تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال دهم، شماره ۲، پائیز ۱۳۹۳
Volume 10, No. 2, Fall 2014 (IR-WRR)
۱-۱۱

ارزیابی‌اطمینان‌پذیری تصفیه‌خانه فاضلاب شهری با استفاده از آنالیز درخت خطا

مسعود طاهریون[۱]*، مرضیه بهرامی[۲] و صابر مرادی‌نژاد[۳]

چکیده

با توجه به رشد سریع جمعیت و نیاز فزاینده برای آب پاک و قابل اطمینان، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نقش مهمی در تامین یک منبع قابل اطمینان آب ایفا می‌نمایند. در این ارتباط اطمینان‌پذیری یک تصفیه‌خانه فاضلاب، زمانی که پساب خروجی، مجدداً استفاده شده و یا به منابع آبی تخلیه می‌شود، مسئله‌ای حیاتی است. عوامل اصلی مؤثر بر عملکرد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، تغییرات در ورودی، تغییرات ذاتی در فرآیندهای تصفیه و مشکلات طراحی و شکست‌های تجهیزاتی و عملیاتی است. بنابراین دستیابی به استانداردهای تخلیه و استفاده مجدد، نیازمند ارزیابی اطمینان‌پذیری تصفیه‌خانه است. از میان روش‌های مختلف ارزیابی اطمینان‌پذیری سیستم‌ها، روش آنالیز درخت خطا یکی از روش‌های معمول و کارآمد است. آنالیز درخت خطا یک روش استنتاجی تحلیل شکست از بالا به پایین است که در آن یک حالت نامطلوب از سیستم که شامل شکست یا عدم تحقق اهداف سیستم می‌باشد، تجزیه و تحلیل می‌شود.

مطالعه موردی در این مقاله تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک غرب تهران بوده که فرآیند آن لجن فعال متعارف بوده و پساب خروجی آن برای آبیاری فضای سبز پایین دست مورد استفاده قرار می‌گیرد. اجزای درخت خطا در این تحقیق شامل تخطی *BOD* تصفیه‌خانه از استاندارد آبیاری به عنوان رویداد نهایی و مواردی نظیر خطای اپراتور، خرابی تجهیزات و مشکل طراحی به عنوان رویدادهای پایه می‌باشد. مقدار احتمالات رویدادهای پایه با توجه به داده‌های موجود و نظرات کارشناسان و بهره‌برداران تصفیه‌خانه تعیین شده و احتمال رویداد نهایی محاسبه شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده احتمال بروز تخطی پساب خروجی ۲۹ درصد برآورد شده که عوامل انسانی به خصوص خطای اپراتور بالاترین سهم را در وقوع آن دارا می‌باشد. پس از آن عوامل مکانیکی، اقلیمی (کمیت و کیفیت فاضلاب ورودی) و عوامل مرتبط با شبکه در رده‌های بعد قرار می‌گیرند. در این رابطه جهت افزایش اطمینان‌پذیری و مدیریت ریسک اقداماتی با اولویت توجه به کاهش خطاهای مربوط به عوامل انسانی، افزایش سطح نظارت و بازرسی سیستم توصیه گردیده است.

کلمات کلیدی: اطمینان‌پذیری، تصفیه‌خانه فاضلاب، درخت خطا (FTA)، مجموعه برش حداقل

تاریخ دریافت مقاله: ۲۱ آبان ۱۳۹۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۲۳ فروردین ۱۳۹۳

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانش‌آموخته ارشد مهندسی عمران مهندسی محیط زیست دانشگاه خوارزمی تهران، تهران، ایران

۳- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران

*- نویسنده مسئول

Reliability Analysis of a Municipal Wastewater Treatment Plant Using Fault Tree Analysis

M. Taheriyoun [1], M. Bahrami [2] and S. Moradinejad [3]*

Abstract

According to the rapid population growth and increasing need for clean and reliable water, wastewater treatment plants play an important role in providing a reliable source of water. In this regard, the reliability of a wastewater treatment plant is a critical issue while the effluent is reused or discharged to water resources. Main factors that affect the performance of a wastewater treatment plant are the variability of the influent, inherent variability in the treatment processes, deficiencies in design and mechanical equipments and operational failures. Thus, meeting established reuse and discharge criteria would require assessment of plant reliability. Amongst many techniques developed in system reliability analysis, Fault Tree Analysis (FTA) is one of the popular and efficient methods. FTA is a top down, deductive failure analysis in which an undesired state of a system, including failure to achieve system goals, is analyzed.

The case study in this article is West Town wastewater treatment plant in Tehran which is a conventional activated sludge process and the effluent is used in irrigation of downstream green areas. The FTA components in this study include the violation of BOD from the standard limit for irrigation as the top event and cases such as operator fault, malfunction of the equipments and failure in the plant design as the basic events. The probabilities of basic events were determined based on available data and the experts' and operators' opinions and the probability of the top event was calculated. According to the obtained results, the probability of effluent BOD violation is estimated about 29% in which human error specially operator's fault has the highest share in its occurance. Subsequently the mechanical, climate (influent wastewater quantity and quality) and factors related to collection network are placed in the following order. In this regard, to increase the reliability and management of the risk, some measures with the priority of focusing on reduction of human faults and incresing the level of supervision and inspection was recommended.

Keywords: Reliability, Wastewater treatment plant, Fault tree analysis (FTA), Minimum cut set

Received: April 10, 2013
Accepted: April 12, 2014

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Email: taheriyoun@cc.iut.ac.ir

2- MSc. Graduate, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

3- Young Researchers and Elite Club, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

*- Corresponding Author

۱- مقدمه

امروزه با توجه به محدودیت منابع آب و ضرورت استفاده بهینه از این منابع، اهمیت استفاده از پساب‌های تصفیه شده مشخص می‌گردد. از طرف دیگر کاربرد پساب با تصفیه ناقص می‌تواند مشکلات عدیده بهداشتی و زیست‌محیطی به دنبال داشته باشد. از این رو کارایی تصفیه‌خانه فاضلاب تأثیر بسزایی در محیط زیست و بازگرداندن آب به چرخه طبیعی دارد. یک تصفیه‌خانه فاضلاب متشکل از واحدها و اجزای مختلف فرآیندی و الکترومکانیکی می‌باشد که بروز اشکال در عملکرد هر یک با توجه به جایگاه آن در زنجیره علت و معلولی واحدها می‌تواند منجر به عدم تحقق کیفیت قابل قبول پساب خروجی گردد. دستیابی به استانداردهای خروجی در یک تصفیه‌خانه فاضلاب تابع عوامل متعددی از جمله توزیع داده‌های دبی و غلظت ورودی تصفیه‌خانه و احتمال بروز نقص در عملکرد فرآیندها و تجهیزات بوده که باعث ایجاد عدم قطعیت در عملکرد تصفیه‌خانه می‌شود. به دلیل وجود این عدم قطعیت‌ها ریسک شکست اجتناب‌ناپذیر بوده و تصفیه‌خانه می‌بایست بر اساس ریسک قابل قبول طراحی شود.

