



Journal of Chemistry and Technologies

pISSN 2663-2934 (Print), ISSN 2663-2942 (Online).

journal homepage: <http://chemistry.dnu.dp.ua>



UDC 504.03:504.4.062.2:004.942

SIMULATION IN THE MANAGEMENT OF WATER RESOURCES

Olena V. Hruzdieva*, Danilo O. Kryachkov, Roman V. Smotraiev

Ukrainian State University of Chemical Technology, 8, Gagarina Ave., Dnipro, 49005, Ukraine

Received 12 August 2023; accepted 5 October 2023; available online 25 October 2023

Abstract

Water resources in the modern world are under anthropogenic pressure, which is increasing with the growth of the world's population and the increase in economic activity. Therefore, the minute-by-minute need for water of proper quality can lead to a shortage of fresh water, which in turn will threaten the existence of humanity. Therefore, there is an urgent need to improve water management systems, taking into account many factors: modern concepts and approaches to water use and wastewater treatment, climate change forecasts, population and industrial development. This is impossible without the use of behavioral models and appropriate software. Currently, a variety of simulation software has been developed and is used (for example, STOAT, SWAT, WaMDaM, WEAP). It allows modeling the behavior of water resources in different territories and making forecasts of the behavior of water bodies. However, such modeling is quite complicated, not only because of the size of the models, but also because of different modeling approaches. The article reviews the current state of water body simulation software, presents the experience of its use for different water bodies in different countries, discusses the problems that arise during modeling, prospects and development of models and related software for system analysis and decision support in water management. The aim of the review is to facilitate interdisciplinary exchange of experience and to provide incentives for future research on database-based modeling in water resources management.

Keywords: imitation modeling; management of water resources; water supply; software security; analysis; forecasting; planning; STOAT; SWAT; WaMDaM; WEAP.

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В УПРАВЛІННІ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ

Олена В. Груздева, Данило О. Крячков, Роман В. Смотраєв

ДВНЗ Український державний хіміко-технологічний університет, проспект Гагаріна, 8, Дніпрі, 49005, Україна,

Анотація

Водні ресурси у сучасному світі перебувають під антропогенним тиском, який підвищується зі зростанням населення планети та збільшенням господарської діяльності. Тому щохвилинна потреба у воді належної якості може призвести до дефіциту прісної води, що своєю чергою стане загрозою існування людства. Отже, існує нагальна потреба в удосконаленні систем управління водними ресурсами з врахуванням багатьох чинників: сучасних концепцій та підходів до водокористування та очищення стічних вод, прогнозів щодо змін клімату, чисельності населення та розвитку промисловості. Це неможливо без використання поведінкових моделей та відповідного програмного забезпечення. Наразі розроблено та використовується різноманітне програмне забезпечення для імітаційного моделювання (наприклад, STOAT, SWAT, WaMDaM, WEAP). Воно дозволяє моделювати поведінку водних ресурсів на різних територіях та робити прогнози поведінки водних об'єктів. Проте таке моделювання є досить складним, і не лише через розмір моделей, а й через різні підходи до моделювання. У статті розглянуто сучасний стан програмного забезпечення для імітаційного моделювання водних об'єктів, наведено досвід його використання для різних водних об'єктів в різних країнах, обговорено проблеми, що виникають під час моделювання, перспективи і розвиток моделей та відповідного програмного забезпечення для системного аналізу і підтримки прийняття рішень в управлінні водними ресурсами. Метою огляду є сприяння міждисциплінарному обміну досвідом і забезпечення стимулів для майбутніх досліджень з моделювання на основі баз даних в управлінні водними ресурсами.

Ключові слова: імітаційне моделювання; управління водними ресурсами; водозабезпечення; програмне забезпечення; прогнозування; планування; STOAT; SWAT; WaMDaM; WEAP.

*Corresponding author: e-mail: Hruzdievaolena@gmail.com

© 2023 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v31i3.287777

Вступ

Водне господарство України потребує суттєвої модернізації, особливо з огляду на зміну принципів державного управління в галузі використання й охорони вод та відтворення водних ресурсів, яке має здійснюватися за басейновим принципом відповідно до Водного кодексу України [1] та положень Водної рамкової директиви ЄС [2]. У Концепції Загальнодержавної цільової програми розвитку водного господарства [3] передбачено широке коло шляхів і способів модернізації галузі, у тому числі оптимізація використання водних ресурсів на об'єктах промисловості, сільського і житлово-комунального господарства. Пропонується розробити та впровадити комп'ютерні технології водорозподілу, управління водокористуванням і охороною вод. Це допоможе в розробці планів управління річковими басейнами та заходів щодо забезпечення сталого функціонування водогосподарської галузі країни. Водночас наразі у світі для оптимізації процесів управління водними ресурсами, водопідготовки, очищення стічних вод та контролю водних балансів використовують методику імітаційного моделювання з використанням різного програмного забезпечення. Дослідники часто використовують їх для вирішення проблем, які виникають зараз і в майбутньому. Вони також використовуються для моделювання розвитку систем функціонування як окремих водойм, так і великих басейнів у багатьох країнах по всьому світу, таких як США, Греція, Індія, Казахстан, Канада, Індонезія, Нігерія, Україна та інші. До того ж постійно проводиться робота з порівняння різних підходів імітаційного моделювання та програмного забезпечення для аналізу водогосподарських проблем водних басейнів, ефективності їх використання в залежності від різних факторів впливу та особливостей водойм і, в решті решт, підлаштування обраної моделі до розв'язання конкретної проблеми. Тому вкрай необхідним є знання стану сучасного розвитку імітаційних моделей, поєднання результатів їх впровадження для управління водними ресурсами, розв'язання проблем та планування поведінки водних об'єктів.

Мета дослідження - розглянути сучасний стан імітаційного моделювання водними ресурсами, перспективи та розвиток моделей,

а також відповідне програмне забезпечення для системного аналізу та підтримки процесу прийняття рішень у сфері управління водними ресурсами. Крім того, мета дослідження полягає в тому, щоб стимулювати майбутні дослідження з імітаційного моделювання управління водними ресурсами в Україні та сприяти обміну досвідом між різними дисциплінами.

Методика дослідження

У світовій практиці головні позиції зайняли програми імітаційного моделювання у водній галузі: STOAT, SWAT, WaMDaM, WEAP тощо. Британська програма STOAT та бельгійська SWAT спрямовані на аналіз ефективності процесів очищення води різного походження шляхом удосконалення технологічних схем. Програми WaMDaM та WEAP створені для моделювання процесів управління водними ресурсами. Об'єкти дослідження цих програм: поверхневі водойми (природні та штучні), стічні води, підземні водні горизонти, ґрунти та ін. Основною задачею моделювання є розробка сценаріїв (цілих або окремих стадій), що дозволяють знайти технологічне рішення покращення водопостачання, модернізувати технологію управління водоймами, розв'язувати проблему забруднення поверхневих водойм і підземних горизонтів або контролювати обсяги та якість стічних вод на локальних каналізаційних очисних спорудах (КОС).

Британська програма STOAT (Sewage Treatment Operational Analysis over Time – програма для чисельного моделювання очисних споруд) – динамічна імітаційна модель, яка розроблена у модульній формі та пропонується для динамічного моделювання потужностей очисних споруд [4]. Ця програма активно використовується у світі. Вона має гнучкий графічний інтерфейс, що дозволяє створювати симуляції окремих процесів очищення стічних вод або комплексних робіт з очищення: процесу осадження, рециркуляції, імпорту септиків та ін. [5; 6]. Програма дозволяє розробляти технологічні схеми окремих модулів (відстійників, аераторів тощо) з використанням технології drag-and-drop.

Програма STOAT є інструментом, важливим для розуміння відповідних аспектів системи очищення стічних вод різного походження, оптимізації реакції об'єкта (стічної води) на зміну вхідного навантаження, навантаження об'єкта під час експлуатації процесу (рис. 1).

STOAT надає більше можливостей для модернізації установок очищення води та кращого розуміння нових технологічних рішень у цій сфері, вдосконалення операційного контролю виробництва.

Особливість STOAT – обмін даними з іншими програмами моделювання, використання інтерфейсу COM або стандартизованого інтерфейсу водного сектора OpenMI.

