СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“
ФАКУЛТЕТ ПО ХИМИЯ И ФАРМАЦИЯ
КАТЕДРА „АНАЛИТИЧНА ХИМИЯ“

Иван Русанов Бенков

ЕКОМЕТРИЧНА ОЦЕНКА НА КАЧЕСТВОТО НА ПОВЪРХНОСТНИ И ОТПАДЪЧНИ ВОДИ С ПОМОЩТА НА ИНДЕКС ЗА КАЧЕСТВО НА ВОДИТЕ (WQI)

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за присъждане на образователна и научна степен
ДОКТОР

Професионално направление: 4.2. Химични науки
Научна специалност: Аналитична химия

Научен консултант:
проф. д-р Стефан Цаковски

София, 2025 г.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Дисертационният труд е в обем от 78 страници. В него са включени 16 таблици, 19 фигури и 20 уравнения. Цитирани са 89 литературни източници.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от катедрен съвет на катедра „Аналитична химия“ на Факултет по химия и фармация на Софийски университет „Св. Климент Охридски“, състоял се на 06.12.2024 г.

Дисертантът е бил докторант на самостоятелна подготовка в катедра „Аналитична химия“ на Факултет по химия и фармация на Софийски университет „Св. Климент Охридски“.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на _ . _ 2025 г. от _ ._ часа в …….. зала на Факултета по химия и фармация на СУ „Св. Климент Охридски”. Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултета по химия и фармация на СУ „Св. Климент Охридски”.

СЪДЪРЖАНИЕ

I. УВОД 4

II. АКТУАЛНОСТ И СЪСТОЯНИЕ НА ИНТЕГРАЛНАТА ОЦЕНКА НА ВОДИТЕ 5

III. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД 8

IV. ИЗПОЛЗВАНИ МЕТОДИ 9

IV.1. Индекс за качество на водата (Water Quality Index-WQI)…….. 9

IV.1.1. Хронология и кратка характеристика на WQI модели…… 9

IV.1.2. Основна структура на WQI моделите. Оценъчни скали…… 10

IV.1.3. Преимущества и недостатъци на WQI моделите ……. 13

IV.1.4. Използвани WQI модели за целите на изследването в настоящия труд …14

IV.1.4.1.“Канадски“ индекс за качество на водата (CCME WQI) …… 14

IV.1.4.2. Индекс за качество на отпадъчни води (Wastewater Quality Index - WWQI) ……..……. 17

IV.2. Екометрични методи. Анализ на главни компоненти (АГК) …… 18

V. ОЦЕНКА НА ОБЕКТИ ОТ ОКОЛНАТА СРЕДА 21

V. 1. Оценка на качеството на повърхностни води от водосбора на река Струма чрез CCME WQI и Анализ на главни компоненти…….. 21

V. 1.1. Общи сведения за басейна на р. Струма ……..…… 21

V. 1.2. Пробовземане и химичен анализ ……. 21

V. 1.3. Резултати и дискусия 22

V. 1.4. Изводи 31

V.2. Оценка на качеството на пречистени отпадъчни води от ПСОВ чрез WWQI модел …….. 32

V.2.1. Пробовземане, физикохимичен анализ и получени данни…… 32

V.2.2. Изчисляване на WWQI …….. 35

V.2.3. Резултати и дискусия …… 37

V.2.4. Изводи …….. 41

VI. ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД …… 42

VI. ПУБЛИКАЦИИ, ВКЛЮЧЕНИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД 43

ИЗПОЛЗВАНИ СЪКРАЩЕНИЯ В ТЕКСТА

АГК - Анализ на главни компоненти

БПК – Биохимична потребност от кислород

ГИС - Географски информационни системи

ДА - Дискриминативен анализ

КА - Клъстерен анализ

МДК - Максимално допустима концентрация

ПДК - Пределно допустима концентрация

ПДС - Пределно допустима стойност

ПСОВ – Пречиствателни станции за отпадъчни води

СЗО – Световна здравна организация

СГС - Средногодишна стойност

CCME - Canadian Council of Ministers of the Environment

COD - Chemical oxygen demand

TN - Total nitrogen

TP - Total phosphorus

TSS - Total suspended solids

WQI - Water Quality Index

WWQI - Wastewater Quality Index

I. УВОД

Водата е природно богатство и компонент на околната среда с изключително важно значение за живота. Тя е сред най-разпространените химични съединения на нашата планета и е с почти неограничен брой функции. От всички природни ресурси водата е най-значимия и ценен ресурс. От хилядолетия достъпът до чиста вода, използвана в бита, има фундаментално значение за живота на хората и общественото здраве. Първоначално интересът на човечеството е бил насочен основно към нейното количество, а по-късно и към нейното качество. Макар водата да е класифицирана като възобновим ресурс, нейното естествено възстановяване е бавно и трудно.

Използването на водите за различни нужди води до влошаване на техните качества, което оказва неблагоприятни въздействия върху флората, фауната и човешкото здраве. Основната причина за това е връщане (заустване) на големи количества (до 80 %) непречистени битови и промишлени отпадъчни води в околната среда, както и неефективно пречистени води в Пречиствателни станции за отпадъчни води (ПСОВ). Основните замърсители на водата имат физичен, химичен или биологичен характер. Въздействията на замърсителите върху водните системи може да се оцени като се проследи промяната на някои основни параметри, характеризиращи качествата на водите - физикохимични, специфични замърсители, приоритетни вещества, микробиологични показатели и др.

Качеството на водата във водосбора на реките може да бъде повлияно от много природни и антропогенни фактори, което води до промени в режима на водния отток и в качеството на повърхностните води поради изпускане на замърсители на определени места (точкови източници), най-често ПСОВ или чрез повърхностни/подпочвени потоци (неточкови източници). Допълнително отрицателно въздействие могат да окажат непреки фактори, като атмосферни валежи, нерационално земеползване и изменения на климата. Промяната на физични, химични и биологични параметри за качество на повърхностните води се дължи и на естествени процеси като изветряне на скалите, оттичане, йонообмен, които също имат значение за качеството на повърхностните води.

За да могат да се открият тенденции на изменения в качеството на водите те трябва да се наблюдават в относително дълъг период от време. Същевременно влошаване на качеството не следва да се допуска, защото това рефлектира върху околната среда, човешкото здраве, стопанския и обществения живот.

II. АКТУАЛНОСТ И СЪСТОЯНИЕ НА ИНТЕГРАЛНАТА ОЦЕНКА НА ВОДИТЕ

Високите темпове на индустриализация и урбанизация през последните два века нанесоха сериозни негативни промени в околната среда (въздух, води, почви) и биоразнообразието. Отражението на проблема в световен мащаб инициира в началото на 21. век прилагане на съответните законодателни и регулаторни механизми за управление на природните ресурси. Директива 2000/60/ЕО на Европейския парламент и на Съвета, регламентираща правната рамка за действие на Общността в областта на политиката за водите, цели подобряване управлението и използването на природните ресурси, от една страна и намаляване антропогенното замърсяване, от друга.

За да се постигне тази цел, отговорните заинтересовани страни трябва да изпълняват подходящи програми за мониторинг, включващи всички необходими параметри, за да се идентифицират естествените и антропогенни процеси, контролиращи качеството на водата. Мониторингът, провеждан от органите, отговорни за опазването на околната среда, генерира големи и сложни по състав бази данни, характеризиращи качеството на водата. Това включва определянето на много показатели за качество на водата в голям брой пробовземателни пунктове, разположени в различни видове повърхностни и подземни водни тела през различни сезони.

Законодателството в областта на качеството на водата е широкообхватно. Директива 91/271/ЕИО регламентира изискванията относно събирането, пречистването и заустването на градски и промишлени отпадъчни води от ПСОВ. С Директива 2013/39/ЕС се определят стандарти за качество на околната среда за 45 приоритетни вещества, в това число Hg, Cd, Ni и Pb и техни съединения в повърхностни водни тела. Максимално допустимите концентрации за най-често срещаните физикохимични параметри в повърхностните води са определени в националната Наредба Н-4 от 2012 г. за характеризиране на повърхностните води. Приложението на всеобхватната законодателна уредба е предпоставка и гаранция, че пречистените води няма да влияят отрицателно на приемащите водни тела.

ПСОВ подобряват значително качеството на заустваната в приемащите водни тела вода. Въпреки това пречистените отпадъчни води все още съдържат сложна смес от органични и неорганични замърсители, суспендирани твърди вещества, хранителни вещества, бактерии, микроорганизми, чието въздействие върху околната среда и човека може да е неизвестно. Действайки като точкови източници на замърсяване, ПСОВ могат да влошат водния състав на приемащите повърхностни водни тела.

Управлението на водите в България се реализира на национално и басейново ниво. С него се цели опазване на водите и свързаните с тях екосистеми като общо наследство, постигане и запазване на добро им състояние и насърчаване на тяхното устойчиво използване. Управлението на водите в повърхностните и на подземните водни тела е многокомпонентен процес, включващ превенция, мониторинг, контрол и коригиращи действия. Оценката на тяхното състояние изисква събиране, обработка и анализ на големи масиви от мониторингови данни.

Определяне на натиска от човешката дейност върху водните тела, идентификацията на причиняващите го фактори и цялостната оценка на тяхното екологично състояние е сложен процес на изследване на огромен набор от биологични, хидроморфологични и физикохимични елементи за качеството. Този многопараметричен подход на оценка на качеството на водите не дава една единна обща крайна стойностна оценка - число, което да е обобщаващ измерител на състоянието на водите.

Поради посочените недостатъци през последните 60 години все по-често изследователи разработват и прилагат методология, която позволява изчисляване на индекс, който е интегрална характеристика и измерител на качеството на водите. Концепцията „Индекс за качеството на водата (Water quality index -WQI)“ е въведена първоначално в Германия и оттогава са разработени многобройни WQI, като WQI на Националната санитарна фондация (The National Sanitation Foundation Water Quality Index - NSFWQI) и Орегон WQI (OWQI) . Те се прилагат в много региони на света. Към днешна дата са познати и приложени десетки модела на индекси за качеството на водата. В научната литература са публикувани и сравнителни анализи на различните модификации на WQI .

Индексът за качеството на водата, разработен от Канадския съвет на министрите на околната среда (*Canadian Council of Ministers of the Environment* - CCME WQI), е предпочитан инструмент за управление на водните ресурси, тъй като оценява качеството на повърхностни води на определено място и в определено време с една стойност, като се вземат предвид приетите прагови стойности на показателите за качество на водата. Този начин на представяне е удобен и за оценка на временни промени в качеството на повърхностните води чрез комбиниране на WQI с Mann–Kendall тест или с други техники за анализ на времеви серии. CCME WQI в момента е един от най-широко използваните индекси за качество на водите не само във всички провинции на Канада, но и в много други страни. Той е един от основните препоръчани индекси за оценка на

качеството на питейна вода от Програмата на ООН за околната среда (*United Nations Environment Programme*).

За разкриване на структурата на набора от мониторингови данни и извличане на знания относно качеството на повърхностните води, към WQI много изследователи използват и различни многовариационни статистически методи. Клъстерният анализ (КА) се използва за откриване на групи на подобие между пробовземателните пунктове и/или параметри за качество на водата. Анализът на главните компоненти (АГК) се използва за разкриване на „скритите“ фактори, контролиращи качеството на повърхностните води. В многобройни изследвания се използват както КА, така и АГК в допълнение към WQI, за да се съпоставят и допълнят резултатите от двете техники за оценка на качеството на водата. За изясняване времевата динамика на показателите за качество на водата в региони с изразена сезонност е приложим дискриминантен анализ (ДА). Когато схемата за мониторинг включва проучвания на много дълъг период за оценка на риска за качеството на водата, се използват модели за прогнозиране.

Значението на екологичните изследвания, провеждани с цел определяне на влиянието и оценка на въздействието на различни замърсявания върху обекти от околната среда, и респективно върху човешкото здраве, нараства непрекъснато в глобален мащаб. Тази тенденция е съпътствана от натрупването на знания за значимостта на тези ефекти и необходимостта от тяхното обективно оценяване. Част от актуалните проблеми, свързани с опазване на водите от антропогенно въздействие, са изследвани в настоящия дисертационния труд.

В **първата част** на дисертационния труд е извършена оценка на качеството на водите във водосбора на река Струма, България, чрез използване на канадския модел на индекс за качество на водата (CCME WQI) и АГК. Изследването е извършено чрез използване на данни от задължителния мониторинг на качеството на водите (2010–2021 г.) от водосбора на р. Струма, България, събрани от 30 пробовземателни станции.

Във **втората част** на дисертационния труд е разработена и приложена методология за определяне на Индекс за качество на отпадъчни води (WWQI) за оценка качеството на пречистени в ПСОВ отпадъчни води, при осъществен оперативен мониторинг. За оценяване състоянието на пречистените води е използван набор от физикохимични параметри, специфични замърсители, приоритетни вещества и общи показатели за качество на отпадъчните води, като са приложени три варианта за определяне теглата на параметрите.

