نشریه‌ی علمی-پژوهشی شهر ایمن
JOURNAL OF RESILIENT CITY
(JRC)

تحلیل آسیب پذیری شبکه آبرسانی به روش تئوری گراف

ساره رودباری[۱]، دکتر محمدعلی نکوئی[۲] ، محمد زاهدیان پور[۳] *
۱- فارغ التحصیل پدافندغیرعامل دانشگاه صنعتی مالک اشتر
۲- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر
۳- فارغ التحصیل پدافندغیرعامل دانشگاه صنعتی مالک اشتر

واژگان کلیدی
آسیب پذیری، نظریه واردن، عملکرد شبکه آبرسانی، تئوری گراف.

چکیده
شبکه آبرسانی از جمله شریان های حیاتی هر جامعه و کشوری محسوب می شود و همواره در جنگ ها به عنوان هدفی مناسب قرار می گیرد. در تئوری واردن تاسیسات آبرسانی به عنوان محصولات کلیدی در حلقه دوم این تئوری قرار می گیرد. بنابراین ادامه عملکرد درست تاسیسات آب برای هر کشور و جامعه ای امری حیاتی محسوب می گردد. با تجه به اهمیت این موضوع مدل های مختلفی برای ارزیابی آسیب پذیری این شبکه بکار گرفته شده است. روش گراف از جمله متدها ریاضی است که در محاسبه قابلیت اطمینان شبکه آب هنگام مواجه با بحران ها جوامع را یاری می دهد. هدف این پژوهش تحلیل آسیب پذیری شبکه با استفاده از تئوری گراف است. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار گفی، پارامترهای مختلف تئوری گراف ارزیابی و تحلیل شد. پارامترهایی همچون مرکزیت، درجه گره و ضریب خوشه بندی که از پارامترهای مهم در تئوری گراف هستند برای شبکه آبرسانی منتخبی از شهرستان تهران به عنوان مطالعه موردی انتخاب و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتیجه برداشت شده از این پژوهش به این صورت بود که مرکزیت و درجه گره ارتباط مستقیمی با آسیب پذیری شبکه آب دارند. به این معنی که با افزایش مرکزیت و درجه گره در یک، شبکه میزان آسیب پذیری آن افزایش خواهد یافت. همچنین ضریب خوشه بندی ارتباط معکوسی با میزان آسیب پذیری در شبکه را دارد و با افزایش ضریب خوشه بندی میزان آسیب پذیری شبکه کاهش می یابد.

۱- مقدمه

زیرساخت های حیاتی شریان هایی هستند که برای بقا و ادامه عملکرد جامعه مورد نیاز هستند[۱] که از جمله این زیرساخت ها زیرساخت آب، برق و گاز و مخابرات می توان اشاره کرد. [۲] سیستم آب‌رسانی شبکه‌ای بهم پیوسته و پیچیده است که نیازمند برنامه‌ریزی و نگه‌داری است تا از کیفیت آب و جریان آن برای رساندن به همه مشتریان اطمینان حاصل شود. این سیستم متشکل از لوله‌ها، دریچه‌ها، پمپ‌ها، مخازن ذخیره، مخزن‌های آب و چاه‌های آب زیرزمینی می‌باشد. اگرچه تحقیقات قابل-توجهی بر روی تعیین قابلیت اطمینان شبکه‌های آب‌رسانی انجام‌شده است، اما کاربردهای آن در دنیای واقعی محدود است[۳و۲۴]. زیرساخت آب از جمله حیاتی ترین زیرساخت ها برای بقا و ادامه جوامع بشری هستند[۴] و به منظور تحلیل آسیب پذیری این زیرساخت باید اندرکنش بین زیرساخت با سایرزیرساخت ها و همچنین اندرکنش آن با محیط پیرامونی نیز توجه داشت [۵و۱۵]. دارایی های زیرساخت شبکه آب به حدی زیاد است که امکان محافظت از تمامی آنها میسر نیست بنابراین باید با استخراج نقاط حساس بودجه بیشتری به منظور حفاظت از آن اختصاص داد[۴و۶].

نظارت مستمر بر سیستم آبرسانی باعث کاهش آسیب و بالارفتن سرعت ترمیم و بازسازی در شبکه و همچنین تشخیص به موقع خرابی در آن می شود و از طرفی این امر باعث پیدا کردن نقطه بحرانی و رفع آن می گردد[۷]. امنیت آب معانی مختلفی دارد ولی در کل به معنی تامین آب به مقدار مطلوب برای افراد جامعه است. در سال ۲۰۰۰ انجمن جهانی آب تعریف امنیت آب را بیشتر دسترسی به آب، قیمت و نیازهای انسان در نظر گرفتند [۲۵].

به منظور حفظ عملکرد و امنیت آب در این زیرساخت پارتیشن-بندی شبکه آب می‌تواند در مدرنیزه کردن مدیریت سیستم تأمین آب بخصوص برای دستیابی به تعادل آب، بکار بردن فنون کنترل فشار و محافظت کاربران از حملات مخرب کمک کند.

* تهران دانشگاه صنعتی مالک اشتر دانشکده آمایش و پدافند غیرعامل رایانامه ali.nekooie@gmail.com

پارتیشن‌بندی شبکه آب را می‌توان از طریق تعریف کردن حوزه-های دائمی ایجاد کرد. از طریق قرار دادن دریچه‌های مرزی (یا برش لوله‌های موجود) و کنتور برای ایجاد زیرسیستم جهت تسهیل تعادل آب و شناسایی از دست رفتن آب یا از طریق منطقه بندی شبکه آب با استفاده از میزان فشار آب درون لوله *PDA* یا بر اساس میزان تقاضا برای آب *DDA* این امر میسر می‌شود. ازآنجایی‌که سیستم‌های آب‌رسانی پیچیده و دارای مقیاس بزرگی هستند و معمولاً در حملات انسان‌ساخت می-توانند اهداف مناسبی برای حمله باشند درنتیجه باید تدابیری اندیشید تا بتوان مدل‌ها و راهکارهایی را برای کاهش آسیب آن ایجاد کرد. بسیاری از نرم‌افزارها مانند GEM'S *&water* EPANET قابلیت نمایش نقشه آب را دارند بنابراین می‌توان از این قبیل نرم‌افزارها برای شبیه‌سازی هیدرولیک سیستم آب‌رسانی به‌منظور مدیریت هرچه بهتر این سیستم‌ها استفاده کرد اما از طرفی این نرم‌افزارها قابلیت پردازش را ندارند.

ازآنجایی‌که هدف در این پژوهش ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه آب‌رسانی و رسیدن به مدلی است که بتوان آسیب‌پذیری شبکه را تا حد بسیار زیادی کاهش داد، در این راستا سؤالاتی از قبیل اینکه چه آسیب‌ها و خطراتی زیرساخت‌ها را تهدید می‌کند؟ گام-های تدوین چارچوب ارزیابی آسیب‌پذیری چیست؟ معیارها و روش‌های آنالیز جذابیت زیرساخت‌ها کدام‌اند؟ برای جلوگیری از آسیب‌پذیری شبکه آب چه راهکارهایی را می‌توان در پیش گرفت؟ و اینکه درنهایت از چه مدل‌هایی می‌توان برای ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه آب بهره جست؟ در ذهن مطرح می‌شود که باید به آن‌ها پاسخ داد. برای رسیدن به پاسخ این سؤالات فرض می شود که علیه اجزای شبکه‌های آب‌رسانی تهدیدات مختلفی وجود دارد و کاهش آسیب‌پذیری در یک شبکه را می‌توان مدل سازی کرد. امروزه تئوری گراف در شاخه های مختلف علوم کاربرد پیدا کرده است. با استفاده از تئوری گراف در تحلیل شبکه آب می توان رابطه بین اجزای مختلف سیستم و ارتباط بین آنها را نشان داد. و در این پژوهش با استفاده از نرم افزار گفی پارامترهای تئوری گراف را مدل کرده و ارتباط بین آنها را در جهت آسیب پذیری شبکه تعیین می گردد.

اجزای شبکه آب‌رسانی عبارت‌اند از منابع آب، خطوط انتقال، تصفیه‌خانه، شبکه توزیع و مخازن که هرکدام از این مؤلفه‌ها زیرمولفه هایی بسیاری دارند اما عمده بحث اینجا بر روی اجزای اصلی شبکه آب‌رسانی می‌باشد. در تعریف ریاضی گراف شبکه مجموعه‌ای از گره‌هاست که از طریق لینک‌هایی به یکدیگر اتصال داده می‌شوند و به‌این‌ترتیب خوشه‌هایی را تشکیل می‌دهند. هر شبکه گراف دارای یکسری معیارها از قبیل ضریب خوشه‌بندی، میانگین طول مسیر، مرکزیت و غیره می‌باشد. در این پژوهش مؤلفه‌های اصلی شبکه آب‌رسانی یعنی منابع، تصفیه‌خانه و ... را به‌عنوان گره در نظر گرفته خواهد شد و خطوط انتقال و توزیع را به‌عنوان لینک‌های اتصال‌دهنده بین این گره‌ها به‌حساب می آید. درنهایت شبکه آب‌رسانی به‌صورت شبکه گراف ترسیم خواهد شد. دارایی های یک زیرساخت به دو دسته دارایی های حیاتی و غیرحیاتس تقسیم می شوند. دارایی های حیاتی در صورت صدمه و نابودی تاثیر بسیار مهمی بر زیرساخت دارند[۹]. حال در بین این دارایی‌ها بعضی از این مؤلفه‌ها هستند که از اهمیت ویژه‌تری نسبت به بقیه دارایی‌ها برخوردارند و در این جهت باید منابع بیشتری را در جهت مقاوم‌سازی و کاهش آسیب آن اختصاص داد. مثلاً مخازن ذخیره آب از جمله مهمترین اجزای شبکه آبرسانی هستند که آب انتقالی از تصفیه خانه را در خود جای می دهند و به این دلیل برای اهداف تروریستی و نظامی بسیار مناسب هستند[۱۰]. مثال دیگری که می توان بیان کرد تصفیه خانه ها هستند. تصفیه‌خانه از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود چراکه عمل تصفیه آب در این گره صورت می‌گیرد و نبود آن می‌تواند هزینه‌های بالایی را ایجاد کند. اجزای شبکه آب‌رسانی معمولاً در فواصل دور از یکدیگر قرار دارند که این امر می‌تواند نقطه قوتی محسوب شود چراکه در صورت حمله اگر اجزای این شبکه به یکدیگر نزدیک‌تر باشد دشمن با صرف هزینه پایین‌تری می‌تواند خسارت‌های بیشتری را برای ما ایجاد کند. عامل دیگر اینکه بعضی از این مؤلفه‌ها مانند مخازن نیز در بعضی مکان‌ها در زیرزمین احداث می‌شوند و این امر نیز موجب بهبود و قوت شبکه باشد چراکه میزان شناسایی آن به‌شدت کاهش‌یافته و درنتیجه احتمال حمله به آن کاهش می‌یابد. با همه این تفاسیر شبکه آب‌رسانی ضعف‌هایی نیز دارد. مثلاً این شبکه در برابر حملات بسیار آسیب‌پذیر است و در صورت موردحمله قرار گرفتن یکی از زیرساخت‌های اصلی کشور منهدم شده و می‌تواند بیش‌ازپیش بر وخامت اوضاع بیفزاید. تهدیدات انسان‌ساخت و طبیعی مختلفی متوجه شبکه آب است که می‌تواند برآن اثرگذار باشد. تهدیدات طبیعی مانند سیل، زلزله، طوفان و .. که عامل طبیعی منجر به آن شده است و انسان در پیش آمدن آن دخالتی ندارد. تهدیدات انسانی تهدیداتی هستند که عامل انسانی باعث به وجود آمدن آن‌ها می‌شود و ازجمله این تهدیدات می‌تواند به حملات زیستی، نظامی و یا فیزیکی اشاره کرد. حال که به اهمیت شبکه آب‌رسانی پرداخته شد، ضرورت تحلیل شبکه برای آنالیز آسیب‌پذیری در این شبکه احساس می‌گردد.