به طور کلی اطمینان‌پذیری یک تصفیه‌خانه احتمال عملکرد کامل سیستم در بازه زمانی معین و تحت شرایط خاص تعریف می‌شود. به عبارت دیگر درصد زمان‌هایی که غلظت خروجی حدود مجاز تعیین شده را رعایت نماید (Metcalf & Eddy, 2003). یکی از روش‌های ارزیابی ریسک و اطمینان‌پذیری سیستم‌ها تکنیک تحلیل درخت خطا (FTA[1]) است که یک روش قیاسی (از کل به جزء) بر مبنای نقص سیستم بوده و هم چون یک روش قیاسی، با یک رویداد نامطلوب (رویداد اصلی) شروع شده و سپس علل آن با استفاده از یک فرآیند سیستماتیک، با رفتن به عقب تعیین می‌شوند. به عبارت دیگر درخت خطا بر اساس یک نمودار منطقی با معرفی ارتباطات رویدادها با رویداد اصلی و ارائه تحلیل کمی از سیستم، راههای بروز شکست (حالت نامطلوب) را نشان داده و درجه اطمینان‌پذیری سیستم را محاسبه می‌نماید Al Saleem (2007). همچنین تحلیل کمی درخت خطا می‌تواند اطلاعات مفیدی درباره‌ی احتمال وقوع رویداد نهایی و اهمیت تمام رویدادها و علل تشکیل دهنده‌ی درخت خطا را فراهم نماید Bedford and Cooke (2001).

محدودیت اصلی روش FTA، ضعف احتمالی آن در شناسایی کلیه رویدادهایی است که می‌توانند به وقوع رویداد نهایی منتهی شود دلیل آن می‌تواند ناشی از عدم تجربه و آگاهی کافی محقق از وظیفه و رفتار سیستم باشد (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۰). محدودیت دیگر این روش مشکل بودن تعیین احتمال وقوع شکست‌ها است، هر چند که داده‌های زیادی از طریق بانک‌های اطلاعاتی، نظرات متخصصین و منابع دیگر در دسترس‌اند ولی تعیین احتمال دقیق شکست‌ها به‌ویژه خطاهای انسانی بسیار مشکل می‌باشد زیرا رفتار انسان‌ها در شرایط مختلف و حتی شرایط یکسان متفاوت است. با وجود این محدودیت‌ها، تکنیک تحلیل درخت خطا هنوز هم به‌عنوان یکی از قوی‌ترین تکنیک‌های مورد استفاده در تجزیه و تحلیل ایمنی و قابلیت اعتماد سیستم‌ها محسوب می‌باشد (امینی، ۱۳۸۴).

در رابطه با تحلیل اطمینان‌پذیری تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب تاکنون مطالعات محدودی با روش‌های آماری انجام شده است. Oliveira et al. (2008) به بررسی اطمینان‌پذیری ۱۶۶ تصفیه‌خانه در برزیل در قالب شش فرآیند مختلف با استفاده از ضریب اطمینان‌پذیری COR[2] پرداختند. این ضریب بر اساس پارامترهای آماری داده‌های خروجی تصفیه‌خانه‌ها محاسبه گردید و اطمینان‌پذیری فرآیندها در رابطه با تخطی از استانداردهای خروجی تصفیه‌خانه مورد ارزیابی قرار گرفت. Al Saleem (2007) با توسعه یک مدل اطمینان‌پذیری احتمالاتی بر مبنای توزیع گاما و با تحلیل داده‌های ورودی و خروجی دبی و غلظت‌ها، به پیش بینی عملکرد آتی چند تصفیه‌خانه فاضلاب پرداخته است. روشهای آماری نیاز به داده‌های کامل ورودی و خروجی تصفیه‌خانه داشته و در موارد کمبود داده استفاده از روشهای سیستماتیک و تحلیلی نظیر درخت خطا کارآیی بیشتری دارد.

Mercer & Hrudey (1990) از درخت خطا در اطمینان‌پذیری کیفیت خروجی یک تصفیه‌خانه آب و ارزیابی کمی ریسک‌های ایجاد شده توسط اپراتور در تصفیه‌خانه آب استفاده کردند. Beauchamp et al. (2010) با استفاده از درخت خطا روشی را در شناسایی خطرات فنی و بهره‌برداری تصفیه‌خانه آب ارائه نمودند. هدف اصلی تحقیق، توسعه یک روش سیستماتیک جهت بهبود درک از نحوه تاثیر فاکتورهای فنی و بهره‌برداری تصفیه‌خانه بر حذف یک نوع پاتوژن به وسیله فرآیند اولترفیلتراسیون بوده است. در این تحقیق عوامل اثرگذار به صورت کیفی مورد تحلیل قرار گرفته است. Andreas et al. (2009) از روش تحلیل درخت خطا در تحلیل ریسک سیستم شبکه آب آشامیدنـــی استفاده نمودند. Bourouni (2013) جهت ارزیابی عملکردی یک سیستم اسمز معکوس در تصفیه آب از دو روش تحلیل درخت خطا و دیاگرم بلوک اطمینان‌پذیری استفاده نمود.

Kelley and Allison (1981) به کمک روش درخت خطا به بررسی رویداد تخطی غلظت کلر باقی مانده از استاندارد در خروجی یک تصفیه‌خانه فاضلاب به روش صافی چکنده پرداختند. در این تحقیق مسیرهای بحرانی رویداد تخطی مشخص شده و نشان داده شد که مهمترین عامل در تخطی کلر باقی مانده به طور مستقیم از زمان ماند، در حوض اختلاط کلر تأثیر می‌پذیرد. در این بروز خطا در بخش فرآیند بیولوژیک تصفیه‌خانه مورد بررسی قرار نگرفته است. LiJun (2008) اطمینان‌پذیری یک تصفیه خانه فاضلاب پتروشیمی در شمال چین به روش درخت خطا بررسی کرده، عوامل مورد بررسی در این تحقیق شامل خرابی تاسیسات مکانیکی و الکتریکی و عوامل انسانی و سیستم کنترل اتوماتیک بوده که در آن عوامل فرآیندی مؤثر در راهبری سیستم بیولوژیکی تصفیه‌خانه در درخت خطا لحاظ نگردیده است.

در تحقیقات داخلی از درخت خطا در زمینه‌های مختلف نظیر تخمین ریسک عدم تأمین آب توسط سیستم آبرسانی در اثر وقوع زلزله (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۰)، ارزیابی خطرات بروز حوادث در محیط‌های صنعتی و کارخانجات (ولدخانی، ۱۳۸۳ و امینی، ۱۳۸۴)، ارزیابی ریسک زیست‌محیطی آلودگی هوا در انبار مخازن نفت (امانت‌یزدی، ۱۳۹۱) و موارد دیگر در زمینه‌های مختلف مهندسی مورد استفاده قرار گرفته ولی تاکنون تحقیقی در رابطه با تحلیل درخت خطا برای تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب به ثبت نرسیده است.

به طور کلی در مطالعات قبلی تحلیل اطمینان‌پذیری سیستم‌های تصفیه‌خانه عمدتاً با استفاده از روشهای تحلیل آماری انجام شده که این روشها نیاز به داده‌های کاملی دارد. تاکنون مطالعات کمی در این زمینه با استفاده از تکنیک درخت خطا انجام شده است. سابقه کاربرد این روش در تحلیل اطمینان‌پذیری تصفیه‌خانه‌های آب به دلیل حساسیت آنها در تامین آب شرب بیشتر به کار گرفته شده است. در هیچ یک از مطالعاتی که تاکنون برای اطمینان‌پذیری تصفیه‌خانه فاضلاب به روش درخت خطا انجام شده، اطمینان‌پذیری تصفیه خانه از لحاظ فرآیند بیولوژیکی و خصوصا در مورد سیستم لجن فعال با در نظر گرفتن جامعیت و زنجیره فرآیندی مورد بررسی قرارنگرفته است. در این مطالعه با استفاده از روش تحلیل درخت خطا، اطمینان‌پذیری عملکرد تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک غرب تهران به روش لجن فعال متعارف با در نظر گرفتن جامعیت و عوامل مؤثر بروز خطا در راهبری فرآیندی سیستم، با هدف تامین کیفیت مناسب پساب خروجی جهت استفاده مجدد در آبیاری فضای سبز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مطالعه موردی

