

ТРЕТМАН ВОДЕ ЗА ПИЋЕ: ОПТИМИЗАЦИЈА ЕФИКАСНОСТИ ТРЕТМАНА И ФОРМИРАЊА НУСПРОДУКАТА

Проф. др Јасмина Агбаба

Безбедна вода за пиће = темељ јавног здравља

- Од суштинског значаја за јавно здравље, социјалну стабилност и економски развој.
- Пажљив одабир извора воде највишег квалитета и заштита изворишта - приступ управљања ризицима по безбедност воде за пиће.

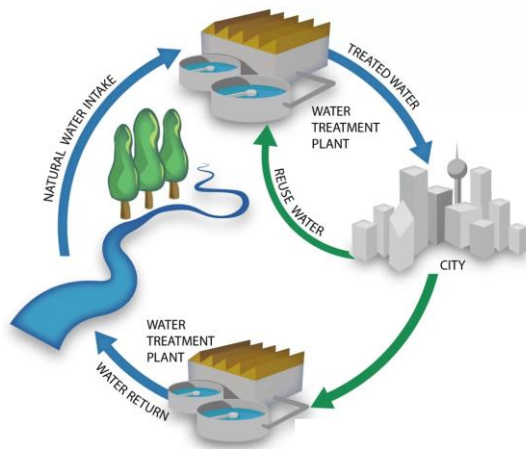
Мултибаријерни приступ узима у обзир све хазарде (природне и антропогене) и подразумева успостављање низа одвојених баријера којима се врши уклањање различитих загађујућих материја које могу бити присутне у сировој води, или могу dospети на постројење за третман воде на други начин.

Приступ обухвата све аспекте управљања квалитетом воде, укључујући три кључна елемента: заштиту извора, пречишћавање воде и управљање дистрибутивном мрежом.

Подупире успешно спровођење Плана за сигурно снабдевање водом - баријере заједно пружају већи степен сигурности да ће вода за пиће бити здравствено безбедна у дужем временском периоду

МУЛТИ БАРИЈЕРНИ ПРИСТУП ПРИПРЕМИ ВОДЕ ЗА ПИЋЕ

- Двојни изазов:
 - **Микробиолошка безбедност** → спречавање избијања болести које се преносе водом.
 - **Хемијска безбедност** → минимизирати изложеност нуспроизводима дезинфекције (ДБП) и другим штетним хемијским супстанцама.



Међународни и национални
прописи



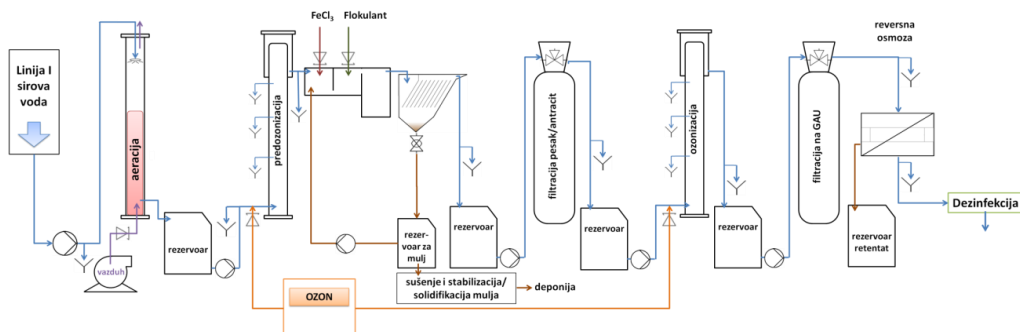
Строга ограничења у погледу
микробиолошког и физичко-
хемијског квалитета воде за пиће



Неопходност оптимизације процеса

Третман воде за пиће

- Треба да обезбеди:
 - микробиолошку исправност
 - физичко-хемијску исправност
 - органолептички квалитет воде
 - усклађеност квалитета воде са прописима



Конвенционални
процеси

Унапређени
процеси

Коагулација/
флокулација

Седиментација

Филтрација

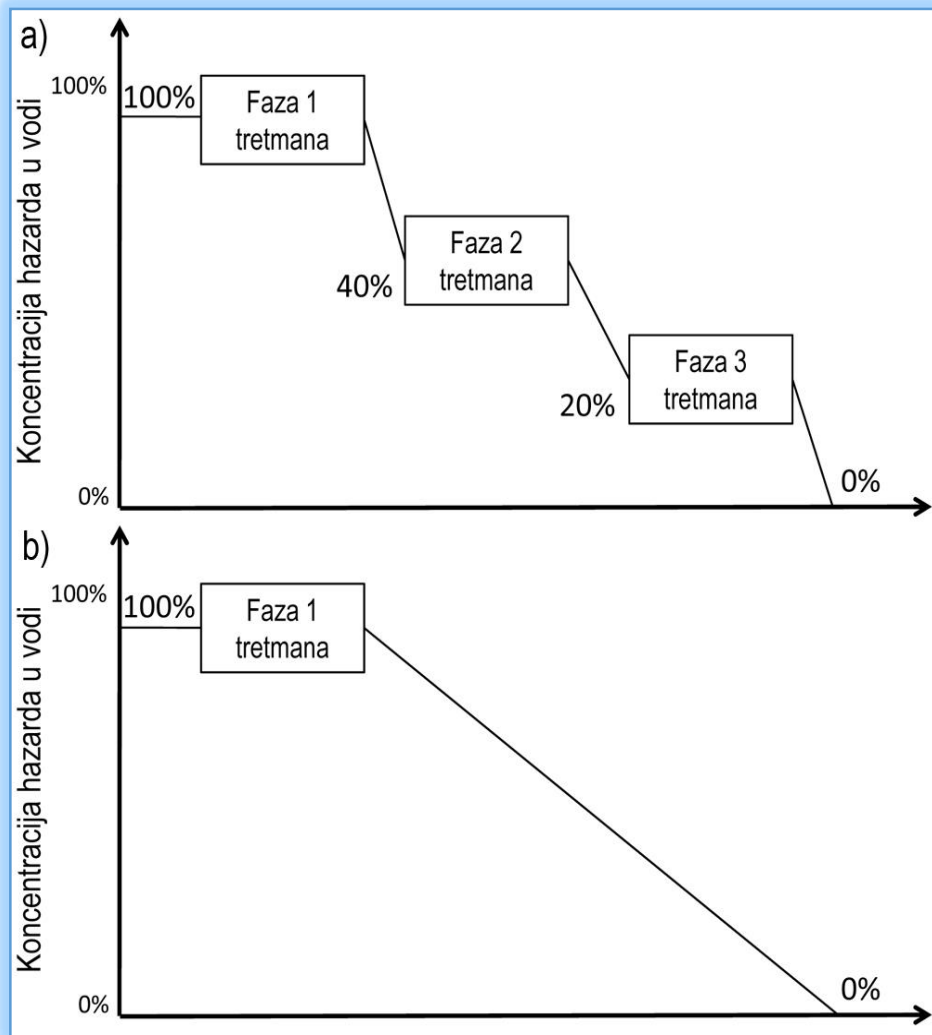
Дезинфекција

Унапређени
процеси оксидације

Мембрански
процеси

Адсорпција

Технолошка линија третмана воде условљена је квалитетом сирове воде и циљним стандардима.



