

نحوه محاسبه‌ی اثر برق در تجهیزات شبکه‌ی آب

مطالعه‌ی موردی: منطقه‌ی ۶ تهران

مهرداد نعیمی - کارشناسی ارشد، مدیریت در سوانح طبیعی، گروه مدیریت در سوانح طبیعی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران
بابک امیدوار* - دانشیار، گروه مدیریت در سوانح طبیعی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران؛ پست الکترونیک: bomidvar@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۱۱ | تاریخ پذیرش: ۹۲/۴/۹

چکیده

شریان‌های حیاتی همچون شبکه‌های آب، برق، مخابرات، حمل و نقل، نفت و گاز بیشترین آسیب را در سوانح طبیعی می‌بینند. حفظ عملکرد یک شهر در پیش و پس از بحران‌هایی چون زلزله، انفجارها، جنگ و سیل، به عملکرد شریان‌های حیاتی وابسته است و با توجه به اندرکنش و وابستگی شدید این شریان‌ها به یکدیگر، بررسی رفتار شریان‌های حیاتی و مدل‌سازی اندرکنش لرزه‌ای^۱ بین آن‌ها ضروری است. در بین شریان‌های حیاتی، شبکه‌ی برق بیشترین تأثیر و اهمیت را دارد که دلیل آن، نقش حیاتی شبکه‌ی برق در برقراری سایر شریان‌ها است و لازم است محاسبات ارزیابی ریسک شریان‌های حیاتی با وجود اثر برق صورت گیرد.

به علت آنکه ارزیابی اثر برق در شریان‌های حیاتی بسیار پیچیده و پراز جزئیات است، از این رو اغلب کارشناسان در محاسبات خود دچار اشتباه می‌شوند. در واقع حذف یا در نظر گرفتن اثر برق نیاز به دقت و بررسی ریشه‌ای دارد. حتی اگر از نمودارهای آماده و نمودارهای موجود در دستورالعمل هزوس^۲ و ریسک یوای^۳ هم استفاده گردد، باید دقت شود که اثر برق به گونه‌ای لحاظ گردد که قبلاً در رسم منحنی‌های شکنندگی مورد استفاده قرار گرفته است. هر یک از تجهیزات، زیر مجموعه‌هایی دارند که در آن‌ها اثر برق وجود دارد و این طور نیست که بتوان به سادگی اثر برق را حذف یا اضافه نمود. در این مقاله، پس از شرح روند دقیق ارزیابی اثر برق و نحوه‌ی محاسبه‌ی آن در مطالعات اندرکنش لرزه‌ای، نتایج روی شبکه‌ی آب منطقه‌ی ۶ تهران مدل شده است. از نتایج این پژوهش می‌توان در تمامی محاسبات که روی شبکه‌ی آب و برق صورت می‌گیرد، شامل برآورد خسارت، ارزیابی ریسک یا اندرکنش شریان‌ها، استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌ی برق، شبکه‌ی آب، اندرکنش، ارزیابی ریسک، منحنی شکنندگی، زلزله

Calculation of electric power effect on water network

Case study: Tehran, district 6

Mehrdad Naeimi¹, Babak Omidvar*²

Abstract

Lifeline networks, such as water, electricity, telecommunications, transportation, oil and gas, are the most vulnerable lifelines in natural and man-made disasters. Considering the interdependency between these lifelines, the evaluation of lifeline behavior and modeling of seismic interaction between them is essential.

Power network has the most influence and importance among the Lifelines because of its critical role in the performance of the other lifelines. In assessment of seismic reliability, the calculations of lifeline with the effect of power network are quite necessary. The assessment of the effect of electricity in the behavior of other lifelines is very sophisticated and its complicated process requires numerous details. This has resulted in errors in available researches. Indeed, neglecting and consideration of the electricity power effect requires careful and accurate assessment, even in the case of using graphs and standards from HAZUS and Risk-UE. It should be noted that electricity power effect has already been considered in fragility curves. In this paper, after addressing the exact evaluation of electricity power network, and introducing its calculation process in seismic interaction studies, the results are used to model the effect of electricity power in seismic performance assessment of water network in district 6 of Tehran. The results can be used for all kinds of lifeline calculations such as loss estimation, risk assessment or lifelines interaction analysis.

Keywords: Land-use planning, risk assessment, risk mitigation, Earthquake.

¹ Graduated MSc. Natural Disaster Management, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

² Associate Professor, Department of Natural Disaster Management, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, P.O. Box: 14155-6135 Tehran, Iran; Email: bomidvar@ut.ac.ir

مقدمه و پیشینه‌ی پژوهش

بیشتر مطالعاتی که تاکنون بر حذف یا منظور نمودن اثر برق صورت گرفته، دارای یک مشکل محاسباتی هستند و آن این است که در این پژوهش‌ها وقتی محاسبات با اثر برق صورت می‌گیرد در واقع اثر برق دو بار محسوب می‌شود و وقتی قرار بر این است که اثر برق را حذف کنند، خواه ناخواه اثر برق در نمودارهای شکنندگی وجود دارد. از این رو تصمیم گرفته شد که به این مسئله دقیق‌تر پرداخته شود. مروری بر مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی اندرکنش نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقات محدودی در سراسر دنیا بر روی تأثیرات متقابل شریان‌ها بر عملکرد یکدیگر انجام گرفته است. اندک مطالعاتی نیز که در ایران در بحث شریان‌های حیاتی صورت گرفته است بیشتر بر تحلیل خسارت و ارزیابی عملکرد هر یک از آن‌ها متمرکز بوده و در بحث اندرکنش از دیدگاه وابستگی شریان‌ها به یکدیگر، نیاز به تحقیقات بیشتری است. حتی در بین منابع بین‌المللی نیز، کمتر تحقیقاتی وجود دارد که اثر تمامی شریان‌ها را بررسی نموده باشد. پیش‌بینی رفتار شریان‌های حیاتی در طول شرایط بحرانی بسیار دشوار است و تمام ابزارها و مدل‌هایی که مطرح می‌شوند در وهله‌ی اول نیازمند شناخت رفتار شریان‌های حیاتی هستند و به همین دلیل است که استفاده از روش‌هایی با رویکرد شبیه‌سازی بسیار توسعه پیدا کرده است. اولین چالش در زمینه‌ی شبیه‌سازی شریان‌های حیاتی، مدل کردن رفتار ناهمگن و نامتجانس آن‌ها در یک قالب و چارچوب واحد است. مسئله‌ی اصلی دیگر این است که وابستگی شریان‌ها تنها از نوع وابستگی فیزیکی دو شریان حیاتی به هم نبوده و آن‌ها از نظر اطلاعاتی و همین‌طور وابستگی‌های خارجی همچون اثرات زیست‌محیطی و سیاسی و اجتماعی نیز به یکدیگر وابسته‌اند [۱]. بررسی هر یک از شریان‌ها نیاز به بررسی سیستم‌ها و تجهیزات زیرمجموعه‌ی آن شریان دارد؛ به عنوان مثال در بخش نفت و گاز، نیاز به بررسی پالایشگاه، ایستگاه‌های تقویت فشار و ذخیره، توربوکمپرسورها و تجهیزات انتقال و توزیع است؛ یا در شبکه‌ی آب باید ایستگاه‌های پمپاژ، تصفیه‌خانه‌ها، چاه‌ها، مخازن، ایستگاه‌های کلرزی و خطوط لوله‌ی انتقال و توزیع بررسی شوند. در شبکه‌ی برق نیز مواردی همچون نیروگاه‌ها، خطوط انتقال، پست‌های برق، فیدرها و دیسپاچینگ‌ها باید بررسی گردند. هر یک از این موارد خود زیر مجموعه‌های جدیدی دارند که در این مقاله شرح داده خواهد شد.

به‌طور کلی وابستگی، انواع متفاوتی دارد و محققان مختلفی اقدام به دسته‌بندی آن‌ها نموده‌اند؛ به عنوان مثال رینالدی^۴ و کلی^۵ وابستگی‌ها را به ۴ دسته تقسیم کرده‌اند [۲]:

۱. فیزیکی: زمانی رخ می‌دهد که سطوح زیرساخت‌ها یک ارتباط محسوس یا مادی (ابزاری) با یکدیگر داشته باشند؛ این نوع وابستگی سطوح برای کمی کردن عدم قطعیت‌ها مناسب است.
۲. اطلاعاتی: وقتی است که شریان‌ها به اطلاعات و انتقال آن وابستگی دارند. با گسترش سریع فناوری‌های اطلاعاتی بر پایه‌ی اتوماسیون و کامپیوتر در دهه‌های اخیر، این وابستگی بسیار مهم‌تر شده است. زمانی که

یک بخش از یک زیرساخت به اطلاعات پراکنده شده در میان دیگر بخش‌ها وابسته باشد، این نوع وابستگی به علت نیاز همیشگی به تبادل داده‌ها و کنترل کامپیوتری در عملکرد زیرساخت‌ها نیز پدیدار می‌شود.

۳. جغرافیایی: وقتی است که یک سازه و رویداد طبیعی، چندین شریان مختلف را که در هم‌جواری هم هستند، تحت تأثیر قرار می‌دهد. هنگامی که محیط اطراف یک زیرساخت سبب ایجاد تغییر در آن شود و به عبارت دیگر، آن زیرساخت متأثر از محیط اطراف خود باشد، دارای وابستگی جغرافیایی خواهد بود.

۴. منطقی: این وابستگی به هنگام دخالت تصمیمات بشر، بروز و ظهور می‌یابد.

دودنهوفر^۶ و همکارانش هم وابستگی‌ها را به ۴ دسته فیزیکی، اطلاعاتی، سیاسی و منطقه‌ای تقسیم نموده‌اند [۳، ۲]. اما بوهنه^۷ وابستگی را به صورتی دیگر تقسیم کرده است [۴، ۲]:

۱. وابستگی انحصاری^۸؛

۲. وابستگی نیازها^۹؛

۳. وابستگی جزئی؛

۴. وابستگی منطقی (پسین)^{۱۰}؛

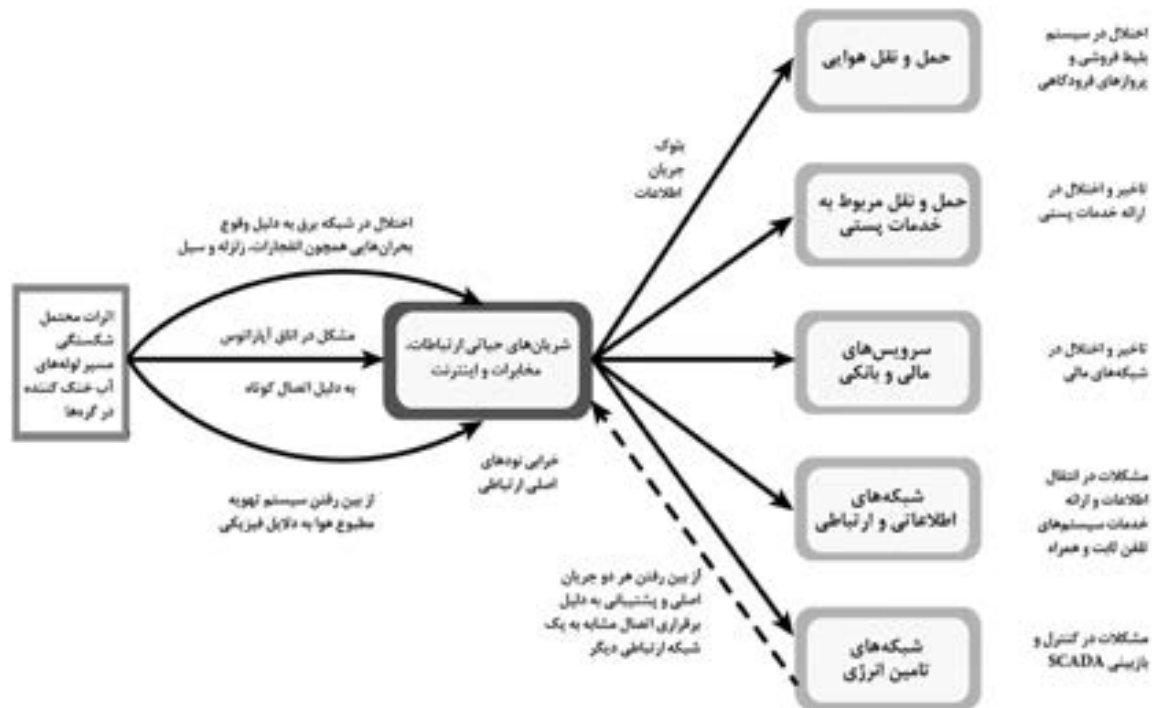
نمودار ۱ وابستگی شریان‌های حیاتی به شبکه‌ی برق را نشان می‌دهد. در بررسی مطالعات صورت گرفته یکی از مهم‌ترین موضوعات، نحوه‌ی مدل‌سازی اندرکنش شریان‌ها است [۴]. افرادی مانند ساتیانارایانا^{۱۱} و یا کوئیمپو^{۱۲} از روش تئوری گراف برای بررسی وابستگی استفاده نموده‌اند. در این روش تمامی اجزا در دو گروه رأس و لبه تقسیم می‌شوند، به طوری که رئوس، نشانگر نقاط اتصال با قابلیت اطمینان بالا بوده و لبه‌ها نشانگر اجزای سیستم زیرساخت و شریان حیاتی هستند [۶، ۵]. به عنوان مثال در بررسی دو جزء شبکه‌ی آب مرتبط به هم ۲ لبه و ۱ رأس خواهیم داشت، حال آنکه در مطالعه‌ی یک جزء آب و یک جزء برق غیر مرتبط به هم ۲ لبه و ۰ رأس خواهیم داشت. پس از این مطالعات، محققین دیگری از تئوری گراف بدون رویکرد روش شناختی استفاده کردند. از آنجا که در این گروه از مطالعات، هیچ پیش‌فرضی مورد استفاده قرار نگرفته است، نتایج دقیق‌تری به دست آمده است. یانگ^{۱۳} در سال ۲۰۰۳ [۷] و دوناس اوساریو^{۱۴} در سال ۲۰۰۶ [۸] از جمله محققانی هستند که از این روش در مطالعه‌ی خود استفاده نمودند. همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، روابط متقابلی بین سیستم‌های شریان‌های حیاتی وجود دارد. اگر یکی از سیستم‌های شریان‌های حیاتی دچار خرابی گردد، این خسارت به دیگر سیستم‌ها نیز منتقل می‌گردد که این همان اندرکنش طبیعی بین دو سیستم است. بنابراین برای اندرکنش بین شریان‌های حیاتی در مناطق مستعد مخاطرات طبیعی، مدل‌سازی پیچیده‌ای لازم است. هایمز و جیانگ^{۱۵} در سال ۲۰۰۱ پیشنهاد نمودند که مدلی براساس سیستم‌های داده-ستانده‌ی^{۱۶} اقتصادی استفاده گردد [۹]. در این مدل روابط خطی بین شریان‌های حیاتی، ریسک و یا ناکارآمدی شبکه را نشان می‌دهد. این دو کارشناس تحقیق خود را روی اندرکنش بین شبکه‌ی برق و شبکه‌ی حمل و نقل ارائه نمودند. اما ایرادی که وجود داشت این بود که در این

