Journal of Water and Wastewater, Vol. 31, No.7, pp: 162-179

Risk Assessment of Using Urban Treated Wastewater for Agricultural and Industrial Application with Bayesian Networks Model

J. Shafiee Neyestanak[1], A. Roozbahani[2], S. E. Hashemi Garmdarreh[3]

1. MSc. Student of Water Resources Engineering, Dept. of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran
(Corresponding Author) roozbahany@ut.ac.ir
3. Assist. Prof., Dept. of Water Engineering, College of Aburaihan, Pakdasht, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received June 30, 2020 Accepted Oct. 5, 2020)

To cite this article:
Shafiee Neyestanak, J., Roozbahani, A., Hashemi Garmdarreh, S. E. 2021. "Risk assessment of using urban treated wastewater for agricultural and industrial application with bayesian networks model" Journal of Water and Wastewater, 31(7), 162-179. Doi: 10.22093/wwj.2020.237516.3044. (In Persian)

Abstract

Urban treated wastewater is a useful resource for allocation to various non-potable reuses because its quantity and quality can be controlled and managed by humans, but it has its limitations. Improper use of these resources without treatment can lead to environmental and health risks and, as a result, can cause social dissatisfaction and sometimes economic problems. This paper examines the risks of limitations associated with the use of treated wastewater. Qualitative information of 26 wastewater treatment plants in the country was collected to create a proper database for risk assessment of using treated wastewater for agricultural and industrial application by taking into account the major factors such as environmental, socio-cultural, economic, and technical. For risks calculation, multiple risks associated with the use of treated wastewater were identified by reviewing various available publications and categorizing them according to the above four risk factors. Hierarchical networks were prepared to calculate the main and the overall risk. Bayesian networks were used to model risk-based structures. Bayesian relationships are causal and helpful in expressing the links of the nodes in a probabilistic way. Research results show that the risk of using treated urban wastewater in agricultural sector is generally higher than its application in industrial use, and hence it will make it more suitable and more acceptable for industrial use under current treatment. Bayesian

risk-based agricultural and industrial structures were suitably modeled according to R^2, RMSE, and MAPE indicators. The average values of the above indicators for the calibration of Bayesian model using treated wastewater in agricultural and industrial risked-based structure were 0.993, 0.202 and 0.637; 0.988, 0.980 and 2.731, respectively. From this study it can be concluded that Bayesian networks have a modeling capability in assessing the risk associated with the use of treated wastewater in agricultural and industrial sectors. The method presented in this paper can be used by the wastewater treatment plant managers and end users when assessing the potential risk of using treated effluent for agricultural and industrial applications.

Keywords: Risk Assessment, Urban Treated Wastewater, Uncertainty, Bayesian Networks.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.237516.3044

مجله آب و فاضلاب، دوره 31، شماره 7، صفحه: 179-162

تحلیل ریسک استفاده از پساب شهری برای مصارف کشاورزی و صنعت با استفاده از مدل شبکه‌های بیزین

جواد شفیعی نیستانک[۱]، عباس روزبهانی[۲]، سید ابراهیم هاشمی گرم‌دره[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، تهران، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) roozbahany@ut.ac.ir
۳- استادیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، تهران، ایران

(دریافت ۹۹/٤/۱۰ پذیرش ۹۹/۷/۱٤)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
شفیعی نیستانک، ج.، روزبهانی، ع.، هاشمی گرم‌دره، س.ا.، ۱۳۹۹، "تحلیل ریسک استفاده از پساب شهری برای مصارف کشاورزی و صنعت با استفاده از مدل شبکه‌های بیزین" مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۷)، ۱۷۹-۱۶۲. Doi: 10.22093/wwj.2020.237516.3044

چکیده

پساب‌های شهری به‌دلیل آن که مقدار کمیت و کیفیت آنها توسط بشر کنترل می‌شود، منبع مناسبی برای تخصیص به کاربری‌های مختلف برای مصارف غیرخانگی است اما دارای محدودیت‌هایی نیز هستند. استفاده غیراصولی از این پساب‌ها بدون تصفیه کامل می‌تواند باعث بروز مخاطرات محیط‌زیستی و بهداشتی شده و در نتیجه باعث بروز نارضایتی‌های اجتماعی و گاهی مشکلات اقتصادی شود. این پژوهش به بررسی مخاطراتی که استفاده از پساب را محدود می‌کند، اختصاص داده شده است. برای این پژوهش اطلاعات کیفی ۲۶ تصفیه‌خانه در کشور جمع‌آوری شد. با استفاده این اطلاعات و با ایجاد یک بانک اطلاعاتی مناسب، خطرپذیری استفاده از پساب در کشاورزی و صنعت با در نظر گرفتن شاخص‌های اصلی ریسک محیط‌زیستی، اجتماعی-فرهنگی، اقتصادی و فنی محاسبه شد. برای محاسبه ریسک‌ها، پژوهش‌ها و مدارک چاپ شده و نشده مختلف جمع‌آوری و مرور شد، مخاطرات گوناگونی در ارتباط با استفاده از پساب، شناسی و در نهایت در دسته‌های ریسک‌های چهارگانه بیان شده تقسیم شده‌اند. در ادامه شبکه‌های سلسله مراتبی ارائه شده تا ریسک‌های اصلی و در نهایت ریسک کلی محاسبه شود. شبکه‌های بیزین برای مدل‌سازی ساختارها استفاده شده است. روابط بیزین به‌صورت علت و معلولی بوده که کمک شایانی به بیان روابط بین گره‌ها به صورت احتمالاتی می‌کند. نتایج پژوهش نشان داد که ریسک استفاده از فاضلاب تصفیه شده شهری با توجه به تصفیه فعلی برای کشاورزی معمولاً بیشتر از استفاده در صنعت است و بنابراین مقبولیت استفاده از پساب در صنعت ممکن است بیشتر از کشاورزی باشد. همچنین نتایج به‌دست آمده نشان داد که ساختارهای مخاطرات ریسکی در ارتباط با کشاورزی و صنعت در شبکه‌های بیزین با توجه به شاخص‌های R^2، RMSE و MAPE به‌خوبی مدل شده‌اند. میانگین این شاخص‌ها برای شبکه‌های بیزین ریسک استفاده از پساب در کشاورزی به‌ترتیب ۰/۹۹۳، ۰/۲۰۲ و ۰/۶۳۷ و استفاده از پساب در صنعت به‌طور معمول ۰/۹۸۸، ۰/۹۸۰ و ۲/۷۳۱ است. بنابراین با توجه به نتایج می‌توان اذعان کرد که شبکه‌های بیزین قابلیت در مدل‌سازی ساختارهای ریسک استفاده از پساب در کشاورزی و صنعت دارد. مدیران و مجریان پروژه‌ها می‌توانند با به‌کارگیری روش ارائه شده در این پژوهش می‌توانند به ارزیابی ریسک‌های مرتبط به محیط‌زیستی، اجتماعی-فرهنگی، اقتصادی و فنی برای استفاده از پساب در کشاورزی و صنعت بپردازند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل ریسک، پساب شهری، عدم قطعیت، شبکه‌های بیزین

۱- مقدمه

بشر با وجود تمام پیشرفت‌هایی که در زمینه بهره‌برداری از منابع آب و تصفیه پیشرفته آب و فاضلاب به‌دست آورده اما کماکان به دلایلی مانند افزایش جمعیت، رشد صنعت، توسعه کشاورزی و همچنین تغییرات گسترده اقلیمی به نحوی که بر روی دما و توزیع، شدت و مدت بارش اثر گذاشته، با مشکل تأمین آب نیازهای مختلف روبه‌رو است. یکی از راه‌حل‌هایی که در طی دهه‌های گذشته توجه متخصیص امر را به خود جلب کرده، موضوع استفاده از آب‌های نامتعارف در کنار دیگر منابع برای تأمین نیازها، به‌ویژه کشاورزی است. در ایران بدون در نظر گرفتن منابع عظیم آب دریا در شمال و جنوب کشور، حجم آب‌های شور و لب‌شور سطحی و زیرزمینی نزدیک به ۱۴ میلیارد مترمکعب، زهاب کشاورزی چیزی در حدود ۲۶ میلیارد مترمکعب و فاضلاب‌های شهری، روستایی و صنعتی مجموعاً ۱/۷ میلیارد مترمکعب تخمین زده شده است. این منابع با توجه به محدودیت‌های کیفی استفاده شده است و در صورت استفاده، به‌صورت غیراصولی استفاده می‌شوند که موجب آلودگی آب، خاک و محصولات کشاورزی، تخریب محیط‌زیست و در نهایت تهدید سلامت انسان می‌شوند (Yargholi et al., 2018).

این نوع آب‌ها را نمی‌توان به‌طور مستقیم وارد طبیعت کرده و یا دوباره استفاده کرد، بنابراین باید توسط روش‌هایی تصفیه شده تا به استاندارد موردنیاز برای تخلیه و یا استفاده مجدد برسند. برای تصفیه آب‌های دریا روش‌های مرسوم حرارتی و اسمز معکوس استفاده می‌شود. همچنین برای تصفیه فاضلاب‌های شهری از روش‌هایی مانند برکه‌های تثبیت، لجن فعال، لاگون هوادهی و یا ترکیبی از این روش‌ها استفاده می‌شود. برای صنایع هم با توجه به نوعشان متفاوت است. بنابراین با وجود مشکلاتی که کشور در زمینه تأمین آب دارد با اتخاذ سیاست‌های صحیح، در نظر گرفتن استانداردهای مربوطه و تصفیه اصولی آب‌های نامتعارف می‌توان از این پتانسیل عظیم برای مصارف خانگی و غیرخانگی استفاده و بهره‌برداری کرد (Kayhanian and Tchobanoglous, 2018a, 2018b, 2018c).

