



کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵

1295P-NWWCE

## تحلیل اطمینان‌پذیری سیستم تصفیه و بازیافت پساب شهرک صنعتی مورچه‌خورت با استفاده

### از روش شبکه بیزی

راضیه انالوئی<sup>۱</sup>، مسعود طاهر یون<sup>۲</sup>، حمیدرضا صفوی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان

r\_analoei@yahoo.com

#### خلاصه

امروزه استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده در بخش‌های مختلفی از قبیل کشاورزی، صنعت و آبیاری فضای سبز به راه‌حلی مناسب برای جبران کمبود آب تبدیل شده است. به دلیل احتمال وجود آلاینده‌های مختلف در فاضلاب و عدم تصفیه کامل منطبق بر استانداردها، این امر همواره با ریسک و عدم اطمینان همراه است. لذا به منظور تعیین وضعیت اطمینان‌پذیری و ارائه راهکارهای ارتقاء آن در سیستم تصفیه فاضلاب، بایستی ارزیابی ریسک صورت گیرد. ریسک بیانگر احتمال وقوع یک رخداد نامطلوب به همراه شدت اثرات منفی آن می‌باشد. در تحقیق حاضر از روش شبکه بیزی برای ارزیابی ریسک سیستم تصفیه فاضلاب استفاده شده است. در این روش با ایجاد رابطه علت و معلولی بین اجزاء سیستم، می‌توان احتمال رخداد یک رویداد در سیستم را به دست آورد. مطالعه موردی در این پژوهش، سیستم تصفیه فاضلاب شهرک صنعتی مورچه‌خورت است. رویداد نهایی مورد بررسی در مدل، ایجاد پیامد رسوب، خوردگی و بیوفیلم حاصل از استفاده پساب در تأسیسات صنعتی شهرک صنعتی می‌باشد. داده‌های ورودی به مدل از طریق نظرات کارشناسان و متخصصان و داده‌های آزمایشگاهی تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت تهیه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با احتمال ۷۰ درصد سیستم تصفیه فاضلاب قادر به تأمین پساب با کیفیت مناسب برای مصارف صنعتی خواهد بود. همچنین کارایی مدل شبکه بیزی در تحلیل عوامل شکست و تخمین ریسک ناشی از عدم تطابق پساب خروجی با استانداردهای موردنظر صنایع نشان داده شده است.

**کلمات کلیدی:** تصفیه‌خانه فاضلاب، ارزیابی ریسک و اطمینان‌پذیری، روش شبکه بیزی Bayesian Network، پساب

#### ۱. مقدمه

یک تصفیه‌خانه فاضلاب دارای واحدهای مختلف فرآیندی و الکترومکانیکی می‌باشد که در صورت بروز اشکال در هر واحد، تصفیه‌خانه قادر نخواهد بود کیفیت مناسب خروجی پساب را مطابق استانداردهای زیست‌محیطی تأمین نماید. ریسک بیانگر احتمال وقوع یک رویداد نامطلوب در سیستم و شدت اثرات منفی آن می‌باشد. اطمینان‌پذیری عکس مفهوم ریسک بوده و عبارت است از احتمال اینکه سیستم یک عمل یا کارکرد موردنیاز را بدون نقص تحت موقعیت‌های تعیین شده برای یک دوره معین زمانی انجام دهد [۱].

یکی از روش‌های کارآمد ارزیابی ریسک و اطمینان‌پذیری سیستم روش شبکه بیزی<sup>۱</sup> می‌باشد. شبکه بیزی یک دیاگرام احتمالاتی برای نمایش روابط علل و معلولی بین اجزاء یک سیستم می‌باشد. در واقع روش بیزی کمک می‌کند تا با استفاده از احتمالات شرطی بین اجزاء یک سیستم، بتوان ارزیابی اطمینان‌پذیری سیستم مورد مطالعه را انجام داد. شبکه بیزی با دو بخش کیفی و کمی وابستگی چندین متغیر مؤثر بر یکدیگر را نشان می‌دهد. در نتیجه می‌توان از شبکه‌های بیزی برای تصمیم‌گیری و استدلال در شرایط عدم قطعیت استفاده کرد [۲].