تحقیق، ارزیابی عملکرد لرزه‌ای شبکه‌های شریان حیاتی در نظر گرفته نشده بود. دونا س اوساریو و همکاران در سال ۲۰۰۶ پیشنهاد دادند که اندرکنش بین شریان‌های حیاتی با روش گرافیکی انجام گیرد. هرچند که این روش هم نیازمند بهبود مفهوم مکانیسم خرابی اندرکنشی شریان‌های حیاتی است [۱۰]. برای محاسبه‌ی اندرکنش شریان‌های حیاتی، یک روش احتمالاتی نیاز است که بتواند نحوه‌ی عملکرد و اثر خرابی گره‌های شبکه در اثر خرابی سایر گره‌ها را توصیف کند. با توجه به اهمیت قابل توجه بررسی اندرکنش بین شریان‌ها، نیاز به بررسی آن به صورت کمی احساس می‌شود. نکته‌ی با اهمیت در این است که اساساً بررسی اندرکنش شریان‌ها امری پیچیده بوده و نیازمند مطالعات پایه‌ای بسیاری است. پیش از آنکه توجه محققان به اندرکنش شریان‌ها جلب شود، موضوعات مهمی همچون مخاطرات، ارزیابی ریسک، برآورد آسیب‌پذیری، تحلیل خسارت، محاسبات عملکرد و سرویس‌دهی، منحنی‌های شکنندگی^{۱۷} و غیره توسط محققان و پژوهشگران انجام می‌شد که به‌نوعی تمامی این موارد جزء ارکان و پایه‌های مطالعات اندرکنش شریان‌ها هستند. به‌علاوه اینکه محققان کمتر از ده سال است که به اهمیت واقعی تحلیل کمی اندرکنش شریان‌ها پی برده‌اند. پس از وقوع بحران‌هایی همچون یازده سپتامبر و یا زلزله‌های بزرگ بم، لوماپریتا، سونامی ژاپن و زلزله‌ی ترکیه، محققان به این حقیقت پی بردند که بدون در نظر گرفتن تمامی شریان‌ها در کنار هم، محاسبات با خطای بسیاری مواجه بوده و عملاً غیر مفید خواهند بود. در حال حاضر در بسیاری از دانشگاه‌های مطرح دنیا، دلایل اصلی وابستگی شریان‌ها به هم و در مرحله‌ی بعد، ایجاد مدلی کارآمد که بتواند در همه‌ی بحران‌های طبیعی و انسان‌ساز مورد استفاده قرار بگیرد، در

دستور کار است [۱۲، ۱۱]. مشخصاً بحث شریان‌ها تنها مبحث پر اهمیت در مقابله با وقوع بحران نیست و مسائلی همچون اسکان موقت، آماده‌سازی نیروهای امداد و نجات، طراحی فرآیند احیا^{۱۸} و بازسازی، نحوه‌ی مقاوم‌سازی و بهسازی ساختمان‌ها و ارزیابی ریسک نیز وجود دارند؛ اما باید به‌خاطر آورد که شریان‌های حیاتی همان‌طور که پیش از وقوع بحران، وظیفه‌ی اصلی برقراری یک شهر را بر عهده دارند، پس از بحران نیز اهمیت فراوانی داشته و هر روز تأخیر در احیا و بازسازی آن‌ها، خسارتی هنگفت و ضرباتی جبران‌ناپذیر ایجاد می‌کنند [۱۲].

اطلاعات ورودی بسیاری برای انجام تحقیق مورد نیاز است؛ مواردی همچون مکان جغرافیایی، محل سیستم در ماتریس شبکه، مقدار تولید و تقاضای شبکه و تجهیزاتی همچون خطوط لوله‌ی نفت و گاز، پالایشگاه، ایستگاه‌های تقویت فشار و ذخیره، توربوکمپرسورها و تجهیزات انتقال در شبکه‌های نفت و گاز، وضعیت ایستگاه‌های پمپینگ آب، تصفیه‌خانه‌ها، مخازن آب، ایستگاه‌های کلرزی، خطوط لوله‌ی آب، چاه در شبکه‌های آب، اجزای شبکه‌ی فاضلاب، مراکز مخابراتی، دیتاسترها،^{۱۹} دکل‌های مخابرات، ایستگاه‌های ماهواره‌ای، اینترنتی، مراکز پست، پل‌ها، تونل‌ها، بزرگراه‌ها، شبکه‌های ارتباطی، ترمینال‌های اتوبوس، قطار، ایستگاه‌های مترو، فرودگاه‌ها، نیروگاه‌های برق، پست‌های برق، خطوط انتقال، فیدرها و دیسپاچینگ^{۲۰}ها در شبکه‌ی برق برای بررسی اندرکنش بین شریان‌ها مورد نیاز است.

عملکرد شریان‌های حیاتی تا حد زیادی به سایر سیستم‌ها و شریان‌های حیاتی وابسته است. برای مثال نیاز است که سیستم آب شهری توسط یک سیستم برق به‌طور مداوم پشتیبانی شود. در این



نمودار ۱: وابستگی شریان‌های حیاتی از منظر شبکه‌ی برق [۴، ۱۳]

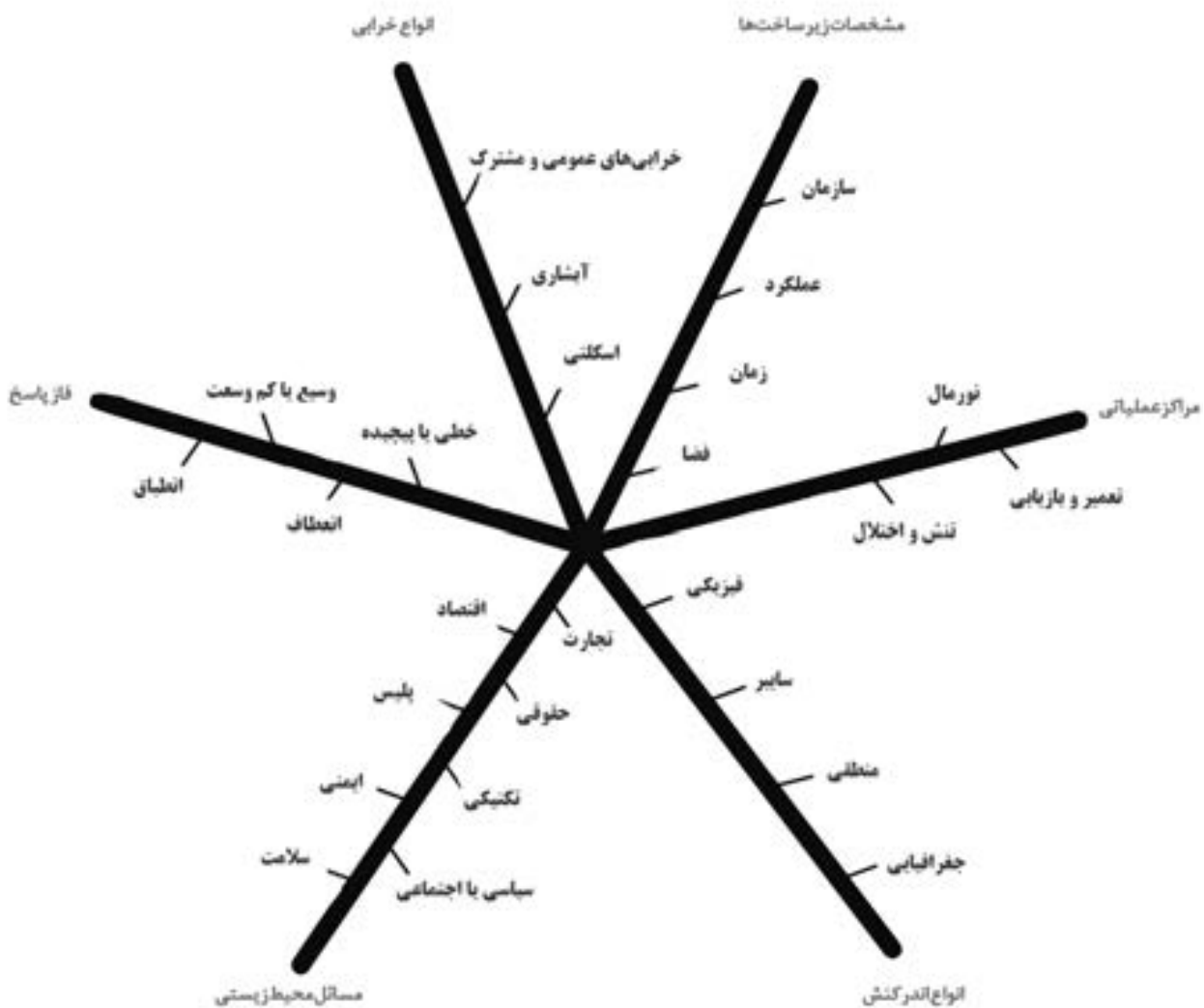
زمینه افراد زیادی مانند رینالدی در سال ۲۰۰۱ و جیلته^{۲۱} در سال ۲۰۰۲ و همین‌طور فدورا^{۲۲} و همکاران در سال ۲۰۰۴ در مورد وابستگی شریان‌های حیاتی به اقتصاد، صنعت و فعالیت‌های اجتماعی بحث نموده‌اند. مدل پیشنهادی رینالدی در نمودار ۲ آمده است [۲]. همچنین پیرنبوم^{۲۳} در سال ۲۰۰۲ سیستم‌های شریان حیاتی را براساس روابط درونی آن‌ها تقسیم‌بندی نموده است [۱۴]. برای مدل‌سازی و تحلیل شریان‌های حیاتی دو دسته از فعالیت‌ها مورد نیاز است: تحلیل سازه‌ها و ارزیابی عملکرد. همان‌طور که ذکر شد، پیش‌گویی رفتار شریان‌های حیاتی در طول شرایط اضطرار بسیار دشوار است و تمام ابزارها و مدل‌هایی که طرح می‌شوند در وهله‌ی اول نیازمند شناخت رفتار شریان‌های حیاتی هستند و به همین دلیل است که استفاده از روش‌هایی با رویکرد شبیه‌سازی بسیار توسعه پیدا کرده است. اولین چالش در زمینه‌ی شبیه‌سازی شریان‌های حیاتی، مدل کردن رفتار ناهمگن و نامتجانس آن‌ها در یک قالب و چارچوب واحد است. مسئله‌ی اصلی دیگر این است که وابستگی شریان‌ها تنها از نوع وابستگی فیزیکی دو شریان حیاتی به هم نبوده

و آن‌ها از نظر اطلاعاتی و همین‌طور وابستگی‌های خارجی همچون اثرات زیست‌محیطی و سیاسی و اجتماعی نیز به یکدیگر وابسته‌اند. بنابراین تکنیک‌های شبیه‌سازی به دو حوزه‌ی وسیع زیر تقسیم می‌گردد:

۱. استفاده از شبیه‌سازی‌های پهنه‌ای: شبیه‌سازی‌های متفاوت و با جزئیات برای یک شریان حیاتی واحد در قلمرو مشخص؛

۲. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی جدیدتر که توانایی مدل چند شریان حیاتی در یک چارچوب منفرد را دارد؛ همانند مدل گراف یا درخت خطا [۱۵].

حالت اول به هزینه و زمان کمتری نیاز دارد و برای مدل‌سازی وابستگی بین شریان‌ها از ساده‌سازی استفاده می‌کند اما ایراد کار در این است که هر یک از شریان‌ها جداگانه بررسی گردیده و امان‌ها و سناریوهای زیادی در این حالت نادیده گرفته می‌شود و انواع وابستگی‌ها و مدیریت اطلاعات و لینک‌های بحرانی بین دو شریان حیاتی در نظر گرفته نمی‌شود و کاملاً بدیهی است که استفاده از روش



نمودار ۲: مدل پیشنهادی رینالدی و همکارانش برای نشان دادن نحوه‌ی اندرکنش شریان‌های حیاتی [۲، ۱۴]

دوم بسیار مفیدتر و البته وقت‌گیرتر و پرهزینه‌تر است و برای آن حداقل ۳ لایه‌ی کاربردی مورد نیاز است [۱۶]:

۱. استفاده از سناریوهای متفاوت برای المان‌های تجهیزات و ارتباطات بین المان‌ها و سناریو برای نتایج رویدادهای مختلف؛

۲. استفاده از یک مجموعه مدیریت برای شبیه‌سازی‌های گوناگون موارد مختلف؛

۳. کمی‌سازی و فرمول‌بندی وابستگی‌ها و ارزیابی عملکرد و سرویس‌دهی شریان‌ها در سوانح مختلف.

با توجه به موارد ذکر شده می‌توان بحث را این‌گونه خلاصه کرد که مسایلی مانند مدل‌سازی سیستم، شبیه‌سازی اندرکنش، کمی‌سازی مدل عملکرد سیستم، بررسی و کمی‌سازی عدم قطعیت در فازهای مختلف محاسبات و پیچیدگی‌های روزافزون سیستم از مهم‌ترین چالش‌هایی هستند که در زمینه‌ی اندرکنش و وابستگی سیستم‌ها و شریان‌های حیاتی وجود دارد. در رابطه با بررسی عدم قطعیت‌های تحلیل می‌توان به این موارد اشاره نمود: در فرآیند ارزیابی سرویس‌دهی و خسارت و عملکرد یک سیستم، عدم قطعیت‌های فراوانی وجود دارد؛ مواردی مانند جنس، شرایط خاک، بزرگی زلزله، فرکانس زلزله، اتصالات بین سیستم‌ها و موارد متفاوت دیگر. از سوی دیگر، اطلاعات کلی موجود در مهندسی، همواره محدود بوده و داده‌های زیادی وجود دارد که در دسترس ما نخواهند بود. مثلاً پارامترهایی مانند بزرگی زلزله و فاصله از مرکز زلزله و عمق زلزله که بسیار مورد اهمیت هستند را از آنالیز رگرسیون زمین‌لرزه‌های قبلی به دست می‌آورند، گرچه برخی محققین با اعمال ضرایبی مانند ضریب اثر خاک محلی و یا منحنی‌های شکنندگی تجهیزات و منحنی‌های نش و شکست و یافتن مقادیر میانگین و میانه و انحراف معیارها توانسته‌اند تا حدی به مقادیر واقعی و مهندسی نزدیک شوند. روش‌هایی مانند الگوریتم ژنتیک،^{۲۴} تئوری گراف،^{۲۵} درخت خطا، زنجیره‌ی مارکف،^{۲۶} روش داده - ستانده، روش مینا - عامل^{۲۷} و تئوری قابلیت اطمینان از زمره‌ی این تحقیقات است [۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱].

