نشان می‌دهد.

۳.۲. تحلیل سناریو

برای به دست آوردن بینش اولیه در مورد اینکه چقدر نتایج به شدت به فرضیات در طول زنجیره مدل‌سازی بستگی دارد، هفت سناریو مدل‌سازی ساخته شده است (جدول B.4 را ببینید). ما نقش وابستگی‌های متقابل و تصمیم‌های پارامترسازی را برای توابع تأثیر و آستانه‌های عملکردی در نتایج نتایج بررسی می‌کنیم (جدول B.5 را برای نتایج عددی ببینید). مورد ارائه شده در بالا، که از این پس به عنوان پارامترسازی "اصلی" نامیده می‌شود، به عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود.

نتایج تا حد زیادی تحت تأثیر گنجاندن وابستگی‌های متقابل CI قرار می‌گیرند: از آنجایی که خرابی‌های آبخاری بخش قابل توجهی از خرابی‌های زیرساختی را در سناریوی پایه تشکیل می‌دهند، حذف این محرک ضربه‌ای، خرابی اجزا را در همه انواع CI به جز جاده‌ها به شدت کاهش می‌دهد، با پیامدهای قوی برای پیش‌بینی‌ها. از اختلالات خدمات تعداد افراد آسیب‌دیده برای همه خدمات اولیه به غیر از دسترسی به تحرک کاهش می‌یابد (شکل ۴، خاکستری را ببینید). در حالی که گنجاندن وابستگی‌ها به خودی خود نقش بزرگی در تعیین میزان تأثیرات بازی می‌کند، پارامترهای دقیق شرایط استقرار آن (مانند آستانه‌های فاصله مسیر) نتایج نهایی را با شدت کمتری تحت تأثیر قرار می‌دهند (شکل ۴، رنگ‌های آبی را ببینید). پارامترسازی توابع ضربه به طور مستقیم و قوی بر تخمین آسیب‌های سازه‌ای تأثیر می‌گذارد، که پیامدهای گسترده‌ای بر کل زنجیره ضربه از خرابی فوری CI در آبخارها تا اختلالات خدمات اساسی دارد. جابجایی توابع ضربه به میزان ۱۵ متر بر ثانیه در هر جهت در مقایسه با سناریوی پایه (یعنی همان سطح آسیب سازه

در شدت بادهای ۱۵ متر بر ثانیه بیشتر یا کمتر) می‌تواند منجر به واگرایی در برآوردهای اختلال در خدمات بین میلیون‌ها نفر شود و تقریباً هیچکدام از آن‌ها (شکل ۴، قرمزها).



شکل ۴. تعداد افرادی که برای هفت سناریو تحت تأثیر اختلالات خدمات اولیه قرار گرفته‌اند، نسبت به پارامترسازی اصلی ارائه شده در بخش ۳.۱. خاکستری: عدم وابستگی متقابل CI. آبی: اجازه می‌دهد مسیرهای جاده‌ای کوتاه‌تر و طولانی‌تر به سمت تأسیسات اجتماعی وجود داشته باشد، قرمزها: آسیب‌پذیری مولفه CI بالاتر و پایین‌تر، بنفش: آستانه آسیب ساختاری بالاتر و پایین‌تر تا رسیدن به ناکارآمدی اجزا.

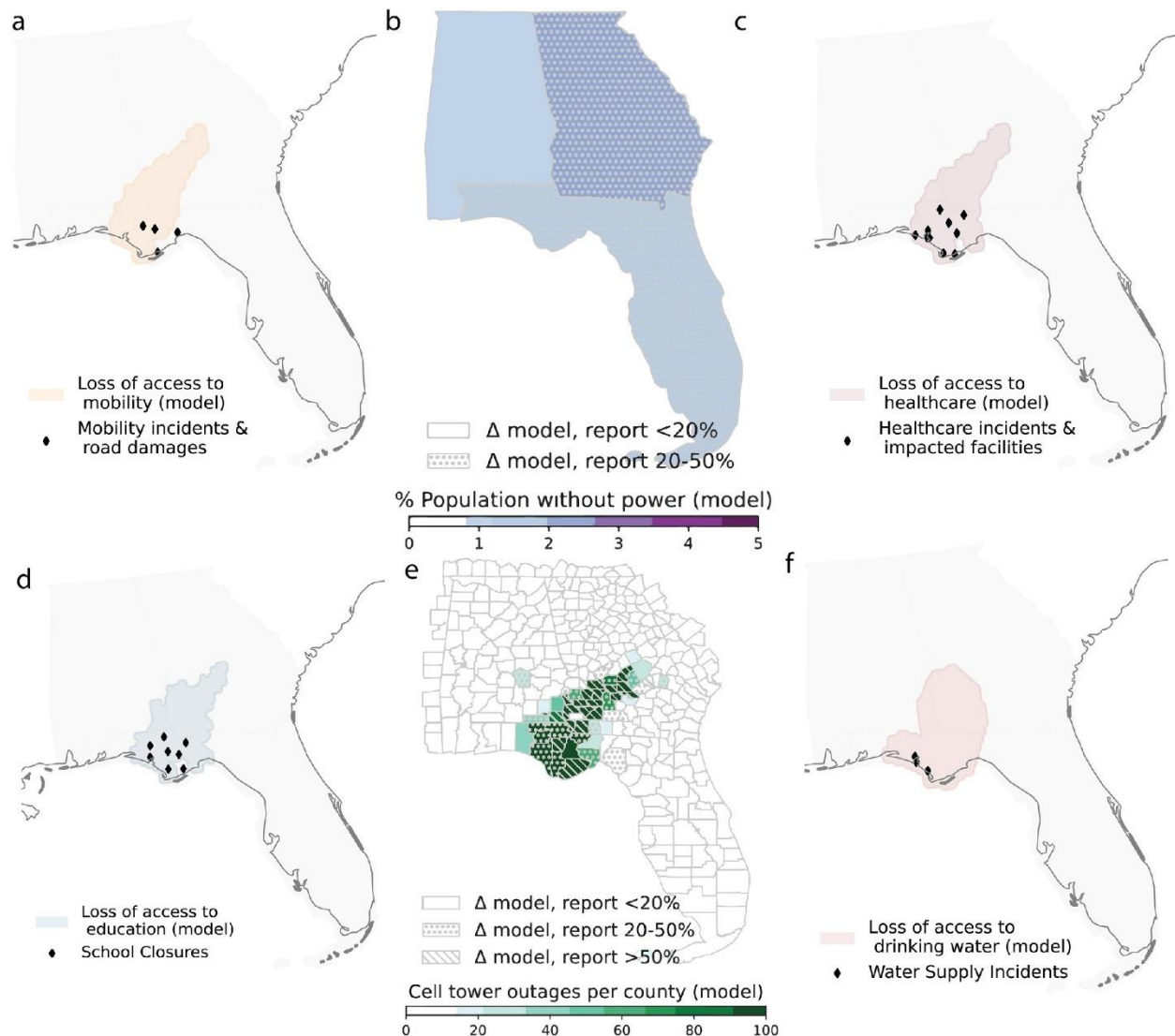
با توجه به وضوح ردپای خطر (۳۶۰ قوس در ثانیه، حدود ۱۱ کیلومتر)، که بیشتر از طول اجزای CI است، نتایج نسبت به مفروضات آستانه بین بخش‌های آسیب‌سازهای و عملکرد قطعات حساس نیستند، زیرا اجزا یا عمدتاً تحت تأثیر قرار می‌گیرند یا کلاً قرار نمی‌گیرند (جدول B.5 را ببینید). این موضوع ممکن است تغییر کند و اهمیت فزاینده‌ای پیدا کند، اما در وضوح‌های خطر بالاتر.

۳.۳ اعتبارسنجی

هدف از این اعتبارسنجی، جمع‌آوری شواهدی در مورد اینکه آیا آبخازهای ضربه‌ای به نمایش گذاشته شده - از آسیب‌های CI به افراد آسیب‌دیده - اتفاق می‌افتد، و اینکه آیا تأثیرات پیش‌بینی‌شده، حتی زمانی که بر اساس مفروضات درشت و مجموعه‌ای از اکتشافی‌ها ترسیم می‌شود، در ترتیب بزرگی درست هستند یا خیر است. مراحل تأثیر چندگانه محاسبه شده در رویکرد اساسی در گستره منابع اعتبارسنجی در نظر گرفته شده منعکس می‌شود و شامل انتشارات رسمی دولت، گزارش‌های ارائه‌دهندگان خدمات و مقالات روزنامه می‌شود (پیوست B.4 را برای یک مرور کلی ببینید).

حتی برای منطقه مورد مطالعه، که در آن منابع اطلاعاتی پس از رویدادهای مخاطره طبیعی فراوان و در دسترس است، مستندات مربوط به کل آبخاز ضربه ناقص است: آسیب‌های سازه‌ای فقط به صورت اتفاقی در تمام انواع زیرساخت گزارش می‌شوند، گزارش‌های جامع خاموشی عملکردی محدود به برق و مخابرات است. بخش، در حالی که حساب‌های مربوط به اختلالات خدمات اساسی همچنان حکایتی است. شکل ۵ این شواهد را ترکیب می‌کند، متضاد آمار خاموشی کمی در برابر خروجی‌های مدل (پانل‌های b و e

برای برق و مخابرات)، و نداشت حوادث مرتبط با خدمات کیفی در برابر مناطق اختلال دسترسی مدل شده (پانل‌های a, c, d و f برای مراقبت‌های بهداشتی، آموزش، تحرک و آب آشامیدنی).



شکل ۵. اعتبارسنجی. نتایج مدل متضاد با شواهد گزارش شده (حکایتی) در مورد (الف) انسداد جاده، آسیب‌های ساختاری و حوادث حرکتی، (ب) قطع برق، (ج) حوادث مرتبط با دسترسی به مراقبت‌های بهداشتی و آسیب‌های بیمارستان، (د) بسته شدن مدارس، (ه) سلول قطعی سایت و (و) مشکلات تامین آب.

از دست دادن دسترسی به برق هم از نظر افراد آسیب‌دیده (تقریباً ۱.۶۵ میلیون گزارش در مقابل ۱.۲۲ میلیون مدل شده) و هم از نظر توزیع فضایی (شکل‌های ۳ و ۵ (الف) را برای یک مرجع بصری دقیق‌تر مقایسه کنید) به خوبی ثبت می‌شود. از دست دادن دسترسی به ارتباطات بسیار به این صورت گزارش نشده است، اما وقوع مستند قطعی سایت سلولی به خوبی با پیش‌بینی‌های مدل فضایی در برج‌های سلولی شکست‌خورده مطابقت دارد (شکل ۵ (ه)، جمع‌آوری شده در سطح شهرستان را ببینید). بیشتر پیش‌بینی‌های شهرستان‌ها در محدوده ۵۰ درصدی خطا قرار دارند، حتی اگر شدت ضربه در شهرستان‌های طوفان‌زده واقع در داخل کشور بیش از حد تخمین زده شود.

حوادث مستند مربوط به از دست دادن دسترسی به خدمات و آسیب‌های زیرساختی، مانند تخلیه بیمارستان، آسیب‌های ساختاری و تلفات ناشی از مراقبت‌های ناهنگام در مورد دسترسی به مراقبت‌های بهداشتی، همگی در محدوده مدل‌سازی شده مورد نگرانی

قرار دارند (شکل ۵). با این حال، آسیب‌های جاده‌ای و حوادث مربوط به تحرک بسیار کمتر از پیش‌بینی‌های مدل در داخل کشور گزارش شده است (شکل ۵ (a))، تمایلی که کمتر مشخص است، اما برای دسترسی به مراقبت‌های بهداشتی و آموزش مشترک است (شکل ۵ (c, d)) و شدیدترین شواهد در مورد مسائل آب آشامیدنی (شکل ۵ (f)). واگرایی در اختلالات پیش‌بینی‌شده و واقعی در تحرک، اهمیت انتخاب عملکردهای تأثیر کافی را تأیید می‌کند، همانطور که در بخش تحلیل سناریو نیز اشاره شد. تابع ضربه جاده مورد استفاده در این مطالعه برای اختلالات ناشی از وزش درختان طراحی شده است، که ممکن است تصویری بیش از حد بدبینانه در مورد آسیب‌های ساختاری (بادوام‌تر) ارائه دهد.