تصفیه‌خانه شهرک غرب تهران واقع در غرب تهران برای جمعیتی معادل ۸۰۰۰۰ نفر و دبی روزانه ۱۰۳۶۸۰ متر مکعب بر روز و به روش لجن فعال متداول طراحی شده است. فلودیاگرام این تصفیه‌خانه در شکل ۱ نشان داده شده است. فرآیندهای مورد استفاده در این تصفیه‌خانه عبارتند از آشغال‌گیر، دانه‌گیر، ته‌نشینی اولیه، هوادهی، ته‌نشینی ثانویه و کلرزنی بوده و فرآیندهای تصفیه لجن شامل تثبیت هوازی و بستر لجن خشک‌کن می‌باشند. پساب خروجی تصفیه‌خانه برای آبیاری فضای سبز مجتمع برج میلاد تهران به فروش می‌رسد. شرکت تأمین و تصفیه آب و فاضلاب. بر اساس نظرات مسئول بهره‌برداری تصفیه‌خانه برخی مشکلات سیستم موجود که منجر به تصفیه ناقص و ایجاد شرایط نامطلوب می‌گردد عبارتند از: خرابی پمپ‌های لجن‌کش، بروز پدیده بالکینگ در حوض ته‌نشینی ثانویه و افزایش دبی ورودی به تصفیه‌خانه در شرایط بارندگی، که در این شرایط غلظت BOD_5 پساب خروجی تصفیه‌خانه از حد مجاز استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست برابر ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر تجاوز می‌نماید. در این مطالعه به بررسی جامعی از عوامل دخیل در تخطی BOD پساب خروجی تصفیه‌خانه از استاندارد مورد نیاز برای آبیاری فضای سبز پرداخته می‌شود.

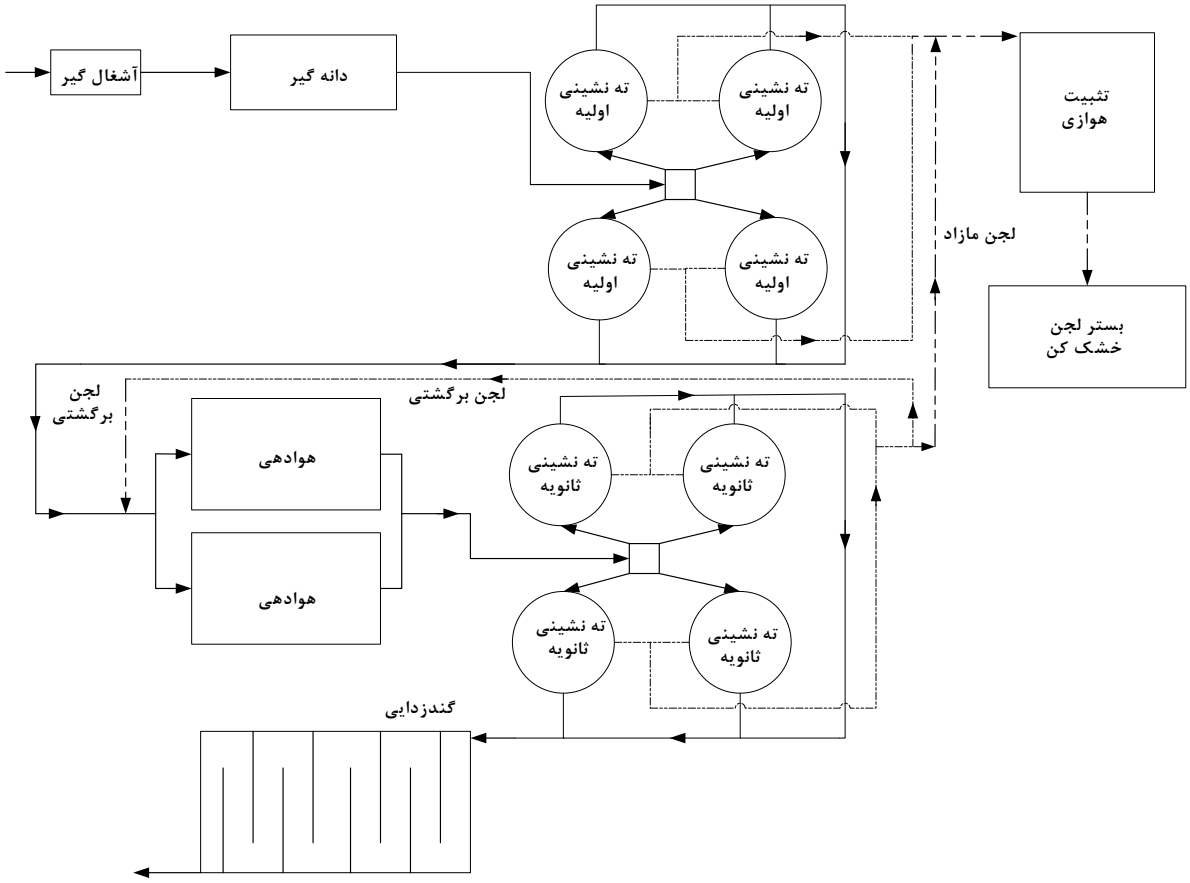
۳- روش تحقیق

با توجه به این در این تحقیق جهت ارزیابی اطمینان‌پذیری تصفیه خانه شهرک غرب از روش تحلیل درخت خطا استفاده می‌شود، گامهای انجام تحقیق بر اساس روش مذکور به شرح زیر می‌باشد:

۱- بررسی واحدهای تصفیه‌خانه و چگونگی بهره‌برداری از سیستم: دراین مرحله بر اساس فلودیاگرام موجود، ارتباط بین واحدهای تصفیه‌خانه و اثرات متقابل آنها مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲- تعریف رویداد نهایی: رویداد نهایی عبارت است از یک حالت بحرانی که سبب شکست سیستم می‌شود. این رویداد منحصر به فرد بوده و در درخت خطا تکرار نمی‌شود. در تصفیه‌خانه شهرک غرب این رویداد، تخطی غلظت BOD_5 پساب خروجی تصفیه‌خانه از حد مجاز استاندارد می‌باشد.

۳- ساخت درخت خطا و توسعه منطقی خطا: با توجه به اقدامات انجام شده در دو مرحله قبل، عوامل مؤثر ایجاد رویداد نهایی به وسیله دروازه‌های منطقی (شامل دروازه‌های "و" و "یا") به یکدیگر متصل شده و رویداد نهایی را تشکیل می‌دهند.



شکل ۱- فلودیاگرام تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک غرب تهران

منطق لازم برای ترسیم نمودارهای درخت خطا مستلزم درک کاملی از عملکرد فیزیکی سیستم می‌باشد. دروازه‌های منطقی که در نمودار درخت خطا به کار گرفته می‌شوند عبارتند از:

- دروازه "و": برای بیان حالتی استفاده می‌شود که رخداد رویداد خروجی، تنها در صورت رخداد همه رویدادهای ورودی انجام شود.
- دروازه "یا": برای بیان حالتی استفاده می‌شود که رخداد رویداد خروجی منوط به رخداد حداقل یکی از رویدادهای ورودی باشد.

۴- تحلیل کمی و کیفی: این تحلیل شامل رده‌بندی رویدادهای اولیه مطابق با نظرات متخصصان و داده‌ها و تعیین احتمال رویداد نهایی بر اساس روابط جبر بولی می‌باشد.

۵- تعیین اولویت‌بندی اهمیت رویدادهای اولیه: این اولویت‌بندی عبارت است از برآورد تعیین میزان تأثیر هر یک از رویدادهای اولیه در بروز رویداد نهایی که در برنامه‌ریزی و مدیریت ریسک بسیار اهمیت دارد. مقدار اهمیت نسبی هر رویداد بر اساس رابطه (۱) برابر است با مقدار اختلاف احتمال وقوع رویداد نهایی در حالت پایه با حالتی که احتمال رویداد اولیه مورد نظر صفر فرض شود. با توجه به این توضیح رابطه زیر برای پارامتر ضریب بهبود[۳] یک رویداد اولیه به دست می‌آید (قراچورلو، ۱۳۸۴).

$$I.F. = \frac{P(N)-P(N_0)}{P(N)} \times 100 \qquad (۱)$$

که $P(N)$: احتمال بروز رویداد نهایی در حالت پایه و $P(N_0)$: مقدار احتمال بروز رویداد نهایی به شرط صفر بودن احتمال رویداد اولیه مورد نظر می‌باشد.

