Archive of SID

محاسبه احتمال رویداد شکست در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با استفاده از شبکه بیزین

محمد جواد عنبری[1]، مسعود تابش[2]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
(نویسنده مسئول) mj.anbari@tabrizu.ac.ir
۲- استاد، عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیر ساخت‌های عمرانی، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(دریافت ۹۳/۶/۱۱ پذیرش ۹۴/۱/۲۲)

چکیده

سامانه‌های فاضلاب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های شهری، وظیفه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب تولیدی به‌منظور بازگشت به طبیعت و یا استفاده مجدد از فاضلاب را بر عهده دارند که یکی از مهم‌ترین بخش‌های این سامانه‌ها، شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب است. عواقب ناگوار ایجاد شکست در این سامانه‌ها گاهی به حدی است که کارکرد بخشی از شهر را دچار اختلال می‌کند. عملکرد مناسب یک شبکه جمع‌آوری فاضلاب وابسته به برنامه بهره‌برداری و نگهداری آن است که با شناخت نقاط دارای احتمال شکست بالا، می‌توان با انجام بازرسی‌های مبتنی بر وضعیت سیستم، عملکرد و کارایی شبکه را به میزان قابل توجهی افزایش داد. در پژوهش حاضر، مدلی برای محاسبه احتمال رویداد شکست در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با استفاده از شبکه بیزین معرفی شده است که با توجه به قابلیت‌های شبکه‌های بیزین و ویژگی‌های سیستم‌های فاضلاب، مدل ارائه‌شده از کارایی بالایی برخوردار است. روش ارائه شده دارای چهار گام اساسی آماده‌سازی ورودی‌های مدل، آموزش شبکه بیزین، صحت‌سنجی شبکه آموزش‌دیده و دریافت نتایج خروجی است. برای نشان دادن کاربرد روش معرفی‌شده، قسمتی از شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهر تهران به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد و با استفاده از احتمال رویداد شکست به‌دست آمده از مدل، فاضلابروها در پنج گروه از جهت اولویت برنامه‌های بازرسی و نگهداری تقسیم شده‌اند. نتایج، نشان‌دهنده احتمال شکست خیلی کم و کم (۳۷ درصد) و متوسط (۶۰ درصد) برای اکثر فاضلابروهای موجود در شبکه است که البته نو بودن بخش عمده شبکه جمع‌آوری فاضلاب تهران، می‌تواند از جمله عوامل آن باشد.

واژه‌های کلیدی: احتمال شکست، شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب، فاضلابرو، شبکه بیزین

۱- مقدمه

سامانه‌های فاضلاب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های شهری، جهت جمع‌آوری، انتقال، تصفیه و دفع فاضلاب‌های کاربران خانگی، صنعتی، تجاری و عمومی طراحی می‌شوند [۱]. عملکرد صحیح این سامانه‌ها با توجه به اهمیتی که در مدیریت شهری دارند، بسیار قابل توجه است. ایجاد شکست در سامانه‌های فاضلاب، در صورت در نظر نگرفتن پیش‌بینی‌های لازم و انجام اقدامات مقتضی، ممکن است پیامدهای اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و مشکلات بهداشتی بسیار شدیدی به دنبال داشته باشد. ذکر این نکته لازم است که منظور از «شکست» تمامی وضعیت‌هایی است که عملکرد سیستم با مشکل مواجه شده یا مختل می‌شود.

یکی از عمده مشکلاتی که در بررسی سامانه‌های فاضلاب وجود دارد، عدم وجود داده‌های کافی و با دقت مناسب است و در بررسی وضعیت این سامانه‌ها، عدم قطعیت بالایی وجود دارد. علاوه بر این، بخشی از سامانه فاضلاب که شامل شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب می‌شود، به‌صورت مدفون در زیرزمین بوده و دسترسی به آن، به سختی امکان‌پذیر است. سامانه‌های جمع‌آوری فاضلاب ممکن است برای دوره‌های طولانی قبل از این که شواهدی از مشکلات به‌وجود آمده ظاهر شود، در سطحی پایین‌تر از شرایط ایده‌آل سامانه عمل نمایند. مشکلات سازه‌ای یا هیدرولیکی ممکن است برای مدت‌ها پنهان باشند تا این‌که با قطع سرویس‌دهی، فروریختن جاده یا بالازدن جریان فاضلاب در سطح راه یا زیرزمین ساختمان‌ها، مشکل نمایان شود [۲]. با توجه به فواصل زمانی طولانی بین بازرسی‌های دوره‌ای، انجام بازرسی و در صورت نیاز تعمیرات مقتضی در بخش‌هایی از شبکه که احتمال رویداد شکست بیشتری دارند، بسیار ضروری است.

در سال‌های اخیر در زمینه ارزیابی عملکرد و تعیین وضعیت موجود در سامانه‌های فاضلاب، پژوهش‌هایی صورت گرفته است. هان و همکاران به توسعه یک سیستم خبره برای اولویت‌بندی

www.SID.ir

Archive of SID

بازرسی فاضلابروها پرداخته‌اند. آن‌ها بیان کرده‌اند که اولویت‌بندی بازرسی فاضلابروها موجب کاهش تعداد بازرسی‌ها و در نتیجه کاهش تعداد تعمیرات اضطراری و هزینه‌های پیشگیرانه می‌شود. تحلیل‌های مربوطه در یک برنامه کامپیوتری با استفاده از شبکه باور بیزین[1] انجام شده است. در این پژوهش، بررسی اثرات شکست با جزئیات کافی صورت نگرفته و تنها به صورت کلی بررسی شده است [۳ و ۴].

با بالارفتن سن تأسیسات، افزایش جمعیت و فشارهای اقتصادی فزاینده، فشار بر سازمان‌های امور شهری برای اولویت‌بندی نگهداری تأسیسات در حال خرابی افزایش می‌یابد که لازمه آن پیش‌بینی دقیق عملکرد و شرایط خطوط لوله است. نجفی و کولاندایول شرایط خطوط لوله‌های شبکه جمع‌آوری فاضلاب را با استفاده از شبکه‌های عصبی پیش‌بینی کرده‌اند. در این تحقیق پارامترهای طول، قطر، جنس، سن، عمق پوشش و شیب لوله‌ها و نوع شبکه به‌منظور پیش‌بینی شرایط، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از مزیت‌های استفاده از شبکه‌های عصبی، عدم نیاز به شناسایی تابع دقیق برای تحلیل و امکان استفاده از نظرات کارشناسی و عیب آن‌ها، نیاز به سری داده‌های گسترده برای آموزش همه ترکیبات ممکن است [۵].

بایک و همکاران شرایط سیستم‌های فاضلاب را با استفاده از مدل زنجیره مارکو[2] ارزیابی کرده‌اند. متغیرهای در نظر گرفته شده در این مقاله عبارت‌اند از: طول، قطر، جنس، سن و شیب لوله. روش زنجیره مارکو دارای مزیت‌هایی مانند سهولت کاربرد، دقت در تخمین‌ها و امکان تولید ماتریس‌ها بر اساس تجربیات کارکنان است. اما در روش زنجیره مارکو فرض می‌شود که نرخ خرابی به زمان وابسته نیست که موجب کاسته شدن از دقت تحلیل‌ها می‌شود. علاوه بر این، برای استفاده از این روش، باید داده‌های موجود به چند گروه تقسیم شده و برای هر گروه منحنی خرابی زنجیره مارکو جدیدی تولید شود که سبب دشواری کار می‌شود [۶].

بابانی و همکاران برنامه‌ای جهت مدیریت دارایی[3] شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با لحاظ نمودن هم‌زمان عملکرد سازه‌ای، هیدرولیکی و زیست‌محیطی شبکه ارائه کرده‌اند. برای ارزیابی عیوب سازه‌ای از روش‌های فازی استفاده شده و مزیت مدل ارائه شده امکان در نظر گرفتن خطاهای ناشی از کم بودن دقت پارامترها و توانایی در ارزیابی شرایط شبکه با وجود داده‌های محدود است؛ اما در این مدل، نقاط دارای اطلاعات محدود دارای الگوی خرابی (خرابی فاضلابروها) مشابه فرض می‌شوند که از دقت کار به‌طور قابل‌توجهی کاسته می‌شود [۷].

در مورد تأسیسات مدفون در زیر خاک سؤال اساسی برای تصمیم‌گیران کیفیت و قابلیت اطمینان تجهیزات و اجزای آن تأسیسات است. خان و همکاران سعی کرده‌اند که با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، شرایط یک شبکه جمع‌آوری فاضلاب در حال بهره‌برداری را مورد ارزیابی قرار دهند. پارامترهای در نظر گرفته شده برای این منظور عبارت‌اند از: سن، طول، قطر و شیب لوله. نتیجه بررسی نشان داده است که هر چهار مشخصه انتخاب شده، تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد سیستم دارد اما سن لوله بیشترین تأثیر را دارد و بعد از آن طول و قطر لوله در مراتب بعدی هستند.