در این پژوهش، به بررسی خطرپذیری استفاده از پساب‌های شهری برای آبیاری زمین‌های کشاورزی واستفاده در صنعت پرداخته می‌شود. به‌طور کلی استفاده از پساب شهری موضوعی است که در طول چند دهه گذشته به دلایل بیان شده مورد توجه قرار گرفته و پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی نحوه استفاده و مدیریت آن انجام شده است. به‌طور نمونه، کالاوروزیوتیس و همکاران در سال ۲۰۱۱ با روش تصمیم‌گیری چند معیاره پساب تصفیه‌خانه Sparti در یونان را برای آبیاری باغ‌های مرکبات و زیتون و تخلیه پساب خروجی تصفیه‌خانه به یک زمین بایر بررسی و ارزیابی کردند (Kalavrouziotis et al., 2011).

طاهریون و همکاران در سال ۲۰۱۶ به تحلیل ریسک استفاده از پساب تصفیه‌خانه شهرک صنعتی البرز واقع در استان قزوین برای آبیاری زمین‌های کشاورزی پرداختند. با تعیین مخاطرات و اثرات استفاده از این نوع پساب و همچنین تهیه پرسش‌نامه‌هایی برای دریافت نظرات کارشناسان و وزن‌دهی به گره‌های شبکه بیزین، ریسک استفاده از پساب برای انسان و گیاه محاسبه شد (Taheriyoun et al., 2016).

در پژوهش دیگری پان و همکاران در سال ۲۰۱۸، با توجه به معیارهای هزینه، پذیرش همگانی، تهدید سلامت و ذخیره آب به‌عنوان معیارهای خاص و کنترل با استانداردهای دولت کانادا به‌عنوان معیار عام به بررسی گزینه‌های مختلف استفاده از پساب این تصفیه‌خانه پرداخته‌اند. گزینه‌های مختلفی مانند استفاده در فلاش تانک‌ها، زراعت در باغچه منازل، آبیاری گل‌های خانه‌ها، آبیاری محصولات کشاورزی، آبیاری فضای سبز پارک‌ها، آبیاری زمین گلف و استفاده برای شرب را با توجه به معیارهای خاص و عام بررسی و در نتیجه آبیاری باغچه منازل برترین گزینه انتخاب شد (Pan et al., 2018).

شاکری و نظیف در سال ۲۰۱۸ برای مدیریت ریسک استفاده از پساب تصفیه‌خانه شهرک اکباتان پژوهشی را با تهیه یک سیستم استنتاج فازی ارزیابی کردند. گزینه‌های آبیاری فضای سبز تصفیه‌خانه، آبیاری فضای سبز اکباتان، تخلیه به رودخانه فیروزبند، استفاده در مراکز تفرجگاهی پارک ارم و آبیاری جنگل چیتگر را با ۱۷ معیار (مخاطرات) در سه دسته محیط زیستی، بهداشتی-اجتماعی و اقتصادی بررسی کرده و آبیاری فضای سبز تصفیه‌خانه است، به‌عنوان گزینه برتر انتخاب شد (Shakeri and Nazif, 2018).

در جدیدترین پژوهش، قربانی موسلو و همکاران در سال ۲۰۲۰ با کمک نظریه بازی‌ها روشی را برای تخصیص بهینه پساب شهری ارائه کرده‌اند. به این صورت که به ارزیابی میزان تولید

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.237516.3044

فاضلاب و پساب و همچنین نیازها در شرق استان تهران پرداخته‌اند تا بهینه‌ترین حالت برای تخصیص پساب شهری را تعیین کنند (Ghorbani Mooselu et al., 2020).

استفاده از این منابع با توجه به محدودیت‌هایی که دارند، دارای ریسک‌ها و خطراتی هستند. بنابراین باید پیش از استفاده از این منابع، کارشناسان به ارزیابی محیط‌زیستی، اجتماعی، اقتصادی و فنی گزینه‌های مختلف بهره‌برداری از پساب بپردازند. ریسک یک مفهوم انتزاعی و دارای تعاریف زیادی است اما می‌توان گفت که دربرگیرنده آینده و شک است و آن را می‌توان به‌صورت تابعی از احتمال و شدت آسیب‌پذیری تعریف کرد (Haimes, 2009, Shariat et al., 2018, Asgarian et al., 2013, Aven, 2011, Tabesh et al., 2018b).

برای محاسبه ریسک (تحلیل ریسک) نیز روش‌های گوناگونی ارائه شده که مرسوم‌ترین روش آن ضرب احتمال، شدت و آسیب‌پذیری است. ریسک شامل دو بخش تحلیل و مدیریت است که تحلیل به شناسایی مخاطرات و اجزا سامانه پرداخته و فاز مدیریتی آن، انتخاب گزینه‌ها و کاهش ریسک است. اهمیت تحلیل ریسک در آن است که مخاطرات سامانه شناسایی و با استفاده از مدل‌های مفهومی یا ریاضی ارزیابی می‌شوند.

یکی دیگر از ابزارهای خوب برای ارزیابی ریسک، استفاده از شبکه‌های بیزین است. این شبکه‌های توانایی مدل‌سازی با داده‌های ناقص، محاسبات رو به عقب در شبکه‌های آموزش دیده، آموزش ساختار پیشنهادی به کاربر بر اساس روابط احتمالاتی و علت و معلولی بین داده‌ها و همچنین امکان استفاده از داده‌های گسسته، پیوسته و ترکیبی (هیبریدی) را دارد. با توجه به مزیت‌های شبکه‌های بیزین، پژوهش‌های متعددی برای استفاده از این روش در رشته‌های گوناگون انجام شده است.

وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ آسیب‌پذیری منابع آب حوزه آبریز Zhangjiakou را با در نظر گرفتن شاخص‌های اصلی هیدرولوژیکی، اجتماعی-اقتصادی، محیط‌زیستی و هیدرولیکی (مجموعاً ۲۶ شاخص) ارزیابی کردند. ابتدا با کمک شبکه‌های بیزین، احتمال وقوع هر گره تعیین و سپس با استفاده از روش AHP[1] اوزان آنها را تعیین کردند. در نتیجه این حوضه دارای آسیب‌پذیری زیادی بوده و مزیت این روش نسبت به مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی در آن است که شاخص‌های تأثیرگذار دیگری نیز بررسی شده است (Wang et al., 2015).

عنبری و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی ریسک شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب منطقه سه شهری تهران پرداختند. ریسک در این پژوهش از ترکیب پیامدهای شکست و احتمالات شکست به‌صورت فازی حاصل شده و شکست نیز شامل شکست هیدرولیکی و شکست سازه‌ای است. کاربرد بیزین در این پژوهش، برای محاسبه احتمال شکست بود و برای محاسبه پیامدهای شکست، از وزن‌های داده شده به رویدادهای پایه، میانگین‌گیری کردند. در انتها به این نتیجه رسیدند که ۶۲ درصد از لوله‌ها دارای خطرپذیری متوسط و ۱۲ درصد دارای خطرپذیری زیاد هستند (Anbari et al., 2017).

تابش و همکاران در سال ۲۰۱۸ اثرگذاری فاکتورهای آب بدون درآمد شبکه آب‌رسانی منطقه چهار تهران که شامل تلفات ظاهری، تلفات واقعی و مصرف مجاز بدون قبض است را بررسی کردند. با تهیه پرسش‌نامه‌هایی از کارشناسان درخواست کرده تا به‌صورت کیفی به آنها پاسخ بدهند. با کمک شبکه فازی نمرات به‌دست آمد و سپس با ورود این اطلاعات پایه به شبکه بیزین، احتمالات هر گره را محاسبه کردند. هدررفت ظاهری به‌عنوان تأثیرگذارترین عامل شبکه آب‌رسانی شناخته شد (Tabesh et al., 2018a).

روزبهانی و همکاران در سال ۲۰۱۸ به تحلیل و مدیریت ریسک استفاده از آب‌های زیرزمینی با کمک تلفیق دو رویکرد شبکه‌های بیزین و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره پرداخته و قابلیت آن را در دشت بیرجند ایران بررسی کردند (Tabesh et al., 2018b).

جمع‌بندی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که از شبکه‌های بیزین علی‌رغم قابلیت بالا در تحلیل ریسک و عدم قطعیت، به‌ندرت در بحث استفاده از آب‌های نامتعارف به‌عنوان منابع آب جایگزین به ویژه در بخش کشاورزی و صنعت استفاده شده و در صورت استفاده نیز محدود بوده است. بنابراین در این پژوهش با نظر گرفتن شاخص‌های مختلف در کنار یکدیگر از جمله مباحث فنی، محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی، ریسک استفاده از پساب ارزیابی و محاسبه شد. این نوع روش تحلیل ریسک در پژوهش‌های پیشین، کمتر مورد توجه کارشناسان قرار گرفته است.

[1] Analytical Hierarchy Process (AHP)

در این پژوهش ساختارهای پیشنهادی ریسک استفاده از پساب در کشاورزی و پساب نیز از دیگر نوآوری‌های پژوهش به‌شمار می‌آید. بنابراین هدف، ارائه یک شبکه بیزین هیبرید برای نخستین بار با هدف تعیین ریسک با لحاظ ریسک‌های محیط‌زیستی، اجتماعی، فنی و اقتصادی استفاده از پساب تصفیه شده بود. در ادامه به‌ترتیب به ارائه متدولوژی محاسبه ریسک استفاده از پساب، ارائه مدل شبکه بیزین برای محاسبه ریسک و سپس به‌کارگیری رویکرد پیشنهادی در تصفیه‌خانه‌های مهم فاضلاب کشور پرداخته خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

برای محاسبه ریسک استفاده از پساب در کشاورزی، شاخص‌های اصلی ریسک محیط‌زیستی، ریسک اجتماعی-فرهنگی، ریسک اقتصادی و ریسک فنی و همچنین برای محاسبه ریسک استفاده از پساب در صنعت سه شاخص اصلی ریسک اجتماعی-فرهنگی، ریسک اقتصادی و ریسک فنی بررسی شدند.