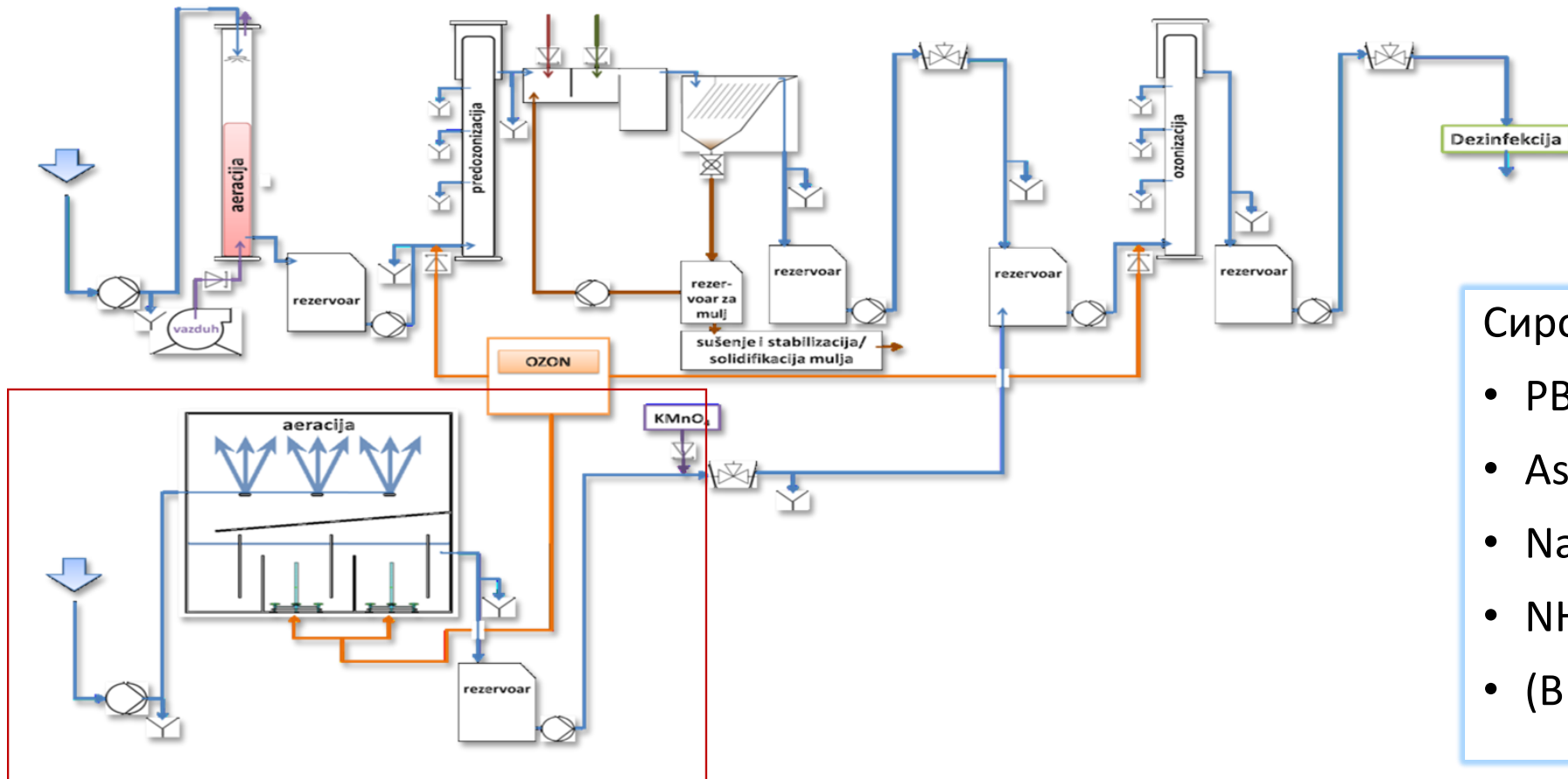
Примери мултибаријерног и једнобаријерног приступа у припреми воде за пиће

Постоји строга зависност између:

- количине штетне материје присутне у води,
- ефикасности сваке фазе у третману,
- утицаја на наредне фазе третмана, и
- могућности да дође до промена у квалитету воде током проласка кроз дистрибуциону мрежу и водоводни систем потрошача.

Неопходно је утврдити адекватне радне лимите (макс. или мин. контролни лимит) за сваку фазу процеса припреме воде за пиће, како би се одржала ефикасност одређене фазе у третману и спречило угрожавање наредних фаза.

ПРИМЕР 1:

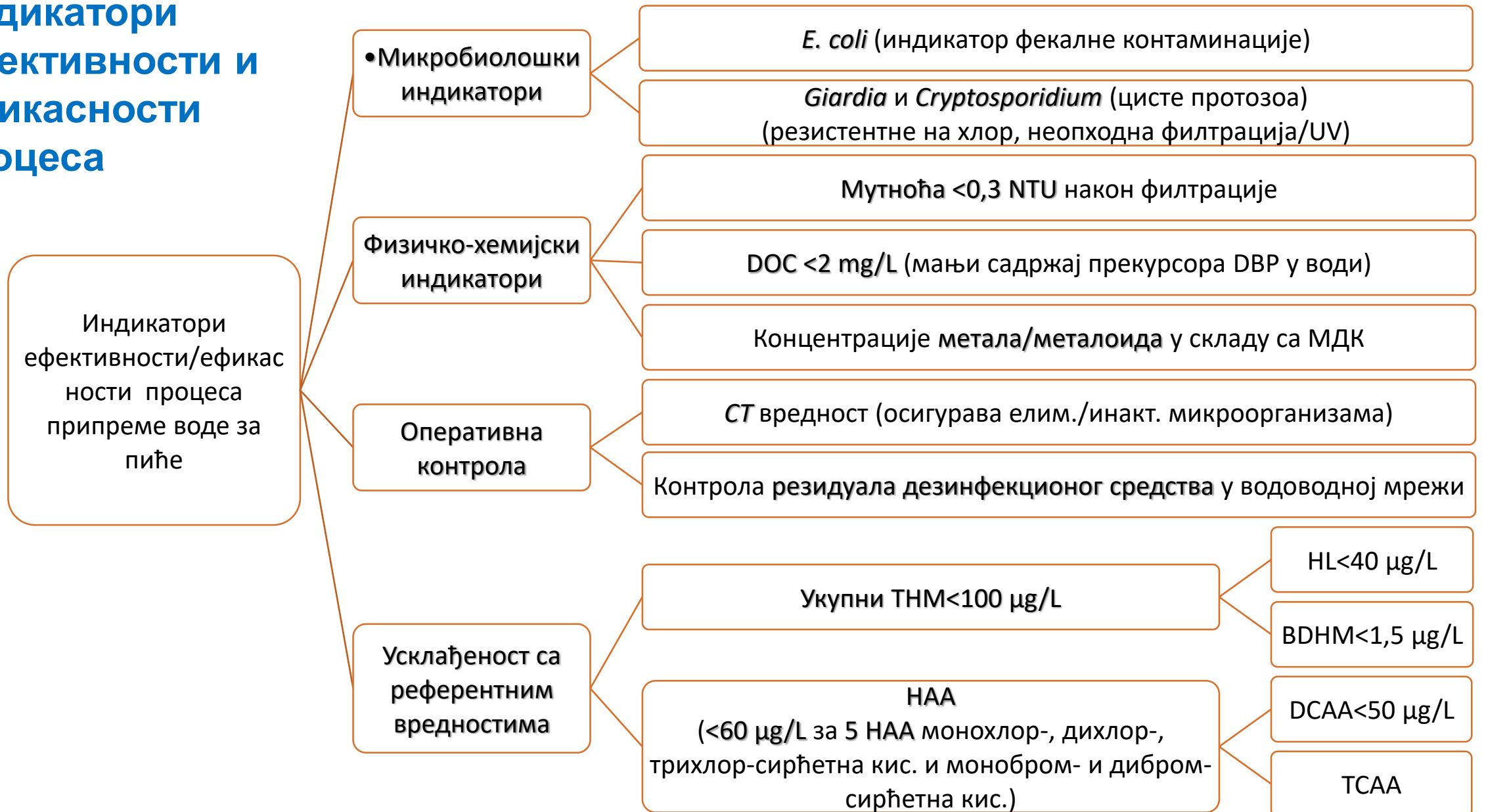


Сирова подземна вода:

- $\text{PB} \approx 30 \text{ mg KMnO}_4/\text{l}$
- $\text{As} \approx 220 \text{ } \mu\text{g/l}$
- $\text{Na} \approx 260 \text{ mg/l}$
- $\text{NH}_3 \approx 0,6 \text{ mg/l}$
- $(\text{B} \approx 0,5 \text{ mg/l})$

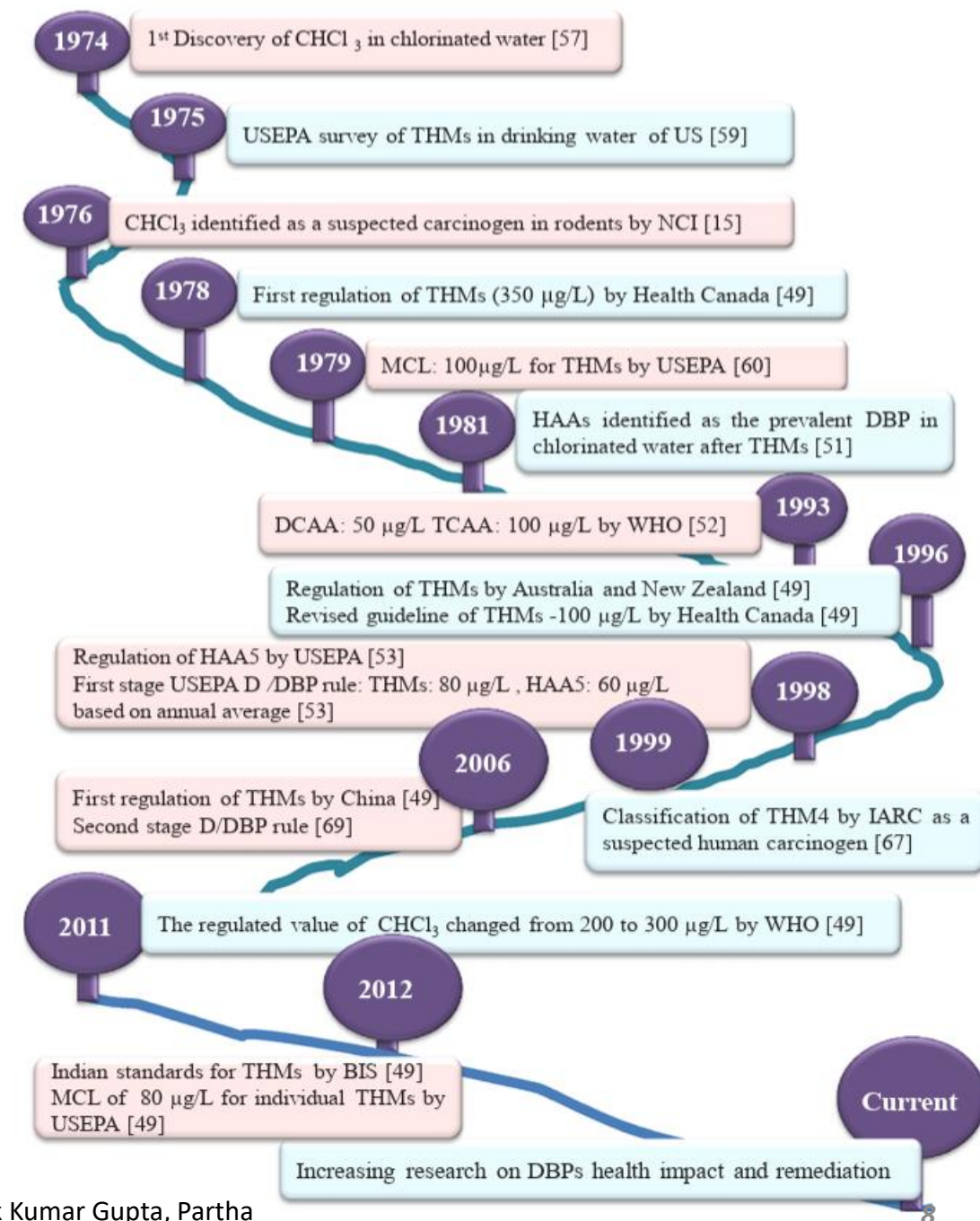
Аерација + предозонизација + коагулација и флокулација + седиментација + филтрација + главна озонизација + GAC филтација + разблаживање са водом из плитког аквифера или реверсна осмоза

Индикатори ефективности и ефикасности процеса



Природне органске материје – прекурсори DBP

- Комплексна мешавина органских једињења.
- Немају директан утицај на здравље
- Утичу на ефикасност процеса прераде воде за пиће
- Могу утицати на задовољство потрошача (може допринети нежељеној боји, укусу и мирису воде за пиће).
- Здравствени ефекти ПОМ произлазе из њиховог утицаја на процесе обраде воде за пиће.