وانگ و همکاران به بررسی و وزن‌دهی عوامل مؤثر در وضعیت لوله‌های شبکه آب و میزان خرابی آن‌ها با استفاده از روش بیزین پرداخته‌اند. آن‌ها ده عامل را برای سه نوع جنس لوله (چدن، چدن نشکن و فولادی) مورد بررسی قرار دادند که این عوامل عبارت‌اند از اندازه، سن، پوشش داخلی و خارجی، وضعیت خاک، وضعیت بستر لوله، عمق ترانشه، تعداد خطوط جاده، جنس و میزان فشار. بر اساس این تحقیق، می‌توان به‌جای بررسی مکانیسم شکست لوله با تحلیل داده‌های مربوط به لوله‌ها، شرایط لوله را ارزیابی نمود [۸].

در کشور ما نیز پژوهش‌هایی جهت بررسی عملکرد و ارزیابی شرایط سامانه‌های آب و فاضلاب صورت گرفته است. توکلی‌فر به ارزیابی عملکرد و شرایط تصفیه‌خانه‌های آب و نحوه عملکرد در برابر بحران‌ها پرداخته است [۹]. بدلی باوانی الگوریتمی به‌منظور ارزیابی شرایط تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بر اساس روش تحلیل و مدیریت ریسک آژانس مدیریت اضطراری فدرال[4] برای زیرساخت‌های مهم و حیاتی توسعه داده است [۱۰ و ۱۱]. عسگریان مدلی برای سنجش آمادگی شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب برای مواجهه با بحران‌ها با رویکرد محاسبه و مدیریت ریسک آن‌ها ارائه کرده است. وی الگوریتم خود را با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تدوین نموده و تأکید بیشتر این تحقیق بر استفاده از نظرات کارشناسی بوده است [۱۲]. روزبهانی و همکاران به ارائه مدل IFHRA-WSS[5] با رویکردی فازی جهت تحلیل ریسک سیستم‌های آب شهری شامل بخش تأمین، تصفیه و توزیع به‌صورت یکپارچه پرداختند و کارایی آن را بر روی سیستم آب شرب شهر ارومیه در ایران بررسی کردند و روزبهانی مدل

[1] Bayesian belief network (Hugin 2000)
[2] Markov chain
[3] Asset management
[4] Federal Emergency Management Agency (FEMA)
[5] Integrated Fuzzy Hierarchical Risk Assessment Model For Water Supply Systems

www.SID.ir

Archive of SID

تحلیل ریسک درخت خطا مبتنی بر شبکه‌های بیزین فازی[1] را ارائه نموده است [۱۳ و ۱۴].

در طول دو دهه اخیر، از شبکه‌های بیزین برای استفاده از دانش کارشناسان در قالب سیستم‌های خبره استفاده شده و پس از آن، محققان روش‌هایی برای آموزش این شبکه‌ها با استفاده از داده‌های موجود توسعه داده‌اند. استفاده از شبکه‌های بیزین نسبت به روش‌های دیگر تحلیل داده‌ها مانند درخت‌های تصمیم، شبکه‌های عصبی مصنوعی، رگرسیون و غیره دارای مزیت‌های مهمی است. از جمله این مزیت‌ها، امکان توسعه شبکه در حالت وجود سری داده‌های ناقص، امکان ترکیب مناسب نظرات کارشناسی و داده‌های موجود، امکان و سهولت به‌روزرسانی پارامترها و احتمالات شرطی بین پارامترهای مختلف (برخلاف روش‌هایی مانند درخت خطا) و امکان محاسبات رو به جلو (پی بردن از وضعیت گره علّت به معلول) و رو به عقب (رسیدن از معلول به علت) می‌باشد [۱۳ و۱۵].

نکته دیگر که حائز اهمیت است، مبحث عدم قطعیت است. در واقع بزرگ‌ترین مشکل در عرصه مدیریت منابع آب، تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت است. روش‌های زیادی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند که اکثر آن‌ها در دو دسته جای می‌گیرند. دسته نخست، روش‌های مبتنی بر تئوری احتمالات و دیگری روش‌های مبتنی بر منطق فازی. روش‌های دسته نخست دارای اساس تئوری قوی‌تری می‌باشند که از جمله جدیدترین این روش‌ها، شبکه‌های بیزین هستند. یکی دیگر از مزیت‌های شبکه‌های بیزین، وجود نرم‌افزارهای مناسبی برای استفاده از این شبکه‌ها است[۱۶]. با بررسی پیشینه تحقیق در زمینه شبکه‌های بیزین، یکی از بهترین نرم‌افزارهای معرفی شده نرم‌افزار هیوگین[2] بوده که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. از ویژگی‌های این نرم‌افزار می‌توان به‌سادگی کاربرد آن و محیط گرافیکی مناسب و نیز داشتن نسخه آموزشی مناسب و با محدودیت‌های کمتر نسبت به برخی دیگر از نرم‌افزارهای مشابه اشاره نمود.

در اکثر مطالعات صورت گرفته در زمینه ارزیابی عملکرد و احتمال رویداد شکست در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب، عوامل تأثیرگذار به‌صورت جامع مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. در مورد احتمال شکست در فاضلابروها باید آسیب‌های سازه‌ای و هیدرولیکی در کنار هم دیده شوند تا امکان ارزیابی و اولویت‌بندی بازرسی فاضلابروها به‌صورتی مناسب ایجاد شود که در تحقیق حاضر با استفاده از مزایای ذکر شده در شبکه‌های بیزین با رویکردی مناسب به آن پرداخته شده است. در این مقاله، پس از معرفی آسیب‌های ممکن در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب و عوامل این آسیب‌ها و نیز معرفی شبکه‌های بیزین، مدل پیشنهادی برای محاسبه احتمال شکست در قالب چهار گام اصلی جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، آموزش شبکه بیزین، صحت سنجی مدل آموزش دیده و دریافت خروجی مدل ارائه شد و فاضلابروهای بخشی از شبکه جمع‌آوری فاضلاب منطقه ۳ آب و فاضلاب شهر تهران با توجه به‌میزان احتمال شکست در آن‌ها، به‌طور مناسب اولویت‌بندی شدند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- آسیب‌های ممکن در شبکه جمع‌آوری فاضلاب

شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب به‌طور دایم یا موقت تحت تأثیر عوامل فیزیکی، شیمیایی، بیوشیمیایی و زیستی قرار دارند. این‌گونه تأثیرات ممکن است در کوتاه‌مدت یا درازمدت باعث آسیب بخش‌های مختلف شبکه شوند. «آسیب» را می‌توان به‌صورت زیر تعریف نمود [۳]:

«بر اساس منطق فرایند نگهداری از تأسیسات، آسیب موجود می‌تواند باعث تأثیر منفی غیرمجاز بر قابلیت کارکرد تأسیسات مربوطه شده یا ممکن است در درازمدت باعث این‌گونه تأثیرات شود».

مهم‌ترین شکست‌ها و آسیب‌های ممکن را می‌توان در دو گروه شکست‌های سازه‌ای و شکست‌های هیدرولیکی دسته‌بندی نمود.

الف) شکست سازه‌ای

به هر نوع شکست در شبکه جمع‌آوری فاضلاب که به فیزیک و ساختمان اجزای سیستم شبکه بستگی دارد، شکست سازه‌ای اطلاق می‌شود. این نوع شکست ناشی از آسیب‌های زیر است:

۱- فرسایش[3] (مکانیکی- فیزیکی): منظور از فرسایش مکانیکی، خرابی بخش‌هایی از محیط تر شده سطح داخلی لوله است. این امر باعث افزایش زبری دیواره لوله و در شرایط بسیار نامناسب باعث تخریب لوله‌ها می‌شود [۳].

۲- خوردگی[4]: خوردگی عبارت است از واکنش یک ماده با محیط اطرافش که در نتیجه آن تغییر قابل اندازه‌گیری ماده مزبور حاصل می‌شود و باعث تأثیر منفی بر کارکرد بخشی از سازه یا کل یک سیستم می‌شود. از بین مصالح مورد استفاده در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب، به‌طور معمول مصالح سیمانی (بتن، آزبست سیمان و

[1] Integrated Fault Tree-Bayesian Network Hierarchical Risk Assessment (IFTBNHRA)
[2] Hugin Lite V.7.8
[3] Erosion
[4] Corrosion

www.SID.ir

Archive of SID

ملات) و فلزات (فولاد و چدن) در معرض خوردگی قرار دارند [۳]. البته در مورد لوله‌های از جنس مواد مصنوعی نیز بسته به شرایط محیطی می‌توان این نوع آسیب را مشاهده نمود. خوردگی را می‌توان به دو دسته خوردگی داخلی و خوردگی خارجی تقسیم نمود. خوردگی داخلی در اثر عوامل خورنده در فاضلاب به‌ویژه به دلیل تولید H_2S در فاضلابروها و خوردگی خارجی عمدتاً در اثر خورندگی خاک و آب زیرزمینی اطراف لوله‌ها روی می‌دهد.

۳- تغییر شکل[1] سطح مقطع: این آسیب تنها در لوله‌های انعطاف‌پذیر (معمولاً از جنس مواد مصنوعی) مانند لوله‌های PVC مطرح است. زیرا در رابطه با لوله‌های از جنس مصالح صلب، تغییرات بسیار کم شکل سطح مقطع، باعث تنش یا انبساط کششی غیرمجاز شده و درنتیجه ترک‌خوردگی دیواره آن‌ها حاصل می‌شود [۳].