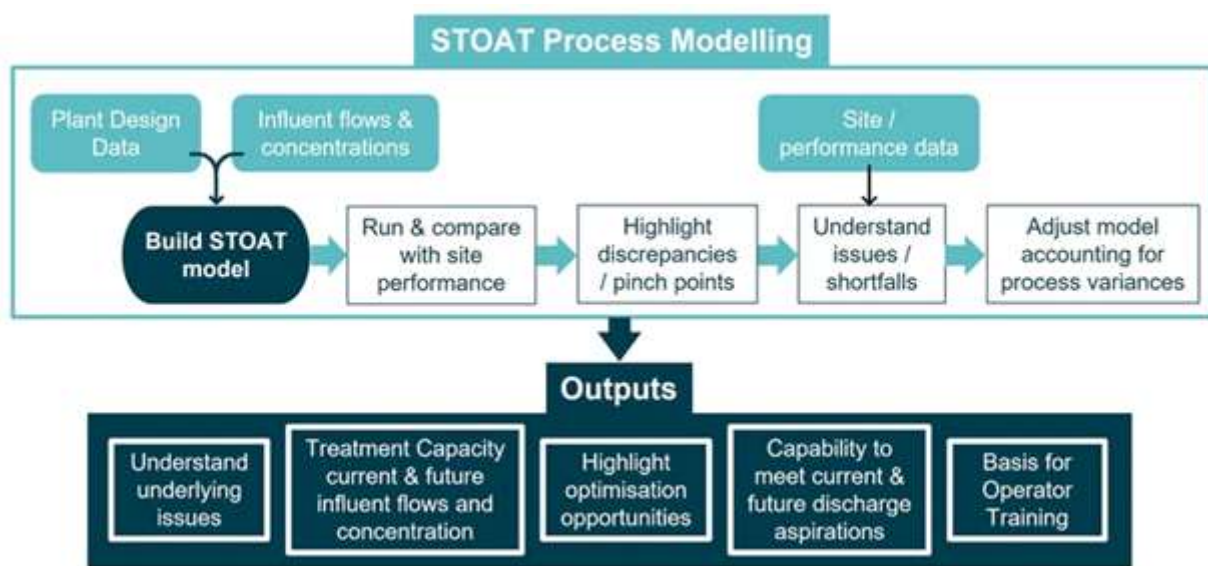


Fig. 1. Scheme of the modeling process in the STOAT program [5]

Рис. 1. Схема процесу моделювання у програмі STOAT [5]

На основі відомих моделей активного мулу ASM1, 2, 2d та 3 будь-яка конфігурація технологічного процесу від простих до складних систем в очисних спорудах може бути відображена та випробувана як для місцевого, так і промислового сектора. STOAT

можна використовувати для оптимізації гідродинаміки водного потоку, потоків енергії та наявних матеріалів або запланованих очисних споруд (рис. 2). Також надані різні можливості подання часової та просторової динаміки.

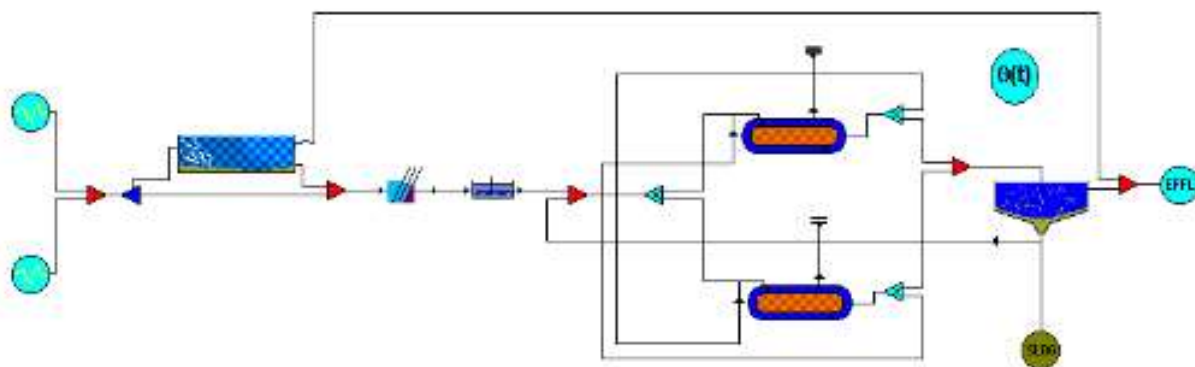


Fig. 2. Classical conditionings with stormwater overflow and activated sludge tank

Рис. 2. Класичний процес кондиціонування з переливом та резервуаром з активним мулом

Серед додаткових можливостей STOAT – простий експорт даних у зовнішні електронні таблиці; зберігання всіх результатів у відомому форматі бази даних .mdb; відображення в реальному часі будь-яких процесів під час симуляції (наприклад, обсяги наповнення, концентрація фосфатів, зважені речовини та ін.); функція "У симуляції – Звіт";

широкі можливості калібрування моделей ASM та ADM [6].

У роботі [7] показані можливості моделювання процесів очищення стічних вод за допомогою різних обчислювальних програм, що значно полегшують проектування установок з очищення стічних вод. Розглянуті програмні пакети (BioWin, GPS-X, Aqua designer тощо), які використані

для моделювання процесів очисних споруд та показано, що поєднання із STOAT значно розширяє можливості цих програм. Але автори роботи зауважують, що така концепція моделювання процесів потребує подальшого тестування, а також необхідних удосконалень вже наявних моделей для моделювання очисних споруд. Авторами проведені дослідження процесу очищення стічних вод з урахуванням обчислювальної гідродинаміки. Це дало змогу покращити характеристики водного потоку очисних станцій. Одночасно досліджувались біологічні, фізичні та хімічні характеристики потоку.

Іншими авторами [8] STOAT був використаний для прогнозування продуктивності очисних споруд з використанням параметрів біологічного та хімічного споживання кисню (БПК та ХПК). Результати моделювання процесу водовідведення реалізовані на очисній станції у промислових зонах 1 та 7 комплексу Джабабека (Індонезія). Результати випробувань показали, що ефективність очисних станцій Джабабека за параметрами БПК, ХПК та загального вмісту завислих речовин (ЗВЗР) підвищилась до 90 %, 93.02 % та 96.12 % відповідно.

Імітаційна безоплатна програма STOAT допомогла дослідникам [9] провести динамічний аналіз роботи очисних споруд Єгипту з урахуванням 5 параметрів стічних вод (БПК, ХПК, ЗВЗР, розчинений кисень та рН). Також авторами побудована модель для всієї очисної станції з урахуванням щоденного об'єму стічних вод протягом року за наявності тимчасового гідравлічного навантаження. Проведена оцінка ефективності моделювання за допомогою STOAT у прогнозуванні ефективності очисних споруд з мінімальними зусиллями та витратами.

Найпоширеніша у світі та в Україні програма, яка використовується для імітації якості та кількості поверхневих та підземних вод, прогнозування їх впливу на ґрунти, методів управління земельними ресурсами та вплив цих змін на довкілля та зміни клімату – SWAT (Soil and Water Assessment Tool – Інструмент оцінки ґрунту та води). Завдяки ефективності у прогнозуванні її використовують для управління водними ресурсами у різних гідрологічних дослідженнях. Програму легко використовувати як для невеликого сточища, так і для великого водозбірного басейну з інтервалом часу від одної доби до року [10;

11]. SWAT може інформувати користувача про гідрологічні процеси, що відбуваються із водним балансом або потоком води, що потрапляє в гідрологічну систему. Її можна використовувати для прогнозування впливу землекористування на навколишнє середовище та на воду, на зміни клімату.

З метою моделювання гідрологічних процесів SWAT спочатку ділить басейн на суббасейни, а потім – на менші одиниці, які можуть самостійно існувати та не залежати від землекористування, ґрунтів та характеристик схилу (рис. 3). SWAT окремо оцінює стік для кожної водної системи, що може самостійно існувати, а потім оцінює загальний стік всього водозбірного басейну. Модель SWAT широко використовується для гідрологічних досліджень, досліджень зміни клімату та якості води із врахуванням навантаження поживних речовин, пестицидів та бактерій. Головна особливість моделі SWAT – її здатність працювати на декількох платформах GIS, включаючи ArcGIS, MapWindows (MWSWAT) або QGIS (QSWAT). Також SWAT може бути інтегрована з програмним забезпеченням для моделювання підземних вод Modflow (SWAT-MODFLOW), інтегрованою гідрологічною моделлю, яка поєднує процеси наземної поверхні SWAT із просторово-явними процесами течії підземних вод.

За останні кілька років SWAT зазнав серйозних змін, пов'язаних із вирішенням поточних та майбутніх проблем у моделюванні водних ресурсів, в результаті яких з'явилась повністю перероблена версія програмного забезпечення – SWAT+. Існує багато модифікацій програми SWAT, у тому числі для роботи із підземними водами, наприклад, модифікація GWFLOW для SWAT+. Це виправданий просторово-розподілений метод моделювання запасів підземних вод, тиску підземних вод, потоку ґрунтових вод та потоку/відтоку ґрунтових вод, викачування ґрунтових вод тощо.