Главне групе дезинфекционих нупродуката

- **Трихалометани:** хлороформ, бромдихлор метан, дибромхлорметан и бромформ.
- **Халосирћетне киселине:** дихлоросирћетна киселина, трихлоросирћетна киселина, итд.
- **Хлорит:** настаје при примени хлордиоксида.
- **Бромат:** настаје при озонизацији вода са повећаним садржајем бромида.

Здравствени ризици:

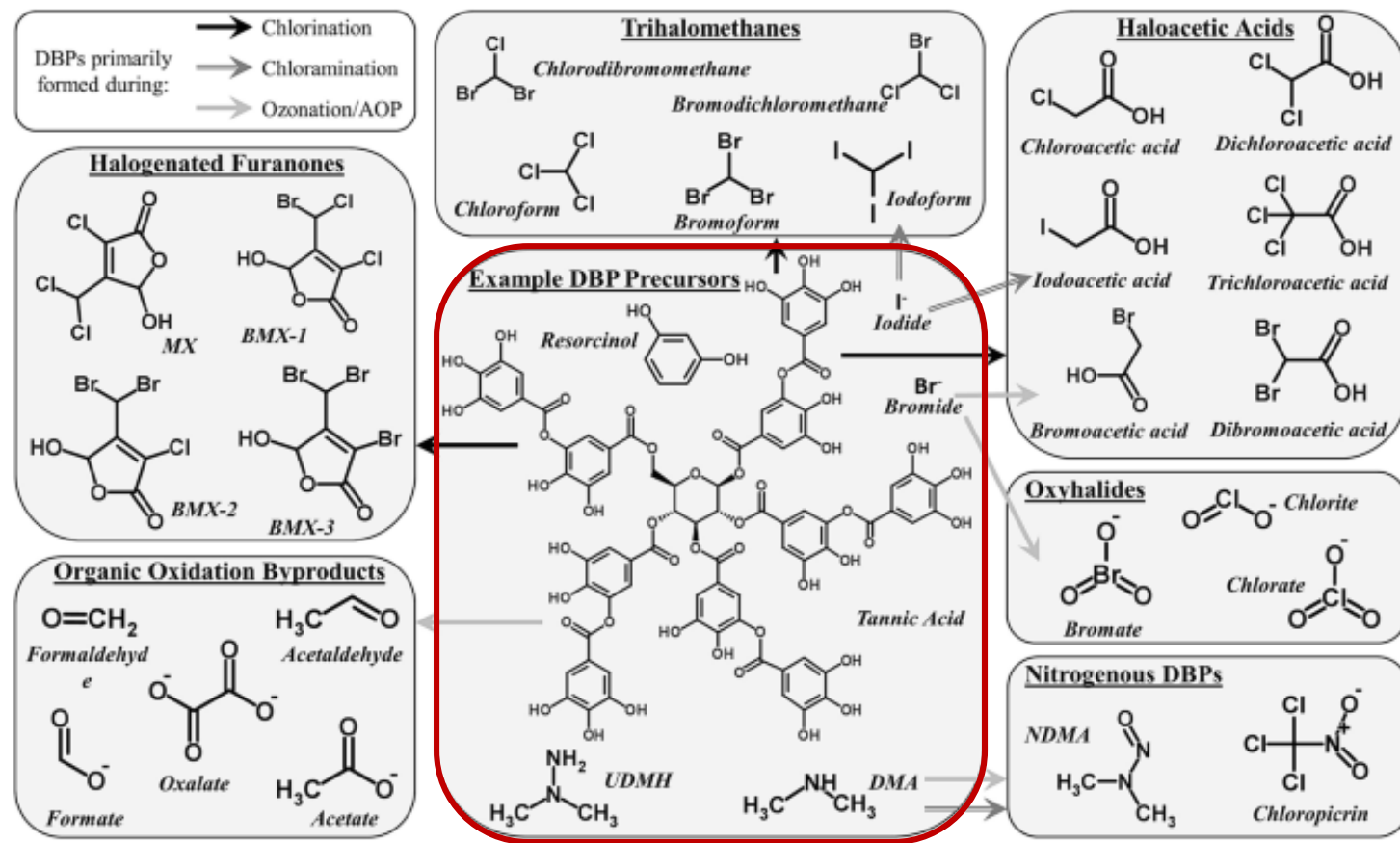
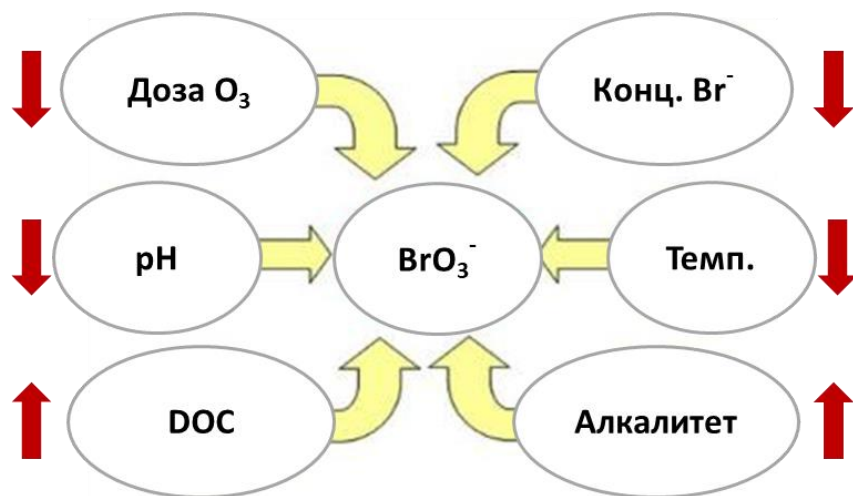
- Неки DBP класификовани су као могући или вероватни канцерогени (нпр. хлороформ, бромат).
- Хронична изложеност
- Строго се примењују МДК на глобалном нивоу.