نتایج اعتبارسنجی برای ارتباطات سیار، دسترسی به مراقبت‌های بهداشتی و آموزش، اهمیت گنجاندن وابستگی‌ها و خرابی آبشاری را در مدل برجسته می‌کند، در عین حال نکاتی را در مورد پارامترسازی کافی نشان می‌دهد: پیش‌بینی نسبتاً دقیق افرادی که تحت تأثیر قطع شدن سایت سلولی قرار گرفته‌اند، بدون وابستگی‌های متقابل برق قابل بازتولید نبودند. همانطور که تحلیل سناریو در بالا نشان داد. به طور مشابه، چندین بیمارستان که به طور مستقیم آسیب ندیده بودند، تخلیه را به دلیل مسائل مربوط به آب و برق گزارش کردند، در حالی که بسیاری از مرگ‌های غیرمستقیم مربوط به عدم دسترسی به موقع بیماران یا کارکنان اورژانس به امکانات بهداشتی بود. این امر اعتبار کلی ترکیب چنین وابستگی‌های CI را در محاسبات عملکرد زیرساخت و اهمیت در دسترس بودن مسیر جاده افراد در محاسبات دسترسی به سرویس سفارشی تأیید می‌کند. با این حال، چنین مشخصات وابستگی می‌تواند خطاها و اختلالات را بیش از حد تخمین بزند، همانطور که در دسترسی به آموزش دیده می‌شود: تخمین زده شده ۴۵۰۰۰ دانش‌آموز گزارش شده که مدرسه را به دلیل تعطیلی از دست داده‌اند، کمتر از حدود ۱۴۵۰۰۲ پیش‌بینی شده توسط مدل هستند. این تا حدودی به دلیل عدم هماهنگی بین کاربران نهایی و امکانات آموزشی است: برخلاف بیمارستان‌ها، که در آن هر تسهیلات در دسترس را می‌توان انتخاب کرد، افراد به یک مدرسه ثابت اختصاص داده می‌شوند. هنگامی که خسارات وارده به چنین تأسیساتی یا CI‌های پشتیبان آنها بیش از حد تخمین زده شود، این امر مستقیماً به بیش از حد برآورد اختلالات دسترسی به آموزش در کل محیط اطراف منتقل می‌شود.

در نهایت، مورد اختلالات دسترسی به آب نشان می‌دهد که درجه بالایی از ساده‌سازی سیستم می‌تواند مشکل‌ساز شود: در غیاب داده‌های بهتر، سیستم آب آشامیدنی تنها توسط تصفیه‌خانه‌های آب پروکسی می‌شد. در نتیجه، مدل مناطق بزرگی از اختلال را از یک تأسیسات معیوب پیش‌بینی کرد، که به نظر می‌رسد رفتار مشاهده‌شده در آن سیستم‌های آب دنیای واقعی نیست. به طور مشابه، هنگام تقریب شبکه مخابراتی - که شامل شبکه‌های فرعی بیشتر و انعطاف پذیرتر از ساختارهای ارتباطی سیار است - از طریق برج‌های سلولی باید احتیاط کرد.

علیرغم این واقعیت که برخی از اختلالات سرویس نسبت به مدل‌سازی شده گسترده‌تر بودند، ادغام یک مدل خطر و یک مدل CI مبتنی بر اکتشافی وابستگی نسبتاً ساده و داده‌های منبع باز به آسانی در دسترس، اجازه می‌دهد تا دینامیک خرابی مهم را در یک زنجیره محاسباتی متقابل ثبت کند. این مدل ضربات را به ترتیب بزرگی درست بازتولید می‌کند، اجازه می‌دهد تا محرک‌های ضربه را به تصمیمات پارامترسازی در هر مرحله از ضربه آبشاری ردیابی کند و مکانیسم‌ها را مجدد کالبره کند. علاوه بر این، یک بعد اجتماعی به خرابی‌های فنی CI می‌دهد، و زمینه‌های اختلال را برای خدمات اساسی ترسیم می‌کند که به طور مداوم توسط منابع رسمی نظارت نمی‌شوند. در حالی که این ویژگی‌ها امیدوارکننده هستند، تقاضا برای تصویری حتی دقیق‌تر وجود دارد، همانطور که خبرنگاری در پیامدهای طوفان مایکل اظهار داشت: «در حالی که ویرانی‌های ساحلی آشکار شده است، برخی از کارشناسان بلایای طبیعی بیشتر نگران شرایط دورتر در داخل هستند. [...] اینها برخی از آسیب‌پذیرترین مکان‌های اجتماعی در کل کشور، شهرستان‌های کم درآمد با نسبت بالایی از افراد مسن و بسیاری از افراد دارای معلولیت و بیماری‌های مزمن هستند».

۴. بحث

فریمورک مدل سازی توسعه یافته برای قابلیت همکاری، قابلیت انتقال و مقیاس طراحی شده است. قابلیت همکاری از طریق تعبیه یک مدل سیستم زیرساخت در پلتفرم ارزیابی ریسک پینار به دست می آید، که اجازه می دهد یک گردش کار ساده از خطرات طبیعی تا اثرات اجتماعی را فراهم کند. ارتباط با یک موتور شبیه سازی خطر مبتنی بر رویداد، راهی به جلو برای استفاده از چند ضلعی های سبک شده در غیاب رد پای خطر، رویدادهای فرضی یا نقشه های دوره بازگشت است که نماینده رویدادهای فردی نیستند. قابلیت انتقال هم از نظر تئوری و هم از لحاظ عملی تضمین می شود: در حالی که ما پیشنهادات در دسترس را در مورد منابع داده زیرساخت و جمعیت، اکتشافات وابستگی، توابع تاثیر و مدل های خطر ارائه می کنیم، این فریمورک می تواند هم داده های اختصاصی و/یا دیگر داده های منبع باز (مانند منطقه ای یا ملی) را مدیریت کند. سطح داده های توسعه یافته. این امکان بررسی انواع زیرساخت ها، خطرات، وابستگی ها و مناطق مورد مطالعه مورد علاقه کاربر را فراهم می کند: به عنوان مثال، توابع آسیب پذیری ممکن است تغییر کنند تا تاثیر مهم زوال از طریق پیری زیرساخت ها را به تصویر بکشند، یا وابستگی ها با آستانه های فاصله متفاوت مجدداً پارامتری شوند. برای محاسبه محدوده برج های سلولی خاص محلی یا سرعت سفر. معیار مقیاس در طراحی مدل سیستم زیرساخت، که به مشخصات فنی کمی نیاز دارد، ادغام می شود و عمدتاً بر توپولوژی شبکه و مجموعه ای از اکتشافات برای وابستگی و روش های تخصیص جریان تکیه می کند و امکان مطالعه سیستم های بزرگ را فراهم می کند.

نتایج شبیه سازی شده باید به عنوان اولین شاخص در نقاط حساس ضربه و اختلالات اوج از زاویه افراد در معرض خطر تفسیر شود. ماهیت ساده سازی رویکردهای مبتنی بر شبکه قبلاً به عنوان یک معاوضه ضروری در برابر گرفتن مقیاس های بزرگ سیستم که در آن خطرات طبیعی رخ می دهد، شناخته شده است. بنابراین، شایستگی رویکرد مدل سیستم توسعه یافته در امکان کار بر اساس یک مبنای جهانی سازگار با چندین سیستم CI وابسته به هم است، اما جایگزین مدل های سیستم تخصصی برای تحلیل های محلی دقیق و بهینه سازی سیستم زیرساخت فردی نمی شود.

سه سطح اطلاعاتی در مورد ریسک زیرساختی که مدل ارائه می کند (آسیب های اجزای ساختاری، خرابی های آبشاری و اختلالات خدمات)، به خوبی با ماهیت بسیار متنوع داده های تاثیر دنیای واقعی، که اغلب حکایتی است و چندین لایه از این ریسک ها را در بر می گیرد، همسو می کند. این تطبیق پذیری برای کالیبره کردن و تنظیم پارامترها در مدل بر اساس شواهد، مانند تنظیم توابع ضربه برای مطابقت با پوشش رسانه های چاپی در مورد آسیب های ساختاری، یا اصلاح اکتشافی وابستگی برای مطابقت با گزارش های خاموشی ارائه دهنده ابزار، را ارائه می دهد. بر اساس دانش ما، تنها تعداد کمی از مطالعات مدل سازی کمی چنین امکان بازخوردی را در بر می گیرند. به دست آوردن نتایج در مورد خرابی های زیرساختی مستقیم و آبشاری امکان تعیین کمیت نقش وابستگی های زیرساختی در ایجاد اثرات گسترده را فراهم می کند: اعتبارسنجی در مطالعه موردی ارائه شده به طور تجربی تأیید کرد که گستره تأثیرات مشاهده شده را نمی توان بدون گنجانیدن وابستگی ها بین شبکه های زیرساخت که با یافته های دیگر تحقیقات در مورد وابستگی های متقابل زیرساخت مطابقت دارد بازتولید کرد.

تجزیه و تحلیل سناریو نشان داد که توابع آسیب ساختاری و پارامترهای وابستگی منابع عدم قطعیت های قابل توجهی در مدل هستند. چگونگی به دست آوردن ماهیت متنوع وابستگی های متقابل، که به اندازه کافی «نقاط قوت جفت» متفاوت بین شبکه های CI مشاهده شده در واقعیت را به حساب می آورد، موضوع تحقیقات در حال انجام است. استفاده ارائه شده از ظرفیت ها، آستانه ظرفیت، افزونگی ها و بررسی های در دسترس بودن مسیر جاده ای در پارامترسازی وابستگی های زیرساخت یک سازش عملی بین چارچوب های ریاضی دقیق با شرط بندی های فراوان (به عنوان مثال) و امکان سنجی پیاده سازی برای شبکه های بزرگ با فرآیند محدود است. دانش و در دسترس بودن داده ها ما رویه های تخصیص کاربر را که معمولاً به کار می روند، صرفاً با تکیه بر شرایط

جغرافیایی (مانند مجموعه‌های Voronoi) یا الگوریتم‌های کوتاه‌ترین مسیر بدون اهداف جایگزین اصلاح می‌کنیم. با این حال، مدل‌سازی پشتیبان‌ها برای وابستگی‌های ناموفق (مانند در دسترس بودن ژنراتور برای مؤلفه‌های وابسته به توان)، تغییر الگوهای تقاضا برای خدمات مرتبط با زیرساخت در میان کاربران نهایی به عنوان واکنشی به رخداد‌های خطر طبیعی یا کاهش عملکرد بر خلاف دودویی خرابی‌های ناشی از اختلالات وابستگی ممکن است پویایی آشناری اجرا شده فعلی را بهبود بخشد. علاوه بر این، رویکرد آستانه به کار گرفته شده برای مرتبط ساختن آسیب‌های سازه‌ای به از دست دادن عملکرد جزء، ساده‌سازی برای کار چالش‌برانگیز توسعه شاخص‌های عملکرد سازگار است، که تحقیقات در جامعه مهندسی و امداد و جستجو و نجات در سوانح ممکن است به بینش‌های آینده منجر شود.