З точки зору водних систем викликає цікавість плагін QWET, який вбудовується у програму SWAT. Це плагін QGIS з відкритим вихідним кодом, який є простим у використанні інструментом адаптації користувача та застосування найсучасніших моделей водних екосистем, а також експериментів на основі моделей для досліджень і управління. QWET може виконувати сценарії зміни клімату та навантаження поживними речовинами та

оцінювати їх вплив на окрему водну екосистему.



Fig. 3. Scheme of information processing in the SWAT model [10]

Рис. 3. Схема обробки інформації у моделі SWAT [10]

У роботі [12] українські автори провели налаштування та калібрування програми SWAT для оцінки надходження біогенних елементів з водозбірної території малих річок від розподілених джерел. Тестування проводили як імітацію течії води великої рівнинної річки переважно зі сніговим

живленням. У якості водного досліджуваного об'єкта був обраний водозбір р. Головесні (Україна), права притока р. Десна (басейн Дніпра), яка розташована на території Придеснянської водно-балансової станції (рис. 4).



Fig. 4. The Desna watershed with SWAT-delineated subbasins, gauge's subwatersheds, digital elevation model, river network, and weather stations [12]

Рис. 4. Басейн р. Десна у програмі SWAT-розподілених суббасейнів, підземних басейнів, з цифровою моделлю висоти, річковою мережею і метеорологічними станціями [12]

Початковими даними для SWAT були багаторічні дані спостережень за гідрологічними, гідрогеологічними й метеорологічними параметрами водозбору р. Головесні. Калібрування, валідацію моделі та аналіз невизначеності виконували з використанням програми автокалібрування SUFI-2 в пакеті SWAT-CUP. Ефективність моделювання оцінювалася авторами на підставі коефіцієнта Неша-Саткліфа, коефіцієнта детермінації (R^2), процентного відхилення і нормалізованого квадратного кореня похибки моделі. Додатково виконано моделювання водного стоку у різні фази водності та оцінено надходження з ним сполук нітрогену і фосфору.

Для калібрування моделі використані стоки річок (12 контрольних точок), висота снігового покриву (13 станцій), прості дані, що включали графічно-визначений поверхневий стік і дані MODIS по евапотранспірації. Авторами запропоновано блок-схеми калібрування разом із детальним описом вихідних даних, що допоможе у моделюванні потоків води для вододілів, які залежать від танення снігу.

Авторами [12] встановлено, що модель SWAT може бути використана для вододілу р. Десни для розрахунку транскордонного переміщення води, визначення оцінки ризиків повеней і проведення досліджень зі зміни клімату. Статистичні дані (R^2 , NSE, PBIAS) показали хороші результати ($NS > 0.7$, $R^2 > 0.75$, $PBIAS < \pm 10\%$) для більшої частини датчиків і задовільний для всіх ($NS > 0.5$, $R^2 > 0.6$, $PBIAS < \pm 15\%$), за винятком двох. У статті показано, що запропонована модель може бути використана для оцінювання потрапляння біогенних елементів із дифузійних джерел в процесі підготовки планів управління річками, а також розробці програми щодо запровадження заходів для зменшення забрудненості водних екосистем. Авторами зауважують, що їх робота забезпечує основу для подальших досліджень водних ресурсів, впливу зміни клімату та питань якості води.

Моделювання водозбору Алі Ефенті у басейні річки Піньюс (Греція), проводилось авторами [13] за допомогою двох різних підходів: концептуальної моделі, що заснована на водних балансах, системи оцінювання води та планування (WEAP) та SWAT. Симбіоз цих програм був обумовлений складним становищем водозбору Алі Ефенті, який страждає від сезонного дефіциту води

через швидке збільшення водокористування в літні місяці, що здебільшого пояснюється місцевим зрошенням сільськогосподарських угідь. Обидві моделі налаштовані, відкалібровані та підтверджені за допомогою водних потоків, за якими велось постійне спостереження. У дослідженні поєднані сильні сторони двох моделей з метою розробки ефективних та всебічних заходів щодо попиту на міський, туристичний, промисловий та сільськогосподарський сектор для досягнення стійкого управління водою в водозбірному басейні.

Інтеграцію двох моделей SWAT та WEAP також використовували автори [14] для моделювання кількості води в басейні річки Гоншуй (Китай)(HRB) з метою оцінки наслідків зміни клімату на гідрологічний цикл. Авторами зазначають, що гідрологічний цикл відіграє значну роль у житті мешканців нижче за течією басейну. Для генерації потоку у моделі SWAT використані щомісячні опади та температури, що спостерігались на території. Розглянуті чотири сценарії опадів у чотирьох Репрезентативних Шляхах Концентрації (Representative Concentration Pathways (RCPs)) та п'ять глобальних моделей циркуляції повітряних мас (Global Circulation Models (GCMs)). Дані потоку за 1991–2001 роки використані для калібрування та перевірки даних, а період 1991–1997 рр. використовували для калібрування періоду 1998–2001 років з метою контролю та перевірки. Розглянуті шість сценаріїв оцінки поведінки водного басейну від соціально-економічного втручання. Результати сценаріїв показали, що опади та річковий стік, імовірно, у майбутньому трохи збільшаться. Відповідно наявних водних ресурсів басейну річки Гоншуй (Китай) буде достатньо для задоволення потреб мешканців до 2050 року. Результати дослідження показали, що не існує дефіциту води, обумовленого соціально-економічними факторами, слабкими та середніми кліматичними змінами, проте басейн Гоншуй зазнає дефіцит води від сильних змін клімату – сценарій змін клімату (RCP-8.5). Дослідження авторів показало, що для забезпечення стійкості водних ресурсів в басейні річки Гоншуй необхідно впроваджувати довгострокову політику управління, яка зможе задовольнити майбутні потреби води мешканців нижче за течією.

Комбінацію імітаційних моделей SWAT та WEAP також ефективно використовували

автори [15] для управління та розподілу водних ресурсів у басейні р. Хейблруд (Іран). Автори підкреслюють, що такий комплексний підхід (комбінацію різних моделей) необхідно використовувати особливо за наявності обмежених водних ресурсів та переправлення їх споживачам. Автори змодельовали попит та пропозицію у басейні р. Хейблруд та оцінили різні сценарії управління водоймами (водотоками), що розроблені у SWAT для кожного суббасейну. Модель SWAT відкалібрована та перевірена з використанням місячної витрати води на виході з басейну в період 1998–2012 рр. Калібрування, валідацію моделі та аналіз невизначеності виконували з використанням програми автокалібрування SUFI-2 в пакеті SWAT-CUP.

Також розглянуті вхідні дані для моделі WEAP та отриманий відсоток задоволення попиту у поточній ситуації для кожного вузла попиту. Автори використовували модель WEAP для схематичної конфігурації системи водоймищ та водотоків басейну р. Хейблруд, де відображені основні вузли попиту: дамби, міста, підземні води, потоки витрати води. Результати розрахунків: коефіцієнт детермінації (0.80), коефіцієнт ефективності Неша-Саткліфа (0.71), середньоквадратична похибка (1.81) та ефективність моделі (0.89) автори схарактеризували як «хороші».

Результати показали, що сільськогосподарські угіддя Фірозкоухської та Гармсарської гідромеліоративних мереж у басейні Хейблруд відчуватимуть дефіцит води, особливо у теплі місяці року. Таким чином, для врівноваження попиту та пропозиції води необхідно розглядати такі сценарії як зміна структури посівів, скорочення посівних площ, скорочення кількості води на душу населення у міських та сільських вузлах споживання, підвищення ефективності зрошення та комбіновані сценарії.

Подібну комбінацію імітаційних моделей SWAT та WEAP використовували автори [16] для моделювання річкового стоку в умовах зміни клімату та оцінки сценаріїв доступності води у майбутньому в різних соціально-економічних умовах до 2060 р. Автори розглядали поведінку водозбору Kikuletwa і Ruvu у верхній частині басейну річки Пангани (Танзанія). Для аналізу використано 13 дощових станцій. Критеріями, використаними для їх вибору, були добрий просторовий розподіл, невеликий відсоток відсутніх даних

та одночасні дані. Довжина запису даних варіювалася від станції до станції, до того ж одночасний період припадав на 1972–1990 рр. Основними водоспоживачами, що можуть конкурувати у басейні р. Пангани, автори відмітили: побутові потреби, зрошення, тваринництво та гідроенергетика. Модель WEAP використана для моделювання розподілу води на основі обраних потенційних майбутніх сценаріїв водокористування. Автори змодельовали 5 сценаріїв у WEAP: вплив зростання населення; розширення площі зрошення; вплив зростання поголів'я худоби; максимальне використання гідроенергетики; зміна клімату.

Для гідрологічного моделювання річкового басейну автори використовували SWAT. Для калібрування програми був обраний період з 1975 по 1980, а період з 1981 по 1987 – для валідації. В результаті аналізу чутливості визначили 12 чутливих параметрів SWAT, які потім були оптимізовані.