۱. ۲- مرور مطالعات

فوستر[۲] و مک‌دونالد[۳] در سال ۲۰۰۰ در مطالعه خود، ارزیابی

[۲] Foster

[۳] McDonald

ریسک آلودگی در منابع تأمین آب را با استفاده از سیستم‌های اطلاعاتی جغرافیایی (GIS) انجام دادند. ظرفیت ذاتی سیستم-های اطلاعات جغرافیایی (GIS) در ذخیره‌سازی، آنالیز و نمایش داده‌های فضایی آن را به ابزاری ایده آل برای کمک به ارزیابی-های ریسک تبدیل کرده است. آنان با استفاده از این مقاله کاربردهای بالقوه GIS را در مدیریت و ارزیابی ریسک منابع مصرف عمومی آب را نشان دادند که با استفاده از این نرم‌افزار مناطق بالقوه خطرپذیر شناسایی شدند[۱۱].

لی گات[۴] و ایزنبیس[۵] در سال ۲۰۰۰ به‌منظور آنالیز ریسک شکست در لوله‌های آب، مدل‌های آماری را بکار بردند. این روش آنالیز بقا روشی است که برای مطالعات اپیدمیولوژیک بکار می-رود. این پژوهش مدل وایبل را برای پیش‌بینی شکست با استفاده از سوابق تعمیر و نگهداری لوله‌های شبکه آب مورداستفاده قرارداد. نتایج نشان داد که عوامل کمی بدون در نظر گرفتن عوامل محیطی برای تشخیص لوله‌ها با بالاترین خطر شکست بکار می‌رود. آن‌ها بیان کردند که داده‌های دوره کوتاه‌تر را در نظر داشته‌اند تا به عدد پیش‌بینی جهانی نزدیک‌تر و با توجه به عوامل محیطی دقت در پیش‌بینی را بهبود بخشد[۱۲].

باویک[۶] و کیجر[۷] در سال ۲۰۰۲ با رویکردی داده‌کاوی به مدل-سازی دارایی‌های آب پرداختند و مدلی را مدنظر داشتند بر این مبنا بود که ارزیابی ریسک انفجار لوله باید باهدف دستیابی به مدل‌سازی و مدیریت تمام دارایی‌های شبکه آب شهر در چارچوبی وسیع کامل شود. آنان دریافتند هر عاملی که بر مکانیسم‌های رفتاری و شیمیایی لوله‌ها اثر بگذارد می‌تواند بر انفجار یا قطع لوله نیز اثر داشته باشد. کار آن‌ها باهدف توسعه رویکرد کلی به مدل‌سازی دارایی‌ها بود و به‌منظور تست مفید بودن این رویکرد، به‌صورت موردی در جهان واقعی پیاده‌سازی و در سیستم انتقال آب کپنهاگ مورد آزمایش قرار گرفت. آنان نتیجه گرفتند که از دیدگاه فصول ترکیدن‌های پی‌درپی لوله‌ها بیشتر در فصل زمستان رخ می‌دهد و احتمال خسارت بالاتری دارند[۱۳].

میکادؤ آپوستلاکیس[۹] در سال ۲۰۰۶ روشی را برای رتبه‌بندی عناصر شبکه آب‌رسانی از منظر آسیب‌پذیری ارائه دادند و بیان داشتند که برای رسیدن به هدف ارزیابی ریسک باید به سؤالاتی از قبیل چه اشتباهی می‌تواند رخ دهد؟ چه پیامدهایی دارد؟ و چه میزان محتمل است؟ بتوان پاسخ داد. پیامد یا حالت‌های پایانی معمولاً با سلامت و ایمنی مردم مرتبط است، اگرچه دیگر حالت‌های پایانی مانند پیامدهای اقتصادی را نیز می‌تواند شامل شود. آنان معتقد بودند که نقطه شروع تجزیه‌وتحلیل، شناسایی دارایی‌های زیرساخت موردنظر می‌باشد و دریافتند که برای تحلیل جامع آسیب‌پذیری ظرفیت عناصر سیستم باید در نظر گرفته شود. گام عمده در جهت این ارزیابی آسیب‌پذیری جامع ارزیابی کل سیستم است. آنان نشان دادند که محدود کردن غربالگری آسیب‌پذیری با رویکرد همه‌یاهیچ (برای مثال با استفاده از رویکرد مجموعه برشی حداقل یا منطق دودویی) منجر به برآورد کمتر آسیب‌پذیری سیستم است. یک‌راه ممکن برای برداشتن گام واقعی نزدیک به رفتار سیستم ایجاد مدل هیدرولیکی شبکه و اجرای آن برای سناریوهاست[۱۴].

پینتو[۱۰] و بنتس[۱۱] در مقاله خود تحت عنوان تئوری آسیب‌پذیری لوله‌های شبکه آب در سال ۲۰۱۰ بیان کردند که مدل‌ها و ابزارهای ریاضی مدرن یکی از ابزارهای ارزشمند است که می‌تواند به ارائه‌دهندگان خدمات آب شهری و سازمان‌های دولتی در سیاست مدیریت عرضه منابع آب در مناطق شهری کیفیت عرضه آب را در نظر داشته باشند. هدف اصلی از مطالعات آسیب‌پذیری، شناسایی نقاط آسیب‌پذیر از یک سازه بر اساس تحلیل شکل ساختاری و میزان اتصال آن است. مفهوم آسیب‌پذیری در ارتباط با پیامدهای شکست علل اولیه خسارات می‌باشد. یک سازه زمانی که آسیب کوچکی منجر به عواقب شکست بزرگی شود آسیب-پذیر است، اقدامی که می‌تواند موجب این خسارت شود می‌تواند از هر نوع ازجمله خطای انسانی و یا حتی یک اقدام خرابکارانه باشد[۱۵].

هررا و کارازاوگلو[۱۲] در سال ۲۰۱۰ در مقاله‌ای با عنوان رویکرد خوشه‌بندی شبکه آب‌رسانی به‌واسطه یادگیری نیمه‌متمرکز بیان داشتند که تقسیم‌بندی شبکه به نواحی اندازه‌گیری منطقه‌ای (DMA) از راهبرد تفرقه بینداز و حکومت کن پیروی می‌کند که تجزیه شبکه توزیع بااتصال بسیار زیاد به شبکه‌های کوچک‌تر را در پی دارد. این شبکه‌های کوچک مستقل بوده و بر اساس تعداد منابع پیشرو تغذیه می‌کنند. آن‌ها بیان کردند که برای رسیدن به توزیع شبکه مناسب، در نظر گرفتن ویژگی‌های طرح

---

۴ Le Gat

۵ Eisenbeis

۶ Babovic

۷ keijzer

۸ Michaud

۹ Apostolakis

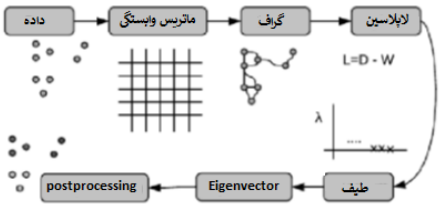
۱۰ Pinto

۱۱ Bentes

۱۲ Karatzoglou

و ابعاد نواحی هیدرولیک مفید است و ازآنجایی‌که این بخش-بندی، شبکه آب‌رسانی را تفکیک می‌کند، شبیه‌سازی مدل‌های ریاضی با *EPANET* توسط رزمن یا هر ابزار آنالیز هیدرولیکی دیگر، نیازمند به دست آوردن طراحی خوب و معتبر قابل‌مقایسه با اهداف شبکه اصلی می‌باشد.

هم‌چنین بیان کردند که در طراحی مسیر عبور نقاط کنترل و در نظر گرفتن جایگزین‌ها برای جلوگیری از چنین احتمالات قطع آب ضروری است. آن‌ها برای تشکیل ماتریس کرنل بیان داشتند که شبکه آب‌رسانی باید به‌عنوان یک گراف ویژه در سیستم اطلاعات جغرافیایی بصورت گره ها و اتصالات در نظر گرفته شود. با ایجاد ماتریس وابستگی مرتبط با شبکه آب‌رسانی و تعیین پیوندهای گراف (لوله‌های شبکه انتقال آب) که وزن آن‌ها قطر این لوله‌ها باشد. با استفاده از این اطلاعات یک ماتریس وابستگی از گراف تعدیل‌شده در شبکه آب‌رسانی را می‌توان به دست آورد. درنهایت با استفاده از روش خوشه‌بندی گراف طیفی الگوریتمی را پیشنهاد کردند. شکل ۱- فرآیند خوشه بندی طیفی را بصورت شماتیک نشان می دهد.



شکل ۱- فرآیند خوشه‌بندی طیفی[۱۶]

آنان شبکه آب‌رسانی نواحی مرکزی *Celaya* را موردمطالعه قراردادند که به‌وسیله یک مخزن *(D1)* و ۵ تانک *(E1, … E5)* , و با ۵ ایستگاه پمپاژ تغذیه می‌شد. این شبکه از ۴۷۹ خطوط و ۳۳۳ گره مصرف تشکیل یافته است. طول کل لوله‌ها ۴۲,۵ کیلومتر و میانگین بلندی گره‌ها ۱۵۶ متر است. میزان جریان مصرفی کل ۹۱ *L/S* است. *DMA* ها از شبکه آب‌رسانی به‌عنوان نقطه آغاز برای اجرای الگوریتم پیشنهادی در نظر گرفته شد و دریافتند با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده قطر لوله و سن آن‌ها ازجمله شاخص‌های مهم آسیب‌پذیری در شبکه آب‌رسانی است. در مقایسه با روش‌های دیگر که فقط با استفاده از اطلاعات گرافیکی و یا برداری بود، روش خوشه‌بندی نیمه‌متمرکز راهی کارآمدتر و قوی‌تری برای این امر می‌باشد[۱۶].

رحمتی در پایان‌نامه خود شبکه توزیع آب را به روش تئوری گراف آنالیز و دسته بندی نمود. ایشان اظهار داشتند که شبکه آب‌رسانی به دلیل گستردگی بیش‌ازحدی که دارد باید آن را به زیرشاخه های کوچکتری تقسیم بندی نمود تا آنالیز آسیب-پذیری نتایج واقعی و ملموس تری را به دست بدهد و به این منظور او از الگوریتم *k-mean* به‌منظور خوشه بندی شبکه آب‌رسانی و با استفاده از روش شبیه سازی چندعاملی به شبیه سازی شبکه آب پرداخت. نقاط بحرانی شبکه را استخراج و در آخر راهکارهایی برای کاهش آسیب‌پذیری ارائه نمود[۱۷].

روزبهانی و تابش در پژوهش خود با نام ادغام ارزیابی ریسک سیستم های آب‌رسانی شهری از منبع تا شیر چارچوبی را برای ارزیابی ریسک این زیرساخت ارائه دادند، سپس با استفاده از مدل فازی در ۱۱ گام به ارزیابی آسیب‌پذیری و ریسک مؤلفه‌های مختلف شبکه آب‌رسانی شهر ارومیه پرداختند [۱۰].