۴- ترک‌خوردگی[2]، شکستگی لوله و ریزش دیواره لوله (یا متلاشی شدن[3] لوله): ترک‌خوردگی معمولاً در لوله‌های غیرانعطاف‌پذیر مشاهده می‌شود که شامل ترک‌های طولی، عرضی و نقطه‌ای است. منظور از شکستگی لوله نیز جدا شدن بخش‌هایی از دیواره لوله و منظور از ریزش دیواره لوله، از دست رفتن کامل مقاومت لوله به همراه درهم شکستن لوله است که شدیدترین مرحله شکست سازه‌ای است [۳].

ب) شکست هیدرولیکی

به هر نوع شکست در شبکه جمع‌آوری فاضلاب که موجب ایجاد مشکل در جریان فاضلاب به‌دلیل افزایش نرخ جریان یا کاهش ظرفیت لوله شود، شکست هیدرولیکی گفته می‌شود. هان و همکاران شکست عملکردی (هیدرولیکی) را ناشی از افزایش تقاضا یا کاهش ظرفیت می‌دانند [۴]. وقوع شکست هیدرولیکی در شبکه‌های فاضلاب نسبت به شکست سازه‌ای معمول‌تر است. آسیب‌هایی که منشا این نوع شکست هستند، عبارت‌اند از:

۱- عدم آب‌بندی[4]: آسیب مورد نظر در این قسمت شامل مواردی مانند عدم آب‌بندی در دیواره لوله‌ها و اتصالات می‌شود. عدم آب‌بندی به‌صورت نشت فاضلاب از شبکه به بیرون آن و نفوذ آب زیرزمینی و خاک به داخل شبکه بروز می‌کند که نفوذ خاک به داخل شبکه خود عاملی برای گرفتگی در مسیر جریان فاضلاب خواهد بود. همچنین نفوذ آب زیرزمینی از سوراخ‌های موجود در لوله، موجب ایجاد و یا افزایش ابعاد حفره‌های موجود در بدنه فاضلابرو می‌شود. نشت فاضلاب از شبکه به بیرون نیز منجر به از دست رفتن ریزدانه‌های خاک اطراف لوله می‌شود. این نفوذها و نشت‌ها ممکن است به ایجاد حفره‌هایی در خاک اطراف لوله منجر شود که در صورت همراه شدن با رویدادهایی مانند ساخت و سازها، زلزله و یا زمین لغزش می‌تواند موجب ایجاد نشست‌های قابل‌توجه شود [۴].

نشت فاضلاب از شبکه به بیرون، در وهله اول بستگی به وضعیت مکانی شبکه نسبت به سطح آب زیرزمینی دارد [۳]. زیرا اگر شبکه زیر سطح آب زیرزمینی باشد، امکان نشت فاضلاب به بیرون شبکه وجود ندارد مگر این‌که فشار فاضلاب داخل لوله (به‌دلیل پرشدن سطح مقطع لوله) بیش از فشار آب خارج لوله باشد. در مورد نفوذ آب زیرزمینی به داخل شبکه نیز سطح آب زیرزمینی عامل تعیین کننده است.

۲- گرفتگی[5] در مسیر جریان فاضلاب: گرفتگی در مسیر جریان ممکن است در اثر ته‌نشینی خاک و گل و لای در کف لوله، رسوبات چرب، رسوبات ناشی از تأثیر آب‌های زیرزمینی، رسوبات سولفاتی و جرم گرفتگی داخل فاضلابرو، رشد و نفوذ ریشه گیاهان به داخل فاضلابرو و ورود و مسدود نمودن مسیر فاضلابرو توسط زباله‌ها ایجاد شود. ریشه‌ها در مناطقی که دارای درختان قدیمی هستند، ایجاد مشکل می‌کنند (البته نوع درخت نیز مؤثر است) و اغلب از عیوب موجود در اتصالات و یا خود لوله وارد سیستم می‌شوند که ورود ریشه از اتصالات لوله‌ها بیشتر اتفاق می‌افتد. بنابراین تعداد اتصالات موجود، عاملی تأثیرگذار در این زمینه است. با توجه به این که برخی گرفتگی‌ها مانند گرفتگی به‌دلیل ورود جسم خارجی (مانند بیل، توپ و غیره) به‌طور معمول ارتباط مشخصی با ویژگی‌های فاضلاب، شبکه فاضلاب و یا حتی خصوصیات محیطی ندارد و موجب کاستن دقت تحلیل‌ها می‌شود، از در نظر گرفتن آن‌ها صرفنظر شده است. اما به‌عنوان نمونه، اگر وسعت مساحت مورد تحلیل به اندازه کافی بزرگ باشد، عواملی مانند فرهنگ مشترکان هر منطقه می‌تواند مورد ارزیابی واقع شود. علاوه بر این، زباله‌ها در قسمت‌هایی از خط لوله با سرعت کم جمع می‌شوند و در سیستم‌های فاضلاب درهم، به‌دلیل ورود روناب سطحی، زباله بیشتری وارد سیستم می‌شود. البته سرعت‌های بالای سیستم درهم در هنگام رویداد بارش، زباله‌ها را از سطح سیستم پاک می‌کند اما ممکن است زباله‌های بزرگ‌تری را وارد سیستم نماید [۱۷].

۳- افزایش بار هیدرولیکی ورودی به شبکه

افزایش بار هیدرولیکی بیش از حدود طراحی ممکن است به‌دلیل بارش‌های شدید، انشعابات غیرمجاز و غیره روی دهد. در سیستم‌های مجزا، شبکه فاضلاب‌های خانگی برای جریان فاضلاب

[1] Deformation
[2] Cracking
[3] Collapse
[4] Leakage
[5] Blockage

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- عوامل موثر در محاسبه احتمال رویداد شکست

نوع شکست	آسیب مربوطه		عوامل موثر در احتمال رویداد شکست
شکست سازه‌ای	ترک‌خوردگی، ریزش دیواره لوله و شکستگی		سن لوله، جنس لوله، ابعاد لوله (طول و قطر لوله)، سطح آب زیرزمینی*، میزان ترافیک بالای سطح فاضلابرو (نوع راه)، عمق لوله (فاصله فاضلابرو از سطح زمین)
	خوردگی و فرسایش لوله		سن لوله، جنس لوله، سرعت جریان فاضلاب، نوع پوشش و روکش خارجی، حفاظت کاتدی (در مورد لوله‌های آهنی و فولادی)
	تغییر شکل سطح مقطع		سن لوله، جنس لوله، قطر لوله، میزان ترافیک بالای سطح فاضلابرو (نوع راه)، عمق لوله (فاصله فاضلابرو از سطح زمین)
شکست هیدرولیکی	عدم آب‌بندی		سن لوله (سن شبکه)، جنس لوله، تعداد اتصالات، سطح آب زیرزمینی
	گرفتگی در مسیر جریان	گرفتگی به دلیل رسوبات	سن لوله، جنس لوله، قطر لوله، سرعت فاضلاب، نوع شبکه (مجزا یا درهم)
		گرفتگی ریشه	تعداد درختان اطراف لوله، نوع درختان (دارای ریشه عمیق یا سطحی)، سن لوله، جنس لوله، عمق لوله، قطر لوله، تعداد اتصالات

* در صورتی که سطح آب زیرزمینی بالاتر از سطح فاضلابرو باشد، تاثیرگذار خواهد بود.

سطحی طراحی نمی‌شود اما آب‌های سطحی از بخش‌هایی مانند درپوش آدم‌روها، اتصالات زهکشی غیرقانونی و یا اتصال ناخواسته شبکه در تقاطع با شبکه فاضلاب‌های سطحی وارد سیستم می‌شوند. همچنین هرچه تعداد اتصالات مشترکان بیشتر شود، ورود فاضلاب‌های سطحی نیز بیشتر می‌شود [۱۷].

۳-۱- عوامل مؤثر در آسیب‌های موجود در شبکه

در مورد هر یک از انواع شکست‌ها و آسیب‌های ذکر شده می‌توان عوامل و پارامترهایی را بیان نمود که به‌وسیله آن‌ها احتمال شکست در هر مورد تخمین زده شود. به‌عنوان مثال ایجاد شکست وابستگی زیادی به سن لوله دارد. همچنین سرعت جریان پایین موجب ته‌نشینی بیشتر رسوبات در مسیر فاضلابرو می‌شود. عوامل در نظر گرفته شده برای شکست‌های سازه‌ای و هیدرولیکی با توجه به‌دسته‌بندی ارائه شده در بخش قبل، در جدول ۱ آورده شده‌اند. در تدوین عوامل موجود در این جدول، امکان دسترسی به داده‌های مربوطه نیز در نظر گرفته شده است.