۶- ارائه راهکارهای کاهش ریسک و بهبود سطح اطمینان‌پذیری: در مرحله آخر با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل درخت خطا و میزان اطمینان‌پذیری تصفیه‌خانه، راهکارهایی برای کاهش ریسک‌های تصفیه‌خانه بر اساس

اولویت‌بندی اهمیت رویدادهای خطا که در مرحله قبل محاسبه گردید، ارائه می‌شود.

تعیین احتمال رویدادهای اولیه بر اساس داده‌های موجود و نظرات متخصصان تعیین می‌گردد. همچنین در این مرحله ترکیبهای مختلفی از رویدادها که موجب بروز رویداد نهایی سیستم می‌شود نیز تعیین می‌شود. این ترکیبها مجموعه‌های برش نامیده می‌شود. دلیل نامیده شدن این مجموعه به مجموعه‌های برش به خاطر آن است که رخداد خطا در اعضای این مجموعه موجب قطع همه مسیرها از ورودی به خروجی می‌گردد.

به کوچک‌ترین زیرمجموعه برش که برای وقوع رویداد نهایی لازم و کافی باشد برش حداقل می‌گویند. تعیین برش حداقل با استفاده از جبر بولی صورت گرفته و از رویداد بالا یک به یک به سمت پایین حرکت کرده و رویدادهای پایانی جایگزین رویدادهای بالاتر خواهند شد. به این صورت که دروازه ((و)) گسترش افقی و دروازه ((یا)) گسترش عمودی ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر با بسط منطقی روابط جبر بولی برای رویداد نهایی و تبدیل آن به شکل جمع حاصل‌ضربها مجموعه‌های برش حداقل تعیین می‌شود.

بر اساس روابط جبر بولی با فرض مستقل بودن رویدادها از نظر آماری مقدار خروجی برای یک دروازه ((و)) از رابطه ۲ و برای دروازه ((یا)) از رابطه ۳ به‌دست می‌آید. (Abdelgawad, 2011)

$$P_T = \prod_{i=1}^{n} P_i \qquad (۲)$$

$$P_T = \sum_{i=1}^{n} P_i \qquad (۳)$$

که P_T: نشان دهنده احتمال شکست در خروجی دروازه، i: شمارنده، n: تعداد رویدادهای ورودی متصل به دروازه و P_i: نشان دهنده احتمال شکست ورودی هستند.

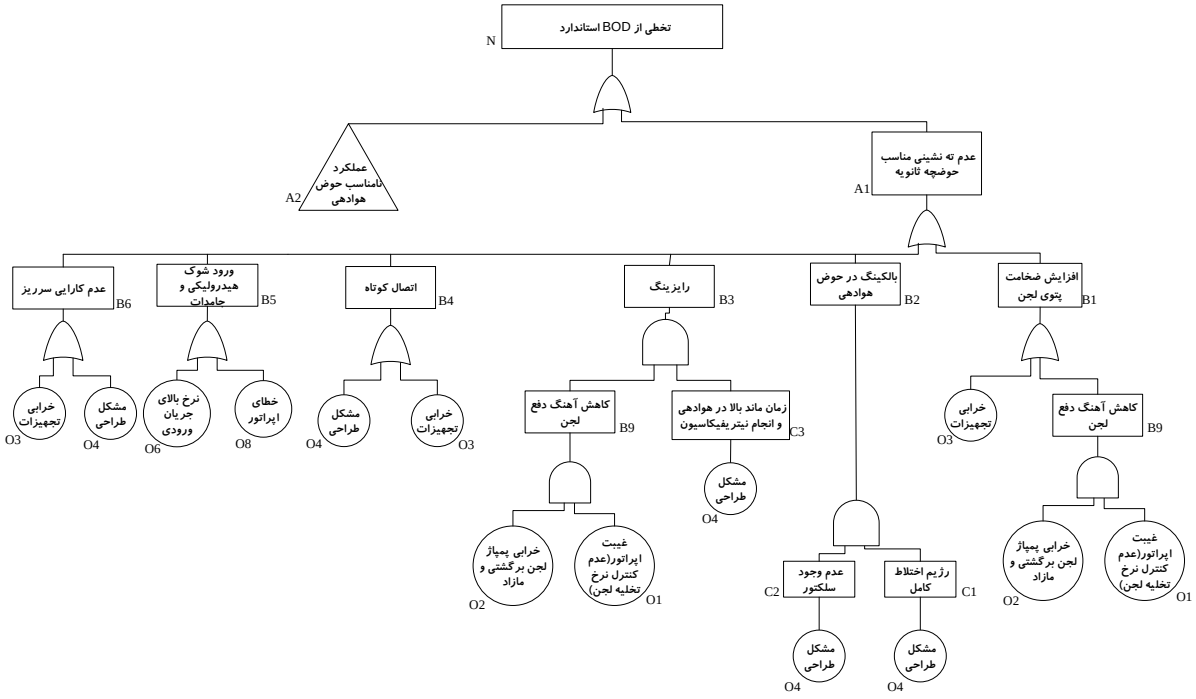
۴- نتایج

بر اساس فلودیاگرام شکل ۱ و زنجیره فرایندی سیستم تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک غرب، ارتباط منطقی عملکرد اجزای مختلف این تصفیه‌خانه با رویداد نهایی تخطی از BOD حد مجاز آبیاری فضای سبز، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این رابطه توجه به نظرات متخصصان و مسئولان بهره‌برداری تصفیه‌خانه و استخراج اطلاعات مربوط به اشکالات متداول بهره‌برداری سیستم‌های لجن فعال از مراجع معتبر (Qasim, 1999; Metcalf and Eddy, 2003) سلسله مراتب عوامل منتهی به بروز تخطی BODخروجی به صورت درخت خطا ترسیم گردیده است. با توجه به بزرگی نمودار درخت خطا تصفیه‌خانه، این نمودار در سه شکل ۲، ۳ و ۴ نمایش داده شده و ارتباط هر شکل با شکل بعدی با نماد مثلث مشخص گردیده است. در این شکل‌ها دروازه «و» با نماد ⌓ و دروازه «یا» با نماد ⌒ نشان داده شده است.