محمد کارآموز و همکارانش در مقاله ای با عنوان ارزیابی آسیب پذیری و کاهش ریسک سیستم های تأمین آب ضمن بیان مخاطرات و تهدیدات در حوزه آب‌رسانی به ارزیابی ریسک آسیب پذیری این سیستم با استفاده از شدت حمله، پیامدهای ممکن و میزان احتمال آن پرداختند و الگوریتمی را برای توسعه سیستم آب‌رسانی پیشنهاد کردند. آنان یک مخزن بزرگ انتقال آب در یک شهرستان بزرگ انتخاب را انتخاب کردند. و معیارهایی با عنوان توزیع، مجزا بودن (حوزه حجم فیزیکی)، قابل‌رؤیت بودن، در معرض قرار گرفتن و بازیابی در نظر گرفتند. در ۴ سطح ارزیابی کیفی، مؤلفه‌ها به‌صورت پایین، متوسط، زیاد و خیلی زیاد نشانه‌گذاری کردند. دریافتند که هزینه‌های سد قابل‌ملاحظه‌اند و برنامه‌های عملیاتی نیازمند به کاهش آسیب‌پذیری در سد است. استراتژی‌های کاهش ریسک برای مخزن شامل افزایش مقاومت سازه‌ها، بهبود سیستم های هشدار دهی و محدود ساختن جاده های دسترسی به سد می‌باشد [۱۸].

دی ناردو[۱۳] و دی ناتالی[۱۴] در سال ۲۰۱۴ در پژوهش خود با عنوان نرم‌افزاری برای پارتیشن‌بندی خودکار شبکه آب (*SWANP*) بیان کردند که پارتیشن‌بندی شبکه آب *(WNP)* نشان‌دهنده کاربرد الگوی تفرقه بینداز و حکومت کن به شبکه‌های آب هوشمند *(SWAN)* می‌باشد که اجازه می‌دهد تا کاربرد فنون برای کنترل فشار و تعادل آب و حفاظت از آلودگی بهبود یابد. این فنون می‌تواند با اثربخشی بیشتر در تعریف کردن اجزای شبکه دائم کوچک‌تر بکار رود که ناحیه سنجش منطقه *(DMA)* نامیده می‌شود *(District Meter Area)* که از طریق الحاق دروازه دریچه و کنتور به دست می‌آید. این نرم‌افزار نشان‌دهنده بهترین نتایج در مقایسه با فنون مختلف بر روی مطالعه موردی واقعی می‌باشد. درنهایت دریافتند که نرم‌افزار *SWANP* ابزار مؤثری برای اپراتورها و صنایع آب جهت به دست آوردن طرح‌های پارتیشن‌بندی شبکه آب را فراهم می‌کند و حالت خودکار آن به‌صورت خودکار بهترین نتایج حداقل سازی

[۱۳] Di Nardo

[۱۴] Di Natale

تعداد کنتورها را در مقایسه با سطح خدماتی شبکه آب را ممکن نمود[۱۹].

یزدانی با استفاده از معیارهای طیفی و آماری به بررسی آسیب‌پذیری شبکه آب‌رسانی پرداخت. در سال ۲۰۱۰ در مقاله‌ای با عنوان نکته‌ای برای اندازه‌گیری آسیب‌پذیری‌های شبکه تحت حملات تصادفی و عمدی، به بحث پیرامون تابع آسیب‌پذیری به‌وسیله کریادو پرداخته است. وی در این مقاله با بررسی گراف‌هایی با ساختارها و سایزهای مختلف، نشان داد رابطه مذکور که تابعی نمایی از تعداد رئوس و یال‌ها و انحراف استاندارد توزیع درجه است، برای نمایش آسیب‌پذیری گراف‌های متفاوت، قابل‌اطمینان نیست. درنهایت روشی جایگزین جهت ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه توزیع آب تحت حملات تصادفی و عمدی ارائه می‌دهد و بیان می‌کند، با استفاده از اندازه‌گیری طیفی و آماری ارزیابی مقاومت شبکه متضاد با آسیب‌پذیری شبکه‌های پیچیده، در نظر گرفته می‌شود و معیارهای طیفی و آماری با در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف از توپولوژیک شبکه، ارزیابی کاملی از آسیب‌پذیری شبکه را ارائه می‌دهند[۲۰]. با توجه به مطالعات فوق می توان نتیجه گرفت که تئوری گراف روشی مناسب به منظور ارزیابی شبکه های آبرسانی است با استفاده از نرم افزارهای مختلفی می توان نتایج تحلیل این روش را به منظور درک بهتر ساختار شبکه آبرسانی مدل سازی نمود. از جمله نوآوری های این تحقیق ارائه مدلسازی آسیب پذیری شبکه آبرسانی با استفاده از نرم افزار گفی است.

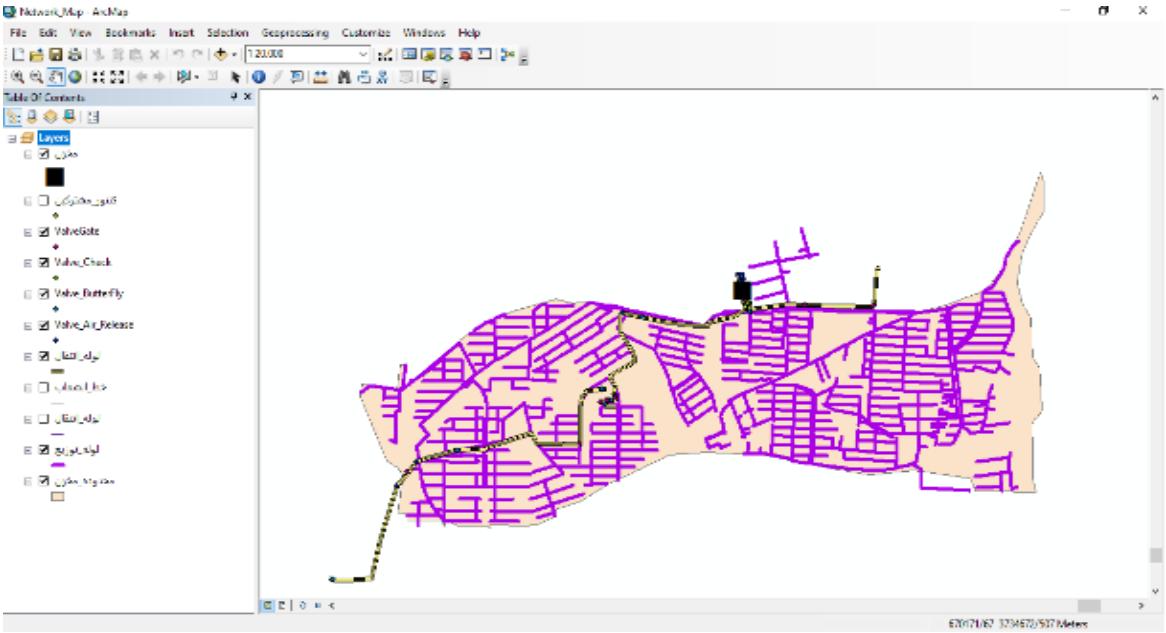
شاخص های تئوری گراف که به منظور تحلیل در مقاله منتخب گردیده، مرکزیت، درجه گره و ضریب خوشه بندی است چرا که مرکزیت گره معیاری است که با آن میزان اهمیت گره ها تعیین می شود در شبکه آبرسانی نیز تعیین گره ها با اهمیت بیشتر در اولویت است لذا به منظور گره ها با درجه اهمیت بیشتر از این شاخص استفاده گردید. خوشه بندی نیز به منظور دسته بندی اطلاعات و گره ها نقش مفیدی در شبکه آب می تواند ایفا کند و در نهایت درجه گره نیز تعداد ورودی و خروجی هر گره را تعییت می کند و در تعیین ارتباط بین گره ها نقش به سزایی دارد.

پدافند غیرعامل به دنبال کاهش آسیب در نتیجه وقوع تهدیدات در زیرساخت ها و شریان های حیاتی است که از جمله این زیرساخت و می توان گفت از مهمترین این زیرساخت ها شبکه آبرسانی در هر کشور و جامعه است. با استفاده از این سه شاخص منتخب که هر کدام اهمیت، درجه بندی و دسته بندی گره ها و دارایی های شبکه اب را ارائه می دهد می توان گره های مهم و حیاتی را شناسایی نمود و با صرف هزینه و بودجه بیشتر احتمال آسیب آنها را کاهش داد. لازم به ذکر است که با استفاده از این روش و نرم افزار میزان آسیب پذیری شبکه در برابر تهدیدات نظامی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. ۳- مواد و روش

به‌منظور انجام ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه برحسب تئوری گراف و تحلیل شبکه نیاز است که داده‌های *GIS* یک منطقه را داشته و تحلیل‌های گراف را روی آن پیاده کرد. در شبکه آب‌رسانی این لایه‌های *GIS* حاوی منابع آب، خطوط انتقال، تصفیه‌خانه، شیرآلات و خطوط توزیع و درنهایت مخازن است. در این لایه‌ها منابع آب، مخازن، ایستگاه‌های پمپاژ و تصفیه‌خانه به‌صورت نقطه یا *POINT* نشان داده می‌شوند و خطوط انتقال و خطوط توزیع به‌صورت لبه یا *LINK* می‌باشند. با داشتن این لایه‌ها و اضافه کردن آن‌ها در یک محیط *GIS* مجموعه‌ای از نقاط و لینک‌ها را ارائه خواهد شد. بعدازآن با واردکردن آن به دیتابیس می توان همه آن‌ها را به‌صورت یک‌لایه جامع متشکل از گره و لینک درآورد که مجموع آن‌ها شبکه گراف را تشکیل می‌دهند. پس‌ازآن با انجام محاسبات ریاضی و به دست آوردن معیارهای مشخص گراف میزان آسیب‌پذیری هر گره و یا لینک را در کل شبکه تعیین می شود.

در خصوص مطالعه موردی منطقه ای از شهر تهران را در نظر گرفته که دارای لایه‌هایی با عناوین خطوط انتقال، مخزن، محدوده مخزن، لوله‌های توزیع و شیرآلات می‌باشد. شکل ۲ مربوط به محدوده مخزن موجود در شبکه آب‌رسانی فرضی می‌باشد.



شکل ۲- نمای کلی شبکه آب‌رسانی محدوده موردمطالعه

۳-۱- نرم‌افزار ARC GIS

سیستم‌های اطلاعاتی جغرافیایی ابزاری مفید و سودمند برای آنالیزهای آماری و فضایی در مدیریت منابع آب است. بنابراین روش‌های مبتنی بر آنالیزهای چندمعیاره فضایی در محیط *GIS* برای مدیریت منابع آب شهری توسعه داده‌شده‌اند[۲۱]. نقشه-های سیستم معمولاً اسناد مفیدی برای به دست آوردن یک درک کلی از سیستم توزیع آب ارائه می‌دهند چراکه این نقشه‌ها حاوی طیف گسترده‌ای از ویژگی‌های ارزشمند سیستم است. این نقشه-ها می‌تواند شامل اطلاعاتی به شرح زیر باشند:

- هم‌ترازی لوله، اتصال، مواد، قطر و غیره
- مکان دیگر مؤلفه‌های سیستم، ازجمله مخازن و شیرها
- مرزهای منطقه فشار
- ارتفاع
- یادداشت‌ها و ویژگی‌ها برای مخازن
- اطلاعات زمینه‌ای از قبلی مکان جاده‌ها، رودخانه‌ها و برنامه‌ریزی برای آن‌ها
- آب و برق [۲۲]

در این مقاله با استفاده از نرم افزار *GIS* از لایه های اطلاعاتی موجود خروجی اکسل گرفته شده و با نوشتن برنامه درنهایت دوباره داده های اکسل را وارد این نرم افزار کرده و سپس نقشه های آسیب پذیری شبکه تولید شد.