За допомогою моделювання у двох програмах автори показали, що очікується підвищення температури в середньому на 2 °C до 2050-х років стосовно базового періоду. Очікується, що середній багаторічний стік води збільшиться приблизно на 10 %. Водночас загальний річний попит на воду в басейні р. Пангані збільшиться з 1879 р. до 73 млн м³ у 2011 р. до 3249.69 млн м³ у майбутньому (2060-ті роки), внаслідок чого спостерігатиметься незадоволена потреба у 1673.8 млн м³ (51.5 %). Показано, що вплив майбутнього дефіциту буде серйознішим в умовах інтенсивної іригації – 71.12 % майбутнього попиту не буде задоволено. Це збільшить тиск на попит на воду через збільшення незадоволених потреб, особливо для зрошення. Майбутні потреби у воді гідроенергетики та тваринництва залишаться незадоволеними на 27.47 та 1.41 % відповідно. Однак побутове водокористування не відчуватиме дефіциту. Автори показали, що такі дані обов'язково вимагають планування поточного та майбутнього використання поверхневих вод у верхньому басейні р. Пангані.

Модель WaMDaM (Water Management Data Model – модель даних управління водними ресурсами та допоміжні програмні інструменти) – дозволяє розробникам організувати та запитувати, порівнювати та надавати дані управління водними ресурсами декількох систем в одному місці

(майданчику). Отже, це відкрита база даних з управління водними ресурсами, яка дозволяє організувати тимчасові ряди, мережі, сценарії, ряди з декількома атрибутами [17; 18]. Модель реалізована як реляційна база даних та набір програмних інструментів. Використовує контекстні метадані, що описують водне джерело, контрольовані словники та допоміжні програмні інструменти для організації та зберігання даних управління водними ресурсами з кількох джерел і моделей (рис. 5) і дозволяє користувачам легше взаємодіяти з її базою даних.

Дослідники [17] створили п'ять варіантів використання моделі (сценаріїв) із тринадцятьма наборами даних і моделей, що зосереджені на вододілі р. Беар-Рівер (США). Визначено 5 сценаріїв:

1) пошук раніше введених наборів даних у базу WaMDaM з метою розширення моделі на більшу область дослідження;

2) створення просторової конфігурації та мережевого зв'язку природних і інженерних компонентів системи;

3) порівняння отриманих даних з метою допомоги користувачеві обрати перевірені дані;

4) порівняння змін в топології мережі, метаданих і значеннях даних сценаріїв;

5) надання вибраних даних для запуску моделі WEAP.

Автори показали, як користувач може ідентифікувати, порівнювати та обирати з кількох типів даних, мереж, елементів сценарію, а потім подавати дані в моделі. Після створення моделей (сценаріїв), дослідники відстежували зміни топології та даних у мережах без дублювання інформації, що дозволило порівняти створені моделі (сценарії).

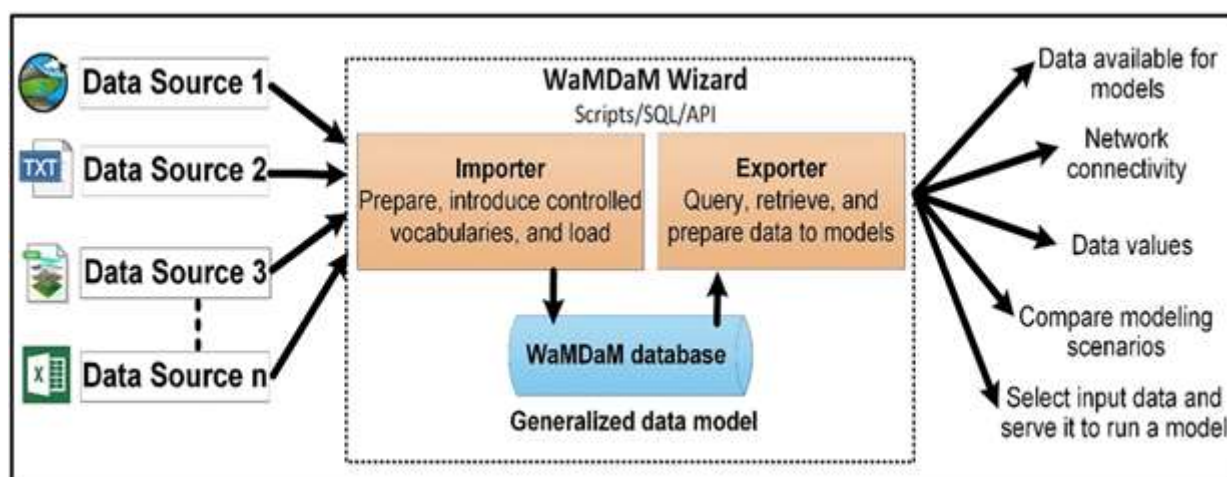


Fig. 5. Combining different metadata, supporting software products with the WaMDaM model [17]
Рис. 5. Поєднання різних метаданих, допоміжних програмних продуктів з моделлю WaMDaM [17]

У статті [18] розглянуті загальні компоненти чотирьох наявних інструментів для зберігання даних, веб-візуалізації та організації сховища, а також шляхи правильного поєднання їх у синтаксисі та семантиці. Автори показують, що об'єднання інструментів у найсучаснішу екосистему програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом дозволяє порівнювати наслідки зростання чисельності населення та збереження води в програмах моделювання та оптимізації. Як досліджувані об'єкти обрано вододіл р. Беар-Рівер (США) і р. Монтеррея (Мексика), які мають різне просторове покриття та міські й сільськогосподарські представництва.

У роботі були об'єднані чотири програмних фреймворки WaMDaM, Hydra Platform, OpenAgua й HydroShare в одну екосистему програмного забезпечення для того, щоб дозволити розробникам моделей зберігати, редагувати, запускати сценарії, візуалізувати та публікувати онлайн дані систем водних ресурсів. Це полегшує експорт даних моделі з одного компонента в інший, для надання користувачам доступу до функцій інших компонентів системи, дозволяє порівнювати моделі імітації та оптимізації для однієї області моделювання.

Модель даних управління водними ресурсами (WaMDaM) пропонує дослідникам необхідні метадані та використання контрольованого словника, щоб забезпечити

можливість запиту даних і порівняння між моделями та наборами даних [17].

Платформа Hydra дозволяє користувачам кодувати та передавати дані моделювання систем через Інтернет, використовуючи підхід вебсервісів.

OpenAgua – це вебпрограма, яка використовує платформу Hydra, щоб дозволити користувачам спільно візуалізувати та редагувати модельні мережі.

HydroShare дозволяє дослідникам публікувати та знаходити набори даних, які пов'язані з водою, і результати моделювання.

Така екосистема програмного забезпечення покликана допомагати розробникам моделей використовувати найкращі функції окремих програмних інструментів, щоб відповісти на запитання наступного покоління щодо управління водними ресурсами.

Нині різними дослідниками все частіше пропонується використовувати систему імітаційного моделювання WEAP ("Water Evaluation And Planning" system – система управління та планування водних ресурсів) для створення сценаріїв попиту на водні ресурси, правил використання ресурсів,

визначення переваг перекидання води, управління відбором води з поверхневих вод і постачання підземних вод до споживача. Таке імітаційне моделювання процесів управління водними ресурсами орієнтоване на широке коло користувачів та може охоплювати питання водопостачання різних галузей (таких як сільське господарство, промисловість, енергетика і муніципалітети), санітарію, очищення стічних вод і зниження ризику катастроф, пов'язаних з водними ресурсами.

WEAP розроблена Стокгольмським інститутом навколишнього середовища [19]. За вимогами дослідників та часу відбувається постійна модернізація програми за підтримкою Гідрологічного інженерного центру Інженерного корпусу армії США, ООН, Всесвітнього банку, USAID та Глобального інфраструктурного фонду Японії. WEAP застосована для оцінки води в Греції [13], Китаї [14], країнах Центральної Азії [17], Африці [16; 20–23], Сполучених Штатах [18], Ізраїлі [24], Індії [25; 26; 32; 36], Колумбії [27], Ефіопії [28], Перу [29], Великобританії [33], Ірландії [34] та ін. (рис. 6).