رویکرد ما مفهوم صریحی از زمان ندارد. از آنجایی که آسیب‌های ساختاری مدل‌سازی شده به زیرساخت‌ها باید از آستانه خاصی برای ناکارآمد شدن اجزا فراتر رود، این نشان می‌دهد که مدل اختلالات نسبتاً طولانی‌تری را ثبت می‌کند. با این حال، از آنجایی که شدت ضربه تابعی از زمان و زمان است، تبدیل آن به یک متغیر صریح می‌تواند روشن‌گر باشد: در حالی که برای دسترسی به مراقبت‌های بهداشتی چند ساعت اختلال در عواقب فوری یک رویداد مخاطره طبیعی ممکن است بسیار مرتبط باشد، ممکن است کمتر مرتبط باشند. برای دسترسی به مدارس، به خصوص اگر در تعطیلات آخر هفته اتفاق بیفتد. معرفی زمان می‌تواند نشانه‌ای آموزنده در مورد پویایی بازبایی و بازبایی هنگام معرفی زمان‌های تعمیر و «عکس‌های فوری» از شبکه CI وابسته به هم در لحظات مختلف، و ثبت رفتارهای عملکردی نوسانی یا غیرهمگرا که سیستم‌های وابسته به یکدیگر می‌توانند نشان دهند، ارائه دهد.

در نهایت، برآوردهای ما از اختلالات خدمات و امداد اولیه پس از فاجعه، یک بعد انسان محوری اغلب نادیده گرفته شده را به گفتمان در مورد خطرات زیرساخت اضافه می‌کند، که هم مدل‌های دانشگاهی، هم ارائه‌دهندگان خدمات شهری و امدادگران و نجاتگران یا گزارش‌های دولتی پس از فاجعه معمولاً به طور سیستماتیک آن را دریافت نمی‌کنند. رویکرد کل‌نگر بیشتر اجازه می‌دهد تا بخش‌هایی را که کمتر به نمایش گذاشته شده‌اند در تحقیقات CI مانند مراقبت‌های بهداشتی و آموزش شامل شود. این می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را به پاسخ‌دهندگان اضطراری با منابع محدود و تصمیم‌گیرندگانی که به طور یکسان با تصمیمات سرمایه‌گذاری چند معیاره روبرو هستند ارائه دهد. با این حال، و به خصوص از آنجا که تحقیقات در مورد آسیب‌پذیری اجتماعی هنوز در مراحل ابتدایی خود قرار دارد، مهم خواهد بود که نگاهی دقیق‌تر به اثرات افتراقی تلفات خدمات پایه بر بخش‌های مختلف جمعیت، مانند فقرا، افراد مسن یا افراد غیر بومی (که مکرراً نشان داده شده است که مکانیزم‌های مقابله کمتری دارند) داشته باشیم.

۵. نتیجه‌گیری

زیرساخت‌های حیاتی مانند خطوط برق، جاده‌ها، سیستم‌های مخابراتی و مراقبت‌های بهداشتی در سرتاسر جهان بیش از هر زمان دیگری در معرض خطرات رویدادهای شدید آب و هوایی در یک تغییر آب و هوا هستند. مدل‌های خرابی CI اغلب در مقیاس‌های محلی با نیازهای داده بالا و قابلیت انتقال کم عمل می‌کنند و بر روی عملکرد فنی تمرکز می‌کنند. خطرات طبیعی اغلب به صراحت به عنوان یک سناریوی مخرب در آن مدل‌سازی نمی‌شوند. مدل‌های مخاطرات طبیعی، به نوبه خود، اغلب بر آسیب‌های مستقیم به دارایی‌ها تمرکز می‌کنند، که ویژگی شبکه‌ای و وابسته به هم ذاتی سیستم‌های زیرساخت حیاتی را نادیده می‌گیرند.

برای پر کردن این شکاف‌ها بین مدل‌سازان زیرساخت و مدل‌سازان خطرات طبیعی، از روش‌های به خوبی تثبیت‌شده در هر دو جامعه استفاده می‌کنیم تا یک چارچوب مدل‌سازی متن‌باز، منسجم و متن‌باز برای ارزیابی خطرات فضایی صریح و در مقیاس بزرگ ناشی از خرابی‌های آبشاری زیرساخت‌ها و آن‌ها ایجاد کنیم. اثرات اجتماعی ناشی از مخاطرات طبیعی در پلتفرم ارزیابی ریسک پینار، ابزاری پیشرفته برای محاسبات اثرات مخاطرات طبیعی و ارزیابی گزینه‌های سازگاری، ما یک مدل سیستم‌های زیرساختی مبتنی بر نظریه شبکه را نشان می‌دهیم که به جزییات فنی کمی جدا از مکان دارایی‌های موجود و معمول نیاز دارد. داده‌های جمعیتی، که می‌تواند انواع بسیاری از شبکه‌های زیرساختی را مدیریت کند و وابستگی‌های متقابل بین آن‌ها را بر اساس مجموعه‌ای از اکتشافات ثبت کند. از این رو این چارچوب دیدگاهی سه لایه در مورد خطرات زیرساخت از نظر آسیب‌های اجزای زیرساخت، آبشارهای خرابی فنی و اختلالات خدمات اساسی انسان‌محور ارائه می‌دهد. این به راحتی در سراسر جغرافیایی قابل انتقال است و می‌تواند طوری تنظیم شود که شامل سیستم‌های CI، وابستگی‌های متقابل و خطرات مورد علاقه کاربر باشد.

مطالعه موردی معتبر در مورد طوفان مایکل در سراسر ایالات متحده فلوریدا، جورجیا و آلاباما برای شش شبکه CI وابسته به هم نشان داد که زنجیره مدل‌سازی ایجاد شده نقاط حساس ضربه را ضبط می‌کند و دینامیک خرابی آبشار را بازتولید می‌کند، که با نگاه کردن به آسیب‌های زیرساختی به تنهایی نمی‌توان به دست آورد. همچنین نشان داد که چگونه می‌توان از داده‌های تأثیر واقعی، مانند گزارش‌های قطع و حساب‌های رسانه‌های چاپی، برای اصلاح و کالیبره کردن مدل استفاده کرد.

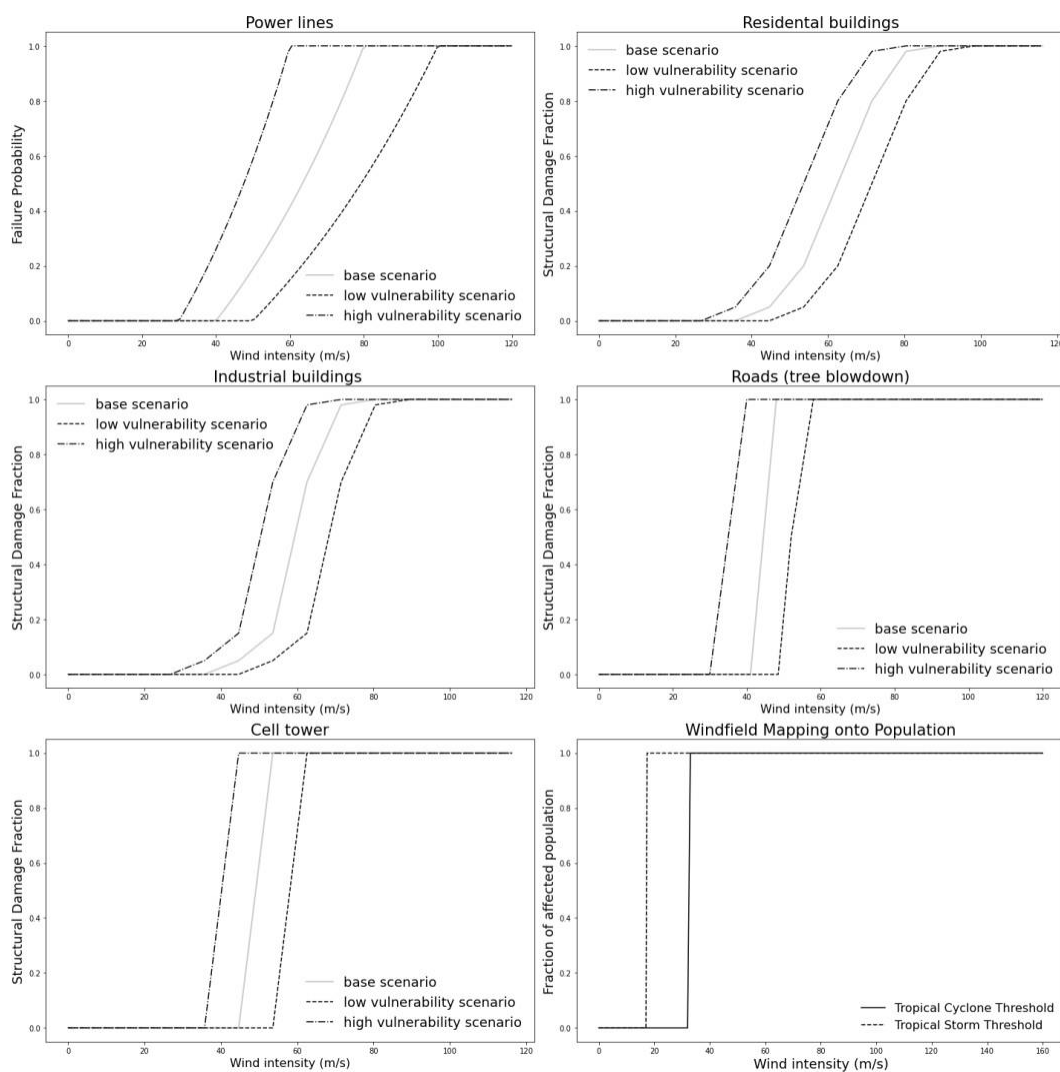
پیش‌بینی مکان‌های صریح فضایی از اختلالات خدماتی که توسط جمعیت وابسته در نتیجه خرابی‌های زیرساخت تجربه می‌شود، لایه جدیدی از اطلاعات خطر را اضافه می‌کند که معمولاً در زمین در دسترس نیست.

در حالی که ما یک "رویکرد روش‌شناختی جامع با بستری از مدل‌های مرتبط و قابلیت همکاری داده‌ها برای مدل‌سازی وابستگی‌های متقابل زیرساخت‌ها برای طیف وسیعی از نگرانی‌های ذینفعان مختلف و زمینه‌های تصمیم‌گیری" را ارائه نمی‌دهیم، رویکرد ما گامی در این مسیر برداشته است. ما ابزاری مناسب برای زمینه‌های تصمیم‌گیری که شامل گستره جغرافیایی بزرگ و تأثیرات چندین سیستم وابسته به هم وابسته به CI به اختلالات برای جمعیت است، ارائه می‌کنیم: سازگاری جهانی این رویکرد اجازه می‌دهد یک دیدگاه مقایسه‌ای از ریسک در بین کشورها، مرتبط با چارچوب‌های سیاست بین‌المللی باشد. برنامه‌ریزی سازگاری و سرمایه‌گذاری‌های زیرساختی برای تاب‌آوری را می‌توان تحت پتانسیل بی‌زاری آن‌ها برای انواع مختلف تأثیرات انسان‌محور و تحت مبادلات بین بخش‌های مختلف CI ارزیابی کرد. تجزیه و تحلیل نقاط حساس پس از فاجعه می‌تواند به فعالیت‌های امدادی و بازسازی بشردوستانه هدفمندتر منجر شود.