لازم به‌ذکر است از آنجا که هدف این پژوهش بررسی ریسک پساب از محل تصفیه‌خانه تا محل مصرف در صنعت بود، بنابراین بحث ریسک محیط‌زیستی استفاده در صنعت منحصر به محل مصرف بوده و شامل اثرات تخلیه پساب صنعت به رودخانه‌ها نیست. هر کدام از این ریسک‌ها دارای زیرگروه‌هایی بوده که به‌صورت سلسله مراتبی در شکل‌گیری آنها اثرگذارند. در شکل ۱ روند نمای کلی پژوهش ارائه شده است.

۲-۱- ساختار ریسک استفاده از پساب در کشاورزی و صنعت

برای تهیه ساختارهای ریسک استفاده از پساب در کشاورزی و صنعت مجموعاً بیش از ۱۳۰ منبع مختلف اعم از پژوهش‌ها و پایان‌نامه‌های گوناگون از منابع معتبر داخلی و بین‌المللی جمع‌آوری شد.

با بررسی این منابع، مشکلات، معضلات و مخاطرات (پارامترهای اثرگذار بر ریسک) استفاده از پساب درآبیاری و استفاده در صنعت بررسی شد. این پارامترها در دسته‌های محیط‌زیستی، اجتماعی- فرهنگی، اقتصادی و فنی تقسیم شده و در نتیجه این پارامترها به‌صورت سلسله مراتبی بر روی ریسک‌های اصلی تأثیر می‌گذارند (شکل‌های ۲ و ۳).