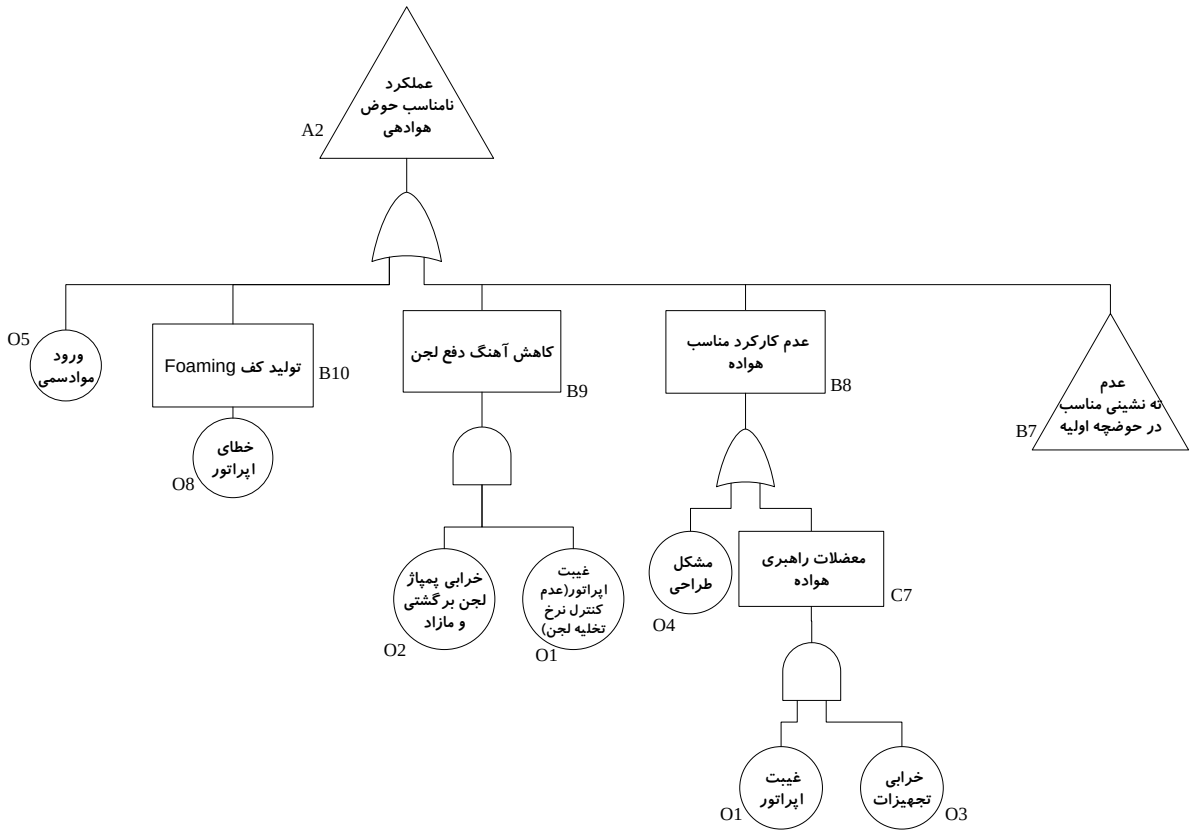
به طور کلی بروز تخطی BOD خروجی تصفیه‌خانه به دلیل اشکال در کارکرد سیستم‌های حوض ته‌نشینی ثانویه، هوادهی و ته‌نشینی اولیه می‌باشد. این اشکالات در قالب خطاهای انسانی و مکانیکی (تجهیزاتی)، اقلیمی (کمیت و کیفیت فاضلاب ورودی) و شبکه جمع‌آوری فاضلاب دسته‌بندی می‌گردند. خطاهای انسانی شامل مواردی نظیر خطای اپراتور، غیبت اپراتور و خطاهای مکانیکی (تجهیزاتی) به صورت خرابی پمپاژ، خرابی تجهیزات (خرابی پل دوار، خرابی بافل‌ها، خرابی سرریز)، خطاهای اقلیمی (کمیت و کیفیت فاضلاب ورودی) شامل عوامل جوی و نرخ بالای جریان ورودی و خطاهای شبکه نیز مربوط به عواملی نظیر احتمال ورود مواد سمی و فاضلابهای صنعتی غیرمجاز ناشی از انشعابات غیر مجاز به شبکه می‌باشد.

مطابق شکل ۲ بروز رویداد نهایی وابسته به یکی از عوامل بروز خطا در عملکرد حوض ته‌نشینی ثانویه و حوض هوادهی در نظر گرفته شده است. عدم ته‌نشینی مناسب در حوض زلال‌ساز ثانویه نیز با توجه به دروازه "یا" به یکی از دلایل ناشی از عملکرد سرریز خروجی، ورود شوک هیدورلیکی، بروز اتصال کوتاه، پدیده رایزینگ و بالکینگ و افزایش ضخامت پتوی لجن نسبت داده شده است. مطابق شکل ۳ بروز اختلال در حوض هوادهی نیز ناشی از حداقل یکی از عوامل ورود مواد سمی، پدیده ایجاد کف در حوض هوادهی، عدم تنظیم مناسب نرخ دفع و برگشت لجن با توجه به تنظیم مقادیر *MLSS*، *F/M* و زمان ماند سلولی و نهایتا کارکرد نامناسب حوض ته‌نشینی اولیه می‌باشد.

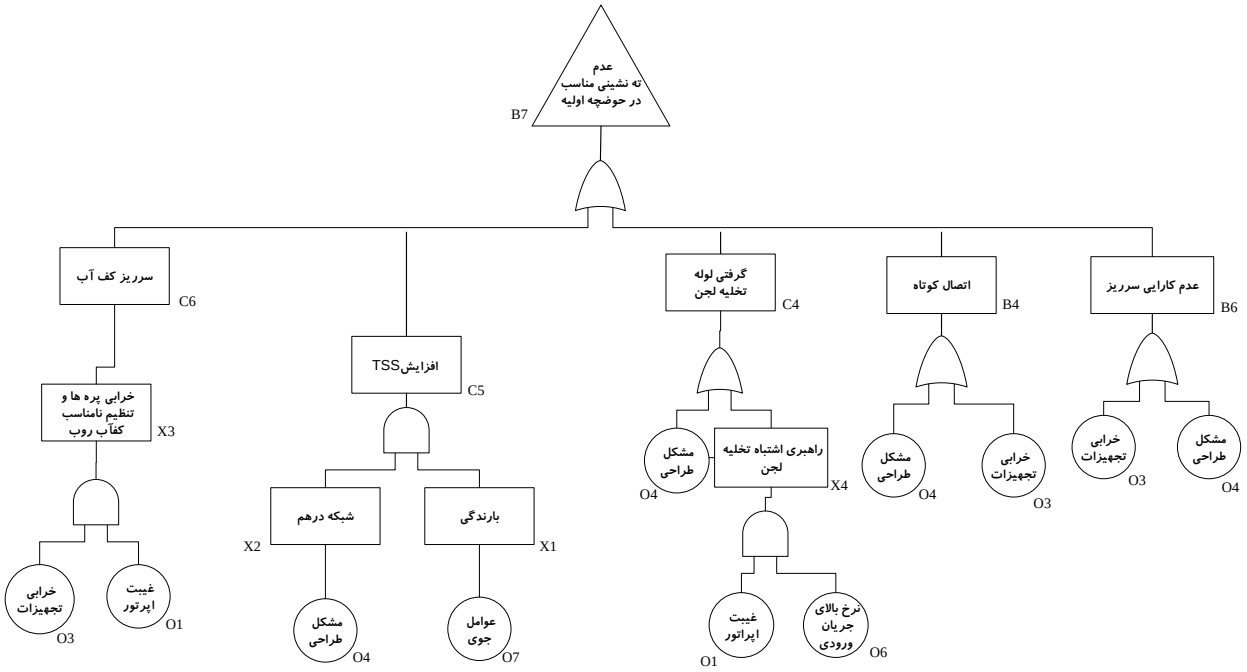
در شکل ۴ عوامل مربوط به عملکرد نامناسب حوض ته‌نشینی اولیه با توجه به دروازه "یا" مربوط به یکی از عوامل خطای سرریز خروجی، بروز اتصال کوتاه، تخلیه ناقص لجن خروجی و افزایش جامدات معلق ورودی و عملکرد نامناسب سیستم سرریز کفاب (*scum*) در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- درخت خطا تصفیه‌خانه فاضلاب (قسمت اول)



شکل ۳- درخت خطا تصفیه‌خانه فاضلاب (قسمت دوم)



شکل ۴- درخت خطا تصفیه‌خانه فاضلاب (قسمت سوم)

در اشکال ۲ تا ۴ رویدادهای موجود درخت خطا به صورت پارامتری نام‌گذاری شده‌اند و رویدادهای با نام O رویدادهای اولیه باشند. با توجه به سلسله مراتب درخت خطا رویداد نهایی با N، سطوح اول تا چهارم قبل از رسیدن به رویداد اولیه نیز به ترتیب با حروف A، B، C و X نشان داده شده است.

