

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte
Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģijas institūts

Sandis Dejus

Doktora studiju programmas „Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģija” doktorants

DZERAMĀ ŪDENS KVALITĀTES TIEŠSAISTES MONITORINGS

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
asoc. profesors *Dr. sc. ing.*
JĀNIS RUBULIS

Zinātniskais konsultants
profesors *Dr. sc. ing.*
TĀLIS JUHNA

RTU Izdevniecība
Rīga 2018

Dejus, S. Dzeramā ūdens kvalitātes tiešsaistes monitorings. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2018. 27 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes „RTU P-12” 2018. gada 9. septembra lēmumu, protokols Nr. 18/05.



Šis darbs ir tapis ar Latvijas Valsts pētījumu programmas *SOPHIS*, līguma Nr. 10-4/VPP-4/11, un Rīgas Tehniskās universitātes Doktorantūras pētniecības grantu programmas atbalstu.

ISBN 978-9934-22-164-4 (print)
978-9934-22-165-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2018. gada 13. decembrī plkst. 12 Rīgas Tehniskās universitātes konferenču zālē, Āzenes ielā 6, 11. stāvā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Anatolijs Borodiņecs
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr. habil. ķīm.* Māris Kļaviņš
Latvijas Universitāte

Profesors *Dr. math.* Andrejs Koliškins
Rīgas Tehniskā universitāte / RTU Rīgas Biznesa skola

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Vārds, uzvārds (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu/angļu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, rekomendācijas un literatūras saraksts, 18 attēlu, 11 tabulu, deviņi pielikumi, kopā 120 lappušu. Literatūras sarakstā ir 186 nosaukumi.

SATURS

1. DARBA VISPĀRĒJS APRAKSTS	5
2. LITERATŪRAS APSKATS	6
3. DARBĀ IZMANTOTĀ METODOLOĢIJA	8
4. REZULTĀTI UN TO APSPRIEŠANA	12
5. SECINĀJUMI	22
6. REKOMENDĀCIJAS UN TURPMĀKIE PĒTĪJUMI	23
PUBLIKĀCIJU SARAKSTS.....	24
LITERATŪRAS SARAKSTS	25

1. DARBA VISPĀRĒJS APRAKSTS

1.1. Darba aktualitāte

Mūsdienās apmēram puse pasaules iedzīvotāju dzīvo pilsētās, savukārt prognozes liecina, ka tuvāko 30 gadu laikā pilsētās dzīvojošo iedzīvotāju skaits var sasniegt divas trešdaļas no visiem iedzīvotājiem, palielinot risku, kas saistīts ar centralizētās ūdensapgādes sistēmām un dzeramā ūdens piegādes drošumu. Lai gan pēdējās desmitgades laikā ir veikti vērienīgi ūdensapgādes sistēmu un tajās izmantoto tehnoloģiju uzlabojumi, vēl aizvien ir sastopami dzeramā ūdens nekaitīguma prasībām neatbilstīgi piegādes gadījumi. Diemžēl gadās, ka patērētāji saslimst vai pat nomirst. Turklāt jaunāko pētījumu rezultāti liecina, ka apmēram 30 % no visiem kuņģa un zarnu trakta slimību gadījumiem, kas reģistrēti pilsētās, ir saistīti ar neatbilstīgu centralizēto ūdensapgādes sistēmu darbību. Tomēr mūsdienās plaši izmantotās un likumdošanā iekļautās dzeramā ūdens kvalitātes monitoringa metodes nav ļāvušas laikus konstatēt šos gadījumus un ziņot ūdens apgādes sistēmas pārraugiem par nekvalitatīvi dzeramo ūdeni piegādes tīklā, tādēļ ir nepieciešams izstrādāt un pilnveidot tiešsaistes dzeramā ūdens kvalitātes monitoringa sistēmas ar agrīnās brīdināšanas funkciju, kas dzeramā ūdens kvalitātes pasliktināšanās gadījumā spēj izziņot trauksmi un novērst neatbilstīga dzeramā ūdens piegādi patērētājam. Šādas sistēmas jau ir komerciāli pieejamas, tomēr to eksperimentālajās pārbaudēs piesārņojuma detektēšanas vidējā precizitāte ir tikai 82 %, kas vēl aizvien rada draudus patērētāju veselībai. Turklāt šīs precizitātes noteikšanai netiek iekļauti mikrobioloģisko parametru mērījumi laiktelpības dēļ (standarta laboratorijas metodes izmantošanai ir nepieciešamas no 18 līdz 24 stundām). Tādēļ svarīga ir agrīno brīdinājuma sistēmu pilnveidošana, uzlabojot tajā iekļautos piesārņojuma detektēšanas algoritmus un nosakot atbilstīgākos dzeramā ūdens tiešsaistes monitoringa laikā mērāmos parametrus.

1.2. Galvenie uzdevumi un mērķis

Promocijas darba mērķis ir izveidot tiešsaistes dzeramā ūdens kvalitātes monitoringa sistēmas risinājumu, iekļaujot tajā fizikāli-ķīmisko un mikrobioloģisko parametru mērījumus, un pārbaudīt tā precizitāti dažāda piesārņojuma gadījumu detektēšanā.

Darba uzdevumi:

- identificēt tiešsaistes dzeramā ūdens kvalitātes monitoringa sistēmā teorētiski iekļaujamos fizikāli-ķīmisko un mikrobioloģiskos parametrus;
- izstrādāt, adaptēt un pārbaudīt tiešsaistes dzeramā ūdens kvalitātes monitoringa sistēmas piesārņojuma detektēšanas algoritmu;
- pilota mēroga ūdensapgādes sistēmā eksperimentāli identificēt precīzāko dzeramā ūdens kvalitātes monitoringa parametru kombināciju dažāda piesārņojuma detektēšanai.

1.3. Novitāte

Šajā darbā ir izstrādāts jauns dzeramā ūdens kvalitātes tiešsaistes monitoringa risinājums, kas ietver fizikāli-ķīmisko un mikrobioloģisko ūdens parametru monitoringu un automatisku piesārņojuma detektēšanas algoritmu. Izstrādātais risinājums ir inovatīvs un līdz šim unikāls, jo tiešsaistes monitoringa laikā dzeramā ūdens kvalitātes noteikšanai tiek izmantotas tādas daudzsološas mikrobioloģiskas metodes kā plūsmas citometrija un adenozintrifosfāta mērījums. Šajā pētījumā iegūtie rezultāti var kalpot par pamatu turpmākiem pētījumiem, kas nodrošinātu šo parametru tiešsaistes mērījumu iespējamību. Darbā tiek pierādīta izmantoto mikrobioloģisko parametru pozitīvā ietekme uz agrīnā brīdinājuma sistēmu piesārņojuma gadījuma detektēšanas precizitāti. Turklāt, lietojot izstrādāto risinājumu, var būtiski samazināt laiku, kas nepieciešams, lai noteiktu dzeramā ūdens mikrobioloģisko atbilstību nekaitīguma prasībām (no 18 līdz 24 stundām šobrīd līdz piecām minūtēm). Promocijas darbā izstrādātais risinājums, izmantojot tiešsaistes mērījumu un automatizētas mikrobioloģisko mērījumu metodes, ir jāpārbauda atšķirīgos apstākļos un sistēmās, tomēr eksperimentāli iegūtie rezultāti parāda, ka šim risinājumam ir būtiskas priekšrocības, to izmantojot reālās ūdensapgādes sistēmās.

2. LITERATŪRAS APSKATS

Lai nodrošinātu dzeramā ūdens drošumu, ir nepieciešams rūpīgs tā kvalitātes monitorings visos ūdensapgādes sistēmas posmos. Pasaules attīstītajās valstīs, t. sk. Latvijā, dzeramais ūdens tā sagatavošanas iekārtās atbilst visām dzeramā ūdens nekaitīguma prasībām, tomēr tā kvalitāte var mainīties uzglabāšanas un sadales laikā [1]. Statistika liecina, ka no 30 % līdz 60 % kopīgo nekvalitatīva ūdens piegādes gadījumu ir saistīti tieši ar sadales tīklu [2]. Dzeramā ūdens kvalitātes izmaiņu cēloņi var būt tīšs vai netīšs dzeramā ūdens piesārņojums. Pasliktināta ūdens kvalitāte sabiedrībai var radīt veselības, sociālas, psiholoģiskas, ekonomiskas un uzticamības problēmas [3], [4]. Diemžēl pasaulē vēl aizvien nepastāv ideālas ūdensapgādes sistēmas, kas nerada risku tās lietotājiem, tādēļ ūdensapgādes uzņēmumu mērķis, izmantojot dzeramā ūdens kvalitātes monitoringu, ir minimizēt šos riskus un pasargāt patērētājus no nekvalitatīva dzeramā ūdens [5].

Neskatoties uz riskiem, vairumā pasaules valstu dzeramā ūdens kvalitātes monitoringu veic, izmantojot standarta laboratoriskās metodes paraugu ņemšanai un analizēšanai, tāpēc faktiskie rezultāti, kas liecina par dzeramā ūdens kvalitāti, tiek uzzināti ar relatīvi lielu laika nobīdi [6], [7], kas potenciāli var apdraudēt dzeramā ūdens patērētājus. Piemēram, patogēnisko mikroorganismu skaita noteikšana dzeramajā ūdenī, izmantojot standarta kultivēšanas metodi, var prasīt vairākas dienas. Tātad palielinās risks, ka tikmēr patērētāji piesārņoto dzeramo ūdeni jau varētu lietot uzturā [8]–[10], turklāt, izmantojot standarta metodes, dzeramā ūdens kvalitātes izmaiņu dinamika, tātad – arī atbilstība nekaitīguma prasībām, nedēļu, diennakšu un stundu griezumā ir nepietiekami pētīta un neskaidra [6]. Turklāt iepriekš veiktie pētījumi pierāda, ka, izmantojot pašreiz esošās monitoringa programmas, mikrobioloģisko piesārņojumu var konstatēt ar 5 % un mazāku varbūtību [11],

savukārt pētījumu rezultāti liecina, ka, lai konstatētu un izmeklētu vienu gadījumu, kad mikrobioloģiski dzeramā ūdens kvalitāte neatbilst nekaitīguma prasībām, vajadzīgs kvalificēts darbspēks 0,37 līdz 3,58 pilna laika ekvivalenta slodzes apjomā [12].

Lai veiktu precīzāku un regulārāku dzeramā ūdens kvalitātes monitoringu, arvien biežāk tiek izmantotas tiešsaistes dzeramā ūdens kvalitātes monitoringa un agrīnā brīdinājuma sistēmas. To lietošana dzeramā ūdens piesārņojuma gadījumā nodrošina trauksmju paziņošanu ūdensapgādes sistēmas operatoram, lai savlaicīgi tiktu veiktas atbilstīgas darbības risku samazināšanai [10]. Diemžēl šādu sistēmu uzstādīšana un lietošana ir salīdzinoši dārga [2]. Lai samazinātu to izmaksas, sistēmās visbiežāk tiek izmantoti lēti un robusti fizikāli-ķīmisko ūdens kvalitātes parametru mērījumi un tādi paši sensori. Ar šiem sensoriem izdarīto mērījumu rezultāti tiek apstrādāti, izmantojot matemātiskus algoritmus, kas ļauj noteikt, vai dzeramā ūdens kvalitāte monitoringa veikšanas punktā atbilst dzeramā ūdens nekaitīguma prasībām. Neatbilstības gadījumā tiek izziņota trauksme, lai ūdensapgādes sistēmas operators savlaicīgi veiktu atbilstīgas darbības risku mazināšanai [10]. Šāda veida sistēmas ļauj samazināt dzeramā ūdens piesārņojuma detektēšanas laiku līdz minūtei [10], [13].