<sup>1</sup> Bayesian Network



شرکت مهندسی آب و فاضلاب کهر

## کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

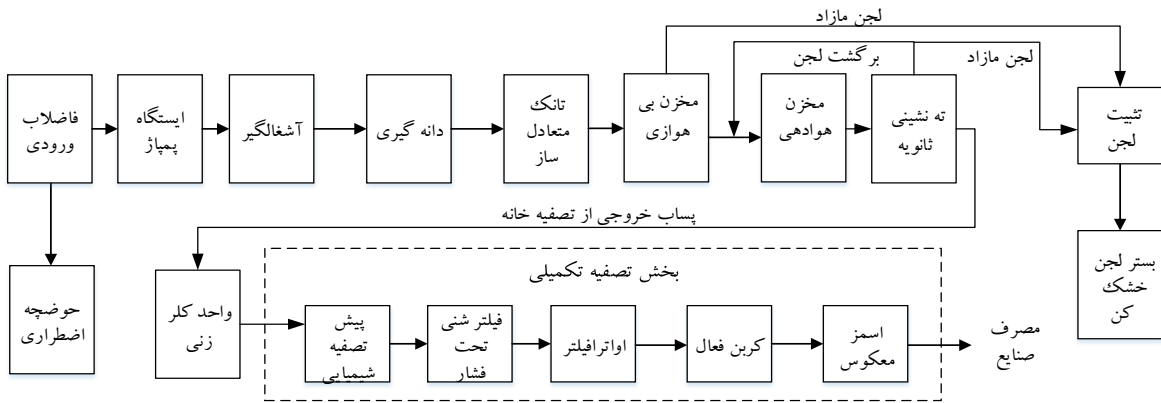
۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



در ادامه به بررسی چند مطالعه مرتبط با تحقیق حاضر می‌پردازیم. محمد رحمان و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از شبکه بیزی به ارزیابی شوری زمین‌های کشاورزی بر اثر آبیاری پساب حاصل از تصفیه فاضلاب پرداخته‌اند. داده‌های مورد استفاده در مدل با استفاده از انجام آزمایش‌هایی بر روی خاک منطقه مورد مطالعه و پساب مورد استفاده انتخاب شده‌اند. آبیاری منطقه مورد مطالعه با استفاده از پساب مدت ۲۰ سال بوده است. نتایج نشان می‌دهد که شوری خاک در طی این ۲۰ سال افزایش زیادی یافته است. یکی از پیشنهادها پژوهش برای کاهش شوری خاک استفاده از اسمز معکوس برای تصفیه تکمیلی می‌باشد [۳]. کاهونگ تانگ و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از شبکه بیزی به ارزیابی ریسک آلودگی پروژه انتقال کانال روباز آب از جنوب به شمال چین پرداخته‌اند. عوامل ایجاد ریسک در سیستم انتقال آب سه عامل شرایط جاده، کامیون‌های عبوری از روی پل و عوامل انسانی می‌باشند. در نهایت مشخص شد احتمال وجود ریسک در این پروژه تنها ۶ درصد می‌باشد که مهم‌ترین آن عوامل انسانی می‌باشد [۴]. گلم کبیر و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی با استفاده از شبکه بیزی به ارزیابی ریسک سیستم توزیع آب شهری پرداخته‌اند. مطالعه موردی در این تحقیق سیستم توزیع آب شهر کلگری کانادا بوده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد تنها ۶/۲ و ۸/۲ درصد از کل لوله‌های سیستم توزیع آب شهری در نرخ شکست بالا و بسیار بالا قرار دارند. مدل ارائه شده برای شناسایی لوله‌های آسیب‌پذیر و حساس سیستم تصفیه آب به کار می‌رود. در نتیجه می‌توان تعداد لوله‌هایی را که نیاز به تعمیر و نگهداری دارند شناسایی کرد [۵]. طاهریون و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از روش شبکه‌های بیزی به ارزیابی ریسک استفاده از فاضلاب در بخش کشاورزی پرداخته است. در این پژوهش با ایجاد شبکه احتمالاتی بیزی و استفاده از نرم‌افزار HUGIN میزان ریسک استفاده از فاضلاب در بخش کشاورزی بر دو اثرپذیرنده انسان و گیاه تعیین گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان ریسک ناشی از خطرات موجود بر اثر پذیرندگان انسان و گیاه به ترتیب ۴۶٪ و ۳۸٪ می‌باشد. همچنین آلاینده کادمیوم بیشترین سهم را در ایجاد ریسک دارند و دترجنت و نیترات در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند [۲]. در پژوهش حاضر سعی شده تا الگویی برای ارزیابی ریسک سیستم تصفیه فاضلاب و استفاده مجدد از پساب در تأسیسات صنعتی با استفاده از شبکه بیزی تدوین گردد. در این مدل رابطه علت و معلولی بین اجزاء مختلف سیستم تصفیه فاضلاب در تأمین پساب با کیفیت مناسب برای مصارف صنعتی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