.

III. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Целта на настоящия дисертационен труд е да се разработи и представи хибриден подход за оценка на качеството на повърхностни и отпадъчни води, включващ индекса за качество на водите и многовариационни статистически методи. Предложеният подход е необходим както да идентифицира природни и антропогенни фактори, контролиращи качеството на повърхностните води, така и да предостави информация за предприетите мерки за подобряване на тяхното качество.

Получените резултати могат да се използват от органите за управление на водите (Басейнови дирекции) за предприемане на мерки за опазване, прекратяване или ограничаване на въвеждането на замърсители във водите, предотвратяване влошаването на качеството на повърхностните води, както и неговото поддържане.

За изпълнение на поставената цел са определени следните конкретни задачи:

1. Да се направи оценка на качеството на води от водосбора на река Струма, България от данните на физикохимичния мониторинг в рамките на действащата в Европейския съюз Рамковата директива за водите (РДВ) и националната нормативна уредба, чрез използване на комбинация между CCME WQI, анализ на времеви серии и анализ на главните компоненти.

2. Да се направи оценка на качеството на пречистени отпадъчни води от ПСОВ чрез използване на индекс за качество на отпадъчни води (Wastewater Quality Index - WWQI) при осъществен оперативен мониторинг, като се приложат три варианта за определяне относителните тегла на изследваните параметри:

-с еднакви относителни тегла;

-с относителни тегла определени чрез експертна преценка;

-с относителни тегла, определени от факторните натоварвания на АГК.

IV.ИЗПОЛЗВАНИ МЕТОДИ

IV.1. Индекс за качество на водата (Water Quality Index-WQI)

IV.1.1. Хронология и кратка характеристика на WQI моделите

Първите оценки на качеството на водата са правени в Германия към средата на XIX век на базата на наличието, респективно-отсъствието на определени видове организми. В последствие и в други европейски държави се класифицират водните тела според степента им на замърсяване без да се използват числови стойности или оценъчни скали. Макар че изследователите днес разполагат с огромен набор от научно изведени и нормативно регламентирани стандарти, цялостната оценка на качеството на водите и съпоставянето на води от различни източници, на база на нормирани ПДК на голям набор от параметри, е трудоемка и сложна задача. Концептуално, решаването на този проблем изисква агрегиране на числени стойности на определен набор от параметри, характеризиращи водата, в една единствена стойност-индекс.

Моделът на индекса за качеството на водата (WQI) е удобен инструмент за оценка на качеството на водите. Той използва агрегирани в една стойност (индекс) отделни компоненти или субиндекси, изведени чрез преобразуване на голям набор от данни за параметри, характеризиращи качеството на водата. WQI се дефинира като рейтинг на състоянието на водите, който отразява комбинираното влияние на различни параметри.

Пръв от съвременните модели е разработеният в САЩ през 60-те години на XX век от Хортън WQI модел (Horton`s Index). Авторът залага на три критерия при определяне на броя и вида на използваните параметри: ограничаване на броя на изследваните променливи; променливите да са значими в повечето водни тела; включване на тези променливи, за които има достатъчни и надеждни данни. Моделът се базира на 10 параметъра за качество на водата, считани за значими в повечето водни тела. Стойностно индексът се изчислява като отношение между сумата на подиндексите I_i умножени по техните тегла W_i към сумата на техните тегла и умножени по два коефициента M_1 и M_2 , които отразяват температурата и очевидното замърсяване.

$$\mathrm{QI} = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_i \cdot I_i}{\sum_{i=1}^{n} W_i} . M_1 . M_2 \qquad \text{(IV.1)}$$

На базата на Хортъновия WQI модел, Браун с подкрепата на Националната санитарна фондация (National Sanitation Foundation-NSF) създава NSF-Index (1965, САЩ). Тази модификация става основа за появата на три производни на нея версии- Dinius Index (1972, САЩ), Oregon Index (1980, щата Орегон и Северна Америка, САЩ)

и индонезийския West Java Index (2017), който към днешна дата е последния WQI модел и е все още с ограничено приложение.

През 1973 г. шотландският отдел за научноизследователско развитие създава друга версия на WQI (*Scottish Research Development Department* SRDD-WQI), която до известна степен е заимствана от Модела на Браун и приложена при оценка качеството на речни води. Bascaron Index (1979, Испания), House Index (1986, Великобритания) и Dalmatian Index (1999, Хърватия) са по-късни производни на SRDD-WQI.

IV.1.2. Основна структура на WQI моделите. Оценъчни скали.

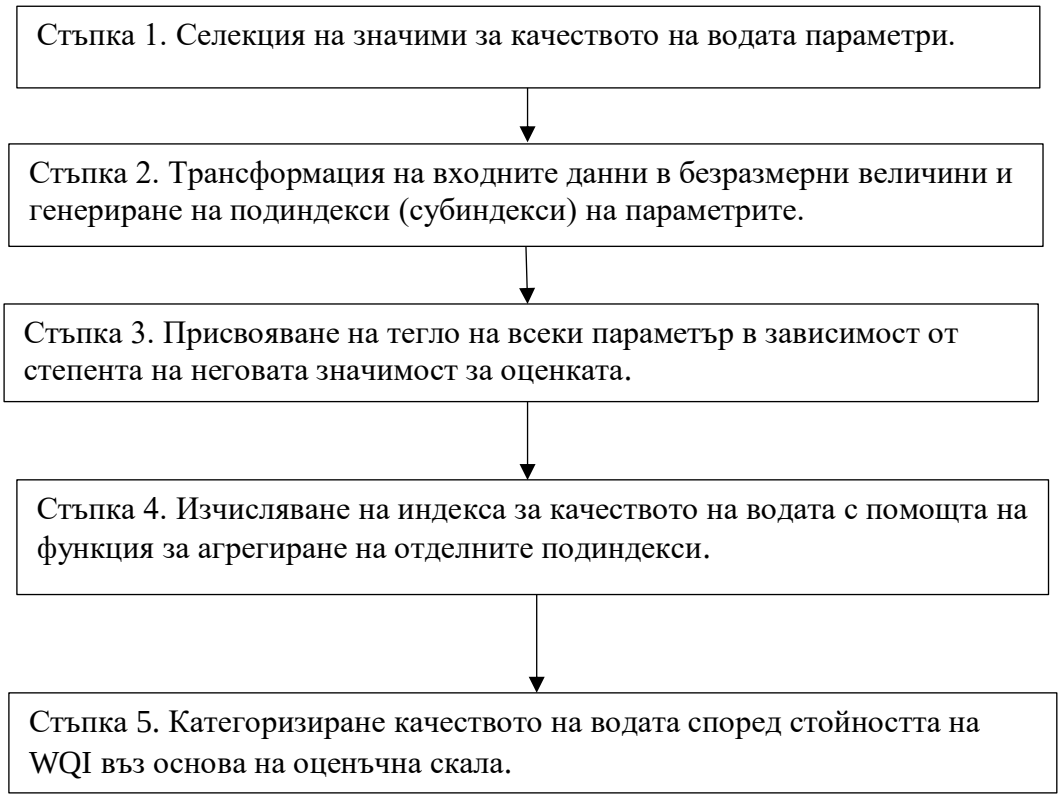
През последните пет-шест десетилетия броят на разработените WQI модели нараства. Понастоящем в различни държави и/или агенции, извършващи оценка на качеството на води (повърхностни, подземни, морски) се прилагат повече от 35 WQI модела. В свое изследване, Udin и съавтори, сред 110 научни публикации (1960-2019 г.), идентифицират 21 най-често използвани модела на WQI, от които 7 са доминиращи. В почти половината изследвания са приложени два WQI модели - CCME WQI и NSF. Всички варианти на моделите са подходящи за оценка състоянието на водите в различни типове водни тела, но в над 80% от изследванията те са приложени спрямо речни водосборни басейни.

Независимо от вариациите на WQI моделите, тяхната структура е сходна. Алгоритъмът на повечето от тях включва пет основни елемента (стъпки), за определяне на крайната стойност на индекса и категоризиране качеството на водите (*Фиг.1*).

Стъпка 1. Селекция на значими за качеството на водата параметри

В зависимост от целите на изследването, предназначението на водите от дадено водно тяло, резултати от мониторинг, както и в зависимост от нормативно въведените стандарти (референтни стойности) изследователят избира няколко параметъра, които оказват най-значим екологичен и здравен ефект. Важен фактор при подбора на параметрите е и експертния опит и преценката на специалисти.

В най-използваните WQI модели броят на изследваните параметри варира значително, като най-малък (4-5 параметъра) е техния брой за моделите *CCME*, *Ross Index* и *Said Index* и достига до 26 параметъра за моделите *Bascaron Index* и *Dojildo Index (1994)*. В повечето случаи анализираните променливи се ограничават до оптималните 10-11 броя. Физикохимичните параметри са основни във всички модели. Освен тях в някои модели са включени и допълнителни параметри-биологични, хранителни вещества, токсични вещества, пестициди, тежки метали и др.



Фиг. 1. Алгоритъм на WQI моделите.

Стъпка 2. Включва трансформация на входните данни в безразмерни величини и генериране на подиндекси на параметрите.

Тъй като входните данни (параметрите) се измерват в различни скали, чрез прилагане на различни статистически подходи те се превръщат в безразмерни нормално разпределени величини. В някои модели изчисляването на подиндекси е относително опростено, а при други е твърде сложно. Правилата за определяне на подиндексите се основават главно на експертно мнение, както и на национални, регионални или международни (СЗО, Рамковата директива на ЕС за водите) стандарти за стойностите на параметрите, характеризиращи качеството на водите.

При моделите Horton Index, Said Index и други подиндексирането се състои в присвояване на стойността на параметъра за стойност на подиндекса (субиндекса). При значителна част от моделите стойността на подиндекса се изчислява като отношение между измерената стойност на параметъра и максимално допустимата (по стандарт) стойност по формулата:

$$\mathrm{SI}_i = \frac{Pc_i}{Mpl_i} \qquad \text{(IV.2)}$$

където : SI_i е субиндекс за i-тия параметър, Pc_i-измерената му стойност, а Mpl_i-максимално допустимата стойност на i-тия параметър.

Стъпка 3. Присвояване на стойностите на тежестта (тегло) на всеки параметър (W_i) в зависимост от степента на тяхната значимост за оценката е важен елемент от цялостното изследване.

Чрез този похват се придава по-голямо относително значение и диференциране влиянието на отделните параметри върху крайната стойност на WQI. При значителна част от моделите (NSF, SRDD, House и др.) стойностите на теглата се определят на база експертна оценка (експертно мнение), основана на екологичното значение на даден параметър, препоръчителни/референтни стойности, предназначението и употребата на водите от изследвания обект. При други модели (CCME, Smith и Dojildo) всички параметри са с еднаква тежест. Обикновено теглата са коефициенти (дробни числа), чиято сумата е единица.

Стъпка 4. Изчисляване на индекса на качеството на водата с помощта на функция за агрегиране на отделните подиндекси е предпоследният елемент в аргоритъма, който води до определяне на крайния WQI. В повечето модели се прилага една от двете групи математически функции - адитивни и мултипликативни, а в някои модели и двете. Съществуват и модели, използващи специфични функции. Простата адитивна функция, обикновено е във вида:

$$WQI = \sum_{i=1}^{n} SI_i \,.\, W_i \qquad \text{(IV.3)},$$

където: WQI е общата (крайната) стойност на индекса, SI_i-стойността на субиндекса за i-тия параметър, W_i- теглото на i-тия параметър и n-броя на включените параметри. При мултипликативното агрегиране се прилагат формули от вида:

$$WQI = \prod_{i=1}^{n} SI_i^{W_i} \qquad \text{(IV.4)}$$

където WQI е общата (крайната) стойност на индекса, SI_i-стойността на субиндекса за i-тия параметър, W_i- теглото на i-тия параметър и n-броя на включените параметри.

Стъпка 5. Категоризиране качеството на водата според стойността на WQI въз основа на оценъчна скала.

Числените стойности на получените индекси позволяват да се направи качествена оценка и категоризиране на водите: „отлично“, „много добро“, „добро“, „умерено“, „замърсено“, „силно замърсено“ и т. н. състояние. Използват се два вида оценъчни скали. При единия вид стойностите на индекса нарастват паралелно с нарастване на степента на замърсяване, а при другия вид, който е доминиращ, стойностите на индекса намаляват с нарастване на степента на замърсяване.

В повечето индексни модели стойностите на WQI са в диапазона 0-100 единици. Окачествяването на водите е в зависимост от интервалната числена скала, която най-често е пет степента.

Паралелно с оценката на качеството на водите, някои автори използват и цветно обозначаване на нивата на замърсеност на водните тела, респективно тяхното състояние: червено, оранжево, жълто, зелено и синьо. Червеният цвят символизира най-висока степен на замърсеност (very bad), а синият-отлично (excellent) състояние.