Lai gan pēdējo gadu laikā ir veikti būtiski agrīnā brīdinājuma sistēmu uzlabojumi, to piesārņojuma detektēšanas jeb klasifikācijas precizitāte ir ļoti atkarīga no piesārņojuma tipa un izmantotā matemātiskā detektēšanas algoritma. Lai pilnveidotu šos algoritmus, jāveic eksperimentāli pētījumi, ievadot eksperimentālās sistēmās reālu piesārņojumu un pētot šo sistēmu darbības stabilitāti [13]–[15]. Reālu un komerciāli pieejamu agrīno brīdināšanas sistēmu, kurās iekļauti tikai fizikāli-ķīmisko parametru mērījumi un to kombinācijas, pārbaudes parāda piesārņojuma detektēšanu 82 % gadījumu. Tātad šīs sistēmas ir jāpilnveido [16]. Zinātniskajā literatūrā atrodami uzlaboti piesārņojuma detektēšanas un klasificēšanas algoritmi, ar kuriem iespējams konstatēt līdz pat 100 % piesārņojuma gadījumu. Tomēr šie algoritmi pārbaudīti, izmantojot tikai ar ķīmisku piesārņojumu veiktu eksperimentu rezultātus vai matemātiskas piesārņojumu imitācijas [13], [17], [18]. Turklāt nevienā no komerciāli pieejamajām sistēmām vai zinātniskajā literatūrā aprakstītajiem pētījumiem nav iekļauts mikrobioloģisko parametru tiešsaistes monitorings. Līdz ar to vairumā gadījumu mikrobioloģiskā dzeramā ūdens kvalitāte nav noskaidrota, bet tieši mikrobioloģiskās kvalitātes neatbilstība visbiežāk ir dažādu slimību cēlonis [7], [19], [20]. Bieži vien saslimšanas gadījumi netiek laikus novērsti, jo šobrīd lietojamās mikrobioloģisko parametru noteikšanas metodes ir laikietilpīgas (no 24 līdz 48 stundām) un darbietilpīgas, tāpēc nav iespējams savlaicīgi un ātri izziņot piesārņojuma trauksmi dzeramā ūdens apgādes sistēmā. Turklāt jaunākas un salīdzinoši ātrākas metodes tiek aprobētas relatīvi lēni galvenokārt relatīvi augsto izmaksu un sarežģītās lietojamības dēļ [7], [19]–[23]. Tomēr jauno un laikietilpīgāko mikrobioloģisko metožu iekļaušana agrīnā brīdinājuma sistēmās varētu uzlabot piesārņojumu gadījumu detektēšanas precizitāti, it sevišķi mikrobioloģiskā apdraudējuma un piesārņojuma gadījumā [7], [24], [25].

Pasaulē tiek veikti plaši pētījumi par dzeramā ūdens mikrobioloģisko izmeklējumu metožu uzlabošanu un jaunu ieviešanu. Apkopojot zinātniskajā literatūrās sniegto informāciju, tika identificētas vismaz 10 šādu metožu [7]. Šajā darbā tiek izmantotas adenožinātrifosfāta (ATF) un plūsmas citometrijas (FCM) metodes, jo šajā gadījumā

mērījumiem ir nepieciešams visīsākais laiks un to precizitāte ir līdzīga citām piedāvātajām metodēm.

3. DARBĀ IZMANTOTĀ METODOLOĢIJA

3.1. Piesārņojuma detektēšanas algoritmu darbības novērtēšana

Piesārņojuma detektēšanas algoritmu precizitāte norāda tā spēju identificēt piesārņojuma gadījumus jeb automātiski klasificēt „tīru” un „piesārņotu” ūdeni. Lai izvērtētu piesārņojuma detektēšanas algoritmu darbības precizitāti, jānovērtē to rezultātu atbilstība reāliem apstākļiem ūdensapgādes sistēmā (3.1. att.) [18], [27], [28].

		Faktiskā ūdens kvalitāte	
		Tīrs ūdens	Piesārņots ūdens
Algoritma noteiktā ūdens kvalitāte	Tīrs ūdens	Patiesi negatīvs rezultāts (TN)	Viltus negatīvs rezultāts (FN)
	Piesārņots ūdens	Viltus pozitīvs rezultāts (FP)	Patiesi pozitīvs rezultāts (TP)

3.1. att. Piesārņojuma detektēšanas algoritma rezultātu iespējamā atbilstība faktiskajai dzeramā ūdens kvalitātei.

Iegūtais novērtējums par atbilstību reāliem apstākļiem tiek izmantots piesārņojuma detektēšanas jutīguma (*PD*), viltus trauksmes līmeņa (*FAR*) un ūdens kvalitātes klasificēšanas precizitātes (*P*) aprēķiniem. Piesārņojuma detektēšanas jutīgums nenorāda algoritma kopējo darbības precizitāti, bet raksturo tā spēju detektēt piesārņojumu. Viltus trauksmes līmenis norāda varbūtību, ka, izmantojot algoritmu, veiktās klasifikācijas rezultāti, iespējams, nav patiesi. Piesārņojuma gadījumu klasificēšanas precizitāte, raksturojot algoritma kopējo darbības precizitāti, norāda algoritma spēju pareizi klasificēt veiktos mērījumus, nosakot „tīra” vai „piesārņota” ūdens klātbūtni sistēmā. Visi algoritma darbības vērtējumi ir robežās no 0 līdz 1. *PD* un *P* gadījumā vērtība 1 atbilst 100 % algoritma darbības precizitātei. *FAR* vērtība, kas tuvojās 0, norāda, ka, klasificējot veiktos mērījumus, algoritma darbība ir pareiza.

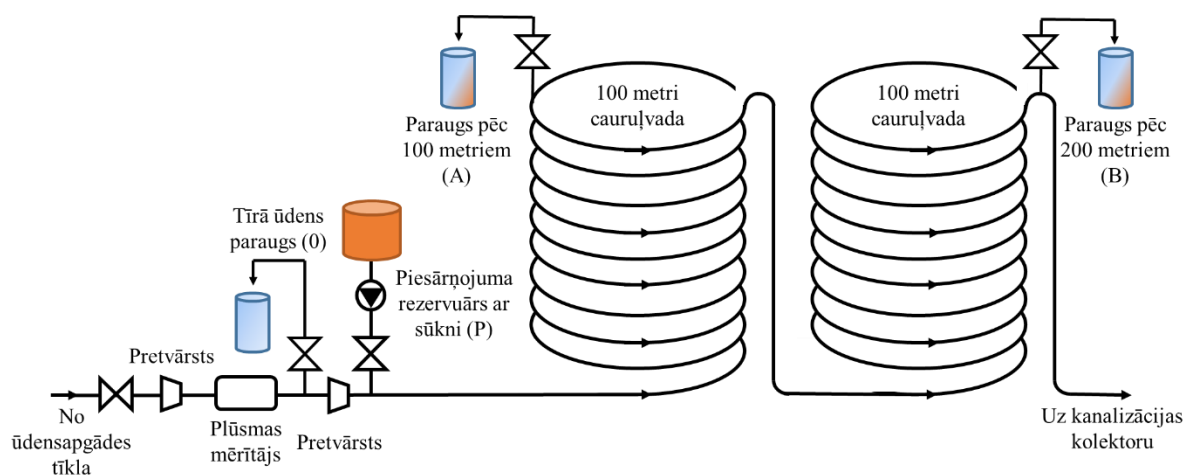
3.2. Dzeramā ūdens piesārņojuma eksperimenti pilota mēroga ūdensapgādes sistēmā

Darbā tika vērtētas dzeramā ūdens kvalitātes parametru izmaiņas dažādu piesārņojuma scenāriju gadījumā, turklāt darba izveides laikā tika noteikta izstrādātā automātiskā piesārņojuma detektēšanas algoritma spēja konstatēt piesārņojumu dzeramajā ūdenī. Lai to paveiktu, Rīgas Tehniskās universitātes telpās tika uzstādīta pilota mēroga ūdensapgādes

sistēma (3.2. att.), kurā tika simulēti piesārņojuma scenāriji. Šāda tipa un mēroga sistēmas tiek izmantotas, lai neapdraudētu patērētāju veselību un eksperimentus varētu veikt pēc iespējas kontrolētos, tomēr reālai situācijai centralizētās ūdensapgādes sistēmās pietuvinātos apstākļos.

Pilota mēroga ūdensapgādes sistēma

Pilota mēroga ūdensapgādes sistēma konstruēta no polivinilhlorīda (PVC) pārtikas klases cauruļvada ar iekšējo diametru 25 mm un kopējo garumu 200 metri. Pārtikas klases cauruļvada materiāls ir izmantots, lai nodrošinātu minimālu cauruļvada materiāla ietekmi uz eksperimenta rezultātiem. Kopējais sistēmas tilpums ir 98,2 litri.



3.2. att. Pilota mēroga ūdensapgādes sistēmas principiālā shēma.

Pilota mēroga ūdensapgādes sistēmā ir izveidotas trīs paraugu ņemšanas vietas: pirms piesārņojuma dozēšanas vietas (0), 100 metrus (A) un 200 metrus (B) pēc piesārņojuma dozēšanas vietas. Tīrā ūdens parauga ņemšanas vieta ir izvietota pirms ūdens piesārņojuma ievadīšanas punkta un paredzēta, lai veiktu „negatīvo kontroli”, norādot izmantotā Rīgas pilsētas ūdensapgādes sistēmā esoša ūdens kvalitāti un ļaujot to lietot turpmāko izmaiņu novērošanai. Potenciāli piesārņota ūdens paraugu ņemšanas vietās A un B dažāda piesārņojuma gadījumā tiek novērotas dzeramā ūdens kvalitātes izmaiņas. Vienmērīgas plūsmas uzturēšanai sistēmā uzstādīts lodveida krāns un ultraskaņas plūsmas mērītājs. Piesārņojuma gadījumu simulēšanai ir izveidota piesārņojuma dozēšanas sistēma ar piesārņojuma rezervuāriem un dozēšanas sūkni (P) [29].

Dzeramā ūdens kvalitātes monitoringa parametri

Lai novērotu fizikāli-kīmiskās dzeramā ūdens kvalitātes izmaiņas, tiek izmantoti līdz šim literatūrā un agrīnā brīdinājuma sistēmās plaši lietotie relatīvi lētie un robustie parametri: temperatūra (T), elektrovadītspēja (EVS), oksidēšanās-reducēšanās potenciāls (ORP), pH, duļķainība (NTU) un kopējā organiskā oglekļa daudzums (TOC). Novērojumu rezultāti var salīdzinoši precīzi liecināt par netipiskiem apstākļiem ūdensapgādes sistēmā. Mikrobioloģiskās ūdens kvalitātes izvērtēšanai izmantotas potenciāli automatizējamas un daudzsološākās alternatīvās mikrobioloģiskās izmeklēšanas metodes – plūsmas citometrija (FCM) un adenozintrifosfāta luminiscences (ATF) mērījumi.

Ekspierimentu laikā ir izmantota paraugu ņemšanas un analīzes metode. Lai izslēgtu iespējamās problēmas, kas saistītas ar fizikāli-ķīmisko tiešsaistes sensoru darbību un datu pārraidi, piemēram, signālu traucējumiem un „trokšņiem”, tiešsaistes mērījumi šajā pētījumu stadijā netiek lietoti. Šādas problēmas varētu būtiski ietekmēt piesārņojuma detektēšanas rezultātu precizitāti, turklāt paraugi jāpaņem arī tāpēc, lai varētu izmantot mikrobioloģisko parametru analīzes metodes.

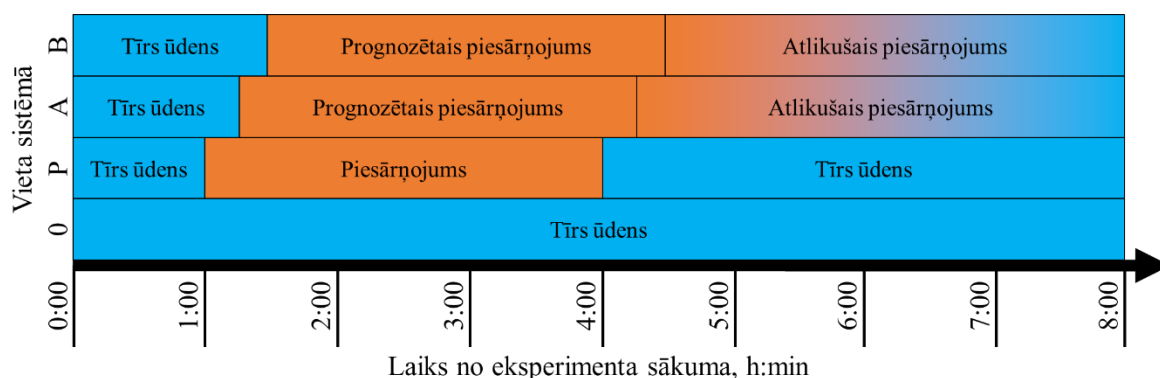
Dzeramā ūdens piesārņojuma scenāriji

Ekspierimentāli tika simulēti četri piesārņojuma gadījumu scenāriji: virszemes ūdeņu, gruntsūdeņu, notekūdeņu, patogēno baktēriju modeļa piesārņojums.