Fig. 6. Location of river basins where WEAP has been applied for official studies [19]

Рис. 6. Розташування басейнів річок, де був застосований WEAP для офіційних досліджень [19]

Інтегрований підхід WEAP надає комплексну оцінку проблем водокористування та дозволяє розробляти сценарії за такими напрямками:

- зміни у водокористуванні (моделювання витрат води, попиту) в ході зростання або

зменшення кількості населення і моделі економічного розвитку;

- наслідки, що можуть відбуватись під час зміни регулювання користування водойми або розподілу пріоритетів між декількома споживачами та сферами, що конкурують,

зادля ефективного розподілу водних ресурсів;

- планування на базі масового водного балансу основних джерел попиту і ступеня забруднення навколишнього середовища для кожного вузла й ланки в системі;

- зміни у водокористуванні в результаті змін сільськогосподарських культур, що вирощуються;

- аналіз стратегії адаптації для знаходження компромісу між розподілом водних ресурсів, який надає пріоритет навколишньому середовищу, та продовольчою безпекою в умовах мінливого клімату та землекористування;

- наслідки й навантаження на навколишнє середовище, що можуть відбуватись в результаті зміни рівня ґрунтових вод;

- наслідки, що можуть відбуватись в процесі змін якості води у поверхневих джерелах;

- наслідки, що можуть відбуватись після імплементації програми оборотного водопостачання на виробництві або технологій очищення стічних вод;

- наслідки для гідрологічної системи водойми у випадку зміни клімату;

- розвиток водного басейну на основі різних гідрологічних, технологічних, економічних, демографічних тенденцій.

Результати та їх обговорення

Програма WEAP використана авторами [30] для розв'язання проблем із водопостачанням у місті Йоганнесбург (Південна Африка), якому загрожує дефіцит води через швидку урбанізацію, економічне зростання, високе споживання води та соціально-економічні проблеми, що спричинені колоніальною системою. Авторами запропонована триступенева методологія збирання дощової води у місті з використанням сценаріїв щодо витрат води та попиту. Ураховані взаємозв'язки соціоекономічної сфери, гідрологічних потреб та водного балансу у Південній Африці. Автори створили та порівняли три сценарії водопостачання для забезпечення регіону водою у майбутньому:

- 1) визначення ділянок збору дощової води;
- 2) кількісна оцінка обсягів стоку до 2050 р.;

- 3) розробка системи підтримки рішень для інтегрованої системи водопостачання. Методологія дослідження проілюстрована на рис. 7.

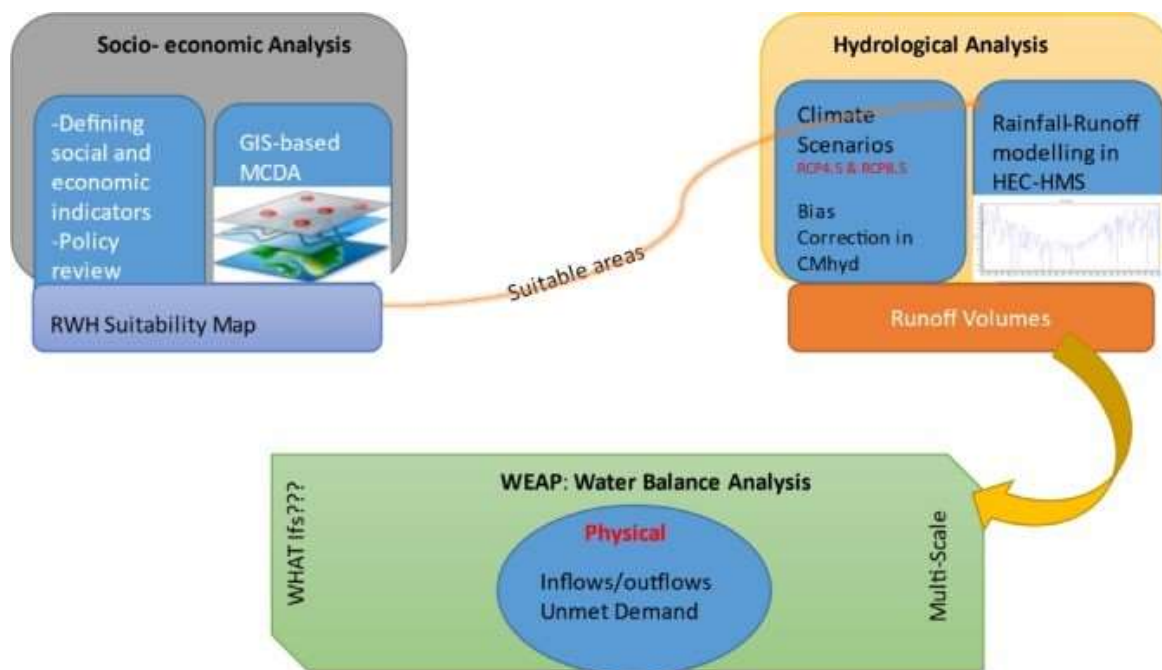


Fig. 7. Modelling framework of rainwater harvesting in the city of Johannesburg

Рис. 7. Методологія дослідження, направленою на збір дощової води у місті Йоганнесбург

Автори звертають увагу на мінливість соціально-економічних показників у Південній Африці, що суттєво впливає на поширення технологій. Результати розрахунків показали, що потреба у воді

лінійно збільшується зі зростанням населення. Тому автори використовували растрово-просторовий метод GIS-MCDA для оцінки потенціалу та придатності збору дощової води в місті Йоганнесбург. Так, за

допомогою сценаріїв WEAP авторами показана ефективність використання дощової води та підземних вод як доповнення до основного водопостачання для задоволення потреби населення у технічній воді.

Додатково дослідники розробили сценарій прогнозування міського водного балансу для оцінки його безпеки до 2050 р. У сценарії карта придатності дощової води може враховувати різні соціальні та економічні перешкоди, які зменшують шанси на підвищення продуктивності потенційного врожаю. Результати розрахунків довели, що альтернативні джерела води можуть значно покращити безпеку води та зменшити потоки стічних вод.

Дослідження показали, що інтегрована система водопостачання, яку доцільно впроваджувати, може значно скоротити незадоволений попит та в майбутньому покращити водну безпеку в Південній Африці. Система WEAP, що інтегрує міську соціально-економічну динаміку, гідрологію та міський водний баланс, може бути використана для підтримки прийнятих рішень та довгострокового планування адаптивних практик управління водою. Слід зазначити, що методологія та моделі, що використовувалися в цьому дослідженні, можуть бути адаптовані до різних місць та масштабів, враховувати зміни, які можуть виникати на різних територіях. Якщо це буде підтримуватися даними високої якості, моделі можуть надати корисну інформацію та сформувані найкращі адаптаційні заходи для забезпечення безпеки води.

Прогноз на майбутнє до 2050 р. за допомогою WEAP був змодельований авторами [31]. Моделювання виконано для транскордонного водозбірного водосховища Гурара площею 2150 км² в Нігерії (Африка) для оцінки гідрокліматичної мінливості внаслідок зміни клімату та антропогенної діяльності з 1989 по 2019 р. та на майбутнє. Авторі визнали модель WEAP ефективною у визначенні гідрологічних змін водозбору від потенційних впливів зміни клімату та антропогенної діяльності за допомогою будівництва в програмному середовищі кліматичних сценаріїв. Кліматичні сценарії RCP6.5 та RCP8.5 показали вплив зміни клімату на водозбір водосховища, і це стало рекомендацією до влади інвестувати (в межах водозбору) в «рентабельну воду» розробку відповідних методів управління: будівництво водної інфраструктури, будівництво очисних

споруд, налаштування іригаційної системи. Такі міри необхідні, щоб більше використовувати наявні води в сезон дощів, а у сухий сезон – резервуари для її зберігання. Сценарії показали необхідність оптимального використання водних ресурсів водозбору, спрямованого на сталий розвиток та продовольчу безпеку.

У статті [22] автори використовували модель WEAP для моделювання потреби у воді у вододілі р. Лобо (центрально-західний Кот-д'Івуар, західна Африка). Дослідники змодельовали поточну ситуацію водопостачання та попиту на воду та створили кілька сценаріїв для майбутніх потреб і постачання води. Моделювання потреби у воді проведені відповідно до еталонного сценарію з метою розуміння ситуації з поточною системою водопостачання та потреб користувачів на досліджуваній території. Перший і другий сценарії розглядають попит на питну воду у місті та враховують кількість населення на території і витрати води на зрошення у сільському господарстві. У третьому сценарії проведений розрахунок попиту на воду у тваринництві. Ці сценарії змодельовані як на сьогоднішній день, так і на майбутні роки до 2040 р. Моделювання проводилося в декілька етапів. На першому етапі був оцінений рівень задоволення потреб відповідно до альтернатив розвитку. Наступним етапом створили сценарій оптимізації водного господарства, проаналізували можливі шляхи зменшення незадоволеної потреби у воді (рис. 8). Показали, що у базовому сценарії загальна потреба у воді у вододілі р. Лобо оцінюється в $45.8 \cdot 10^6$ м³ у 2016 р., з яких 44 % є потребою в зрошенні рису. До 2040 року ця потреба становитиме близько $92.4 \cdot 10^6$ м³, тобто зросте більш ніж на 100 %. Показано, що це збільшення торкнеться всіх секторів водокористування (побутовий, агроскотарський). Для внутрішнього використання води у місті попит досягне $61.4 \cdot 10^6$ м³ у 2040 р. Агроскотарський попит оцінюється в $31 \cdot 10^6$ м³ у 2040 р. Загалом автори показали, що водні ресурси, які мобілізовані на вододілі р. Лобо, не покривають цих вимог. Розрахунки довели, що на систему водопостачання є величезне навантаження.