۶. مواد تکمیلی

۶.۱. پارامترهای سناریو مطالعه موردی

۱. مشخصات سناریوی "آسیب پذیری اجزای بالاتر و پایین تر"



شکل ۶.۱. توابع ضربه مورد استفاده برای حالت پایه (خاکستری، توپر)، سناریوی آسیب پذیری کم (سیاه، نقطه دار) و سناریوی آسیب پذیری بالا (سیاه، قطه چین). محورهای X: قدرت باد طوفان (m/s)، محورهای Y: احتمال شکست (خطوط برق)، کسر آسیب ساختاری (همه CI های دیگر).

۲. مشخصات سناریوی "آستانه های آسیب-عملکرد"

سناریو	بیس	پایین	بالا
آستانه	۰.۰۵ (خطوط برق) ۰.۵ (جاده‌ها) ۰.۳ (بقیه)	۰.۰۱ (خطوط برق) ۰.۳ (جاده‌ها) ۰.۱۵ (بقیه)	۰.۱ (خطوط برق) ۰.۷ (جاده‌ها) ۰.۵ (بقیه)

جدول ۶.۱: آستانه آسیب اجزای ساختاری (متوسط طول بخش برای CIهای لبه مانند خطوط برق و جاده‌ها)، که منجر به تخصیص سطح عملکرد داخلی ۰ می‌شود.

۳. مشخصات سناریوی "بدون وابستگی متقابل CI"

Dep	Source	Target	Redun- dancy	Road access	Dep. type	Flow type	Func. Thresh	Dist. Thresh. [m]
7	celltower	people	FALSE	FALSE	end user	logical	1	40000
8	education	people	TRUE	TRUE	end user	logical	1	40000
9	health	people	FALSE	TRUE	end user	logical	1	100000
10	power line	people	TRUE	FALSE	end user	physical	0.6	
11	road	people	FALSE	FALSE	end user	logical	1	30000
12	wastewater	people	TRUE	FALSE	end user	logical	1	

جدول ۶.۲: شرایط وابستگی مورد استفاده در سناریو بدون پیوندهای بین CI

۴. مشخصات سناریو "آستانه‌های فاصله پایین‌تر و بالاتر"

Dep	Source	Target	Redun- dancy	Road access	Dep. type	Flow type	Func. Thresh	Dist. Thresh. [m]
1	power line	celltower	TRUE	FALSE	functional	physical	0.6	
2	power line	education	TRUE	FALSE	functional	physical	0.6	
3	wastewater	education	TRUE	FALSE	functional	logical	1	
4	power line	health	TRUE	FALSE	functional	physical	0.6	
5	wastewater	health	TRUE	FALSE	functional	logical	1	
6	power line	wastewater	TRUE	FALSE	functional	physical	0.6	
7	celltower	people	FALSE	FALSE	end user	logical	1	40'000
8	education	people	TRUE	TRUE	end user	logical	1	25'000 / 40'000
9	health	people	FALSE	TRUE	end user	logical	1	70'000 / 130'000
10	power line	people	TRUE	FALSE	end user	physical	0.6	
11	road	people	FALSE	FALSE	end user	logical	1	30'000
12	wastewater	people	TRUE	FALSE	end user	logical	1	

جدول ۶.۳: شرایط وابستگی برای سناریو با پارامترهای اصلاح شده در مقایسه با حالت پایه (آستانه فاصله کمتر و بالاتر).

۶.۲. اعتبارسنجی مطالعه موردی

پاراگراف های زیر اطلاعات مفصلی در مورد شواهد مورد استفاده برای اعتبارسنجی نتایج مطالعه موردی ارائه می دهند. منابع رسمی دولتی برای تأثیرات برق و مخابرات در دسترس است، در همه موارد دیگر حساب های رسانه های چاپی در نظر گرفته شد. تلاش های جستجو هم بر بازیابی اطلاعات در مورد تأثیرات زیرساختی (مانند آسیب های ساختاری، قطعی ها و غیره) و هم تأثیرات خدمات اولیه (مانند حوادث مراقبت های بهداشتی، اختلالات حرکتی و غیره) متمرکز بود.

صدمات ساختاری به اجزای زیرساخت تنها به طور اتفاقی در روزنامه ها و در گزارش طوفان پست گرمسیری سرویس ملی هواشناسی برای همه بخش های مورد مطالعه گزارش شده است. قطع برق در سطح شهرستان برای برق و ارتباطات سیار توسط دفاتر دولتی مربوطه (پلیس امنیت سایبری، امنیت انرژی، و واکنش اضطراری و کمیسیون ارتباطات فدرال) ثبت شده است، اما برای بخش های آب و حمل و نقل در دسترس نیست. تعطیلی بیمارستان ها مستند است، در حالی که تعطیلی مدارس کمتر کامل است. افرادی که از اختلالات خدمات اولیه رنج می برند را تنها می توان به طور غیرمستقیم برای برق و ارتباطات سیار بر اساس آمار قطعی استنباط کرد، و به طور حکایتی در مقالات روزنامه ها برای سایر خدمات گزارش می شود، مانند جوامعی که توسط مخازن آب شیرین تامین می شوند یا به دلیل ریزش جاده ها قطع می شوند.

تأسیسات مراقبت های بهداشتی تحت تأثیر قرار گرفته و حوادث مربوط به عدم دسترسی به خدمات اورژانس و مراقبت های بهداشتی:

بیمارستان رفتاری Emerald Coast خدمات جهانی بهداشت، فورت والتون بیچ، شامل بیمارستان توانبخشی سلامت، شهر پاناما؛ بیمارستان یادبود جورج ای ویمز در آپالاجیکولا. قلب مقدس پزشکی خلیج در شهر پاناما؛ بیمارستان آزادی Calhoun در Blountstown. مرکز پزشکی منطقه ای ساحل خلیج در پاناما سیتی؛ بیمارستان جکسون در ماریانا؛ بیمارستان قلب مقدس در خلیج در بندر سنت جو. مرکز پزشکی خلیج فارس.

• اسپرینگفیلد: "پس کی کسی برای کمک میاد؟" ترنيسا اسمیت، ۴۸ ساله، راننده اتوبوس مدرسه در اسپرینگفیلد که برای خودش در عقب ماشینش تحت درمان با انسولین بود.

• شهرستان گلدسن: یکی از اعضای خانواده در طول طوفان بی توجه بود. آنها با ۹۱۱ تماس گرفتند اما به آنها گفتند کسی نمی تواند پاسخ دهد. چارلز اش پدر، ۷۱ ساله، به دلیل طوفان قادر به دریافت درمان دیالیز نیست.

• شهرستان لیبرتی: مرد، ۷۸ ساله. از درد قفسه سینه/تنگی نفس در طول طوفان شکایت کرد. EMS قادر به پاسخگویی نبود. چند ساعت بعد در صحنه فوت شد.

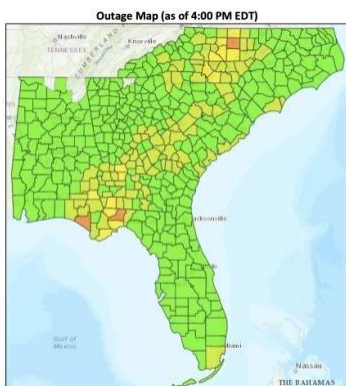
• شهرستان خلیج: تیموتی کلارک، ۶۴ ساله. مشغول کار در حیاط پس از طوفان، سقوط کرد، EMS قادر به پاسخگویی نبود. رابرت ویتنی، ۴۳ ساله، پس از شروع بادهای شدید ناشی از طوفان، مشغول کار در حیاط برای ایمن سازی ملک، سقوط کرد، EMS قادر به پاسخگویی نبود. خوزه گولازو، ۵۲ ساله، سابقه پزشکی پیچیده، به دلیل قطع برق/حمل و نقل، قادر به دسترسی به دیالیز نیست. جودیت کولی، ۷۹ ساله. آسایشگاه، سابقه پزشکی پیچیده که نیاز به استفاده از دستگاه های برقی، بدون برق، بدون ژنراتور داشت. جیمز استاکی، ۸۱ ساله، آسایشگاه، سابقه پزشکی پیچیده که نیاز به استفاده از دستگاه های برقی، بدون برق، بدون ژنراتور داشت. پل گیلدی، ۷۷ ساله. بیماری طبیعی گسترده، پس از طوفان در خانه فوت شده بود، بدون برق. کورت بنت، ۶۷ ساله، شرایط پزشکی که نیاز به استفاده از دستگاه های تنفسی برقی دارد، بدون برق. دوروتی لارنس، ۹۴ ساله. بیماری طبیعی، بدون برق، سلامت خانه کمتر در دسترس است.

۶.۳. قطعی برق

برگرفته از Hurricane Michael Situation Reports.

<https://www.energy.gov/ceser/downloads/hurricane-michael-position-reports-october-2018>

آمار خاموشی در سطح شهرستان فقط به صورت گرافیکی در دسترس است، به شکل رجوع کنید، اعداد دقیق بر اساس وضعیت گزارش شده است که اعداد اعتبارسنجی از آن گرفته شده است.



شکل ۶.۳- نقشه خاموشی در هر شهرستان، از خلاصه رویداد طوفان مایکل، بعد از ظهر ۱۱ اکتبر ۲۰۱۸

ایالت	تأثیر گرفته	مشتریان تحت تأثیر قرار گرفته	افراد تحت تأثیر قرار گرفته
آلاباما	۳.۰۹٪	۸۷۷۰۶	۱۵۰۰۰
فلوریدا	۳.۶۸٪	۴۰۰۶۶۶	۷۸۰۰۰
جورجیا	۶.۴۴٪	۴۲۴۷۴۴	۶۷۶۰۰۰

جدول ۶.۴- تعداد افراد آسیب‌دیده (ستون ۳) با ضرب داده‌های سرشماری جمعیت در درصد مشتریان آسیب‌دیده (ستون ۱) تخمین زده می‌شود، زیرا تعداد مشتریان آسیب‌دیده به مشترکان اشاره دارد، نه افراد در هر خانواده.

۶.۴. تأثیرات مخابراتی

بخش‌هایی از سایت‌های سلولی خارج از خدمات به ازای هر شهرستان در گزارش‌های وضعیت ارتباطات طوفان مایکل که توسط کمیسیون ارتباطات فدرال ارائه شده است، در <https://www.fcc.gov/michael> گزارش شده است.

برای مقایسه با نتایج در این مطالعه، بخش‌هایی از برج‌های سلولی ناکارآمد در سطوح شهرستانی که توسط شکل فایل‌های TIGER/Line ارائه شده توسط اداره سرشماری ایالات متحده، وزارت بازرگانی تعریف شده است، جمع‌آوری شدند و با ارقام گزارش‌شده در تضاد بودند. لازم به ذکر است که سایت‌های سلولی و دکل‌های سلولی دقیقاً مشابه نیستند و نام‌گذاری شهرستان‌ها در چند مورد مبهم بود.

۶.۵. حوادث جاده‌ای و حرکتی

• شهرستان واکولا: ساوری گفت: "ما بیش از ۱۰۰۰ درخت فقط روی خطوط داشتیم." بعد از مدتی شمارش را متوقف کردیم. درختان ارتباطات را قطع کردند، جاده‌ها را مسدود کردند و خطوط برق را در هم پیچیدند و برق را قطع کردند.

• Calhoun & Liberty: که به خشم ویرانگر طوفان‌ها عادت نداشتند، جوامع داخلی مانند شهرستان‌های Calhoun و Liberty برای روزها قطع شدند — جاده‌ها مسدود شدند و همه ارتباطات قطع شد. درختان از بین رفته و آوار همه جاده‌ها را پر کرده یا مسدود کرده است. ساکنان روستایی در پشت مسیرهای طولانی خاکی خود گیر افتاده بودند.