۳-۲- معرفی شبکه‌های بیزین

شبکه بیزین[1] مدلی گرافیکی برای بیان روابط احتمالاتی بین متغیرها است. شبکه‌های بیزین بر مبنای استفاده از احتمالات شرطی و تئوری بیز توسعه داده شده‌اند. تئوری بیز به‌صورت زیر بیان شده است [۱۸]:

اگر E و F دو رویداد مفروض باشند به گونه‌ای که P(E)≠0 و P(F)≠0، آنگاه رابطه ۱ به‌دست می‌آید

$$P(E/F)=\frac{P(F/E)P(E)}{P(F)} \qquad (۱)$$

یک شبکه بیزین، شبکه‌ای از گره[2]ها است که با کمان[3]های مستقیم به‌هم متصل شده‌اند و به هر گره یک تابع احتمال نسبت داده می‌شود. یک گره بیانگر یک متغیر تصادفی گسسته با تعداد وضعیت‌های محدود (مانند اعداد ۱ تا ۶ و یا عبارت‌های «صحیح» و «غلط») یا یک متغیر تصادفی پیوسته (یا توزیع گوسی[4] مانند دما و یا حجم فاضلاب تولیدی) است. کمان‌های بین گره‌ها نشان‌دهنده روابط علّی بین گره‌ها هستند و جهت کمان‌ها همواره از علت به سمت معلول است (به متغیر علت، گره والد و به معلول، ولد (فرزند) اطلاق می‌شود). به دو گره (متغیر) که توسط یک کمان به هم متصل شده‌اند، یک یال[5] می‌گویند. نمودار یک شبکه بیزین، یک نمودار غیرحلقه‌ای جهت‌دار است یعنی هیچ مسیر مستقیمی نمی‌توان یافت که شروع و پایان آن در یک گره باشد. اگر یک گره هیچ والدی نداشته باشد (یعنی پیکان هیچ کمانی به سمت آن نباشد)، گره یک جدول احتمال مرزی[6] خواهد داشت. اگر یک گره والد داشته باشد (یعنی یک یا چند کمان به سمت آن باشد)، گره دارای جدول احتمال شرطی[7] است. احتمال شرطی، تأثیر احتمالی یک گره بر گره مفروض در شبکه را به‌دست می‌دهد. پس از ساخت یک شبکه می‌توان از آن برای ورود داده‌های مشاهداتی در گره‌هایی که وضعیت مشخص و معلوم دارند، استفاده نموده و بر اساس آن احتمالاتی را که بر اساس آن‌ها در گره‌های دیگر به‌دست می‌آیند، دریافت نمود [۱۹].

[1] Bayesian Network (BN)

[2] Node
[3] Link
[4] Gaussian Distribution
[5] Edge
[6] Marginal Probability Table
[7] Conditional Probability Table (CPT)

www.SID.ir

Archive of SID

یک مفهوم مهم در شبکه‌های بیزین، مفهوم استقلال شرطی است. دو متغیر A و B مستقل شرطی نامیده می‌شوند، هرگاه متغیر C به متغیرهای A و B وابسته باشد و مقدار متغیر C معلوم باشد، وجود اطلاعات در مورد متغیر B، هیچ‌گونه اطلاعات اضافی در مورد متغیر A ارائه ندهد. این مفهوم را می‌توان به‌صورت رابطه ۲ بیان نمود

$$P(A \mid B,C) = P(A \mid C) \qquad (۲)$$

توزیع احتمالاتی توام مجموعه‌ای از متغیرهای $x_1, x_2, \ldots x_n$ با فرض مستقل بودن آن‌ها، از حاصل‌ضرب توزیع احتمالات شرطی آن‌ها به‌دست می‌آید

$$P(x_1, x_2, \ldots x_n) = \prod_{i=1}^{n} P(x_i \mid \pi(x_i)) \qquad (۳)$$

که $P(x_1, x_2, \ldots x_n)$ احتمال توام مقدار متغیرها و $\pi(x_i)$ مقادیر کمی مجموعه علل x_i است.

لازم به ذکر است که به محاسبه احتمال شرطی تعدادی از متغیرها بر اساس اطلاعات موجود سایر متغیرها در شبکه بیزین، استنباط (استنتاج)[1] گفته می‌شود. زمانی که تمامی اطلاعات موجود در مورد گره‌های والد و یا اجداد متغیر یا متغیرهای مورد نظر باشند، استنباط ساده است و بر اساس روابط احتمالات شرطی محاسبه می‌شود. اما اگر اطلاعات فرزندان یا نواده‌ها موجود باشد، باید استنباط را برخلاف مسیر کمان‌ها انجام داد و کار پیچیده‌تر خواهد بود. برای این منظور از کاربرد تئوری بیز که پیش‌تر بیان شد، استفاده می‌شود [۱۹].

۳-۳- ساختار مدل پیشنهادی برای محاسبه احتمال شکست

الگوریتم کلی روش ارائه شده جهت محاسبه احتمال شکست فاضلابروها با استفاده از شبکه بیزین در شکل ۱ آورده شده است. همان‌گونه که در این الگوریتم مشاهده می‌شود، مدل پیشنهادی از چهار گام کلی آماده‌سازی ورودی‌های مدل، آموزش شبکه بیزین، صحت‌سنجی مدل و دریافت خروجی مدل تشکیل می‌شود.

یکی از مسائلی که در مورد شبکه‌های بیزین مطرح است، انتخاب بهترین دسته‌بندی از بین حالت‌های مختلف ممکن است. در یک شبکه بیزین هر پارامتر را می‌توان به چندین حالت مختلف دسته‌بندی نمود که از ترکیب این حالت‌های مختلف، شبکه‌هایی بسیار متنوع حاصل می‌شود و نتایج حاصل نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در این تحقیق از شاخصی که توسط کولکارنی و همکاران معرفی شده، برای دسته‌بندی استفاده می‌شود که این شاخص از طریق رابطه ۴ به‌دست می‌آید [۲۰]

$$D(x) = \frac{P(f|c) - P(f)}{P(f)} \qquad (۴)$$

که $D(x)$ شاخص معرفی شده، $P(f|c)$، احتمال شکست لوله به شرط داشتن یک دسته ویژگی خاص c (همان دسته‌های مربوط به پارامترها و P(f)، نیز تحت عنوان احتمال گسترده شکست در کل شبکه است که $P(f|c)$ از طریق رابطه ۵ محاسبه می‌شود

$$P(f/c) = \frac{P(c|f)P(f)}{P(c|f)P(f) + P(c|nf)(1-P(f))} \qquad (۵)$$

که $P(c|f)$، احتمال مشاهده یک دسته ویژگی خاص c بر روی لوله‌هایی است که حداقل یک‌بار دچار شکست شده‌اند و از رابطه ۶ محاسبه می‌شود. $P(c|nf)$، احتمال مشاهده یک دسته ویژگی خاص c بر روی لوله‌هایی است که دچار شکست نشده‌اند و با استفاده از رابطه ۷ به‌دست می‌آید

$$P(c|f) = \frac{\text{تعداد لوله‌های با ویژگی c و دارای حداقل یک}}{\text{کل تعداد لوله‌های دارای حداقل یک شکست در سال}} \qquad (۶)$$

$$P(c|nf) = \frac{\text{تعداد لوله‌های با ویژگی c و بدون شکست در}}{\text{کل تعداد لوله‌های بدون شکست در سال i}} \qquad (۷)$$

احتمال گسترده در کل شبکه ($P(f)$) نیز از رابطه ۸ به‌دست می‌آید:

$$(P(f)) = \frac{\sum^{N} \text{تعداد کل لوله‌های دارای حداقل یک شکست در سال i}}{\sum^{N} \text{تعداد کل لوله‌ها در سال i}} \qquad (۸)$$