IV.1.3. Преимущества и недостатъци на WQI моделите

Преимущества на WQI моделите

1. Относително лесен и гъвкав метод за оценяване качеството (състоянието) на води от различни типове повърхностни и подземни водни тела, както и за сравняване качеството на води от различни географски области.

2. WQI е изключително полезен инструмент при мониторинга и управлението на качеството на водите: подпомага органите, отговорни за управлението на водите да определят политики и приоритети, вземат решения, осъществяват контрол, планират мерки, разработват проекти и др.

3. Индексите дават обратна информация за степента на спазване на стандарти и регулаторни изисквания и оценяване на тяхната ефективност.

4. Практичен подход за изследване на тенденциите, идентифициране на естествени и изкуствени замърсители на водните обекти, оценяване на вида, големината и източниците на натиск от човешката дейност върху водните тела.

5. Осигурява достъпна информация за широката общественост относно качеството на водата от конкретен водоизточник.

6. Удобен за целите на научни изследвания, тъй като позволява трансформиране на голямо количество данни в единна оценка, приложима за определяне на ефикасността на различни мерки за подобряване качеството на водите, въздействието на различни дейности върху качеството на водата и други.

Недостатъци на WQI моделите

1. Моделът WQI се прилага за оценка на качеството на водите въз основа на местни критерии за качество на водите - нормативно уредени чрез националните или регионалните законодателства. По този начин той не е унифициран (универсален) за приложение във всички страни по света.

2. Някои модели поради фактори като: свобода при определяне на включваните параметри (експертен опит), относително малък брой и/или изключване на цели групи параметри, отсъствие на тегла на параметрите, използване относително сложни математически функции и други, водят до несигурност по отношение точността на оценяването.

3. При агрегирането на данните не се отчитат връзките между изследваните качествени параметри, което е пречка за установяване на факторите, които влияят на качеството на водите и определяне на теглата на параметрите.

С цел премахване на неяснотата при избора на параметри, определяне на техните тегла и повишаване на точността на оценката е удачно при оценяване на качеството на водите да се приложат и статистически методи като: корелационен анализ, АГК, КА и др.

IV.1.4. Използвани WQI модели за целите на изследването в настоящия труд

IV.1.4.1. Канадски индекс за качество на водата (CCME WQI)

За комплексно оценяване на качественото състояние на природни води подходящ за използване е Индекс на качеството на водите (Water Quality Index - WQI), разработен в края на 90-те години на миналия век от канадското министерство по въпросите на опазването на околната среда (CCME, 2001).

WQI е комбинаторен индекс, включващ три компонента, които характеризират антропогенното или общото въздействие върху качеството на водите:

- ***диапазон на въздействие (F_1)*** - изразява относителния дял (обхвата) на показатели (параметри), неотговарящи на нормативно определените ПДС:

$$F_1 = \left[\frac{m}{M}\right] \text{ x } 100, \qquad \text{(IV.5)}$$

където m е броят на качествените показатели със случаи на отклонение от референтната стойност на съответната ПДС, а M е общият брой показатели за качество на водата, използваните при изчисляването на индекса.

- ***честота на въздействие (F_2)*** - показва съотношението между броя на т. нар. „лоши проби" (проби, при които е установена концентрация/стойност на параметър над ПДС) и общия брой проби:

$$F_2 = \left[\frac{n}{N}\right] \text{ x } 100, \qquad \text{(IV.6)}$$

където n е броят на всички проби, отклоняващи се от референтните ПДС, а N– общият брой проби, използвани при изчисляването на индекса

- ***амплитуда (F₃)*** - показва степента или кратността на отклонението на стойностите на „лошата проба” спрямо съответните референтни ПДС. Амплитудата се изчислява посредством алгоритъм в три стъпки.

Първоначално, се прави оценка на величината на отклоненията (excursions) E_i на т. нар. *„лоши проби”* спрямо съответните пределно допустими стойности:

$$E_i = \left[\frac{v_i}{V_{ПДС_i}}\right] -1, \qquad \text{(IV.7) или}$$

$$E_i = \left[\frac{V_{ПДС_i}}{v_i}\right] -1, \qquad \text{(IV.7a)}$$

където v_i е стойността на „лошата” проба, а $V_{ПДС_i}$ е референтната пределно допустима стойност за съответния показател за качество. Формулата IV.7a се прилага за изчисляване на амплитудата на показатели, чиито референтни ПДС намаляват при преминаване в по-лоша категория (напр. съдържанието на разтворен кислород). След това се изчислява нормализираната сума на отклоненията *NSE*:

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_i}{N} \qquad \text{(IV.8)}$$

където съответните символи съвпадат с тези от посочените по-горе формули.

Финалната формула за определяне на амплитудата $\boldsymbol{F_3}$ се изчислява като асимптотична функция, привеждаща стойността на нормализираната сума на отклоненията към интервала на индексната оценка от 0 до 100:

$$F_3 = \left(\frac{NSE}{0{,}01*NSE + 0{,}01}\right) \qquad \text{(IV.9)}$$

След получаването на стойностите на отделните компоненти (F_1, F_2 *и* F_3) на интегрираната формула се изчислява ***индекса на качеството на водите (WQI)***, посредством следната формула:

$$WQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2+F_2^2+F_3^2}}{1{,}732}\right), \qquad \text{(IV.10)}$$

където делителят 1,732 нормализира получената стойност в интервала от 0 до 100, като 0 означава „най-лошо качество”, а 100 – „най-добро качество”. За категоризация на водите по отношение на тяхното качество е разработена петстепенна оценъчна скала (Таблица 1).

Съгласно националното законодателство, характеризирането на състоянието на речните води по физикохимични параметри за качество се извършва в три категории: „умерено“, „добро“ и „отлично“ състояние. Прилагането на класификационната система за оценка на водите по физикохимични елементи за качество се основава на средногодишните

стойности (СГС) на показателите при наличие на най-малко 4 резултата (измервания) годишно, разпределени в 4-те годишни сезона.

Таблица 1. Оценъчна скала за категоризиране на водите по отношение на тяхното качество посредством WQI.

Категория	Интервал на (WQI)	Оценка на състоянието
Отлично	95 - 100	Водите се намират в своето естествено състояние. Няма антропогенно натоварване.
Много добро	80 - 94	Водите се намират в естествено състояние, като се регистрират единични изолирани случаи на антропогенно натоварване и замърсяване.
Добро	65 – 79	Водите като цяло се определят като чисти, но се регистрират редица случаи на антропогенно натоварване. Слабо замърсени води.
Критично	45 - 64	Водите в значителна степен са подложени на антропогенно натоварване. Замърсени води.
Лошо	0 – 44	Водите са подложени непрекъснато на антропогенно натоварване. Силно замърсени води.

Съгласно националното законодателство, характеризирането на състоянието на речните води по физикохимични параметри за качество се извършва в три категории: „умерено“, „добро“ и „отлично“ състояние. Прилагането на класификационната система за оценка на водите по физикохимични елементи за качество се основава на средногодишните стойности (СГС) на показателите при наличие на най-малко 4 резултата (измервания) годишно, разпределени в 4-те годишни сезона.

Главната цел на басейновите дирекции в България за управление на речните води е постигане на изискването те да отговарят минимум на „добро” физикохимично състояние. За да се модифицира интервалната скала от стойности на WQI, определящи категорията води (Таблица 1), то стойностите за „добро” физикохимично състояние се приемат като прагови стойности за изчисляване на WQI.

Получената нова модифицирана класификационна скала за категоризация на качеството на водите, базирана на българското законодателство (Таблица 2) класифицира речните води в три групи: умерени ($0 \leq WQI < 65$), добри ($65 \leq WQI < 80$) и много добри ($80 \leq WQI \leq 100$). Тази класификационна скала е използвана за целите на настоящото изследване (Таблица 2).

Таблица 2. Класификационна скала за категоризация на качеството на водите според стойностите на WQI, базирана на българското законодателство

Класификационна група	WQI	Състояние на водата	Забележка
1	80<WWQI ≤100	отлично/ много добро	Чисти и условно чисти води - качеството на водата отговаря на референтните стойности за добро физикохимично състояние.
2	65<WWQI ≤80	добро	Слабозамърсени води - качеството на водата се отклонява понякога от референтните стойности за добро физикохимично състояние.
3	0 <WWQI ≤65	умерено	Замърсени води - качеството на водата не отговаря на референтните стойности за добро физикохимично състояние.

IV.1.4.2. Индекс за качество на отпадъчни води (Wastewater Quality Index -WWQI)

За оценка на качеството на пречистени отпадъчни води беше възприет и приложен модифициран WWQI модел, хибриден на предложените модели от Ravikumar и съавтори и Abdelaziz и съавтори. Отличителна характеристика на този метод е генериране на подиндекси и претегляне на включените параметри.

Прилагането на индекса за качеството на отпадъчни води (WWQI) позволява да се оцени тяхното качество като отразява комбинираното влияние на различни параметри за качество на водата-физикохимични, специфични замърсители, приоритетни вещества, микробиологични показатели и др.

WWQI се изчислява за всяка водна проба на три етапа.

На първия етап, след определяне на значимите параметри, на всеки параметър, като абсолютна стойност (цяло число, обикновено от 1 до 5), се присвоява тегло (w_i), което отразява относителния дял на неговия ефект върху човешкото здраве, определя и неговото относително значение за общото качество на водата.

Вторият етап включва изчисляване на относителното тегло (W_i) на всеки параметър с помощта на уравнение IV.11.

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \qquad \text{(IV.11)},$$

където: W_i е относителното тегло на параметъра, w_i - теглото на параметъра (като абсолютна стойност), а n - броят на параметрите.

На третия етап се изчислява индексът за качеството за всеки параметър по уравнение IV.12:

$$q_i = 100 - (100.\frac{C_i}{C_{is}}) \quad \text{(IV.12)}$$

където: q_i е индекс за качеството за i-тия параметър, C_i - концентрацията на i-тия параметър във водната проба, C_{is} - национален стандарт (пределно допустима стойност) за i-тия параметър. Мерните единици за концентрации на показателите са mg/L, с изключение на електропроводимостта (µS/cm) и pH.

Вместо стойност за ПДК, по отношение на pH се прилага допустим интервал по формулата:

$$q_i = 100 - \frac{100.(excursion)}{(8.5-6.5)} \quad \text{(IV.13)}$$

Ако измерената стойност за pH (c_i) попада в интервала ($6.5 \leq c_i \leq 8.5$), т.е. няма отклонение (excursion), тогава q_i = 100. Ако c_i > 8.5, отклонението се изчислява като c_i – 8.5. Ако c_i < 6.5, отклонението се изчислява като 6.5 – c_i.

Накрая, за изчисляване на WWQI се определя стойността на подиндекса за качеството на водата (SI_i) за всеки параметър (уравнение IV.14), която след това се използва за определяне на WWQI съгласно уравнение IV.15.

$$SI_i = W_i.q_i \quad \text{(IV.14)}$$

$$WWQI = \sum_{i=1}^{n} SI_i \quad \text{(IV.15)}$$

където: SI_i е подиндекс на i-тия параметър; q_i –индекс за качеството за i-тия параметър и n-броят на параметрите.

За категоризиране качеството на пречистени от ПСОВ отпадъчни води (според стойностите на WWQI), чието заустване е само във водни обекти - реки, в настоящото изследване е използвана същата модифицирана класификационна скала за категоризация на водите, базирана на българското законодателство (Таблица 2).

IV.2. Екометрични методи.

Анализ на главни компоненти (АГК) (Principal components analysis-PCA)

Екометрията е научно направление, което класифицира, моделира и интерпретира мониторингови данни за природни обекти (въздух, води, почви, екосистеми) с цел откриване на специфични връзки и зависимости между тях, въз основа на сходства и различия в техните характеристики (параметри). Основен инструментариум на екометрията са методите на многовариационната статистика, чието приложение, базирано на общодостъпен или специализиран софтуер за анализ на данни, дефинира това научно направление като “интелигентен анализ на данни” (“*Intelligent Data Analysis - IDA*“).

Анализът на главни компоненти има за цел да открие и интерпретира „скритите“ и сложни отношения между характеристиките в набора от данни. Това налага редуциране на входните променливи. Характеристиките, които са подобни, се обединяват и преобразуват в нови характеристики, наречени **латентни (скрити) фактори или главни компоненти**. Те описват по-добре разглежданата система, без да са корелирани помежду си.

Освен да се открие структурата на данните, чрез АГК наборът от данни може да се моделира, компресира (намаляване броя на променливите) и визуализира.