Virszemes ūdens piesārņojuma scenārijā simulēta situācija, kad dzeramā ūdens sagatavošanas stacijā ir radušies darbības traucējumi un neattīrīts ūdens no virszemes ūdens avota nonāk ūdensapgādes sistēmā. Gruntsūdeņu un notekūdeņu piesārņošanas scenārijos ir simulēts ūdensapgādes cauruļvada, kas ieguldīts 1 m zem gruntsūdeņu līmeņa, plīsums ar atvēruma diametru 1,5 mm. Ūdensapgādes tīklā ir izveidojies vakuums, kam seko gruntsūdeņu vai ar notekūdeņiem piesārņotu gruntsūdeņu intrūzija. Patogēno baktēriju modeļa piesārņojuma scenārijā simulēts apzināts dzeramā ūdens piesārņojuma gadījums, sistēmā ievadot *Escherichia coli* mikroorganismus ar barotni.

Scenāriji tika izvēlēti, balstoties uz centralizētu ūdensapgādes sistēmas darbību un iepriekš aprakstītajām relatīvi visbiežāk sastopamajām problēmām un darbības traucējumiem. Ja simulētos scenārijus īsteno reālos apstākļos, ņemot vērā iespējamu patogēnu klātbūtni, var tikt radīti mikrobioloģiska rakstura draudi patērētāju veselībai.

Piesārņojuma plūsma (0,005 L/s jeb 5 mL/s) visos eksperimentos tiek simulēta kā 10 % no kopējās ūdens plūsmas sistēmā (0,05 L/s). Uzturētais plūsmas ātrums ir 0,1 m/s. Simulētā piesārņojuma plūsma atbilst 1,5 mm liela cauruļvada plīsumam un negatīvam spiedienam sistēmā. Lai nodrošinātu rezultātu salīdzināmību, scenārijos, kas nav saistīti ar intrūziju, saglabāta identiska plūsma. Kopējais eksperimenta ilgums ir 8 stundas, bet katrs no piesārņojuma gadījumiem ilga 3 stundas (P) (3.3. att.). Īstenojot piesārņojuma scenārijus, katrā no tiem sistēmā tika ievadīti 50 litri piesārņojuma.



3.3. att. Piesārņojuma gadījumu simulācijas eksperimentu laika plāns.

Pirms piesārņojuma ievadīšanas sistēmā (3.3. attēlā laika periods „tīrs ūdens”) visās paraugu ņemšanas vietās (0 – tīrā ūdens paraugs, A – paraugs pēc 100 metriem cauruļvada,

B – paraugs pēc 200 metriem cauruļvada, P – piesārņojuma dozēšanas vieta) un visa eksperimenta laikā paraugu ņemšanas vietā 0 paraugi tika ņemti ar 15 minūšu intervālu. Prognozētais piesārņojuma laiks tika aprēķināts, balstoties uz vienmērīga plūsmas ātruma uzturēšanu sistēmā un pieņemot, ka tajā nenotiek difūzija (16 minūtes un 40 sekundes paraugu ņemšanas vietā A un 33 minūtes un 20 sekundes paraugu ņemšanas vietā B).

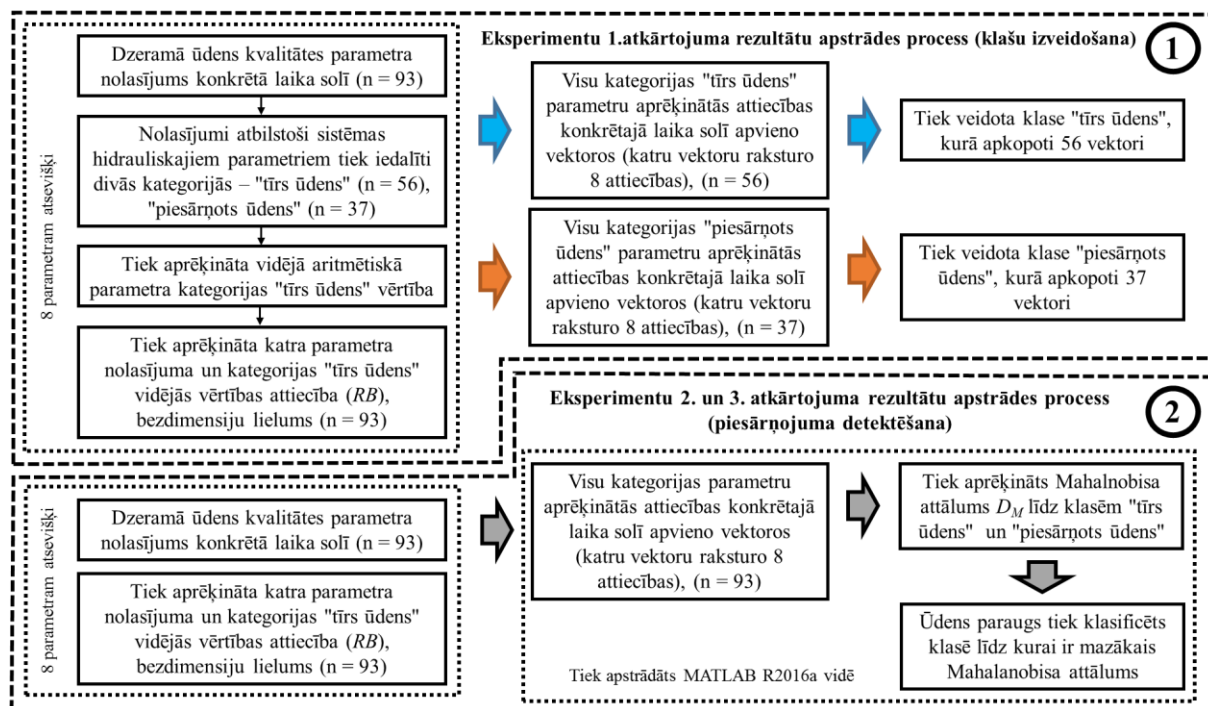
Katrs no piesārņojuma scenārijiem tika atkārtots trīs reizes.

3.3. Piesārņojuma detektēšanas algoritms

Iegūtie dzeramā ūdens kvalitātes parametru izmaiņu rezultāti tika apstrādāti ar Mahalanobisa attālumu piesārņojuma detektēšanas algoritmu, kas izvēlēts, balstoties uz veikto literatūras analīzi [28]. Šis algoritms līdz šim aprakstītajos pētījumos ir uzrādījis salīdzinoši precīzākos piesārņojuma detektēšanas un klasificēšanas rezultātus. Mahalanobisa attālumu algoritms tiek balstīts uz klasteru analīzi. Tā pēc savas būtības ir datu kopu grupēšana vairākās klasēs, ņemot vērā to līdzību. Mahalanobisa attālums ir bezdimensiju lielums, kas ir relatīva vērtība un apraksta objektu attālumu līdz kādam kopīgam punktam telpā. Ūdens kvalitātes mērījumi, kas tiek veikti katrā laika solī, tiek apvienoti vienā tos raksturojošā parametrā. Tos definē kā objektu, bet vairākus līdzīgus objektus var definēt kā klasi.

Eksperimentāli iegūto dzeramā ūdens kvalitātes datu apstrādes principiālā shēma apraksta datu apstrādes procesu (3.4. att.). Datu apstrādi piesārņojuma detektēšanai var iedalīt divos posmos.

Pirmajā posmā tiek apstrādāti mērījumi, kas veikti, īstenojot attiecīgā piesārņojuma eksperimenta pirmo atkārtojumu. Balstoties uz teorētiskiem aprēķiniem par ūdens uzturēšanās laiku katrā no paraugu ņemšanas vietām, mērījumi tiek iedalīti divās grupās. Grupā „tīrs ūdens” tiek iekļauti visi nolasījumi ($n = 56$), kas atbilst teorētiski nepiesārņotam ūdenim paraugu ņemšanas vietā. Savukārt grupā „piesārņots ūdens” tiek iekļauti teorētiski piesārņotam ūdenim atbilstīgi nolasījumi ($n = 37$). Katram no grupā „tīrs ūdens” iekļautajiem parametriem tiek aprēķināta vidējā aritmētiskā vērtība, kas vispārīgi raksturo nepiesārņotu ūdeni. Lai rezultātus neietekmētu katra atsevišķa ūdens kvalitātes parametra mērvienību skala un mērījumu amplitūda, tiek aprēķināta katra nolasījuma un vidējās aritmētiskās parametra vērtības attiecība RB . Katrā laika solī veikto nolasījumu aprēķinātās parametru attiecības RB (astoņiem parametriem) tiek apvienotas katru laiku soli raksturojošā vektorā, ko raksturo astoņi neatkarīgi skaitļi. Iegūtie vektori atbilstīgi iepriekš veiktajam iedalījumam „tīrs ūdens” un „piesārņots ūdens” tiek apkopoti klasēs, kas turpmāk tiek izmantotas dzeramā ūdens piesārņojuma detektēšanai.



3.4. att. Dzeramā ūdens kvalitātes datu apstrādes principiālā shēma.

Otrajā solī, tāpat kā pirmajā, tiek atrasta katrā laika solī konkrētajam parametram atbilstīga attiecība RB . Katrā laika solī veikto nolasījumu attiecības tiek apvienotas vektorā. Lai katrā laika solī noteiktu vektora atbilstību kādai no iepriekš izveidotajām klasēm, tiek aprēķināts Mahalanobisa attālums līdz katrai klasei (3.1.). Laika solī veiktais mērījums tiek pieskaitīts klasei, līdz kurai ir mazākais Mahalanobisa attālums. Daļa datu apstrādes procesa ir automatizēta un izstrādāta, izmantojot matemātisko aprēķinu programmatūras *MATLAB R2016a* rīkus.

$$D_M(p, c) = \sqrt{(p - \mu_c)^T \times S^{-1} \times (p - \mu_c)}, \quad (3.1.)$$

kur $D_M(p, c)$ – Mahalanobisa attālums starp mērījuma vektoru un definēto klasi;

p – mērījumu vektors n -dimensiju telpā;

μ_c – definētas klases vidējo parametru vērtību vektors n -dimensiju telpā;

S – kovariācijas matrica vektoram y ;

T – transponēšanas funkcija.

4. REZULTĀTI UN TO APSPRIEŠANA

4.1. Piesārņojuma detektēšanas algoritmu salīdzinājums

Darbā ir salīdzināti 11 dažādi literatūrā aprakstīti dzeramā ūdens piesārņojuma detektēšanas algoritmi. Lai tos salīdzinātu, visiem algoritmiem ir noteikts piesārņojuma detektēšanas jutīgums PD un viltus trauksmes līmenis FAR . Algoritmus raksturojošie parametri apkopoti 4.1. tabulā, kurā katram piesārņojuma algoritmam ir uzrādītas PD un FAR

vērtības, detektēto piesārņojuma datu kopu izcelsme, detektējamā piesārņojuma veids un detektēšanai izmantotie ūdens kvalitātes parametri.