## ۲. مطالعه موردی

مطالعه موردی منتخب پژوهش حاضر تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه خورت واقع در استان اصفهان می‌باشد. تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه خورت در ۲ فاز اجرایی به بهره‌برداری رسیده است. فاز اول شهرک در سال ۱۳۸۸ و با ظرفیت ۸۰۰ مترمکعب در روز و فاز دوم آن در سال ۱۳۹۱ و با ظرفیت ۱۲۰۰ مترمکعب در روز مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. از سال ۱۳۹۲ پساب حاصل از تصفیه فاز ۲ بعد از عبور از سیستم تصفیه تکمیلی در اختیار صنایع موجود در شهرک قرار گرفته و تا امروز بخشی از آب مورد نیاز صنایع که شامل صنایع غذایی، نساجی، بسته‌بندی، ماشین‌آلات صنعتی و شیمیایی می‌باشند را تأمین می‌کند. فلودیاگرام تصفیه‌خانه در شکل ۱ نشان داده شده است. فرآیندهای مورد استفاده در این تصفیه‌خانه شامل حوضچه اضطرابی، آشغال‌گیر، دانه‌گیر و چربی‌گیر، تانک متعادل‌ساز، راکتور بی‌هوازی با فلدار با جریان رو به بالا، راکتور لجن فعال با بستر معلق، حوضچه ته‌نشینی مستطیلی و حوضچه کلرزنی می‌باشد. بخش تصفیه تکمیلی نیز شامل واحدهایی از قبیل پیش تصفیه شیمیایی، فیلتر شنی، اولترا فیلتر، کربن فعال و اسمز معکوس می‌باشد. در این مطالعه به بررسی ریسک‌های بخش تصفیه‌خانه و تصفیه تکمیلی شهرک صنعتی مورچه خورت پرداخته می‌شود.



شکل ۱. فلودیاگرام تصفیه خانه شهرک صنعتی مورچه خورت

### ۳. روش تحقیق

شبکه بیزی یک دیاگرام احتمالاتی برای نمایش روابط علل و معلولی بین اجزاء یک سیستم می باشد. با استفاده از این مدل می توان وابستگی چندین متغیر مؤثر بر یکدیگر را نشان داد. این روش بر اساس تئوری احتمال بوده و تکنیک مؤثری برای تصمیم سازی در مواردی است که امکان جمع آوری داده های کافی برای کاهش عدم قطعیت ها موجود نیست [۲]. روش BN بر پایه قانون بیزا بنا شده است. به ساده ترین شکل می توان قانون را به صورت زیر بیان کرد [۶]:

$$P(X|Y) = \frac{P(Y|X)P(X)}{P(Y)} \quad (1)$$

در فرمول (۲)  $P(X|Y)$  احتمال رخداد رویداد X به شرط وقوع رویداد Y می باشد.  $P(Y|X)$  احتمال وقوع رویداد Y به شرط رخداد رویداد X می باشد،  $P(X)$  احتمال وقوع رویداد X و  $P(Y)$  احتمال وقوع رویداد Y هستند. در واقع شبکه بیزی مدلی گرافیکی است که روابط احتمالاتی بین تعداد زیادی از متغیرها را نمایش می دهد. با استفاده از این روش رابطه بین علت ها و معلول ها برقرار می شود و می توان احتمال رخداد یک رویداد در سیستم را با استفاده از اثرات سایر اجزاء سیستم به دست آورد. هر یک از متغیرهای تصمیم گیری در روش BN به صورت یک گره مدل می شوند. گره ها توسط پیکان هایی که نشان دهنده جهت اثر و رابطه علت و معلول می باشد به هم متصل می شوند. برای هر گره حالت های مختلف در نظر گرفته می شود و برای هر یک از حالت ها نیز درصدی به عنوان احتمال وقوع منظور می شود [۳]. در نتیجه می توان احتمال آخرین گره را که از گره های ماقبل خود تأثیر می پذیرد به دست آورد. به منظور تعیین چگونگی تأثیر یک گره بر روی سایر گره ها از جدول احتمالات شرطی ۳ یا CPT استفاده می شود. در واقع در این جدول مقدار احتمال هر گره در حالت های مختلف مثلاً موفقیت و شکست و تحت تأثیر گره های ماقبل قرار می گیرند. در نهایت از نرم افزار HUGIN، به منظور تشکیل مدل بیزی و تحلیل مدل استفاده می شود [۷].