Фактори који утичу на формирање DBP

- Квалитет воде:

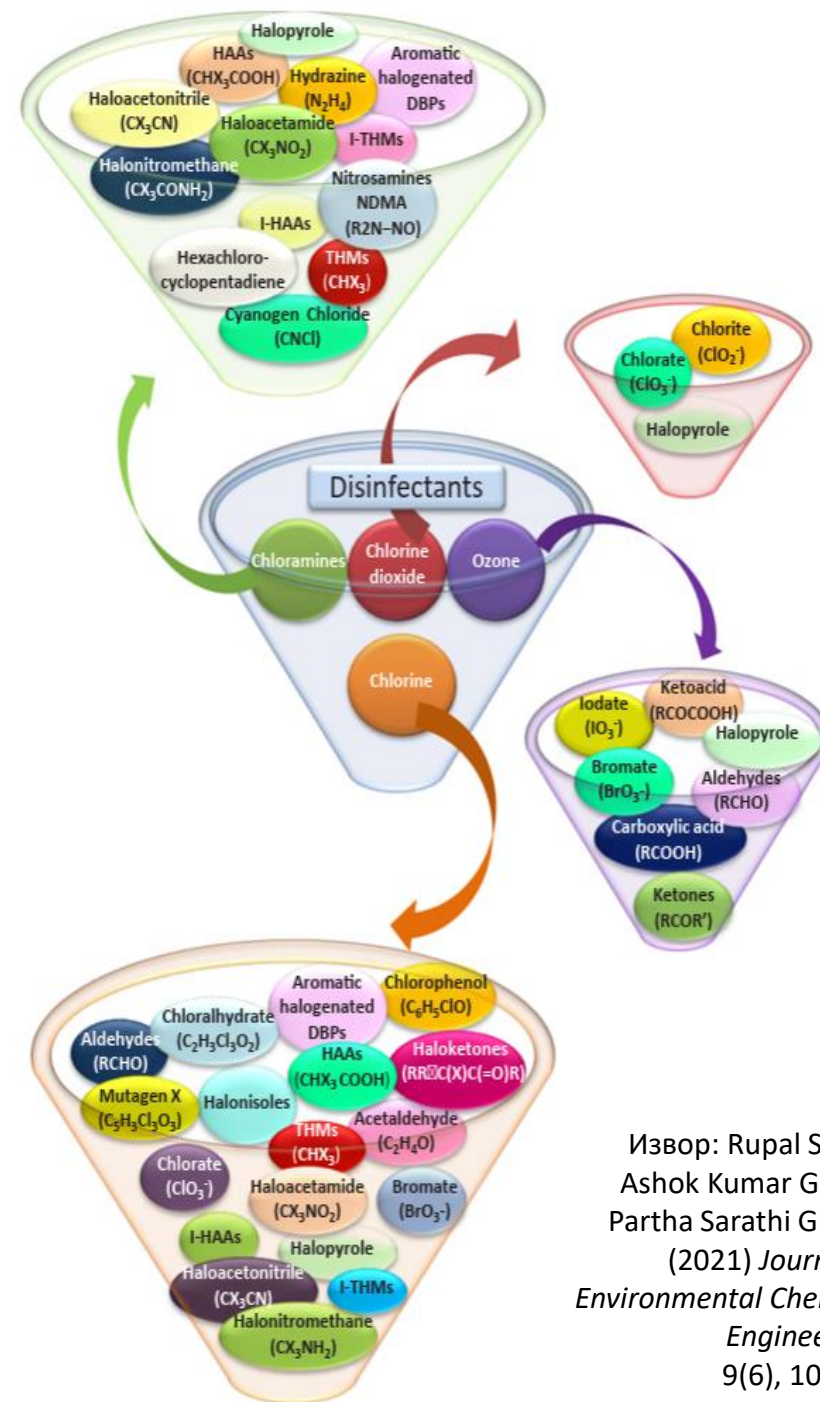
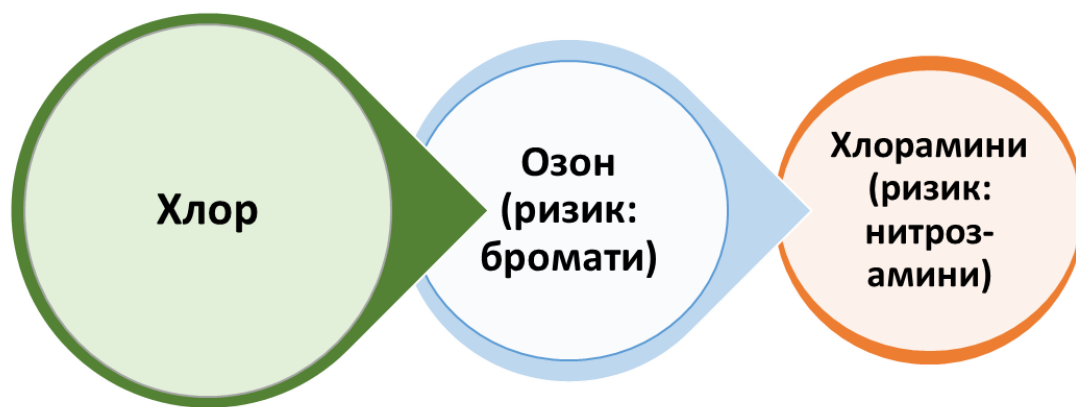
- Количина и карактер ПОМ
- Бромиди и јодиди (бромовани/јодивани DBP често токсичнији).



Извор: Mayer, B.K., Ryan, D.R. (2017) Impact on Disinfection Byproducts Using Advanced Oxidation Processes for Drinking Water Treatment. In: Gil, A., Galeano, L., Vicente, M. (eds) Applications of Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Drinking Water Treatment. The Handbook of Environmental Chemistry, 67. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/698_2017_82

Фактори који утичу на формирање DBP

- **Избор дезинфекционог средства и доза:**
 - Хлор - највећи потенцијал за формирање DBP
 - Озон - ризик од бромата
 - Хлорамини - нижи THM, формирање нитрозамина
 - UV - нема DBP, нема резидуално деловање