Експерименталните (входните) данни, получени от система, описана от *m* обекта (проби) и *n* характеристики (параметри), формират матрица **X** (*m* x *n*). Главната задача при АГК е разлагането на матрицата от данни **X** на две части: матрица на факторните резултати (factor scores) **S** и матрица на факторните натоварвания (factor loadings) **L**. Това разлагане се осъществява на няколко етапа:

1) През пространството на обектите се прекарва нова ос, която да описва по-добре обектите, отколкото началните оси, т.е. остатъците да са най-малки, а описаната вариация в системата – възможно най-голяма. Тази ос (променлива) се нарича първи „главен компонент“ („Principal component - PC“) или „латентен (скрит) фактор“ и често се означава като PC1. PC1 е линейна комбинация от старите оси (променливи), като всяка стара ос участва във формирането й с определени, различни по стойност, тегла.

$$PC1 = l_{11}.\, x_1 + l_{12}\,.\, x_2 + \ldots + l_{1n}.\, X_n \qquad \text{(IV.16)}$$

2) Въвежда се следващо направление в пространството (нов фактор, нова ос), което е перпендикулярно на първото. Този фактор се означава като PC2. По начина на описване на обектите, втората ос не е равностойна на първата. PC1 описва възможно най-голяма част от необяснената до момента вариация на системата, а всяка следваща ос описва все по-малка част и т.н. Теоретично, броят на нововъведените оси е равен на броя на старите оси, но на практика се избират по-малък брой нови оси.

3) Определянето на статистически значимите фактори (главни компоненти) е една от най-трудните задачи при прилагането на АГК. Най-често при определяне броя на факторите се спазват следните правила:

-да се използват толкова броя фактори, колкото да опишат преобладаващата част от вариацията на данните, обикновено около 90%; за екологични изследвания за добро описание се приема и до 70% обяснена вариация;

-да се използват само фактори, чиито собствени стойности λ_i>1;

-да се използват само фактори, които повишават прогностичната сила на модела.

АГК позволява да се намали броят на характеристиките *n*, описващи системата, като се използват *s* броя фактора (s < n). Тази редукция на размерността води до минимална загуба на информация, която се съдържа в матрицата **E**. Математическият израз за разлагането на матрицата **X** се представя с уравнение IV.17.

$$\mathbf{X} = \mathbf{S} \times \mathbf{L} + \mathbf{E} \qquad \text{(IV.17)}$$

Матрицата **S** се нарича "матрица на факторните резултати". В нея се съдържат новите координати на обектите в пространството на главните компоненти. Факторните резултати обикновено се представят графично във факторното пространство, което дава възможност за откриване както на групи от подобни обекти (структура на обектите), така и на влиянието на всеки фактор върху даден обект.

Матрицата **L**, наречена "матрица на факторните тегла (натоварвания)", дефинира участието на всяка изходна характеристика във формирането на даден фактор чрез стойностите на т. нар. факторни тегла (l_{ij}). Те заемат стойности в интервала ($-1 \leq l_{ij} \leq 1$) и могат да се интерпретират по начин подобен на корелационните коефициенти. Характеристиките с ниски абсолютни стойности на факторните тегла влияят слабо върху фактора, докато тези с високи стойности (положителни или отрицателни) играят съществена роля при формирането му. За значими факторни тегла на първо ниво се приемат тези, чиято абсолютна стойност е по-голяма от 0.7, а на второ ниво – онези, чиито стойности са по-големи от 0.4.

Стойностите на факторните тегла на изходните характеристики за даден фактор са указание за неговата същност. В зависимост от това кои от старите оси участват със значими тегла при формирането на дадената нова ос, всеки фактор може да получи условно название.

В екометрията идентифицирането на факторите дава възможност за откриване на „реалните" фактори, влияещи върху качеството на изследваната екологична система. Чрез АГК се „откриват" и описват антропогенните и природните фактори,

V. ОЦЕНКА НА ОБЕКТИ ОТ ОКОЛНАТА СРЕДА

V.1.Оценка на качеството на повърхностни води от водосбора на река Струма чрез CCME WQI и Анализ на главни компоненти

V.1.1. Общи сведения за басейна на р. Струма.

Река Струма е една от най-дългите реки на територията на България. По големина на водосборния басейн (10797 км^2) е на второ място след р. Марица. Водосборният басейн е с преобладаващо планински и хълмист релеф. Изворната област на реката е разположена на височина 2180 м по южните склонове на планината Витоша, а при с. Кулата, където пресича границата на България с Гърция, надморската височина е само 62 м.

Поречието на р. Струма се поделя на три части. Горното течение обхваща западните и югозападни склонове на Витоша, Пернишката, Радомирската и Кюстендилската котловина. Средното течение на реката (известно още и като Средна Струма) започва от южната периферия на Кюстендилската котловина до южната граница на страната. Долното течение на реката е изцяло на територията на Гърция.

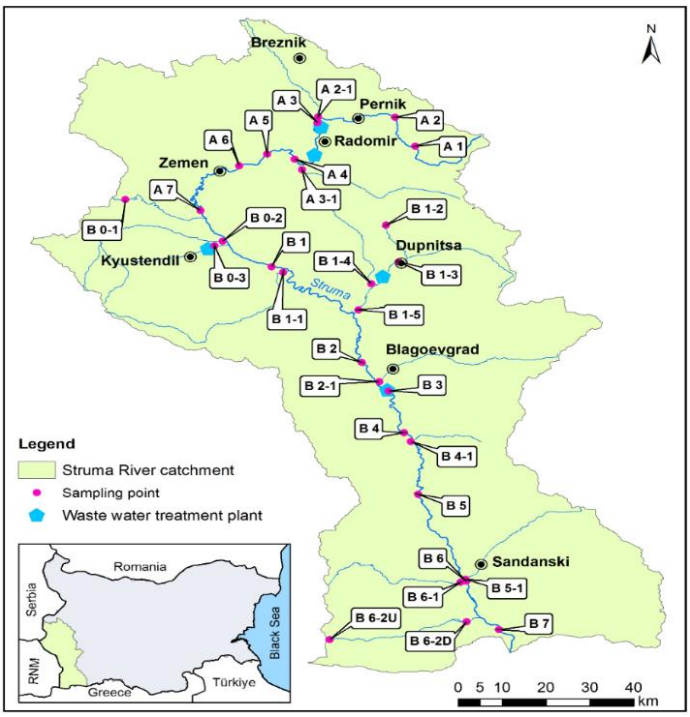
През 2021 г. в района на водосборния басейн на реката са живели около 412 хил. души, като преобладава градското население (73%). Основната част живее в големите областни градове – Благоевград, Перник и Кюстендил, както и в няколко общински центъра - Дупница, Сандански, Петрич и Радомир.

С най-малък дял на населението, свързано с пречиствателни станции за отпадъчни води е област Благоевград – 32,7% (НСИ, 2021), област Кюстендил – 62,1 %, област Перник - 73,8 %. Значителен е делът на населението в област Благоевград свързано с общинска канализация без пречистване – 50,6 %, а най-благоприятно е състоянието в област Перник – само 5,1%.

V.1.2. Пробовземане и химичен анализ

В България с *Наредба № Н-4 от 14.09.2012 г. за характеризиране на повърхностните води* се регламентира реда и начина за характеризиране, класифициране и представяне на състоянието/потенциала на повърхностните водни тела. Екологичното състояние и екологичният потенциал на повърхностните води съдържат няколко групи показатели за качество: биологични, физикохимични, специфични замърсители и хидроморфоложки. Екологичното състояние се определя от групата показатели с най-ниска стойност.

В настоящето изследване са използвани данни от задължителната програма за мониторинг на физикохимичните показатели от 30 пункта за мониторинг на водни проби от басейна на река Струма, взети през периода 2010-2021 г. (*Фиг.2*). Българският участък на реката обхваща нейното горно и средно течение, който в настоящото изследване е разделен на два подучастъци - А и В.



Фиг. 2. Карта на река Струма с обозначение на местата за пробовземане

Басейнът на р. Струма е съставен от различен тип водни обекти: R3- планински типове реки; R5 – полупланински типове реки; R13- равнинни типове реки; L3, L13- видове "езера" с олиготрофни условия.

В изследването са включени 10 физикохимични параметри за качество на повърхностни водни тела: разтворен O_2, pH, електропроводимост, NH_4^+, NO_3^-, NO_2^-, общ N, PO_4^{3-}, общ P и БПК$_5$. Референтни стойности на посочените физикохимични параметри, категоризиращи състоянието на водите, са съгласно *Наредба № Н-4 от 14.09.2012 г. за характеризиране на повърхностните води*.

V.1.3. Резултати и дискусия

С цел получаване на обективна оценка на качеството на водите на р. Струма, бяха обработени данни от пунктове с минимум четири пробонабирания годишно, с пълен или почти пълен набор от физикохимични показатели. Общият брой изследвани проби са

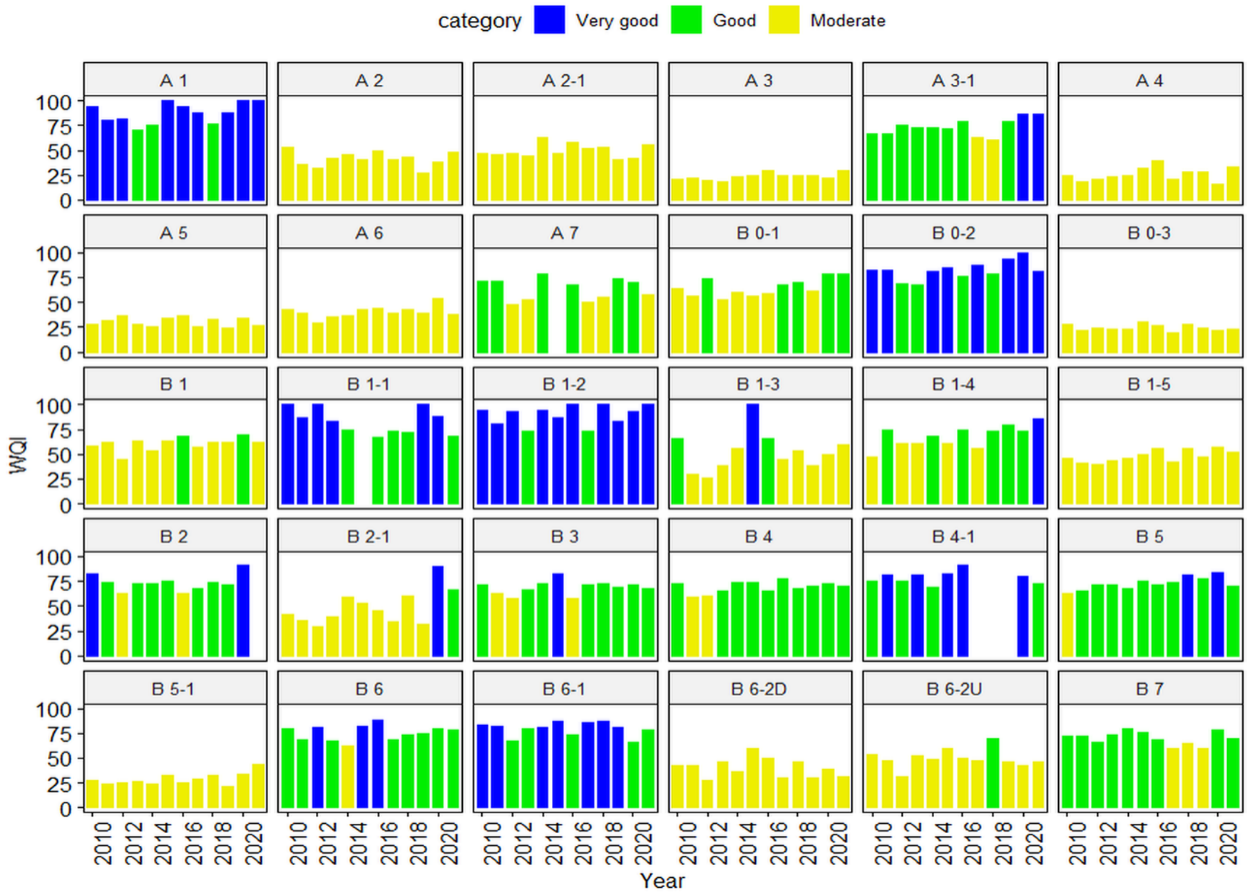
1337. Относителният дял на пробите с липсващи данни за част от параметрите е малък- 3,29 % (44 проби).

Въз основа на получените стойности на годишния WQI, състоянието на водите от водните тела за изследвания период (2010-2021 г.) се разпределят по брой и категория на водите, както следва: (Таблица 3)

Таблица 3. Категоризация на повърхностните води по водни тела (пунктове за пробовземане) - р. Струма

Код на пункт	Умерено състояние, бр. години	Добро състояние, бр. години	Отлично/ много добро състояние, бр. години	Общо, бр. години
A1	-	3	9	12
A2	12	-	-	12
A2-1	12	-	-	12
A3	12	-	-	12
A3-1	2	8	2	12
A4	12	-	-	12
A5	12	-	-	12
A6	12	-	-	12
A7	5	6	-	11
B0-1	7	5	-	12
B0-2	-	4	8	12
B0-3	12	-	-	12
B1	10	2	-	12
B1-1	-	5	6	11
B1-2	-	2	8	10
B1-3	9	2	1	12
B1-4	5	6	1	12
B1-5	12	-	-	12
B2	2	7	2	11
B2-1	10	1	1	12
B3	3	8	1	12
B4	2	10	-	12
B4-1	-	4	5	9
B5	1	9	2	12
B5-1	12	-	-	12
B6	1	8	3	12
B6-1	-	5	7	12
B6-2D	12	-	-	12
B6-2U	11	1	-	12
B7	3	9	-	12
Всички пунктове	**191**	**105**	**56**	**352**
Горно течение	**79**	**17**	**11**	**107**
Средно течение	**112**	**88**	**45**	**245**

Годишните стойности на WQI за всички пунктове за вземане на проби през периода на наблюдение са представени графично на Фиг. 3.