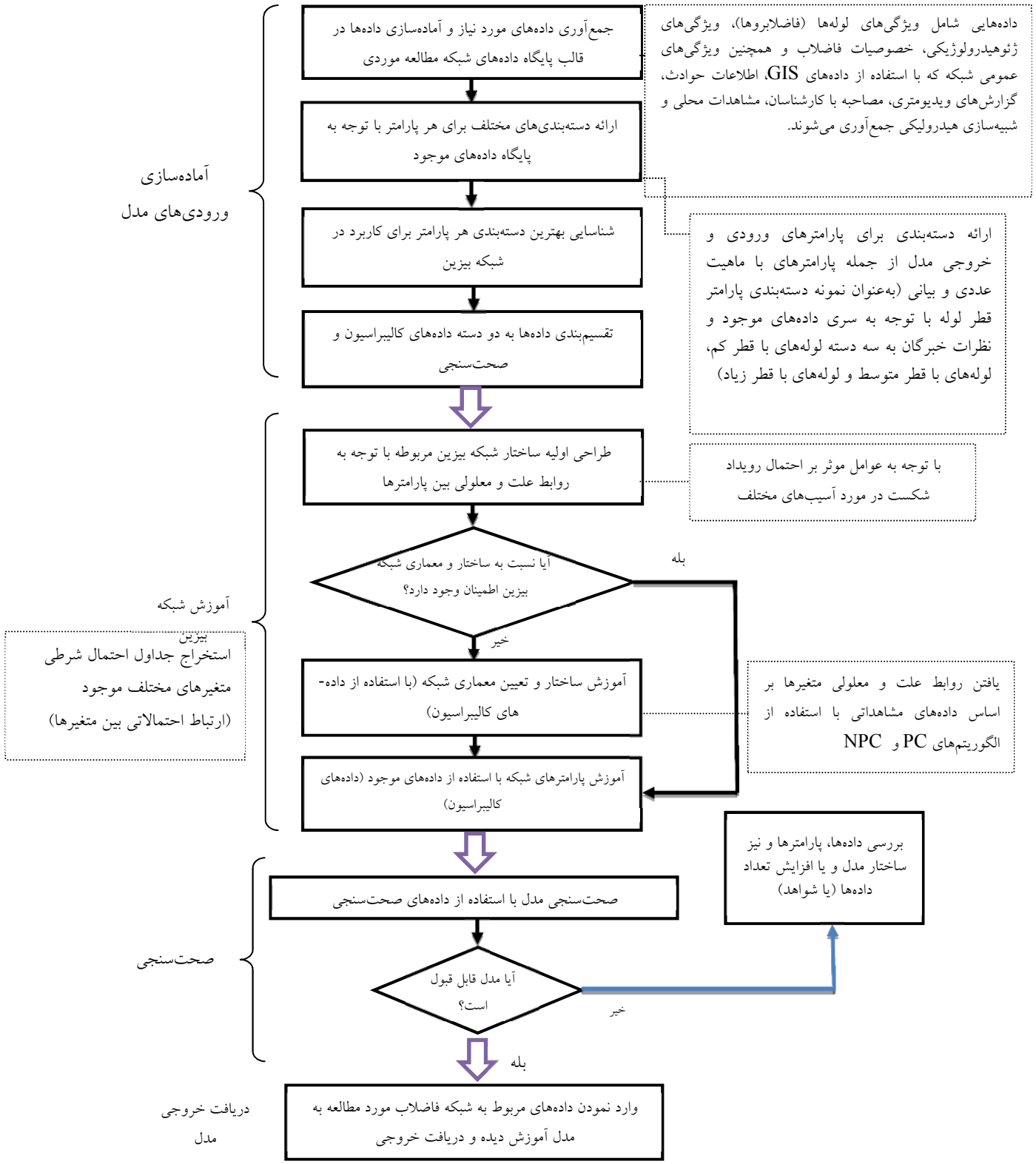
۴- مطالعه موردی و نتایج تحقیق

در این پژوهش، بخشی از منطقه سه آبفای تهران به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. در ناحیه انتخاب شده، شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب منطقه امیرآباد، نصر (گیشا) و فاطمی که دلیل این انتخاب وجود داده‌های حوادث و گزارش‌های ویدیومتری در این مناطق، وجود داده‌های GIS و وجود تنوع بیشتر در سن و جنس فاضلابروها برای آموزش شبکه بیزین بوده است. شبکه جمع‌آوری فاضلاب تهران به‌طور کلی به‌صورت مجزا طراحی شده است. جنس

[1] Inference

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱- الگوریتم مدل محاسبه احتمال رویداد شکست شبکه فاضلاب با استفاده از شبکه بیزین

www.SID.ir

Archive of SID

فاضلابروهای موجود در کوی نصر عمدتاً آزبست سیمان است و عمر لوله‌ها تا ۴۰ سال نیز می‌رسد. اما در نقاط محدودی از این ناحیه از لوله‌های پلی‌اتیلن فاضلابی نیز استفاده شده که دارای عمر کمتری هستند. در منطقه امیرآباد و فاطمی نیز از لوله‌های با جنس پلی‌اتیلن استفاده شده است. عمر فاضلابروها در شبکه امیرآباد بین ۱۰ تا ۱۵ سال و در شبکه فاطمی بین ۵ تا ۱۰ سال است. سطح آب زیرزمینی در کل منطقه ۳ بسیار پایین‌تر از سطح شبکه فاضلاب است. سطح آب زیرزمینی حدود ۱۰۰ متری سطح زمین قرار دارد و از این جهت در گذشته در این منطقه از چاه‌های جذبی استفاده می‌شد. البته در مناطق کوی نصر و شهرآرا به‌دلیل سنگلاخی بودن نوع زمین و نفوذپذیری کم آن، امکان استفاده از چاه‌های جذبی وجود نداشته است و لذا شبکه این مناطق بسیار قدیمی به‌صورت تصفیه‌خانه‌های محلی بوده است.

۴-۱- آماده‌سازی ورودی‌های مدل

در گام اول، داده‌های مورد نیاز که امکان دسترسی به آن‌ها فراهم بود، جمع‌آوری شدند (جدول ۱). ضمناً در مورد عامل سرعت در شبکه فاضلاب با توجه به عدم وجود داده ثبت شده در این زمینه، از شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه جمع‌آوری فاضلاب با استفاده از نرم‌افزار SewerCAD v.5.5 استفاده شده است. برای انجام تحلیل هیدرولیکی، تولید سرانه فاضلاب بر اساس طرح جامع تهران در منطقه مورد نظر، برابر ۱۸۴ Lpcd[1] در نظر گرفته شده است [۲۱].

پس از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، بر اساس شاخص ارائه شده توسط کولکارنی و همکاران می‌توان جهت دسته‌بندی هر یک از پارامترهای مورد استفاده در شبکه بیزین که نیاز به تشخیص بهترین دسته‌بندی ممکن داشته باشد، مراحل زیر را طی نمود [۱۴]:

۱- در اولین گام با توجه به داده‌های موجود در پایگاه داده‌های توسعه داده شده در مرحله قبل و با استفاده از نظرات خبرگان، دسته‌بندی‌هایی که به نظر مناسب‌تر هستند، انتخاب می‌شوند.

۲- برای هر یک از دسته‌ها (ویژگی‌ها) شاخص $D(x)$ را به‌دست آورده و سپس با میانگین‌گیری بین دسته‌ها، میانگین این شاخص برای کل دسته‌بندی محاسبه می‌شود $\overline{D}(x)$؛ مثلاً برای عمر لوله در حالت در نظر گرفتن دو دسته مقادیر، $D_1(x)$ و $D_2(x)$ و در حالت در نظر گرفتن سه دسته مقادیر، $D_1(x)$، $D_2(x)$ و $D_3(x)$ محاسبه شده و میانگین‌گیری می‌شود.

۳- پس از به‌دست آوردن مقادیر $\overline{D}(x)$ برای هر حالت دسته‌بندی، بهترین دسته‌بندی حالتی است که بزرگ‌ترین مقدار $\overline{D}(x)$ را نتیجه دهد.

[1] Litter per capita per day

در استفاده از روش ذکر شده، استفاده از قضاوت کارشناسی از اهمیت بالایی برخوردار است. جدول ۲ نتیجه دسته‌بندی انجام گرفته برای پارامترهای ورودی مورد استفاده در شبکه بیزین را نشان می‌دهد. همچنین در این جدول، در مقابل نام هر پارامتر، عنوانی که در شبکه بیزین برای گره مربوط به آن‌ها به‌کار می‌رود، ذکر شده است.

جدول ۲- دسته بندی پارامترهای شبکه بیزین

نام پارامتر (عامل)	دسته اول	دسته دوم	دسته سوم
سن لوله (سال)	۵-۱۰	۱۰-۱۵	۱۵-۴۰
جنس لوله	آزبست سیمان	پلی‌اتیلن	
قطر لوله (mm)	۲۰۰-۲۲۵	۲۵۰	>۲۵۰
عمق لوله (m)	۱/۷-۲/۵	(۲/۵-۳/۵)	≥۳/۵
نوع راه	فاقد راه	کوچه و خیابان فرعی (محلی)	سایر راه‌ها
تعداد اتصالات	۱-۵	۶-۱۰	۱۱-۲۳
تعداد درختان	≤۷	>۷	
عمق ریشه درختان	سطحی	عمیق	
سرعت (m/s)	<۱	[۱-۱/۵]	>۱/۵

در پایان این گام از مدل، با توجه به تعداد کل داده‌های مورد استفاده برابر ۷۵۲، حدود ۵۰۰ داده (نزدیک ۷۰ درصد)، برای کالیبراسیون و آموزش مدل و بقیه داده‌ها، یعنی ۲۵۲ داده برای صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفتند. برای این که داده‌های صحت‌سنجی انتخاب شده، نماینده خوبی برای سری داده‌های موجود باشد، انتخاب آن‌ها با استفاده از تولید اعداد تصادفی انجام گرفت.

۴-۲- آموزش شبکه بیزین

در این تحقیق، برای ایجاد، آموزش و اجرای شبکه بیزین از نرم‌افزار هیوگین استفاده شد. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در زمینه عوامل مؤثر بر احتمال شکست در مورد آسیب‌های مختلف و نظرات خبره، ساختار شبکه بیزین مطابق شکل ۲ ایجاد شد. در این شکل، گرفتگی به‌دلیل رسوبات با گره "Blockage" و گرفتگی به‌دلیل نفوذ ریشه با گره "Root" نشان داده شده است. گره‌های "Structural"، "Hydraulical" و "P(Failure)" نیز به ترتیب برای شکست سازه‌ای، شکست هیدرولیکی و احتمال شکست (شکست کلی سیستم) در نظر گرفته شدند.