۳-۲- ادبیات شبکه

گام بعدی ساخت ادبیات شبکه برای انجام آنالیزهای آن می‌باشد. به این منظور نیاز است که با اطلاعاتی که وارد نرم‌افزار *GIS* شده بتوان ادبیات شبکه را در *GIS* شکل داد لذا نیاز به برنامه‌ای است که از یک الگوریتم پیروی کرده و سپس گره‌ها و لینک‌ها را مورد شناسایی قرار داده و بر این اساس مشخصات گره‌ها و لینک‌ها را به‌صورت جداگانه برحسب *ID* دارایی‌ها، *Target*، *Source* با فرمت اکسل به دست بدهد. به این ترتیب دو جدول اکسل حاصل می شود که شامل مشخصات توصیفی گره‌ها و لینک‌ها خواهد بود که درنهایت باید بتوان آن‌ها را وارد نرم‌افزار گفی *(Gephi)*کرده و سپس توپولوژی شبکه را ایجاد و براین مبنا معیارهای کل شبکه را محاسبه کرد.

۳-۳- زبان برنامه‌نویسی C#

سی شارپ *(C#)* یک زبان برنامه‌نویسی شیءگرا است که توسط شرکت مایکروسافت ساخته‌شده و ترکیبی از قابلیت‌های خوب *C++* و *JAVA* است. با استفاده از این زبان، برنامه مورد نیاز برای آنالیز آسیب پذیری شبکه را نوشته و وارد نرم افزار *GIS* شد.

۳-۴- نرم‌افزار گفی (Gephi)

گفی ابزاری قدرتمند برای آنالیز شبکه است که ابزارهای زیادی برای آنالیزهای آماری شبکه داده است. نرم‌افزاری برای کاوش درداده‌ها و اپن سورس است. این نرم‌افزار می‌تواند بعضی فرمت‌ها همانند *GEXF, GDF, GML, GRAPH ML, Pajek NET files* و *UCINET* را بخواند. این نرم‌افزار هم‌چنین قابلیت خواندن فایل *EXCEL* و *CSV* را نیز دارد. برای واردکردن داده‌ها به نرم‌افزار گفی باید ۲ فایل یکی محتوی گره‌ها و ویژگی‌های آن و دیگری محتوی لبه‌ها و ویژگی‌های آن را داشته باشیم. فایل گره‌ها باید حاوی ستون‌هایی بانام‌های *ID* باشد که *ID* هر گره منحصر به خود آن گره است. فایل لبه‌ها

نیز باید محتوی ستون *Source* و *Target* باشد که محتوی این است که از *id* های گره آغاز و به گره دیگر ختم می‌شود. به‌این‌ترتیب با واردکردن این فایل‌ها درنهایت شبکه‌ای را تشکیل می‌دهد. و می توان شاخص‌های شبکه را با استفاده از این نرم‌افزار محاسبه کرد[۲۳].

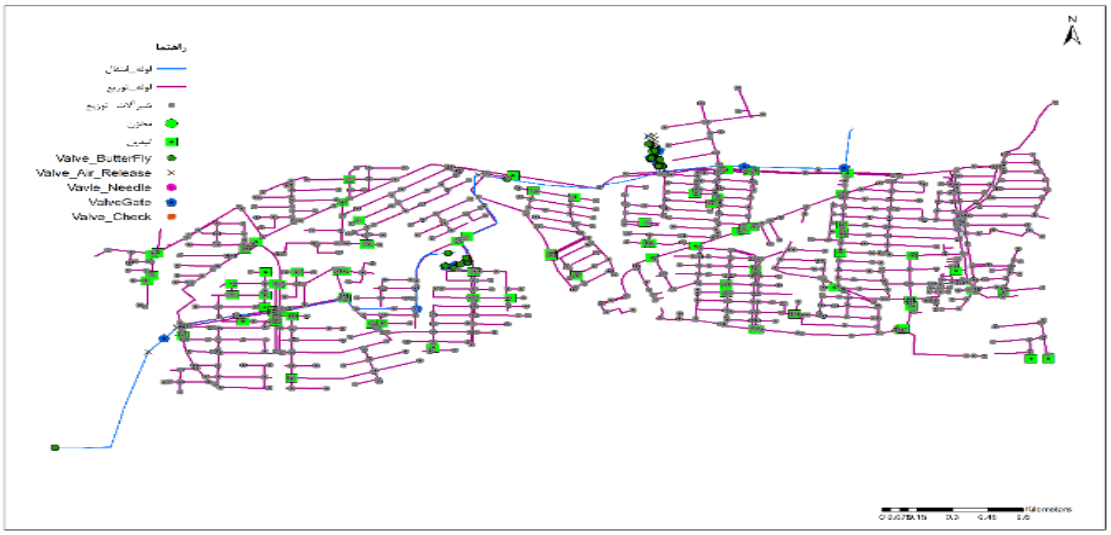
ازجمله شاخص‌های این شبکه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- مرکزیت
- میانگین درجه
- میانگین طول مسیر
- قطر
- ضریب خوشه بندی
- آنتروپی

۳. ۴- بحث و نتایج

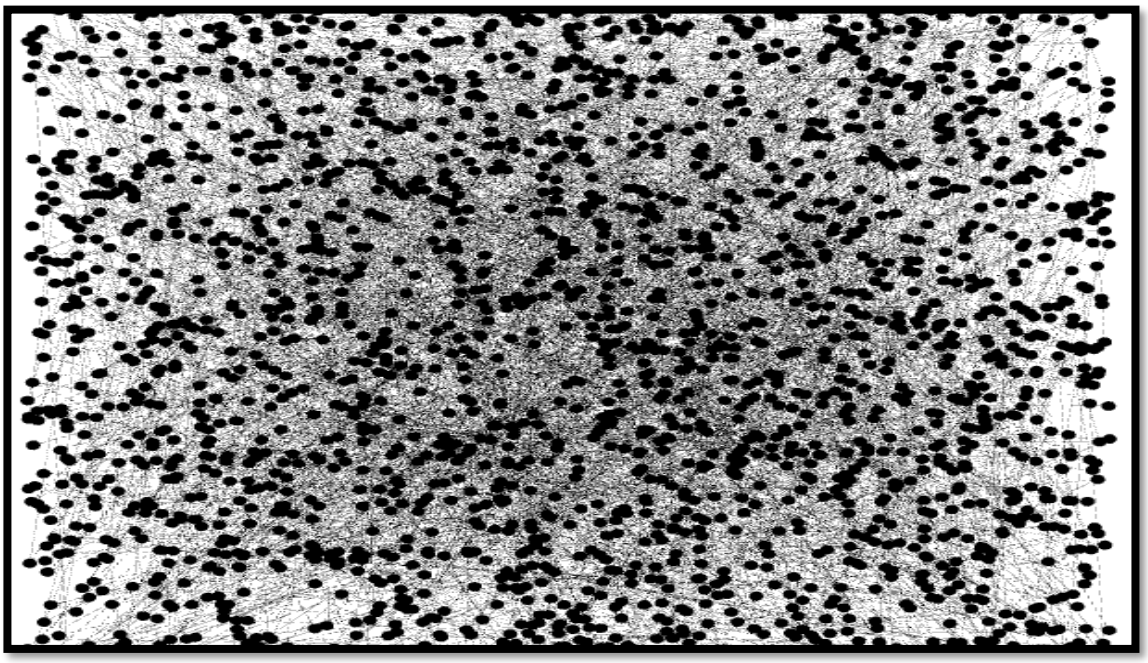
به‌منظور تحلیل شبکه آب‌رسانی ابتدا لایه‌های *GIS* منطقه موردمطالعه را با استفاده از ابزار *merge* نرم‌افزار *RAMCAP* به تلفیق داده‌های نقاط و خطوط کرده تا همگی به یک‌لایه واحد تبدیل شوند. در این مرحله دولایه اصلی *Point* و *Line* استخراج شد. در گام بعدی با استفاده از ابزار *split line at point* لایه‌های قبل که به‌صورت نقطه و خط بودند به‌عنوان ورودی استفاده‌شده و آن‌ها را روی‌هم انداخته شد. سپس با استفاده از کدهای ای کیو ال در نرم‌افزار *postsql* یک دیتابیس جدید ایجاد شد. در مرحله بعد لایه خطوط و نقطه‌ای که در گام قبلی آماده بود، وارد دیتابیس شد. درنهایت شبکه را تشکیل و داده‌های مربوط به گره‌ها و لینک‌ها از آن استخراج شد. پس از اجرای کدهای *sql* زیر یک شبکه بر اساس لایه خطوط واردشده ساخته شد. جدول *vertex* نیز در دیتابیس تولید می‌شود که مشخصات نودها را دارد. دو ستون *Source*و *Target* نیز بر اساس مشخصات شبکه تولید می‌شود. در پایان نیز دو جدول با فرمت *csv* تولید گردید. پس از استخراج داده‌های دو جدول ستون‌های *label* و ... را بر اساس داده‌های موجود در لایه *point* تکمیل شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار *spatial join* دولایه مربوط به *points* و لایه *vertex* موجود در دیتابیس ترکیب شد.

پس‌ازاینکه لایه‌های نقطه‌ای و خطی را روی‌هم انداخته و از دیتابیس خروجی گرفته شد شبکه مورد مطالعه به‌صورت شکل ۳ نمایش داده شد:



شکل ۳- نمای کلی شبکه آب‌رسانی تحت مطالعه

پس‌ازاین مرحله مشخصات ستون *type* که مربوط به نودهاست را نگه داشته و باقی ستون‌ها حذف گردید. این ستون به فایل *csv* اضافه‌شده و بر اساس آن *label* را ایجاد شد. در انتها دو فایل *csv* به نرم‌افزار گفی افزوده و درنهایت توپولوژی شبکه به‌صورت شکل ۴ ارائه شد.

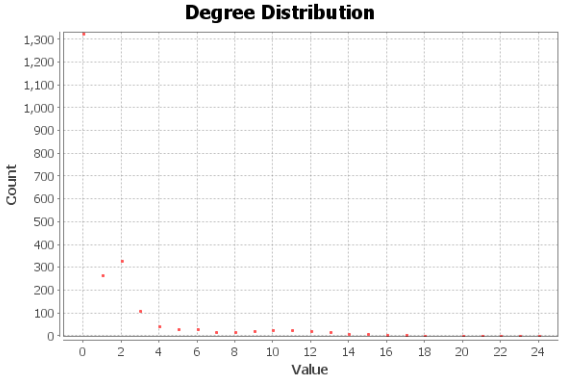


شکل ۴-توپولوژی شبکه آب‌رسانی منطقه موردمطالعه

۴-۱- محاسبه شاخص‌های شبکه

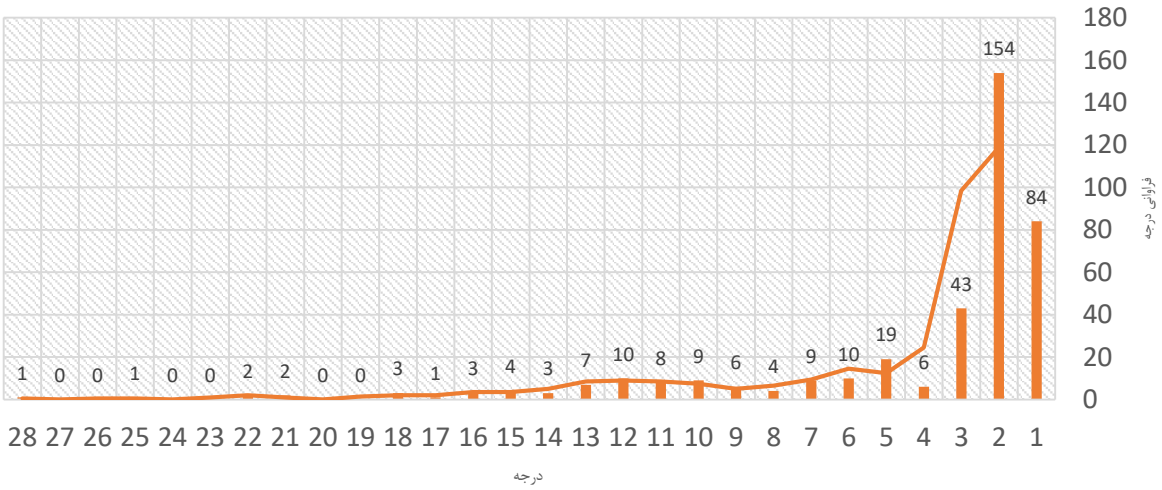
پس‌ازاینکه از لایه‌های *GIS* خروجی گرفته و آن‌ها را به‌صورت جدول مشخصات توصیفی اکسل با فرمت *CSV* ایجاد کرده و به نرم‌افزار گفی وارد گردید، حال نوبت محاسبه شاخص‌های مربوط به شبکه می‌شود. در این مرحله تک‌تک شاخص‌های موجود در شبکه را با استفاده از گزینه‌ها موجود در گفی ران کرده که خلاصه نتایج آن به شرح زیر می‌باشد:

اولین شاخصی که اقدام به محاسبه آن شد شاخص میانگین درجه بود که مقدار آن ۰,۸۴۴ محاسبه شد. درجه با آسیب‌پذیری ارتباط مستقیمی دارد به این صورت که هرچه درجه بیشتر باشد آسیب‌پذیری نیز بیشتر می‌شود. که نمودار آن به‌صورت شکل ۵ حاصل آمد:



شکل ۵-درجه شبکه موردمطالعه

در این راستا برای میانگین درجه وزن داده‌شده نیز مقدار ۰,۸۴۴ به دست آمد. در گام بعدی پس‌ازاینکه به محاسبه درجه شبکه پرداخته شد سپس آنتروپی آن محاسبه گردید. شکل ۶- فراوانی درجه شبکه مورد مطالعه را نشان می دهد.



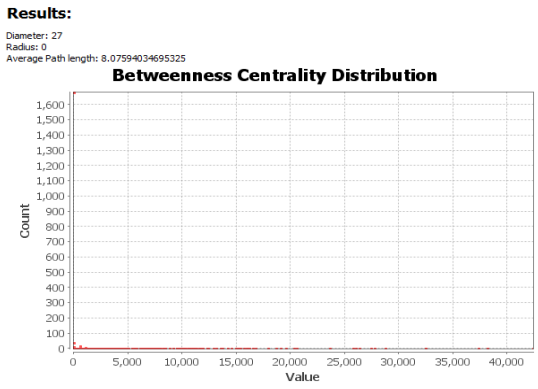
شکل ۶- فراوانی درجه شبکه

همان‌گونه که مشخص است دانسیته یا همان چگالی گراف موردمطالعه حدوداً ۱,۱ درصد می‌باشد که فاصله بسیار زیادی تا گراف کامل داشته و ازلحاظ تکامل با گراف کامل که سمبل یک گراف منظم است، فاصله معنی‌داری دارد. با محاسبه انجام‌شده مطابق با فرمول ذیل آنتروپی شبکه برای شبکه موردمطالعه ۲,۹۵ می‌باشد.

$$I(G) = -\sum_{i=1}^{max_d} h_i(\log_2(h_i)), \quad \text{where} \quad g' = [h_1, h_2, \ldots, h_{max_d}]$$

این رقم اگرچه به ۳,۵ که معیار آنتروپی شبکه‌های تصادفی نزدیک می‌باشد ولی به هر صورت دارای فاصله معناداری از آن نیز می‌باشد. همین امر باعث می‌گردد شبکه با بررسی برخی شاخص‌ها رفتار منظم و به ازای برخی شاخص‌ها رفتار تصادفی نشان می‌دهد.

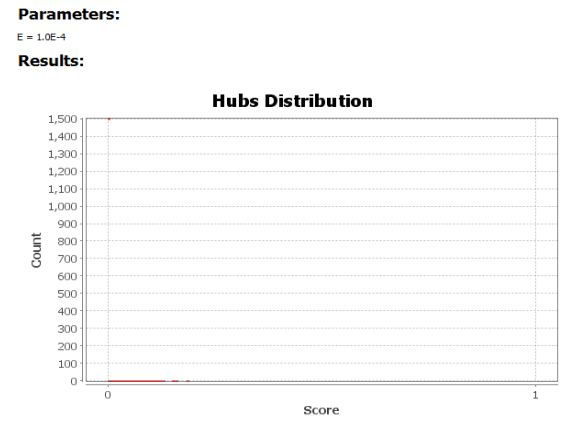
در گام بعدی قطر شبکه محاسبه گردید. قبلاً بیان شد که قطر با آسیب‌پذیری شبکه همانند درجه شبکه ارتباط مستقیم دارد. هرچه میزان قطر شبکه بیشتر باشد درنتیجه میزان آسیب‌پذیری شبکه نیز افزایش خواهد یافت. مقدار قطر برای شبکه آب‌رسانی عدد ۲۷ را نشان می‌دهد که این عدد نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بسیار بالای شبکه می‌باشد و شبکه در رنج‌های بسیار آسیب‌پذیر دسته‌بندی می‌شود. قطر شبکه به‌صورت شکل ۷- حاصل شد.



شکل ۷- نمودار قطر شبکه

قطر شبکه در حیطه شبکه‌های رگولار دسته‌بندی می‌شود و ازاین‌جهت رفتار شبکه‌های منظم را نشان دهد. شاخص بعدی را تراکم شبکه تشکیل می‌دهد و تراکم شبکه با میزان آسیب‌پذیری ارتباط معکوس دارند پس هرچه میزان تراکم بیشتر باشد آسیب‌پذیری کمتر است و در اینجا نیز میزان تراکم برای شبکه مقدار ۰,۰۰۱ حاصل شد به این معنی که ازلحاظ تراکم شبکه در رنج آسیب‌پذیری‌های پایین دسته‌بندی می‌شود.

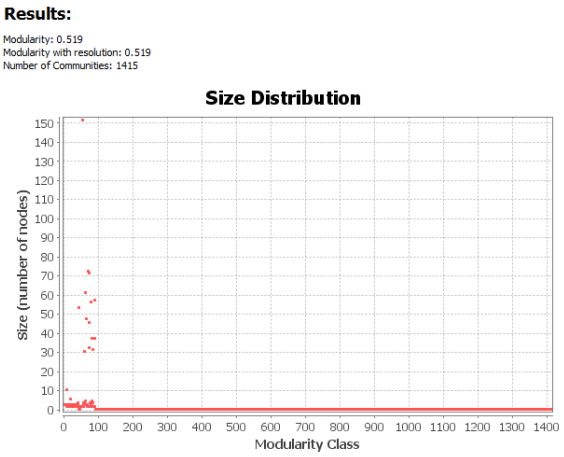
هاب در شبکه به گرهی با بیشترین درجه را می‌گویند. هرچه میزان هاب بزرگ‌تر باشد آسیب‌پذیری شبکه بیشتر است پس بین آنان ارتباط مستقیمی وجود دارد. در شبکه موردمطالعه میزان هاب در شکل ۸ مشخص‌شده است:



شکل ۸- هاب شبکه موردمطالعه

طبق تعریف هاب، در شبکه هاب به گره‌ای با بیشترین میزان درجه گفته می‌شود که در مورد شبکه ما میزان این شاخص برای شبکه مورد مطالعه ۲۸ حاصل شد که ازاین‌جهت شبکه در نزدیکی دسته شبکه‌های آزاد مقیاس رتبه‌بندی شد.

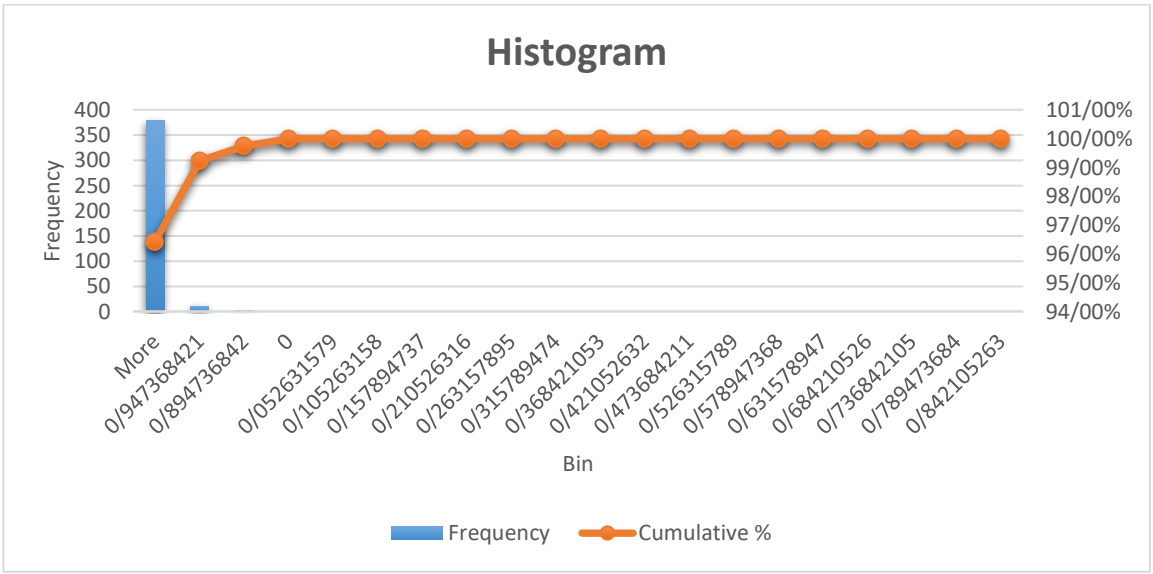
Modularity شبکه مقدار ۰٫۵۱ را به خود اختصاص داد و نمودار آن به شکل ۹- است:



شکل ۹- modularity شبکه

در شبکه‌ای با N نود و L لینک که به NC اجتماع تقسیم‌شده، و هر اجتماع شامل NC نود و LC لینک است اگر LC بزرگ‌تر از مقدار انتظاری لینک‌های بین نودهای این اجتماع باشد می‌توان گفت اجتماع درستی انتخاب‌شده است. درواقع هرچقدر این مقدار بزرگ‌تر باشد خوشه‌بندی انجام‌شده در شبکه بهتر است اگر کل شبکه را به‌عنوان یک اجتماع در نظر گرفته شود مقدار *MODULARITY* عدد صفر حاصل می‌شود. اگر هر نود را در یک اجتماع جدا گذاشته شود LC صفر دست می‌آید و این شاخص منفی می‌شود. از *modularity* می‌توان درروش های تشخیص اجتماعات استفاده کرد تا بهترین خوشه‌بندی را برگزید که برپایه چند الگوریتم تشخیص اجتماعات است.