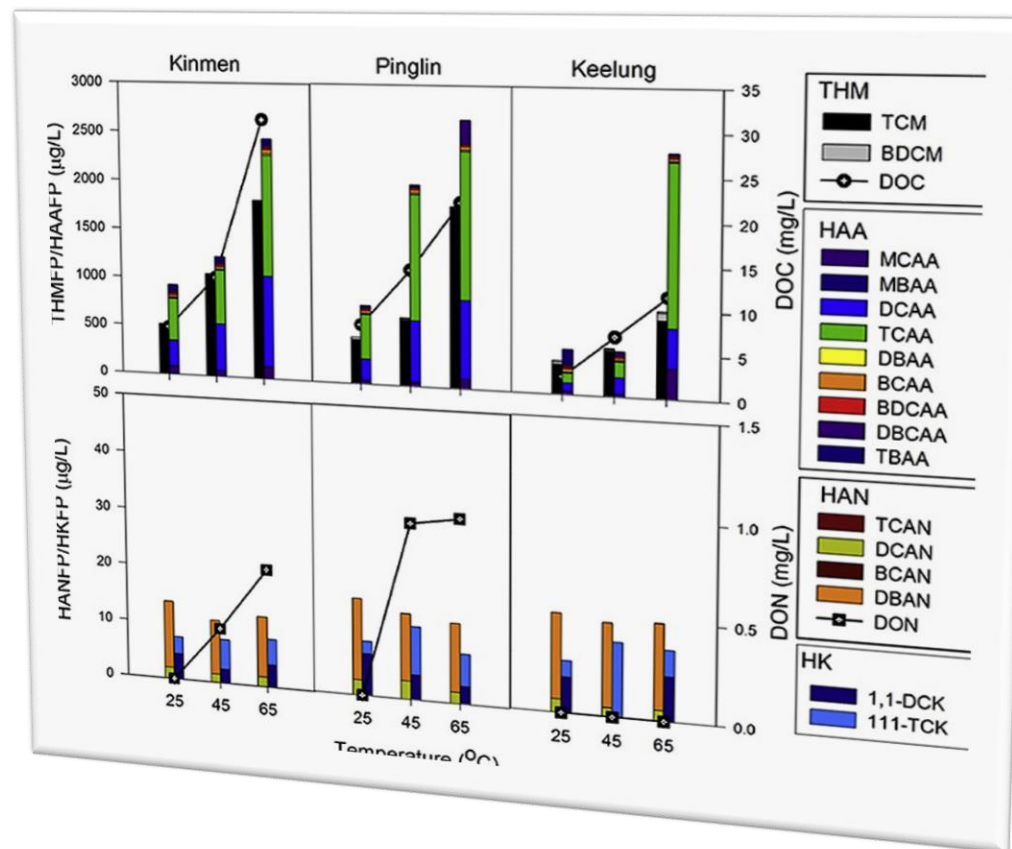
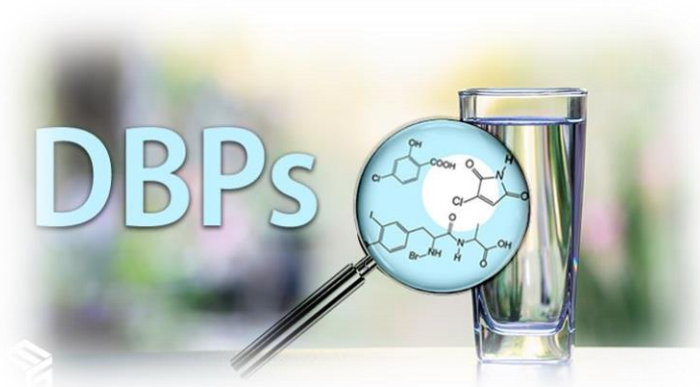


Извор: Rupal Sinha,
Ashok Kumar Gupta,
Partha Sarathi Ghosal
(2021) *Journal of
Environmental Chemical
Engineering*,
9(6), 106511

Фактори који утичу на формирање DBP

- Оперативни услови:

- Повећан pH → фаворизује формирање THM
- Повећана T → убрзава реакциону кинетику
- Време контакта и услови складиштења → дужа „старост воде“ = више DBP



Извор: Chia-Jung Chang, Chin-Pao Huang, Chia-Yang Chen, Gen-Shuh Wang (2020) Assessing the potential effect of extreme weather on water quality and disinfection by-product formation using laboratory simulation, Water Research, 170, 115296. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115296>

Стратегије оптимизације третмана воде

- **Уклањање ПОМ – уклањање прекурсора**

- Фокус је на предтретману
- Смањење садржаја ПОМ пре дезинфекције директно смањује формирање DBP.
- СЗО предлаже оптимизовано уклањање ПОМ као начин да се смањи раст биофилма у дистрибуционом систему.

- **Одабир дезинфекционог средства и припрема воде за дезинфекцију**

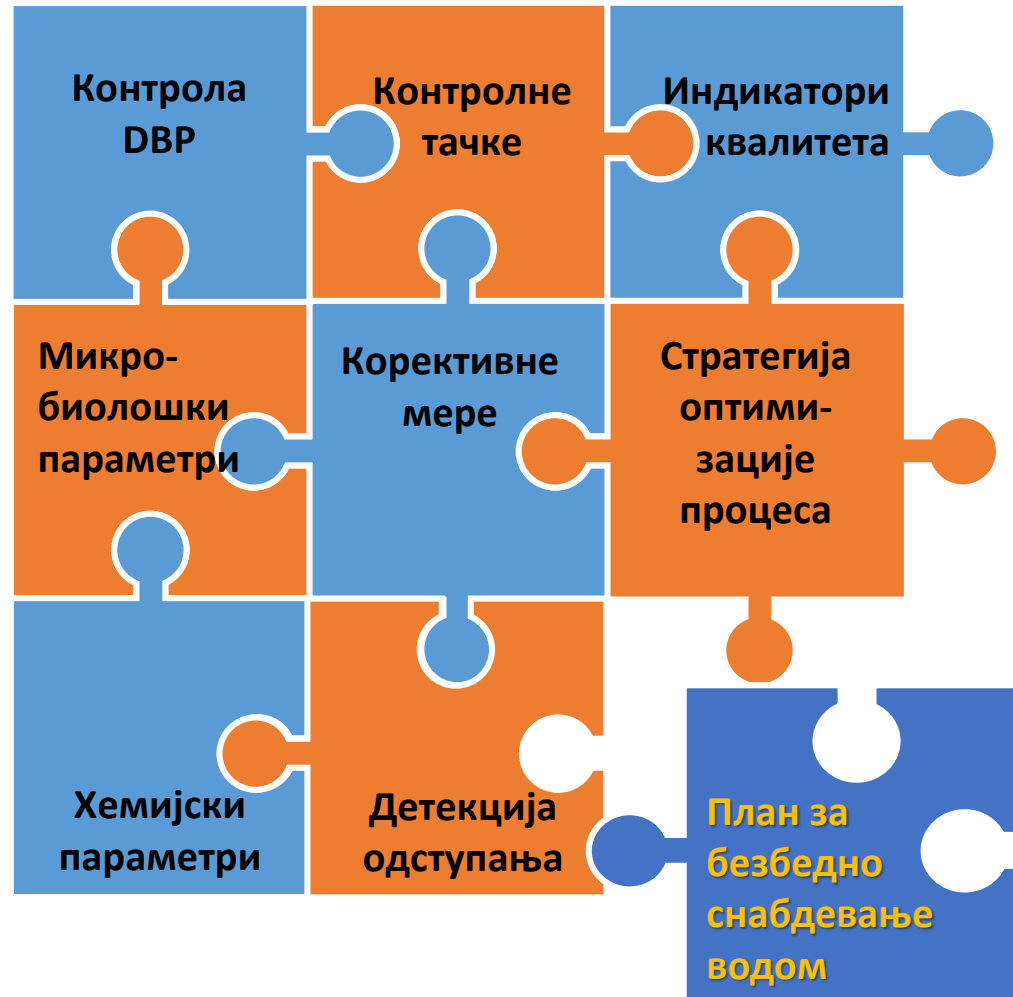
- Квалитет воде у третману треба да је такав да је дезинфекција ефикасна, а стварање DBP минимално.