Ці результати підкреслюють факт, що імітовані фактори росту на 2040 р. (зростання населення та зрошення землі) в майбутньому чинитимуть дуже великий тиск на сучасну систему.

Прогнози дозволили авторам дати окремі рекомендації щодо потреб, які необхідно задовольнити до 2040 року на вододілі р. Лобо. Автори також звернули увагу на деякі обмеження у застосуванні моделі WEAP до вододілу (недосконалість розрахунку

прогнозування зростання населення та площі зрошувальних земель). Був запропонований сценарій "Поліпшення технологій іригації", який можна реалізувати у сільському господарстві.

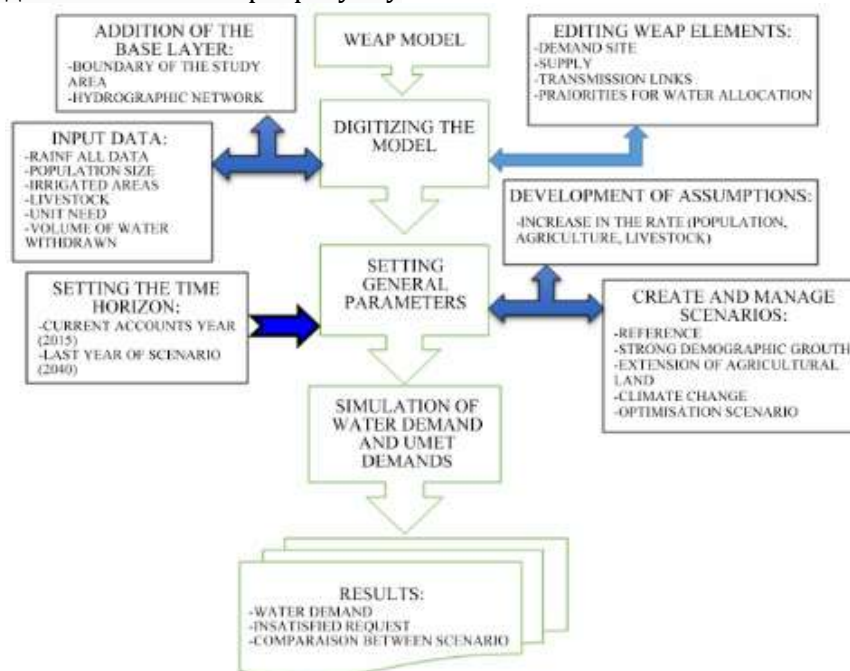


Fig. 8. Modeling steps water supply and demand in the Lobo River watershed in WEAP

Рис. 8. Кроки моделювання водопостачання та попиту у вододілі р. Лобо у WEAP

Особлива можливість WEAP – довгострокове планування водокористування, –реалізоване авторами [32] для басейну річки Дваракешвар-Гандхерсварі (Індія). Розроблено чотири сценарії для різних інтервалів часу (2010–2030–2050–2080 рр.) стійкого управління обмеженими водними ресурсами з використанням наступних програм: динамічного перетворення землекористування та його ефектів (Dyna-CLUE); оцінки ґрунту та води (SWAT); визначення різниці потоків (MODFLOW); створення сценаріїв попиту на водні ресурси (WEAP). Отримані результати моделювання SWAT показали збільшення річкового стоку у 2030 або 2080 рр. і зниження у 2050 р. Результати моделювання MODFLOW показали помітну зміну запасів підземних вод у 2030 р., але мінімальні зміни у 2050 та 2080 рр. За отриманими результатами автори роблять висновок про зменшення сільськогосподарських угідь та збільшення населення на територіях трьох гідротехнічних споруд протягом 2010–2030–2050–2080 років. Отримані дані за допомогою моделей Dyna-

CLUE, SWAT, MODFLOW інтегровані до WEAP. Результати показали наступне:

- 1) дисбаланс між водопостачанням та попитом у сфері сільського господарства та внутрішньої діяльності;
- 2) верхня частина басейну річки потрапляє в умови високого водного стресу;
- 3) нижня частина басейну річки потрапляє під високий міський ріст.

Автори також указали на недолік цього дослідження – проблему дефіциту даних та мале число точок валідації.

Для визначення дефіциту води в регіоні автори [30] за допомогою WEAP провели проектування систем водопостачання та дослідили зміну попиту на воду у сільськогосподарському та побутовому секторах за різними кліматичними та соціально-економічними сценаріями в п'яти водозбірних басейнах Великобританії: Асторе, Гілгіт, Хунза, Шигар і Шйок у період з 2015 по 2050 р. Необхідність дослідження обумовлена великою кількістю населення (1.8 млн), значною чутливістю до кліматичних змін та швидким соціально-економічним зростанням.

Для сценарію зміни клімату використано загальне середнє значення трьох глобальних кліматичних моделей (GCMs) в рамках трьох різних сценаріїв репрезентативної траєкторії концентрації (Representative Concentration Pathway (RCP), RTK2.6, RTK6.0 та RTK8.5). Сценарії «спільні соціально-економічні шляхи» (SSPs) та «розвиток сільськогосподарських земель» (LD) поєднувались із кліматичними сценаріями для розвитку клімато-соціально-економічного сценарію.

Результати розрахунків показали, що зміна клімату та соціально-економічне зростання створюють розрив між попитом і пропозицією води в регіоні. До того ж соціально-економічне зростання (сільського господарства та населення) буде домінантним зовнішнім фактором, який зменшить виробництво їжі та підвищить рівень бідності в регіоні. Серед п'яти водозборів лише Асторе та Гілгіт зіткнуться з нестачею води, в той час як Шійоке зіткнеться з нестачею води лише за умови розвитку сільського господарства. Також автори зауважили, що нестача води, яка виникне у відповідь на клімато-соціально-економічні сценарії, буде зовсім різною для двох

водозбірних басейнів, які зараз відчувають дефіцит води через демографію та географію.

Автор [34] у своїй дисертаційній роботі досліджує можливість розробки інтегрованої моделі управління водою для Дубліна (Ірландія) за допомогою WEAP. У роботі проводили налаштування та параметрування моделі з використанням різних наборів даних з гідрології, попиту на воду, інфраструктури Дубліну та кліматичних даних. Калібрування та перевірку моделі проводили за допомогою даних про використання водних потоків. Використана можливість інтеграції програмного забезпечення WEAP з іншими імітаційними моделями, які оптимізують параметри. Режим атмосферних опадів генерували за допомогою структури просторового узагальненого лінійного моделювання (GLM) та стохастичної бібліотеки клімату (SCL). Для створення стохастичних даних про температуру використовували модель водозбору ріки Рай (Райуотер), що є притокою річки Ліффі.

Автор показує загальну схему міста Дублін (Ірландія) за допомогою GIS системи, що вмонтована у WEAP (рис. 9), на якій відображені відповідні водні потоки.

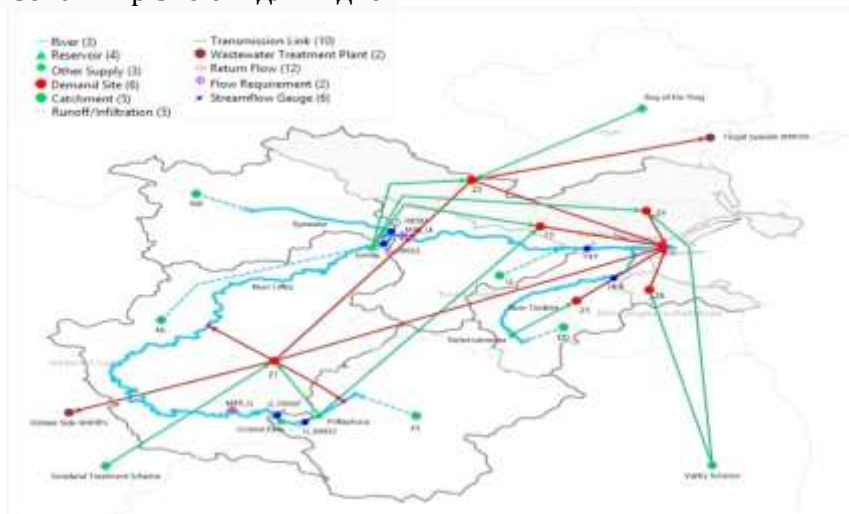


Fig. 9. Diagram of the WEAP – Dublin model with counties (light grey and marked); boundaries of the representative Liffey Underwater Catchments and Dublin Bay (grey); The shaded areas represent parts of the catchment that do not provide water to the city

Рис. 9. Схема моделі WEAP – Дублін з округами (світло-сірий та марковані); межі репрезентативних підземних водозборів Ліффі та затоки Дублін (сірий); заштриховані області – частини водозбору, які не забезпечують водою місто

Синіми лініями представлені річки Ліффі, Доддер та Райуотер; річки та лінії із зеленими вузлами – притоки верхній Ліффі, Середній Ліффі, Нижній Ліффі, Райуотер та Доддер. Гідрологічне сполучення між п'ятьма

підземними водозборами та відповідними їм річками показані синіми пунктирними лініями. Зелені трикутники на Ліффі показують три водойми: Фоллафука, Золотий водоспад і Лексиліп; фіолетові кола

використовуються для унаочнення вимог до потоку нижче водоспадів та водосховища Лейксліп.