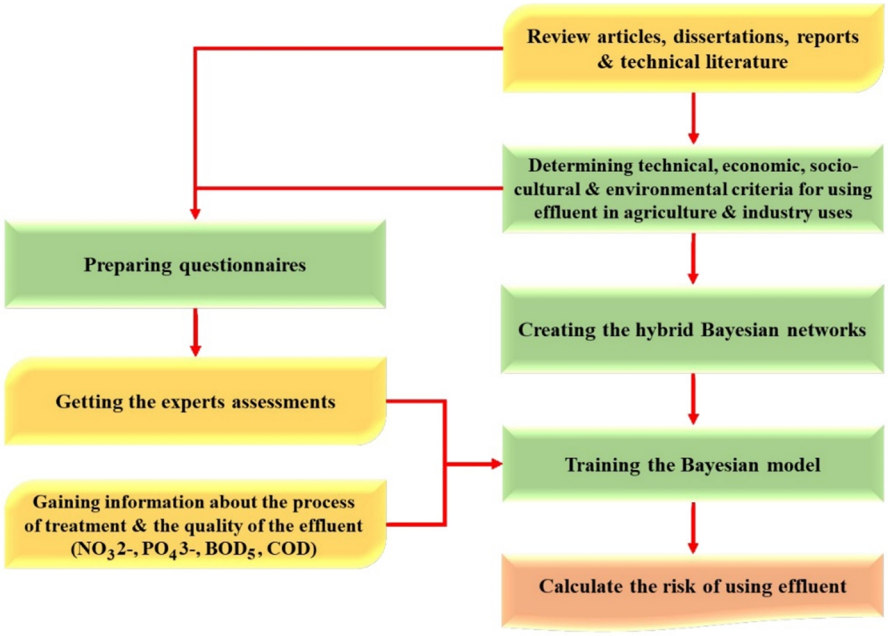


Fig. 1. Research process

شکل ۱- روند نمای پژوهش

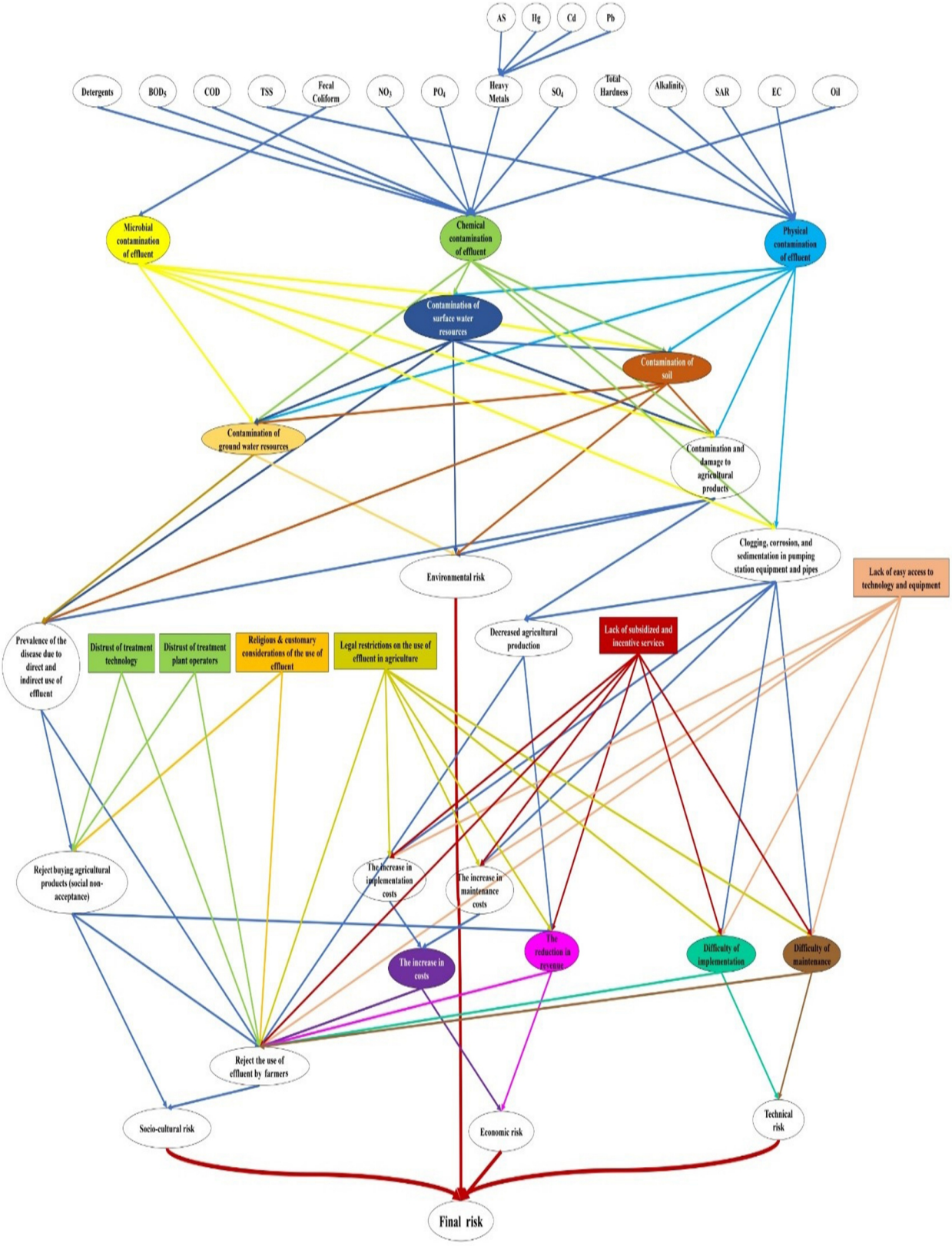


Fig. 2. Risk structure of treated wastewater use for agriculture

شکل ۲- ساختار ریسک استفاده از پساب برای کشاورزی

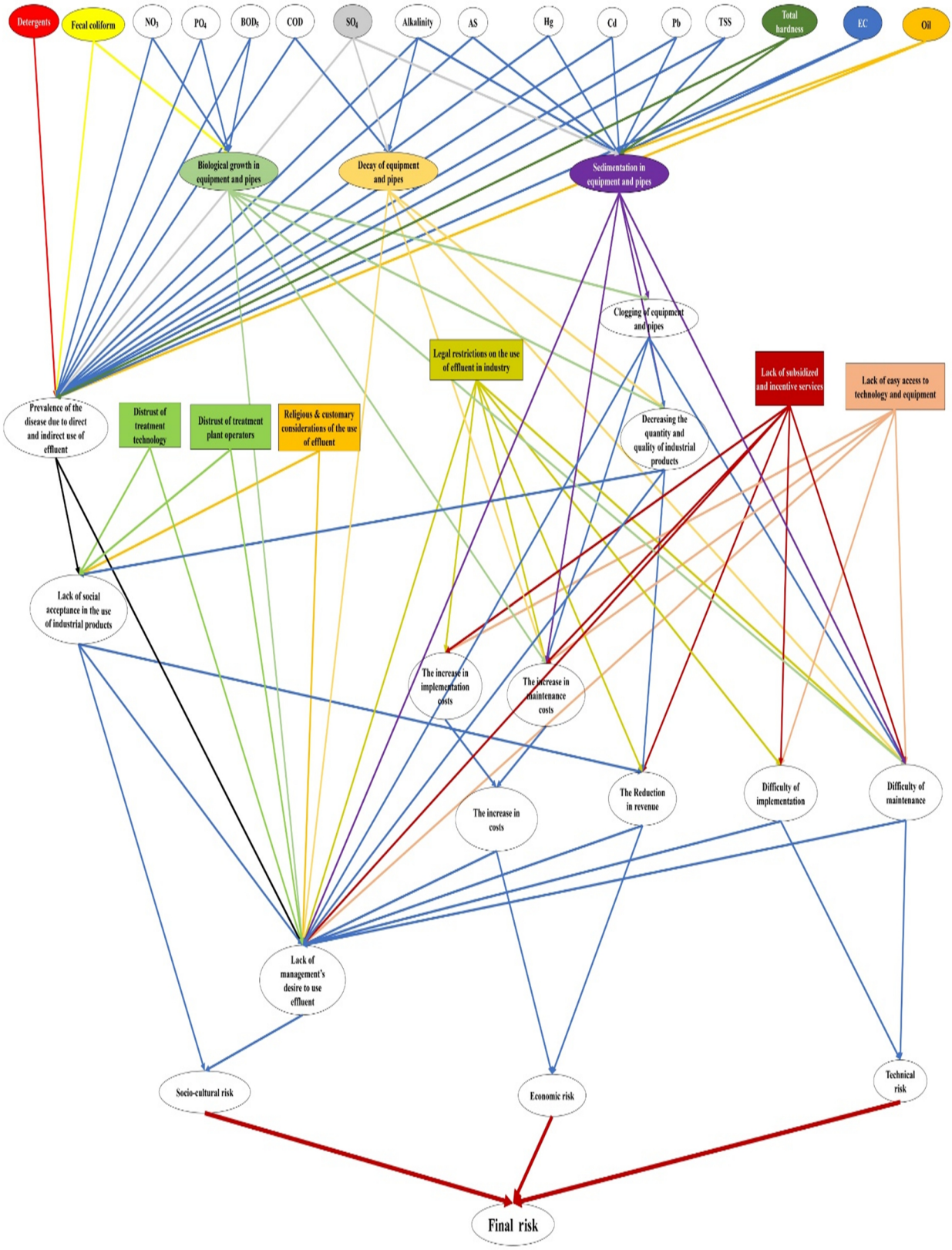


Fig. 3. Risk structure of treated wastewater use for industry

شکل ۳- ساختار ریسک استفاده از پساب برای صنعت

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.237516.3044

۲-۱-۱- ساختار ریسک استفاده از پساب در کشاورزی

در قسمت ریسک محیط‌زیستی، پارامترهای کیفی مهم و اثرگذار بر کشاورزی شامل شوینده‌ها، روغن و چربی، نیاز اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی، نیاز اکسیژن‌خواهی شیمیایی، جامدات معلق، فکال کلیفرم، نیترات، فسفات، آرسنیک، جیوه، کادمیم، سرب، سولفات، قلیاییت، نسبت جذب سدیم و شوری هستند. هر کدام از این پارامترهای کیفی در دسته‌های سه گانه آلودگی میکربی پساب، آلودگی شیمیایی پساب و آلودگی فیزیکی پساب تقسیم می‌شوند. این آلودگی‌ها خود بر روی آلوده شدن منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و خاک اثرگذارند. همچنین این آلودگی‌ها بر روی آلوده شدن و آسیب دیدن محصولات کشاورزی نیز اثرگذارند. در نهایت این آلودگی‌ها باعث ریسک محیط‌زیستی استفاده از پساب می‌شود.

ریسک اجتماعی- فرهنگی دارای زیرگره‌های شیوع بیماری در اثر استفاده مستقیم و غیرمستقیم از پساب، عدم اطمینان به فناوری تصفیه، عدم اطمینان به اپراتورهای تصفیه‌خانه، ملاحظات شرعی و عرفی استفاده از پساب و محدودیت‌های قانونی استفاده از پساب در کشاورزی است. گره شیوع بیماری خود از چهار گره آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی، آلودگی خاک و آلوده شدن و آسیب دیدن محصولات کشاورزی به دست می‌آید. ریسک اجتماعی- فرهنگی از ترکیب دو گره عدم استفاده کشاورز از پساب و نخریدن محصولات کشاورزی (عدم پذیرش اجتماعی) حاصل می‌شود.

ریسک اقتصادی به‌طور کلی به دو دسته ریسک‌های کاهش درآمدها و افزایش هزینه‌ها تقسیم می‌شوند. افزایش هزینه‌ها نیز از دو ریسک افزایش هزینه‌های اجرایی و بهره‌برداری به دست آمده و این گره‌های میانی از زیرگره‌های عدم ارائه خدمات یارانه و مشوقی، گرفتگی، خوردگی و رسوب‌گذاری در تجهیزات ایستگاه‌های پمپاژ و لوله‌ها، عدم دسترسی راحت به فناوری و تجهیزات، محدودیت‌های قانونی استفاده از پساب در کشاورزی حاصل می‌شوند.

ریسک فنی از دو ریسک صعوبت اجرای پروژه و صعوبت نگهداری پروژه به‌دست می‌آید. این دو گره با گره افزایش هزینه‌های اجرایی پروژه دارای زیرگره‌های مشترک هستند.

۲-۱-۲- ساختار ریسک استفاده از پساب در صنعت

برای ریسک صنعت با توجه به مرور پیشینه‌های مختلفی که انجام شده، با سه ریسک اصلی اجتماعی-فرهنگی، اقتصادی و فنی ارزیابی می‌شود. استفاده گسترده ای از آب در صنعت انجام می‌شود مانند استفاده در بویلرها، آتش‌نشانی، شست‌وشو و خنک‌کننده‌ها (Sari et al., 2017). بنابراین ساختار به‌گونه‌ای طراحی شد که ریسک استفاده از پساب در کاربری‌های گوناگون در صنعت را پوشش دهد.

ریسک اجتماعی دارای زیرگره‌های شیوع بیماری در اثر استفاده مستقیم و غیرمستقیم از پساب، عدم اطمینان به فناوری تصفیه و اپراتورهای تصفیه‌خانه، ملاحظات شرعی و عرفی استفاده از پساب ومحدودیت‌های قانونی در استفاده از پساب در صنعت است. زیرگره‌های ریسک اقتصادی شامل، پایین آمدن کمیت و کیفیت کالای صنعتی، عدم ارائه خدمات یارانه و مشوقی، افزایش هزینه‌های اجرا و بهره‌برداری و کاهش درآمدها است.

ریسک فنی دربرگیرنده گره‌های رشد بیولوژیکی، پوسیدگی، رسوب‌گذاری و گرفتگی تجهیزات و لوله‌ها، عدم دسترسی راحت به فناوری و تجهیزات، صعوبت اجرا و صعوبت نگهداری پروژه است.

۲-۲- اطلاعات کیفیت تصفیه‌خانه‌ها

با توجه به مرور پیشینه و همچنین دریافت اطلاعات از گزارش‌های شرکت‌های مهندسین مشاور یکم، توس‌آب، زیست آب، رایان پی آب و آساراب تعداد ۷۰ سری داده کیفیت پساب از ۲۶ تصفیه‌خانه در سراسر کشور تهیه شد. هر چند یکی از چالش‌های مدل‌سازی ریسک، اطمینان از صحت داده‌های استفاده شده به‌ویژه در تصفیه‌خانه‌های قدیمی‌تر است ولی در این مراحل سعی شد تا با استفاده از نظرات کارشناسی و بازدیدهای میدانی از صحت و سقم داده‌های اخذ شده تا حد امکان اطمینان حاصل شود و حتی گره‌هایی مرتبط با عدم اطمینان از این داده‌ها به‌ویژه در بحث بهره‌برداری در نظر گرفته شود. هدف از این کار ایجاد یک بانک اطلاعاتی مناسب برای ارزیابی ریسک استفاده از پساب در کاربری‌های مختلف، بررسی ریسک‌های گوناگون روش‌های تصفیه فاضلاب و قرارگرفتن تصفیه‌خانه‌ها در مناطق مختلف کشور است (شکل ۴). این امر کمک می‌کند تا به‌صورت جامع‌تری ریسک‌های مختلف تحلیل شوند. دامنه تغییراتی بانک اطلاعاتی در جدول ۱ به تفکیک پارامترهای مختلف کیفیت پساب ارائه شده است.

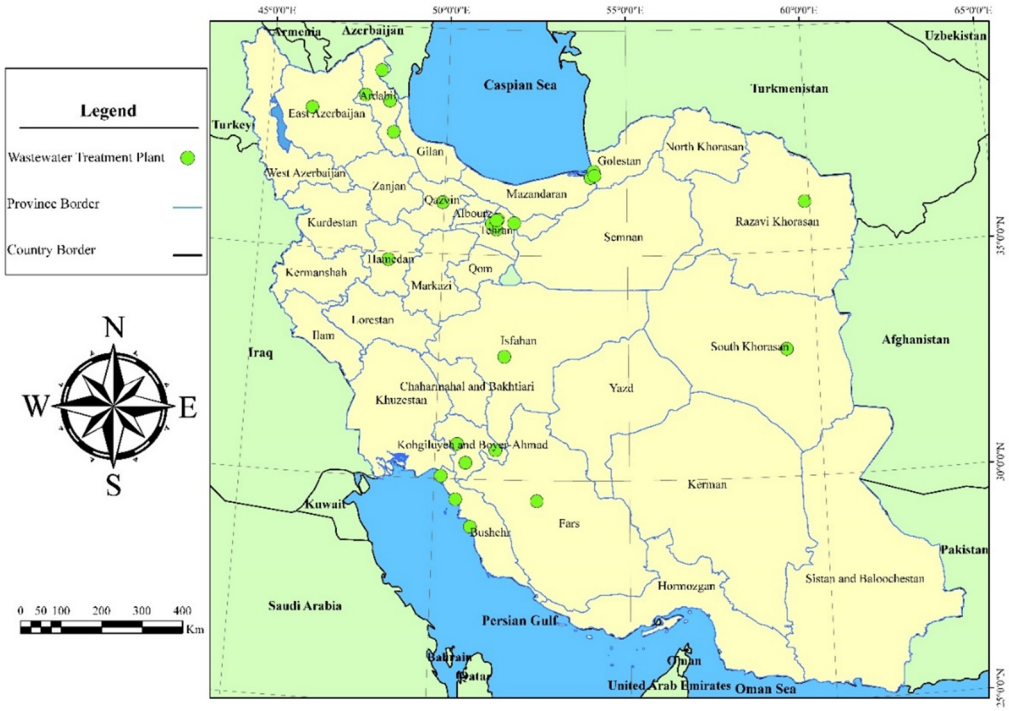


Fig. 4. Distribution of treatment plants nationwide

شکل ۴- پراکنش تصفیه‌خانه‌ها در سطح کشور

جدول ۱- بیشینه، کمینه، میانگین و انحراف از معیار پارامترهای کیفیت پساب

Table 1. Maximum, minimum, average and standard deviation of effluent quality parameters