انواع مدل‌ها و روش‌های بررسی اندرکنش بین شریان‌های حیاتی

چنانچه گفته شد، شریان‌ها با هم اندرکنش دارند؛ به‌عنوان مثال شبکه‌ی آب با دو شبکه‌ی گاز و نفت در خنک کردن تجهیزات، تولیدات و دفع مایعات وابستگی دارد. همچنین این شبکه وظیفه‌ی خنک کردن تجهیزات شبکه‌ی برق و مخابرات و کاهش انتشار مایعات را انجام می‌دهد. شبکه‌ی برق اندرکنش زیادی با دیگر شریان‌ها دارد. بعضی از این وابستگی‌ها در ادامه آمده است [۲۲]:

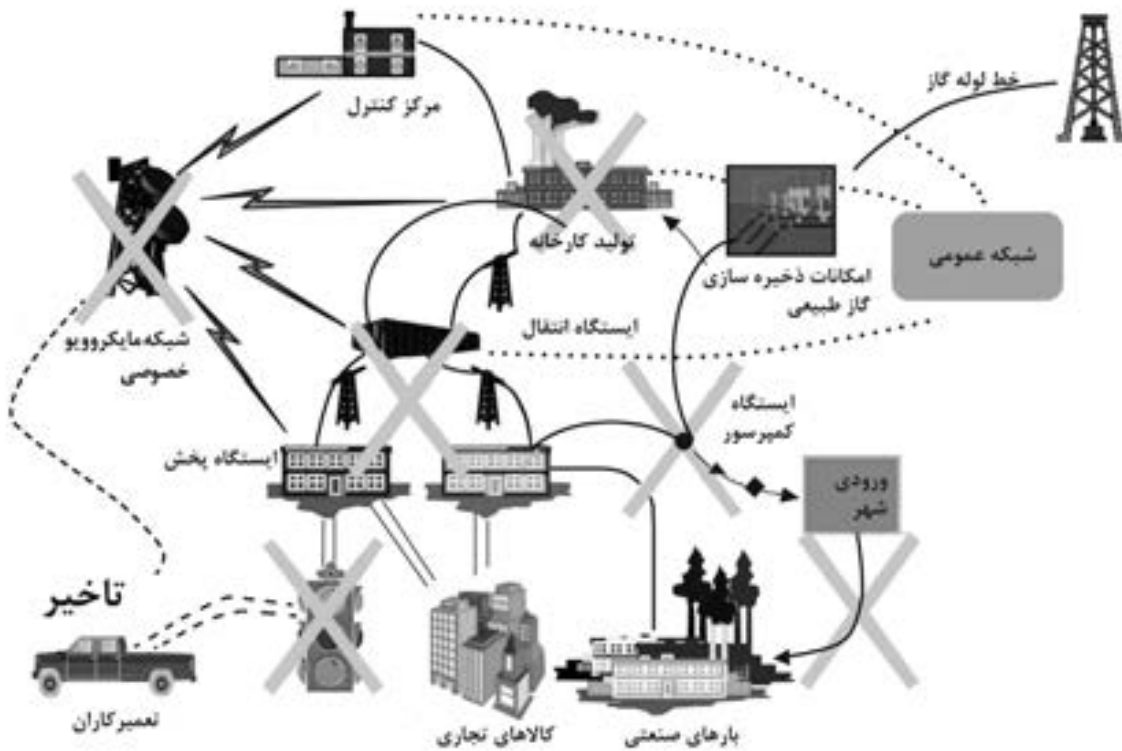
- با شبکه‌ی آب: برق برای پمپ‌ها، مخازن و کنترل سیستم؛
- با شبکه‌ی گاز: برق برای کمپرسورها، مخازن و کنترل سیستم؛
- با شبکه‌ی مخابرات: برق برای سوئیچ‌یاردها؛
- با شبکه‌ی نفت: برق برای پمپ‌ها، مخازن و کنترل

سیستم؛

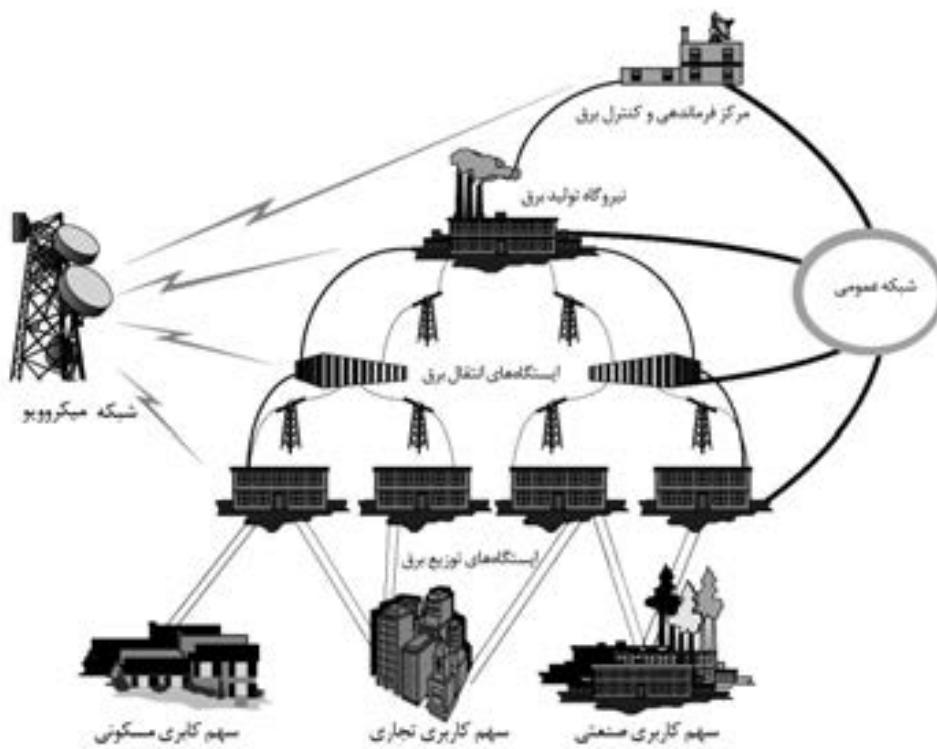
- با شبکه‌ی حمل و نقل: برق برای چراغ‌های راهنما، سوئیچرها و سیگنال‌ها.
- بعضی دیگر از فرضیات خرابی تجهیزات به شرح زیر است:
- نیروگاه‌های برق خراب می‌شوند تنها اگر خودشان خراب شوند؛
- خرابی پست‌های برق به خودشان و همین‌طور عملکرد نیروگاه‌های برق بستگی دارد؛
- خرابی مدارهای توزیع هم به پست‌های برق و هم نیروگاه‌های برق بستگی دارد؛
- در شبکه‌ی آب، خرابی چاه‌ها، تصفیه‌خانه‌ها و مخازن به خرابی خودشان تنها بستگی دارد [۱۹]؛
- خرابی پمپ‌ها هم به خرابی خود پمپ و هم خرابی سایر تجهیزات شبکه‌ی آب و هم برق وابسته است.
- در تصویر ۱ وابستگی‌های شریان‌های حیاتی به شبکه‌ی برق نشان داده شده است.

خنک‌کنندگی یکی از مهم‌ترین نیازهای شبکه‌ی برق است که باید با کمک شریان شبکه‌ی آب صورت گیرد. به دلیل محدودیت‌های موجود در اصول گرما پویشی، هر نیروگاه گرمایی مقداری انرژی را به صورت انرژی اتلافی از دست می‌دهد [۱۹]. در تصویر ۲ وابستگی سه بخش کاربری مسکونی، کاربری تجاری و کاربری صنعتی به شبکه‌ی برق نشان داده شده است و در جدول ۱ وضعیت چهار شریان حیاتی مهم در بحث اندرکنش، رفتار شبکه در بحران و تأثیرات شبکه روی سایر سیستم‌ها مشاهده می‌شود.

شبکه‌ی برق تأثیری حیاتی بر شبکه‌ی نفت و گاز دارد و در صورت اختلال، باعث ناپایداری کامل شبکه و عدم تأمین سوخت و انرژی خواهد شد. تأثیر شبکه‌ی برق روی مخابرات بسیار زیاد و حیاتی است و در صورت آمادگی نیروهای امداد و بازیابی، می‌تواند به سرعت تعمیر و قابل راه‌اندازی شود. گرچه ایجاد همین آمادگی نیازمند این است که متخصصین برق و مخابرات، از پیش از زلزله روی تجهیزات کار کنند و خرابی یا فرسودگی شبکه را شناسایی و رفع کنند تا در حین بحران، این موضوع باعث سردرگمی نیروها و پیچیده شدن بیشتر فرآیند نشود. شبکه‌ی برق اساس و منبع انرژی بسیاری از شبکه‌ها و تجهیزات دیگر شریان‌ها است. شبکه‌ی گاز، انرژی ژنراتورهای شبکه‌ی برق را تأمین می‌کند و شبکه‌ی برق، انرژی کنترل سیستم ذخیره‌سازی کمپرسورها را فراهم می‌کند. وجود آب نیز برای کنترل آتش‌سوزی‌های احتمالی و خنک نمودن تجهیزات ضروری است. زمانی که برق قطع می‌شود، شبکه‌ی گاز دچار اختلال شده و تولید گاز کاهش می‌یابد و تولیدات نفتی نیز تحت تأثیر قرار خواهند گرفت. کاهش عرضه‌ی گاز و نفت، روی شبکه‌ی برق نیز تأثیر می‌گذارد، بنابراین، چنان‌که ذکر شد، تمامی شریان‌های حیاتی وابستگی قابل توجه و پراهمیتی به یکدیگر دارند [۲۳].



تصویر ۱: انواع وابستگی شریان‌های حیاتی به شبکه‌ی برق



تصویر ۲: تجهیزات و بخش‌های مختلف شبکه‌ی برق

روش تحقیق

در روند محاسبات باید ابتدا مشخص شود چگونه می‌توان شبکه‌ی آب و شبکه‌ی برق را در کنار هم و در درخت خطا مدل کرد و کدام یک از ایستگاه‌های برق و دیگر تجهیزات دارای سیستم پشتیبان^{۲۸} هستند. باید بررسی گردد که هر مخزن آب از کدام ایستگاه برق می‌گیرد، به کدام مخازن آب می‌دهد و از کدام تصفیه‌خانه و چاه آب می‌گیرد، چگونه می‌توان اثر برق را از شبکه حذف نمود و در آن حالت هم باید تحلیل صورت گیرد. اجزای مختلف شبکه‌ی آب و برق چگونه به هم متصل هستند و چگونه می‌توان منحنی شکنندگی آن‌ها را رسم نمود. باید نحوه‌ی رسم درخت‌های خطا در سطوح جزئی و کلی و مناسب‌ترین نرم‌افزار درخت خطا مشخص گردد و اینکه احتمال خرابی تجهیزات و شبکه در زلزله‌هایی با دوره‌ی بازگشت ۲۰۰۰ ساله چه میزان از زلزله با دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ ساله تفاوت دارد. گام‌های تحلیل را می‌توان مطابق آنچه در زیر آمده است عنوان کرد:

۱. تهیه‌ی منحنی‌های هم شتاب و هم سرعت برای هر یک از گسل‌های منطقه‌ی مورد مطالعه برای دوره‌های بازگشت مختلف؛

۲. تعیین حداکثر شتاب زمین^{۲۹} PGA در محل گره‌ها و تأسیسات شبکه‌ی آب و برق و تعیین حداکثر سرعت زمین^{۳۰} PGV در مرکز قطعات لوله در خطوط انتقال شبکه‌ی آب؛

۳. فرض یک متغیر برای افزودن مقدار تصادفی زلزله به حداکثر شتاب زمین مورد انتظار؛

۴. برآورد شتاب و سرعت تصادفی و همبستگی بین میانگین‌ها و در نظر گرفتن توزیع تصادفی در محل گره‌ها؛

۵. برآورد احتمال شکست و نرخ تعمیر RR^{۳۱} برای شبکه‌ی مورد مطالعه با توجه به منحنی شکنندگی تعیین شده [۲۴]؛

۶. مدل‌سازی شبکه، جدا کردن گره‌های برق خسارت دیده در صورتی که احتمال خرابی آن‌ها از حد مشخصی بیشتر باشد؛

۷. کنترل سیستم برق در دو مرحله: درخت خطای کلی و درخت خطای یک سطحه (برای محاسبات درخت خطا از نرم‌افزار کامندر نسخه‌ی ۸ استفاده شده است)؛

۸. کنترل سیستم آب در دو مرحله: درخت خطای کلی و

جدول ۱: وضعیت ۴ شریان حیاتی مهم در بحث اندرکنش، رفتار شبکه در بحران‌ها و تأثیرات شبکه روی سایر سیستم‌ها

بخش‌های مختلف	به چه شریان‌هایی نیاز دارند	تأثیر روی سایر شریان‌ها	رفتار شبکه در تهدیدات و بحران‌ها
شبکه‌ی انرژی (برق و نفت و گاز)	آب برای خنک‌کنندگی ایستگاه‌های برق و پالایشگاه / شبکه‌ی ارتباطات برای کنترل و مدیریت سیستم‌های برقی و گازی / شبکه‌ی حمل و نقل برای جابه‌جایی سوخت و تجهیزات و نیروی کار.	انرژی برق پیش‌نیاز عملکرد تمامی دیگر شریان‌های حیاتی است / به‌طور خاص در شبکه‌ی آب، از برق در پمپ‌ها، تصفیه‌خانه‌ها، چاه‌ها، مخازن و سیستم‌های کنترلی و مدیریتی استفاده می‌شود.	ایستگاه‌ها و شبکه‌های توزیع محلی در برابر همه‌ی بحران‌ها، آسیب‌پذیری شدید دارند. عملکرد در سیل، زلزله و انفجار تقریباً از بین می‌رود. کابل‌ها در برابر باد، توربین‌ها در برابر تغییرات آب و هوایی، تجهیزات دیسپاچینگ در سوانح لرزه‌ای بیشترین آسیب را دارند.
شبکه‌ی حمل و نقل	انرژی سوخت و برق برای راه افتادن انواع وسایل نقلیه‌ی هوایی، زمینی و ریلی / شبکه‌ی ارتباطات برای کنترل و مدیریت سیستم‌ها / به‌زهکشی عناصر زیرساختی برای مقابله با سیل.	همه‌ی شریان‌های دیگر به شبکه‌ی حمل و نقل نیاز دارند، از انتقال نیروی کار و قطعات و انرژی بگیریید تا توزیع غذا / جابه‌جایی نیروهای امدادی در حین و پس از بحران.	آسیب‌پذیری جاده‌ها و ریل‌ها در زلزله و به‌خصوص سیل / اجزا و سیستم‌های شبکه‌ی حمل و نقل بسیار وابسته به تغییرات جمعیتی است / در جنگ‌ها دشمن دست به نابودی مسیرهای مواصلاتی و عبوری می‌زند. حفظ عملکرد سیستم در حین بحران اهمیت فوق‌العاده دارد.
شبکه‌ی ارتباطات و مخابرات	به انرژی برای راه افتادن همه‌ی سیستم‌ها / به شبکه‌ی حمل و نقل برای جابه‌جایی سوخت و تجهیزات و نیروی کار.	همه‌ی شریان‌های دیگر به شبکه‌ی ارتباطات نیاز دارند، از کنترل سیستم‌ها بگیریید تا انتقال و تحویل داده‌ها، گزارش دهی و تمام فعالیت‌هایی که نیاز به اینترنت، موبایل و تلفن دارند.	آسیب‌پذیری سیستم‌ها در زلزله و انفجارات / اجزا و سیستم‌های شبکه‌ی ارتباطات نیز بسیار وابسته به تغییرات جمعیتی و رفتار کاربران است / حجم تقاضای بالا در لحظات پس از بحران از موارد بسیار مهمی است که باید لحاظ گردد.
شبکه‌ی آب و فاضلاب	به انرژی برق برای پمپ‌ها، تصفیه‌خانه‌ها، چاه‌ها و مخازن / به ارتباطات برای مدیریت کنترلی / به حمل و نقل برای نیروی کار و فراهم نمودن تجهیزات شیمیایی فرآیندها.	همه‌ی شریان‌های دیگر به صورت مستقیم و یا آبخاری به این شریان وابسته‌اند، در تمامی ساختمان‌های موجود به آب برای مصارف کارکنان نیاز است. همچنین آب برای خنک‌کنندگی بسیاری از تجهیزات شریان‌ها ضروری است.	شبکه‌ی آب در نزولات جوی، زهکشی، زلزله و خشکسالی دچار بحران می‌شود. در سیل بیشترین آسیب‌ها و خرابی‌ها را متحمل می‌شود. همچنین به آلودگی‌های زیست‌محیطی، تغییرات جمعیتی و آب و هوایی وابسته است. سرویس دهی این شبکه در روزهای پس از بحران اهمیت ویژه‌ای دارد.