Фиг.3 Годишни стойности на WQI за всички пробовземателни пунктове през периода на наблюдение

При анализиране на резултатите от изчислените индекси за качеството на водата (WQI) за всичките 30 мониторингови пункта в поречието на р. Струма се установява, че в повече от половината от случаите състоянието се определя като „умерено“, около 30 % като „добро“ и едва 16 % като „отлично“.

В по-голямата част от поречието качеството на водите не отговаря на поставените цели в Плана за управление на басейна на р. Струма за поне добро състояние на повърхностните води. Особено висок е делът на „умерените“ проби в горното течение на реката, където почти ¾ от резултатите са оценени с индекса като „умерени“. В 6 от деветте пункта в този участък, през целия изследван период, не се регистрира „добро“ или „отлично“ състояние на водите.

В средното течение (подучастък В) се наблюдава известно подобрение на качеството на водите, но почти половината от пунктове според стойности на WQI са със статус „умерено“. Това са основно притоци на главната река, в които се заустват селищни канализационни системи или пречиствателни станции за отпадъчни води

(ПСОВ). Примери за това са пунктовете (B 0-3) Банщица след гр. Кюстендил, (B 1-5) р. Джерман след гр. Дупница преди вливане в р. Струма, (B 5-1) р. Санданска Бистрица преди устие, както и р. Струмешница по цялото си протежение (B 6-2U B 6-2D). Водите на главната река в този подучастък, след вливане на тези от притоците, не показват значително влошаване на качеството, което свидетелства за предимно локалното въздействие на тези притоци.

Преди напускане на българската територия, с малки изключения, водите на р. Струма са в „добро“ състояние.

Стойностите на WQI от трите язовира потвърждават тяхното предназначение. Водите на язовирите Студена (A 1) и Дяково (B 1-2) се използват за водоснабдяване главно на гр. Перник и гр. Дупница, поради което качеството на водите им се определя изцяло като „добро“ и „много добро“.

Много по-различна е ситуацията при яз. „Пчелина“ (A 5). Той е изграден преди всичко като утайник на промишлено и комунално замърсените води на р. Струма в Пернишката и Радомирската котловина. Вследствие на комплексния характер на антропогенния натиск за целия период на изследване, водите му имат „умерено“ качество. Подобни са резултатите от изследване на качеството на водите му и в по-ранни публикации.

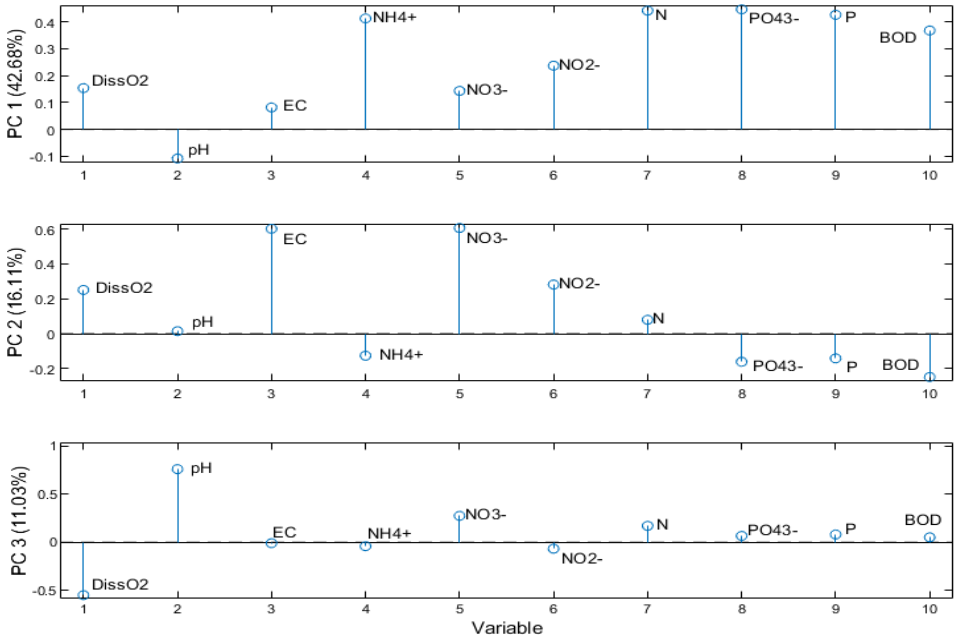
Анализът на 10-те физикохимични показателя, използвани при изчисляване на WQI, показва, че най-силно повлияни от антропогенното въздействие (индекс F_2 - честота) са NH_4^+, NO_3^-, NO_2^-, PO_4^{3-}, общ N и общ P, биохимична потребност от кислород (БПК5). Останалите показатели имат по-нисък дял във формирането на стойностите на индекса. Честите превишения на референтните стойности на посочените показатели свидетелстват за значителен дял в замърсяването от отпадните канализационни води на по-големите населени места, разположени предимно в басейните на притоците на р. Струма.

По отношение на амплитудата на превишенията над референтните стойности (F_3) за състояние „добро“ се наблюдава следната картина. В доминиращата част от „лошите проби“ се регистрира превишение на стойностите до 10 пъти. Много малък е делът на значителните превишения (над 25 пъти от допустимите стойности). Най-чести са отклоненията при показателите PO_4^{3-}и общ P. Тези екстремални стойности са регистрирани в пунктовете: B 0-3 (р. Банщица след Кюстендил), B 1-5 (р. Джерман след Дупница преди вливане в р. Струма), B 5-1 (р. Санданска Бистрица преди устие) и в много по-малка степен на р. Струмешница по цялото си протежение (B 6-2U, B 6-2D).

Извършеният тест на Mann-Kendall очертава 15 от 30 места за вземане на проби със значително нарастване на годишните WQI и само В 1-1 (река Елешница) се установява тенденция на намаляване през изследвания период. Като цяло се наблюдава отчетлива положителна тенденция за подобряване на състоянието на водите по течението на реката за изследвания период, която е по-силно изразена в средното течение на реката.

Връзките между показателите за качество на водата и местата за вземане на проби са изследвани чрез АГК. Наборът от входни данни, използван за АГК, се състои от променливи – показатели за качеството на водата и обекти – пробовземателни пунктове. Показателите за качеството на водата са представени чрез техните отклонения (excursions), изчислени по уравнения (IV.7) или (IV.7a). Само за pH са използвани оригиналните данни. Преди анализа входните данни бяха подложени на z-трансформация. АГК разкрива, че първите три главни компонента обясняват почти 70% от вариацията на данните.

При формирането на **първия главен компонент** PC1, обясняващ 42.68% от вариацията на данните значително влияние имат хранителните вещества: общ N и общ P, PO_4^{3-}, NH_4^+ и БПК 5 (*Фигура 4).*Този латентен фактор може условно да се нарече „градски отпадъчни води", като в по-малка степен той може да се определи и като индикатор за селскостопанска дейност, която обаче не оказва съществен антропогенен натиск върху водосбора на Струма.

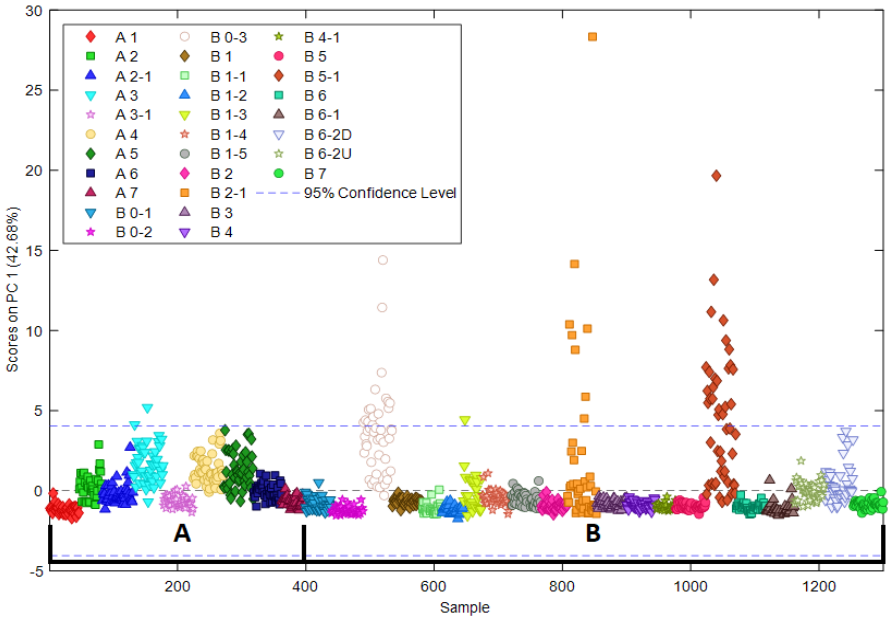


Фиг.4. Графики на факторните натоварвания за първите 3 латентни фактора

Вторият главен компонент PC2 (16.11%) се формира предимно от показателите електропроводимост и съдържание на нитрати NO_3^- и отразява основно въздействието на промишлените отпадъчни води във водосбора на р. Струма.

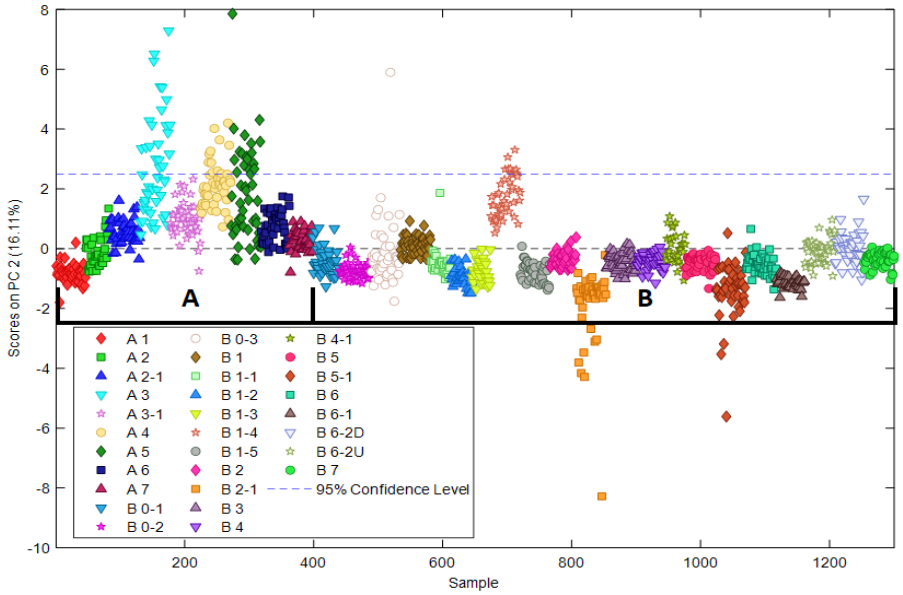
Последният **(третият) главен компонент** PC3 (11.03%) е в положителна корелация с pH и в отрицателна корелация с разтворения O_2. Този фактор може да бъде свързан с реакцията на замърсяване на повърхностните води в антропогенно повлияните водни тела. Високите стойности на pH са предпоставка за намаляване на водорасловата фотосинтезата, което води до намаляване на количеството на разтворения O_2.

Графиките на факторните резултати илюстрират влиянието на горепосочените латентни фактори върху пробовземателните пунктове във водосбора на р. Струма. Диаграмата на резултатите за PC1 показва по-изразено въздействие на градските отпадъчни води върху местата за вземане на проби в горното течение (подучастък А) на реката: А3 (река Струма при град Батановци), А4 (река Струма преди язовир Пчелина) и А5 (язовир Пчелина), както и на притоци от средното течение (участък В): В 0-3 (река Банщица), В 2-1 (река Благоевградска Бистрица R), В 5-1 (река Сандaнска Бистрица) и В 6-2D (река Струмешница преди вливането й в река Струма (Фиг. 5).