پس از تعیین معماری اولیه شبکه، باید شبکه آموزش داده شود. آموزش شبکه بیزین، شامل دو مرحله آموزش ساختار و آموزش پارامترها است. آموزش ساختار شبکه به معنای تعیین متغیرهای وابسته و مستقل و یافتن ارتباط‌های ممکن بین متغیرهایی است که

www.SID.ir

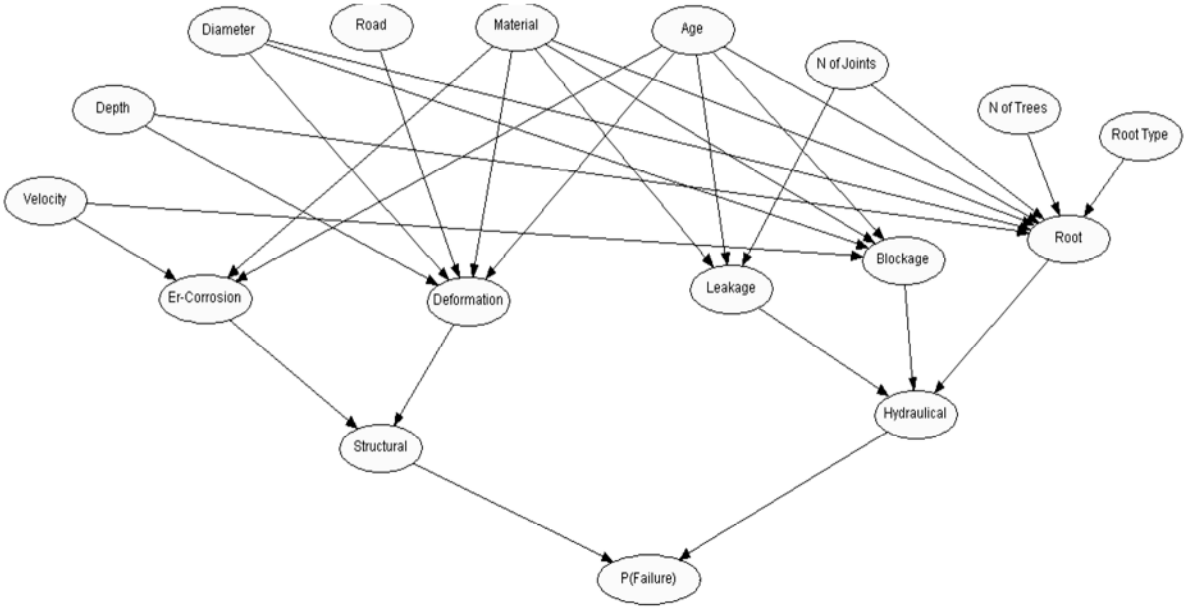
Archive of SID

روابط علت و معلولی آن‌ها بر اساس داده‌های مشاهداتی (داده‌های کالیبراسیون) قابل‌تشخیص است. الگوریتم‌های PC و NPC از معروف‌ترین الگوریتم‌های مورد استفاده در این زمینه هستند [۱۹]. ایده کلی روش PC به‌دست آوردن یک سری عبارت‌های وابستگی یا عدم وابستگی با استفاده از آزمون‌های آماری استقلال شرطی برای هر جفت متغیر در شبکه است که برای هر جفت متغیری که استقلال شرطی بین آن‌ها وجود نداشته باشد (دارای وابستگی شرطی باشند)، یک کمان ارتباطی در نظر گرفته می‌شود. سپس مسیرهایی که به یک گره منتهی می‌شوند، شناسایی شده و بررسی می‌شود که هیچ‌گونه حلقه‌ای در ساختار شبکه نباشد. با استفاده از استقلال‌های شرطی به‌دست آمده، جهت‌های کمان‌ها تعیین می‌شود. نکته‌ای که در مورد الگوریتم PC باید مورد توجه قرار گیرد، عدم توانایی این الگوریتم در تعیین همه جهت‌های کمان‌ها از طریق داده‌های موجود است و بنابراین تعدادی از کمان‌ها به‌صورت تصادفی جهت‌دهی می‌شوند. می‌توان برای حل این مشکل از الگوریتم NPC استفاده نمود که در آن، الگوریتم با تعامل با خبره در مورد کمان‌های نامشخص تصمیم می‌گیرد.

در صورتی که فرد خبره از معماری اولیه شبکه و روابط علت و معلولی بین پارامترها اطمینان داشته باشد، نیازی به آموزش ساختار شبکه نبوده و به‌طور مستقیم می‌تواند وارد مرحله آموزش پارامترهای شبکه بیزین شود.

آموزش پارامترهای مدل، استخراج جداول احتمال شرطی متغیرهای مختلف موجود در شبکه با استفاده از داده‌های موجود است. برای آموزش پارامترها از داده‌های کالیبراسیون که در گام قبل انتخاب شده‌اند، استفاده می‌شود. این داده‌ها ارتباط بین متغیرهای مختلف و وقوع انواع شکست در شبکه را نشان می‌دهد و شبکه بیزین با آموزش پارامترها در واقع ارتباط احتمالاتی بین این متغیرها را به‌دست می‌آورد. در این پژوهش برای آموزش پارامترها از الگوریتم EM[1] استفاده شده است. این روش توسط لاریتزن[2] توسعه داده شده است [۲۲]. این روش ابزاری منعطف برای تخمین بیشینه احتمال در مسائل مختلف شامل داده‌های ناقص ارائه می‌دهد. در این الگوریتم فرایند آموزش احتمالات شرطی بین متغیرها با استفاده از داده‌های ورودی مشاهداتی انجام می‌گیرد. الگوریتم EM با انجام تعدادی تکرار، نتایج نهایی احتمالات شرطی را مشخص می‌کند. در هر تکرار لگاریتم احتمال داده مشاهداتی ورودی مربوط به توزیع احتمالاتی محاسبه می‌شود و الگوریتم سعی می‌کند که این مقدار را بیشینه نماید. دو راه برای کنترل تعداد تکرارها وجود دارد: ۱- اگر تفاضل نسبی بین لگاریتم احتمال برای دو تکرار موفق به حد کافی کوچک باشد؛ یعنی تفاضل نسبی بین لگاریتم احتمال برای دو تکرار موفق کوچک‌تر از یک خطای مجاز باشد الگوریتم EM پایان می‌یابد، ۲- در صورت تجاوز از تعداد بیشینه تکرارهای تعیین شده نیز الگوریتم به پایان می‌رسد [۱۹].

[1] EM (Estimation-Maximization) Algorithm
[2] Lauritzen

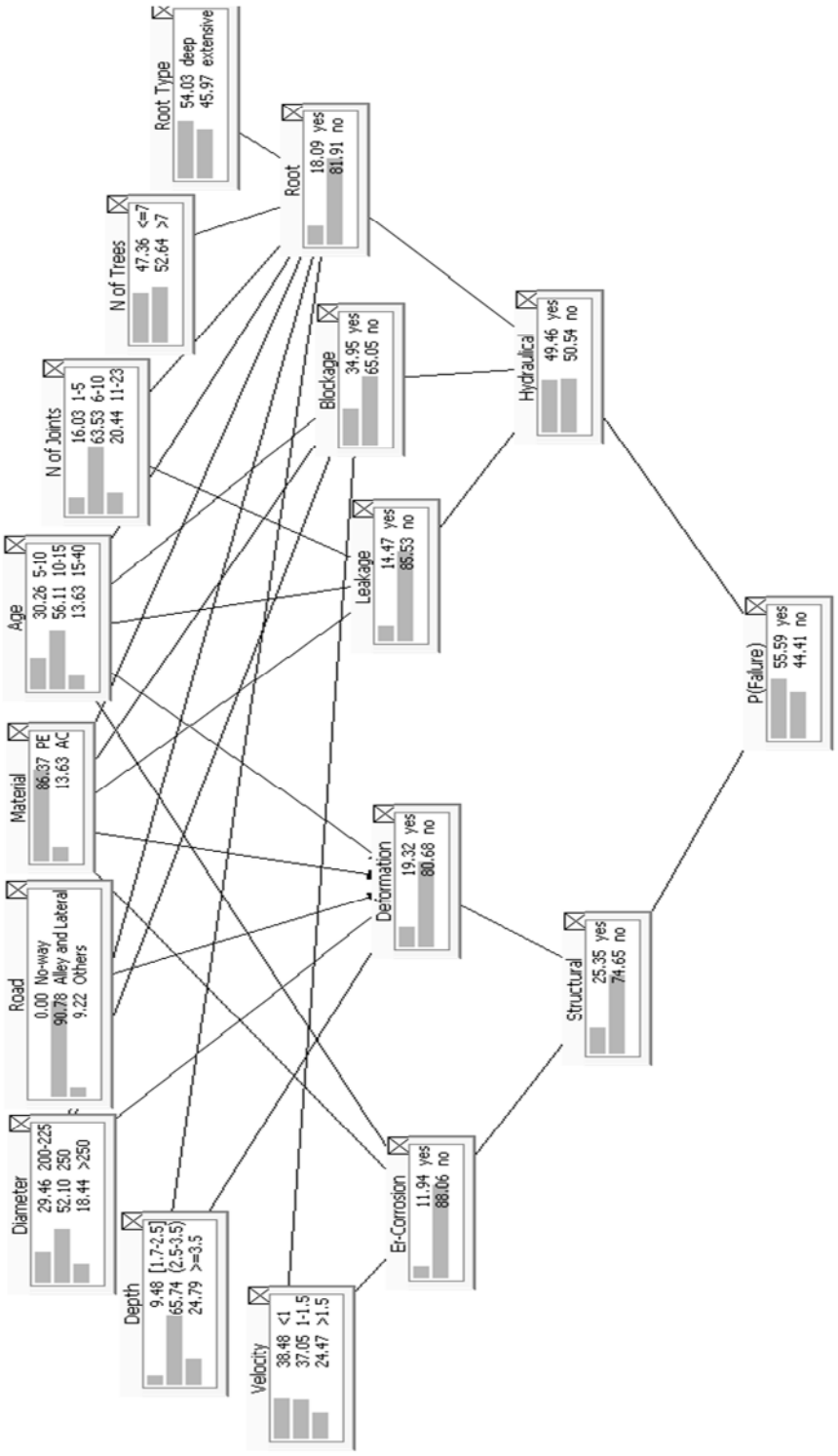


شکل ۲- ساختار شبکه بیزین مطالعه موردی

www.SID.ir

Archive of SID

پس از آموزش شبکه، شبکه آموزش‌دیده اجرا شد که نتیجه به‌دست آمده از اجرای شبکه آموزش‌دیده در شکل ۳ نشان داده شده است. درصدهای نشان داده شده در این شکل برای پارامترهای ورودی، نشان دهنده درصد هر یک از دسته‌های مربوط به آن پارامتر از لحاظ تعداد داده‌های آن دسته در سری داده‌های کالیبراسیون است. در مورد پارامترهای میانی و پارامتر خروجی مدل، اعداد نشان داده شده در این شکل، درصد وقوع شکست یا عدم شکست آسیب مربوطه است.