- درخت خطای یک سطحه؛
۹. کنترل سیستم آب و برق به صورت همزمان در دو مرحله؛
- درخت خطای کلی و درخت خطای یک سطحه؛
۱۰. محاسبه‌ی احتمال شکست و شاخص عملکرد شبکه‌ی آب و برق در سه حالت شبکه‌ی آب با اثر برق و پشتیبان، شبکه‌ی آب با اثر برق و بی پشتیبان و شبکه‌ی آب بدون اثر برق [۱۳، ۲۵]؛
۱۱. محاسبه‌ی عدم قطعیت نتایج و مقایسه‌ی تحلیل‌های در حالت‌های مختلف و نتیجه‌گیری و رسم نتایج در نمودارها.

مطالعه‌ی موردی و انجام تحلیل

محاسبات روی شبکه‌ی آب و برق منطقه‌ی ۶ شهرداری تهران انجام شده است و مطابق بررسی‌های صورت گرفته در منطقه، پست‌های برق زیر دارای سیستم پشتیبان نیستند: پست جمهوری، پست طالقانی، پست قورخانه، پست یوسف‌آباد، پست حافظ، پست جمال‌زاده، پست بهار، پست بوستان لاله، پست عباس‌آباد، پست آذربایجان، پست کریم‌خان، پست فیروزی و پست ولی‌عصر. بنا بر این مطالعات، تنها پست‌های برق منطقه که دارای قابلیت اطمینان بهتر و سیستم پشتیبان هستند، پست‌های نمایشگاه، حقانی و مصلی هستند. ذکر این نکته لازم است که نیمی از پست‌های عنوان شده از لحاظ موقعیت در درون منطقه‌ی ۶ نیستند اما از آنجا که برق مخازن آب یا پست برق درون منطقه را تعیین می‌کنند، باید وارد محاسبات گردند. پست‌های نمایشگاه و تهران پارس از نوع ASEA، پست‌های حقانی و ظفر از نوع AEG، پست مصلی از نوع ABB، پست‌های طالقانی و قورخانه از نوع SF₆، پست‌های آذربایجان، چمران، ولی‌عصر، کریم‌خان و فیروزی از نوع Cogalex، پست‌های جمهوری، سهروردی، حافظ و یوسف‌آباد از نوع آلمان شرقی و پست‌های دیگر مانند خیام، جمال‌زاده، بوستان لاله، بهار و عباس‌آباد ناشناس هستند. در بین این پست‌ها، تنها ASEA و ABB دارای قابلیت اطمینان مناسبی هستند. تصفیه‌خانه‌های جلالیه (یک) با ظرفیت ۲۵۹۲۰۰ متر مکعب، تصفیه‌خانه‌ی کن (دو) با ظرفیت ۶۹۱۲۰۰ متر مکعب و تصفیه‌خانه‌ی تهران پارس با ظرفیت ۴۵۳۶۰۰ متر مکعب، همگی جزء تصفیه‌خانه‌های بزرگ دسته‌بندی می‌گردند [۲۴، ۲۶]. دسته‌بندی ایستگاه‌های پمپاژ این‌گونه است که در صورت ظرفیت کمتر از ۳۸۰۰ متر مکعب در روز، ایستگاه پمپاژ کوچک است و در صورت ظرفیت بالای ۳۸۰۰ متر مکعب در روز، ایستگاه پمپاژ بزرگ است. همچنین بیش از ۹۰۰۰ کیلومتر طول خطوط لوله با قطری در حدود ۱۰۰ تا ۹۰۰ میلی‌متر وجود دارد که جنس اکثر آن‌ها از چدن داکتایل است. تعداد شیرهای شبکه‌ی توزیع آب تهران نیز بالغ بر ۱۲۱۹۴۰ و شیرهای فشارشکن ۶۸۳ عدد است. اما شروع محاسبات، مشخصاً نیازمند یافتن شتاب زلزله PGA در محل تجهیزات، ایستگاه‌ها و مخازن است. بنا بر ۵ سناریوی زلزله و مختصات جغرافیایی گره‌های مورد نظر، در جدول ۲ مقدار PGA برای نقاط مورد نظر محاسبه شده است.

برای محاسبه‌ی مقدار تصادفی شتاب زلزله، فاصله‌ی همه‌ی

ایستگاه‌ها تا نقطه‌ی مبدأ (میدان فردوسی) محاسبه شده و سپس با توجه به وابستگی بین حرکات زمین بین ایستگاه‌ها مقدار تصادفی حرکت زمین در اثر زلزله محاسبه شده است [۱۳].

پس از محاسبه‌ی شتاب زلزله در نقاط مورد نظر، مرحله‌ی بعدی محاسبه‌ی احتمال خرابی اجزای شبکه‌ی برق، آب و سپس شبکه‌ی مشترک آن‌هاست. با توجه به اینکه باید در یکی از حالات تحلیل، اثر برق حذف شود، لازم است برای آن حالت، منحنی شکنندگی مخصوصی تهیه گردد که در ادامه بیان خواهد شد. در جریان محاسبات نیاز به احتمال خرابی تجهیزات در دو حالت با اثر برق و بدون اثر برق بود، و با توجه به اینکه منحنی‌های شکنندگی موجود در راهنماهایی همچون هزوس و RISK-UE اجازه‌ی حذف اثر برق را نداده و با فرض وجود اثر برق است [۲۴، ۲۶]، رسم منحنی‌های شکنندگی جدیدی برای تجهیزات در هر دو حالت ذکر شده و همچنین در دو حالت با اثر سیستم پشتیبان و بدون اثر سیستم پشتیبان گریزناپذیر بود. بنابراین با کمک نرم‌افزارهای درخت خطا و استفاده از روابط و جدول‌های مرجع [۲۴، ۲۶] به محاسبه‌ی احتمال خرابی تجهیزات و رسم منحنی شکنندگی پرداخته شد. این محاسبات برای تمامی شتاب‌های طیفی ممکنه از ۰ تا ۱/۴g صورت گرفت تا منحنی رسم شده دامنه‌ی شتاب محتمل را پوشش دهد. در این مرحله، در مجموع، بیش از ۱۰۰۰ تحلیل درخت خطا صورت گرفت که نتایج تعدادی از آن‌ها به‌طور نمونه در ادامه آمده است. در جدول ۳ احتمال خرابی تجهیزات تصفیه‌خانه‌ی مهارنشده آمده است. محاسبه برای تمام تجهیزات و اجزای درون شبکه‌ی برق و آب انجام شده است. در جدول ۴ احتمال خرابی تجهیزات مهارشده‌ی یک تصفیه‌خانه شامل تجهیزات الکتریکی، حوضچه‌ی ته‌نشینی رسوب، کلرزی، تجهیزات شیمیایی، سیستم برق و سیستم پشتیبان که از منحنی‌های شکنندگی محاسبه شده‌اند، نمایش داده شده است.

مشابه محاسباتی که برای تصفیه‌خانه‌ها صورت گرفت، برای پمپ‌ها نیز، احتمال خرابی همه‌ی تجهیزات درونی یک پمپ شامل تجهیزات سیستم پشتیبان، برق تجاری، تجهیزات پمپ و ساختمان پمپ محاسبه شده است و برای چاه‌ها احتمال خرابی تمامی تجهیزات درونی یک چاه شامل تجهیزات سیستم پشتیبان، برق تجاری، تجهیزات چاه و ساختمان محل چاه محاسبه شد. برای محاسبات پمپ و چاه از سطح خرابی متوسط، که تجهیزات پمپ و چاه، در اثر خرابی نیازمند تعمیر هستند، استفاده شده است. محاسبات برای تمامی PGAهای بین ۰ تا ۱/۴g و برای دو حالت پمپ مهارشده و پمپ مهارنشده صورت گرفته است. در مرحله‌ی بعد، نتایج محاسبه شده در جدول‌های ۳ و ۴، وارد درخت خطا شده و محاسبات برای دو حالت با اثر برق، بدون اثر برق و همچنین در دو حالت با اثر برق پشتیبان و بدون اثر برق پشتیبان محاسبه می‌شود. با توجه به تعداد PGAهای در نظر گرفته شده و با توجه به تعداد تجهیزات و تعداد حالات مدنظر که پیش‌تر ذکر شد، نیاز به بیش از ۱۰۰۰ بار تحلیل درخت خطا وجود دارد که بسیار زمان‌بر بود.

جدول ۲: محاسبه‌ی PGA برای هر ۵ سناریوی زلزله

PGA					فاصله‌ی عمقی از گسل شمال	فاصله‌ی سطحی از گسل	ایستگاه
Zare (North Fault) [۲۹] سناریو ۱	Campbell-Bozorgnia(North Fault)[۲۸] سناریو ۲	Zafarani (North Fault) [۲۷] سناریو ۳	Zafarani (Moshafault) [۲۷] سناریو ۴	Zafarani (Rey Fault) [۲۷] سناریو ۵	km	km	
۰,۴۴۲۴۳۹	۰,۳۵	۰,۵۹۵	۰,۱۹۷	۰,۲۸۳	۹,۱۸۴۷۷۰۰۰۳	۹,۴	امیرآباد بالا
۰,۴۱۸۸۵۷	۰,۳۲۶	۰,۵۸۵	۰,۱۹۴	۰,۲۷۳	۱۰,۳۰۷۷۶۴۰۶	۱۰,۵	امیرآباد پایین
۰,۴۰۲۵۵۷	۰,۳۳۷	۰,۵۲	۰,۱۸۱	۰,۲۸۸	۱۱,۱۲۱۶۰۰۶	۱۱,۳	انقلاب
۰,۴۲۹۴۱۷	۰,۳۲۴	۰,۶۰۵	۰,۱۹۴	۰,۲۶۳	۹,۷۹۷۹۵۸۹۷۱	۱۰	یوسف آباد بالا
۰,۴۱۶۷۷۹	۰,۳۲۶	۰,۵۹۴	۰,۱۸۷	۰,۲۵۵	۱۰,۴۰۹۶۱۰۹۴	۱۰,۶	یوسف آباد پایین
۰,۳۷۴۰۷۴	۰,۲۸	۰,۵	۰,۱۸۹	۰,۲۹۸	۱۲,۶۴۲۷۸۴۵	۱۲,۸	فردوسی
۰,۳۹۴۶۹۳	۰,۳۰۲	۰,۵۱۲	۰,۱۹۴	۰,۳۰۲	۱۱,۵۲۷۷۹۲۵	۱۱,۷	تصفیه خانه جلایه
۰,۴۴۹۰۸۲	۰,۳۶	۰,۵۶۴	۰,۱۷۷	۰,۲۷۶	۸,۸۷۷۴۹۹۶۴۸	۹,۱	گیشا
۰,۳۸۵۱۳۷	۰,۲۹۳	۰,۵۰۵	۰,۱۹	۰,۳۰۳	۱۲,۰۳۴۹۶۹۱۱	۱۲,۲	بهجت آباد
۰,۳۶۶۹۴۲	۰,۲۶۵	۰,۵۲۵	۰,۱۹۷	۰,۲۸۴	۱۳,۰۴۷۶۰۵۱۴	۱۳,۲	طالقانی
۰,۳۷۴۰۷۴	۰,۲۸	۰,۵۱۵	۰,۱۹۷	۰,۲۹۸	۱۲,۶۴۲۷۸۴۵	۱۲,۸	کریم خان
۰,۳۹۴۷۵۸	۰,۳۰۲	۰,۵۷۴	۰,۲۰۱	۰,۲۹۲	۱۱,۶۲۹۲۷۳۴۱	۱۱,۸	مصلی
۰,۳۹۴۶۹۳	۰,۳۰۲	۰,۶۰۵	۰,۱۹۴	۰,۲۴۸	۱۱,۵۲۷۷۹۲۵	۱۱,۷	عباس آباد
۰,۳۹۰۸۳۴	۰,۲۹۹	۰,۵۰۵	۰,۱۸۸	۰,۲۹۸	۱۱,۷۳۰۷۲۸۸۸	۱۱,۹	بی سیم
۰,۴۰۲۵۵۷	۰,۳۳۷	۰,۵۰۵	۰,۱۸۸	۰,۲۹۹	۱۱,۱۲۱۶۰۰۶	۱۱,۳	بوستان لاله
۰,۳۶۰۰۰۳	۰,۲۶۵	۰,۵۱۶	۰,۱۹۳	۰,۳۰۳	۱۳,۴۵۲۱۳۷۳۸	۱۳,۶	قورخانه
۰,۵۱۸۱۲۲	۰,۴۵۲	۰,۵۹۴	۰,۱۸۳	۰,۲۵۷	۵,۷۶۲۸۱۱۸۱۴	۶,۱	تصفیه خانه ۲
۰,۳۴۹۹۵۲	۰,۲۶۲	۰,۵۱۶	۰,۱۸۹	۰,۲۹۸	۱۴,۰۵۸۴۴۹۴۲	۱۴,۲	بهار
۰,۴۸۰۹۸۵	۰,۳۹۸	۰,۵۸۵	۰,۱۹۲	۰,۲۳۸	۷,۴۳۵۷۲۴۵۷۸	۷,۷	مخزن ۶۱
۰,۲۵۳۸۴۱	۰,۱۸۵	*	*	*	۲۱,۷۰۸۰۶۳۰۲	۲۱,۸	تهران پارس