Parameter	Maximum	Minimum	Average	Standard deviation
BOD_5 (mg/L)	345	0.1	46.9	54.5
COD (mg/L)	605	6	87.4	95.1
TSS (mg/L)	544.93	1.8	64.0	88.9
Fecal coli. (MPN/100 ml)	3700	0	211.2	277.9
NO_3 (mg/L)	188.3	1.1	34.2	38.8
PO_4 (mg/L)	54	0.45	10.5	11.9
As (µg/L)	15.7	0	1.7	3.0
Hg (µg/L)	9.1	0	1.1	1.7
Pb (µg/L)	60	0	7.9	15.1
Cd (µg/L)	40	0	2.6	6.6
SO_4 (mg/L)	1050	65.7	309.9	179.7
Total Hardness (g/L)	3.55	0.15	0.5	0.5
Alkalinity (mg/L)	690	141	331.3	115.5
SAR	22.3	0.2	3.3	3.0
EC (mmhos/cm)	6.110	0.594	1.8	1.0
Oil (mg/L)	22.5	0	3.2	4.3
Detergent (mg/L)	8.6	0	1.3	1.1

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.237516.3044

۲-۳- محاسبه ریسک‌ها

برای محاسبه ریسک گره‌های کمّی مانند گره آلودگی شیمیایی پساب در بخش کشاورزی، ابتدا گره‌های ورودی به آن نرمال شدند. نرمال‌سازی به این صورت انجام شد که در این ۷۰ سری داده کیفیت پساب، هر پارامتر کیفی هر تصفیه‌خانه از کیمنه آن مجموعه کم و بر تفاضل بیشینه و کمینه تقسیم و در صد ضرب شد. به‌این ترتیب تمامی پارامترهای کیفی بین صفر تا صد توزیع شد. پس از آن که پارامترهای تأثیرگذار بر آن نرمال شدند باید اوزان هر کدام از این پارامترها بر این گره محاسبه شود. برای این کار پرسش‌نامه‌هایی تهیه شد و ۱۱ فرد متخصص در زمینه‌های کفیت آب، آب‌های نامتعارف، تصفیه فاضلاب، کشاورزی و آب زیرزمینی مقدار اثرگذاری هر گره والد بر مولود را نمره‌دهی کردند. کارشناسان با معیارهای توصیفی "کم"، "کم تا متوسط"، "متوسط"، "متوسط تا زیاد" و "زیاد" مقدار اثرگذاری هر گره والد بر روی هر گره مولود را ارزیابی کردند. در نهایت پس از ارزیابی کارشناسان و میانگین‌گیری اوزان، هر گره را در وزن مربوطه خود ضرب و بر مجموع ضرایب تقسیم شد. محاسبه ریسک گره‌های گسسته، مانند "عدم اطمینان به فناوری تصفیه"، به‌صورت کیفی مانند پنج دسته فوق نمره‌دهی شد و سپس برای محاسبه خطرپذیری گره‌هایی که والد آنها گسسته هستند مقدار کمی آنها در محاسبات لحاظ شد. کم مقدار ۱۰، کم تا متوسط ۳۰، متوسط ۵۰، متوسط تا زیاد ۷۰ و زیاد ۹۰ بود.

۲-۴- شبکه‌های بیزین

همان گونه که در قسمت مقدمه عنوان شد برای محاسبه ریسک روش‌های مختلفی وجود دارد. در این پژوهش ریسک استفاده از پساب برای کاربری کشاورزی و صنعتی به صورت سلسله مراتبی محاسبه می‌شود. یکی دیگر از ابزارهایی که به متخصصین کمک می‌کند تا به تحلیل ریسک بپردازند، استفاده از شبکه‌های بیزین احتمالاتی است (Tabesh et al., 2018a, Anbari et al., 2017, Tabesh et al., 2018b).

این شبکه‌ها بر اساس قانون بیز در معادله ۱ که احتمال ثانویه را بر اساس احتمال اولیه به‌دست می‌آورد ساخته شده‌اند (Khakzad et al., 2011). شبکه‌های بیزین می‌توانند رویدادهای علت و معلولی را به‌صورت شبکه ارتباطات مشخص کرده و در نهایت نیز جدول احتمالاتی هر گره را در اختیار کاربر قرار دهد. پس با توجه به این توانایی و ساختار ریسک‌ها که به‌صورت علت و معلولی است، استفاده از شبکه‌های بیزین کمک شایانی به تحلیل ریسک استفاده از پساب می‌کند

$$P(E_i|F) = \frac{P(F|E_i)P(E_i)}{P(F|E_1)P(E_1) + P(F|E_2)P(E_2) + \ldots + P(F|E_n)P(E_n)} \quad (۱)$$

که در آن

$P(E|F)$ احتمال رخداد E به شرط F یا همان احتمال پسین، $P(F|E_i)$ احتمال رخداد F به شرط E_i و $P(E_i)$ احتمال مشاهده E_i با احتمال پیشین و $P(F)$ احتمال مشاهده F است. همچنین برای n رویداد $E_1, E_2, \ldots E_n$ که $P(E_i)\neq 0$ باشد و $1 \leq i \leq n$ است. به‌طور کلی می‌توان این گونه عنوان کرد که شبکه بیزین از دو جزء اصلی کمّی و کیفی تشکیل شد. جزء کمّی آن مجموعه‌ای از روابط احتمالاتی یا توزیعات احتمالاتی، برای هر گره از شبکه ارائه شده و جزء کیفی یک گراف خطی جهت‌دار بوده که در آن هر گره نشان‌دهنده یک متغیر شبکه و یال‌ها نشانگر وابستگی بین متغیرهای شبکه هستند. همان طور که پیشتر اشاره شد ارتباط بین گره‌ها در یک شبکه بیزین با مفهوم روابط خانوادگی شناخته می‌شود. اگر گره، هیچ والدی نداشته باشد (یعنی هیچ کمانی به سمت آن نباشد)، گره یک جدول احتمال مرزی خواهد داشت و اگر گره والد داشته باشد (یک یا چند کمان به سمت آن باشد)، دارای جدول احتمال شرطی[1] خواهد بود. (Pearl, 1988, Cockburn and Tesfamariam, 2012, Abebe et al., 2018).

از مزایای شبکه‌های بیزین که پیشتر نیز به چند مورد آن اشاره شد، می‌توان به امکان ترکیب نظرات کارشناسی و داده‌های موجود، نمایش متغیرهای یک مدل به‌صورت گره و روابط علت و معلولی به‌صورت ارتباطات میان گره‌ها و استفاده از اطلاعات گذشته به‌منظور پیش‌بینی وضعیت آینده نیز اشاره کرد. شبکه‌های بیزین به لحاظ جنس داده‌ها به سه دسته شبکه بیزین پیوسته، شبکه‌ای که گره‌های پیوسته دارد، شبکه بیزین گسسته، شبکه‌ای که گره‌های گسسته دارد و شبکه بیزین هیبرد که هم دارای گره‌های گسسته و

[1] Conditional Probability Table (CPT)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.237516.3044

پیوسته است، تقسیم می‌شوند. در این پژوهش با توجه به داده‌های ورودی، شبکه‌های بیزین هیبرید استفاده شد که اولین برای تحلیل ریسک استفاده از پساب استفاده می‌شود. در کنار نرم‌افزارهایی مانند Hugin lite و Bayesserver که برای مدل‌سازی شبکه‌های بیزین از آن استفاده می‌شود، از زبان برنامه‌نویسی R نیز می‌توان استفاده کرد. یکی از مهم‌ترین مزایای این زبان رایگان بودن و کدهای باز آن است. برای مدل‌سازی شبکه‌های هیبرید بیزین از بسته HydeNet استفاده شد.

۲-۵- روش K-fold

برای واسنجی وصحت‌سنجی مدل به صورت اعتبارسنجی متقابل[1] انجام شد. روش K-fold یکی از روش‌های اعتبارسنجی متقابل است. در این روش سری داده‌ها به K زیرمجموعه افراز می‌شوند. از این K زیرمجموعه، هر بار یکی برای صحت‌سنجی و K-1تای دیگر برای آموزش (واسنجی) به‌کار می‌روند. این روال K بار تکرار می‌شود و همه داده‌ها دقیقاً یک بار برای آموزش و یک بار برای صحت‌سنجی به کار گرفته می‌شوند. در نهایت میانگین نتیجه این K بار اعتبارسنجی به‌عنوان یک تخمین نهایی برگزیده می‌شود. به‌طور معمول از روش اعتبارسنجی پنج لایه یا ده لایه در پژوهش‌های مدل‌سازی و پیش‌بینی استفاده می‌شود. در این پژوهش با توجه به تعداد داده‌ها تعداد پنج لایه انتخاب شد که در بخش نتایج، برای ساختارهای ریسک‌ها ارائه شدند.