• شهرستان جکسون: یک چالش بزرگ پاکسازی جاده‌های مسدود شده و متقاعد کردن رانندگان محلی بود تا از جاده‌ها خارج شوند تا عملیات پاکسازی سریعتر انجام شود. مارک فورمن، رئیس سازمان آتش نشانی و نجات شهرستان جکسون از تصادفات و جراحات زیادی خودرو در شب خبر داد.

• FL، Eastside: بازگشت همیشه آسان نبود. بخش‌هایی از بزرگراه ۹۸ ایالات متحده، بزرگراه ساحلی، شسته شد. ممکن است چندین هفته طول بکشد. ما هنوز در حال تمیز کردن جاده‌ها هستیم. بسیاری از جاده‌ها آسیب دیده‌اند. خسارت زیادی از آب وارد شده است و برخی از آنها شسته شده‌اند.

برگرفته از: <https://eu.tallahassee.com/story/news/hurricane/2018/10/14/hurricane-michael-arc-ruin-trail-destruction-florida-panhandle-big-bend/1614787002>

۶.۶. حوادث تأمین آب

• هنگامی که طوفان مایکل فلوریدا را در هم شکست، طوفان شریر دسته ۴ برج آبی را در ساحل مکزیکو واژگون کرد.

• در همان نزدیکی، مرکز پزشکی خلیج در پاناما سیتی هنوز با برق جزئی ارائه شده توسط ژنراتورها کار می‌کرد، اما توالتهای تاسیسات پر می‌شدند و آب نداشتند.

• سپاه مهندسين ارتش ایالات متحده در بازگرداندن خدمات آب آشامیدنی و فاضلاب به جوامعی در شهرستان بی که تحت تأثیر طوفان مایکل قرار گرفته است. با شروع بازسازی جوامع در فلوریدا و جورجیا پس از طوفان مایکل، Anheuser-Busch گفت که برخی از خطوط آبجو خود را تعطیل می‌کند تا بیش از ۳۰۰۰۰۰ قوطی آب آشامیدنی را به افراد نیازمند برساند.

• مثال متقابل: وقتی طوفان مایکل به سمت پانهندل فلوریدا می‌چرخد، ساکنان تالاهاسی می‌توانند خیالشان راحت باشد که آب آشامیدنی آنها سالم است و نیازی به جمع‌آوری آب معدنی ندارند. یکی از مقامات شهری روز دوشنبه گفت که این شهر دارای منبع آب فراوان و ایمن است که از آبخوان فلوریدا در اعماق زمین گرفته شده است، و به اندازه کافی آب اضافی در آن تعبیه شده است که بعید است در طول طوفان از کار بیفتد یا آلوده شود.

برگرفته از: <https://www.meco.com/hurricane-season-impact/>
https://response.epa.gov/site/site_profile.aspx?site_id=13982

۶.۷. حوادث دسترسی به مدرسه

"تا اطلاع ثانوی، مدارس در هشت شهرستان در سراسر Panhandle، از جمله Bay، Calhoun، Franklin، Gadsden، تعطیل هستند.

شهرستان های خلیج، جکسون، لیبرتی و واشنگتن، حدود ۴۵۰۰۰ دانش‌آموز را آواره کردند.

برگرفته از: <https://eu.pnj.com/story/news/2018/10/17/hurricane-michael-closes-schools-florida/1660289002>

پیوست‌ها

پیوست A. انتخاب‌های مدل‌سازی برای شبکه‌های CI

سیستم CI	امکانات گسترده	امکانات با پیچیدگی کم
جاده	N: تونل‌ها، پل‌ها	N: تقاطع‌ها
	E: -	E: خیابان‌ها
برق قدرت	N: پست‌های انتقال و توزیع، تیرهای برق	N: نیروگاه‌های تولید برق
	E: خطوط توزیع ولتاژ پایین	E: خطوط انتقال
مخابرات / ارتباطات رادیویی	N: نقاط تبادل اینترنت، مراکز داده، دفاتر مرکزی، ایستگاه‌های پایه، قطب‌ها	N: برج‌های سلولی
	E: خطوط ثابت، کابل‌های فیبر نوری، خطوط انتقال زیردریایی	E: -
فاضلاب و آبرسانی	N: چاه‌ها، مخازن، پمپ‌ها، شبکه‌های آبی	N: تصفیه‌خانه‌های آب
	E: خطوط لوله آب، تونل‌های آب، رودخانه‌ها	E: -
مراقبت‌های بهداشتی و خدمات اورژانسی	N: مطب پزشکان، دندان‌پزشکان، داروخانه‌ها، خانه‌های سالمندان	N: بیمارستان‌ها، درمانگاه‌ها
	E: -	E: -
امکانات آموزشی	N: دانشگاه‌ها، مراکز نگهداری از کودکان، مهدکودک‌ها	N: مدارس
	E: -	E: -
کاربر نهایی	N: -	N: خوشه‌های افراد
	E: -	E: -

جدول A.1 شبکه‌های CI و اجزای آنها، در لبه‌ها (E) و گره‌ها (N). ستون اول یک انتخاب فرعی ساده از اجزای شبکه را برای نشان‌دادن سیستم‌ها در یک محیط استاندارد شده با پیچیدگی کم پیشنهاد می‌کند، ستون دوم اجزای اضافی را در صورت موجود بودن داده پیشنهاد می‌کند.

پیوست B. مطالعه موردی

B.1. ورودی‌های مدل سیستم زیرساخت

B.1.1. داده‌های مؤلفه زیرساخت

زیرساخت	منبع	شرح داده‌ها، پیش‌پردازش
جاده‌ها	OpenStreetMap	داده‌ها: با استفاده از ماژول OpenStreetMap در پینار
بیمارستان‌ها	HIFLD*: بیمارستان‌ها	پیش‌پردازش: ادغام خطوط، تمیز کردن محوطه، حذف تکراری‌ها، پیوند خوشه غیرمرتبط
خطوط برق	HIFLD: خطوط انتقال برق	داده‌ها: شامل ۲۰ کیلومتر بافر در اطراف مرزهای بیرونی کشور
نیروگاه‌ها	HIFLD: نیروگاه‌ها	پیش‌پردازش: -
امکانات آموزشی	HIFLD: مدارس دولتی	داده‌ها: همه خطوط در کشور
برج‌های سلولی	HIFLD: برج‌های سلولی	پیش‌پردازش: ادغام خطوط، حذف تکراری‌ها، پیوند خوشه غیرمرتبط
فاضلاب	HIFLD: تصفیه خانه های فاضلاب	داده‌ها: همه امکانات در کشور شامل ۲۰ کیلومتر بافر در اطراف مرزهای بیرونی
مردم	تعداد جمعیت شبکه‌بندی شده WorldPop	پیش‌پردازش: -

جدول B.1: داده‌های دارایی زیرساخت کدگذاری شده جغرافیایی مورد استفاده در مطالعه موردی، بخش ۳.

*HIFLD: داده‌های بنیادی زیرساخت داخلی

B.1.2. داده‌های عرضه و تقاضا

محاسبه تقاضای برق به ازای هر خوشه مردم (به جدول B.1 مراجعه کنید): کل مصرف انرژی الکتریکی / کل جمعیت کشور * تعداد جمعیت خوشه

متغیر	منبع	توضیحات داده
عرضه	HIFLD: نیروگاه‌ها	همان منبع داده برای داده‌های موقعیت جغرافیایی نیروگاه‌ها در منطقه مورد نظر. منبع انرژی الکتریکی گرفته شده از تولید خالص سالانه نیروگاه‌ها، در ستون NET_GEN آورده شده است.
تقاضا	آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) ترازهای انرژی جهانی	کل مصرف انرژی الکتریکی برای کل ایران یا ایالات متحده آمریکا، همه بخش‌ها، ۲۰۱۹.

جدول B.2: داده‌های جمعیت، داده‌های عرضه و تقاضای انرژی که برای مطالعه موردی در بخش ۳ استفاده شد.

محاسبه منبع برق در هر نیروگاه (به جدول B.1 مراجعه کنید): مستقیماً از منبع داده گرفته شده است.

تبادل عرضه و تقاضا در حالت بدون اختلال: افزودن یک عنصر واردات/صادرات به چارچوب داده‌های نیروگاه با عرضه معادل تفاوت بین عرضه کل نیروگاه‌ها در منطقه مورد نظر و کل مصرف انرژی در منطقه مورد نظر (جدول B.2 و B.3).

B.1.3. وابستگی‌ها

مروری بر تصمیم‌های پارامترسازی وابستگی در مفروضات مدل‌سازی ارائه شده است که به این انتخاب‌ها در زیر توضیح داده شده است (جدول B.3).

Dep	Source	Target	Redun- dancy	Road access	Dep. type	Flow type	Func. Thresh	Dist. Thresh. [m]
1	power line	celltower	TRUE	FALSE	functional	physical	0.6	
2	power line	education	TRUE	FALSE	functional	physical	0.6	
3	wastewater	education	TRUE	FALSE	functional	logical	1	
4	power line	health	TRUE	FALSE	functional	physical	0.6	
5	wastewater	health	TRUE	FALSE	functional	logical	1	
6	power line	wastewater	TRUE	FALSE	functional	physical	0.6	
7	celltower	people	FALSE	FALSE	end user	logical	1	30000
8	education	people	TRUE	TRUE	end user	logical	1	40000
9	health	people	FALSE	TRUE	end user	logical	1	100000
10	power line	people	TRUE	FALSE	end user	physical	0.6	
11	road	people	FALSE	FALSE	end user	logical	1	30000
12	wastewater	people	TRUE	FALSE	end user	logical	1	

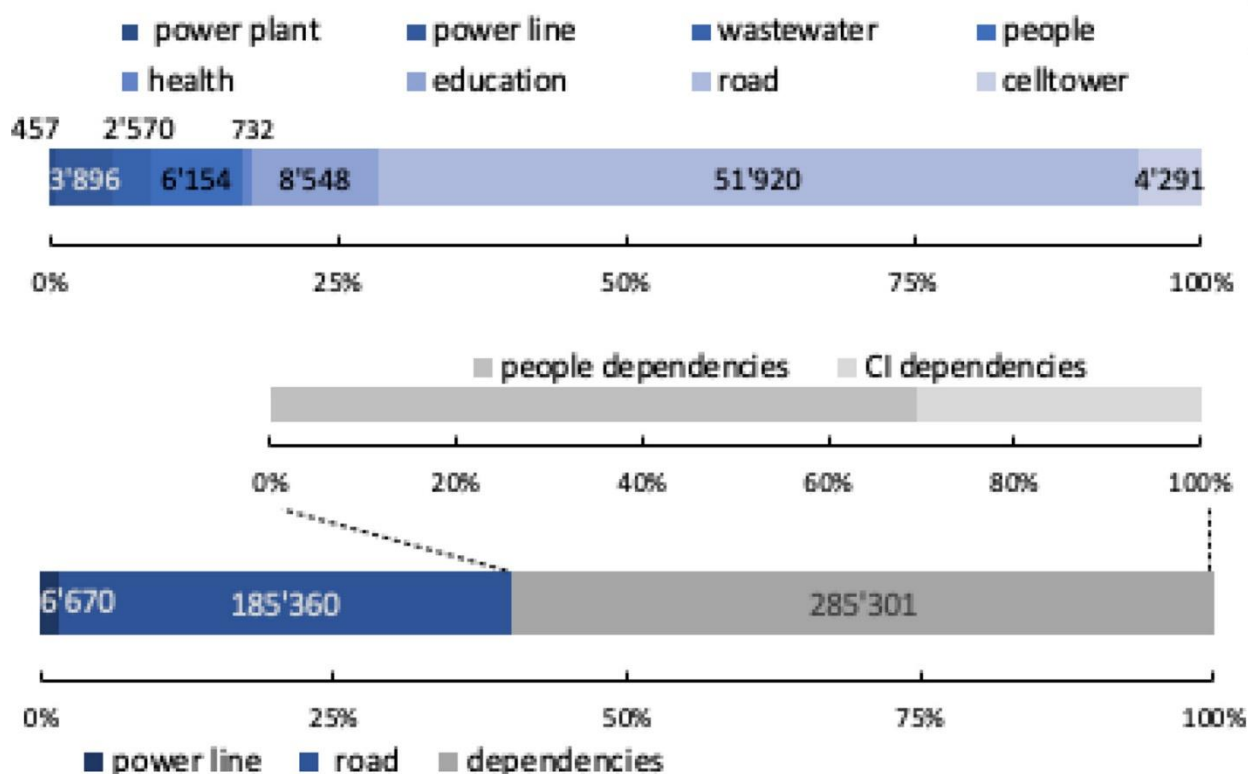
جدول B.3. وابستگی‌های شناسایی شده بین شبکه‌های CI (۱-۶) و بین شبکه‌های CI و کاربران نهایی (۷-۱۲). پارامترهای وابستگی برای پیوند نمودارهای CI فردی و نمودار جمعیت به یک گراف CI وابسته به هم استفاده می‌شود. تصمیم‌گیری برای تنظیمات پارامترهای خاص در بخش B.1.3 مورد بحث قرار می‌گیرد.