Vairāki piesārņojuma detektēšanas algoritmi (MEK, MNTVM, MNTDR, AVM, CANARY, DSM) nav pārbaudīti, izmantojot reālus ūdens piesārņojumu un kvalitāti raksturojošus datus, tāpēc nevar uzskatīt, ka šo algoritmu piesārņojuma detektēšanas spēja novērtēta pilnvērtīgi. Šajos gadījumos piesārņojuma koncentrācija un „pīķi” ir radīti mākslīgi, veidojot datu kopas. Tāpēc nepastāv sasaiste ar ūdensapgādes sistēmās iespējamajiem ūdens kvalitātes parametru mērījumiem, piesārņojumu un to iespējamo saistību faktiska piesārņojuma gadījumā. Mākslīgi radītajās datu kopās piesārņojums lielākoties tiek simulēts, izmantojot savstarpēji korelējošas parametru izmaiņas piesārņojuma laikā, turklāt piesārņojums ir salīdzinoši ilgs, lai algoritmi to spētu konstatēt. Šāda veida datu kopu izmantošana un piesārņojuma detektēšanas precizitāte var būt maldinoša un būtiski mazināties gadījumā, kad algoritmu lieto reālu datu apstrādē. Lai pilnvērtīgi pārbaudītu algoritma spēju reaģēt uz reāliem piesārņojuma gadījumiem, jāveic pilota mēroga eksperimenti un jānovēro ūdens kvalitātes izmaiņas, kas ne vienmēr savā starpā korelē.

Ļoti būtiska piesārņojuma detektēšanas algoritmu sastāvdaļa ir robežvērtības, kas, balstoties uz pieredzi un izpratni par dzeramā ūdens kvalitātes izmaiņām, jāiestata algoritma lietotājam. Tātad minētās vērtības ir subjektīvas un var ievērojami atšķirties. Šo robežvērtību atbilstīga iestatīšana ir algoritma darbības pamatā, tā var ietekmēt darbības precizitāti un piesārņojuma detektēšanas varbūtību.

Ar PE un MA algoritmiem apstrādājot eksperimentos iegūtos datus, ir iegūti vislabākie piesārņojuma detektēšanas rezultāti, kur atsevišķos gadījumos PD sasniedz 1,00, un tas nozīmē, ka pilnīgi visi piesārņojuma gadījumi tiek konstatēti, un FAR ir 0,00, kas savukārt nozīmē, ka netiek izziņota neviena viltus trauksme. Ja datu kopas apstrādē $PD = 1,00$ un $FAR = 0,00$, var secināt, ka algoritms ūdens kvalitātes mērījumus klasificējis ar 100 % precizitāti.

Atbilstīgi dzeramā agrīnā brīdinājuma sistēmu pilnveidošanas un uzlabošanas tendencēm vienīgais no apskatītajiem algoritmiem, kas spēj ne tikai detektēt piesārņojumu ar augstu precizitāti ($PD = 1,00$), bet arī klasificēt dažāda veida piesārņojumu, ir Mahalanobisa attālumu algoritms. Šajā algoritmā netiek izmantotas robežvērtības. Algoritma trūkums ir tajā nepieciešamā klašu definēšana, kam, lai aprakstītu dažādu piesārņojumu, nepieciešami ilglaicīgi un atkārtoti eksperimenti pilota mēroga sistēmās. Tomēr šis algoritms ir salīdzinoši vienkāršs, un tā lietošanai nav vajadzīgi apjomīgi skaitļošanas resursi.

Analizēto algoritmu izstrādātāji apgalvo, ka neviens no šiem piesārņojuma detektēšanas algoritmiem nav pilnīgs un tos šobrīd nevar komercializēt, tie noteikti jāturpina pētīt un to darbības precizitāte jāvērtē gan ar dažādām eksperimentālām, gan reālām datu kopām.

Pilnīgi visos gadījumos, kad piesārņojuma detektēšanas algoritmi tikuši pārbaudīti, detektējot ūdensapgādes sistēmās sastopamo piesārņojumu pilota vai reāla mēroga sistēmās, tas ticis darīts, ievadot ūdenī ļoti specifiskus ķīmiskas izcelsmes piesārņojuma savienojumus. Nav konstatēts neviens zinātnisks pētījums, kurā tiktu apskatīta un eksperimentāli pārbaudīta bioloģiskā piesārņojuma detektēšanas iespējamība, kā arī mikrobioloģisko ūdens kvalitātes parametru iekļaušana detektēšanas algoritmos.

Piesārņojuma detektēšanas algoritmu salīdzinājums

Algoritms	<i>PD</i>	<i>FAR</i>	Datu avots	Piesārņojuma veids	Ūdens kvalitātes parametri
VEA	0,52	0,22	E	Kadmija nitrāts	<i>T</i> , pH, <i>NTU</i> , EVS, ORP, UV-254, nitrāti, fosfāti
	0,52	0,88	R	Fenols	pH, DO, <i>ḲSP</i> , fosfāti, nitrāti, <i>TOC</i> , EVS, <i>NTU</i> , <i>T</i> , fluorīdi
	0,84	0,61	M	Nenoteikts	
	0,89	0,41			
LPF	0,38	0,94	E	Kadmija nitrāts	<i>T</i> , pH, <i>NTU</i> , EVS, ORP, UV-254, nitrāti, fosfāti
	0,68	0,82	R	Fenols	pH, DO, <i>ḲSP</i> , fosfāti, nitrāti, <i>TOC</i> , EVS, <i>NTU</i> , <i>T</i> , fluorīdi
	0,92	0,24	M	Nenoteikts	
	0,90	0,25			
PE	0,97	0,025	E	Kadmija nitrāts	<i>T</i> , pH, <i>NTU</i> , EVS, ORP, UV-254, nitrāti, fosfāti
	0,83	0,33	R	Fenols	pH, DO, <i>ḲSP</i> , fosfāti, nitrāti, <i>TOC</i> , EVS, <i>NTU</i> , <i>T</i> , fluorīdi
	0,74	0,78	M		
	0,69	0,87			
	0,10	0,80	E	Glifosāts	<i>T</i> , pH, <i>NTU</i> , EVS, ORP, UV-254, nitrāti, fosfāti
	1,00	0,00		Kadmijš	
	1,00	0,00		Atrazīns	
	0,76	0,00		Niķelis	
	0,79	0,00		Hroms	
KKA	0,97	0,00	E	Akrilamīds	
MEK	0,44–1,00	–	M		<i>T</i> , pH, <i>NTU</i> , EVS, <i>TOC</i> , kopējais hlors
MNTVM	0,08–0,59	0,001–0,09			
MNTDR	0,38–0,99	0,04–0,15			
	0,30–0,99	–			
AVM	0,58–0,98	–			
CANARY	0,82	0,14			
	0,89	–			
	0,68–0,96	0,01–0,50			pH, EVS, <i>TOC</i> , kopējais hlors
MA	0,33–1,00*	–	E	Glifosāts	<i>T</i> , pH, <i>NTU</i> , EVS, ORP, UV-254, nitrāti, fosfāti
	0,20–0,95*	–		Nātrija fluorīds	
	0,94–0,95*	–		Kadmija nitrāts	
DSM	0,21–1,00	0,032–0,39	M	Dzelzs amonija sulfāts	pH, EVS, amonijs
	0,52–1,0	0,006–0,39		Kālija heksaciano-ferāts	

Skaidrojumi: M – piesārņojuma datu kopa veidota mākslīgi, R – piesārņojuma datu kopa ir reāla mēroga ūdens kvalitātes mērījumi, E – piesārņojuma datu kopa ir eksperimentāli ūdens kvalitātes mērījumi.

* Klasifikācijas rezultāts, detektēšanas rezultāts *PD* visiem piesārņojuma gadījumiem ir 1,00.

4.2. Piesārņojuma gadījumā konstatētās ūdens kvalitātes parametru izmaiņas

Dzeramā ūdens kvalitātes parametru mērījumu vidējie rezultāti, pārbaudot tīra un piesārņota ūdens paraugus, ļauj spriest par kvalitātes parametru atbilstību dzeramā ūdens nekaitīguma prasībām. Dzeramā ūdens piesārņojuma gadījumos konstatētie mērījumu rezultāti norāda, ka, izmantojot fizikāli-ķīmiskās metodes un izvērtējot to atbilstību dzeramā ūdens kvalitātes nekaitīguma prasībām, nav iespējams detektēt lielāko daļu piesārņojuma gadījumu. Vienīgais scenārijs, kurā kāda no fizikāli-ķīmisko parametru vērtībām pārsniedza

Latvijā un ES reglamentēto, ir notekūdeņu piesārņojums. Šajā gadījumā eksperimentu laikā izmērītā duļķainības parametra vērtība 5,26 *NTU* pārsniedza reglamentēto 3 *NTU* vērtību. Savukārt atbilstīgi Kanādā spēkā esošajām rekomendācijām, kur pieļaujamā duļķainība ir 1 *NTU*, tā tiktu konstatēta, arī īstenojot virszemes un gruntsūdeņu scenārijus. Šie rezultāti ikdienas vai kārtējā monitoringa laikā ļautu fiksēt atkāpes no normas. Visu pārējo reglamentēto parametru vērtības visu scenāriju īstenošanas laikā ir dzeramā ūdens nekaitīguma prasību robežās.

Mikrobioloģisko parametru izmaiņas ir salīdzinoši lielas un labi raksturo piesārņojuma gadījumus. Diemžēl piesārņojuma gadījumu detektēšanai izmantotie ATF un FCM parametri nav reglamentēti un ikdienas monitoringa laikā netiktu izmantoti, līdz ar to īstermiņā nekonstatējot piesārņojumu. Atkāpes no normas, visticamāk, tiktu konstatētas, veicot mikrobioloģiskos izmeklējumus ar klasiskajām kultivēšanas metodēm.

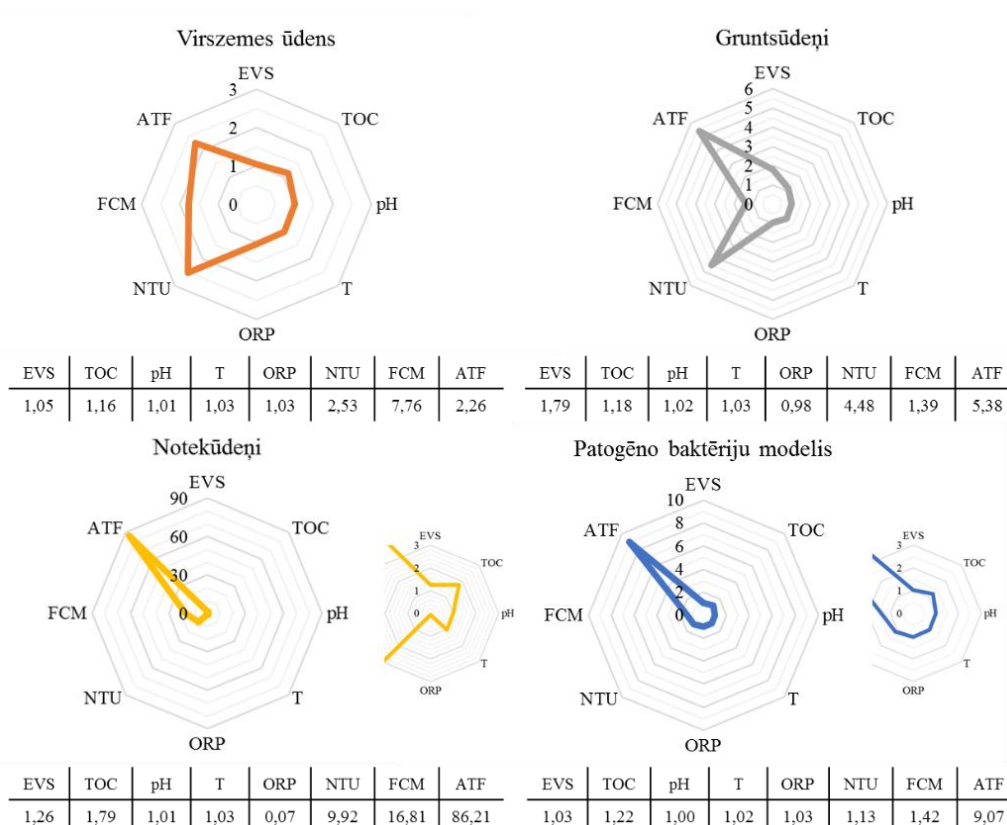
Konstatētās ūdens parametru izmaiņas norāda uz EVS, duļķainības, *TOC*, ATF un FCM parametru izmantošanas iespējamu lietderību, detektējot piesārņojuma gadījumus, kā arī uz ORP, *T* un pH parametru nelielajām pārmaiņām dažāda piesārņojuma gadījumā, izņemot notekūdeņu piesārņojuma gadījumu, kurā ORP parametram konstatētas ievērojamas izmaiņas.