۳- نتایج و بحث

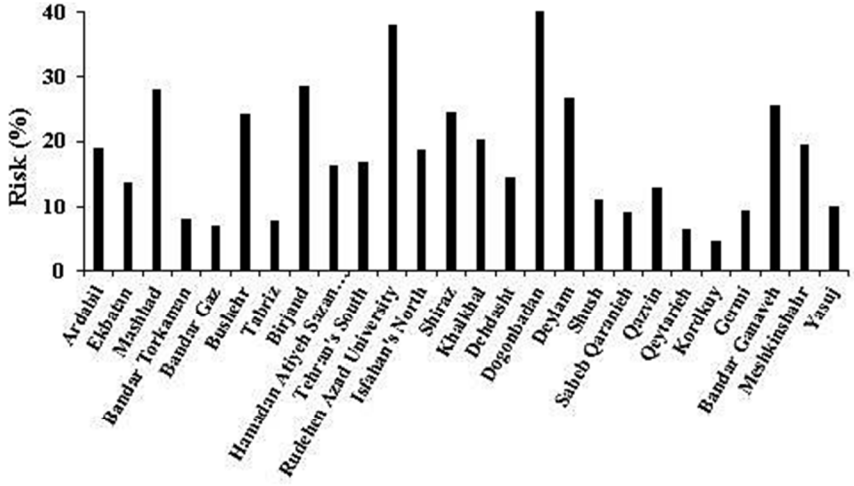
۳-۱- نتایج تحلیل ریسک

در شکل ۵ شاخص‌های اصلی ریسک استفاده از پساب در کشاورزی و صنعت رسم شدند. با توجه به کیفیت پساب‌ها به‌طور کلی ریسک محیط‌زیستی استفاده از پساب در کشاورزی در برخی از تصفیه‌خانه‌ها مانند تبریز، بندگز و ترکمن پایین بود و به لحاظ محیط‌زیستی محدودیتی ندارد. بیشترین ریسک مربوط به تصفیه‌خانه دوگنبدان و پس از آن تصفیه‌خانه دانشگاه آزاد رودهن است که البته ریسک محیط‌زیستی این دو تصفیه‌خانه کمتر از ۴۵ درصد برآورد شد. ریسک اجتماعی-فرهنگی استفاده از پساب در شهر تهران نسبت به سایر شهرها کشور کمتر ارزیابی شد که آن هم می‌تواند به‌علت تصفیه صحیح و اصولی فاضلاب وهمچنین آگاهی بیشتر مردم نسبت به بازپرخانی پساب باشد. اما در سایر نقاط کشور این ریسک بالا بود و با توجه به کیفیت کمتر پساب خروجی و همچنین بعضی اوقات کاهش محصولات کشاورزی و یا افزایش امراض خاص در منطقه رویکرد استفاده از این منابع آب در اجتماعات محلی کاهش پیدا کرده است که این خود باعث افزایش ریسک در بخش اجتماعی-فرهنگی استفاده از پساب در کشاورزی شود.

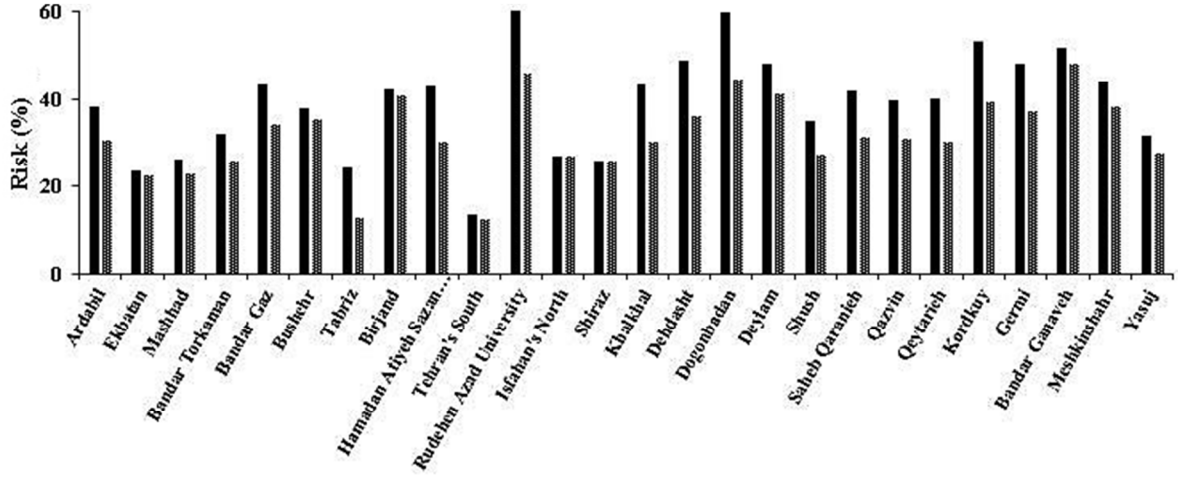
به‌طور کلی رویکرد مردم در ارتباط با استفاده از پساب در صنعت و کالای مصرفی خروجی آن نسبت به محصولات کشاورزی حاصل از آبیاری با پساب مثبت‌تر ارزیابی شده است، اما در مناطقی مانند اصفهان و شیراز با توجه به محدود بودن منابع آب، ریسک استفاده از پساب در هر دو بخش صنعت و کشاورزی تقریباً برابر است. در این بخش نیز ریسک استفاده از پساب تصفیه‌خانه جنوب تهران در بخش صنایع از دیدگاه اجتماعی-فرهنگی در پایین‌ترین سطح قرار دارد. ریسک اقتصادی استفاده از پساب در صنعت به‌طور کلی کمتر از کشاورزی بود، زیرا میزان بهره‌وری و همچنین تولید افزایش ارزش افزوده آن بیشتر است، اما در مناطقی با توجه به عدم توسعه صنایع، ریسک اقتصادی استفاده از پساب در کشاورزی به‌طور طبیعی کمتر از صنعت است.

ریسک فنی استفاده از پساب در کشاورزی و صنعت نیز با توجه به مناطق مختلف، گوناگون است. به‌طور نمونه ریسک فنی تصفیه‌خانه تبریز و جنوب تهران در بخش صنعت کمترین مقدار را داشته و با توجه به گستره صنایع، دسترسی آسان به ابزارآلات مخصوص و همچنین کیفیت مطوب پساب به لحاظ، خوردگی و پوسیدگی ریسک در حدود ۱۰ درصد است. از طرفی دیگر شهری مانند بیرجند ریسک فنی استفاده از پساب در بخش صنعت بیشتر از کشاورزی است. با قیاس ریسک‌های کلی استفاده از پساب در کشاورزی و صنعت دریافت می‌شود که ریسک کلی بیشتر تصفیه‌خانه‌های بررسی شده در بخش کشاورزی بیشتر از ریسک کلی در بخش صنعت بود و مقبولیت استفاده از پساب در صنعت در شاخص‌های سه گانه اجتماعی-فرهنگی، اقتصادی و فنی نیز به‌طور کلی بیشتر از ریسک استفاده از پساب در کشاورزی است.

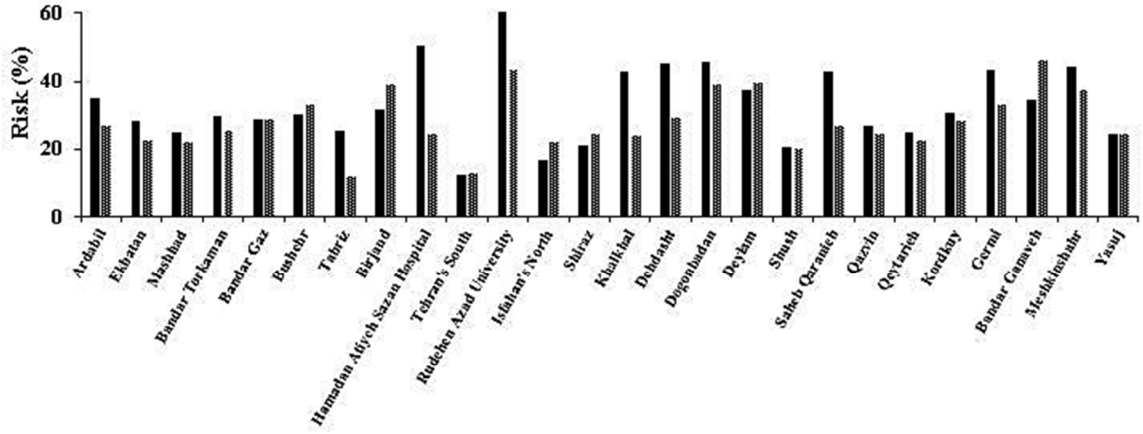
[1] Cross Validation



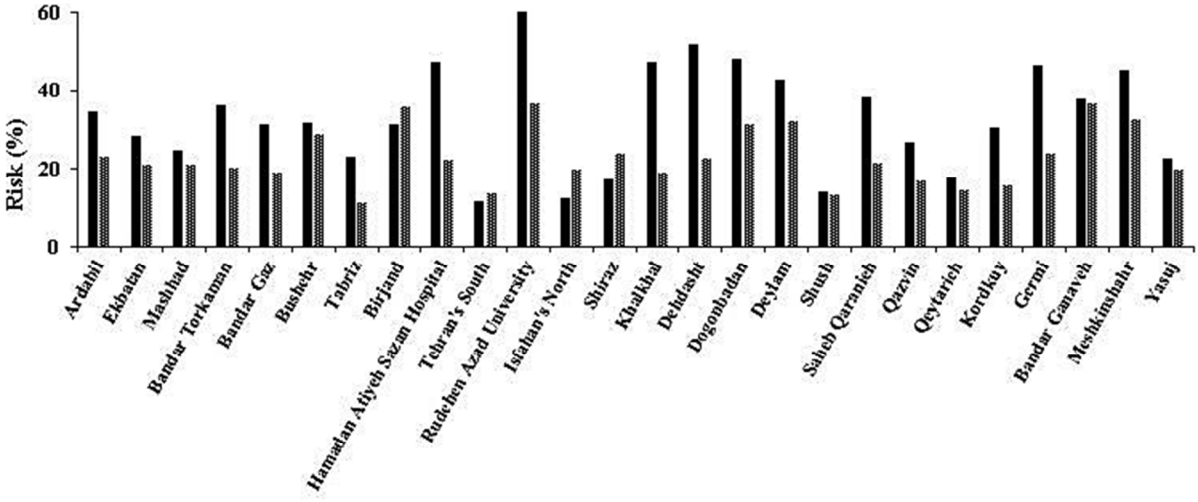
a) Environmental risk of using treated wastewater in agriculture