شکل ۳- شبکه بیزین مطالعه موردی آموزش‌دیده

www.SID.ir

Archive of SID

با استفاده از شبکه آموزش‌دیده و اجراشده حاضر، می‌توان تأثیر هر یک از پارامترها بر آسیب‌ها و شکست‌های مختلف را بررسی نمود. به‌عنوان نمونه، در مورد پارامتر قطر، اگر فرض شود که قطر فاضلابرو مورد نظر در دسته "۲۲۵-۲۰۰" قرار دارد، آسیب گرفتگی لوله به احتمال ۴۱/۷۴ درصد و احتمال رویداد شکست هیدرولیکی و شکست کل به ترتیب برابر ۵۵/۹۱ درصد و ۶۱/۷ درصد است. حال اگر فرض شود که قطر فاضلابرو در دسته سوم یعنی "۲۵۰<" باشد، احتمال رویداد آسیب گرفتگی، شکست هیدرولیکی و شکست کل به ترتیب برابر ۱۶/۹۷، ۳۲/۰۵ و ۴۰/۰۶ درصد خواهد بود که کاهش قابل‌توجهی نسبت به حالت قبل دارد. می‌توان نتیجه گرفت که قطرهای بزرگ‌تر گرفتگی کمتر و شکست‌های هیدرولیکی و به تبع آن احتمال شکست کمتری دارند. برای دیگر پارامترها نیز می‌توان به همین طریق بحث نمود و تاثیر عوامل مختلف را بررسی کرد. همچنین پس از آموزش پارامترهای شبکه بیزین، مشخص است که ۵۵/۵۹ درصد از فاضلابروهای داده‌های کالیبراسیون دارای شکست و ۴۴/۴۱ درصد بدون هیچ‌گونه شکست بوده‌اند. همچنین بیشترین حوادث روی‌داده و ثبت شده در شبکه فاضلاب مربوط به گرفتگی و کمترین حوادث ثبت شده مربوط به فرسایش و خوردگی بوده است. علاوه بر این، درصد شکست‌های هیدرولیکی ثبت شده بیشتر از شکست‌های سازه‌ای (حدود دو برابر) بوده است.

۴-۳- صحت‌سنجی مدل

پس از انجام مراحل آموزش شبکه، باید دقت و صحت پیش‌بینی‌های مدل مورد بررسی قرار گیرد. برای انجام صحت‌سنجی مدل از روابط ۹ تا ۱۱ برای کل شبکه جمع‌آوری فاضلاب استفاده می‌شود

$$MP_t = 100 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left|(P_{obs} - P_{est})_i\right|}{n} \quad (۹)$$

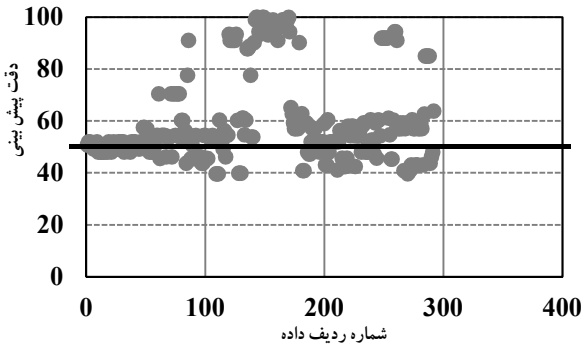
$$MP_F = 100 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left|(P_{obs} - P_{est})_{F,i}\right|}{n} \quad (۱۰)$$

$$MP_{NF} = 100 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left|(P_{obs} - P_{est})_{NF,i}\right|}{n} \quad (۱۱)$$

که در این روابط

MP_t، MP_F و MP_{NF}، به‌ترتیب میانگین دقت مدل برای کل فاضلابروهای موجود، میانگین دقت برای فاضلابروهای دارای شکست و میانگین دقت برای فاضلابروهای بدون شکست در داده‌های صحت‌سنجی هستند که در کل شبکه جمع‌آوری فاضلاب محاسبه می‌شوند. $(P_{obs})_{F,i}$ و $(P_{obs})_{NF,i}$ به ترتیب احتمال شکست و عدم شکست مشاهداتی لوله i ام است که برای فاضلابروهای دارای شکست ۱۰۰ درصد و برای فاضلابروهای بدون شکست صفر درصد خواهد بود. $(P_{est})_{F,i}$ و $(P_{est})_{NF,i}$ نیز احتمال شکست تخمین زده شده توسط مدل برای لوله i ام است که به‌ترتیب برای لوله‌های دارای شکست و بدون شکست هستند. در رابطه ۹، $(P_{obs})_i$ با توجه به وجود شکست یا عدم وجود شکست در لوله i ام، مقدار صفر و یا ۱۰۰ درصد خواهد داشت و $(P_{est})_i$ احتمال شکست تخمین زده شده توسط مدل (بر حسب درصد) برای لوله i ام است. n در این روابط تعداد کل لوله‌های مرتبط با هر رابطه است. دلیل انجام صحت‌سنجی با استفاده از روابط جداگانه برای پیش‌بینی شکست و عدم شکست این است که معمولا مدل شبکه بیزین دقت بالاتری برای پیش‌بینی عدم شکست دارد و علاوه بر این، دقت پیش‌بینی شکست‌های شبکه از اهمیت بالاتری برای تصمیم‌گیران برخوردار است.

شکل ۴، نمودار دقت پیش‌بینی تمامی داده‌های صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. هر یک از نقاط نشان داده شده در این نمودار نماینده یکی از داده‌های صحت‌سنجی است و خط مشخص‌شده در نمودار، حداقل دقت مطلوب است. میزان دقت پیش‌بینی برای کل لوله‌های شبکه (داده‌های صحت‌سنجی) (MP_t) برابر ۶۲/۳۹ درصد، برای لوله‌های دارای شکست (MP_F) ۴۷/۶۵ درصد و برای لوله‌های بدون شکست (MP_{NF}) برابر ۶۷/۹۶ درصد به‌دست آمد که با توجه به کمبود شدید داده‌ها (تنها داده‌های یک سال در دسترس بوده است) در شرایط فعلی قابل قبول هستند.



شکل ۴- دقت پیش‌بینی مدل برای داده‌های صحت‌سنجی

۴-۴- دریافت خروجی مدل

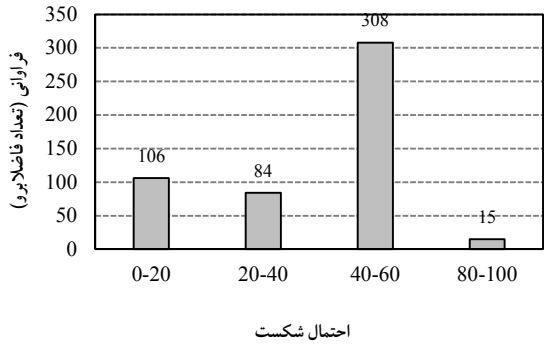
گام نهایی مدل مورد استفاده، ورود داده‌های عوامل یا پارامترهای مربوط به شبکه جمع‌آوری فاضلاب مورد مطالعه به شبکه بیزین

www.SID.ir

Archive of SID

آموزش دیده و دریافت خروجی مدل که همان احتمال رویداد شکست در هر فاضلابرو است، می‌باشد. برای این منظور پس از انجام مراحل آموزش شبکه بیزین، شبکه اجرا می‌شود؛ به این معنا که در مورد متغیرهای مختلف با استفاده از استنباط در شبکه بیزین، احتمال هر دسته مربوط به طبقه‌بندی آن متغیر با استفاده از جداول احتمالات شرطی (CPT) محاسبه می‌شود. در مرحله بعد برای هر یک از عوامل ذکر شده مؤثر در شکست‌های سازه‌ای و هیدرولیکی (گره‌های بالایی شبکه بیزین ایجاد شده)، در مورد هر فاضلابرو دسته مناسب در دسته‌بندی مربوط به آن عامل را مشخص نموده و پس از اجرای شبکه بیزین، احتمال شکست مربوط به آن فاضلابرو مشخص می‌شود. در این مرحله استنباط در شبکه بیزین با استفاده از داده‌های ورودی مربوط به آن فاضلابرو و با استفاده از همان جداول احتمالات شرطی، انجام می‌گیرد و احتمال شکست نهایی هر فاضلابرو را مشخص می‌نماید. از ویژگی‌های شبکه‌های بیزین امکان استفاده از نظرات کارشناسی در صورت عدم وجود داده‌های مربوط به یک عامل خاص است. به این منظور در صورت عدم وجود داده‌های مشاهداتی در مورد یک عامل، می‌توان از نظرات کارشناسان برای تعیین آن پارامتر و پر کردن جداول احتمال شرطی مربوط به آن استفاده نمود. علاوه بر آن در صورتی که کارشناس نیز نظر و اطلاع دقیق در مورد آن پارامتر نداشته باشد، شبکه بیزین به دسته‌های مختلف آن پارامتر احتمال مساوی اختصاص می‌دهد.