انتخاب آستانه‌های مسافت: ترکیبی از حدس‌های پیچیده (مانند ۳۰ کیلومتر قطر بزرگ برای دسترسی به برج‌های سلولی یا بیمارستان‌های حداکثر ۱۰۰ کیلومتر دور از افراد، که برابر است با زمان سفر کمی بیشتر از "ساعت طلایی" حیاتی در پزشکی. شرایط اضطراری، هنگام در نظر گرفتن میانگین سرعت سفر در یک بزرگراه)، و اصلاحات تکراری به گونه‌ای که سطوح دسترسی به سرویس در مرحله ۴ برای همه سرویس‌های اساسی در سراسر منطقه مورد بررسی در یک شبیه‌سازی حالت پایه با CI سالم بیش از ۹۹٪ بود. به عنوان مثال، تنظیم برد برج‌های سلولی به ۱۵ کیلومتر منجر به ۶.۷ میلیون مشتری بدون دسترسی به ارتباطات تلفن همراه در حالت پایه می‌شود، در حالی که برد انتخاب شده (۳۰ کیلومتر) تنها باعث می‌شود که چند صد نفر بدون پوشش باشند. برای وابستگی‌هایی که هیچ آستانه فاصله‌ای تنظیم نشده است، عناصر هدف صرف نظر از فاصله آن، به نزدیک‌ترین عنصر از نوع منبع مربوطه مرتبط می‌شوند. این مورد برای همه وابستگی‌های غیر زائد است که در آن بدیهی است که چنین پیوندی باید وجود داشته باشد (به عنوان مثال، امکانات آموزشی و بهداشتی دارای دسترسی به برق و آب).

انتخاب مشخصات افزونگی: آب و نیرو به گونه‌ای مدل‌سازی می‌شوند که از طریق یک منبع واحد برای هر هدف وابسته تامین شوند. ارتباطات سیار به گونه‌ای مدل‌سازی شده است که از هر منبعی در آستانه‌های مسافتی ارائه شود، زیرا اتصال می‌تواند از طریق هر سایت سلول قابل دسترسی برقرار شود. مراقبت‌های بهداشتی را می‌توان از هر مرکز بهداشتی قابل دسترسی ارائه کرد، اما ثبت نام مدارس معمولاً ثابت است، از این رو هر گروه جمعیتی تنها یک پیوند آموزشی غیرقابل جایگزین را در اختیار دارند. فرض بر این است که دسترسی جاده توسط هر جاده قابل دسترسی در آستانه فاصله مشخص شده فراهم می‌شود.

انتخاب انواع جریان و آستانه عملکرد: متغیرهای فیزیکی برای تقاضا و عرضه برق در سراسر منطقه مدل‌سازی شده در دسترسی بودند و ظرفیت در شبکه از این رو به عنوان نسبت تقاضای توان به منبع تغذیه در هر خوشه شبکه محاسبه می‌شود. بنابراین، آستانه‌های عملکردی برای وابستگی‌های توان را می‌توان به عنوان یک کسر پیوسته با توجه به نسبت ظرفیت بیان کرد. در اینجا در غیاب اطلاعات مربوط به قطعه، روی ۰.۶ تنظیم شده است، به این صورت که "اگر نسبت تقاضا به عرضه در خوشه شبکه برق که مولفه وابسته به آن متصل است، به زیر ۰.۶ برسد، مولفه ناکارآمد خواهد شد". تمام وابستگی‌های دیگر، در غیاب معیارهای جریان آگاهانه فیزیکی، وابستگی‌های منطقی هستند. به این ترتیب، آنها یا از یک منبع کاربردی تامین می‌کنند، یا اگر منبع ناکارآمد باشد، این کار را نمی‌کنند. آستانه‌های عملکردی برای وابستگی‌های منطقی از این رو بی‌اهمیت هستند و روی ۱ تنظیم می‌شوند. مسیرهای جاده بین گره‌های جمعیت و امکانات اجتماعی (بیمارستان‌ها، مدارس) بر اساس الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر Dijkstra محاسبه شدند.

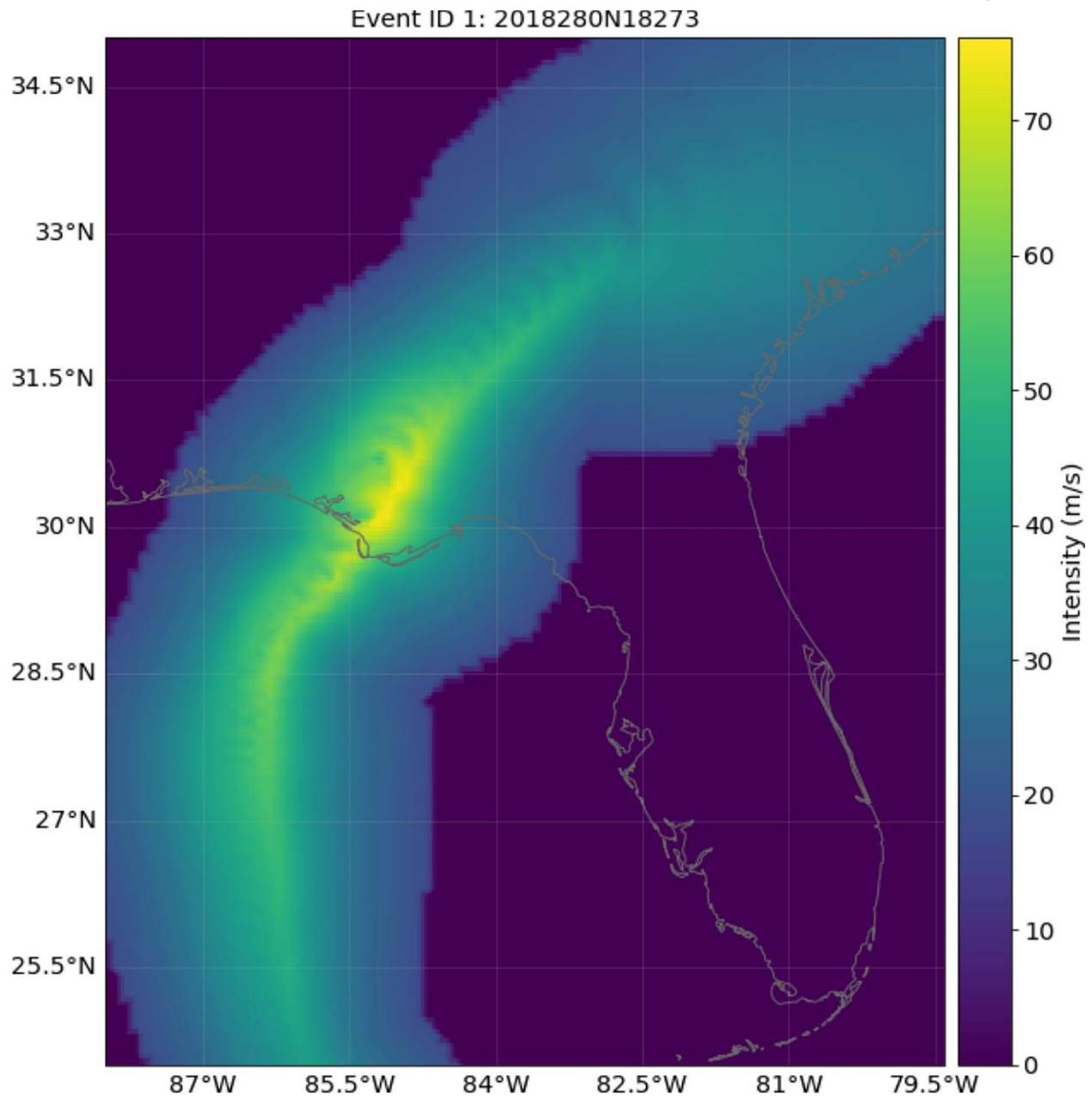
B.1.4. مشخصات گراف CI وابسته به زیرساخت



شکل B.1: مشخصات گره (نمونه نوار اول) و عناصر لیه (نمونه نوار دوم) در گراف CI وابسته به هم، ساخته شده برای مورد ارائه شده در بخش ۳.۱.