- **Превенција и смањење ризика**

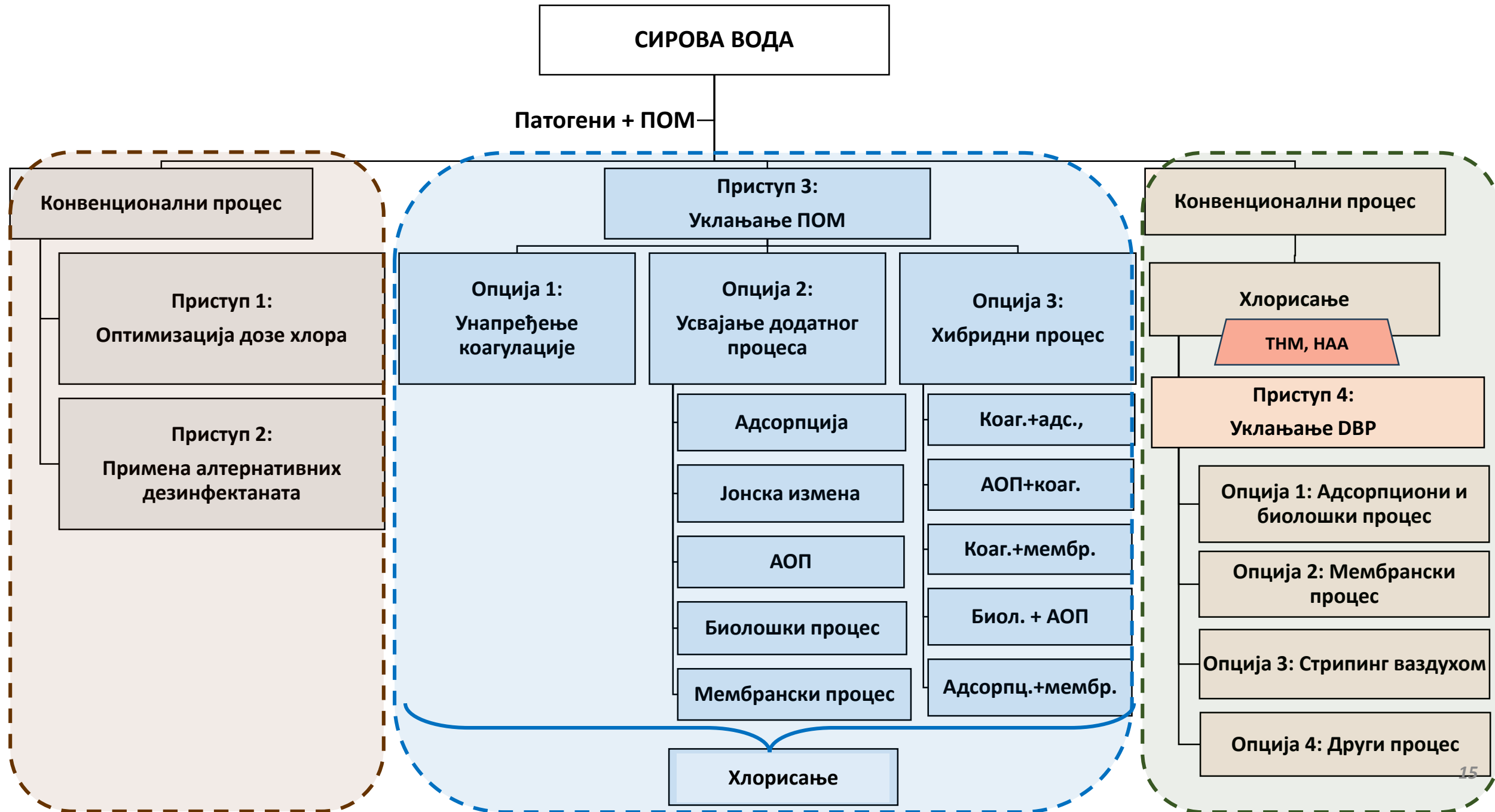
- препознавање и контрола потенцијалних опасности пре него што постану проблем, укључујући микробиолошке патогене и хемијске нуспродукте - минимизација формирања DBP пре него што вода дође до фазе дезинфекције

**СТРАТЕШКИ КОРАК У
СИСТЕМИМА БАЗИРАНИМ НА
WSP ПРИСТУПУ**

План за безбедно снабдевање водом - проактивни систем управљања ризицима од извора, преко третмана, до дистрибуције и крајњег потрошача



- ✓ Омогућава праћење и контролу фактора који утичу на настанак DBP
- ✓ Укључује стратегије оптимизације
- ✓ Дефинише контролне тачке и индикаторе за континуирано праћење квалитета воде
- ✓ Омогућава брзо препознавање одступања и имплементацију корективних мера
- ✓ Помаже у усклађивању са регулаторним стандардима за микробиолошке и хемијске параметре



Ефикасности уклањања ПОМ у лабораторијским истраживањима

Третман	Проценат уклањања (средња вредност)			
	DOC	UV ₂₅₄	Прекурсори ТНМ	Прекурсори НАА
Коагулација са $Al_2(SO_4)_3$	26–70 (54)	34–85 (69)	48–83 (70)	48–93 (79)
Коагулација са $FeCl_3$	13–74 (53)	30–88 (68)	44–90 (72)	69–97 (81)
Јонска измена-коагулација	42–76 (59)	47–96 (79)	27–88 (70)	52–80 (67)
	39–75 (63)	47–90 (77)	50–92 (76)	61–97 (84)
Коагулација ($Al_2(SO_4)_3$) –PAC	58–86 (77)	57–96 (88)	73–93 (85)	91–99 (96)
Коагулација ($Al_2(SO_4)_3$) – озонизација	16–34 (23)	49–69 (61)	47–58 (51)	60–81 (71)
	21–69 (54)	55–93 (82)	59–90 (78)	48–97 (80)
Нанофилтрација	86–93 (90)	89–99 (96)	66–98 (87)	67–99 (87)
	77–89 (84)	79–93 (87)	75–98 (89)	88–100 (97)
Озонизација	8–16 (12)	28–77 (58)	0–43 (14)	-50 to 20 (4)
Озонизација–UV	17–56 (33)	90–94 (92)	48–89 (67)	

Извор: Guidelines for Canadian Drinking Water Quality: Guidance on Natural Organic Matter in Drinking Water (2020), доступно на: <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/reports-publications/water-quality.html>

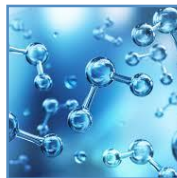
Свака стратегија третмана мора бити прилагођена специфичностима локације и карактеристикама сирове воде.