У роботі показано, що інтеграція варіантів управління водними ресурсами, таких як збір дощових вод, повторне використання «сірої» води, штучний перерозподіл підземних вод та стабілізація міських систем водовідведення, може призвести до відчутних переваг порівняно з традиційними практиками стосовно зменшення подачі прісноводних ресурсів та збільшення перерозподілу підземних вод.

Досить актуальним для сьогодення є вплив майбутніх змін клімату та людської діяльності на гідрологічний стан територій. Водночас таке прогнозування не можна проводити за допомогою тільки статичного методу чи програмного забезпечення. Зазвичай дослідники використовують різноманітні методи розрахунків у моделюванні та компілюють їх із відомим програмним забезпеченням. Так, автори роботи [35] показали, як зміна клімату або діяльність людини можуть змінити шляхи гідрологічного циклу та вплинути на особливості посухи в басейнах річок. Дослідження проводили на прикладі важливого для центрального Ірану басейну річки Заянде Руд, де домінує сільське господарство та у якому спостерігаються постійні засухи, що мають вже катастрофічну дію. Спочатку в дослідженні були згенеровані місцеві кліматичні дані майбутніх років (2006–2040), (2041–2075) та (2076–2100) за найсуворішим сценарієм (RCP 8.5) в кліматичній моделі CMIP5. Потім оцінювали величину стоку, отриману за допомогою імітаційної моделі WEAP, з урахуванням впливу прямих (кліматичні) та непрямих (водозабір людини) факторів. І нарешті аналізували майбутній прогноз метеорологічної та гідрологічної посухи, який був визначений за допомогою Standardized Precipitation Index (SPI) та Standardized Runoff Index (SRI). Отримані результати не були задовільними, і відповідно автори спрогнозували негативний вплив зміни клімату на режим стоку водозабору для забезпечення життя населення. Отже, автори звертають увагу на те, що необхідно

обов'язково проводити прогнозування потенційного впливу зміни клімату на метеорологічно-гідрологічну посуху, особливо для таких регіонів, як Іран, де прогнозовані впливи зміни клімату рідко досліджуються у плануванні водних ресурсів та при управлінні водними ресурсами.

Аналогічним питанням щодо шляхів адаптації до майбутніх кліматичних та соціально-економічних невизначеностей були стурбовані автори [33], які розробили ітеративний мультиметодний підхід, що містив генерацію сценаріїв із використанням їх у WEAP для басейну річки Кавері в штаті Карнатака, Індія. Модель водних ресурсів WEAP калібрували і перевіряли з використанням річкового стоку, що спостерігався на той період. Ймовірні майбутні зміни в опадах під час пікового сезону літніх мусонів та потреби у воді використовували для моделювання водних ресурсів з 2021 по 2055 рр. Для прийняття рішень вивчали два критичні показники: показник для всього водного басейну, що включав юридичні вимоги до стоку в річище вниз за течією штату Таміл Наду, а також місцевий показник, що включав надійність водопостачання міста Бангалор.

У роботі схематично представлено шляхи адаптації з 2015 по 2050 рр., розроблені під час робочих зустрічей трьома групами зацікавлених сторін: представниками сільського господарства; особами, що приймають рішення в уряді; керівниками промисловості та радою з водних ресурсів (рис. 10). Кожен шлях є комбінацією 17 варіантів адаптацій та заснований на перевагах, які притаманні кожній групі. Шляхи розроблені у відповідь на критичну ситуацію із водними ресурсами за умови зменшення кількості опадів та збільшення міського та сільськогосподарського попиту.

Автори відмічають, що існує тонкий баланс між наявністю води та потребою у ній, і цей баланс особливо вразливий до майбутніх змін та невизначеностей. Тому необхідно реалізовувати різні шляхи адаптації, які можуть частково компенсувати негативні наслідки змін, а своєчасна увага до управління сільськогосподарським попитом підвищить надійність цих шляхів.

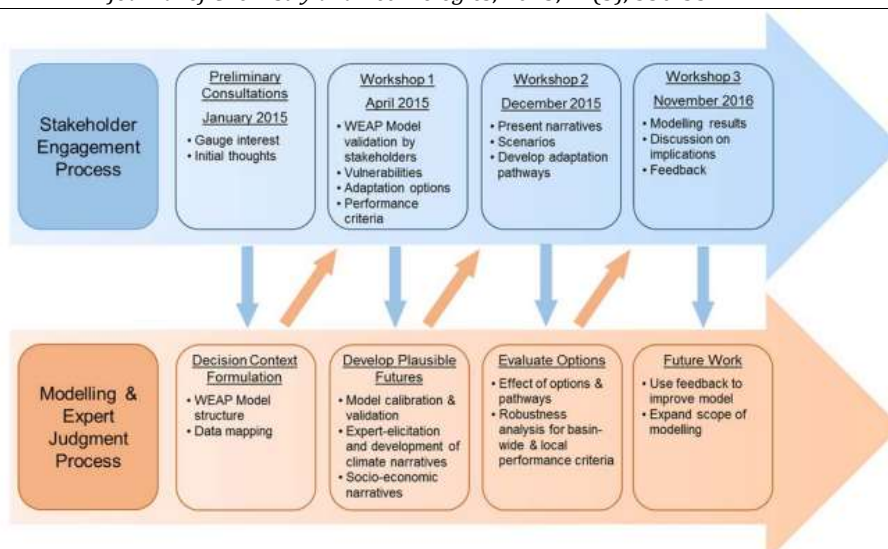


Fig. 10. The iterative steps in the research design showing the sequencing of and linkages between qualitative (stake-holder engagement) and quantitative (modeling and expert judgment) methods [33]

Рис. 10. Ітераційні кроки в дослідному проєкті, який розглядав шляхи адаптації, та показують послідовність і зв'язки між якісними (залучення зацікавлених сторін) і кількісними (моделювання та експертне судження) методами [33]

У дослідженнях авторів [37] оцінювався доступ до води під час зрошення в громаді Анд (Болівія, Південна Америка). Дослідження пов'язані зі значними відмінностями між соціальними та географічними групами: наприклад, рівень бідності набагато вищий у сільських громадах, де умови життя значною мірою залежать від доступу до водних ресурсів. Завдяки аналізу наявних даних автори виявили, що володіння правами на воду та створення пріоритету розподілу є основними критеріями, які контролюють доступ до води в громаді. Відповідно до цих критеріїв потреба у воді розбита на 28 груп, для яких за допомогою WEAP оцінено задоволення потреби у воді. Деякі групи мали покриття потреби у воді менше ніж 20 %, а інші досягли охоплення близько 100 %. Ці відмінності не спостерігались в агрегованій моделі, для якої покриття потреби у воді весь час було понад 60 %. Оцінка сценаріїв зміни клімату у WEAP показала, що покриття потреби у воді зменшується на 15 % протягом сухого сезону. Тому автори вважають, що реалізація запланованих стратегій могла б протидіяти цьому скороченню через збільшення інфраструктури забезпечення та зберігання. Реалізація вказаних стратегій у моделі WEAP показала, що для деяких груп покриття потреби у воді може зрости до 80 %, однак інші групи все ще будуть стикатися з нестачею води. Авторів роблять висновок, що використання методів та інструментів планування водних ресурсів за допомогою правильного управління ними може посилити

чинні підходи до справедливості та підвищити ефективність у скороченні бідності та нерівності.