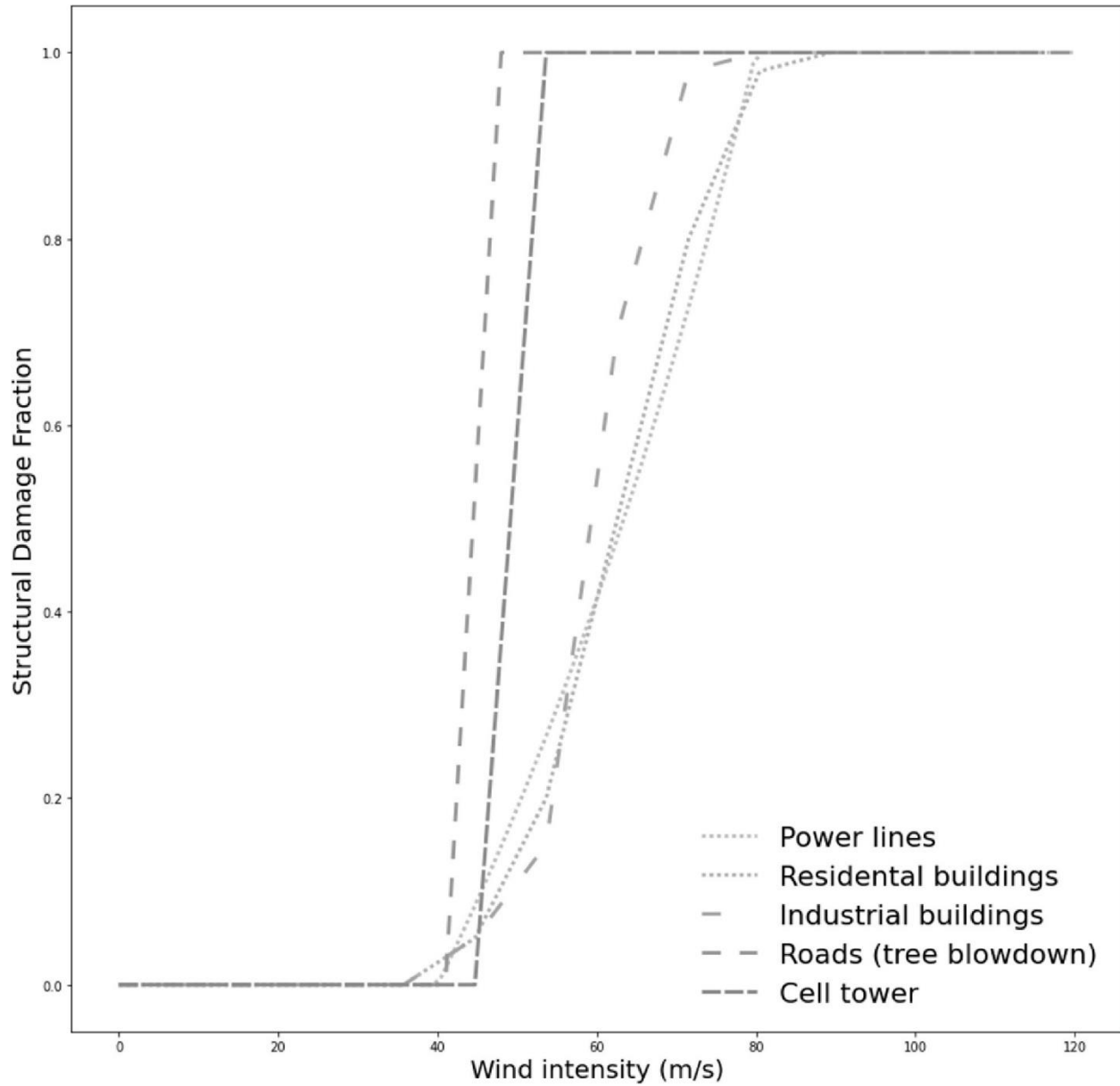
B.2. ورودی‌های مدل ریسک مخاطرات طبیعی

B.2.1. ردپای خطر



شکل B.2: نقشه شدت میدان باد طوفان مایکل، محاسبه شده با پینار از مسیر طوفان مایکل. ردیابی داده ها از IBTrACS.

B.2.2. منحنی‌های آسیب‌پذیری



شکل B.3. توابع ضربه مورد استفاده برای محاسبات آسیب سازه از میدان باد طوفان در بخش ۳.۱، برای همه انواع CI. توجه داشته باشید که محور Y نشان دهنده کسری از آسیب ساختاری به اجزاء برای همه CI ها به جز خطوط برق است که احتمال خرابی برای آنها وجود دارد.

B.3. تجزیه و تحلیل سناریو

B.3.1. انتخاب سناریو و نمای کلی نتایج

سناریو	توضیحات	مرحله
بدون وابستگی متقابل CI	حذف هرگونه وابستگی عملکردی بین شبکه‌های CI	۱
آستانه مسیر طولانی‌تر	افزایش آستانه مسافت مجاز برای مسیرهای سفر کاربر نهایی	۱ و ۴
آستانه مسیر کوتاه‌تر	کاهش آستانه مسافت مجاز برای مسیرهای سفر کاربر نهایی	۱ و ۴
آسیب‌پذیری کامپوننت پایین	تغییر عملکردهای ضربه برای مقاومت در برابر شدت خطر بالاتر.	۲
آسیب‌پذیری کامپوننت بالا	تغییر عملکردهای ضربه برای مقاومت در برابر شدت خطر کمتر.	۲
آستانه عملکرد پایین	کاهش آستانه آسیب برای ناکارآمدی اجزا.	۲
آستانه عملکرد بالا	افزایش آستانه آسیب برای ناکارآمدی اجزا.	۲

جدول B.4: سناریوهایی برای مطالعه حساسیت نتایج نهایی (تعداد افرادی که اختلالات خدمات اولیه را تجربه می‌کنند) به فرضیات در سراسر زنجیره مدل‌سازی.

دسترسی به سرویس پایه	اصلی	بدون وابستگی متقابل CI	آستانه مسیر طولانی‌تر	آستانه مسیر کوتاه‌تر	آسیب‌پذیری کامپوننت پایین	آسیب‌پذیری کامپوننت بالا	آستانه عملکرد پایین	آستانه عملکرد بالا
پویایی	100	100	100	100	205	42	116	81
برق	100	88	95	90	238	37	96	66
خدمات بهداشتی	100	48	97	142	196	48	115	80
تحصیلی	100	72	100	121	236	45	106	87
ارتباطات رادیویی	100	57	95	96	236	30	92	61
آب و فاضلاب	100	45	100	103	232	24	100	100

جدول B.5: نتایج تجزیه و تحلیل سناریو: تعداد افرادی که در هر سناریو به دلیل خرابی‌های آبشاری ناشی از خطر، اختلالات سرویس را تجربه می‌کنند، نسبت به اعداد اختلال در پارامترسازی اولیه انتخاب شده همانطور که در بخش ۳.۱ توضیح داده شد. ۷ سناریو انتخاب شده در جدول B.4 توضیح داده شده و در بخش ۳.۲ مورد بحث قرار گرفته است.

B.3.2. پارامترهای سناریو

به بخش ۶ (مواد تکمیلی) مراجعه کنید.

B.4. منابع اعتبارسنجی

به بخش ۶ (مواد تکمیلی) مراجعه کنید.

در دسترس بودن داده‌ها

همه کدها و همه داده‌ها منبع باز و دارای دسترسی آزاد هستند. کد برای به دست آوردن داده‌ها و تولید مجدد نتایج در مخازن مربوطه GitHub در دسترس قرار گرفته است پلتفرم ارزیابی ریسک پینار در GitHub قابل دسترسی است:

توضیحات پروژه: <https://github.com/MamarezaAlipour/Pinar>

محاسبات اثربخشی: <https://github.com/MamarezaAlipour/Pinar-Python>

مدل سیستم زیرساخت: <https://github.com/MamarezaAlipour/Pinar-Petals>

References

- [1] Price WT, Glenn C. Schools closed across the Panhandle, 45,000 kids missing class due to Hurricane Michael. Pensacola News J 2022. <https://www.pnj.com/story/news/2018/10/17/hurricane-michael-closes-schools-florida/1660289002>.
- [2] Bay District Schools, "Hurricane Michael Recovery Information." <https://www.bay.k12.fl.us/hurricane-michael> (accessed Jan. 25, 2022).
- [3] Burlew J. 43 and counting: deconstructing the Florida death toll after Hurricane Michael. Tallahassee Democrat 2018;29. <https://www.tallahassee.com/story/news/2018/11/29/43-and-counting-deconstructing-death-toll-hurricane-michael/2124902002/>.
- [4] Beven II JL, Berg Robbie, Hagen Andrew. Hurricane Michael tropical cyclone report. Natl Hurri Center 2019. https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/A142018_Michael.pdf.
- [5] Thacker S, et al. Infrastructure for sustainable development. Nat Sustain 2019;2(4). <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0256-8>.
- [6] McKinsey Global Institute. Climate risk and response. Phys Haza Socioecon Impact 2020. <https://www.mckinsey.com/-/media/mckinsey/business%20functions/sustainability/our%20insights/climate%20risk%20and%20response%20physical%20hazards%20and%20socioeconomic%20impacts/mgi-climate-risk-and-response-full-report-vf.pdf>.
- [7] Yesudian AN, Dawson RJ. Global analysis of sea level rise risk to airports. Clim Risk Manage 2021;31:100266. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100266>.
- [8] Koks EE, et al. A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets. Nat Commun 2019;10(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10442-3>.
- [9] Nicolas C, et al. Stronger Power: Improving Power Sector Resilience to Natural Hazards. Washington, DC: World Bank; 2019. <https://doi.org/10.1596/31910>.
- [10] Thacker S, et al. Infrastructure for climate action. Denmark: UNOPS, Copenhagen; 2021. <https://www.unops.org/news-and-stories/news/infrastructure-for-climate-action>.
- [11] "Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030," UNDRR, 2015. Accessed: Nov. 26, 2021. [Online]. Available: <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>.
- [12] SWD. 318 - COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT on a new approach to the European Programme for Critical Infrastructure Protection Making European Critical Infrastructures more secure. European Commission; 2013. <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/7fuseactionlist&coted10102&year2013&number318&versionALL&languageen>.
- [13] Rinaldi SM, Peerenboom JP, Kelly TK. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. IEEE Control Syst Mag 2001;21(6):11-25. <https://doi.org/10.1109/37.969131>.
- [14] Mitsova D, Esnard A-M, Sapat A, Lai BS. Socioeconomic vulnerability and electric power restoration timelines in Florida: the case of Hurricane Irma. Nat Haza 2018; 94(2):689-709. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3413-x>.
- [15] ECA Working Group, "Shaping Climate-Resilient Development – A Framework for Decision-Making," 2009. Accessed: Jun. 05, 2020. [Online]. Available: https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/usys/ied/wcr-dam/documents/Economic_s_of_Climate_Adaptation_ECA.pdf.
- [16] Stip, C., Z. Mao, G. Browder, L. Bonzanigo, and J. Tracy, "Water infrastructure resilience – examples of dams, wastewater treatment plants, and water supply and sanitation systems," World Bank, Washington, DC, Sector note for LIFELINES: The Resilient Infrastructure Opportunity, 2019. [Online]. Available: <http://documents1.worldbank.org/curated/en/960111560794042138/pdf/Water-Infrastructure-Resilience-Examples-of-Dams-Wastewater-Treatment-Plants-and-Water-Supply-and-Sanitation-Systems.pdf>.
- [17] Hallegatte S, Rentschler J, Rozenberg J. Lifelines: the resilient infrastructure opportunity. World Bank Publications; 2019.
- [18] Bresch DN, Berghuijs J, Egloff R, Kupers R. A resilience lens for enterprise risk management. Turbulence: a corporate perspective on collaborating for resilience. Amsterdam University Press; 2014. p. 49-65. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/127039>.
- [19] Dawson RJ, et al. A systems framework for national assessment of climate risks to infrastructure. Philos Trans R Soc, A 2018;376(2121):20170298. <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0298>.
- [20] Ouyang M. Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. Reliab Eng Syst Saf 2014;121:43-60. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.06.040>.
- [21] Lee EE, Mitchell JE, Wallace WA. Network Flow approaches for analyzing and managing disruptions to interdependent infrastructure systems. Wiley handbook of science and technology for homeland security. American Cancer Society; 2009. p. 1-9. <https://doi.org/10.1002/9780470087923.hhs686>.
- [22] Loggins RA, Wallace WA. Rapid Assessment of hurricane damage and disruption to interdependent civil infrastructure systems. J Infrastruct Syst 2015;21(4): 04015005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000249](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000249).
- [23] Zorn C, Pant R, Thacker S, Shamseldin AY. Evaluating the magnitude and spatial extent of disruptions across interdependent national infrastructure networks. ASME J Risk Uncertainty Part B 2020;6(2). <https://doi.org/10.1115/1.4046327>.
- [24] Pant R, Thacker S, Hall JW, Alderson D, Barr S. Critical infrastructure impact assessment due to flood exposure. J Flood Risk Manage 2018;11(1):22-33. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12288>.
- [25] Pant R, Hall JW, Blainey SP. Vulnerability assessment framework for interdependent critical infrastructures: case-study for Great Britain's rail network. Eur J Transp Infrastruct Res 2016;16(1). <https://doi.org/10.18757/ejtr.2016.16.1.3120>.
- [26] Goldbeck N, Angeloudis P, Ochieng WY. Resilience assessment for interdependent urban infrastructure systems using dynamic network flow models. Reliab Eng Syst Saf 2019;188:62-79. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.03.007>.
- [27] Nan C, Sansavini G. A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures. Reliab Eng Syst Saf 2017;157:35-53. <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.08.013>.
- [28] Dueñas-Osorio L, Craig JJ, Goodno BJ. Seismic response of critical interdependent networks. Earthq Eng Struct Dyn 2007;36(2):285-306. <https://doi.org/10.1002/eqe.626>.
- [29] Banerjee J, Basu K, Sen A. Analysing robustness in intra-dependent and inter-dependent networks using a new model of interdependency. Int J Crit Infrastruct 2018;14(2):156-81. <https://doi.org/10.1504/IJICIS.2018.091938>.
- [30] Ouyang M, Dueñas-Osorio L. An approach to design interface topologies across interdependent urban infrastructure systems. Reliab Eng Syst Saf 2011;96(11): 1462-73. <https://doi.org/10.1016/j.res.2011.06.002>.
- [31] Guidotti R, Chmielewski H, Unnikrishnan V, Gardoni P, McAllister T, van de Lindt J. Modeling the resilience of critical infrastructure: the role of network dependencies. Sustain Resilient Infrastruct 2016;1(3-4):153-68. <https://doi.org/10.1080/23789689.2016.1254999>.
- [32] Thacker S, Pant R, Hall JW. System-of-systems formulation and disruption analysis for multi-scale critical national infrastructures. Reliab Eng Syst Saf 2017;167:30-41. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.04.023>.
- [33] Masoomi H, Burton H, Tomar A, Mosleh A. Simulation-based assessment of postearthquake functionality of buildings with disruptions to cross-dependent utility networks. J Struct Eng 2020;146(5):04020070. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002555](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002555).
- [34] He X, Cha EJ. Modeling the damage and recovery of interdependent civil infrastructure network using Dynamic Integrated Network model. Sustain Resilient Infrastruct 2020;5(3):152-67. <https://doi.org/10.1080/23789689.2018.1448662>.
- [35] Hernandez-Fajardo I, Dueñas-Osorio L. Probabilistic study of cascading failures in complex interdependent lifeline systems. Reliab Eng Syst Saf 2013;111:260-72. <https://doi.org/10.1016/j.res.2012.10.012>.
- [36] Tootaghaj DZ, Bartolini N, Khamfroush H, He T, Chaudhuri NR, Porta TL. Mitigation and Recovery From Cascading Failures in Interdependent Networks Under Uncertainty. IEEE Transact Control Netw Syst 2019;6(2):501-14. <https://doi.org/10.1109/TCNS.2018.2843168>.
- [37] Fotouhi H, Moryadee S, Miller-Hooks E. Quantifying the resilience of an urban traffic-electric power coupled system. Reliab Eng Syst Saf 2017;163:79-94. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.01.026>.
- [38] Beyza J, Ruiz-Paredes HF, Garcia-Paricio E, Yusta JM. Assessing the criticality of interdependent power and gas systems using complex networks and load flow techniques. Physica A 2020;540:123169. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123169>.
- [39] Garschagen M, Sandholz S. The role of minimum supply and social vulnerability assessment for governing critical infrastructure failure: current gaps and future agenda. Nat Haza Earth Syst Sci 2018;18(4):1233-46. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1233-2018>.
- [40] Chang SE, McDaniels TL, Mikawoz J, Peterson K. Infrastructure failure interdependencies in extreme events: power outage consequences in the 1998 Ice Storm. Nat Haza 2007;41(2):337-58. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-9039-4>.
- [41] Karakoc DB, Barker K, Zobel CW, Almoghatani Y. Social vulnerability and equity perspectives on interdependent infrastructure network component importance. Sustain Citi Soc 2020;57:102072. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102072>.
- [42] S. E. Chang, C. Pasion, S. Yavari, and K. Elwood, "Social Impacts of Lifeline Losses: Modeling Displaced Populations and Health Care Functionality," pp. 1-10, Apr.2012,