مجموعه‌های برش حداقل با استفاده از روش مستقیم و به کمک روابط ۲ و ۳ و قوانین حاکم بر جبر بولی برای نمودار درخت خطای این تحقیق به دست می‌آیند. بنابراین با توجه به شکل ۱ برای رویداد نهایی، رابطه ۴ به شکل زیر نوشته می‌شود.

$$\begin{aligned} N = A_1 + A_2 &= (B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 \\ &\quad + B_6) + A_2 \\ &= \big(B_1 + (C_1 + C_2) + (C_3 + B_9) + (O_3 + O_4) \\ &\quad + (O_6 + O_8) + (O_3 + O_4)\big) \\ &\quad + A_2 \\ &= ((O_1 . O_2) + O_3) + (O_4) \\ &\quad + (O_1 . O_4 . O_2) \\ &\quad + (O_3 + O_4) + (O_6 + O_8) \\ &\quad + (O_3 + O_4) + A_2 \end{aligned} \qquad (۴)$$

با جای‌گذاری رویدادها توسط رویدادهای پایین‌تر، با توجه به این‌که اجتماع دو مجموعه که یکی زیر مجموعه دیگری باشد برابر با مجموعه بزرگ‌تر خواهد بود (قانون جذب)، پس $(O_1 . O_4 . O_2) \subset O_4$ و در نتیجه $(O_1 . O_4 . O_2) + O_4 = O_4$. از طرفی اجتماع هر مجموعه با خودش برابر با همان مجموعه می‌باشد[۴]. لذا $O_3 + O_3 = O_3$ و $O_4 + O_4 = O_4$ در نهایت پس از ساده‌سازی رابطه ۴، رابطه ۵ حاصل خواهد شد:

$$N = (O_1 . O_2) + O_3 + O_4 + O_6 + O_8 + A_2 \qquad (۵)$$

و بر اساس شکل‌های ۲ و ۳، رابطه ۶ برای خطای عملکرد حوض هوادهی و ته‌نشینی اولیه به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} A_2 = B_7 + B_8 + B_9 + B_{10} + O_5 \\ = B_7 + ((O_1 . O_3) + O_4) \\ + (O_1 . O_2) + O_8 + O_5 \\ B_7 = B_6 + B_4 + C_4 + C_5 + C_6 \\ = (O_3 + O_4) + (O_3 + O_4) \\ + (O_4 + (O_1 . O_6)) + (O_7 . O_4) \\ + (O_1 . O_3) \\ = O_3 + O_4 + (O_1 . O_6) \end{aligned} \qquad (۶)$$

مشابه توضیحات قبل در ساده سازی رابطه ۴ به رابطه ۵، اشتراک دو مجموعه O_7 (عوامل جوی) و O_4 (مشکل طراحی) زیر مجموعه هر دو محسوب می‌شود، $(O_7 . O_4) \subset O_4$، پس اجتماع آن‌ها برابر O_4 شده و رویداد O_7 حذف می‌شود. در ادامه رابطه ۷ به شکل زیر به دست می‌آید:

$$A_2 = (O_3 + O_4 + (O_1.O_6)) + ((O_1.O_3) + O_4) + (O_1.O_2) + O_8 + O_5 = O_3 + O_4 + O_8 + O_5 + (O_1.O_6) + (O_1.O_2) \quad (۷)$$

نهایتا برای رویداد نهایی N رابطه حاصله برای احتمال بروز تخطی به شرح زیر خواهد بود:

$$N = A_1 + A_2 = ((O_1.O_2) + O_3 + O_4 + O_6 + O_8) + (O_3 + O_4 + O_8 + O_5 + (O_1.O_6) + (O_1.O_2))$$
$$N = (O_1.O_2) + O_3 + O_4 + O_5 + O_6 + O_8 \quad (۸)$$

بنابراین بر اساس رابطه ۸، مجموعه‌های برش‌های حداقل شامل شش مجموعه (O_8 و O_6 و O_5 و O_4 و O_3 و O_1O_2) می‌باشند: به عبارت دیگر هر یک از رویدادهای غیبت اپراتور به همراه خرابی پمپاژ لجن، خرابی تجهیزات، مشکل طراحی، ورود مواد سمی، نرخ بالای جریان ورودی و خطای اپراتور به تنهایی در صورت رخداد منجر به تخطی BOD خروجی تصفیه‌خانه از حد مجاز خواهد گردید.

۴-۱- کمی سازی درخت خطا

جهت محاسبه احتمال وقوع رویداد نهایی باید احتمال رویدادهای اولیه مشخص باشد که تعیین آن‌ها با استفاده از داده‌های موجود، سوابق و تجربیات بهره‌برداری سیستم موجود و استفاده از نظرات متخصصین امکان‌پذیر می‌باشد. در این مطالعه تیم ارزیابی درخت خطا متشکل از چهار نفر مدیر بهره‌برداری تصفیه‌خانه، کارشناس فرآیند و کارشناس مکانیک و هیئت علمی دانشگاه در نظر گرفته شد. نظرات تیم ارزیابی به صورت پرسشنامه جمع‌آوری شده و سپس با میانگین‌گیری از نظرات ارائه شده مقادیر احتمالاتی رویدادهای اولیه تعیین گردید. البته در مواردی مانند خرابی پمپها و تجهیزات که عمدتاً بروز خطا به شرایط بهره‌برداری تصفیه‌خانه مرتبط بوده از نظرات کارشناسان بهره‌برداری تصفیه‌خانه استفاده شده است. نتایج به دست آمده از این فرآیند در ادامه آمده است.

- **خرابی پمپ لجن برگشتی و مازاد**

بر اساس اطلاعات و تجربیات کارشناسان بهره‌برداری تصفیه‌خانه به طور میانگین در ۱۰ روز از سال بروز خرابی و نیاز به سرویس پمپ‌های لجن برگشتی و مازاد، محتمل می‌باشد که بر اساس آن مقدار احتمال این خرابی به شکل رابطه ۹ به دست می‌آید:

$$P(O_2) = \frac{10}{365} = 0.027 \quad (۹)$$

- **خرابی تجهیزات**

مقدار احتمالاتی خطای خرابی تجهیزات که عموماً شامل خرابی پـل دوار، خرابی بافل‌ها، خرابی سرریز با توجه نظر کارشناسان بهره‌برداری تصفیه‌خانه برابر ۰/۰۲ در نظر گرفته شده است.

$$P(O_3) = 0.02 \quad (۱۰)$$

- **نرخ بالای جریان ورودی**

با توجه به اینکه در تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک غرب افزایش جریان ورودی عمدتاً به دلیل شرایط بارندگی و ورود روانابهای شهری به تصفیه‌خانه می‌باشد لذا جهت تعیین احتمال افزایش جریان ورودی از داده‌های هواشناسی محل استفاده گردید. در این راستا بر اساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک فرودگاه مهرآباد تهران (نزدیکترین ایستگاه به محل تصفیه‌خانه) میانگین آمار ۱۵ ساله بارندگی نشان می‌دهد به طور متوسط در این منطقه ۵۵ روز بارانی در سال وجود دارد. با نظر تیم ارزیابی فرض می‌شود ۳۰٪ شرایط بارندگی منجر به ایجاد اختلال در سیستم گردد، لذا خواهیم داشت:

$$P(O_6) = P(O_7) = 0.3 \times \frac{55}{365} = 0.045 \quad (۱۱)$$

- **مشکلات طراحی**

تیم ارزیابی بـا توجه به بار ورودی حـال حاضر تصفیه‌خانه و ظرفیت‌های لحاظ شده در محاسبات طراحی، مقدار احتمالی دخیل بودن مشکلات طراحی در معضلات سیستم را ۳٪ در نظر گرفتند (رابطه ۱۲).