4.3. Piesārņojuma tipu definēšana

Lai varētu veikt automātisku dzeramā ūdens piesārņojuma detektēšanu, izmantojot Mahalanobisa attālumu metodi, atbilstīgi algoritma lietošanas metodikai (3.4. att.) (1. posmam) jādefinē tīra un piesārņota ūdens klases. Vidējās katras piesārņojuma scenārija klases *RB* (attiecīgā parametra piesārņota un tīra ūdens attiecība) vērtības, kas aprēķinātas, izmantojot iepriekš aprakstīto metodiku, attēlojot tās *spider* tipa diagrammā, veido attiecīgā piesārņojuma tipa „pirkstu nospiedumus” (4.1. att.).

Dažādu dzeramā ūdens piesārņojumu īpaši uzskatāmi raksturo šādi parametri: *NTU*, FCM un ATF kombinācija piesārņojumam, īstenojot virszemes scenāriju, EVS, ATF un *NTU* kombinācija gruntsūdeņu scenārija gadījumā, ORP (centra virzienā), ATF un FCM kombinācija piesārņojumam notekūdeņu scenārija gadījumā, ATF un FCM kombinācija piesārņojumam patogēnu baktēriju modeļa piesārņojuma scenārija gadījumā.

Iegūtās *RB* skaitliskās vērtības tiek apvienotas vektoros, kas sastāv no attiecīga mainīgo elementu skaita skaitļu kopā. Ja algoritmā tiek iekļauti visi astoņi parametri, tad arī vektors sastāv no astoņu skaitļu kopas. Piemēram, īstenojot virszemes ūdeņu scenāriju, piesārņojuma vidējo *RB* vērtību vektors $p(V) = (1,05; 1,16; 1,01; 1,03; 1,03; 2,53; 7,76; 2,26)$.



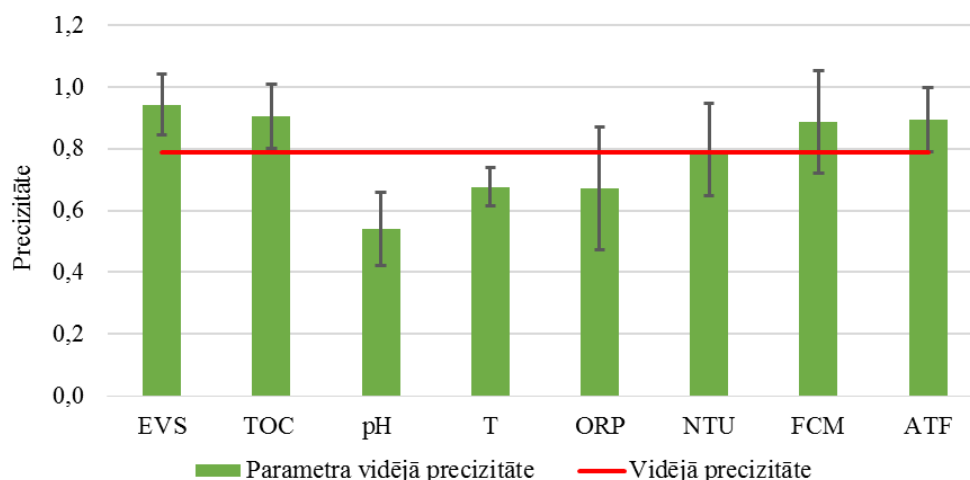
4.1. att. Dažādu piesārņojuma tipu klasifikācijai aprēķinātās *RB* vērtības.

4.4. Atsevišķu parametru mērījumu piesārņojuma detektēšanas precizitāte

Lai identificētu parametrus, kuru mērījumi ļautu visprecīzāk detektēt piesārņojumu, katram no mērītajiem dzeramā ūdens kvalitātes parametriem tika precizēta piesārņojuma detektēšanas jutīguma un nolasījumu klasifikācija. Atsevišķu parametru sensoru klasifikācijas precizitātes (*P*) salīdzinājums apkopots 4.2. attēlā. Maksimāli iespējamā klasifikācijas precizitāte ir 1,00, kas atbilst 100 % precīzai tīra un piesārņota ūdens automātiskai klasifikācijai un piesārņojuma detektēšanas algoritma nekļūdīgai darbībai. Kopumā dzeramā ūdens piesārņojuma vidējā klasifikācijas precizitāte, mērot atsevišķus dzeramā ūdens parametrus, ir 0,79, kas atbilst 79 % precīziem tīra un piesārņota ūdens klasifikācijas gadījumiem. Iegūtais rezultāts ir tuvs iepriekš veiktajos eksperimentos, kuros tika vērtēta agrīno brīdinājuma sistēmu piesārņojuma detektēšanas precizitāte, iegūtajiem rezultātiem, kur precīzi tika klasificēti 82 % nolasījumu.

Vislabākos piesārņojuma klasifikācijas un detektēšanas rezultātus visos scenārijos uzrādījuši EVS un TOC parametri, kas ļāvuši precīzāk konstatēt piesārņojumu, pārspējot katra konkrētā piesārņojuma scenārija vidējo precizitāti. Parametri NTU, FCM un ATF šādu precizitāti uzrādījuši trijos no četriem scenārijiem. Patogēnu baktēriju modeļa piesārņojuma gadījumā ATF atšķirībā no lielākās daļas citu parametru ir uzrādījis salīdzinoši augstu klasifikācijas precizitāti, tātad ir pamatota tā lietošana specifiska piesārņojuma noteikšanai. Konstatētie piesārņojuma detektēšanas jutīguma raksturlielumi (*PD*) pH (0,29), *T* (0,49) un

ORP (0,25) ir mazākie šajos eksperimentos fiksētie, turklāt tie ir mazāki par visiem iepriekš literatūrā aprakstītajiem piesārņojuma detektēšanas jutīguma raksturlielumiem.



4.2. att. Atsevišķu parametru piesārņojuma detektēšanas precizitāte.

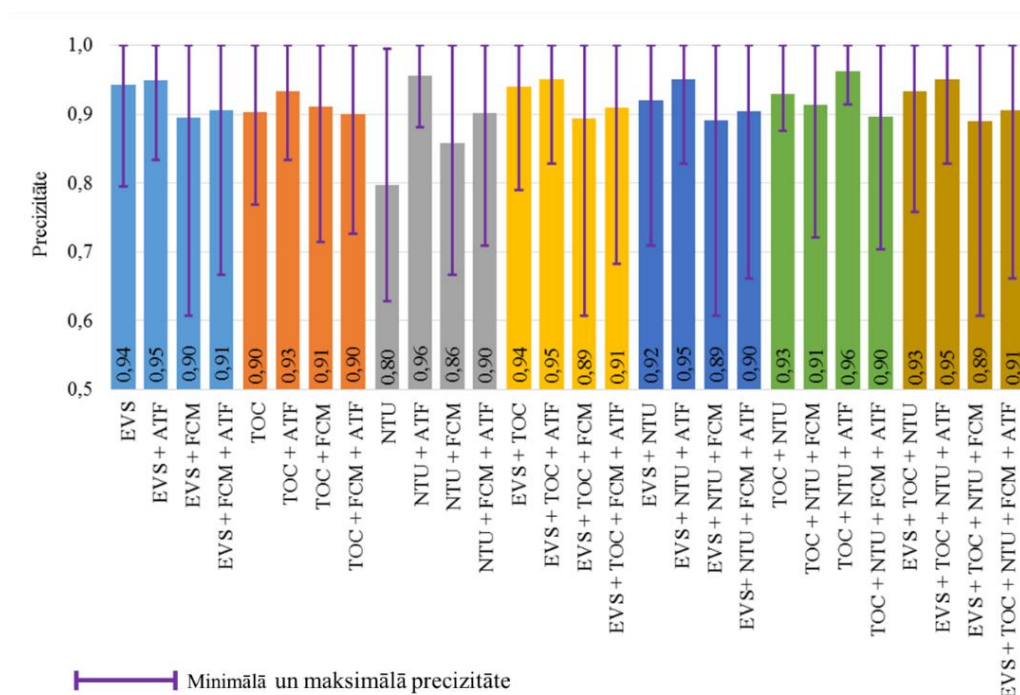
Analizējot līdz šim veikto pētījumu rezultātus, autori atzīst, ka šo *T*, pH un ORP parametru mērījumu nevienmērīgums tīrā ūdenī ir salīdzinoši augsts un apgrūtina piesārņojuma detektēšanu, tādēļ ir pieņemts lēmums turpmākajos piesārņojuma detektēšanas un datu apstrādes procesos *T*, ORP un pH parametrus neiekļaut, bet izmantot EVS, TOC, NTU, FCM un ATF parametrus.

4.5. Parametru kombināciju mērījumu piesārņojuma detektēšanas precizitāte

Izvēlētie pieci parametri apvienoti 25 iespējamās parametru kombinācijās. Parametru kombināciju veidošanas mērķis ir novērtēt, kā, izmantojot vairāku parametru mērījumus, uzlabojas piesārņojuma klasifikācijas precizitāte, kā arī novērtēt, kā uzlabojas piesārņojuma klasifikācijas precizitāte, iekļaujot mikrobioloģisko parametru mērījumus tiešsaistes dzeramā ūdens kvalitātes monitoringa sistēmās. Iegūtie piesārņojumu klasifikācijas precizitātes mērījumu rezultāti apkopoti 4.3. attēlā. Lai varētu precīzāk izprast piesārņojuma klasifikācijas precizitātes uzlabojumus, izmantojot dzeramā ūdens kvalitātes parametru kombinācijas, 4.3. un 4.4. attēlā standartnoviržu vietā tiek attēloti maksimālie un minimālie piesārņojuma klasifikācijas precizitātes raksturlielumi. Tādējādi iespējams analizēt ne tikai vidējās piesārņojuma klasifikācijas uzlabošanās pakāpi, bet arī tās uzlabošanas dažādu kritisku vai mazāk kritisku scenāriju gadījumā.

Vidējā dzeramā ūdens piesārņojuma klasifikācijas precizitāte, izmantojot dažādas sensoru kombinācijas, ir 0,91, kas ir augstāka, salīdzinot ar atsevišķu parametru vidējo klasifikācijas precizitāti 0,79. Tātad, izmantojot vairāku dzeramā ūdens kvalitātes parametru mērījumus, piesārņojumu var detektēt un klasificēt precīzāk, nekā izdarot atsevišķu parametru mērījumus. Visprecīzākā klasifikācija panākta, izmantojot NTU un ATF, kā arī NTU, ATF un TOC parametru kombinācijas. Attiecīgi šo parametru kombināciju mērījumi un to rezultātu

apstrāde, izmantojot piesārņojuma detektēšanas un klasifikācijas algoritmu, ļauj klasificēt piesārņojuma gadījumus ar precizitāti $0,96 \pm 0,04$. *NTU* un *ATF* parametru kombinācija, īstenojot notekūdeņu scenāriju, uzrādīja precizitāti 1,00, īstenojot gruntsūdeņu scenāriju – 0,99, īstenojot patogēno baktēriju modeļa piesārņojuma scenāriju – 0,95, īstenojot virszemes ūdeņu scenāriju – 0,88. Savukārt *NTU*, *ATF* un *TOC* parametru kombinācijas precizitāte notekūdeņu scenārijā ir 1,00, gruntsūdeņu un patogēno baktēriju modeļa piesārņojuma scenārijos – 0,97, bet virszemes ūdeņu scenārijā – 0,91. Lai gan abu parametru kombināciju izmantošanas rezultāti ir ļoti līdzīgi, par labāko atzīta *NTU*, *ATF* un *TOC* parametru kombinācija, jo tās minimālā klasifikācijas precizitāte ir augstāka. Minimālā precizitāte ir ļoti svarīga, jo tā pēc savas būtības ataino sliktākās dzeramā ūdens piesārņojuma gadījuma situācijas konstatēšanas un potenciālā neatbilstošas kvalitātes ūdens patērētājam novēršanas iespējamību.