### ۴. نتایج و بحث

مدل بیزی تشکیل شده در نرم افزار برای تصفیه خانه فاضلاب شهرک صنعتی مورچه خورت و بخش تصفیه تکمیلی در شکل ۲ نمایش داده شده است. با توجه به شکل روابط علل و معلولی رویدادهای اولیه و میانی با گره پیامد نشان داده شده است. تمامی گره ها به جز گره پیامد دارای یک احتمال موفقیت و شکست می باشند. گره های پایه علتی هستند برای ایجاد گره های میانی پس برای آن ها احتمال شرطی تعریف نمی شود. گره های میانی دارای احتمال

<sup>1</sup> Bayes

<sup>2</sup> Edges

<sup>3</sup> Conditional Probability Table





## کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵

جدول ۱. CPT ورود مواد سمی بالا به حوض هوادهی

C1	NO		Yes	
	NO	Yes	NO	Yes
C2				
NO	0.97	0.4	0.5	0.01
Yes	0.03	0.6	0.5	0.99

با توجه به جدول ۱ ورود مواد سمی بالا به حوض هوادهی ناشی از دو عامل C1 (خطای اپراتور) و C2 (عدم کارکرد مناسب حوضچه اضطراری) می باشد. در نتیجه با توجه به جدول ۱ احتمال عدم ورود مواد سمی بالا به حوض هوادهی به شرط عدم وجود خطای اپراتور و کارکرد مناسب حوضچه اضطراری ۹۷ درصد و احتمال شکست ۳ درصد می باشد. اگر خطای اپراتور رخ ندهد ولی حوضچه اضطراری به درستی کار نکند موفقیت حوض هوادهی در عدم ورود مواد سمی بالا ۴۰ درصد و عدم موفقیت ۶۰ درصد می باشد. در واقع ورود یا عدم ورود مواد سمی بالا به حوض هوادهی به وقوع یا عدم وقوع خطای اپراتور و کارکرد نامناسب حوضچه اضطراری بستگی دارد. پس از تشکیل و تحلیل شبکه بیزی توسط نرم افزار HUGIN احتمال وقوع هر گره و گره پیامد به دست آمده است. نتایج حاصل از تحلیل برای گره های مهم و کلیدی شبکه بیزی به جز گره پیامد تصفیه خانه شهرک صنعتی مورچه خورت در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. نتایج حاصل از تحلیل شبکه بیزی تصفیه خانه شهرک صنعتی مورچه خورت به استثناء گره پیامد

نام رویداد	احتمال موفقیت (درصد)	احتمال شکست (درصد)
کیفیت نامناسب خروجی تصفیه خانه	۷۴	۲۶
کارکرد نامناسب حوض ته نشینی	۷۸	۲۲
کارکرد نامناسب سیستم هوادهی	۸۲	۱۸
کارکرد نامناسب سیستم پیش تصفیه شیمیایی	۷۵	۲۵
کارکرد نامناسب سیستم فیلتر شنی	۸۲	۱۸
کارکرد نامناسب سیستم اولترافیلتراسیون	۸۳	۱۷
کارکرد نامناسب سیستم کربن فعال	۷۶	۲۴
کارکرد نامناسب سیستم اسمز معکوس	۸۹	۱۱