$$P(O_4) = 0.03 \quad (۱۲)$$

- **ورود مواد سمی**

بر اساس نظر تیم ارزیابی درخت خطا، با توجه به صنایع کارگاهی کوچک و دیگر عوامل احتمالی تخلیه کننده مواد سمی به شبکه جمع‌آوری فاضلاب احتمال ورود مواد سمی به تصفیه‌خانه ۳٪ در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۱۳).

$$P(O_5) = 0.03 \quad (۱۳)$$

- **خطای اپراتور**

میزان خطای اپراتور در هر قسمت از سیستم می‌تواند مقادیر متفاوتی را به خود اختصاص دهد ولی تیم ارزیابی درخت خطای تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک غرب به طور کلی میزان نقش اپراتور در نحوه کارکرد اجزای فرآیند را به طور متوسط ۱۵٪ لحاظ کـرده است (رابطه ۱۴).

$$P(O_8) = 0.15 \quad (۱۴)$$

- **غیبت اپراتور**

با توجه به شیفت‌های کـاری و تعداد کارگران و بهره‌برداران تصفیه‌خانه میزان حضور اپراتور در تصفیه خانه برابر ۱۲ ساعت در روز در نظر گرفته شد. بنابراین خواهیم داشت:

$$P(O_1) = \frac{12}{24} = 0.5 \quad (۱۵)$$

حال با استفاده از رابطه ۸ و جایگزین کردن مقادیر احتمالاتی روابط ۹ تا ۱۵ می‌توان مقدار خطا در رویداد نهایی تخطی از استاندارد را مطابق رابطه ۱۶ بدست آورد.

$$\begin{aligned} P(N) &= P(O_1.O_2) + P(O_3) + P(O_4) + P(O_5) \\ &\quad + P(O_6) + P(O_8) \\ P(N) &= P(O_1.O_2) + P(O_3) + P(O_4) + P(O_5) \\ &\quad + P(O_6) + P(O_8) \\ &= 0.02 + 0.03 + 0.03 \\ &\quad + 0.045 + 0.15 + (0.5 \\ &\quad \times 0.027) = 0.288 \end{aligned} \quad (۱۶)$$

بنابراین میزان خطای رویداد نهایی (ریسک) برابر با مقدار ۰/۲۸۸ بوده و میزان اطمینان‌پذیری تصفیه‌خانه مطابق رابطه ۱۷ برابر ۷۱/۲٪ بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} Reliability &= 1 - P(N) = 1 - 0.288 \\ &= 0.712 = 71.2\% \end{aligned} \quad (۱۷)$$

بنابراین بر اساس تحلیل انجام شده، درجه ریسک‌پذیری تصفیه‌خانه برای تامین پساب با کیفیت استاندارد حدود ۲۹ درصد بوده است.

۴-۲- اولویت‌بندی اهمیت رویدادهای پایه

در برنامه‌ریزی و مدیریت ریسک، اولویت‌بندی رویدادهای منجر به بروز خطا و برآورد میزان اهمیت آنها ضروری می‌باشد. برای بدست آوردن میزان اهمیت نسبی هر یک از رویدادهای اولیه بر اساس رابطه (۱)، مقدار احتمال هر رویداد اولیه در رابطه ۱۶، برابر صفر در نظر گرفته شده و اختلاف احتمال وقوع رویداد نهایی در این حالت با حالت پایه (برابر ۰/۲۸۸) بیانگر میزان اهمیت آن رویداد در به وقوع پیوستن رویداد نهایی است.

در جدول ۱ ضمن تقسیم‌بندی رویدادهای اولیه به عوامل انسانی، اقلیمی (کمیت و کیفیت فاضلاب ورودی) ، مکانیکی و شبکه فاضلاب، مقادیر ضرایب بهبود این رویدادها نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مهمترین رویداد اولیه در بروز تخطی خروجی تصفیه‌خانه خطای اپراتور به میزان ۵۱/۹٪ و کم اهمیت‌ترین آن ورود مواد سمی می‌باشد. در بین عوامل دسته‌بندی شده نیز عامل انسانی بیشترین و عامل شبکه کمترین سهم را در بروز رویداد نهایی درخت خطا دارند.

۴-۳- برنامه کاهش و مدیریت ریسک

پس از تعیین میزان اطمینان‌پذیری تصفیه خانه و اولویت‌بندی اهمیت رویدادهای تأثیر گذار در ریسک نهایی تصفیه‌خانه، در مرحله نهایی راهکارهایی برای کاهش ریسک و بهبود سطح اطمینان‌پذیری ارائه می‌گردد. با توجه به ضرایب بهبود به دست آمده از بخش قبل، مهمترین اقدام در این راستا کاهش خطاهای انسانی می‌باشد. در این زمینه مهمترین اقداماتی که در برنامه ریسک باید در نظر گرفته شود به شرح زیر است:

- آموزش راهبران و افزایش سطح دانش فنی،
- توجه به رضایت‌مندی و بهبود شرایط شغلی بهره‌برداران،
- افزایش سطح اتوماسیون سیستم بهره‌برداری و کاهش دخالت عوامل انسانی در امر راهبری تصفیه‌خانه
- افزایش فرآیندهای کنترل و بازرسی و نظارت

مسلم است که در برنامه جامع مدیریت ریسک باید به سایر عوامل مؤثر در بروز خطا در تصفیه‌خانه حتی با سطح اهمیت پایین‌تر نیز توجه شود. در بخش کاهش خطاهای مربوط به عوامل مکانیکی، بازرسی تجهیزات، انجام سرویس‌های دوره‌ای و انجام تعمیرات به موقع در مواقع لزوم مؤثر خواهد بود. جهت کاهش ریسک عوامل اقلیمی (کمیت و کیفیت فاضلاب ورودی) و شبکه نیز ایجاد تمهیداتی برای پایش لحظه‌ای و وجود سیستم هشدار شرایط بحرانی در ورودی به تصفیه‌خانه لازم است. همچنین در نظر گرفتن مخازن ذخیره برای هدایت فاضلاب ورودی با دبی مازاد و یا کیفیت حاوی مواد سمی توصیه می‌شود.

در بین واحدهای تصفیه‌خانه، با توجه به سطح دخالت رویدادهای اولیه در بروز خطای عملکردی هر یک از واحدهای تصفیه، حوض ته‌نشینی ثانویه مهمترین واحد در بروز تخطی پساب خروجی می‌باشد. لذا توجه به عملکرد و راهبری صحیح این واحد از نظر اطمینان‌پذیری کیفیت پساب خروجی اولویت دارد.