* در مرجع مورد استفاده موجود نبود

جدول ۳: احتمال خرابی تجهیزات تصفیه خانه‌ی مهارنشده

PGA	Water Treatment UnAnchored					
	Chlorination Eq	Chemical Eq	Sediment	Electric Eq	Electric Power	Backup Power
۰,۰۰۰۱	۰,۰۰۰۰۵	۰,۰۰۰۰۹	۰,۰۰۰۰۴	۰,۰۰۰۰۶	۰,۰۰۰۰۲	۰,۰۰۰۰۶
۰,۰۰۵	۰,۰۰۰۰۶	۰,۰۰۰۰۲۶	۰,۰۰۰۰۳	۰,۰۰۰۰۱	۰,۰۰۰۰۷	۰,۰۰۰۴۷۰۷
۰,۰۱	۰,۰۰۲۷۱۹۰۲	۰,۰۱۰۴۳۰۵	۰,۰۰۰۱۶۹۵	۰,۰۰۰۱۴۱۲	۰,۰۰۳۰۱۱۵	۰,۰۴۱۵۵۹۶
۰,۰۱۵	۰,۰۱۸۸۰۰۹۱	۰,۰۵۱۰۵۴۴	۰,۰۰۲۷۸۰۰۶	۰,۰۱۰۴۳۰۵	۰,۰۴۱۵۵۹۶	۰,۱۱۰۰۹۲۵
۰,۰۲	۰,۰۴۶۷۵۴۱۸	۰,۱۲۳۹۹۵	۰,۰۱۴۰۰۲۲	۰,۰۳۳۵۴۸۷	۰,۱۵۵۳۷۱۸	۰,۱۹۳۱۲۶۱
۰,۰۲۵	۰,۰۷۰۶۶۱۱۳	۰,۲۱۶۷۱۳۹	۰,۰۳۹۹۷۸۳	۰,۰۷۲۲۶۶۸	۰,۳۲۴۲۶۵۵	۰,۲۷۸۴۲۲۵
۰,۰۳	۰,۱۱۳۰۵۷۸۳	۰,۳۱۵۸۰۲۱	۰,۰۸۲۸۲۸۵	۰,۱۲۳۹۹۵	۰,۵	۰,۳۵۹۵۷۲۲
۰,۰۳۵	۰,۱۶۱۰۳۵۶۴	۰,۴۱۹۹۴۲	۰,۱۴۰۵۱۸۴	۰,۱۸۴۵۰۵۵	۰,۶۵۰۰۲۰۸	۰,۴۳۳۷۱۸۸
۰,۰۴	۰,۲۱۲۰۱۴۴۴	۰,۵	۰,۲۰۸۷۰۲۹	۰,۲۴۹۵۹۱۷	۰,۷۶۳۹۹۲۷	۰,۵
۰,۰۴۵	۰,۲۶۴۹۵۸۲۷	۰,۵۷۷۸۱۴۳	۰,۲۸۵۲۲۵	۰,۳۱۵۸۰۲۱	۰,۸۴۴۶۲۸۲	۰,۵۵۵۵۵۴۳
۰,۰۵	۰,۳۱۵۲۳۲۸۸	۰,۶۴۵۰۱۸۶	۰,۳۵۷۶۸۸۹	۰,۳۸۰۶۱۳۷	۰,۸۹۹۲۱۰۲	۰,۶۰۹۸۵۰۵
۰,۰۵۵	۰,۳۶۵۲۲۸۶۷	۰,۷۰۲۲۰۶۱	۰,۴۳۰۹۳۳۸	۰,۴۴۲۳۴۸	۰,۹۳۵۱۵۶۸	۰,۶۵۴۷۰۹۷
۰,۰۶	۰,۴۱۲۸۵۱۷۶	۰,۷۵۰۴۰۸۳	۰,۵	۰,۵	۰,۹۵۸۴۴۰۴	۰,۶۹۳۲۸۶۳۴
۰,۰۶۵	۰,۴۵۷۸۴۲۳۳	۰,۷۹۰۷۹۴۱	۰,۵۶۳۵۹۳۱	۰,۵۵۳۰۶۳۳	۰,۹۷۳۳۸۰۳	۰,۷۲۸۰۳۶۲
۰,۰۷	۰,۵	۰,۸۴۴۵۱۰۷	۰,۶۳۱۰۷۳۵	۰,۶۰۱۳۷۸۹	۰,۹۸۴۹۲۲۸	۰,۷۵۷۸۸۶۴
۰,۰۷۵	۰,۵۳۹۲۵۶۶۸	۰,۸۵۲۶۰۷۲	۰,۶۷۲۳۰۵۱	۰,۶۴۵۰۱۸۶	۰,۹۸۹۰۱۰۴	۰,۷۸۳۹۹۶۲
۰,۰۸	۰,۵۷۵۶۴۲۸۵	۰,۸۷۶۰۰۵	۰,۷۱۷۴۷۷۵	۰,۶۸۴۱۹۷۹	۰,۹۹۳۸۹۸۲	۰,۸۰۶۸۷۳۹
۰,۰۸۵	۰,۶۰۹۲۵۰۳۶	۰,۸۹۵۹۳۳۹	۰,۷۵۶۹۷۷۶	۰,۷۱۹۲۱۵	۰,۹۹۵۳۸۷۹	۰,۸۲۶۹۵۸۶
۰,۰۹	۰,۶۴۰۲۱۰۱۷	۰,۹۱۱۷۴۰۴	۰,۷۹۱۲۹۷۱	۰,۷۵۰۴۰۸۳	۰,۹۹۶۹۸۸۵	۰,۸۴۴۶۲۸۲
۰,۰۹۵	۰,۶۸۸۶۷۵۷۷	۰,۹۳۵۳۰۱۲	۰,۸۲۰۹۶۹۱	۰,۷۷۸۱۲۸۳	۰,۹۹۸۰۲۲۳	۰,۸۶۰۲۰۶۳
۱	۰,۶۹۴۸۱۱۵۹	۰,۹۳۶۳۳۳	۰,۸۴۶۵۲۷	۰,۸۰۲۷۱۹۸	۰,۹۹۸۹۳۵	۰,۸۷۳۹۷۰۷
۱,۰۵	۰,۷۱۸۷۸۴۹۸	۰,۹۴۶۱۳۳۷	۰,۸۶۸۴۷۹۳	۰,۸۲۴۵۱۰۷	۰,۹۹۹۱۳۱۶	۰,۸۸۶۱۵۹۸
۱,۰۱	۰,۷۴۰۷۶۰۹۱	۰,۹۵۴۱۰۲۲	۰,۸۸۲۳۹۵۸	۰,۸۴۳۸۰۶۶	۰,۹۹۹۴۱۹۳	۰,۸۹۶۹۷۴۹
۱,۰۱۵	۰,۷۶۰۸۹۸۴۳	۰,۹۶۰۸۰۳۵	۰,۹۰۳۴۰۰۷	۰,۸۶۰۸۸۶۹	۰,۹۹۹۶۰۹۴	۰,۹۰۶۵۹۳۵
۱,۰۲	۰,۷۷۹۳۴۸۵۷	۰,۹۶۶۴۵۱۳	۰,۹۱۷۱۷۱۵	۰,۸۷۶۰۰۵	۰,۹۹۹۷۳۵۶	۰,۹۱۵۱۶۵۱
۱,۰۲۵	۰,۷۹۶۲۵۳۱۲	۰,۹۷۱۲۲۱۵	۰,۹۲۸۹۳۹۵	۰,۸۸۹۳۸۸۴	۰,۹۹۹۸۲	۰,۹۲۲۸۱۹۱
۱,۰۳	۰,۸۱۱۷۴۴۱۲	۰,۹۷۵۲۵۹۶	۰,۹۳۸۹۳۶	۰,۹۰۱۲۴۰۱	۰,۹۹۹۸۷۶۷	۰,۹۲۹۶۶۷۴
۱,۰۳۵	۰,۸۲۵۹۳۳۶۹	۰,۹۷۸۶۸۵۴	۰,۹۴۷۵۸۳۴	۰,۹۱۱۷۴۰۴	۰,۹۹۹۹۱۵۱	۰,۹۳۵۸۰۶۶
۱,۰۴	۰,۸۳۸۹۶۴۳۲	۰,۹۸۱۵۹۸۳	۰,۹۵۶۹۳۳۹	۰,۹۲۱۰۴۹	۰,۹۹۹۹۶۱۲	۰,۹۴۱۳۰۰۰

جدول ۴: احتمال خرابی تجهیزات تصفیه خانه‌ی مهارشده

PGA	Water Treatment Anchored					
	Chlorination Eq	Chemical Eq	Sediment	Electric Eq	Electric Power	Backup Power
۰.۰۰۰۱	۰.۰۰۰۰۷	۰.۰۰۰۰۲	۰.۰۰۰۰۴	۰.۰۰۰۰۱	۰.۰۰۰۰۲	۰.۰۰۰۰۵
۰.۰۰۵	۰.۰۰۰۰۹	۰.۰۰۰۱۲۴	۰.۰۰۰۰۳	۰.۰۰۰۰۳	۰.۰۰۰۲۹	۰.۰۰۰۰۹
۰.۱	۰.۰۰۰۵۱۹۹	۰.۰۰۰۳۷۴۷۶	۰.۰۰۰۱۶۹۵	۰.۰۰۰۰۶	۰.۰۰۰۳۰۱۱۵	۰.۰۰۱۹۹۹۶
۰.۱۵	۰.۰۰۳۳۶۳۲۲	۰.۰۱۸۰۹۵۸	۰.۰۰۲۷۸۰۶	۰.۰۰۰۷۸۳۸	۰.۰۰۴۱۵۵۹۶	۰.۰۰۸۸۶۰۴
۰.۲	۰.۰۱۷۴۶۸۸	۰.۰۰۴۶۱۱۰۹	۰.۰۱۴۰۰۲۲	۰.۰۰۰۳۶۵۴۸	۰.۰۵۵۳۷۱۸	۰.۰۲۱۱۲۰۶
۰.۲۵	۰.۰۲۲۸۲۸۱۵	۰.۰۸۶۱۱۴۴	۰.۰۳۹۹۷۸۳	۰.۰۱۰۴۳۰۵	۰.۰۳۲۴۲۶۵۵	۰.۰۴۱۵۵۹۶
۰.۳	۰.۰۴۲۷۱۹۷۵	۰.۱۳۴۶۷۵۸	۰.۰۸۲۸۲۸۵	۰.۰۲۲۲۹۵	۰.۵	۰.۰۶۶۱۶۶۴
۰.۳۵	۰.۰۶۶۸۴۰۱۲	۰.۱۸۸۲۵۵۹	۰.۱۴۰۵۱۸۴	۰.۰۴۰۸۴۷	۰.۶۵۰۰۲۰۸	۰.۰۹۴۷۱۳۲
۰.۴	۰.۰۹۵۲۶۹۳۲	۰.۲۴۳۹۷۲	۰.۲۰۸۷۰۲۹	۰.۰۶۳۳۶۱۷	۰.۷۶۳۹۹۳۷	۰.۱۲۶۰۷۹۳
۰.۴۵	۰.۱۲۶۹۹۲۱۲	۰.۳۹۹۶۸	۰.۲۸۵۲۲۵	۰.۰۹۱۶۹۸	۰.۸۴۴۶۲۸۲	۰.۱۵۹۱۰۷
۰.۵	۰.۱۶۱۰۳۵۶۸	۰.۵۳۳۹۰۲۳	۰.۳۵۷۶۸۸۹	۰.۱۳۳۹۹۵	۰.۸۹۹۲۱۰۲	۰.۱۹۳۱۲۶۱
۰.۵۵	۰.۱۹۶۵۳۷۸۵	۰.۰۴۰۵۶۸۹	۰.۴۳۰۹۳۲۸	۰.۱۵۹۵۲۹۱	۰.۹۳۵۱۵۶۸	۰.۲۲۷۴۲۲۴
۰.۶	۰.۲۳۲۷۷۱۲۳	۰.۵۳۴۴۸۱۵	۰.۵	۰.۱۹۷۲۸۰۲	۰.۹۵۸۴۴۰۴	۰.۲۶۱۵۶۳۷
۰.۶۵	۰.۲۶۹۱۴۳۹۲	۰.۵	۰.۵۶۳۳۶۳۱	۰.۲۳۶۳۸۷۴	۰.۹۷۳۳۸۰۳	۰.۲۹۵۱۳۳۳
۰.۷	۰.۳۰۵۱۸۸۴۱	۰.۵۴۲۱۵۶۷	۰.۶۲۱۰۳۵	۰.۲۷۶۱۰۲۸	۰.۹۸۲۹۲۲۸	۰.۳۲۷۸۵۵۱
۰.۷۵	۰.۳۴۰۵۲۵۶۶	۰.۵۸۰۹۹۱۲	۰.۶۷۲۳۰۵۱	۰.۳۱۵۸۰۲۱	۰.۹۹۸۰۱۰۴	۰.۳۵۹۵۷۲۲
۰.۸	۰.۳۷۴۹۴۸	۰.۶۱۶۶۲۴۶	۰.۷۱۷۴۷۷۵	۰.۳۵۴۹۸۱۴	۰.۹۹۲۸۹۸۲	۰.۳۹۰۱۴۹۵
۰.۸۵	۰.۴۰۸۲۰۰۳	۰.۶۴۹۲۲۷	۰.۷۵۶۹۷۷۶	۰.۳۹۳۲۷۵	۰.۹۹۵۳۸۷۹	۰.۴۱۹۵۰۹۴
۰.۹	۰.۴۴۰۱۷۹۱۵	۰.۶۷۸۹۹۴۶	۰.۷۹۱۲۹۷۱	۰.۴۳۰۳۰۳۸	۰.۹۹۶۹۸۸۵	۰.۴۴۷۶۱۰۵
۰.۹۵	۰.۴۷۰۷۹۳۱۹	۰.۷۰۶۱۳۴۸	۰.۸۲۰۹۶۹۱	۰.۴۶۵۹۳۶۴	۰.۹۹۸۰۲۲۳	۰.۴۷۴۴۳۸۷
۱	۰.۵	۰.۷۳۰۸۵۶۱	۰.۸۴۶۵۲۷	۰.۵	۰.۹۹۸۶۹۳۵	۰.۵
۱.۰۵	۰.۵۲۷۷۸۳۸۷	۰.۷۵۳۳۶۱	۰.۸۶۸۴۷۹۳	۰.۵۳۳۴۰۵	۰.۹۹۹۱۳۱۶	۰.۵۳۴۳۱۵۵
۱.۱	۰.۵۵۴۱۵۱۵۷	۰.۷۷۳۸۴۲۶	۰.۸۸۷۲۹۵۸	۰.۵۶۳۱۰۶۶	۰.۹۹۹۴۱۹۳	۰.۵۳۷۴۱۶۹
۱.۱۵	۰.۵۷۹۱۲۶۷۲	۰.۷۹۲۴۸۲۲	۰.۹۰۳۳۰۰۷	۰.۵۹۲۰۹۴۷	۰.۹۹۹۶۰۹۴	۰.۵۶۳۳۳۳۳
۱.۲	۰.۶۰۲۷۴۵۲۷	۰.۸۰۴۴۷۹	۰.۹۱۷۱۷۱۵	۰.۶۱۹۳۸۶۳	۰.۹۹۹۷۳۵۶	۰.۵۹۰۱۴۸۸
۱.۲۵	۰.۶۲۵۰۵۲	۰.۸۲۴۸۹۴۶	۰.۹۲۸۹۳۹۵	۰.۶۴۵۰۱۸۶	۰.۹۹۹۸۲	۰.۶۰۹۸۵۰۵
۱.۳	۰.۶۴۶۰۹۷۶۶	۰.۸۳۸۹۶۳۲	۰.۹۳۸۹۳۴۶	۰.۶۶۹۰۴۳۶	۰.۹۹۹۸۷۶۷	۰.۶۲۸۵۲۷۳
۱.۳۵	۰.۶۶۵۹۳۶۸۱	۰.۸۵۱۷۸۶۲	۰.۹۴۷۵۸۳۴	۰.۶۹۱۵۲۳۸	۰.۹۹۹۹۱۵۱	۰.۶۴۶۲۱۸۴
۱.۴	۰.۶۸۶۶۶۱۲	۰.۸۶۳۴۷۷۹	۰.۹۵۴۹۳۳۹	۰.۷۱۲۵۲۸۶	۰.۹۹۹۹۴۱۲	۰.۶۶۲۹۷۲۹