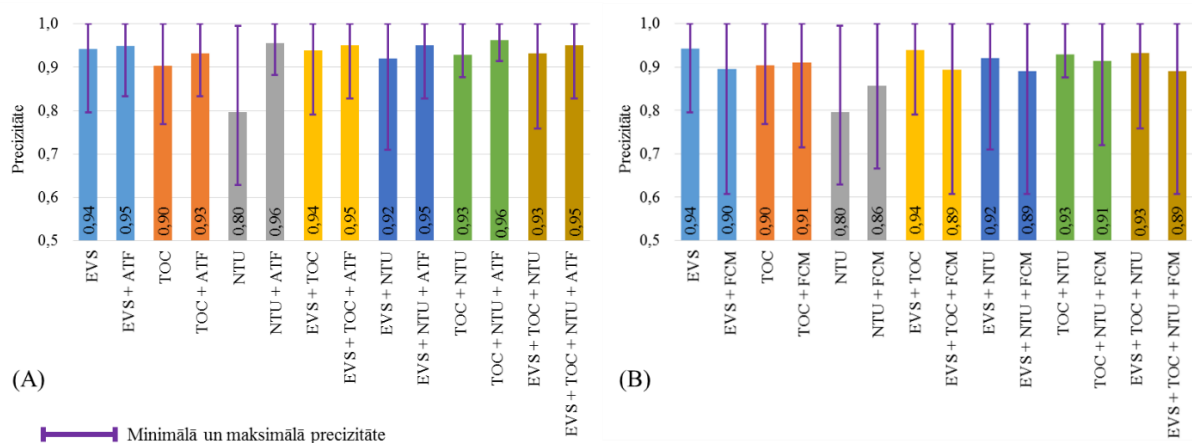
4.3. att. Parametru kombināciju piesārņojumu klasifikācijas precizitāte.

Lai varētu novērtēt mikrobioloģisko parametru ietekmi uz piesārņojuma klasifikācijas precizitāti, rezultātos iekļauti atsevišķi fizikāli-ķīmisko parametru un to kombināciju precizitāti raksturojoši raksturlielumi. Mikrobioloģisko parametru ietekme tiek vērtēta, salīdzinot fizikāli-ķīmisko parametru kombināciju precizitāti ar rezultātiem, kas iegūti, šīm kombinācijām pievienojot vienu vai abus mikrobioloģiskos parametrus.

Raksturlielumi, kas parāda vidējo dzeramā ūdens piesārņojuma gadījumu klasifikācijas precizitāti dažādiem fizikāli-ķīmiskiem parametriem un to kombinācijām, kā arī to izmaiņas mikrobioloģiskā parametra pievienošanas gadījumā, apkopoti 4.4. attēlā

Mikrobioloģisko parametru iekļaušanu dzeramā ūdens piesārņojuma gadījuma klasifikācijas algoritmā nevar uzskatīt par viennozīmīgu. Pievienojot *ATF* mērījumus jebkurai fizikāli-ķīmisko parametru kombinācijai, piesārņojuma klasifikācijas vidējā precizitāte tiek

uzlabota vai saglabāta esošajā līmenī. Turklāt, izmantojot attiecīgo parametru kombināciju, visos ATF pievienošanas gadījumos tiek uzlabota minimālā piesārņojuma klasifikācijas precizitāte. ATF pievienošana fizikāli-ķīmisko parametru mērījumiem var uzlabot dzeramā ūdens piesārņojuma gadījumu klasifikācijas precizitāti, tātad var būt noderīga dzeramā ūdens tiešsaistes monitoringa un agrīnā brīdinājuma sistēmās.



4.4. att. Fizikāli-ķīmisko parametru un to kombināciju piesārņojuma klasifikācijas precizitātes izmaiņas pēc ATF (A) un FCM (B) parametru pievienošanas.

Pievienojot FCM parametru fizikāli-ķīmisko parametru vai to kombināciju mērījumiem, piesārņojuma gadījumu klasifikācijas precizitāte var gan uzlaboties, gan pasliktināties. FCM pievienošana jebkurai fizikāli-ķīmisko parametru kombinācijai, īstenojot virszemes un gruntsūdeņu scenārijus, piesārņojuma klasifikācijas precizitāti uzlabo vidēji par 0,05, notekūdeņu scenārija gadījumā saglabājas esošajā 1,00 līmenī, bet patogēno baktēriju modeļa piesārņojuma gadījumā pasliktinās vidēji par 0,16. Turklāt, pievienojot FCM fizikāli-ķīmisko parametru mērījumiem, var samazināties attiecīgās parametru kombinācijas minimālā piesārņojuma klasifikācijas precizitāte, tādējādi pasliktinot kopējos piesārņojuma detektēšanas rezultātus.

Gadījumā, kad fizikāli-ķīmisko parametru mērījumiem tiek pievienoti gan ATF, gan FCM mērījumi, kopējā piesārņojumu detektēšanas precizitāte saglabājas esošajā līmenī. Virszemes ūdeņu un gruntsūdeņu scenārijos precizitāte uzlabojas par attiecīgi 0,02 un 0,08. Notekūdeņu scenārijā tā saglabājas 1,00. Tomēr patogēno baktēriju modeļa piesārņojuma scenārija gadījumā tā pazeminās par 0,12. Pievienojot ATF un FCM mērījumus fizikāli-ķīmisko parametru mērījumiem, var uzlabot dzeramā ūdens piesārņojuma gadījumu klasifikācijas precizitāti. Tomēr, īstenojot eksperimentāli simulētos piesārņojuma scenārijus, rezultāti liecina par nestabiliem precizitātes uzlabojumiem un pat tās pasliktināšanos, tātad FCM un ATF parametru vienlaicīga iekļaušana dzeramā ūdens tiešsaistes monitoringa un agrīnā brīdinājuma sistēmās var nebūt lietderīga.

4.6. Piesārņojuma detektēšanas precizitāte un agrīnās brīdināšanas sistēmas darbība

Lai gan pilota mēroga eksperimentos nav iespējams simulēt visus centralizētās ūdensapgādes sistēmās iespējamos piesārņojuma gadījumus, šajā darbā ir eksperimentāli demonstrēta dažādu dzeramā ūdens kvalitātes parametru monitoringa lietderība un potenciāls, detektējot teorētiskus piesārņojuma gadījumus. Interpretējot kopējos piesārņojuma detektēšanas algoritmu eksperimentālas izmantošanas rezultātus, jāņem vērā, ka piesārņojuma scenāriji un līdz ar to piesārņojuma detektēšanas precizitāte ir noteikta tikai konkrētiem apstākļiem un 10 % piesārņojumam ūdensapgādes sistēmā. Piesārņojuma gadījumi centralizētās ūdensapgādes sistēmās var būt salīdzinoši nevienmērīgāki gan plūsmu, gan piesārņojuma periodu ziņā. Eksperimenti ir veikti taisnā cauruļvadā bez pieslēgumiem un atzariem, kas imitē salīdzinoši vienkāršu ūdensapgādes sistēmas posmu. Pilsētu ūdensapgādes sistēmas piesārņojuma izplatības virzienu, sajaukšanos ar tīru ūdeni un faktisko tā koncentrāciju ir grūtāk prognozēt un detektēt, turklāt eksperimentos ir izmantota paraugu ņemšana un analīze, nevis tiešsaistes mērījumu metode.

Tomēr eksperimentāli iegūtie rezultāti un piesārņojuma gadījumu klasifikācijas precizitāte $0,96 \pm 0,04$, izmantojot ATF, duļķainības un *TOC* parametru mērījumus, ir salīdzinoši augsta, salīdzinot ar esošo komerciālo agrīnā brīdinājuma sistēmu uzrādīto precizitāti, kas ir 0,82 reāla piesārņojuma gadījumos. Komerciālo sistēmu precizitāte matemātiski simulēta piesārņojuma gadījumā var sasniegt 0,98. Savukārt zinātnieku piedāvātie algoritmi (DSM, PE, MEK, MA algoritmi), kas līdz šim nav iekļauti komerciālās agrīnā brīdinājuma sistēmās, ir uzrādījuši līdz 1,00 augstu piesārņojuma detektēšanas jutību. Tomēr šie rezultāti sasniegti, apstrādājot mākslīgas mērījumu datu kopas vai veicot ķīmisku piesārņojumu simulāciju. Līdzīga 1,00 liela piesārņojuma detektēšanas jutība, veicot iespējamu piesārņojuma gadījumu simulāciju ūdensapgādes sistēmās un sekojošu mērījumu datu apstrādi (ATF, duļķainības un *TOC* parametriem), tika sasniegta šajā darbā simulēto notekūdeņu un gruntsūdeņu piesārņojuma scenārijos. Turklāt šajā darbā simulētie piesārņojuma scenāriji ir pietuvināti reāliem apstākļiem, tātad – demonstrē sarežģītāku piesārņojuma gadījumu detektēšanu. Šādas tiešsaistes dzeramā ūdens kvalitātes monitoringa stacijas sensoru un nepieciešamo iekārtu izmaksas varētu būt salīdzinoši augstas. Tiešsaistes duļķainības sensora izmaksas ir apmēram EUR 3000–6000 atkarībā no ražotāja. *TOC* tiešsaistes sensoru modifikāciju cena ir atkarīga no tajā lietotās parauga analizēšanas metodes, bet tā svārstās no EUR 8000 līdz EUR 60 000. ATF tiešsaistes mērījumu iekārtas nav komerciāli pieejamas, bet to aptuvenās izbūves izmaksas varētu būt EUR 10 000–20 000. Tomēr, attīstoties pieejamajām tehnoloģijām, aprīkojumu cenas varētu samazināties un kļūt pieejamākas lielākam skaitam ūdenssaimniecību.

Iegūtie rezultāti pierāda, ka Mahalanobisa attālumu algoritmu, iespējams, var lietot, lai konstatētu dažādu ūdensapgādes sistēmu piesārņojuma gadījumus. Tomēr pirms piedāvātā risinājuma izmantošanas reālās centralizētās ūdensapgādes sistēmās iegūtie piesārņojuma detektēšanas un klasifikācijas rezultāti jāpārbauda atšķirīgos apstākļos, mainot hidrauliskos un piesārņojuma parametrus. Turpmākajos eksperimentos jāiekļauj tiešsaistes mērījumi, kas to

rezultātus pietuvinātu reālu agrīnā brīdinājuma sistēmu darbībai. Izstrādāto algoritmu var vienkārši automatizēt un iekļaut tiešsaistes sistēmās, tā trūkums gan ir liels datu apjoms, kas nepieciešams, lai definētu piesārņojuma klases.

Dzeramā ūdens izraisītie patērētāju saslimšanas gadījumi lielākoties ir saistīti ar mikrobioloģisko parametru neatbilstību dzeramā ūdens nekaitīguma prasībām, tādēļ arvien vairāk pētījumu ir saistīti ar mikrobioloģisko parametru izmantošanu agrīnā brīdinājuma sistēmās. Diemžēl ūdensapgādes sistēmās ir novērojamas salīdzinoši lielas ūdens kvalitātes parametru svārstības, kas var ietekmēt piesārņojuma gadījumu detektēšanu. Eksperimentos konstatētās ATF izmaiņas sistēmas normālas darbības apstākļos ir $\pm 39,6\%$. Šīs izmaiņas ir relatīvi lielākas no visiem šajā pētījumā analizētajiem parametriem, tomēr ATF pievienošana fizikāli-ķīmisko parametru mērījumiem uzlabo piesārņojuma detektēšanas un klasifikācijas precizitāti. Eksperimentos tika pierādīts, ka, izmantojot automatizētas ATF iekārtas, ATF parametrs var uzlabot tiešsaistes agrīnā brīdinājuma sistēmas darbības precizitāti. ATF parametru mērījumu automatizācija, lietojot regulārus un relatīvi vienkāršus mērījumus, palīdzētu veikt nepārtrauktu dzeramā ūdens mikrobioloģiskās kvalitātes uzraudzību, kas piesārņojuma gadījumā ļautu to operatīvi konstatēt, tādējādi būtiski samazinot risku ietekmēt patērētāju veselību. Tomēr pašreizējās metodes izmaksas, salīdzinot ar klasiskajām, ir salīdzinoši augstas. Lai samazinātu iekārtu ekspluatācijas un apkalpošanas izmaksas, ATF parametrus var analizēt retāk. Turklāt, izmantojot minēto metodi, rodas šķidrumi, kas jānovada kanalizācijā, tāpēc reālās sistēmās ir jāparedz sarežģītāks iekārtu uzstādīšanas risinājums.