در درخت خطای شکل ۲، برخی عوامل نظیر بروز پدیده‌های بالکینگ و رایزینگ، ناشی از عوامل طراحی دانسته شده است. بنابراین اقدام برای اصلاح مشکلات طراحی در این زمینه ضروری می‌باشد. به عنوان مثال برای کنترل بالکینگ لازم است احداث

جدول ۱- اهمیت نسبی (ضرایب بهبود) رویدادهای اولیه

عوامل	رویداد	نماد	$P(N_0)$	$I.F$	$\sum I.F$
عوامل انسانی	غیبت اپراتور	O_1	0.275	4.67%	66.96%
	خطای اپراتور	O_8	0.1385	51.9%	
	مشکلات طراحی	O_4	0.2585	10.39%	
عوامل اقلیمی (کمیت و کیفیت فاضلاب ورودی)	نرخ بالای جریان ورودی	O_6	0.2435	15.59%	15.59%
عوامل مکانیکی	خرابی پمپاژ	O_2	0.275	4.67%	11.6%
	خرابی تجهیزات	O_3	0.2685	6.93%	
عوامل مرتبط با شبکه	ورود مواد سمی	O_5	0.2685	6.93%	6.93%

سلکتور بیولوژیکی یا تبدیل رژیم هیدرولیکی حوض هوادهی از اختلاط کامل به نهرگونه بررسی و اقدام شود. همچنین در صورت بروز رایزینگ در حوض ته‌نشینی، کنترل فرآیند نیتریفیکاسیون در حوض هوادهی و زمان‌ماند لجن در حوض ته‌نشینی کنترل شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق قابلیت اجرای روش تحلیل درخت خطا در ارزیابی اطمینان‌پذیری تأسیسات تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک غرب تهران مورد بررسی قرار گرفت. هدف از ارزیابی اطمینان‌پذیری، بررسی احتمال تخطی غلظت BOD پساب خروجی تصفیه‌خانه از حد استاندارد آبیاری در نظر گرفته شد. در این روش با مطالعه سیستماتیک بر روی فرآیند تصفیه‌خانه و بررسی عوامل مؤثر در عملکرد سیستم با ترسیم نمودارهای منطقی ارتباط عوامل بروز خطا با رویداد نهایی (تخطی پساب از استاندارد) نمایش داده شد. در این نمودارها راههای بروز شکست سیستم (رویداد نهایی) نشان داده شد و با ارائه تحلیل کمی به روش برش حداقل و با استفاده از روابط جبر بولین، احتمال رویداد نهایی و درجه اطمینان‌پذیری سیستم محاسبه گردید. با تعیین مجموعه‌های برش حداقل، عوامل و رویدادهای اولیه که می‌توانند به تنهایی موجب بروز شکست سیستم (رویداد نهایی) شوند، مشخص می‌گردند. سپس مقادیر احتمال هر یک از رویدادهای مذکور بر اساس نظر تیم کارشناسی ارزیابی و داده‌ها و سوابق موجود تعیین شده و احتمال بروز رویداد نهایی به میزان ۰/۲۸۸ محاسبه گردید. با تعریف پارامتر ضریب بهبود، میزان سهم هر یک از رویدادهای اولیه در بروز رویداد نهایی محاسبه گردید. بر اساس این تحلیل، عوامل انسانی در صدر قرار داشته و پس از آن به ترتیب سهم عوامل اقلیمی (کمیت و کیفیت فاضلاب ورودی)، عوامل مکانیکی و عوامل مرتبط با شبکه در رده‌های بعدی قرار گرفته‌اند. در بین رویدادهای اولیه به ترتیب اولویت، خطای اپراتور، نرخ بالای جریان ورودی، مشکلات طراحی، خرابی تجهیزات، ورود مواد سمی، غیبت اپراتور، خرابی پمپاژ و عوامل جوی قرار دارند. نتایج به دست آمده برای مدیریت ریسک تصفیه‌خانه و ارائه اقدامات کاهش بروز تخطی پساب خروجی مورد استفاده قرار گرفته و در این رابطه با توجه به اهمیت عوامل انسانی، اقداماتی نظیر توجه به ارتقاء وضعیت شغلی پرسنل بهره‌بردار، نظارت مداوم، مکانیزه کردن کنترل فرآیند و کاهش دخالت عوامل انسانی تاکید گردیده است.

جهت ادامه این تحقیق پیشنهاد می‌شود با لحاظ نمودن عدم قطعیت پارامترها و رویدادها با استفاده از روش تحلیل مونت‌کارلو و روش درخت خطای فازی، اطمینان پذیری تصفیه‌خانه برآورد گردد. همچنین مقایسه نتایج به دست آمده با سایر روشهای تحلیل اطمینان‌پذیری سیستم نظیر روش تحلیل اثرات حالات شکست (FMEA[5]) و به کارگیری روش تحقیق در سایر سیستم‌های تصفیه فرآیندی توصیه می‌شود.

پی نوشت‌ها

1- Fault Tree Analysis
2- Coefficent of Reliability
3- Improvement Factor
4- Idempotence law
5- Failure Mode Effect Analysis

۶- مراجع

امانت یزدی ل (۱۳۹۱) ارزیابی ریسک زیست‌محیطی آلودگی هوا در انبار شرکت پخش فرآورده‌های نفتی یزد و پهنه‌بندی آلودگی

هوا با استفاده از GIS. دومین کنفرانس برنامه و مدیریت محیط زیست، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست.

امیدوار ب، نظریها م، محمودیان م (۱۳۹۰) تخمین ریسک عدم تأمین آب توسط سیستم آبرسانی در اثر وقوع زلزله با استفاده از روش تحلیل درخت خطا، مطالعه موردی: سیستم ابرسانی مربوط به تصفیه‌خانه شماره ۵ کلانشهر تهران. کنفرانس بین‌المللی آب و فاضلاب، تهران.

امینی ع (۱۳۸۴) آنالیز ریسک پذیری مخازن نگهداری آمونیاک و محاسبه ریسک مناطق مسکونی. اولین همایش ملی مهندسی ایمنی و مدیریت HSE .

شرکت تأمین و تصفیه آب و فاضلاب استان تهران، تصفیه خانه شهرک غرب تهران، آدرس: http://tww.tpww.co.ir/fa/home

قراچورلو ن (۱۳۸۴) ارزیابی و مدیریت ریسک. انتشارات علوم و فنون: ۱۲۲-۱۲۳.

ولدخانی ا (۱۳۸۳) ارزیابی خطر انفجاردر بویلرهای کارخانجات گلوکوزان به روش FTA. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس.

ولوی م (۱۳۸۲) ارزیابی قابلیت اطمینان با استفاده از درختهای خطا مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شریف.

Abdelgawad M A (2011) Hybrid decision support system for risk criticality assessment and risk analysis. Doctor of Philosophy Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering. University of Alberta.

Al Saleem A (2007) Performance analysis of sanitary wastewater treatment plants: reliability-based analysis. MSc Thesis, King Saoud University College of Engineering, Civil Engineering, Department.

Andreas L, Rosén L, Norberg T (2009) Fault tree analysis for integrated and probabilistic risk analysis of drinking water systems. Water Research 43(6): 1641–1653.

Beauchamp N, Lence B, Bouchard C (2010) Technical hazard identification in water treatment using fault tree analysis. Canadian Journal of Civil Engineering.37(6): 897-906.

Bedford T and Cooke R.M (2001) Probabilistic risk analysis: foundations and methods. Cambridge University Press, Cambridge: 302-327.

Bourouni K (2013) Availability assessment of a reverse osmosis plant: comparison between reliability block diagram and fault tree analysis methods. Desalination 313(15): 66–76.

Kelley D and Allison R (1981) Fault tree analysis and treatment plant instrumentation. Journal of Water Pollution Control Federation 53(1): 43-47.

LiJun B (2008) A study on wastewater treatment systems reliability analysis. MSc Thesis. Hebei University of Technology.

Mercer S and Hrudey S (1990) Demonstration of quantitative risk assessment for a municipal water treatment plant chlorination process. Biennial Environmental Specialty Conference. Canadian Society for Civil Engineering. Hamilton, Ont.

Metcalf & Eddy Inc (2003) Wastewater engineering treatment and reuse. McGraw-Hill Companies Inc. 4th Edition: 1634-1649.

Oliveira S, Von Sperling M (2008) Reliability analysis of wastewater treatment plants. Water Research 42: 1182 – 1194.

Qasim Syed R (1999) Wastewater treatment plants, planning, design, and operation, CRC press. 2nd Edition. United States of America: 379- 410.

Wu J, Yan S, Xie L (2011) Reliability analysis method of a solar array by using fault tree analysis and fuzzy reasoning. Petri net. Acta Astronautica 69: 960–968.