جدول ۵: احتمال خرابی یک تصفیه خانه‌ی مهارشده و مهارنشده با اثر برق و سیستم پشتیبان

خرابی تصفیه خانه مهارنشده کامل		خرابی تصفیه خانه مهارشده کامل	
PGA(g)	P(f)	PGA(g)	P(f)
۰	۰	۰	۰
۰.۰۵	۰.۰۰۰۰۱	۰.۰۵	۰.۰۰۰۰۶
۰.۱	۰.۰۰۰۱	۰.۱	۰.۰۰۰۰۲
۰.۱۵	۰.۰۱۷	۰.۱۵	۰.۰۰۲۸
۰.۲	۰.۰۷۵	۰.۲	۰.۰۲۱
۰.۲۵	۰.۱۸۹	۰.۲۵	۰.۰۶۲
۰.۳	۰.۳۴۱	۰.۳	۰.۱۳۳
۰.۳۵	۰.۴۹۶	۰.۳۵	۰.۲۲۵
۰.۴	۰.۶۳۳	۰.۴	۰.۳۳۱
۰.۴۵	۰.۷۴	۰.۴۵	۰.۴۳۳
۰.۵	۰.۸۲۱	۰.۵	۰.۵۳۷
۰.۵۵	۰.۸۷۷	۰.۵۵	۰.۶۲۲
۰.۶	۰.۹۱۶	۰.۶	۰.۶۹۹
۰.۶۵	۰.۹۴۳	۰.۶۵	۰.۷۶۲
۰.۷	۰.۹۶۱	۰.۷	۰.۸۱۴
۰.۷۵	۰.۹۷۴	۰.۷۵	۰.۸۵۵
۰.۸	۰.۹۸۲	۰.۸	۰.۸۸۸
۰.۸۵	۰.۹۸۸	۰.۸۵	۰.۹۱۴
۰.۹	۰.۹۹۲	۰.۹	۰.۹۳۴
۰.۹۵	۰.۹۹۴	۰.۹۵	۰.۹۴۹
۱	۰.۹۹۶	۱	۰.۹۶۱

تصفیه‌خانه در حالت وجود اثر برق و وجود سیستم پشتیبان

برای محاسبه‌ی وضعیت تصفیه‌خانه‌ها در حالت وجود اثر برق و وجود سیستم برق پشتیبان از نمودار درخت خطای ۳ استفاده شده و ورودی اطلاعات نمودار و احتمال خرابی تجهیزات، مطابق اعداد جدول‌های قبلی است.

مطابق نمودار ۳، در حالت کلی، تجهیزات تصفیه‌خانه شامل سیستم کلرزی، ته‌نشین رسوب و مخازن شیمیایی با گذرگاه OR و تجهیزات الکتریکی، برق شهری و سیستم برق پشتیبان با گذرگاه AND در درخت خطا حضور دارند. در این حالت ۵۶ تحلیل برای حالت تجهیزات مهارشده و ۵۶ تحلیل برای حالت تجهیزات مهارنشده صورت گرفت که نتایج در جدول ۵ آمده است.

تصفیه‌خانه در حالت وجود اثر برق و عدم وجود سیستم برق پشتیبان

برای محاسبه‌ی وضعیت تصفیه‌خانه‌ها در حالت وجود اثر برق و عدم وجود سیستم پشتیبان از نمودار درخت خطای ۴ استفاده شد. در این حالت تمامی تجهیزات و اثر برق تصفیه‌خانه با گذرگاه OR در درخت خطا حضور دارند. در این حالت ۵۶ تحلیل برای حالت تجهیزات مهارشده و ۵۶ تحلیل برای حالت تجهیزات مهارنشده در نرم‌افزار صورت گرفت که نتایج در جدول ۶ آمده است:

تصفیه خانه در حالت عدم وجود اثر برق و عدم وجود

سیستم برق پشتیبان

در حالت بدون اثر برق و سیستم پشتیبان، برای محاسبه ی وضعیت تصفیه خانه ها در حالت عدم وجود اثر برق و سیستم پشتیبان از درخت خطایی استفاده می شود که تنها تجهیزات تصفیه خانه در نمودار وجود دارند و با گذرگاه OR در درخت خطا حضور دارند. در این حالت برای هر کدام از حالت های مهارشده و نشده ۵۶ تحلیل صورت گرفت که نتایج در جدول ۷ آمده است.

نتایج کلی مربوط به منحنی تصفیه خانه ها برای حالات مهارشده و مهار نشده به ترتیب در نمودارهای ۵ و ۶ آمده است.

در نمودار ۶ نتایج کلی مربوط به تصفیه خانه ها در هر سه حالت محاسبه شده و در حالت تجهیزات مهارشده نشان داده شده است. مشاهده می شود حالت وجود اثر برق و عدم وجود اثر سیستم پشتیبان خرابی بسیار بیشتری نسبت به دو حالت دیگر (حالت سیستم کامل و حالت نادیده گرفتن اثر برق) دارد که به خوبی اهمیت اثر سیستم پشتیبان برق را نشان می دهد.

ایستگاه های پمپاژ مهارشده و مهار نشده

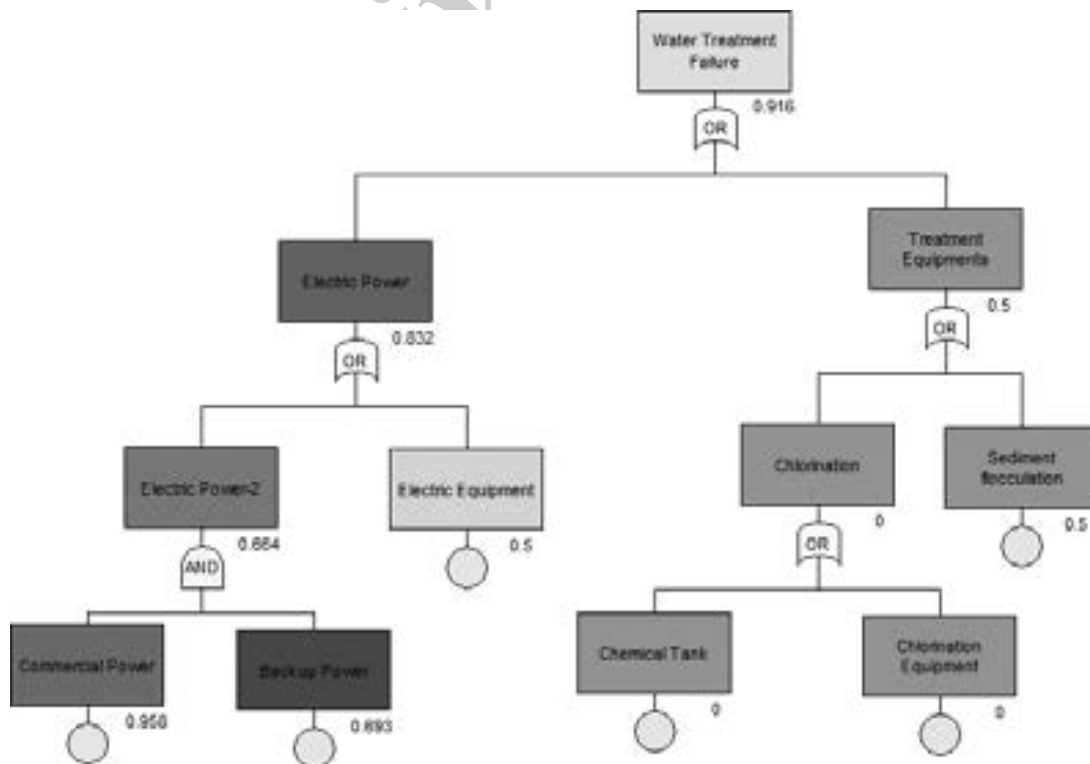
مشابه همین روند برای ایستگاه های پمپاژ صورت گرفت. نتایج کلی مربوط به منحنی ایستگاه های پمپاژ برای حالات مهارشده و مهارشده را می توان به ترتیب در نمودارهای ۷ و ۸ مشاهده کرد.

در نمودارهای ۷ و ۸ مشاهده می شود پمپ در حالت وجود اثر برق و عدم وجود اثر سیستم پشتیبان خرابی بسیار بیشتری نسبت به دو حالت دیگر (حالت سیستم کامل و حالت نادیده گرفتن اثر برق) دارد

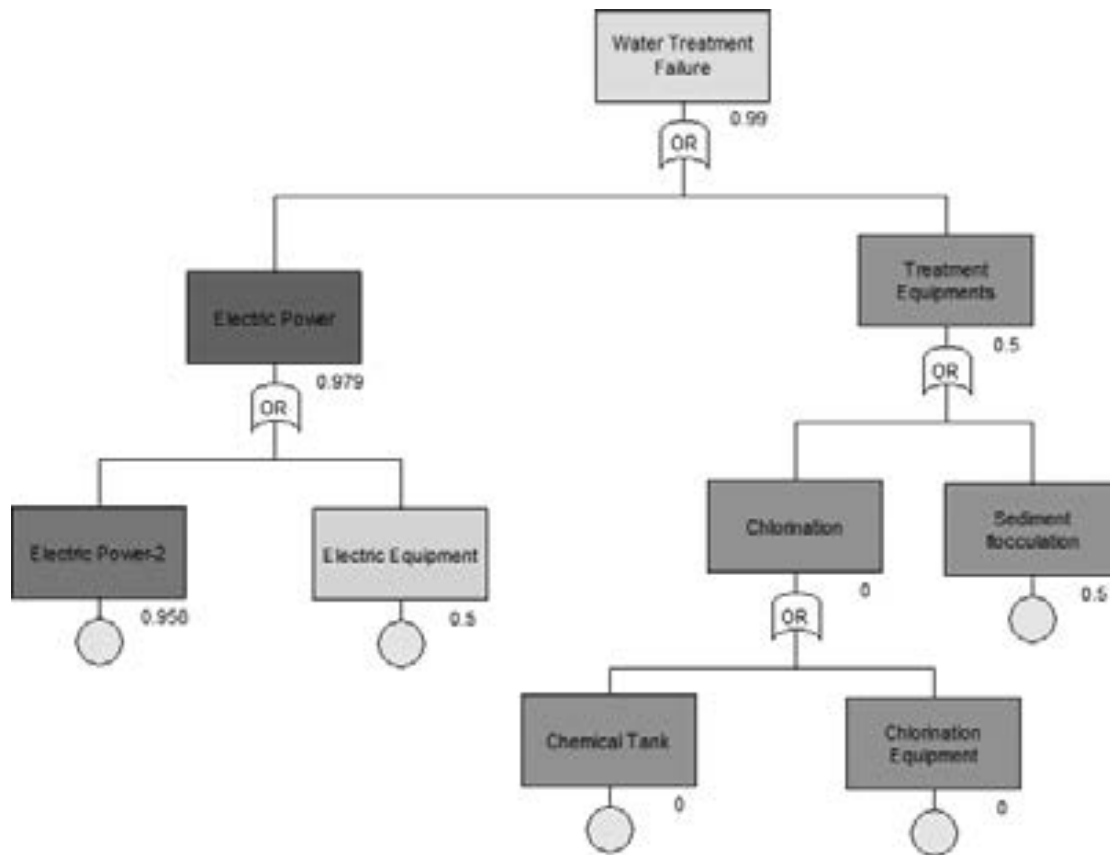
جدول ۶: احتمال خرابی یک تصفیه خانه ی مهار نشده و مهارشده با

اثر برق و بدون سیستم پشتیبان

خرابی تصفیه خانه مهار نشده بی پشتیبان		خرابی تصفیه خانه مهارشده بی پشتیبان	
PGA(g)	P(f)	PGA(g)	P(f)
۰	۰	۰	۰
۰,۰۵	۰,۰۰۰۱	۰,۰۵	۰,۰۰۰۶
۰,۱	۰,۰۰۴۵	۰,۱	۰,۰۰۴
۰,۱۵	۰,۰۰۵۳	۰,۱۵	۰,۰۰۴۹
۰,۲	۰,۰۱۹۴	۰,۲	۰,۰۱۷۶
۰,۲۵	۰,۰۳۹۷	۰,۲۵	۰,۰۳۵۸
۰,۳	۰,۰۵۹۸	۰,۳	۰,۰۵۵۲
۰,۳۵	۰,۰۷۵۴	۰,۳۵	۰,۰۷۱۱
۰,۴	۰,۰۸۶	۰,۴	۰,۰۸۲۲
۰,۴۵	۰,۰۹۲۴	۰,۴۵	۰,۰۸۹۵
۰,۵	۰,۰۹۶	۰,۵	۰,۰۹۴۳
۰,۵۵	۰,۰۹۷۹	۰,۵۵	۰,۰۹۶۹
۰,۶	۰,۰۹۹	۰,۶	۰,۰۹۸۳
۰,۶۵	۰,۰۹۹۵	۰,۶۵	۰,۰۹۹۱
۰,۷	۰,۰۹۹۷	۰,۷	۰,۰۹۹۵
۰,۷۵	۰,۰۹۹۸	۰,۷۵	۰,۰۹۹۸
۰,۸	۰,۰۹۹۹	۰,۸	۰,۰۹۹۹
۰,۸۵	۱	۰,۸۵	۰,۰۹۹۹
۰,۹	۱	۰,۹	۱
۰,۹۵	۱	۰,۹۵	۱
۱	۱	۱	۱



نمودار ۳: درخت خطای یک تصفیه خانه با فرض وجود برق و سیستم پشتیبان



نمودار ۴: درخت خطای یک تصفیه خانه با فرض وجود برق و عدم وجود سیستم پشتیبان

جدول ۷: احتمال خرابی یک تصفیه خانه ی مهارنشده و مهارشده

که به خوبی اهمیت اثر سیستم برق پشتیبان را نشان می دهد.