شکل ۵ نشان‌دهنده تعداد فاضلابروهایی است که در دسته‌های احتمال شکست مشخص شده، قرار گرفته‌اند. اگر میزان احتمال رویداد شکست "۲۰-۰"، "۴۰-۲۰"، "۶۰-۴۰"، "۸۰-۶۰" و "۱۰۰-۸۰" به ترتیب خیلی کم، کم، متوسط، متوسط تا زیاد و زیاد در نظر گرفته شود، احتمال شکست ۱۰۶ فاضلابرو خیلی کم (۲۱ درصد)، احتمال شکست ۸۴ فاضلابرو کم (۱۶ درصد)، احتمال شکست ۳۰۸ فاضلابرو متوسط (۶۰ درصد) و احتمال شکست ۱۵ فاضلابرو زیاد (۳ درصد) است.



شکل ۵- نمودار تعداد فاضلابروها در هر دسته احتمال رویداد شکست

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتم محاسبه احتمال رویداد شکست در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با استفاده از شبکه‌های بیزین معرفی شد و کاربرد آن در بخشی از شبکه جمع‌آوری فاضلاب منطقه ۳ آبفای تهران نشان داده شد. با توجه به مشکل کمبود داده در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب، لازم بود که با استفاده از روشی مناسب، از تلفیق داده‌های ناقص موجود و نظرات خبرگان برای تحلیل ریسک این زیرساخت‌های مهم شهری استفاده شود. علاوه بر این، به‌دلیل دشواری و هزینه‌بر بودن دسترسی به این زیرساخت‌های مدفون، ضرورت ایجاد روشی برای ارزیابی شرایط این سامانه‌ها با توجه به عوامل مرتبط احساس می‌شد. لذا مدل ارائه شده در این تحقیق، تلاشی برای رفع این خلل در سیستم مدیریت زیرساخت شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب است.

در این تحقیق شکست‌ها و آسیب‌های سازه‌ای و هیدرولیکی عمده موجود در شبکه‌ها به طور هم‌زمان دیده شدند مانند آسیب‌هایی از جمله فرسایش، خوردگی، ترک‌خوردگی، گرفتگی، عدم آب‌بندی و غیره و احتمال رویداد شکست در قالب الگوریتم معرفی شد که شامل چهار گام اساسی جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، آموزش شبکه بیزین، صحت‌سنجی مدل آموزش دیده و دریافت خروجی مدل بود. برای کاربرد شبکه بیزین در این مطالعه از نرم‌افزار هیوگین استفاده شد. با توجه به نتایج صحت‌سنجی، دقت پیش‌بینی مدل تقریبا قابل قبول بود. البته در صورت امکان استفاده از تعداد داده بیشتر، با دوره زمانی طولانی‌تر، با دقت بالاتر و در منطقه جغرافیایی وسیع‌تر برای کالیبراسیون مدل، قطعا می‌توان به دقت‌های بالاتری دست یافت. نتایج خروجی به‌دست آمده از مدل برای مطالعه موردی تحقیق، نشان‌دهنده احتمال شکست خیلی کم و کم (۳۷ درصد) و متوسط (۶۰ درصد) برای اکثر فاضلابروهای موجود در شبکه است که البته جوان بودن بخش عمده شبکه جمع‌آوری فاضلاب تهران، می‌تواند از جمله عوامل آن باشد. شبکه بیزین به‌دست آمده برای شبکه جمع‌آوری فاضلاب منطقه مورد مطالعه، با توجه به قابلیت به روزرسانی شبکه‌های بیزین، در هر زمانی که داده‌های کامل‌تری به‌دست آید و یا آمار حوادث ثبت‌شده افزایش یابد، می‌تواند مورد بازنگری قرار گرفته و کارایی آن افزایش داده شود. از خروجی الگوریتم حاضر می‌توان در اولویت‌بندی بازرسی فاضلابروهای موجود در شبکه استفاده نمود و عملکرد و کارایی شبکه را افزایش داد و همچنین با استفاده در برنامه‌های تحلیل و مدیریت ریسک، مانع از وقوع بحران در این زیرساخت حیاتی شد.

www.SID.ir

Archive of SID

۶- قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از همکاری‌های صمیمانه متخصصان و کارشناسان محترم شرکت آب و فاضلاب استان تهران و شرکت آب و فاضلاب منطقه ۳ تهران که اطلاعات ارزشمندی در اختیار این پروژه قرار دادند، قدردانی نمایند.

۷- مراجع

1. Grigg, N. S. (2003). *Water, wastewater, and stormwater infrastructure management*, Lewis Pub., Boca Raton, Florida.
2. Khan, Z., Zayed, T., and Moselhi, O. (2009). "Simulating impact of factors affecting sewer network operational condition." *Proc. of CSCE 2009 Annual General Conference*, Montreal, Canada, 285-294.
3. Hahn, M., Palmer, R., and Merrill, M. (1999). "Prioritizing sewer line inspection with an expert system." *Proc. of ASCE, 29th Annual Water Resources Planning and Management Conference*, Tempe, Arizona, United States, 1-9.
4. Hahn, M. A., Palmer, R. N., Merrill, S. M., and Lukas, A. B. (2002). "Expert system for prioritizing the inspection of sewers: Knowledge base formulation and evaluation." *J. Water Resources Planning and Management*, 128(2), 121-129.
5. Najafi, M., and Kulandaivel, G. (2005). "Pipeline condition prediction using neural network models." *Proc. of Pipeline: Optimizing Pipeline Design, Operations and Maintenance in Today's Economy*, ASCE, Reston, VA., 767-781.
6. Baik, H. S., Jeong, H. S., and Abraham, D. M. (2006). "Estimating transition probabilities in Markov chain-based deterioration models for management of wastewater systems." *J. Water Resources Planning and Management*, 132(1), 15-24.
7. Babani, J., Adams, B. J., and Wilson, B. G. (2008). "Integrating hydraulic and environmental performance assessments in asset management of wastewater collection networks." *Proc. of the 11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK.
8. Wang, C., Niu, Z., Jia, H., and Zhang, H. (2010). "An assessment model of water pipe condition using Bayesian inference." *J. Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 11(7), 495-504.
9. Tavakolifar, H. (2008). "Developing of evaluation and readiness enhancement algorithm for urban water treatment systems against crisis." MSc. Thesis, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran. (In Persian)
10. FEMA. (2005). *A how to guide to mitigate potential terrorist attacks against buildings*, Risk Management Series, FEMA 452, USA.
11. Badali Bavani, E. (2012). "Developing an algorithm for risk management of wastewater treatment plants in crisis situations." MSc. Thesis, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran. (In Persian)
12. Asgarian, M. (2012). "An algorithm for assessment of wastewater collection network readiness in crisis situations by multi criteria decision making." MSc. Thesis, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran. (In Persian)
13. Roozbahani, A., Zahraie, B., and Tabesh, M. (2013). "Integrated risk assessment of urban water supply systems from source to tap." *J. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(1), 923-944.
14. Roozbahani, A. (2012). "Risk based decision making model for urban water systems." PhD Thesis, School of

www.SID.ir

Archive of SID

Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran. (In Persian)

15. Heckerman, D. (1996). A tutorial on learning with Bayesian networks, Microsoft Research Advanced Technology Division, Microsoft Corporation, Redmond, Washington, USA.
16. Nikoo, M. R., and Kerachian, R. (2009). "Evaluating the efficiency of Bayesian networks in river quality management: Application of the Trading-Ratio System." *J. Water and Wastewater*, Vol.19.No.1 (65), 23-33. (In Persian)
17. ASCE. (1994). *Existing sewer evaluation and rehabilitation*, ASCE 62, New York.
18. Neapolitan, R. E. (2004). *Learning Bayesian networks*, Prentice Hall, New Jersey, US.
19. HUGIN EXPERT A/S, (2012). Hugin researcher userguide, Version 7.6, Aalborg, Denmark.
20. Kulkarni, R. B., Golabi, K., and Chuang, J. (1986). *Analytical techniques for selection of repair-or-replace options for cast-iron gas piping systems-Phase I*, Gas Research Institute, Chicago, Illinois.
21. Management and Planning Organization of Tehran Urban Developing Plans. (2006). "Strategic-structural plan of Tehran development (Tehran comprehensive plan)." Housing and Urbanization Ministry, Tehran Municipality, Tehran, Iran. (In Persian)
22. Lauritzen, S. L. (1995). "The EM algorithm for graphical association models with missing data." J. Computational Statistics and Data Analysis, 19(1), 191-201.

www.SID.ir