با توجه به جدول ۱ احتمال وقوع کیفیت نامناسب خروجی تصفیه خانه شهرک صنعتی ۲۶ درصد می باشد. در نتیجه بخش تصفیه خانه شهرک صنعتی مورچه خورت عملکرد مناسبی برابر ۷۴ در تأمین پساب به منظور ورود به بخش تصفیه تکمیلی دارد. همچنین حوض ته نشینی و حوض هوادهی به ترتیب با ۷۸٪ و ۸۲٪ عملکردی مناسبی در بخش تصفیه خانه دارند. لذا احتمال وقوع کیفیت نامناسب بخش خروجی تصفیه خانه، بیشتر ناشی از کارکرد نامناسب حوض ته نشینی می باشد. از طرفی بخش تصفیه تکمیلی شامل پیش تصفیه شیمیایی، فیلتر شنی، اولترافیلتر، کربن فعال و اسمز معکوس به ترتیب با احتمال ۷۵٪، ۸۲٪، ۸۳٪، ۷۶٪ و ۸۹٪ قادر به تأمین پساب مطابق با استانداردها زیست محیطی می باشند. همچنین احتمال گره پیامد که در سه دسته تقسیم بندی شده است در جدول ۳ نشان داده شده است. احتمال وقوع رویداد A1 یعنی عدم وقوع رسوب و خوردگی و بیوفیلم در تأسیسات صنعتی برابر ۷۰ درصد، رخداد رسوب و خوردگی و بیوفیلم در تأسیسات صنعتی در بلندمدت ۲۴ درصد و رخداد رسوب و خوردگی و بیوفیلم در تأسیسات صنعتی در کوتاه مدت ۶ درصد تعیین گردیده است.

جدول ۳. احتمال وقوع گره پیامد مدل بیزی تصفیه خانه شهرک صنعتی مورچه خورت

نماد	احتمال پیامد (درصد)	پیامد
A1	۷۰	عدم وقوع رسوب و خوردگی و بیوفیلم در تأسیسات صنعتی
A2	۲۴	رخداد رسوب و خوردگی و بیوفیلم در تأسیسات صنعتی در بلندمدت
A3	۶	رخداد رسوب و خوردگی و بیوفیلم در تأسیسات صنعتی در کوتاه مدت



شرکت مهندسی آب و فاضلاب کتور

## کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



در نهایت احتمال موفقیت کل سیستم تصفیه فاضلاب شهرک صنعتی مورچه خورت در تأمین آب با کیفیت مناسب برای مصارف صنعتی با استفاده از روش شبکه بیزی برابر ۷۰ درصد و احتمال شکست سیستم در تأمین آب با کیفیت مناسب برای مصارف صنعتی آن برابر ۳۰ درصد تعیین گردیده است. به منظور کاهش ریسک های سیستم و افزایش اطمینان پذیری پیشنهادهایی از قبیل تهیه نظام مند مدیریت بحران، افزایش سطح دانش فنی اپراتورهای تصفیه خانه به منظور کاهش خطاهای انسانی، استفاده از تجهیزات الکترونیک جهت پایش سیستم های موجود، سرویس و تعمیر بخش های مختلف تصفیه خانه به صورت منظم و دوره ای، افزایش نیروی کار جهت بالا بردن دقت بررسی ها و سرویس تجهیزات، تجهیز کردن آزمایشگاه تصفیه خانه فاضلاب شهرک صنعتی مورچه خورت و انجام آزمایش های مرتب دوره ای پارامترهای مختلف مطابق با استاندارد پساب های صنعتی ارائه می شود.