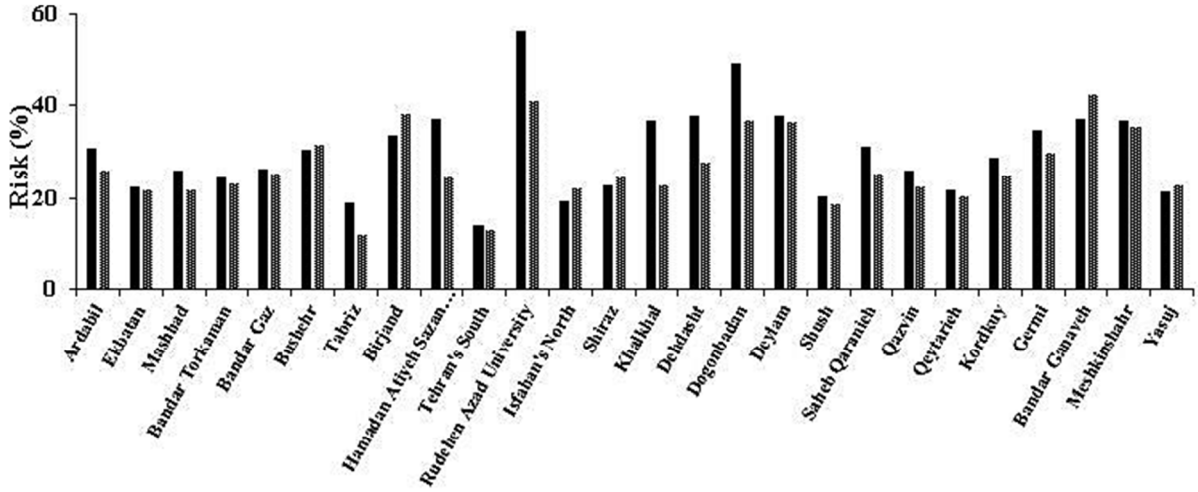
b) Social risk of using treated wastewater



c) Economic risk of using treated wastewater



d) Technical risk of using treated wastewater



e) Total risk of using treated wastewater

Fig. 5. Risk of using treated wastewater in agriculture & industry for selected treatment plants (respectively shown in black & gray)

شکل ۵- ریسک استفاده از پساب در کشاورزی و صنعت در تصفیه‌خانه‌های منتخب (به ترتیب با رنگ مشکی و خاکستری مشخص شده‌اند)

از طرفی در تصفیه‌خانه‌هایی مانند جنوب تهران، شوش و دیلم که ریسک‌های کلی یکسانی در هر دو کاربری دارند را نمی‌توان با یک یا چند سری داده کیفیت پساب و همچنین استفاده از نظر کارشناسان به ارزیابی کرد.

پیشنهاد می‌شود که تعداد دفعات بیشتری نمونه‌برداری و آنالیز کیفی تهیه و همچنین گره‌هایی که توسط کارشناسان تکمیل شده است نیز از طریق مصاحبه و دریافت نظرات مردم منطقه تهیه و ارزیابی شود.

۳-۲- نتایج مدل‌سازی ریسک با شبکه بیزین

پس از آن که ریسک ساختارها کشاورزی و صنعت محاسبات شد، این اطلاعات وارد شبکه‌های بیزین هیبرید شدند تا مدل بیزین بر اساس اطلاعات بانک اطلاعاتی آموزش ببیند. از مزایای این کار ایجاد ساختاری با یک بانک اطلاعاتی قوی از سراسر کشور به منظور محاسبه ریسک استفاده از پساب است و ساخت شبکه‌هایی احتمالاتی برای انجام محاسبات اشاره کرد. با این کار کاربران می‌توانند با وارد کردن اطلاعات کیفیت پساب به شبکه‌های بیزین

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.237516.3044

مقدار خطرپذیری در کاربری‌های کشاورزی و صنعت را محاسبه و بر آن اساس تصمیم‌گیری کنند. همچنین از دیگر امکانات شبکه‌های بیزن، حرکت رو به عقب است. به‌طور مثال کارشناس با وارد کردن ریسک موردنظر خود به شبکه می‌تواند کیفیت پساب خروجی را به‌دست آورده و بر اساس آن فرایندهای تصفیه در تصفیه‌خانه را مدیریت کند. علاوه بر آن همان گونه که توضیح داده شد بیزین توانایی مدل‌سازی با اطلاعات کم را دارد.

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل از روش K-fold استفاده شده تا با کمک آن بتوان مدل را در شرایط مختلف ارزیابی کرد. تعداد K در این پژوهش ۵ انتخاب شده است. این ۵ دسته به‌گونه‌ای باید به مدل داده شوند که هر بار یک دسته به‌عنوان دسته صحت‌سنجی بوده و ۴ دسته، به‌عنوان دسته ورودی به مدل ارائه شود. شاخص‌های R^2، RMSE و MAPE در هر مرحله از اجرای مدل برای واسنجی و صحت‌سنجی به دست آمده و در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین در شکل ۶ نتایج ریسک‌های مشاهداتی و محاسباتی در مقابل هم رسم شده‌اند.

بر اساس جدول ۲، میانگین شاخص‌های R^2، RMSE و MAPE برای قسمت واسنجی شبکه‌های بیزین ریسک استفاده از پساب در کشاورزی به‌ترتیب ۰/۹۹۳، ۰/۲۰۲ و ۰/۶۳۷ و برای شبکه‌های بیزین ریسک استفاده از پساب در صنعت ۰/۹۸۸، ۰/۹۸۰ و ۲/۷۳۱ است. همچنین میانگین شاخص‌های فوق برای قسمت صحت‌سنجی شبکه‌های بیزین ریسک استفاده از پساب در کشاورزی به‌ترتیب ۰/۹۹۹، ۰/۱۹۳ و ۰/۶۴۳ و برای شبکه‌های بیزین ریسک استفاده از پساب در صنعت به‌ترتیب ۰/۹۸۵، ۱/۰۶۵ و ۲/۸۰۰ است. مطابق شکل ۶، دقت مدل‌سازی با توجه به داده‌های محاسباتی و مشاهداتی خوب ارزیابی می‌شود. همچنین با توجه به دامنه تغییرات R^2، RMSE و MAPE، هر دو ساختار ریسک، شبکه‌های بیزین به‌خوبی و روابط حاکم بر گره‌ها نیز توسط مدل بیزین به خوبی شناسایی و آموزش دیده است.

برای انجام پژوهش‌ها بر روی ریسک استفاده از پساب پیشنهاد می‌شود تا برای نرمال‌سازی پارامترها مانند روش شاخص کیفیت منابع آب زیرزمینی و سطحی ایران برای آلاینده‌های متداول و سمّی که توسط سازمان محیط‌زیست ارائه شده است (Hashemi et al., 2011).

برای دامنه‌ای از پارامترها جدول احتمالی مربوط به آن تهیه شود تا مقدار آلودگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکربی با دقت بیشتری محاسبه شوند. همچنین در قسمت آلاینده‌های میکربی با توجه به نبود اطلاعات برای پارامتر تخم انگل پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی این پارامتر نیز لحاظ شود تا مقدار آلاینده‌های میکربی با دقت بیشتری ارزیابی شود.

لازم به ذکر است که نتیجه‌گیری فعلی در این پژوهش بر اساس اطلاعات فعلی در ایران است که ممکن است دقیق و کافی نباشد و قطعاً بررسی‌های بیشتر بر مبنای داده‌های بیشتر موردنیاز است.

جدول ۲- نتایج مدل‌سازی در شبکه‌های بیزین

Table 2. Summary results of Bayesian networks modelling

Structure name	Structure number	Calibration			Validation		
		R^2	RMSE	MAPE %	R^2	RMSE	MAPE %
Risk of using treated wastewater in agriculture	1	0.991	0.222	0.701	1.000	0.202	0.702
	2	0.990	0.191	0.594	1.000	0.186	0.607
	3	0.992	0.216	0.710	1.000	0.191	0.694
	4	1.000	0.172	0.508	1.000	0.170	0.530
	5	0.990	0.210	0.671	1.000	0.215	0.680
	Average	0.993	0.202	0.637	1.000	0.193	0.643
Risk of using treated wastewater in industry	1	0.988	0.963	2.648	0.990	0.885	2.994
	2	0.990	0.850	1.451	0.995	0.783	1.000
	3	0.986	1.103	3.560	0.976	1.371	3.715
	4	0.988	1.134	3.360	0.993	1.106	3.278
	5	0.989	0.852	2.637	0.972	1.180	3.011
	Average	0.988	0.980	2.731	0.985	1.065	2.800