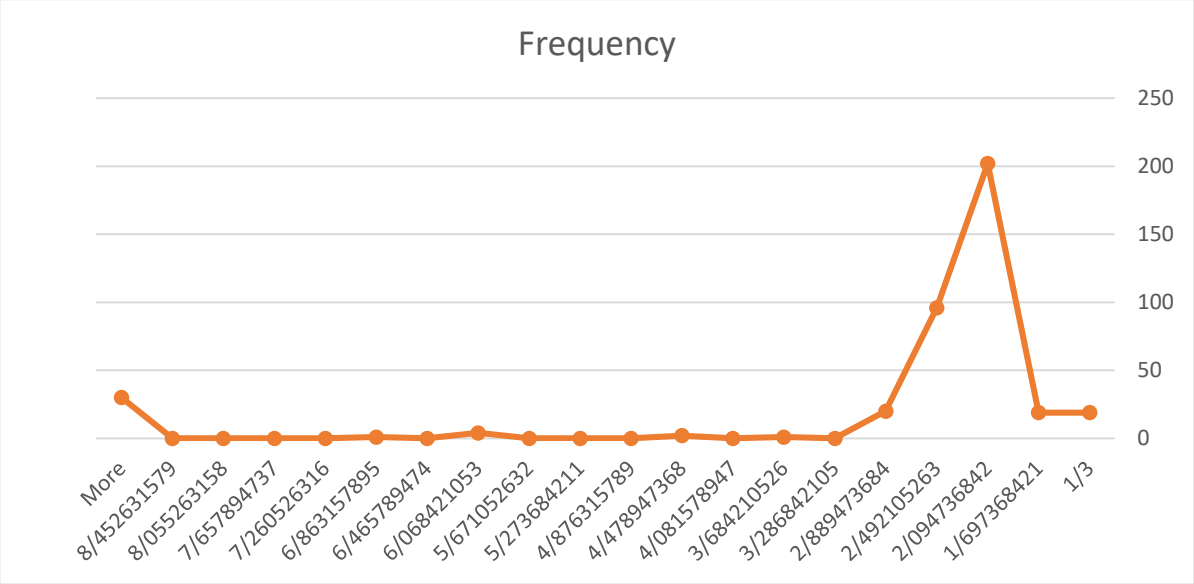
ضریب خوشه‌بندی گره به تعداد گره‌های اطراف یک گره گفته می‌شود درنتیجه برای اینکه ضریب خوشه‌بندی شبکه محاسبه گردد باید میانگین ضریب خوشه‌بندی تمام گره‌های شبکه را محاسبه کرد. در مورد شبکه آب‌رسانی تحت مطالعه میانگین ضریب خوشه‌بندی مقدار ۰٫۰۰۲ به‌دست‌آمده است و از طرفی ضریب خوشه‌بندی با آسیب‌پذیری ارتباط معکوس دارد. هرچه میزان ضریب خوشه‌بندی کمتر باشد آسیب‌پذیری شبکه بالاتر است. در اینجا نیز میزان خوشه‌بندی شبکه ۰٫۰۰۲ حاصل شد که جز دسته شبکه‌های تصادفی قرار می‌گیرد. شکل ۱۰ – فراوانی ضریب خوشه بندی برای شبکه تحت مطالعه را نشان می دهد.



شکل ۱۰- فراوانی ضریب خوشه‌بندی

بعد از نرمال کردن داده‌های ضریب خوشه‌بندی مشاهده می گردد ضریب خوشه‌بندی عددی بین صفرتا یک است. که در این مطالعه بیشتر اعداد رنج یک را دارند به این معنی که آسیب‌پذیری آن‌ها بالاست(شکل ۱۰).

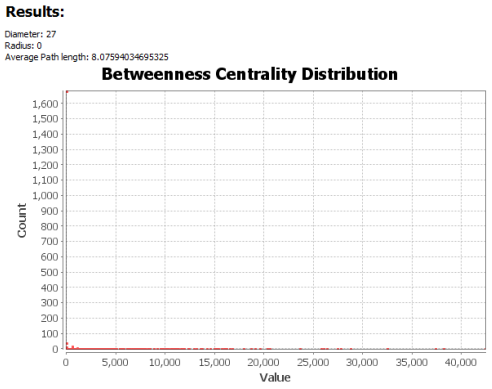
مرکزیت شاخص دیگری است که برای تحلیل شبکه کاربرد دارد. مرکزیت یک گره نشان‌دهنده میزان ارتباط گره با سایر گره‌هاست و در حقیقت مرکزیت شبکه با میزان آسیب‌پذیری آن ارتباط مستقیم دارد. برای شبکه موردمطالعه ما مقدار مرکزیت ۰,۱۱۳ حاصل شد. شکل ۱۱ فراوانی مقدار مرکزیت برای گره های مورد مطالعه را نشان می دهد.



شکل ۱۱- فراوانی مقادیر مرکزیت گره‌ها

همان‌طور که از نمودار (شکل ۱۱) دریافت می شود بیشتر گره‌های مقدار مرکزیتشان حدوداً ۲ است.

آخرین معیاری که در اینجا محاسبه می گردد میانگین طول مسیر است. طول مسیر برابر با تعداد لینک‌هایی که بین گره شروع و پایان قرار می‌گیرند می‌باشد و میانگین طول مسیر میانگین همه مسیرها بین این دو گره می‌باشد. میانگین طول مسیر با آسیب‌پذیری ارتباط معکوس دارد به این معنی که با افزایش تعداد مسیرها بین گره‌های ابتدایی و آغازین از میزان آسیب‌پذیری شبکه کاسته می‌شود. میانگین طول مسیر برای شبکه مقدار ۸,۰۷۶ به‌دست‌آمده است. که نمودار آن به‌صورت شکل ۱۲ است:



شکل ۱۲-میانگین طول مسیر در شبکه تحت مطالعه

مقدار میانگین طول مسیر برای شبکه مورد مطالعه در نزدیکی شبکه‌های جهان کوچک و رگولار است در موضعی بینابین آن‌ها قرار می‌گیرد. به این معنی که ازلحاظ بعضی شاخص‌ها همانند شبکه‌های رگولار و در بعضی شاخص‌ها همانند شبکه‌های جهان کوچک رفتار خواهد کرد.

نتیجه محاسبه این شاخص‌ها به‌صورت جدول ۱ ارائه شد:

جدول ۱- شاخص‌های محاسبه‌شده شبکه

معیارهای شبکه	
Average degree	۰,۸۴۴
Average weighted degree	۰,۸۴۴
Diameter	۲۷
Centrality	۰,۱۱۳
Modularity	۰,۵۱
Average path length	۸,۰۷۶
Average clustering coefficient	۰,۰۰۲
Density	۰,۰۰۱

حال که شاخص‌های شبکه را محاسبه گردید باید عدد آسیب‌پذیری شبکه را محاسبه کرد. برای این کار تنها سه پارامتر ضریب خوشه‌بندی، مرکزیت و درجه شبکه را در یکدیگر ضرب کرده و سپس از آن میانگین هندسی گرفته و درنتیجه عدد حاصل را به‌عنوان عدد آسیب‌پذیری شبکه یا Vn در نظر گرفته

می شود. ازآنجایی‌که ضریب خوشه‌بندی با آسیب‌پذیری رابطه عکس دارد درنتیجه برای به دست آوردن آسیب‌پذیری شبکه باید عدد خوشه‌بندی را از ۱ کسر کرده و مقدار را در هم ضرب کرد.

$$Vn=1+GA(CLi\times CCi\times Di)$$

$$Vn= 1.356$$

درنتیجه مقدار آسیب‌پذیری شبکه یعنی Vn مقدار ۰،۳۵۶ به دست آمد.

۴-۲- شابلون آسیب‌پذیری شبکه

در این بخش نیاز است که دانست عدد آسیب‌پذیری به‌دست‌آمده در رنج آسیب‌پذیری بالا یا در رنج آسیب‌پذیری پایین محاسبه می‌شود. به این منظور بر اساس شاخص‌های استاندارد موجود شابلونی را طراحی کرده و با جایگذاری اعداد به‌دست‌آمده در شابلون، تعیین گردد که ازلحاظ هر پارامتر شبکه در کدام دسته از شبکه‌های گراف قرار می‌گیرد. با جایگذاری و مقایسه پارامترها نتیجه نهایی شابلون آسیب‌پذیری به‌صورت جدول ۲ ارائه شد.

جدول ۲-مقایسه معیارهای شبکه با استانداردها

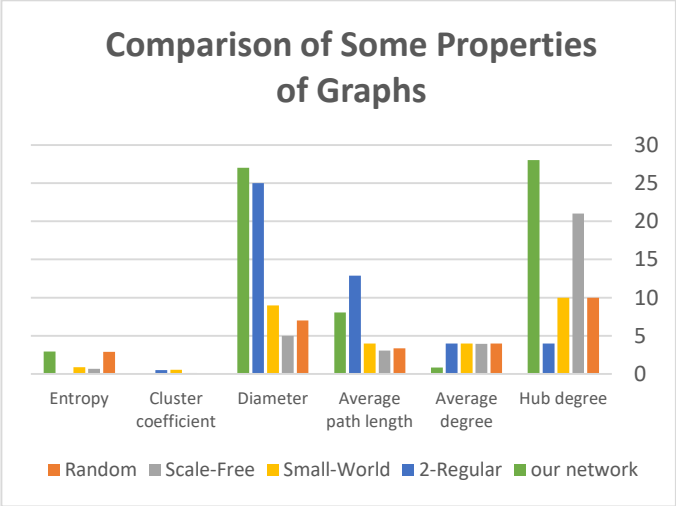
our network	2-Regular	Small-World	Scale-Free	Random	Comparison of Some Properties of Graphs
28	4	10	21	10	Hub degree
0/844	4	4	3/94	4	Average degree
8/076	12/88	4	3/08	3/38	Average path length
27	25	9	5	7	Diameter
0/002	0/5	0/544	0/156	0/045	Cluster coefficient
2/94	0	0/9	2/3	2/9	Entropy

از مقایسه پارامترهای بالا در جدول دریافت می شود که ازنظر شاخص Hub شبکه مورد مطالعه در رنج شبکه‌های آزاد مقیاس قرارگرفته است. توزیع درجه در این شبکه‌ها از توزیع توانی پیروی می‌کند. درجه بدیهی‌ترین معیار مرکزیت یک گره است. هرچه درجه رأس بیشتر باشد یعنی به گره‌های بیشتری متصل است و در جریان احتمالی داده‌ها در سایر گره‌ها مؤثرتر واقع می‌شود. متداول‌ترین حمله به شبکه‌ها، حمله به رأس با بیشترین درجه است. میانگین طول مسیر شبکه در رنج شبکه‌های منظم قرار گرفت به این معنی فاصله بین اولین تا آخرین گره تقریباً زیاد است و ازاین‌جهت آسیب‌پذیری شبکه را بالا می‌برد. ضریب خوشه‌بندی میزان تمایل گره به ارتباط با سایر گره‌هاست. درنتیجه هرچه مدار ضریب خوشه‌بندی پایین‌تر باشد میزان آسیب‌پذیری شبکه را افزایش خواهد داد. با افزایش درجه گره که میزان آسیب‌پذیری افزایش می‌یابد ممکن است گره‌ای در شبکه باشد که دارای درجه پایین باشد به‌خودی‌خود دارای اهمیت پایینی است اما به دلیل همسایگی با گرهی با درجه زیاد پل ارتباطی بین سایرِ گره‌هاست درنتیجه میزان درجه گره اهمیت خود را از دست می‌دهد اما به دلیل مجاورتش دارای ارزش زیادی می‌شود و این امر موجب می‌شود که آن گره موردحمله واقع شود که این امر در جدول ۳ کاملاً قابل مشاهده است.