### ۵. نتیجه گیری

در تحقیق حاضر سعی شده است تا با استفاده از روش شبکه بیزی الگویی جهت ارزیابی ریسک و اطمینان پذیری سیستم تصفیه فاضلاب ارائه گردد. مدل بیزی بر اساس تعیین احتمال هر گره و احتمال شرطی هر گره نسبت به گره های پیشین خود عمل می کند و در نهایت می توان احتمال وقوع گره نهایی را تعیین کرد. مطالعه موردی انتخاب شده سیستم تصفیه فاضلاب شهرک صنعتی مورچه خورت می باشد. این تصفیه خانه در دو بخش تصفیه خانه اصلی و بخش تصفیه تکمیلی بخشی از آب صنایع موجود در شهرک به منظور استفاده در بخش های مختلفی از قبیل برج های خنک کننده، بویلرها، آب مصرفی در صنایع مختلفی مانند نساجی، پلاستیک و لاستیک، فولاد و آهن، صنایع غذایی و آب شست و شو را شامل می شوند، تهیه می کند. با تشکیل شبکه بیزی تصفیه خانه فاضلاب شهرک صنعتی مورچه خورت و تحلیل مدل بیزی احتمال وقوع رویداد عدم وقوع رسوب و خوردگی و بیوفیلم در تأسیسات صنعتی برابر ۷۰ درصد، ایجاد رسوب و خوردگی و بیوفیلم در تأسیسات صنعتی در بلندمدت ۲۴ درصد و ایجاد رسوب و خوردگی و بیوفیلم در تأسیسات صنعتی در کوتاه مدت ۶ درصد تعیین گردیده است. در نتیجه احتمال موفقیت کل سیستم تصفیه فاضلاب شهرک صنعتی مورچه خورت با استفاده از روش شبکه بیزی برابر ۷۰ درصد می باشد. در نهایت به منظور کاهش ریسک های سیستم و افزایش اطمینان پذیری پیشنهادهایی از قبیل تهیه نظام مند مدیریت بحران، افزایش سطح دانش فنی اپراتورهای تصفیه خانه به منظور کاهش خطاهای انسانی، استفاده از تجهیزات الکترونیک جهت پایش سیستم های موجود، سرویس و تعمیر بخش های مختلف تصفیه خانه به صورت منظم و دوره ای، افزایش نیروی کار جهت بالا بردن دقت بررسی ها و سرویس تجهیزات، تجهیز کردن آزمایشگاه تصفیه خانه فاضلاب شهرک صنعتی مورچه خورت و انجام آزمایش های مرتب دوره ای پارامترهای مختلف مطابق با استاندارد پساب های صنعتی ارائه گردیده است.

### ۶. تشکر و قدردانی

این تحقیق با همراهی دکتر سید علیرضا مؤمنی مدیر محیط زیست شرکت شهرک های صنعتی استان اصفهان، خانم مهندس مهناز حیدری مدیر تصفیه خانه شهرک صنعتی مورچه خورت، خانم مهندس حمیده ابراهیمی کارشناس تصفیه خانه شهرک صنعتی مورچه خورت و آقای مهندس حمید ارومیه طراح بخش تصفیه تکمیلی تصفیه خانه مورچه خورت انجام گردیده است. که بدین وسیله از زحمات این عزیزان تشکر می گردد.

### ۷. مراجع

۱. طاهریون، م. بهرامی، م. مرادی نژاد، ص. (۱۳۹۳)، ارزیابی اطمینان پذیری تصفیه خانه فاضلاب شهری با استفاده از آنالیز درخت خطا، نشریه تحقیقات آب ایران، دوره ۱۰، ۲، صفحه ۱-۱۱.



کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



۲. طاهریون، م. علوی، م. احمدی، آ. (۱۳۹۵)، تحلیل ریسک استفاده از پساب تصفیه شده در کشاورزی با استفاده از شبکه بی‌زی، نشریه

علمی-پژوهشی امیرکبیر-مهندسی عمران و محیط زیست، دوره ۴۸، شماره ۱، صفحه ۱۰۱-۱۱۰.

3. Rahman, M.M. Hagare, D. Maheshwari, B. (2016), *Bayesian Belief Network analysis of soil salinity in a peri-urban agricultural field irrigated with recycled water*, Agricultural Water Management, Volume 176, Pages 280-296.
4. Tang, C. Yi, Y. Yang, Zh. Sun, J. (2016), "Risk forecasting of pollution accidents based on an integrated Bayesian Network and water quality model for the South to North Water Transfer Project," Ecological Engineering, Volume 96, Pages 109-116.
5. Kabir, G. Demissie, G. Sadiq, R. Tesfamariam, S. (2015), *Integrating failure prediction models for water mains: Bayesian belief network based data fusion*, Knowledge-Based Systems, Volume 85, Pages 159-169.
6. B. Kjaerulff, U and L. Madsen, N., (2007). *Bayesian Networks and Influence Diagrams: A Guide to Construction and Analysis*. Springer Science+Business Media, Newyork.
7. WWW.HUGIN.Com