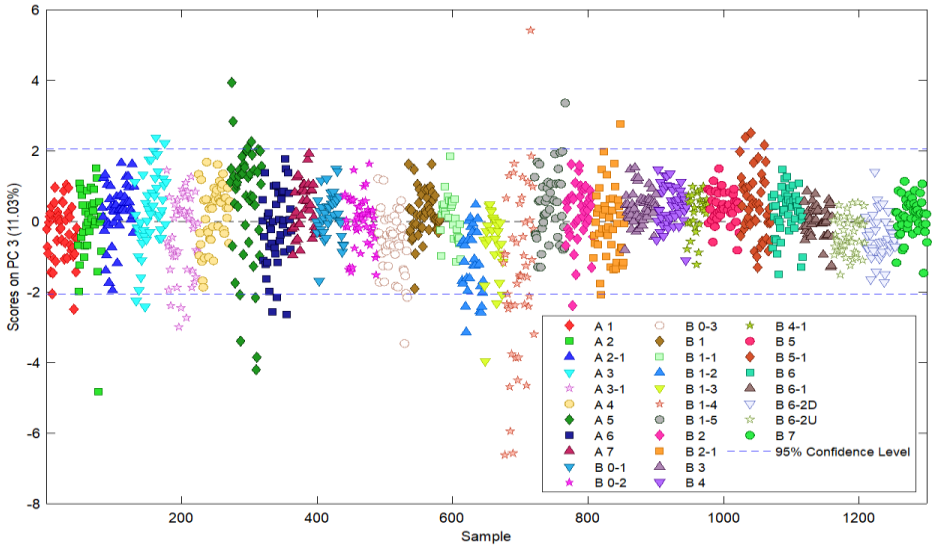
Фиг.5. Диаграма на факторните резултати за PC1.

Влиянието на промишлените отпадъчни води е представено на Фиг.6. Най-засегнати са водите от горното течение на река Струма - пробовземните станции А3, А4, А5, следвани от притока р. Разметаница в средното течение (В 1-4).



Фиг.6. Диаграма на факторните резултати за PC2.

Въздействието на отговора на замърсяването на повърхностните води не дискриминира пробовземателните пунктове. Наблюдава се значително разсейване на факторните резултати при най-силно антропогенно повлияните пунктове, каквито А5 (яз. Пчелина) и В1-4 (река Разметаница) (Фиг.7).



Фиг.7. Диаграма на факторните резултати за PC3.

Резултатите от изследването показват, че съществува значителна разлика между качеството на повърхностните води в горното и средното течение на водосбора, обусловена от спецификата на урбанизационния и индустриален натиск. Водите на язовир Студена (А1), които се използват за водоснабдяване на гр. Перник имат „добро“ или „много добро“ състояние за целия период на изследване. Анализът на АГК не

разкрива антропогенен натиск. Стойностите на WQI показват малка нарастваща тенденция от 0,22 единици на година. Пробовземателните пунктове, разположени надолу по течението на реката (А2 – А6) имат „умерено“ физикохимично състояние през изследвания период.

Река Струма при Перник (А2) и река Струма при град Батановци (А3) са засегнати от битови и промишлени отпадъчни води от област Перник. Отпадъчните води от района на Радомир влошават качеството на водите надолу по течението: река Струма преди язовир Пчелина (А4), яз. Пчелина (А5) и река Струма при с. Жабляно (А6). Язовир "Пчелина" е изграден през 1975 г. като утаител на замърсените води от битово и промишлено замърсяване на водите на река Струма от областите Перник и Радомир. Сложният характер на антропогенния натиск върху язовира се потвърждава и от предишни изследвания на повърхностни води и седименти на язовир Пчелина. Високата вариация на резултатите на фактора PC3 за пункт А5 е вероятно причинена и от работата на малката водноелектрическа централа, разположена непосредствено след язовир Пчелина.

Стойностите на WQI в средното течение на Струма се покачват, поради очистване на водите, преминали през яз. Пчелина, което е наблюдавано и за периода между 1989 и 1998 г. Водите от пробовземателен пункт на река Струма при с. Ръждавица (А7) са с добро състояние за 6 от 12-те изследвани години. Тенденцията за значително подобряване на качеството на водата (0.43 WQI единици на година) за А3 може да бъде свързана с подобряването на работата на ПСОВ на Перник и свързаната с нея канализационна мрежа. Притокът на река Конска (А2-1) има поведение, подобно на пробовземателен пункт А2 (Струма близо до град Перник) и влошеното му състояние - “умерено“ се дължи на градските отпадъчни води и малките промишлени предприятия от град Брезник и околните села. Притокът река Арката (А3-1) е с преобладаващо “добро” и “много добро“ състояние със значима положителна тенденция за покачване на качеството на водата. „Умереното“ състояние през 2017 и 2018 г. се дължи на малките предприятия, разположени във водосбора на притока.

Анализите на пробите от средния участък на река Струма (В1 –В7) показват значителни положителни изменения в качеството на водите, които определят предимно „доброто“ им състояние. Тази тенденция продължава и надолу по течението, подобно на същата в горното течение, след язовир Пчелина. Резултатите от АГК не показват значително градско или промишлено въздействие в горепосочените пробовземателни станции. Има значително подобрение в качеството на водите на река Струма при село

Невестино (B1), като най-изразено в целия водосбор на Струма е при град Кресна (B5) с 0.61 WQI единици годишно. Първите два притока в средното течение – река Драговищица (B0-1) и река Соволянска Бистрица (B0-2), бележат значителна положителна тенденция на повишено качество на водата. Река Драговищица е трансгранична река и стойностите на WQI на проби от пункт B0-1, разположен близо до границата, отразяват антропогенния натиск на територията на Република Сърбия.

Река Банщица (B0-3) има „умерено" състояние през целия изследван период, което се дължи на градските отпадъчни води на град Кюстендил. Наблюдават се и екстремни превишения (над 25 пъти) за PO_4^{3-} и общ фосфор. Това потвърждава докладваните по-рано резултати, където качеството на водите на река Банщица е класифицирано погрешно като отпадъчни води от ПСОВ.

Притоците, които се вливат в река Струма между местата за вземане на проби B1 и B2 могат да бъдат разделени на три групи. Река Елешница (B1-1) и язовир Дяково (B1-2) са с „добро" и „много добро" състояние, без данни за антропогенно въздействие. Река Дупнишка Бистрица (B1-3) и река Разметаница (B1-4) са с „умерено" до „добро" качество на водите през изследвания период. Причините за „умереното" състояние са градските отпадъчни води на гр. Дупница и промишлени отпадъчни води на ТЕЦ Бобов дол съответно за пунктовете B1-3 и B1-4. Значимите промени в качеството на повърхностните води на река Разметаница се илюстрират от голямото разсейване на резултатите на фактора за реакция на замърсяване на повърхностните води (PC3). Река Джерман (B1-5) има „умерено" състояние през целия период на наблюдение.

Резултатите от АГК не идентифицират градски и индустриален натиск нагоре по течението спрямо пробовземателни пунктове B1-3 и B1-4. Вероятно процеси, които протичат в повърхностните води или наличието на нерегламентирани заустявания със специфичен „физикохимичен" профил преди пунктовете проби B1-4 и B1-5 прави невъзможно тяхното установяване чрез първите два главни компонента. Това предположение се подкрепя от регистрираните екстремни превишения (над 25 пъти) за PO_4^{3-} и общ P в река Джерман, както и от много високата измерена концентрация на общ органичен въглерод през 2021 г. – 9.48 mg/L. Следващите два притока надолу по течението, повлияни от градските отпадъчни води, са река Благоевградска Бистрица (B2-1) и река Сандански Бистрица (B5-1). И двата пробовземателни пункта имат положителен тренд на WQI. Това подобрение се дължи на въвеждането в експлоатация на ПСОВ Благоевград през 2012 г. и частична подмяна на канализационната мрежа на гр. Сандански.

Последните две места за вземане на проби от притоци на Струма, където резултатите от АГК показват въздействие на градските отпадъчни води са B6-2U и B6-2D, разположени на трансграничната река Струмешница. „Умереното“ състояние на повърхностните води, идващи от Република Северна Македония (B6-2U), което се характеризира с превишения на PO_4^{3-} и общ P, не претърпява значителна промяна при B6-2D.

Като цяло по течението на главната река антропогенно засегнатите притоци не водят до влошаване качеството на водата на р. Струма. Резултатите на факторите PC1 и PC2 имат подобни стойности за първия пункт - язовир Студена (A1) и последния, включен в изследването, пункт на река Струма при село Тополница (B7) във водосбора на река Струма.

V.1.4. Изводи

1. Състоянието на изследваните повърхностни води от водосбора на река Струма, определено въз основа на физикохимичните елементи за качество, зависи главно от антропогенния натиск, от неговата интензивност и степен на натоварване.
2. През целия период на изследването състоянието на водите на реката в участъка (подучастък А) след гр. Перник до пункт В 0-2 (р. Соволянска Бистрица преди устие) остава „умерено“. Основната причина за това е непрекъснатото постъпване в тях на битови и промишлени отпадъчни води.
3. В средното течение на реката (подучастък В) WQI има ясно изразена положителна тенденция за изследвания период. Това се дължи на преминаването на повърхностните води през яз. Пчелина и предприетите мерки в този участък на водосбора.
4. Макар част от нейните притоци да са подложени на локални въздействия, водите на главната река в средното течение не се характеризират със значително влошаване на качеството си.

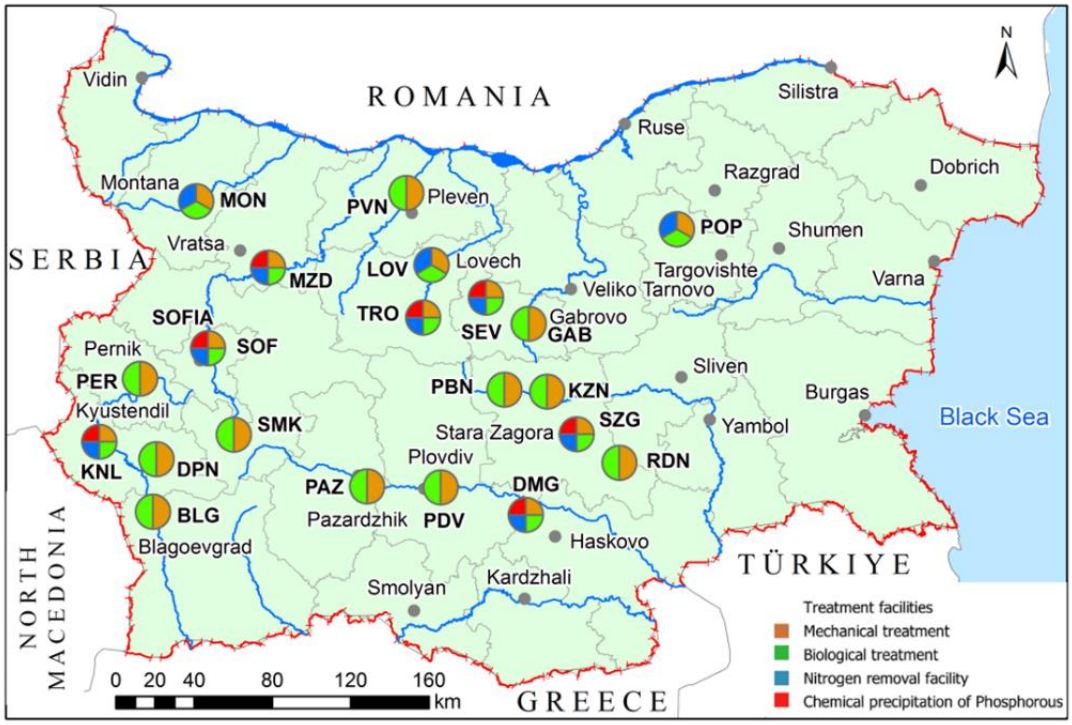
V.2. Оценка на качеството на пречистени отпадъчни води от ПСОВ чрез WWQI модел

V.2.1. Пробовземане, физикохимичен анализ и получени данни

Целта на това изследване е да се предложи подходяща методология за определяне на WWQI за оценка на отпадъчни води при оперативен мониторинг, включваща набор от физико-химични параметри, специфични замърсители, приоритетни вещества и общи показатели за качество на отпадъчните води, чрез прилагане на комплексен подход за тяхното претегляне.

За оценяване на качеството на пречистени отпадъчни води от ПСОВ са използвани комбинирани аналитични данни за шест физикохимични параметри за качество на отпадъчните води (COD, TN и TP, TSS, pH, EC), приоритетни вещества (Cd, Ni и Pb) и специфичен замърсител (Cr), получени в една пробовземателна кампания, извън задължителните схеми за мониторинг.

Анализираните проби от пречистени води са събрани на изходите на двадесет и една ПСОВ в България, приемащи отпадъчни води. Пробовземането е извършено през месец август 2018 г., при характерните за периода високи дневни температури на въздуха ($t > 30^0C$) и при нормални метеорологични условия. Капацитетът на изследваните ПСОВ е в широк диапазон от еквивалент жители (е.ж.) и дебит (Q). Заустваните води постъпват в различни по тип реки. Местоположението на ПСОВ и водните тела (реките), в които се заустват пречистените от тях води са представени на *Фиг. 7*.



Фиг.7. Карта на изследваните ПСОВ

Получените от физико-химичния анализ на пробите данни за 10-те изследвани параметъра бяха съпоставени със стандартите (максимално допустими концентрации), регламентирани в националното законодателство.