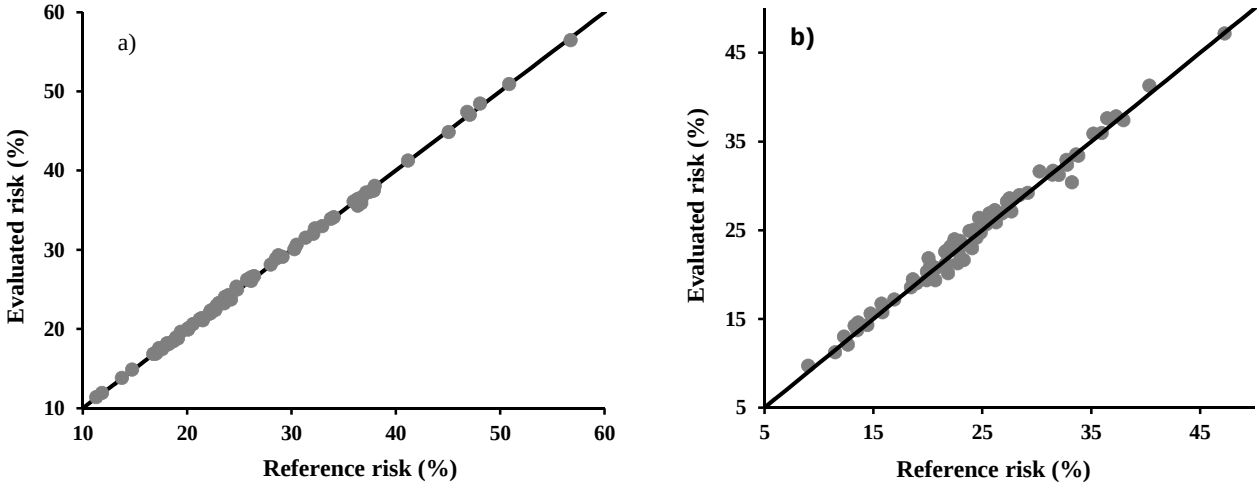


Fig. 6. Comparison of Bayesian networks validation results with real risks
a) Risk of using treated wastewater in agriculture, b) Risk of using treated wastewater in industry

شکل ۶- مقایسه نتایج صحت‌سنجی شبکه‌های بیزین با ریسک‌های واقعی a) ریسک استفاده از پساب در کشاورزی و b) ریسک استفاده از پساب در صنعت

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به موضوعیت طرح که ریسک استفاده از پساب در کشاورزی و صنعت است، در این پژوهش به بررسی و ارزیابی مخاطرات و پیامدهای ناشی از گزینه‌های مختلف استفاده از پساب پرداخته شد. با مرور پیشینه و پژوهش‌های متعدد ساختارهایی برای محاسبه ریسک‌های استفاده از پساب در صنعت و کشاورزی ارائه شد. برای محاسبه ریسک استفاده از پساب در این دو کاربری، ۷۰ سری داده کیفیت تصفیه‌خانه از ۲۶ تصفیه‌خانه کشور بررسی شد. نتایج ریسک‌ها در تصفیه‌خانه‌های مختلف نشان داد که در اکثر مناطق ریسک استفاده از پساب در صنعت کمتر از ریسک استفاده از پساب در کشاورزی است.

در انتها با استفاده از شبکه‌های بیزین که توانایی و قابلیت‌های آن نیز پیشتر بحث شد، ساختارهایی برای مدل‌سازی ریسک استفاده از پساب در کشاورزی و صنعت در شبکه‌های بیزین ایجاد شده است. این ساختارها در شبکه‌های بیزین به مدیران و مجریان پروژه‌های استفاده از پساب کمک می‌کند تا با دقت قابل‌قبولی از شبکه‌های بیزین بتوانند به ارزیابی محیط‌زیستی، اجتماعی-فرهنگی، اقتصادی و فنی، استفاده از پساب در کشاورزی و صنعت بپردازند که البته این موضوع نیاز به داشتن داده‌های کافی و مفید برای آموزش مدل و استفاده از آن است. هر چند مدل بیزین قادر به لحاظ داده‌های ناقص است اما لزوم توجه به خروجی های مطمئن و صحت‌سنجی آنها برای کاربر بسیار اهمیت دارد. همچنین بهره‌برداران تصفیه‌خانه‌ها می‌توانند با استفاده از قابلیت محاسبات رو به عقب در شبکه بیزین با انتخاب ریسک مدنظر خود میزان کیفیت پساب خروجی از تصفیه‌خانه را محاسبه و بر اساس آن فرایندهای تصفیه و زمان ماند در تصفیه‌خانه را تغییر داده تا در عین مدیریت خطرپذیری‌های اقتصادی و فنی، خطرپذیری محیط‌زیستی و اجتماعی-فرهنگی نیز رعایت شوند. پژوهش‌های آینده نویسندگان این پژوهش بر روی استفاده از این ساختارها برای منطقه مطالعاتی مشخصی انجام خواهد شد تا کاربرد نتایج پژوهش در امر مدیریت ریسک و انتخاب سناریو برتر برای استفاده از پساب در آن منطقه تعیین می‌شود.

۵- قدردانی

به‌این وسیله از کلیه کارفرمایان محترم مرتبط با شرکت‌های آب و فاضلاب، شرکت‌های مهندسین مشاور و کارشناسان محترمی که در تهیه داده‌های موردنیاز این پژوهش همکاری و مساعدت کرده‌اند، قدردانی می‌شود.

References

Abebe, Y., Kabir, G. & Tesfamariam, S. 2018. Assessing urban areas vulnerability to pluvial flooding using GIS applications and bayesian belief network model. *Journal of Cleaner Production*, 174**,** 1629-1641.

Anbari, M. J., Tabesh, M. & Roozbahani, A. 2017. Risk assessment model to prioritize sewer pipes inspection in wastewater collection networks. *Journal of Environmental Management*, 190**,** 91-101.

Asgarian, M., Tabesh, M. & Roozbahani, A. 2013. Risk assessment of wastewater collection performance using the fuzzy decision-making approach. *Journal of Water and Wastewater*, 26(4)**,** 74-87. (In Persian)

Aven, T. 2011. On some recent definitions and analysis frameworks for risk, vulnerability, and resilience. *Risk Analysis*, 31**,** 515-522.

Cockburn, G. & Tesfamariam, S. 2012. Earthquake disaster risk index for Canadian cities using bayesian belief networks. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 6**,** 128-140.

Ghorbani Mooselu, M., Nikoo, M. R., Latifi, M., Sadegh, M., Al-Wardy, M. & Al-Rawas, G. A. 2020. A multi-objective optimal allocation of treated wastewater in urban areas using leader-follower game. *Journal of Cleaner Production*, 267**,** 122189.

Haimes, Y. 2009. On the complex definition of risk: a systems-based approach. *Risk Analysis: An Official Publication of the Society for Risk Analysis*, 29**,** 1647-1654.

Hashemi, S. H., Porasghar, F., Nasrabadi, T., Ramezani, S. & Khoshro Gh. 2011. *Guidance of Iran's water resources quality index calculation*. Iran's Department of Environment in Cooperation with Shahid Beheshti University. Pub. Tehran, Iran. (In Persian)

Kalavrouziotis, I., Filintas, A., Koukoulakis, P. H. & Hatzopoulos, J. 2011. Application of multicriteria analysis in the management and planning of treated municipal wastewater and sludge reuse in agriculture and land development: the case of Sparti's wastewater treatment plant, Greece. *Fresenius Environmental Bulletin*, 20**,** 287-295.

Kayhanian, M. & Tchobanoglous, G. 2018a. Potential application of reclaimed water for potable reuse: part 1-introduction to potable water reuse. *Journal of Water and Wastewater*, 116(4)**,** 3-22. (In Persian)

Kayhanian, M. & Tchobanoglous, G. 2018b. Potential application of reclaimed water for potable reuse: part II-technical and regulatory issues. *Journal of Water and Wastewater*, 116(4)**,** 23-60. (In Persian)

Kayhanian, M. & Tchobanoglous, G. 2018c. Potential application of reclaimed water for potable reuse: part III-the path forward and implementation challenges. *Journal of Water and Wastewater*, 116(4)**,** 61-74. (In Persian)

Khakzad, N., Khan, F. & Amyotte, P. 2011. Safety analysis in process facilities: comparison of fault tree and Bayesian network approaches. *Reliability Engineering and System Safety*, 96**,** 925-932.

Pan, Q., Chhipi-Shrestha, G., Zhou, D., Zhang, K., Hewage, K. & Sadiq, R. 2018. Evaluating water reuse applications under uncertainty: generalized intuitionistic fuzzy-based approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32**,** 1099-1111.

Pearl, J. 1988. *Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference*, Morgan Kaufmann Publishers Inc. Massachusetts, USA.

Sari, M. D. K., Kristensen, G. H., Andersen, M., Ducheyne, A. A. M. & Lee, W. A. 2017. Water-reuse risk assessment program (WRAP): a refinery case study. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 7**,** 162-174.

Shakeri, H. & Nazif, S. 2018. Development of an algorithm for risk-based management of wastewater reuse alternatives. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8**,** 38-57.

Shariat, R., Roozbahani, A. & Ebrahimian, A. 2018. Risk assessment of the urban runoff collection networks using spatial multi criteria decision-making (case study: district 11 of Tehran). *Journal of Water and Wastewater*, 30(1)**,** 1-17. (In Persian)

Tabesh, M., Roozbahani, A. & Hadigol, F. 2018a. Risk assessment of water treatment plants using fuzzy fault tree analysis (case study: Jalaliyeh water treatment plant). *Journal of Water and Wastewater*, 29(4)**,** 132-144. (In Persian)

Tabesh, M., Roozbahani, A., Roghani, B., Faghihi, N. R. & Heydarzadeh, R. 2018b. Risk assessment of factors influencing non-revenue water using Bayesian networks and fuzzy logic. *Water Resources Management*, 32**,** 3647-3670.

Taheriyoun, M., Alavi, V. & Ahmadi, A. 2016. Risk analysis of wastewater reuse in agriculture using Baysian network. *Amirkabir Journal of Civil Engineering (Amirkabir)*, 48**,** 101-109. (In Persian)

Wang, X., Ma, F., Li, C. & Zhu, J. 2015. A Bayesian method for water resources vulnerability assessment: a case study of the Zhangjiakou region, North China. *Mathematical Problems in Engineering*, 120873.

Yargholi, B., Azimi, M, M. & M. Pormoghadam, M. 2018. Successful experience in using wastewater in eucalyptus cultivation in saline lands of Bushehr province. *2nd National Festival of Water Technologies, Unconventional Waters (Saline and Wastewater)*, Mashhad, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (In Persian)