- [43] R. Pant, J. W. Hall, and S. Thacker, "System-of-systems framework for global infrastructure vulnerability assessments," 2017. Accessed: Nov. 03, 2020. [Online]. Available: <https://www.greengrowthknowledge.org/sites/default/files/download/s/resource/System-of-systems%20framework%20for%20global%20infrastructure%20vulnerability%20assessment.pdf>.
- [44] Zio E. Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. *Reliab Eng Syst Saf* 2016;152:137–50. <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.02.009>.
- [45] WorldPop. Global 1km Population total adjusted to match the corresponding UNPD estimate, 22. University of Southampton; 2020. <https://doi.org/10.5258/SOTON/WP00671>.
- [46] Gauthier P, Furno A, El Faouzi N-E. Road network resilience: how to identify critical links subject to day-to-day disruptions. *Transp Res Rec* 2018;2672(1): 54–65. <https://doi.org/10.1177/0361198118792115>.
- [47] H. Chmielewski, R. Guidotti, T. McAllister, and P. Gardoni, "Response of Water Systems under Extreme Events: A Comprehensive Approach to Modeling Water System Resilience," pp. 475–486, May 2016, doi: 10.1061/9780784479865.050.
- [48] Ouyang M, Hong L, Mao Z-J, Yu M-H, Qi F. A methodological approach to analyze vulnerability of interdependent infrastructures. *Simul Modell Pract Theory* 2009; 17(5):817–28. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2009.02.001>.
- [49] Eberenz S, Lüthi S, Bresch DN. Regional tropical cyclone impact functions for globally consistent risk assessments. *Nat Haza Earth Syst Sci* 2021;21(1):393–415. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-393-2021>.
- [50] Sauer JJ, et al. Climate signals in river flood damages emerge under sound regional disaggregation. *Nat Commun* 2021;12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22153-9>.
- [51] Kam PM, et al. Global warming and population change both heighten future risk of human displacement due to river floods. *Environ Res Lett* 2021;16(4):044026. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd26c>.
- [52] M. Souvignat, F. Wieneke, L. Mueller, and D. N. Bresch, "Economics of Climate Adaptation (ECA) - Guidebook for Practitioners," 2016.
- [53] "Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation," IPCC, 2012. Accessed: Aug. 17, 2022. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/>.
- [54] Eberenz S, Stocker D, Rösli T, Bresch DN. Asset exposure data for global physical risk assessment. *Earth Syst Sci Data* 2020;12(2):817–33. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000409595>.
- [55] Pianosi F, et al. Sensitivity analysis of environmental models: a systematic review with practical workflow. *Environ Model Softw* 2016;79:214–32. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008>.
- [56] Tabandeh A, Sharma N, Gardoni P. Uncertainty propagation in risk and resilience analysis of hierarchical systems. *Reliab Eng Syst Saf* 2022;219:108208. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108208>.
- [57] Bloemendaal N, de Moel H, Mol JM, Bosma PRM, Polen AN, Collins JM. Adequately reflecting the severity of tropical cyclones using the new Tropical Cyclone Severity Scale. *Environ Res Lett* 2021;16(1):014048. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd131>.
- [58] Knapp KR, Kruk MC, Levinson DH, Diamond HJ, Neumann CJ. The international best track archive for climate stewardship (IBTrACS): unifying tropical cyclone data. *Bull Am Meteorol Soc* 2010;91(3):363–76. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2755.1>.
- [59] Holland G. A revised hurricane pressure–wind model. *Mon Wea Rev* 2008;136(9): 3432–45. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2395.1>.
- [60] Fausset R, Blinder A, Haag M. Rescue teams scour ruins as hurricane death toll rises. *New York Times* 2018. <https://www.nytimes.com/2018/10/12/us/hurricane-michael-live-updates-florida.html>.
- [61] Jenelius E, Mattsson L-G. Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: a grid-based approach with case study. *Transport Res Part A: Policy Pract* 2012;46(5):746–60. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.02.003>.
- [62] de Bruijn KM, Cumiskey L, Dhuhda RN, Hounjet M, Hynes W. Flood vulnerability of critical infrastructure in Cork, Ireland. *E3S Web Conf* 2016;7:07005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160707005>.
- [63] Iannacone L, Sharma N, Tabandeh A, Gardoni P. Modeling time-varying reliability and resilience of deteriorating infrastructure. *Reliab Eng Syst Saf* 2022;217: 108074. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108074>.
- [64] Holma H, Kinnunen P, Kovács IZ, Pajukoski K, Pedersen K, Reunanen J. Performance. LTE for UMTS. John Wiley & Sons, Ltd; 2011. p. 257–301. <https://doi.org/10.1002/9781119992943.ch10>.
- [65] De Leonardi D, Huey R, Green J. National Traffic Speeds Survey III: 2015, ". Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration; 2018.
- [66] Zorn CR, Shamseldin AY. Quantifying directional dependencies from infrastructure restoration data. *Earth Spectra* 2016;32(3):1363–81. <https://doi.org/10.1193/013015EQS015M>.
- [67] Luijck E, Nieuwenhuijs A, Klaver M, van Eeten M, Cruz E. Empirical findings on critical infrastructure dependencies in Europe. *Critical information infrastructure security*. 2009. p. 302–10. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03552-4_28.
- [68] Sharma N, Gardoni P. Mathematical modeling of interdependent infrastructure: an object-oriented approach for generalized network-system analysis. *Reliab Eng Syst Saf* 2022;217:108042. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108042>.
- [69] K. Poljansek, M. Marin Ferrer, T. De Groeve, and I. Clark, "Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less," ETH Zurich, Report, 2017. Accessed: Jun. 08, 2020. [Online]. Available: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/297819>.
- [70] A. Naqvi and I. Monasterolo, "Natural Disasters, Cascading Losses, and Economic Complexity: A Multi-layer Behavioral Network Approach," Apr. 2019. <https://eub.wu.ac.at/6914> (accessed Apr. 28, 2022).
- [71] Otsuka A. Natural disasters and electricity consumption behavior: a case study of the 2011 Great East Japan Earthquake. *Asia-Pac J Reg Sci* 2019;3(3):887–910. <https://doi.org/10.1007/s41685-019-00129-4>.
- [72] Ghosn M, et al. Performance indicators for structural systems and infrastructure networks. *J Struct Eng* 2016;142(9):F4016003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001542](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001542).
- [73] Henry D, Emmanuel Ramirez-Marquez J. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. *Reliab Eng Syst Saf* 2012;99: 114–22. <https://doi.org/10.1016/j.res.2011.09.002>.
- [74] Almoghaty Y, Barker K, Albert LA. Resilience-driven restoration model for interdependent infrastructure networks. *Reliab Eng Syst Saf* 2019;185:12–23. <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.12.006>.
- [75] IEE L, Mitchell JE, Wallace WA. Restoration of services in interdependent infrastructure systems: a network flows approach. *IEEE Transact Syst, Man, Cybernet, Part C (Appl Rev)* 2007;37(6):1303–17. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.905859>.
- [76] Hasan S, Foliente G. Modeling infrastructure system interdependencies and socioeconomic impacts of failure in extreme events: emerging R&D challenges. *Nat Haza* 2015;78(3):2143–68. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1814-7>.
- [77] Mitsva D, Sapat A, Esnard A-M, Lamadrid AJ. Evaluating the impact of infrastructure interdependencies on the emergency services sector and critical support functions using an expert opinion survey. *J Infrastruct Syst* 2020;26(2):04020015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000548](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000548).
- [78] Cutter SL, Boruff BJ, Shirley WL. Social vulnerability to environmental hazards. *Hazards vulnerability and environmental justice*. Routledge; 2006.
- [79] Guo J, Feng T, Cai Z, Lian X, Tang W. Vulnerability assessment for power transmission lines under typhoon weather based on a cascading failure state transition diagram. *Energies* 2020;13(14). <https://doi.org/10.3390/en13143681>.
- [80] Hazus Hurricane Model Technical Manual. FEMA 2021. https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_hazus-hurricane-technical-manual-4.2.3_0.pdf.