بدون اثر برق و سیستم پشتیبان

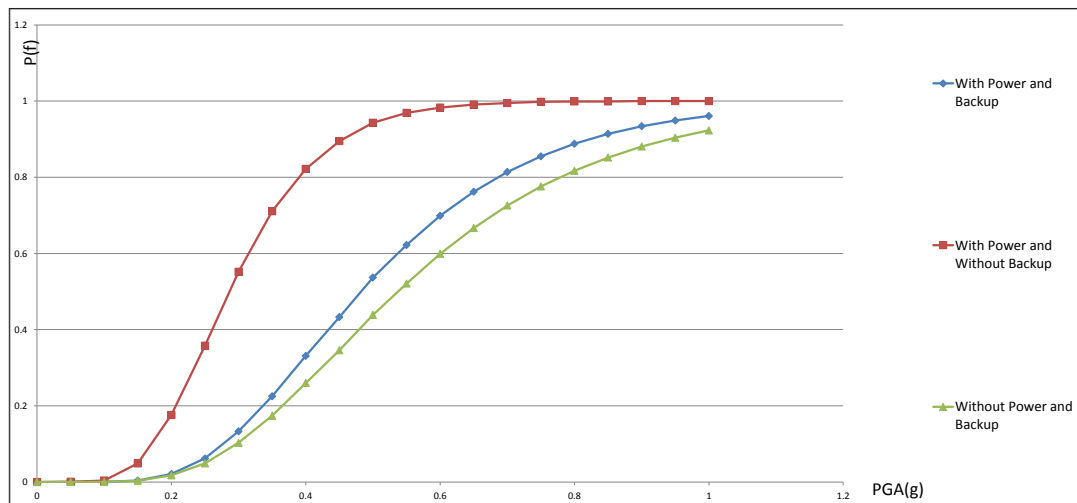
خرابی تصفیه خانه مهار نشده بی برق		خرابی تصفیه خانه مهار شده بی برق	
PGA(g)	P(f)	PGA(g)	P(f)
۰	۰	۰	۰
۰,۰۵	۰	۰,۰۵	۰
۰,۱	۰,۰۰۱	۰,۱	۰,۰۰۰۲
۰,۱۵	۰,۰۱۲	۰,۱۵	۰,۰۰۳۵
۰,۲	۰,۰۴۶	۰,۲	۰,۰۱۷۵
۰,۲۵	۰,۱۰۸	۰,۲۵	۰,۰۴۹
۰,۳	۰,۱۹۷	۰,۳	۰,۱۰۳
۰,۳۵	۰,۲۹۸	۰,۳۵	۰,۱۷۴
۰,۴	۰,۴۰۶	۰,۴	۰,۲۶
۰,۴۵	۰,۵۰۹	۰,۴۵	۰,۳۴۶
۰,۵	۰,۶۰۳	۰,۵	۰,۴۳۹
۰,۵۵	۰,۶۸۲	۰,۵۵	۰,۵۲۱
۰,۶	۰,۷۵	۰,۶	۰,۵۹۹
۰,۶۵	۰,۸۰۵	۰,۶۵	۰,۶۶۷
۰,۷	۰,۸۴۹	۰,۷	۰,۷۲۶
۰,۷۵	۰,۸۸۴	۰,۷۵	۰,۷۷۶
۰,۸	۰,۹۱۱	۰,۸	۰,۸۱۷
۰,۸۵	۰,۹۳۲	۰,۸۵	۰,۸۵۲
۰,۹	۰,۹۴۸	۰,۹	۰,۸۸۱
۰,۹۵	۰,۹۶	۰,۹۵	۰,۹۰۴
۱	۰,۹۷	۱	۰,۹۲۳

چاه ها با و یا بدون برق پشتیبان

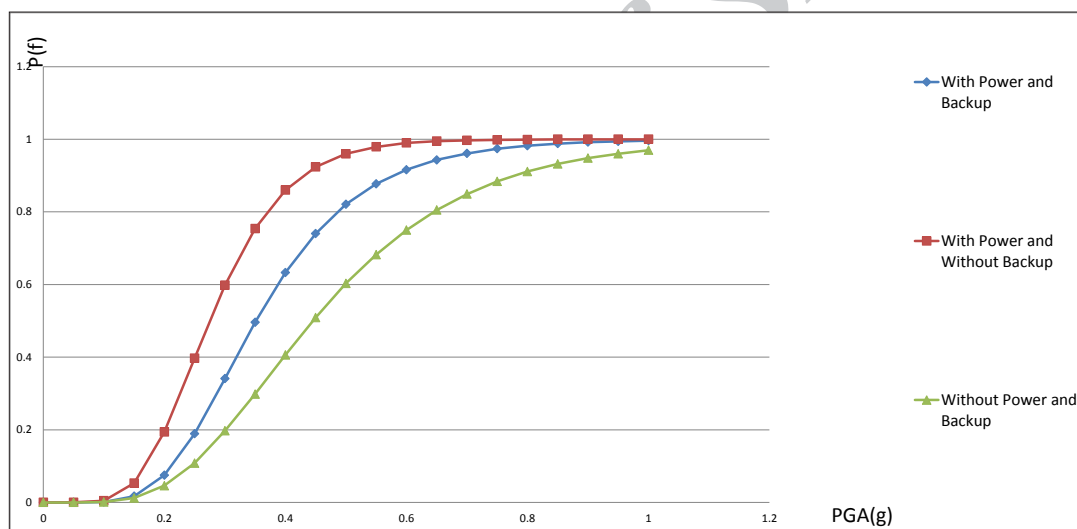
نتایج کلی مربوط به منحنی چاه ها در نمودار ۹ آمده است. در نمودار ۹ مشاهده می شود چاه در حالت وجود اثر برق و عدم وجود اثر سیستم برق پشتیبان خرابی بسیار بیشتری نسبت به دو حالت دیگر (حالت سیستم کامل و حالت نادیده گرفتن اثر برق) دارد که به خوبی اهمیت اثر سیستم برق پشتیبان را نشان می دهد. ذکر این نکته ضروری است که طبق نتایج موجود در هزوس، ریسک یو ای و سایر استانداردهای موجود، وضعیت چاه ها در دو حالت تجهیزات مهارشده و تجهیزات مهارنشده، تفاوت قابل توجهی ندارد.

تصفیه خانه ی جلالیه

در ادامه، با توجه به شبکه ای بودن سیستم آب و برق در منطقه ی ۶ تهران، محاسبات شبکه ای صورت می گیرد. برای این کار، ابتدا لازم است برای هر یک از گره های درون شبکه، درخت خطای دیگری رسم گردد تا در آن وابستگی هر ایستگاه آب به ایستگاه های آب بالادست آن و همچنین پست های برق بالادست آن نمایان گردد. سپس برای هر یک از این نقاط، PGA مربوطه محاسبه گردد و سپس از جدول های بالا، براساس PGA احتمال خرابی محاسبه شود و سپس این اعداد به نرم افزار درخت خطا وارد گشته و تحلیل و محاسبات صورت گیرد. لازم به ذکر است که روند ذکر شده در بالا باید



نمودار ۵: مقایسه‌ی نتایج کلی مربوط به تصفیه‌خانه‌ها در هر سه حالت محاسبه شده و در حالت تجهیزات مهارشده



نمودار ۶: مقایسه‌ی نتایج کلی مربوط به تصفیه‌خانه‌ها در هر سه حالت محاسبه شده و در حالت تجهیزات مهارنشده

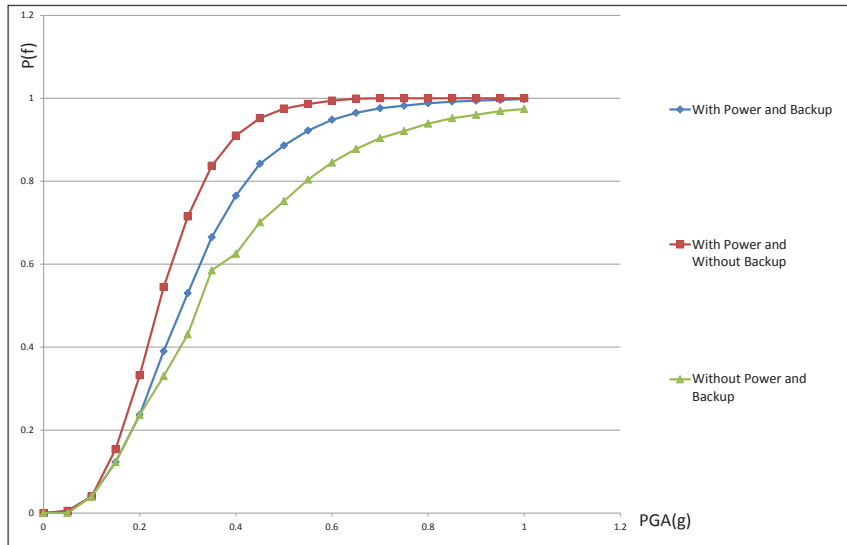
آب می‌گیرد و آب بسیاری از مخازن دیگر منطقه را تهیه می‌کند و به همین دلیل باید پیش از سایر مخازن تحلیل و بررسی گردد. همچنین برق این ایستگاه از ایستگاه برق بوستان لاله تهیه می‌گردد که وارد درخت خطا شده است. احتمال خرابی تصفیه‌خانه‌ی جلالیه برای ۵ سناریوی مختلف ذکر شده در جدول ۲ با توجه به درخت خطای ۱۰ و با به‌کارگیری احتمال خرابی جدول‌های قبل برای دو حالت با در نظر گرفتن اثر برق و بدون در نظر گرفتن آن در جدول ۸ آمده است. همان‌گونه که از جدول ۸ قابل مشاهده است گسل شمال تهران بیشترین اثر را بر تصفیه‌خانه‌ی جلالیه دارد و در صورت در نظر نگرفتن اثر برق تا حدود ۳۰ درصد خطا در محاسبات احتمال خرابی وارد می‌گردد.

برای هر یک از مخازن، نیروگاه‌ها و تصفیه‌خانه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه صورت گیرد. در ادامه احتمال خرابی تصفیه‌خانه‌ی جلالیه مورد بررسی قرار گرفته است.

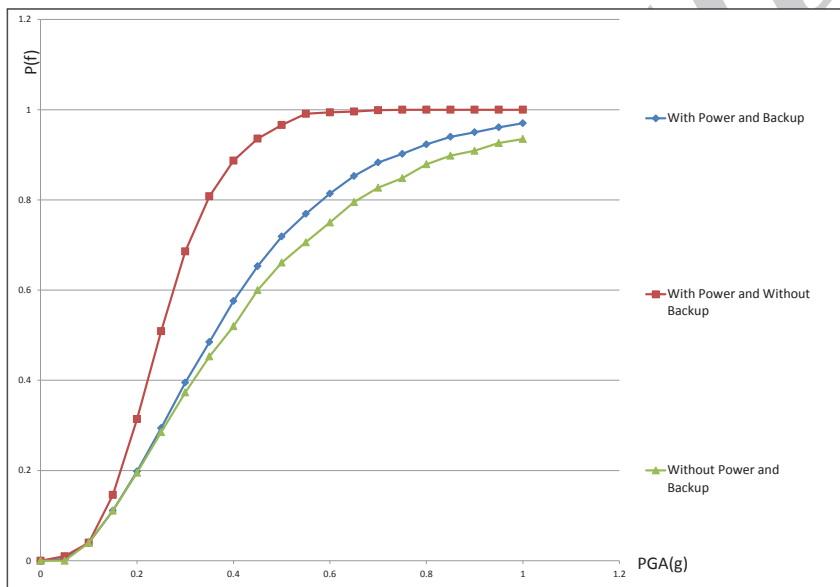
در نمودار ۱۰، درخت خطای وابستگی شبکه‌ای تصفیه‌خانه‌ی جلالیه‌ی تهران آورده شده است.

مطابق نمودار ۱۰، احتمال خرابی تصفیه‌خانه‌ی جلالیه به دریافت آب از سد کرج از یک سو، و دریافت برق از ایستگاه ۶۳ کیلوولت بوستان لاله از سوی دیگر و همچنین عبور آب از خطوط لوله‌ی آب وابسته است.

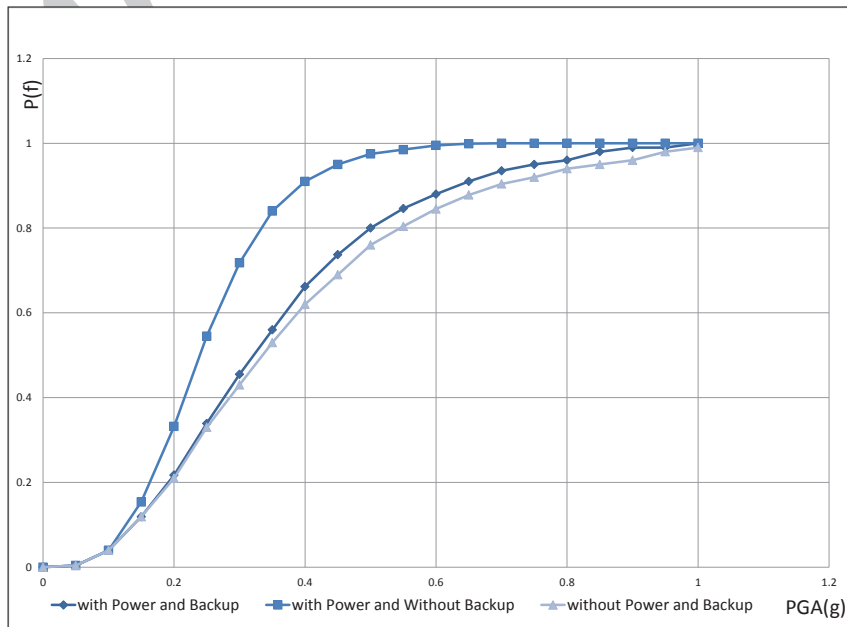
سازه‌ی تصفیه‌خانه‌ی جلالیه هم دارای تجهیزات تصفیه‌خانه، هم پمپ و هم چاه است. این تصفیه‌خانه به‌طور مستقیم از سد کرج



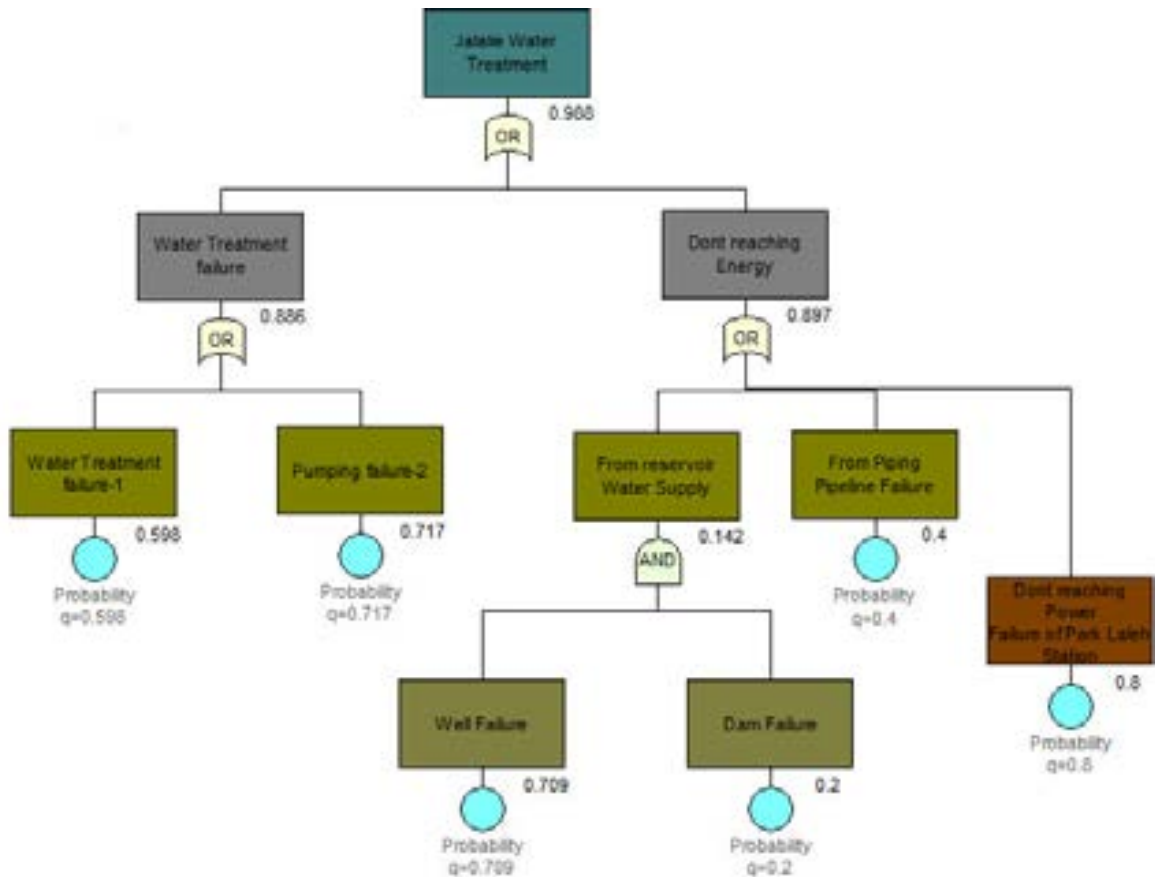
نمودار ۷: مقایسه‌ی نتایج کلی مربوط به پمپ‌ها در هر سه حالت محاسبه شده و در حالت تجهیزات مهارنشده