Literatūrā aprakstīti gadījumi, kad, izmantojot plūsmas citometriju (FCM) un rezultātu statistisko analīzi, ir iespējams detektēt piesārņojuma gadījumus, kuros eksperimentāli simulēts 4% mikroorganismu skaita pieaugums. Eksperimentu laikā konstatētās $\pm 23,1\%$ ($6,59 \times 10^5 \pm 1,52 \times 10^5$ šūnas/mL) šūnu skaita izmaiņas ūdensapgādes sistēmas normālas darbības apstākļos ir līdzīgas iepriekš aprakstītajām $1,62 \times 10^5$ līdz $1,07 \times 10^6$ šūnas/mL izmaiņām Rīgas ūdensapgādes sistēmā. Šāda izmaiņu amplitūda sistēmas normālas darbības apstākļos liedza detektēt zema piesārņojuma gadījumus un samazināja piesārņojuma klasifikācijas precizitāti, kas iegūta ar FCM mērījumiem. FCM salīdzinoši sliktos piesārņojuma detektēšanas rezultātus var saistīt arī ar suspendētām daļiņām jeb paaugstinātu duļķainību, tāpēc FCM mērījumos suspendētās daļiņas var kļūdīgi uzskatīt par mikroorganismiem, mazinot faktisko mērījumu precizitāti. Tādējādi FCM parametra pievienošanas lietderība fizikāli-ķīmisko parametru mērījumiem, detektējot piesārņojuma gadījumus, ir atkarīga no ūdensapgādes sistēmā esošo šūnu skaita svārstībām normālos darbības apstākļos. Pirms FCM parametra mērījumu sākuma reālās sistēmās ir rūpīgi jāanalizē ikdienas šūnu skaita izmaiņas.

Lai ūdensapgādes uzņēmumus motivētu izmantot agrīnā brīdinājuma vai tiešsaistes dzeramā ūdens kvalitātes monitoringa sistēmas, nepietiek tikai ar ūdensapgādes sistēmas piesārņojuma gadījumu precīzu detektēšanu. Šo sistēmu lietošanu šobrīd nevar ekonomiski pamatot, jo to uzstādīšanas un ekspluatācijas izmaksas ir salīdzinoši augstas. Tomēr ASV veiktā pētījuma rezultāti ir pierādījuši, ka vairāk par 30% no visiem reģistrētajiem kuņģa un zarnu trakta slimību gadījumiem var būt saistīti ar trūkumiem ūdens apgādes sistēmās, turklāt ik gadu saslimušo cilvēku ārstēšanai tiek patērēti vairāk nekā 10 miljardi ASV dolāru.

Tādējādi investīcijas ūdensapgādes sistēmu uzlabošanā varētu atmaksāties kopējā sabiedrības ekonomiskajā ieguvumā, bet ne konkrēto ūdenssaimniecību finanšu rādītājos.

Līdz šim veikto un, iespējams, turpmāko pētījumu rezultāti ļautu monitorēt dzeramā ūdens kvalitāti, radot pamatojumu arvien biežākai tiešsaistes sistēmu izmantošanai. To iespējamā lietošana, ne tikai detektējot piesārņojuma gadījumus, bet arī uzlabojot ūdens sagatavošanu un piegādi, varētu paātrināt minēto tiešsaistes sistēmu ieviešanu.

5. SECINĀJUMI

1. Veicot dzeramā ūdens adenožīntrifosfāta, duļķainības un kopējā organiskā oglekļa mērījumus un apstrādājot to rezultātus ar Mahalanobisa attāluma piesārņojuma gadījumu detektēšanas un klasificēšanas algoritmu, ir iespējams veikt piesārņojuma gadījumu klasifikāciju (P) ar $0,96 \pm 0,04$ precizitāti. Tas nozīmē, ka ir iespējams klasificēt tīra un piesārņota ūdens klātbūtni sistēmā vidēji ar 96 % precizitāti. Notekūdeņu intrūzijas gadījumā piesārņojumu var klasificēt ar 100 % precizitāti.
2. Temperatūras, oksidēšanas-reducēšanas potenciāla un pH parametru mērījumi demonstrē viszemāko piesārņojuma gadījumu klasificēšanas precizitāti, attiecīgi $0,68 \pm 0,06$, $0,67 \pm 0,20$ un $0,54 \pm 0,12$. Šīs precizitātes raksturlielumi ir mazāki nekā vidējā piesārņojuma klasifikācijas precizitāte $0,79 \pm 0,14$, kas iegūta, izmantojot atsevišķus katra parametra mērījumus, tādēļ šo parametru mērījumus nav lietderīgi izmantot piesārņojuma gadījumu klasifikācijā. Tomēr šo parametru monitoringu var lietot, lai novērtētu dzeramā ūdens atbilstību nekaitīguma prasībām.
3. Adenožīntrifosfāta mērījumu pievienošana jebkurai no pētījumā apskatītajām fizikāli-ķīmisko parametru kombinācijām uzlabo mērījumu precizitāti vidēji par 0,06 jeb 6 %. Patogēno baktēriju modeļa piesārņojuma gadījumā uzlabojums var sasniegt 0,32 jeb 32 %.
4. Plūsmas citometrijas mērījumu pievienošana jebkurai no pētījumā apskatītajām fizikāli-ķīmisko parametru kombinācijām neietekmē mērījumu vidējo precizitāti dažādos piesārņojuma gadījumos. Tomēr notekūdeņu un virszemes ūdeņu piesārņojuma gadījumā precizitāti var uzlabot par attiecīgi 0,19 un 0,21 jeb 19 % un 21 %. Plūsmas citometrijas mērījumu izmantošanu piesārņojuma gadījumu klasificēšanā ietekmē to relatīvi lielās $\pm 23,1$ % šūnu skaita izmaiņas normālos ūdensapgādes sistēmas darbības apstākļos.
5. Iekļaujot mikrobioloģisko parametru mērījumus agrīnā brīdinājuma sistēmās, var uzlabot piesārņojuma detektēšanas precizitāti, tomēr ir jāveic ilglaicīgi šo parametru mērījumi, lai noteiktu to svārstības normālos sistēmas darbības apstākļos.
6. Automatizētu mikrobioloģisko parametru mērījumu iekļaušana agrīnā brīdinājuma sistēmās ļautu samazināt mikrobioloģiskā piesārņojuma detektēšanai nepieciešamo laiku no minimālajām 18 stundām, izmantojot šobrīd likumdošanā esošos parametrus un standarta laboratorijas metodes, līdz apmēram 1–5 minūtēm. Tādējādi būtiski tiktu samazināts laiks, kad patērētājiem varētu piegādāt dzeramo ūdeni, kas neatbilst nekaitīguma prasībām.

6. REKOMENDĀCIJAS UN TURPMĀKIE PĒTĪJUMI

Agrīnā brīdinājuma sistēmu izmantošana ūdensapgādes sistēmās ir neizbēgama, jo iedzīvotāju skaits pilsētās pieaug, radot potenciālas problēmas dzeramā ūdens kvalitātes uzturēšanā, tādēļ ir būtiski veikt zinātniskus pētījumus, lai rastu risinājumus šo sistēmu turpmākai uzlabošanai un pilnveidošanai.

Šajā promocijas darbā tika izstrādāts dzeramā ūdens piesārņojuma gadījumu detektēšanas un klasifikācijas algoritms, tomēr tā darbība tika pārbaudīta, īstenojot tikai konkrētus piesārņojuma scenārijus. Lai pilnveidotu algoritmu, to vajadzētu papildināt ar piesārņojuma tipu klasifikāciju, kas potenciāli ļautu noteikt piesārņojuma avotu un veidu, kā arī pievienot citus piesārņojuma tipus (piemēram, pesticīdus vai toksiskus savienojumus), būtu jāveic atkārtoti eksperimenti, mainot piesārņojuma tipus, plūsmas (šajā darbā izmantotais plūsmas ātrums ir 0,1 m/s), koncentrāciju un jāveido piesārņojuma datubāzes. Izmantojot agrīnā brīdinājuma sistēmas reālos apstākļos, to piesārņojuma detektēšanas precizitāte ir ļoti atkarīga no to uzstādīšanas vietas un skaita ūdensapgādes sistēmā, tāpēc, plānojot šādas sistēmas, to skaitam un novietojumam jāpievērš ļoti liela uzmanība, jo nepareizi izvietotas agrīnā brīdinājuma sistēmas zaudē jebkādu to uzstādīšanas jēgu.

Šajā pētījumā tika identificēta labākā dzeramā ūdens parametru mērījumu kombinācija, kas sastāv no adenožīntrifosfāta, ūdens duļķainības un kopējā organiskā oglekļa mērījumiem, kas būtu pielietojama piesārņojuma gadījumu detektēšanai un klasificēšanai. Diemžēl eksperimentos tika izmantota paraugu ņemšanas un analīzes metode, kas šobrīd neļauj apgalvot par šo parametru piesārņojuma detektēšanas precizitāti tiešsaistes mērījumu un agrīnās brīdinājuma sistēmas darbības laikā. Lai varētu izteikt šādu apgalvojumu, ir jāveic pilota mēroga eksperimenti, izmantojot attiecīgo parametru tiešsaistes sensorus. Lielākais izaicinājums būtu šādos eksperimentos iekļaut adenožīntrifosfāta mērījumus, jo šobrīd tirgū nav plaši pieejami šī parametra tiešsaistes sensori. Tomēr literatūrā ir sastopama virkne šādu sistēmu prototipu, ko šajā gadījumā varētu izmantot. ATF mērījumu automatizācija un iekļaušana tiešsaistes iekārtu klāstā šai metodei ļautu iegūt plašu pielietojamību dzeramā ūdens mikrobioloģisko izmeklējumu jomā. Turklāt, palielinoties piedāvāto iekārtu skaitam, samazinātos arī to cena, līdz ar to tās kļūtu pieejamākas ūdensapgādes uzņēmumiem.

Alternatīvo un relatīvi ātro mikrobioloģisko parametru mērījumu metožu (piemēram, plūsmas citometrijas vai adenožīntrifosfāta mērījumi) izmantošana ļauj iegūt relatīvi vairāk informācijas par dzeramā ūdens mikrobioloģisko kvalitāti un tās dinamiku nekā līdz šim izmantotā klasiskās kultivēšanas metode, tāpēc iespējams veikt gan dažādus pilota eksperimentus, gan eksperimentus reālās centralizētās ūdensapgādes sistēmās, lai noskaidrotu iespējamo korelāciju starp mikrobioloģisko un fizikāli-ķīmisko parametru izmaiņām normālas sistēmas darbības un piesārņojuma gadījumā. Lai stimulētu šādu metožu ieviešanu, ir nepieciešams tās iekļaut likumdošanā esošo metožu sarakstā. Līdzīgi kā Šveicē, šobrīd kā viena no oficiālajām dzeramā ūdens mikrobioloģisko izmeklējumu metodēm ir iekļauta plūsmas citometrija.

Agrīnā brīdinājuma sistēmu ieviešana ūdensapgādes sistēmās ir atkarīga no ūdensapgādes uzņēmumu motivācijas investēt šādās relatīvi dārgās iekārtās. Lai paaugstinātu ūdensapgādes

uzņēmumos ar dzeramā ūdens kvalitāti saistīto risku apzināšanu, ļoti būtiski ir katrā ūdensapgādes sistēmā veikt esošo risku analīzi. Šāda veida analīze ūdensapgādes uzņēmumiem ļautu apzināt līdz šim nekonstatētās problēmas, kā arī motivētu tos izmantot agrīnā brīdinājuma sistēmas. Šādu riska novērtējumu veikšana ir paredzēta ūdens drošuma plānu ieviešanas gadījumā, kas Eiropas Savienībā tiek reglamentēta, tomēr šobrīd spēkā esošajos tiesību aktos šo plānu ieviešana lielākoties ir brīvprātīga.

PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

1. Dejus, S., Nescerecka, A., Kurcalts, G. and Juhna, T. (2018). Detection of drinking water contamination event with Mahalanobis distance method, using On-line monitoring sensors and manual measurements data. *Water Science and Technology: Water Supply*. 18 (6). p. 2133–2141, doi:10.2166/ws.2018.039.
2. Dejus, S., Nescerecka, A., Stankevics, V., Juhna, T. (2018) Evaluation of Affected Area after Contamination Event in Drinking Water Distribution System. *Book of Abstracts, 10th IWA Eastern European Young Water Professionals Conference, May 7–12, 2018*. Zagreb: University of Zagreb, Croatia, 2018, p.143-144, ISBN 978-953-8168-23-9.
3. Dejus, S., Nescerecka, A., Kurcalts, G., Juhna, T. (2017) Drinking Water Contamination Detection by On-line Monitoring: Pilot Scale Studies. *Book of Abstracts, 9th IWA Eastern European Young Water Professionals Conference, May 24–27, 2017*. Budapest: Budapest University of Technology and Economics, Hungary, 2017, p. 161–162, ISBN 978-963-313-256-2.
4. Dejus, S., Nescerecka, A., Juhna, T. (2017) On-line Drinking Water Contamination Event Detection Methods. *Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference Environment. Technology. Resources, June 15–17, 2017*. Volume I, Rezekne: Rezeknes Academy of Technologies, Latvia, 2017, lpp. 77–81, ISSN 1691-5402.
5. Ribickis, L., Kuņicina, N., Zabašta, A., Čaiko, J., Galkina, A., Kondratjevs, K., Patļins, A., Nazarovs, S., Merkurjevs, J., Pečerska, J., Romānovs, A., Zeņina, N., Skorobogatjko, A., Ņikitenko, A., Andersone, I., Grakovskis, A., Kabaškins, I., Savrasovs, M., Piļipovcs, A., Dejus, S. (2017). *Sensoru tīklu tehnoloģiju lietojums ūdensapgādes un transporta sistēmās*. Rīga: RTU Izdevniecība, 194 lpp. ISBN 978-9934-10-915-7 (2.1. un 2.3. nodaļas – 19 lpp.).
6. Dejus, S., Rusenieks, R., Nescerecka, A., Nazarovs, S., Juhna, T. (2016) Long Term Drinking Water Quality Monitoring in Drinking Water Supply Systems by On-Line Sensors. *Book of Abstracts, 8th Eastern European Young Water Professionals Conference, May 11–14, 2016*, Wroclaw: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, Poland, 2016, p. 73–74, ISBN 978-83-7493-936-2.
7. Dejus S., Nescerecka A., Nazarovs S., Juhna T. (2015) Review on Existing and Emerging Biological Contamination Detection Tools for Drinking Water Distribution Systems (DWDS) Online Monitoring. *Proceedings of the 7th IWA Eastern European Water Professionals Conference for young and senior water professionals, September 17–19, 2015*. Belgrade, 2015, p. 320–332.

8. Dejus S., Rubulis J. (2013). Challenges of water quality modelling in water supply systems. *Proceedings of the 5th IWA Eastern European Water Professionals Conference for young and senior water professionals*, June 26–28, 2013, Kiev, Ukraine, 2013, p. 246–252.
9. Nazarovs, S., Dejus, S., and Juhna, T. (2012). Modelling water quality in drinking water distribution networks from real-time direction data, *Drinking Water Engineering and Science*, vol. 5, 39–45, doi:10.5194/dwes-5-39-2012.
10. Rubulis, J., Dejus, S., Meksa, R. (2012) Online measurement usage for predicting water age from tracer tests to validate a hydraulic model. *Proceedings of the 12th International Water Distribution Systems Analysis Conference*, September 19–23, 2010, Tucson, USA, pp. 1488-1497. doi:10.1061/41203(425)133.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. National Reserach Council. *Drinking Water Distribution Systems: Assessing and Reducing Risks*. Washington, D.C.: National Academies Press, 2006. 404 p. ISBN 978-0-309-10306-0.
2. De Graaf, B. R., Williamson, F., Koerkamp, M. K., Verhoef, J. W., Wuestman, R., Bajema, B., Trietsch, E., Van Delft, W. Implementation of an innovative sensor technology for effective online water quality monitoring in the distribution network. *Water Practice and Technology*. 2012. Vol. 7, no. 4. doi: 10.2166/wpt.2012.099. ISSN 1751-231X.
3. Rasekh, A., Brumbelow, K. Drinking water distribution systems contamination management to reduce public health impacts and system service interruptions. *Environmental Modelling & Software*. 2014. Vol. 51, p. 12–25. doi: 10.1016/j.envsoft.2013.09.019. ISSN 13648152.
4. Oliker, N., Ostfeld, A. A coupled classification – Evolutionary optimization model for contamination event detection in water distribution systems. *Water Research*. 2014. Vol. 51, p. 234–245. doi: 10.1016/j.watres.2013.10.060. ISSN 0043-1354.
5. Hrudey, S. E., Hrudey, E. J. *Safe Drinking Water Lessons from Recent Outbreaks in Affluent Nations*. Padstow, Cornwall, UK: IWA Publishing, 2004. 486 p. ISBN 1-84339-042-6.
6. Williamson, F., Van den Broeke, J., Koster, T., Koerkamp, M. K., Verhoef, J. W., Hoogterp, J., Trietsch, E., De Graaf, B. R. Online water quality monitoring in the distribution network. *Water Practice and Technology*. 2014. Vol. 9, no. 4, p. 575–585. doi: 10.2166/wpt.2014.064. ISSN 1751-231X.
7. Lopez-Roldan, R., Tusell, P., Cortina, J. L., Courtois, S., Cortina, J. L. On-line bacteriological detection in water. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2013. Vol. 44, p. 46–57. doi: 10.1016/j.trac.2012.10.010. ISSN 01659936.
8. Hrudey, S. E., Hrudey, E. J. Published Case Studies of Waterborne Disease Outbreaks—Evidence of a Recurrent Threat. *Water Environment Research*. 2007. Vol. 79, no. 3, p. 233–245. doi: 10.2175/106143006X95483. ISSN 1061-4303.
9. Tang, Y., Wu, S., Miao, X., Pollard, S. J. T., Hrudey, S. E. Resilience to evolving drinking water contamination risks: a human error prevention perspective. *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 57, p. 228–237. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.06.018. ISSN 0959-6526.
10. Storey, M. V., Van der Gaag, B., Burns, B. P. Advances in on-line drinking water quality monitoring and early warning systems. *Water Research*. 2011. Vol. 45, no. 2, p. 741–747.

doi: 10.1016/j.watres.2010.08.049. ISSN 0043-1354.

11. Van Lieverloo, J. H. M., Mesman, G. A. M., Bakker, G. L., Baggelaar, P. K., Hamed, A., Medema, G. Probability of detecting and quantifying faecal contaminations of drinking water by periodically sampling for *E. coli*: A simulation model study. *Water Research*. 2007. Vol. 41, no. 19, p. 4299–4308. doi: 10.1016/j.watres.2007.06.003. ISSN 0043-1354.
12. Ellis, K., Gowdy, C., Jakomis, N., Ryan, B., Thom, C., Biggs, C. A., Speight, V. Understanding the costs of investigating coliform and *E. coli* detections during routine drinking water quality monitoring. *Urban Water Journal*. 2018. Vol. 15, no. 2, p. 101–108. doi: 10.1080/1573062X.2017.1398762. ISSN 1573-062X.
13. Che, H., Liu, S. Contaminant Detection Using Multiple Conventional Water Quality Sensors in an Early Warning System. *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 89, p. 479–487. doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.239. ISSN 1877-7058.
14. Eliades, D. G., Stavrou, D., Vrachimis, S. G., Panayiotou, C. G., Polycarpou, M. M. Contamination Event Detection Using Multi-level Thresholds. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 119, no. 1, p. 1429–1438. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.1003. ISSN 1877-7058.
15. Liu, S., Che, H., Smith, K., Lei, M., Li, R. Performance evaluation for three pollution detection methods using data from a real contamination accident. *Journal of Environmental Management*. 2015. Vol. 161, p. 385–391. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.07.026. ISSN 0301-4797.
16. Umberg, K., Allgeier, S. Parameter Set Points: An Effective Solution for Real-time Data Analysis. *Journal – American Water Works Association*. 2016. Vol. 108, no. January, p. E60–E66. doi: 10.5942/jawwa.2016.108.0009. ISSN 1551-8833.
17. Olikar, N., Ostfeld, A. Minimum Volume Ellipsoid Classification Model for Contamination Event Detection in Water Distribution Systems. *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 70, p. 1280–1288. doi: 10.1016/j.proeng.2014.02.141. ISSN 1877-7058.
18. Hou, D., He, H., Huang, P., Zhang, G., Loaiciga, H. Detection of water-quality contamination events based on multi-sensor fusion using an extended Dempster–Shafer method. *Measurement Science and Technology*. 2013. Vol. 24, no. 5, p. 055801. doi: 10.1088/0957-0233/24/5/055801. ISSN 0957-0233.
19. Zulkifli, S. N., Rahim, H. A., Lau, W. J. Detection of contaminants in water supply: A review on state-of-the-art monitoring technologies and their applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2018. Vol. 255, p. 2657–2689. doi: 10.1016/j.snb.2017.09.078. ISSN 0925-4005.
20. Højris, B., Christensen, S. C. B., Albrechtsen, H. J., Smith, C., Dahlqvist, M. A novel, optical, on-line bacteria sensor for monitoring drinking water quality. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6, no. 1, p. 23935. doi: 10.1038/srep23935. ISSN 2045-2322.
21. Banna, M. H., Imran, S., Francisque, A., Najjaran, H., Sadiq, R., Rodriguez, M., Hoorfar, M. Online Drinking Water Quality Monitoring: Review on Available and Emerging Technologies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2014. Vol. 44, no. 12, p. 1370–1421. doi: 10.1080/10643389.2013.781936. ISSN 1064-3389.
22. Raich, J. *Review of sensors to monitor water quality*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013. 33 p. ISBN 978-92-79-34618-7.
23. Figueras, M. J., Borrego, J. J. New Perspectives in Monitoring Drinking Water Microbial Quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2010. Vol. 7, no. 12, p. 4179–4202. doi: 10.3390/ijerph7124179. ISSN 1660-4601.
24. Tatari, K., Corfitzen, C. B., Albrechtsen, H. J., Christensen, S. C. B. *Sensors for microbial drinking water quality*. Lyngby: Technical University of Denmark, DTU Environment, 2016. 43 p.
25. Vang, Ó. K. *ATP measurements for monitoring microbial drinking water quality*. Lyngby:

- Vester Kopi, 2013. Available from: <http://www.orbit.dtu.dk>.
26. Sherchan, S. P., Gerba, C. P., Pepper, I. L. Evaluation of Real-Time Water Quality Sensors for the Detection of Intentional Bacterial Spore Contamination of Potable Water. *Journal of Biosensors & Bioelectronics*. 2013. Vol. 04, no. 04, p. 1–5. doi: 10.4172/2155-6210.1000141. ISSN 2155-6210.
 27. Liu, S., Smith, K., Che, H. A multivariate based event detection method and performance comparison with two baseline methods. *Water Research*. 2015. Vol. 80, no. May, p. 109–118. doi: 10.1016/j.watres.2015.05.013. ISSN 0043-1354.
 28. Liu, S., Che, H., Smith, K., Chang, T. A real time method of contaminant classification using conventional water quality sensors. *Journal of Environmental Management*. 2015. Vol. 154, p. 13–21. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.02.023. ISSN 0301-4797.
 29. Dejus, S., Neščerecka, A., Juhna, T. On-Line Drinking Water Contamination Event Detection Methods. In : *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Rezekne: Rezeknes Academy of Technologies, 2017. p. 77.