جدول۳-میزان اثر پارامترهای شبکه

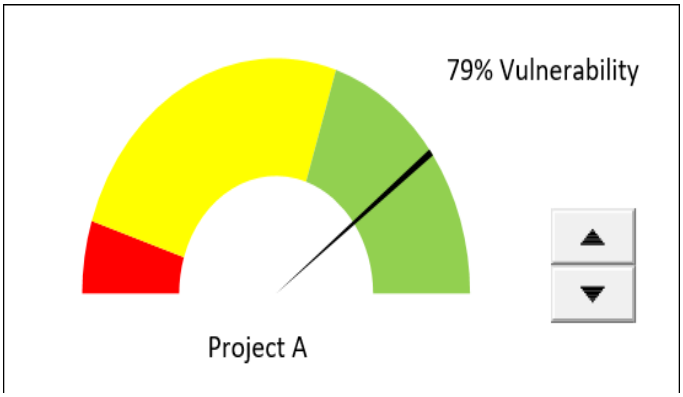
severity	type of network	value	Comparison of Some Properties of Graphs	ID
خیلی زیاد	Scale-Free	28	Hub degree	1
خیلی کم	Scale-Free	0/844	Average degree	2
زیاد	2-Regular	8/076	Average path length	3
خیلی زیاد	2-Regular	27	Diameter	4
خیلی کم	Random	0/002	Cluster coefficient	5
خیلی زیاد	Random	2/94	Entropy	6

شکل ۱۳، مقیاس‌های شبکه را در برابر سایر شبکه‌های گراف نشان می‌دهد:



شکل ۱۳- نمودار میله‌ای مقایسه شاخص‌های شبکه موردمطالعه با سایر شبکه‌های گراف

بصورت شماتیک نمای کلی میزان آسیب‌پذیری شبکه به‌صورت شکل ۱۴ حاصل گردید:



شکل ۱۴-آسیب‌پذیری کلی شبکه

۴-۳- تحلیل گره‌ها

در گام بعدی هدف این بود که بتوان سهم آسیب‌پذیری هر گره

در کل شبکه را محاسبه کرد به این منظور نیاز بود تا سه پارامتر هرگره یعنی ضریب خوشه‌بندی، میانگین درجه و مرکزیت هر گره نیز مطابق با آسیب‌پذیری شبکه در یکدیگر ضرب شود تا عدد آسیب‌پذیری شبکه‌ای هر گره محاسبه شود. به این منظور به تحلیل سه شاخص ضریب خوشه‌بندی، درجه گره و مرکزیت گره‌ها پرداخته شد.

تحلیل درجه گره

درجه گره با میزان آسیب‌پذیری شبکه ارتباط مستقیم دارد، با افزایش درجه گره میزان آسیب‌پذیری در شبکه نیز افزایش می‌یابد چراکه گره‌های دارای درجه بالا اهداف مناسب‌تری برای حملات هستند. نحوه‌ی توزیع درجه گره در یک شبکه نقشه مهمی در میزان استحکام آن در مقابل حملات هدفمند دارد. هرچه میزان درجه گره زیادتر باشد آسیب‌پذیرتر است درنتیجه در شبکه تحت مطالعه ماکزیمم درجه ۲۸ است که بسیار زیاد است درنتیجه شبکه را بسیار آسیب‌پذیرتر می‌سازد.

جدول ۴- گره‌ها با بیشترین میزان درجه در شبکه

parametr	id	label	value	Explanation
max degree	721	D-484	28	
	511	D-449	25	
	21	VBF-67	23	درجه بالا نشان دهنده اتصال زیاد است و در صورتی که گره دارای درجه بالایی باشد از لحاظ
	711	D-820	22	
	821	D-321	22	آسیب پذیری در سطح بالایی قرار دارد.
	621	D-293	21	
	811	D-372	21	
	61	VBF-57	18	
	211	D-846	18	
	671	D-382	18	

این امر می‌تواند بر میزان آسیب‌پذیری شبکه تأثیر بسزایی داشته باشد. شکل ۱۵ نشان‌دهنده پهنه‌بندی میزان درجه در کل شبکه تحت مطالعه است.

شکل ۱۵- نقشه بندی میزان درجه گره‌ها و سهم آنان در آسیب‌پذیری شبکه

همان‌طور که از شکل ۱۵ دریافت می شود بیشتر میزان درجه‌ها دارای درجه کم هستند که این امر برای استحکام شبکه حائز اهمیت است. نقاط قرمزرنگ نشان‌دهنده گره‌ها با درجات بالا می‌باشد که شبکه را آسیب‌پذیرتر می‌سازد و نقاط زردرنگ گره با درجه متوسط و نقاط سبزرنگ گره‌ها با درجه پایین می‌باشد.

تحلیل مرکزیت گره

گره‌ها با مرکزیت زیاد، گره‌های مهمی محسوب می‌شوند و نقش زیادی در کارکرد درست شبکه‌های پیچیده دارند و همین امر موجب شده تا گره‌ها با مرکزیت زیاد گره‌هایی آسیب‌پذیر محسوب شوند و ازآنجایی‌که مرکزیت با آسیب‌پذیری رابطه مستقیمی دارد با افزایش یکی دیگری نیز افزایش پیدا می‌کند. مرکزیت بالا نشان‌دهنده ارتباط زیاد بین اجزا است. جدول ۵ نشان‌دهنده ۱۰ گره با بیشترین میزان مرکزیت در شبکه‌اند.

جدول ۵- گره‌ها با بیشترین میزان مرکزیت در شبکه

row	parametr	id	label	value	Explanation
1	Max Centrality	4	VAR-23	815	
2		27	VG-85	815	
3		49	VG-95	815	
4		58	VG-83	815	مرکزیت بالا نشان دهنده ارتباط زیاد بوده و در صورتی که گره دارای ضریب خوشه پایین نیز
5		60	VG-96	815	
6		87	VG-98	815	باشد گره باید از لحاظ آسیب پذیری بررسی گردد.
7		128	VC-79	815	
8		256	C-125	815	
9		463	D-289	815	
10		497	D-419	815	

اگر رنج مرکزیت را از ۱ تا ۱۰ در نظر گرفته، مقداری از گره‌های شبکه با اختصاص دادن مقدار ۸,۵ تقریباً در رنج گره‌ها با مرکزیت بالا هستند اما اکثر گره‌های شبکه در حد وسط یعنی مرکزیت ۵ هستند. بنابراین شبکه مستعد آسیب‌پذیری است و از این لحاظ باید مورد ارزیابی و مستحکم سازی قرار گیرد. شکل ۱۶ نمایانگر گره‌ها با مرکزیت‌های مختلف است.

شکل ۱۶-پراکندگی گره‌های شبکه با درجات مختلف مرکزیت

شکل ۱۶- مرکزیت گره‌های شبکه را نشان می‌دهد. در نقشه فوق نقاط قرمز نشان‌دهنده گره‌ها با مرکزیت بالا، نقاط زردرنگ نشان‌دهنده گره با مرکزیت متوسط و نقاط سبزرنگ نشان‌دهنده گره‌های شبکه با میزان مرکزیت پایین است. لازم به ذکر است که گره‌های قرمزرنگ آسیب‌پذیرترین گره‌ها می‌باشند.

تحلیل ضریب خوشه‌بندی گره

خوشه‌بندی با آسیب‌پذیری ارتباط معکوس داشت به این معنی که هرچه ضریب خوشه‌بندی بالا باشد آسیب‌پذیری در سطح پایینی ارزیابی می‌شود. جدول زیر نشان‌دهنده گره‌ها با بیشترین میزان ضریب خوشه‌بندی می‌باشند. جدول ۶- گره ها با بیشترین میزان خوشه بندی را نشان می دهد.

جدول ۶- گره‌ها با بیشترین میزان خوشه‌بندی در شبکه

parametr	id	label	value	Explanation
Max Cluster coefficient	809	D-394	1	
	610	D-517	0/11	
	910	D-204	0/11	
	572	D-533	0/1	ضریب خوشه بندی نشان دهنده میزان خوشه ها در اطراف گره است و در صورتی که ضریب خوشه بندی بالا باشد آسیب پذیری در سطح پایین ارزیابی می شود.
	632	D-522	0/1	
	732	D-461	0/1	
	932	D-331	0/1	
	942	D-405	0/1	
	913	D-205	0/083	
	514	D-428	0/072	

برای راحتی محاسبات ضریب خوشه‌بندی را از یک کم کرده درنهایت اثر خوشه‌بندی به‌صورت مستقیم اثرگذار شد. خوشه‌بندی به تعداد گره‌های اطراف یک گره گفته شد. درنتیجه در شبکه رنج آن را بین ۰ تا ۱ در نظر گرفته و بر این مبنا بیشتر گره‌ها عدد ۱ را به خود اختصاص دادند به این معنی که ازلحاظ خوشه‌بندی شبکه به‌شدت آسیب‌پذیر است. نمای کلی خوشه‌بندی شبکه به‌صورت شکل ۱۷- حاصل شد.

شکل ۱۷- گره‌ها با بیشترین میزان خوشه‌بندی در شبکه

همان‌طور که از شکل ۱۷ نیز قابل‌درک است بیشتر گره‌ها دارای ضریب خوشه‌بندی ۱ و درنتیجه میزان خوشه‌بندی در رنج زیاد قرار گرفت و ازآنجایی‌که اثر معکوس آنرا به مستقیم تبدیل کرده به همان میزان که خوشه‌بندی زیاد باشد آسیب‌پذیری شبکه نیز بسیار زیاد است. با حاصل ضرب پارامترهای مورد مطالعه در یک دگر درنهایت میزان آسیب پذیری شبکه مورد مطالعه حاصل خواهد گردید. و نتیجه میزان آسیب‌پذیری شبکه‌ای در کل شبکه تحت مطالعه به‌صورت شکل ۱۸ حاصل شد.

شکل ۱۸- آسیب‌پذیری شبکه‌ای در شبکه تحت مطالعه

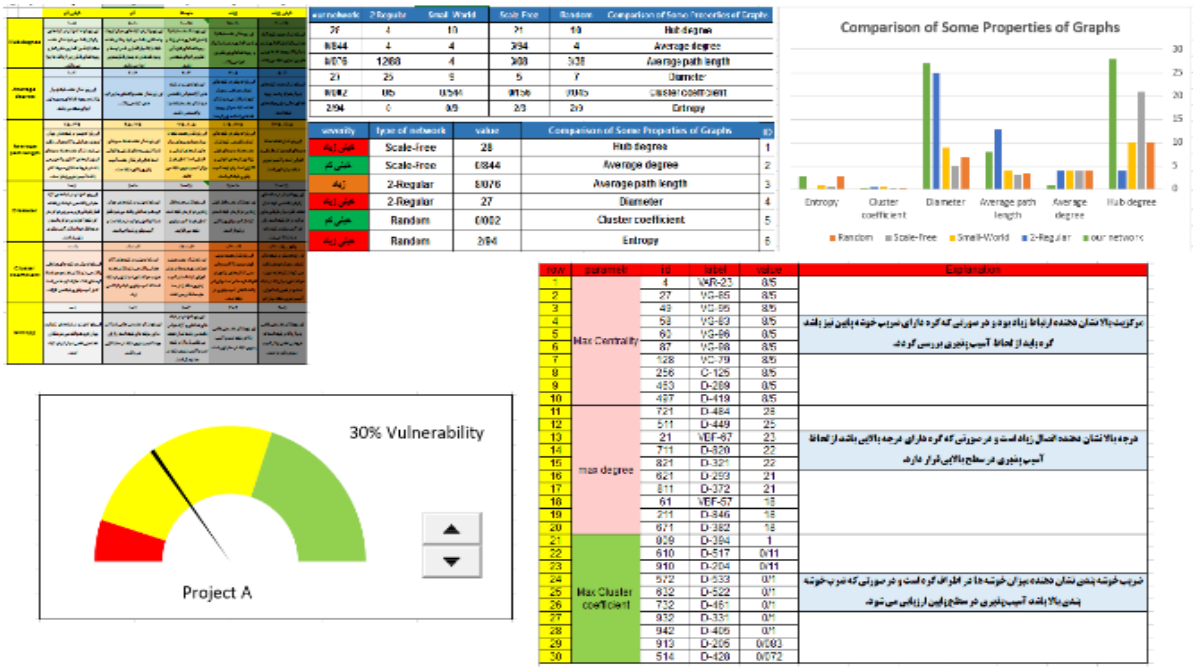
نقاط قرمزرنگ دارای حداکثر میزان آسیب‌پذیری، نقاط زردرنگ نشان‌دهنده گره‌ها با میزان آسیب‌پذیری متوسط و درنهایت نقاط سبزرنگ گره‌هایی با کمترین میزان آسیب‌پذیری هستند. همان‌طور که از نقشه بالا دریافت می شود بر اساس اعداد به دست آماده آسیب‌پذیری شبکه بالاست.