نمودار ۸: مقایسه‌ی نتایج کلی مربوط به پمپ‌ها در هر سه حالت محاسبه شده و در حالت تجهیزات مهار شده



نمودار ۹: مقایسه‌ی نتایج کلی مربوط به منحنی چاه‌ها در هر سه حالت محاسبه شده



نمودار ۱۰: درخت خطای محاسبات تصفیه‌خانه‌ی جلالیه‌ی تهران با اثر برق

جدول ۸: احتمال خرابی تصفیه‌خانه‌ی جلالیه برای دو حالت با در نظرگرفتن اثر برق و بدون در نظرگرفتن آن

سناریو	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵	سناریوی زلزله تصفیه‌خانه‌ی جلالیه
با اثر برق	۰/۹۹۹	۰/۹۸۸	۱	۰/۹۸۶	۰/۸۰۳	
بدون اثر برق	۰/۸۸۰	۰/۷۴۶	۰/۹۸۶	۰/۷۷۲	۰/۵۶۳	
درصد خطا %	۱۱/۹۱	۲۴/۴۹	۱/۴	۲۱/۷۰	۲۹/۸۹	

نتیجه‌گیری

در این مقاله دلیل و چگونگی وابستگی شریان‌های حیاتی به شبکه‌ی برق بررسی شده و سپس نحوه‌ی مدل‌سازی تجهیزات شبکه‌ی آب در سه حالت با اثر برق و سیستم پشتیبان، با اثر برق و بدون سیستم پشتیبان و بدون اثر برق شرح داده شده است. چنان‌که ذکر شد، حذف اثر برق، عدم قطعیت بزرگی وارد محاسبات خواهد نمود. برای تحلیل دقیق اثر برق باید از منحنی‌های جدیدی که برای تصفیه‌خانه‌ها، پمپ‌ها و چاه‌ها رسم و ارائه شده است با

محاسبه‌ی احتمال خرابی به ازای همه‌ی بازه‌های خطر، استفاده شود. مطابق نتایج، نادیده گرفتن اثر برق در شبکه‌ی آب و با تحلیل اشتباه آن، می‌تواند تا حدود ۳۰ درصد خطا در نتایج به وجود بیاورد. ضمن اینکه در هنگام بررسی اثر برق و سیستم پشتیبان نیز باید از نمودارهایی که ارائه شده استفاده شود تا از دو بار محسوب شدن اثر برق جلوگیری شود. مطابق نمودارها، سیستم در حالت وجود اثر برق و عدم وجود اثر سیستم پشتیبان، خرابی بسیار بیشتری نسبت به دو حالت دیگر دارد.

نتایج تحقیق حاضر نشانگر آن است که شبکه‌ی آب وابستگی زیادی به شبکه‌ی برق دارد و عدم در نظر گرفتن اثر آن در محاسبات باعث عدم قطعیت فراوانی در محاسبات می‌گردد. در این تحقیق، امکان‌سنجی وارد نمودن تکنیک درخت خطا در ارزیابی اثرات اندرکنش شریان‌های حیاتی بررسی شد. مطابق تحلیل‌های صورت گرفته، روش درخت خطا به خوبی در محاسبات احتمال خرابی و منحنی‌های شکنندگی شریان حیاتی آب به صورت مستقل و همچنین محاسبات شبکه‌ای شریان‌های حیاتی آب و برق منطقه‌ی ۶ تهران مفید و مؤثر بود و به‌عنوان یک روش کاملاً قابل اطمینان در بررسی وابستگی بین شریان‌ها و ارزیابی ریسک لرزه‌ای آن‌ها ایفای نقش نموده است. مطابق نتایج به دست آمده مشاهده شد که شبکه‌ی برق نقش بسیار مهمی در ارزیابی احتمال خرابی شبکه‌ی آب بازی می‌کند و وجود آن برای کارآمدی و عملکرد مناسب شبکه‌ی آب بسیار مهم و حیاتی است. همان‌گونه که ذکر شد عدم در نظر

پی‌نوشت

1. Seismic interaction
2. HAZUS
3. Risk-UE
4. Rinaldi
5. Klliy
6. Dudenhoeffler
7. Buhne
8. Exclusive-dependency
9. Requires-dependency
10. Hinders-dependency
11. Vagner & Satyanaraiana
12. Quimpo
13. Yang
14. Doenas Osario
15. Haimes and Jiang
16. Input-Output
17. Fragility Curves
18. Recovery
19. Data centers
20. Dispatchings
21. Gillette
22. Fedora
23. Peerenboom
24. Genetic Algorithm
25. Geraph Theory
26. Markof Chainge
27. Agent-Based Method
28. Backup
29. Peak ground acceleration
30. Peak ground velocity
31. Repair Rate

منابع و مأخذ

1. Balducelli, C., Bologna, S., Di Pietro, A., Vicolo, G. (2005). "Analyzing interdependencies of critical infrastructures using agent discrete eventsimulation." *International Journal of Emergency Management*.
2. Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P., & Kelly, T. K. (2001). "Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies." *Control Systems, IEEE*, 21(6), 11-25.
3. Dudenhoeffler, D. D., Permann, M. R. & Boring, R. L., (2006). Decision consequence in complex environments: Visualizing Decision Impact. *Proceedings of the First Joint Emergency Preparedness and Responses and Robotic and Remote Systems Topical Meeting*, 211-218.
4. Buhne, S. G., and K. Pohl. (2003). Modelling Dependencies between Variations Points in Use Case Diagrams. In *Proceeding of 9th Intl. Workshop on Requirements Engineering - Foundations for Software Quality (REFSQ'03)*, Klagenfurt/Velden, Austria.
5. Satyanarayana, A. and Wood, R. K. (1985). "A linear-time algorithm for computing K-terminal reliability in series-parallel networks." *SIAM Journal of Computing*.
6. Quimpo, Rafael G. and Wu, Sue-Jen (1997). "Condition assessment of water supply infrastructure." *Journal of Infrastructure Systems*, 67-69.
7. Yang, H and Shaoping, S (2003). "Seismic Reliability of Urban Pipeline Network Systems." *Proceedings of the Sixth U.S. Conference and Workshop on Lifeline Earthquake Engineering*, 67-83.
8. Dueñas-Osario, L; Craig, J. I. and Goodno, B. J. (2006). "Interdependent response of networked systems" *Journal of Infrastructure Systems*, 86-103, (In press).
9. Haimes, Y. Y., & Jiang, P. (2001). Leontief-based model of risk in complex interconnected infrastructures. *Journal of Infrastructure systems*, 7(1), 1-12.

گرفتن اثر برق در محاسبات شبکه‌ی آب، گاهی حتی به میزان ۳۰ درصد خطا وارد محاسبات نموده است و به خوبی وابستگی شدید بین این دو شبکه اثبات شد. به عنوان مثال برای تصفیه‌خانه‌ی جلالیه، احتمال خرابی در سناریوی ۵ در حالت در نظر گرفتن اثر برق برابر ۰/۸۰۳ به دست آمده است و طبق نتایج این تحقیق، اثر سیستم برق پشتیبان در شبکه‌ی برق بسیار مهم و قابل توجه است (۲۹/۸۹ درصد تأثیر دارد) و در اثر نصب سیستم پشتیبان در ایستگاه‌ها و ترانسفورماتورهای شبکه‌ی برق احتمال خرابی به مقدار زیادی کمتر می‌شود. به عنوان مثال برای تصفیه‌خانه‌های مهارنشده، برای ماکزیمم شتاب زمین برابر ۰/۵g، احتمال خرابی در حالت با اثر پشتیبان برابر ۰/۴۱ و بدون وجود سیستم برق پشتیبان برابر ۰/۹۱ محاسبه شده است.

با توجه به استفاده از پنج سناریوی مختلف زلزله در این مقاله، اهمیت انتخاب سناریوی زلزله‌ی مناسب به خوبی مشاهده گردیده است. در این تحقیق از روابط کاهندگی زارع، کمپیل - بزرگ‌نیا و سه سناریوی زعفرانی استفاده گردیده است. نتایج حاصل از هر یک از این سناریوها متفاوت با دیگری است و گاهی این اختلاف کاملاً تأثیرگذار است. به ویژه در سناریوهای گسل مشاء و گسل ری که به دلیل فاصله‌ی مکانی آن‌ها از منطقه‌ی مورد مطالعه، نتایج خفیف‌تری را ایجاد نموده‌اند و اثر آن‌ها در منطقه‌ی مورد بررسی قابل مقایسه با سه سناریوی دیگر نیست. براساس مطالعه‌ی صورت گرفته، مهم‌ترین و تأثیرگذارترین گسل برای منطقه‌ی ۶ شهرداری تهران، گسل شمال تهران است. احتمال خرابی تجهیزات شبکه‌ی آب و برق در سناریوهای مرتبط با این گسل، بسیار بالا بوده و در واقع می‌توان گفت که در صورت وقوع یک زلزله‌ی قوی در این گسل، احتمال خرابی شریان‌های حیاتی مورد مطالعه در این تحقیق، چیزی نزدیک به یک خواهد بود.

مطابق نتایج تحلیل، با توجه به احتمال خرابی بالای شبکه‌ی آب منطقه‌ی مورد مطالعه در زلزله‌های احتمالی آینده، اثر وابستگی بین شبکه‌ی آب و برق در مناطقی با شدت لرزه‌ای کم، مقدار بیشتری خواهد داشت و برعکس. دلیل این موضوع آن است که در زلزله‌های با شدت بالا، احتمال خرابی اجزا و تجهیزات شبکه‌ی آب، خود به تنهایی آن قدر بالا است که شبکه‌ی آب به طور کامل کارایی خود را از دست می‌دهد و دیگر نیازی به بررسی اثر اندرکنشی بین شبکه‌ی آب و برق وجود ندارد.

مطابق نتایج حاصل در اثر مهارشدگی تجهیزات شبکه‌ی آب و برق، احتمال خرابی تجهیزات، مقادیری در حدود ۱۰ تا ۲۷ درصد کاهش یافت. همچنین در نتیجه‌ی افزودن سیستم پشتیبان، احتمال خرابی تجهیزات مقادیری در حدود ۵ تا ۳۵ درصد کاهش یافت.

۳۲

شماره دوم
پاییز و زمستان
۱۳۹۱

دوفصلنامه
علمی و پژوهشی



نحوه‌ی محاسبه‌ی اثر برق در تجهیزات شبکه‌ی آب

27. Zafarani, H., Noorzad, A., Ansari, A., & Bargi, K. (2009). Stochastic modeling of Iranian earthquakes and estimation of ground motion for future earthquakes in Greater Tehran. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(4), 722–741.
28. Campbell, K. W. (2006). Campbell–Bozorgnia NGA Empirical Ground Motion Model for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and SA at Selected Spectral Periods Ranging from 0.01–10.0 Seconds (Version 1.1). University of California, Berkeley
29. Zare, M. (2009). Fundamentals of seismic hazard analysis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology.
10. Dueñas–Osorio, L., James I. C and Barry G. G (2006). “Seismic response of critical interdependent networks.” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 119–123.
11. Paul W. Parfomak, (2005), Vulnerability of Concentrated Critical Infrastructure: Background and Policy Options, Specialist in Science and Technology Resources, Science, and Industry Division
12. Adachi, Takao and Ellingwood, Bruce R. (2007b). “Serviceability of earthquake damaged water systems: effects of electrical power availability and power backup systems on system vulnerability”, *Reliability Engineering and System Safety*.
13. Naeimi M, (2010). Application of Fault Tree and Shortest Path Method Algorithm in Studying seismic interaction of lifelines, case study: power and water networks of district no. 6 of Tehran, A Thesis submitted for the degree of Master of Science in Natural Disaster Management, Faculty of Environment, University of Tehran (in Persian).
14. Peerenboom, J., & Fisher, R. (2002). *Energy Infrastructure Vulnerability Surveys and Assessment*
15. Adachi, Takao and Ellingwood, Bruce R. (2007). “Assessment of probabilistic seismic hazard analysis applied to the networked civil infrastructure systems.” Manuscript under review by *Journal of Infrastructure Systems*, American Society of Civil Engineers (ASCE).
16. Sianipar, P. R., & Adams, T. M. (1997). Fault–tree model of bridge element deterioration due to interaction. *Journal of infrastructure systems*, 3(3), 103–110.
17. Ezell, B. C., Farr, J. V., & Wiese, I. (2000). Infrastructure risk analysis model. *Journal of Infrastructure Systems*, 6(3)
18. Ang, A. H.–S.; Pires, J. A. and Villaverde, R. (1996). «A model for the seismic reliability assessment of electric power transmission systems.” *Reliability Engineering and System Safety*, 65–74.
19. Eguchi, R. T. and Honegger, D. G. (2003). “Standard Guidelines to Assess the Seismic Fragility of Water Transmission Systems.” *Proceedings of the Sixth U.S. Conference and Workshop on Lifeline Earthquake Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), 93–98.
20. Pires, J. A.; Ang, A. H.–S. and Villaverde, R. (1996). “Seismic reliability of electrical power transmission systems.” *Nuclear engineering and design*, 23–33.
21. North American Electric Reliability Council (NERC) (2004). *Gas /Electricity Interdependencies and Recommendations*. Princeton, NJ: North American Electric Reliability Council.
22. Fedora, Ph. A. (2004). “Reliability Review of North American Gas /Electric System Interdependency” *Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences*, IEEE, 104–111.
23. Youngsuk K., Bill F. Spencer, Amr S. Elnashai, J. S., (2009) Seismic Performance Assessment of Interdependent Lifeline Systems, *International Journal of Engineering Under Uncertainty: Hazards, Assessment and Mitigation*.
24. Federal Emergency Management Agency (2003). *HAZUS MH MR1 Technical Manual*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency (FEMA).
25. Omidvar, B, Naeimi M, Eskandari M (2010). Interaction Between Lifelines: Challenges & Models, The 3rd national conference on environmental engineering, University of Tehran.
26. Mouroux, P., & Le Brun, B. (2006). RISK–UE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different european towns. In *Assessing and Managing Earthquake Risk* (pp. 479–508). Springer Netherlands