С *Директива 91/271/ЕИО на Съвета относно пречистването на градските отпадъчни води* и *Наредба № 6 от 9.11.2000 г. за емисионни норми за допустимото съдържание на вредни и опасни вещества в отпадъчните води, заустване във водни обекти*, се определят максимално допустимите концентрации за химическа потребност от кислород (COD), общ азот (TN), общ фосфор (TP) и общи суспендирани твърди вещества (TSS) за заустванията.

Разпоредбите на *Директива 2013/39/ЕС на Европейския парламент и на Съвета за изменение на Директиви 2000/60/ЕО и 2008/105/ЕО по отношение на приоритетни вещества в областта на водна политика* и *Наредба за стандарти за качество на околната среда за приоритетни вещества и някои други замърсители от 2010* г. определят граничните стойности за приоритетните замърсители Cd, Ni и Pb.

Допустимите стойности за pH и електропроводимост (EC) за постигане на поне умерен статус на повърхностни водни тела (езера и реки) са регламентирани в *Наредба № Н-4/2012 г. за характеризиране на повърхностните води.* В същия документ за вътрешни повърхностни води максимално допустимата концентрация (МДК) за Cr (III) е ограничена до 32 μg/L.

Пробовземането на водните проби е извършено в стъклени бутилки, които непосредствено преди това са промити с вода от водоизточника. Пробите за ICP-MS анализа са филтрувани през 0.45 μm мембранен филтър, подкислени с к. HNO_3 до pH 2 и съхранявани при температура 4 ^{0}C до инструменталното измерване. ICP-MS анализът на следовите елементи Cd, Cr, Ni и Pb е осъществен с помощта на масспектрометър с индуктивно свързана плазма *Perkin Elmer SCIEX-ELAN DRC-E ICP* (MDS Inc., Concord, ON, Канада). Направеният избор на анализирани изотопи ^{112,114}Cd, ^{52}Cr, ^{60,62}Ni и ^{206,207,208}Pb е съобразен с природната разпространеност и наличието на спектрални и матрични пречения. Проведено е външно калибриране със серия от стандартни разтвори и са построени калибровъчни графики с корелационен коефициент > 0.999 за всеки един от елементите.

За оценка на точността на анализа са използвани сертифицирани референтни материали NWTM-23.5 (Environmental matrix reference material, a trace element-fortified sample, Environment and Climate Change, Gatineau, QC, Canada) и SPS-SW-2 (Reference Material for Measurement of Elements in Surface Waters, Spectrapure Standards, Oslo,

Norway), чиято матрица наподобява тази на водните проби. Проведеният ICP-MS анализ на TM-23.5 и SPS-SW-2 за Cd, Cr, Ni и Pb показа много добро съвпадение между експериментално определените и сертифицирани стойности.

Определянето на ХПК, общ N и общ P е осъществено с кюветни тестове и портативен спектрофотометър *DR 3900* (Hach Lange GmbH, Германия) съответно при 448, 370 и 890 nm.

За определянето на ХПК са използвани кюветни тестове LCK 314. Методът се основава на окисляването на пробата с калиев бихромат, сярна киселина, сребърен сулфат и живачен сулфат. Разтворът се нагрява при 148 ± 2 °C в термореактор LT 200 (Hach Lange GmbH, Берлин, Германия) в продължение на два часа. Определянето на ХПК е в диапазона от 15 до 150 mg/L O_2.

Методът за определяне на общ азот използва кюветни тестове LCK 138 и се основава на окисляването на органичните и неорганичните форми на азота с пероксидисулфат до нитрати, които след това реагират с 2,6-диметилфенол в среда на сярна киселина и фосфорна киселина, като се получава нитрофенол. Разтворът се нагрява до 100 ± 2 °C (LT 200) за един час. Определянето на TN е в диапазона от 1 до 16 mg/L.

За определянето на общ фосфор са използвани кюветни тестове LCK 348. Методът се основава на взаимодействието на фосфатните йони с молибдатни йони и антимон за образуването на антимонилфосфомолибдат, който се редуцира от аскорбинова киселина до фосфомолибдатно синьо и нагряването му за един час при 100 ± 2 °C (LT 200). Определянето на TP е в диапазона от 1 mg/L до 10 mg/L.

За определяне на pH и електропроводимост е използван комбиниран уред *Senslon+ MM734* (Hach Lange GmbH, Германия).

Общо неразтворените твърди вещества са определени с помощта на стъкловлакнести филтри при спазване на изискванията на стандарт EN 872:2005. Всички изследвания са проведени по валидирани методи в акредитирана лаборатория за анализ на води към Университета по архитектура, строителство и геодезия, София.

Съпоставянето на измерените стойности/концентрация на анализираните параметри от пречистени отпадъчни води с техните референтни стойности (МДК) показва отклонения от стандартите за качество на околната среда на следните показатели:

- Превишение на МДК на специфичен замърсител Pb (14,45 µg/L) във водите от ПСОВ-Пловдив;

- В три от ПСОВ, стойностите на EC са над референтната стойност от 750 µS/cm (1174 µS/cm ПСОВ-Димитровград, 841 µS/cm ПСОВ-Плевен, 991 µS/cm ПСОВ-Раднево);

- Минимално надминатa гранична стойност на pH (8,51) в ПСОВ-Троян;

-В една проба концентрацията на общ N е над МДК (14,2 mg/L, ПСОВ-Пазарджик).

-Най-много (пет) са пробите с превишения на МДК на общ P (2,15 mg/L ПСОВ-Габрово, 1,61 mg/L ПСОВ-Пазарджик, 1,70 mg/L ПСОВ-Пловдив, 2,21 mg/L ПСОВ-Перник, 2,82 mg/L ПСОВ-Попово).

Тези резултати показват, че пречиствателните съоръжения като цяло отговарят на изискванията на законодателството по отношение качеството на пречистените води.

V.2.2. Изчисляване на WWQI

Стойностите на WWQI се изчисляват по описаната по-горе методика (т. IV.1.4.2.) с помощта на относителните тегла на параметрите за качество на водата (W_i), определени за всеки от параметрите за качество на водата. За изчисляване на WWQI са използвани три варианта за определяне на теглата на параметрите:

-еднаква тежест -$WWQI_N$;

-експертна оценка - $WWQI_{Exp}$;

-факторни натоварвания на PCA- $WWQI_{PCA}$

При първия вариант се използват еднакви тегла, като тегло от единица беше присвоено на всеки от 10-те изследвани показателя (относително тегло 0.1). При използването на „експертна преценка“ (втори вариант на тегловия подход), най-високи тегла от 5 единици бяха присвоени на приоритетните вещества Cd, Ni и Pb (относителни тегла 0.128), тегло от 4 единици беше присвоено на ХПК, TN и TP (генериращи еутрофикация на водните тела) и специфичния замърсител Cr (относителни тегла 0.103), тегло от 3 единици беше присвоено на TSS и EC (относителни тегла 0.077) и най-ниско тегло от 2 на pH (относително тегло 0.051), чието въздействие се счита като най-малко вредно. Третият вариант за определяне на теглата на параметрите (w_i) се базира на факторните натоварвания, получени от анализа на главните компоненти. При него се използва формулата V.1:

$$w_i = \frac{\sum_{K=1}^{n}(E_K.P_{iK})}{\sum_{k=1}^{n} E_K} \quad , \qquad \text{(V.1.)}$$

където $Ек$ е собствена стойност на главен компонент, P_{iK} - факторното натоварване на параметрите и n - броят на главни компоненти със собствени стойности, по-високи от 1.

Теглата на параметрите се определят от собствените стойности и факторните натоварвания на главните компоненти със собствени стойности по-високи от 1.

Резултатите от АГК показват, че първите пет латентни фактора (главни компоненти -PC) със собствени стойности по-високи от 1 обясняват почти 80% от общата вариация на данни. Факторните натоварвания на тези главни компоненти са представени в Таблица 4. Максималните абсолютни стойности на факторните натоварвания за всеки параметър за качеството на водата са записани с удебелен шрифт.

Таблица 4. Факторни натоварвания за първите пет главни компоненти

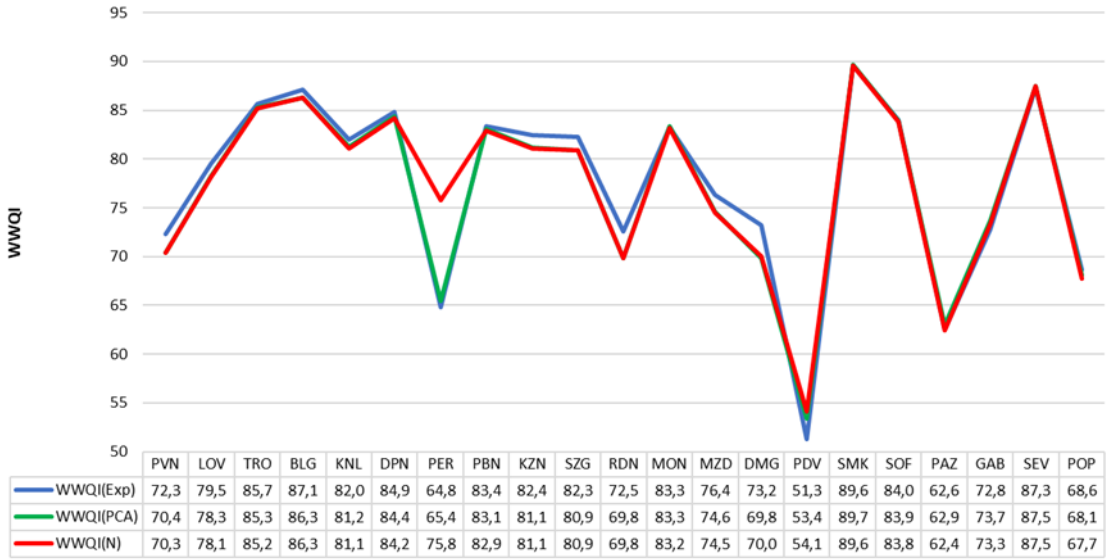
Параметър	**Главни компоненти/ факторни натоварвания**				
	PC1	**PC2**	**PC3**	**PC4**	**PC5**
pH	-0.032	0.097	0.021	0.209	**0.893**
EC	-0.124	**0.813**	-0.083	-0.147	-0.013
COD	0.121	0.068	-0.032	**-0.812**	-0.083
TSS	**0.906**	0.116	-0.034	0.009	-0.213
TP	0.307	0.097	0.269	**0.589**	0.316
TN	0.138	**0.845**	-0.037	0.107	0.133
Cr	-0.054	0.010	**0.933**	-0.085	0.174
Cd	0.117	-0.223	**0.820**	0.289	-0.125
Ni	0.054	**-0.520**	0.179	-0.465	0.458
Pb	**0.884**	-0.128	0.073	-0.031	0.193
Собствена стойност	1.767	1.749	1.663	1.391	1.260
Обяснена вариация (%)	17.67	17.49	16.63	13.91	12.60

Факторните натоварвания разкриват връзките между параметрите за качеството на водата имащи значителен принос за формирането на латентните фактори. Наблюдават се силни корелации между TSS и Pb в PC1; между EC и TN в PC2 и между Cd и Cr в PC3. Факторните натоварвания на PC4 отразяват силна отрицателна корелация между COD и TP. Относителните тегла на параметрите (W_{PCA}) се изчисляват съгласно уравнение IV.11.

Оценката за качеството на заустваната пречистена отпадъчна вода е извършена според изчислените стойности на WWQI, въз основа на модифицирана според българското законодателство оценъчна скала за категоризиране на водите, които се групират в три категории (виж Таблица 4).

V.2.3. Резултати и дискусия

След определяне на относителните тегла на параметрите бяха определени стойностите на подиндексите SI с относителните тегла на показателите, според приложения теглови подход: $W_{i\ N}$, $W_{i\ Exp}$ и $W_{i\ PCA}$. Последно бяха изчислени стойности на WWQI за изследваните ПСОВ (с трите варианта на (W_i). Сравнителна графика на стойности на WWQI при различни варианти на Wi е представена на Фиг. 8.



Фиг.8. Сравнителна графика на стойности на WWQI при различни варианти на Wi

Анализът на резултатите показва, че:

- приложените три варианта на тегловия подход за изчисляване на WWQI дават сходни резултати;

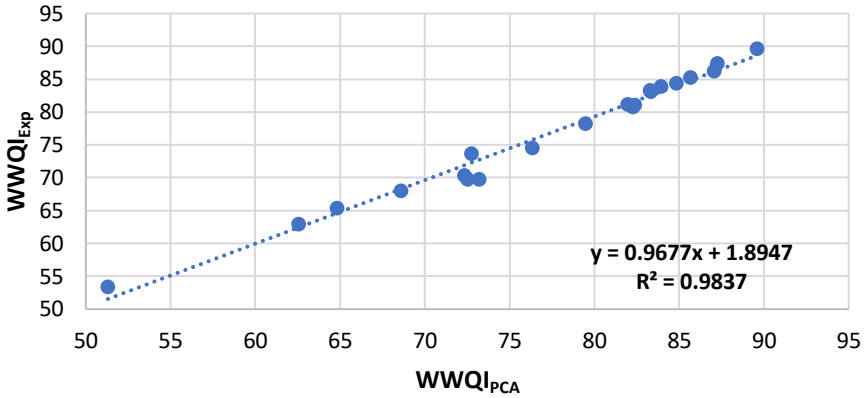
- при варианта „експертната преценка“, стойностите на WWQI са по-високи, за разлика от съответните стойности, получени при вариантите „PCA“ и „еднакви тегла“, които дават почти идентични резултати;

- единствени изключения са получават при водите, изпускани от ПСОВ-Перник и ПСОВ-Пловдив, чиито най-високи WWQI са изчислени чрез метода на „еднаквите тегла“;

- има пълно съответствие между трите варианта на тегловия подход за изчисляване на WWQI при оценката за категоризиране на водите, с изключение на класификацията за водите от ПСОВ-Перник (виж Фиг.11).