۴. نتیجه گیری

تئوری گراف روشی برمبنای ریاضیات است که برپایه آن می توان میزان آسیب پذیری و عدم قطعیت ها را در شبکه محاسبه نمود. شبکه مورد مطالعه بخشی از شبکه آبرسانی تهران بود که میزان آسیب پذیری آن را با استفاده از گراف تعیین شد. پارامترهای

بسیاری در تئوری گراف موثر است که از جمله آنها میانگین درجه، میانگین طول مسیر، درجه گره، مرکزیت و ... می باشد. مرکزیت و درجه گره با میزان آسیب پذیری ارتباط مستقیمی دارد به این معنی که با افزایش درجه گره و مرکزیت آن میزان آسیب پذیری شبکه افزایش می یابد. در خصوص شبکه آبرسانی مورد مطالعه در این پژوهش از آنجایی که درجه گره و مرکزیت آن زیاد است یعنی تمرکز دارایی ها در یک نقطه زیاد بوده و این موضوع آسیب پذیری آن را افزایش می دهد. همچنین مشخص گردید که آسیب پذیری شبکه با ضریب خوشه بندی ارتباط معکوس دارد. همان گونه نتیجه گرفته شد در این میان ضریب خوشه بندی شبکه مورد مطالعه بسیار پایین است در نتیجه میزان آسیب پذیری شبکه مورد مطالعه بالاست و برای سایر معیارها نیز آسیب پذیری متوسطی حاصل آمد. بطور کلی با ترکیب سه معیار ضریب خوشه بندی، مرکزیت و درجه گره به عنوان معیارهای انتخابی به عنوان پارامترهای آسیب پذیری شبکه در نظر گرفته شد و در نتیجه آسیب‌پذیری شبکه‌ای برای گره‌ها ماحصل ضرب این سه معیار در یکدیگر حاصل گردید. با انجام این عملیات آسیب پذیری شبکه مورد مطالعه با استفاده از پارامترهای تحلیل شبکه همچون مرکزیت، درجه گره و ضریب خوشه بندی در سطح بالایی ارزیابی گردید. به این منظور برای تداوم عملکرد این شبکه آب رسانی باید تمهیدات ویژه ای را برای استمرار عملکرد زیرساخت آب داشت. از جمله این راهکارها می توان پراکنده سازی دارایی های شبکه و یا موازی سازی دارایی های مهم را مد نظر داشت. با صرف هزینه بیشتر و موازی سازی دارایی ها با اهمیت بالا ، پشتوانه ای را برای این دارایی ها در نظر گرفته که تا زمان بروز بحران وارد مدار گردند.

از جمله نوآوری که در این پژوهش صورت گرفت ارائه شابلون آسیب پذیری و تحلیل شبکه بود که بصورت شکل ۱۹ حاصل شد:



شکل ۱۹- شابلون شبکه تحت مطالعه

در شابلون بالا رنج مقیاس‌های استاندارد شبکه‌ها را قرار داده و به این ترتیب هر شاخص از لحاظ قرار گرفتن در شبکه‌های آزاد مقیاس، جهان کوچک، تصادفی و منظم بررسی شد. به این ترتیب با امتیازی که هر شبکه در هر شاخص کسب کرد آن‌را در دسته مربوطه قرار داده و از این جهت بررسی شد که شبکه در کدام حیطه قرار می‌گیرد و چه رفتارهایی را از خود نشان می‌دهد. پس از آن ۱۰ گره با بیشترین میزان درجه و مرکزیت و خوشه-بندی را مشخص و در نهایت از جمع کل آن‌ها میزان آسیب-پذیری شبکه بصورت نمودار نشان داده شد.

در گام آخر نقشه میزان آسیب‌پذیری کل شبکه حاصل شد که با استفاده از این نقشه می توان نقاط بسیار حساس‌تر و آسیب‌پذیرتر را شناسایی و با تخصیص بهینه بودجه به این نقاط کمترین میزان خسارات ممکن را در شبکه آب داشت. پس می‌توان دریافت که تئوری گراف روش خوبی برای ارزیابی آسیب‌پذیری در زیرساخت‌ها به‌حساب می‌آید. با استفاده از این روش می‌توان دارایی‌های حیاتی در شبکه را مورد شناسایی قرارداد.

به منظور مدیریت بحران شهر تهر ان لازم است با توجه به نتیجه ای که از توپولوژی این شبکه آب حاصل گردید، نقاط آسیب پذیر شبکه های مورد مطالعه تعیین و میزان اهمیت آنها را مورد بررسی قرار داد. برای گره هایی که نقش حیاتی دارند و عملکرد کلیدی را در شهر ایفا می کنند مسیر و یا گره جایگزینی

در نظر داشت که در صورت تخریب این نقاط و مسیرهای کلیدی بتوان آب منطقه را تامین و از میزان حساسیت آنها کاست. همچنین لازم است که در تعیین مسیر جایگزین به سایر پارامترهای دگر از جمله به شیب منطقه نیز توجه کافی داشت.
همچنین به منظور تعمیر و بازسازی مراکز و مسیرهای کلیدی شبکه در هنگام بروز بحرا ها لازم است از قبل بررسی های لازم به عمل آمده و تمهیدات مختلفی که منجر به تسریع بازسازی و افزایش تاب آوری شبکه گردد اندیشیده شود.
در خصوص تهدیدات آلودگی نیز باید بیان نمود که با تعیین این گره های اساسی و تعیین حساسترین گر ه ها برای اینکه از انتشار آلودگی تجهیزات و تمهیدات رفع آلودگی برای این گره ها را نیز در نظر داشت.

۵. جنبه نوآوری تحقیق

نو آوری و تفاوت این تحقیق با تحقیقات و مطالعات پیشین در سه جنبه قابل عنوان است.

۱- نرم افزار گفی ، نرم افزاری در جهت تحلیل شبکه های اجتماعی بوده و به همین منظور توسعه داده شده است اما در این پژوهش این نرم افزار برای نخستین بار در تحلیل آسیب پذیری زیرساخت ها بکار گرفته شد.

۲- در مطالعات پیشین تحلیل آسیب پذیری برای سایر زیرساخت ها به صورت نقطه ای مورد ارزیابی قرار می گرفت اما در این پژوهش تحلیل آسیب پذیری زیرساخت آب با استفاده از پارامترهای تئوری گراف بصورت شبکه ای ارزیابی شده است.

۳- تاکنون شابلون و مرز آسیب پذیری برای زیرساخت آب ارائه نگردیده بود که در این تحقیق به این امر پرداخته شد و در نهایت شابلونی برای تعیین درجه آسیب پذیری زیرساخت آب ارائه گردیده است.

۶. مراجع فارسی

[۴]. تهذیبی کامبیز، نوری مهدی، مشعوف بیژن، نصیبی مهدی؛ ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌های انتقال آب با استفاده از روش خوشه‌بندی، مجله مدیریت بحران، پاییز ۹۴.

[۶]. اسکندری، محمد. امیدوار، بابک. توکلی ثانی، محمد صادق. تحلیل خسارت شریان های حیاتی با درنظرگرفتن اثرات وابستگی در اثر حملات هدفمند؛ دوفصلنامه علمی و پژوهشی مدیریت بحران، شماره ۱۹، ویژه نامه پدافند غیرعامل، ۱۳۹۳.

[۹]. حسن مشهدی، ارزیابی تهدیدها، آسیب‌پذیری و ریسک در زیرساخت های حیاتی. کتاب, ۱۳۹۴.

[۱۷]. رحمتی، مریم. ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه توزیع به روش گراف، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۵.

[۱۸]. شکیبامنش ا، و هاشمی فشارکی س ج،" ملاحظات پدافند غیر عامل در تأسیسات زیربنایی شهری"، مجموعه مقالات اولین .کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت زیرساختها، دانشکده فنی دانشگاه تهران، آبان1388

۷. مراجع لاتین

[1]. Johansso, J. Hassel, H. (2010) .An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis, Reliability Engineering and system Safety 1335-1344.

[2]. Wang .S, Hong .L , Chen, X. (2012) . Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems: A methodological framework; Physica A 391. 3323–3335.

[3]. Chia-Chien Hsu . Sandford , Brian A. (2007)The Delphi Technique: Making Sense Of Consensus, Practical Assessment, Research & Evaluation, Vol 12, No 10.

[5]. Kröger , W. Zio, E. (2011). Vulnerable Systems; Springer London Dordrecht Heidelberg New York, A catalogue record for this book is available from the, British Library _ Springer-Verlag London Limited.

[7]. Ali Nekooie, . Hosnavi . M. R, . Nouri, M (2015). A Model of Sustainability-Resilience Index (SRI) for Amphibious Urbanisation.

[8]. Cook,C. Bakker , K.(2012). Water security: Debating an emerging paradigm, Global Environmental Change 22 , 94–102

[10]. Roozbahani, A., Zahraie, B., Tabesh, M. (2013). "Integrated risk assessment of urban water supply systems from source to tap". Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 27(4 - .355 303 ,).

[11]. Foster . J.A, McDonald .A.T.(2000) Assessing pollution risks to water supply intakes using geographical information systems (GIS), Environmental Modelling & Software 15, 225–234

[12]. Le Gat . Y, Eisenbeis . P,(2000) Using maintenance records to forecast failures in water networks. Urban Water 2, 173±181

[13]. Babovic . V, drecourt . J-Ph, keijzer . m, friss Hansen . p,(2012) A data mining approach to modelling of water supply assets, Urban Water 4 , 401–414

[14]. Pinto , J · Varum , H · Bentes , I · Agarwal , J.(2010) A Theory of Vulnerability ofWater Pipe Network (TVWPN). Water Resour Manage , 24:4237–4254

[15]. Michaud , D. Apostolakis , G. E.(2006) Methodology for Ranking the Elements of Water-Supply Networks, J. Infrastruct. Syst.12:230-242

[16]. Herrera . M, Canu . S, Karatzoglou . A, P´erez-Garc´ıa . R. and Izquierdo . J,(2010) An approach to water supply clusters by semi-supervised learning, International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake

[19]. Di Nardo . A, Di Natale. M, Santonastaso . G. F, Tuccinardi .F. P, Zaccone. G, (2014) SWANP: software for automatic Smart WAter Network Partitioning, International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 7th International Congress on Environmental Modelling and Software San Diego, California, USA, D.P. Ames, N. Quinn (Eds.).

[20]. Yazdani . A, Jeffrey . P,(2011) A note on measurement of network vulnerability under random and intentional attacks, School of Applied Sciences, Cran_eld University, MK43 0AL, UK. arXiv:1006.2791v2 [physics.comp-ph]

[21]. BATHRELLOS . G, SKILODIMOU . H, SOULAKELLIS . N, PANAGOPOULOS . G, TATARIS . G, (2007) MAPPING URBAN WATER DEMANDS USING MULTI-CRITERIA ANALYSIS AND GEOINFORMATION METHODS, publications on Research Gate.

[22]. Walski .T, Donald . M, Chase . V, Dragan . A. (2003). Walter Grayman, Stephen Beckwith, Advanced Water Distribution Modeling and Management. University of Dayton eCommons. Department of Civil and Environmental Engineering and Engineering Mechanics.

[23]. Creating a Network Graph with Gephi, Miriam Posner, 2016.

[24]. Hsu , Chia-Chien. Brian A. S. (2007). The Delphi Technique: Making Sense Of Consensus, Practical Assessment, Research & Evaluation, Vol 12, No 10.

[25]. Mays, L. W. (2004). "Water supply systems security", New York, McGraw-Hill Professional Engineering