Стратегије оптимизације третмана и дистрибуције воде за пиће



ТРЕТМАН

- **Оптимизована/унапређена коагулација** - побољшано уклањање ПОМ
- **Активни угаљ (GAC, PAC)** – ефикасан у уклањању прекурсора THM и HAA.
- **Биофилтрација** – биодеградација органских прекурсора
- **Јонска измена**
- **Мембрански процеси (NF, RO)** - висока ефикасност уклањања, али скуп процес.
- **Унапређени оксидациони процеси (UV/H_2O_2 , O_3/H_2O_2)**



ДЕЗИНФЕКЦИЈА

- **Ниска доза хлора** са довољним СТ.
- **Секвенцијална дезинфекција** - озон/UV (инактивација патогена) + ниска доза хлора за обезбеђење резидуалног деловања.
- **Алтернативна дезинфекциона средства** - хлорамини, хлор диоксид (специфично за локацију).



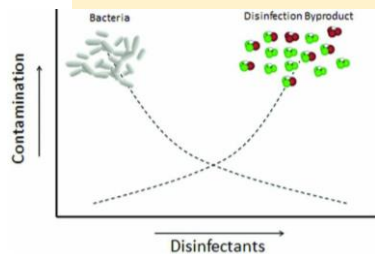
ДИСТРИБУЦИОНИ СИСТЕМ

- **Краће време задржавања** (хидрауличка оптимизација)
- **Одржавање резидуала** дезинфекционог средства у безбедном опсегу
- **Редовно испирање** резервоара и дистрибуционе мреже

Изазови и ограничења

Компромис

микро-
биолошка
безбедност
vs
хемијска
безбедност



Трошкови и енергетски захтеви

напредне
технологије су
често скупе и
енергетски
веома захтевне
за примену на
великим
постројењима



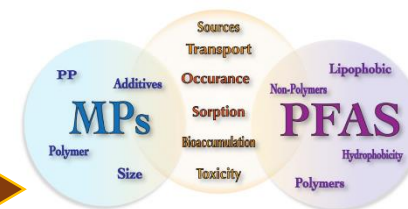
Утицај климатских промена

повећање
садржаја ПОМ
у води,
цветање алги



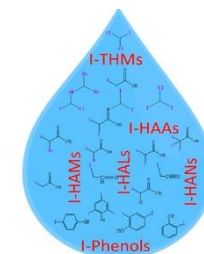
Нови контаминанти

PFAS,
фармацеутски
производи,
микропластика
- нису циљеви
оптимизације
усмерене на
контролу DBP

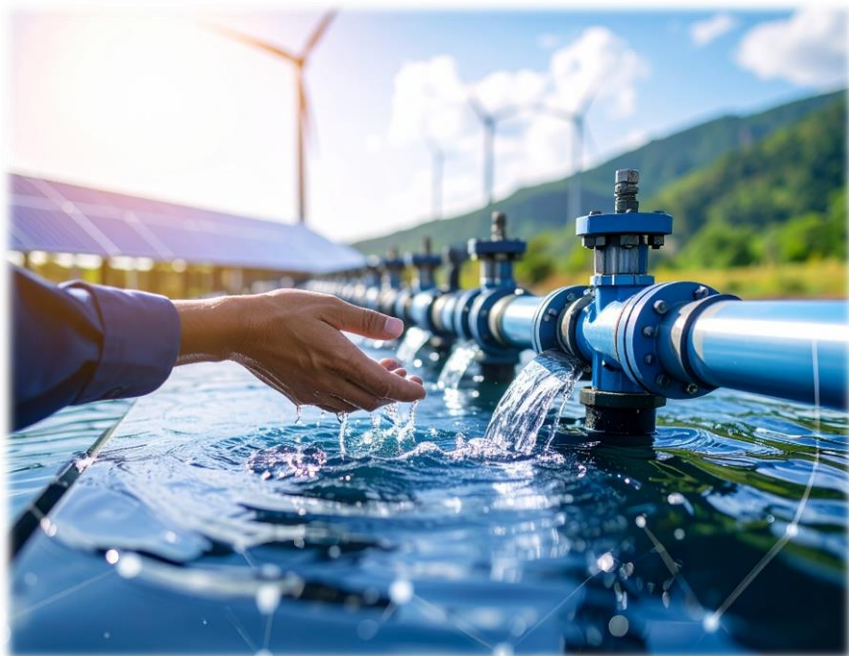


Регулаторне празнине

јодовани DBP и
нитрозамини су
токсични, али
још увек нису
регулисани у
многим
земљама.



Могући правци развоја



- **Мониторинг у реалном времену**
 - сензори за ПОМ
 - онлајн анализатори нуспроизвода дезинфекције
 - онлајн праћење резидуала дезинфекционог средства.
- **Вештачка интелигенција и предиктивно моделирање**
 - оптимизација дозирања коагуланта
 - процена потрошње хлора
 - предвиђање формирања DBP
- **Фокус на одрживост**
 - технике са ниском потрошњом енергије
 - смањена употреба хемикалија (AOP, биофилтрација)
- **Холистичка процена**
 - анализа животног циклуса (LCA) за оцену економских и еколошких утицаја.

ЗАКЉУЧАК

- **Ефективан третман воде за пиће** - предуслов за обезбеђење хемијског и микробиолошког квалитета воде уз испуњавање регулаторних захтева (укључујући ДБП).
- **Алати за оптимизацију процеса третмана** - уклањање прекурсора, пажљиво одабрана стратегија дезинфекције, управљање дистрибуционим системом
- **Не постоји универзално решење** одн., стратегије морају бити прилагођене локалном квалитету сирове воде, условима водоснабдевања и регулаторним захтевима.
- **Праћење и верификација перформаци процеса** третмана кроз пажљиво пројектован мониторинг програм - учесталост заснована на варијабилности извора и/или критичности појединих процеса третмана.
- **Могућности за унапређењем** - мониторинг квалитета воде у реалном времену, одржива технолошка решења и превентивно управљање ризиком кроз имплементацију Плана за безбедно снабдевање водом за пиће.



ХВАЛА НА ПАЖЊИ!