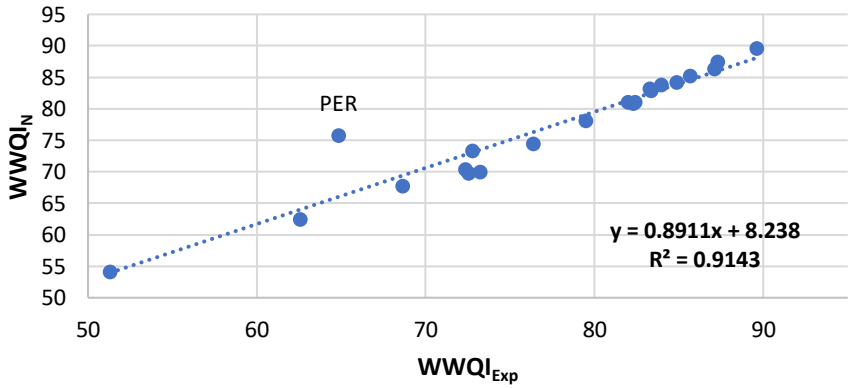
При сравняване на резултатите на $WWQI_{Exp}$ и на $WWQI_{PCA}$, посредством линеен регресионен анализ се установява, че първите са с почти 2 единици по-високи (отрез b_0 = 1,8947), (Фиг.9).

Този резултат противоречи на изводите в публикация на Z. Liu и съавтори (2021) че методът, използващ АГК дава различни резултати от експертната преценка (често означаван като „метод Delphi“) за присвояване на тегла и се счита за по-точен при оценката на резултатите.



Фиг. 9. Сравнение на WWQI, изчислени с W_i на параметрите на база експертна преценка и W_i , базирани на PCA подход (n=21)

Изчислените WWQI, използващи експертна преценка и равни тегла, следват същата тенденция и са в съответствие (Фиг.10), което частично противоречи на констатациите в публикация на А. Сингх и съавтори (2020), където се предлага използването на различни тегла на параметрите.



Фиг. 10. Сравнение на WWQI, изчислени с еднакви W_i на параметрите и W_i , базирани на експертна преценка (n=21)

Единственото изключение е ПСОВ-Перник, където $WWQI_N$ е по-висок от $WWQI_{Exp}$ с 11 единици. Тази разлика води до различното класифициране на статуса на пречистените отпадъчни води от ПСОВ-Перник.

Класификация на състоянието на пречистените води от изследваните ПСОВ въз основа на приложени WWQI и превишения на параметрите за качество на водата е представена с цветна диаграма на Фиг. 11.

ПСОВ	$WWQI_{Exp}$	$WWQI_{PCA}$	$WWQI_N$	Превишения
Благоевград				
Димитровград				EC
Дупница				
Габрово				TP
Кюстендил				
Казанлък				
Ловеч				
Монтана				
Мездра				
Пазарджик				TP, TN
Павел баня				
Пловдив				TP, Pb
Перник				TP
Попово				TP
Плевен				EC
Раднево				EC
Севлиево				
Самоков				
София				
Стара Загора				
Троян				pH

Състояние на водите : - много добро; - добро ; - умерено

Фиг. 11. Класификация на състоянието на пречистените води от изследваните ПСОВ въз основа на приложени WWQI и превишения на параметрите за качество на водата

С цел оценка на ефективността на трите теглови подхода, използвани за изчисляване на WWQI, беше извършен сравнителен анализ на водният статус на пречистените отпадъчни води и отклоненията от екологичните стандарти за тяхното качество.

От 21 изследвани води от ПСОВ, 11 са класифицирани с „много добро“ състояние (ПСОВ-Троян, Благоевград, Кюстендил, Дупница, Павел баня, Казанлък, Стара Загора,

Самоков, София и Севлиево). Тази група включва ПСОВ с различен капацитет на пречиствателните съоръжения. „Много доброто“ състояние съответства на липсата на отклонения от екологичните стандарти за качество на водата. Единственото изключение е отпадъчните води от ПСОВ-Троян, където pH е 8,51 и минимално надвишава диапазона на „много добро“ състояние от 6,5-8,5.

Втората група отпадъчни води от ПСОВ (7 от 21) се класифицират като имащи „добро“ състояние. Сред тях отпадъчните води на две ПСОВ (Ловеч и Мездра) не показват отклонения от екологичните стандарти, докато останалите пет са свързани с отклонения от тези стандарти. Отпадъчните води от ПСОВ в Плевен, Раднево и Димитровград показват стойности на ЕС, надвишаващи екологичния стандарт, докато тези от ПСОВ в Габрово и Попово имат стойности на ТР над съответния стандарт. Може да се заключи, че WWQI на ПСОВ с отклонения се влияят предимно от параметрите на качеството на водата, които отговарят на екологичните стандарти, а не от тези, които не отговарят. Повишените нива на ТР, надвишаващи лимита за ПСОВ в Габрово и Попово, предполагат необходимостта от внедряване на съоръжения за пречистване на фосфор и в двете ПСОВ.

За ПСОВ - Пловдив и ПСОВ-Пазарджик се установяват два показателя за качество на водата, които не отговарят на стандартите. И двете отпадъчни води са класифицирани като имащи „умерен“ воден статус, в съответствие с предишно проучване (Йотова и съавтори, 2021) което идентифицира проблеми в тези съоръжения.

Единственият изходен поток отпадъчни води, класифициран в различни класове чрез трите използвани подхода, е от ПСОВ-Перник. Подходът на експертната преценка определя „умерено“ състояние, докато методите с равно претегляне и базирания на АГК, „подценяват“ отклонението на ТР, което води до класификация на „добро“ състояние на водата. $WWQI_{\mathrm{N}}$ е с 10 единици по-висок от $WWQI_{Exp}$ и $WWQI_{PCA}$, вероятно поради по-ниските концентрации на тежки метали във водите и на относително по-високите стойности на параметри като ХПК и TN. Разликата между $WWQI_{Exp}$ и $WWQI_{PCA}$ е минимална, само 0,6 единици (64,8 за $WWQI_{\mathrm{Exp}}$ и 65,4 за $WWQI_{PCA}$), като и двете стойности се движат близо до прага на WWQI от 65, който разделя умереното от доброто състояние на водата.

V.2.4. Изводи

1. Успешно е извършена оценка на качеството на пречистени отпадъчни води от 21 ПСОВ чрез метода WWQI. Общото състоянието на изходящите води за повечето ПСОВ се класифицира като „добро“ или „много добро“, с изключение на водите от ПСОВ-Пловдив и ПСОВ-Пазарджик, за които е определено „умерено“ състояние.

2. WWQI беше изчислен чрез използване на мониторингови данни за шест физикохимични параметри за качество на отпадъчните води (COD, TN и TP, TSS, pH, EC), приоритетни вещества (Cd, Ni и Pb) и специфичен замърсител (Cr), чрез използване на три варианта за определяне на теглата на параметрите - еднакви тегла, експертна преценка и факторните натоварвания от АГК. Това позволи да се направи сравнителен анализ по отношение точността и обективността на всеки тегловен подход.

3. Трите варианта на определяне на относително тегло на параметрите дават сходни резултати за изчисления WWQI, като при „експертната преценка“ стойностите на $WWQI_{\mathrm{Exp}}$ са малко по-високи от $WWQI_{\mathrm{PCA}}$. Почти равни WWQI се получават при равни относителни тегла и тези, формирани посредством АГК. Това ни дава основание да направим извод, че подходът на експертна преценка е по-подходящ за оценка на ефективността на ПСОВ в единични мониторингови кампании, поради по-малката му сложност в сравнение с подхода, базиран на АГК, и способността му да приоритизира специфични параметри за качество на водата в сравнение с метода с равни тегла. Освен това, подходът на експертна преценка предлага по-голяма гъвкавост, което го прави много подходящ за целеви оперативен мониторинг, насочен към оценка на специфични видове замърсяване.

VI. ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Въз основа на извършеното изследване могат да се дефинират следните основни приноси на дисертационния труд:

1. Извършена е оценка на качеството на водите от водосбора на река Струма, България за дванадесет годишен период от време въз основа данните на физикохимичния мониторинг в 30 мониторингови пункта, в съответствие с Рамковата директива за водите в ЕС и националната нормативна уредба, чрез използване на комбинация между CCME WQI, анализ на времеви серии и АГК.

2. Приложеният хибриден подход за оценка на качеството на повърхностните води, включващ индекса за качество на водите и многовариационния статистически подход - АГК, позволява да се идентифицират природните и антропогенни фактори, контролиращи качеството на повърхностните води, отчитайки стандартите за качество на околната среда в различни по тип водни тела.

3. Разработена е и е приложена методология за определяне на Индекс за качество на отпадъчни води (WWQI) за оценка качеството на пречистени в ПСОВ отпадъчни води чрез три подхода при определяне на относителните тегла на параметрите.

4. Получените резултати от изследването са подходящи за използване от органите по управление на водите (Басейнови дирекции) за подобряване на качеството на повърхностните води във водосбора на р. Струма; за откриване на причините за непостигане на „много добро“ качество на пречистените води при част от изследваните ПСОВ, както и за предприемане на коригиращи действия за прекратяване или ограничаване на въвеждането на замърсители във водите.

VI. ПУБЛИКАЦИИ, ВКЛЮЧЕНИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Benkov, I.; Varbanov, M.; Venelinov, T.; Tsakovski, S. *Principal Component Analysis and the Water Quality Index - A Powerful Tool for Surface Water Quality Assessment: A Case Study on Struma River Catchment, Bulgaria*, *Water*, 2023, 15, 1961. https://www.mdpi.com/2073-4441/15/10/1961

2. Benkov, I.; Tsakovski, S.;Venelinov, T. *Assessment of the Water Quality of WWTPs' Effluents through the Use of Wastewater Quality Index*, Applied Sciences 2024, 14, 8467. https://doi.org/10.3390/app14188467

УЧАСТИЯ В МЕЖДУНАРОДНИ НАУЧНИ КОНФЕРЕНЦИИ

1.Tsakovski, S.; Benkov, I.; Varbanov, *M.; Venelinov, „Multivariate statistics and the water quality index – a powerful tool for surface water quality assessment",* 11th International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE 2024) and SECOTOX Conference June 05-09, 2023, Skiathos, Greece

2. Tsakovski, S.; Benkov, I., „*The use and misuse of water quality indexes in water quality assessment"*, 11th International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE 2024) and SECOTOX Conference, June 16-20, 2024 , Lefkada island, Greece

БЛАГОДАРНОСТИ

Изразявам огромна благодарност на моя научен консултант проф. д-р Стефан Цаковски, който ме запозна със същността и приложението на екометричните методи за оценка на природни обекти, за насочването ми към темата на дисертацията и въвеждането в проблемите по оценяване на качествата на природни води! Под негово ръководство се осъществи систематизирането, обработката на данните, разработването и прилагането на методологията на изследването, както и цялостното оформяне на дисертационния труд. Благодаря му за безрезервната подкрепа, доверието и помощта, която ми оказа! За мен е чест, че го познавам и имам възможността за работя с него!

Благодаря на доц. д-р Мариан Върбанов за запознаване с модела на „канадския“ индекс за качеството на водата (CCME WQI), насоките и помощта за изчисляване на WQI със подходящ софтуер, проверката на резултатите и техния анализ при изследване качеството на водите от водосбора на р. Струма!

Благодаря на доц. д-р Тони Венелинов за съвместната работа по разработването и прилагането на методология за определяне качеството на отпадъчни води от ПСОВ чрез WWQI модела, обработката, проверката и анализа на резултатите от изследването, както и за окончателното оформянето и публикуване на научните статии!

Благодаря на доц. д-р Валентина Любомирова за консултациите, за изясняване на методологията и практическото прилагане на съвременни методи за анализ на природни води!

Благодаря на ръководството на Басейнова дирекция „Западнобеломорски район“- Благоевград за предоставянето на данни от мониторингови изследвания на водите на басейна на р. Струма и коментирането на получените резултати!

Благодаря на моето семейство за разбирането, подкрепата, обичта и огромната им вяра в мен и моите успехи!