Сценарії WEAP використані авторами [38] для оцінки впливу розвитку регіону на водні ресурси – взаємопов'язані суббасейни озер Центральної рифової долини в Ефіопії. Розглянуті три сценарії розвитку подій у часі: нещодавній (2009–2018 рр.), короткостроковий (2019–2028 рр.) та довгостроковий розвиток (2029–2038 рр.). З використанням моделі дощового стоку Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV) авторами були оцінені притоки води в озеро Зівай із шести водозбірних басейнів. Потребу рослин у воді для схеми зрошення сільськогосподарської продукції оцінювали за моделлю CROPWAT.

Моделювання у WEAP показало, що річний попит на воду для короткострокового сценарію розвитку подій (2019-2028 рр.) становить 149.4 млн. м³, що відповідає 46% зростанню порівняно з попитом для нещодавнього розвитку (102.3 млн. м³). Якщо всі заплановані довгострокові заходи з розвитку водних ресурсів в регіоні будуть повністю реалізовані, річний попит на воду становитиме 223 млн. м³ і збільшиться у 2,2 рази порівняно з нещодавнім розвитком. Збільшення попиту на воду, у більшій мірі, буде пов'язано зі збільшенням прогнозованої площі зрошення за цей період. Так як річне водопостачання не зможе забезпечити попит на воду для всіх варіантів розвитку, то це помітно вплине на водний баланс

взаємопов'язаних озер та у довгостроковій перспективі (2029–2038 рр.) викличе дефіцит води у розмірі 47.9 млн м³. Автори [38] доводять, що в озерах Зівай та Абіята у майбутньому рівень води суттєво знизиться, що у довгостроковій перспективі викличе брак води, а аналогічні процеси в озері Зівай істотно вплинуть на запаси води у водосховищах озера Абіята. Побудувавши сценарії у WEAP, автори спрогнозували, що майбутні події загрожуватимуть водним ресурсам взаємопов'язаної системи озер.

Програмне забезпечення WEAP вибрано авторами [39] зі Словацької Республіки для перевірки моделювання водогосподарського балансу поверхневих вод в басейні річки Грон відповідно до поточної методології обраної водним господарством країни. Моделювання проводили у період 2000–2019 рр. Акцент зроблено на сумісності чинної методології водогосподарського балансу (ретроспективний водогосподарський баланс кількості поверхневих вод) та методів моделювання у програмі WEAP. Отримана модель управління річковим басейном, що здатна давати результати набагато кращі за наявні. Робота авторів показала, що WEAP може бути простим у використанні інструментом побудови моделей для оптимального та успішного розвитку, планування та прогнозування управління водними ресурсами Словаччини. Підхід, який використали автори, показав можливості WEAP, особливо з точки зору контролю за самою моделлю. Він дає можливість

моделювати річковий стік з високою точністю при любий кількості даних. Однак, автори попереджують, що цей підхід може містити складні елементи управління водними ресурсами, тому дослідники мають бути досить кваліфікованими.

У дослідженні [40] оцінюється ефективність стратегій управління водними ресурсами з упором на використання води у сільському господарстві, промисловості та енергетиці. Авторами розроблені два сценарії WEAP: поточний (2009–2016 рр.) та майбутній (до 2100 р.). Вони визначили рівні водної безпеки з урахуванням соціально-економічних змін та змін клімату басейну Вільканота-Урубамба в південних перуанських Андах. В процесі розробки поточного та перспективного сценаріїв автори використовували особливу методологію, що наведена на рисунку 11. Район дослідження охоплює басейн Вільканота-Урубамба в південних перуанських Андах, і за потребами у воді є комплексною системою, оскільки система живиться шляхом танення льодовиків. Поточна загальна потреба у воді оцінювалась в $5.12 \cdot 10^9$ м³ на рік та включала сільське (6674.17 м³/рік), побутове ($7.79 \cdot 10^7$ м³/рік), промислове ($1.01 \cdot 10^6$ м³/рік) господарства та енергетику ($5.03 \cdot 10^9$ м³/рік). Автори показують, що очікувані результати дозволять вперше оцінити вплив змін у внесках льодовиків на безпеку води, враховуючи також зміни попиту на воду.

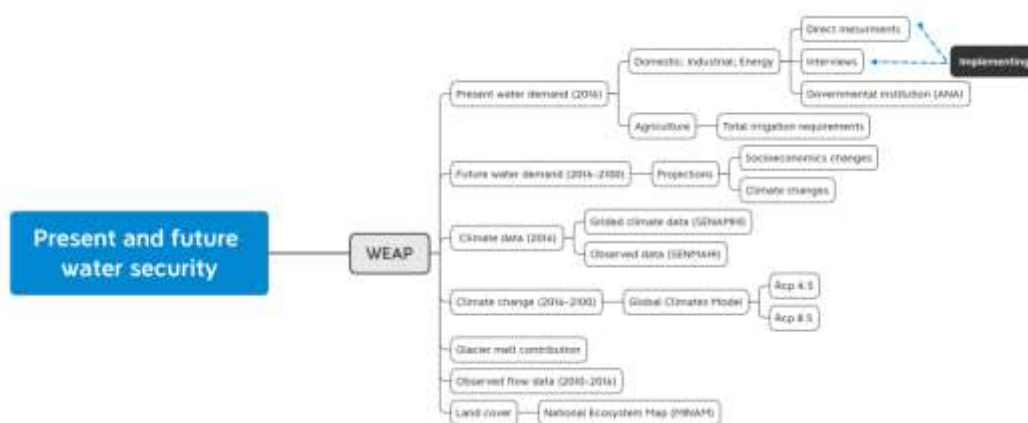


Fig. 11. Methodology of the creation present and future in WEAP.

Рис. 11. Методологія створення поточного та перспективного сценаріїв у WEAP.

Навантаження на використання води та зміна клімату за останні десятиліття призвели до зменшення доступності водних ресурсів у провінції Сетиф (Алжир) [41]. Провінція Сетиф є однією з напівзасушливих

зон у Східному Алжирі та знаходиться в районі нагір'я, тому отримує опади в середньому менше ніж 400 мм·рік⁻¹. Живлення водойм на цій території відбувається переважно завдяки опадам, які

поповнюють поверхневі та карстові водні горизонти. Автори дослідили питання еволюції демографічного тиску та його впливу на водні ресурси. Мета роботи полягала в розробці моделі управління водними ресурсами за допомогою WEAP, оцінці пропорції балансу ресурсів та потреб у воді, аналізі майбутньої ситуації з водою відповідно до різних сценаріїв.

В основу методології досліджень покладене наступне: 2016 р. як базовий для розрахунків; обраний інтервал часу для розрахунків; початкові наближення (рис. 12). Запропоновані чотири сценарії й п'ять гіпотез, в яких економічна, демографічна інформація та водоспоживання використовувались для побудови альтернативних сценаріїв при вивченні змін загального та роздрібного споживання води (рис. 13). Розроблено п'ять математичних виразів та відповідно запропоновано п'ять ключових припущень, які ґрунтувались на збільшенні кількості населення, зміні клімату, забезпеченні та вдосконаленні розподільних мереж. Перша гіпотеза ґрунтувалась на стрімких темпах приросту населення (3.5 %). Друга – на зниженні кількості опадів на 10 % зафіксовані Національним агентством водних ресурсів за останні 20 років). Третя гіпотеза ґрунтувалась на зменшенні втрат води на 20 %, четверта спиралась на дані Міністерства водних ресурсів щодо норм витрат води на одну людину, яка становила 120 дм³ на добу, п'ята враховувала збільшення норм витрат води на одну людину до 150 дм³ на добу.

Такий підхід дозволив виявити найбільш слабкі місця в забезпеченні потреб у питній воді та залежність утворення стічних вод від кліматичних та антропогенних навантажень. Показано, що водні ресурси, у тому числі підземні, експлуатуються неефективно, і це призводить до незадоволеного попиту у всіх місцях регіону Сетиф. Так, автори показали, що потреба у воді високогірного регіону залежить від багатьох факторів, а саме: демографічних, соціальних, кліматичних та економічних. Ці фактори призводять до дестабілізації водних ресурсів, наслідком чого є нестача води в агломераціях та збільшення скидів стічних вод за відсутності адекватної каналізаційної мережі, яка функціонує тільки в окремих агломераціях. Збільшення скидів стічних вод може викликати змішування вод доброї та поганої якості у середньостроковій та довгостроковій перспективах. Таким чином, стійке управління водними ресурсами є складним завданням, якщо регіон страждає від нестачі води й відчуває висхідний антропогенний попит на воду.

У дослідженні [42] сценарії WEAP використовували для оцінки впливу попиту та пропозиції води на водні ресурси річки Нижній Інд в провінції Сінд (Пакистан) як для сьогодення, так і на майбутні роки. Це обумовлено тим, що басейн Нижнього Інду – один із найпосушливіших регіонів Південної Азії та має різні види водокористувачів: села, міста, натуральне та комерційне зрошуване землеробство.

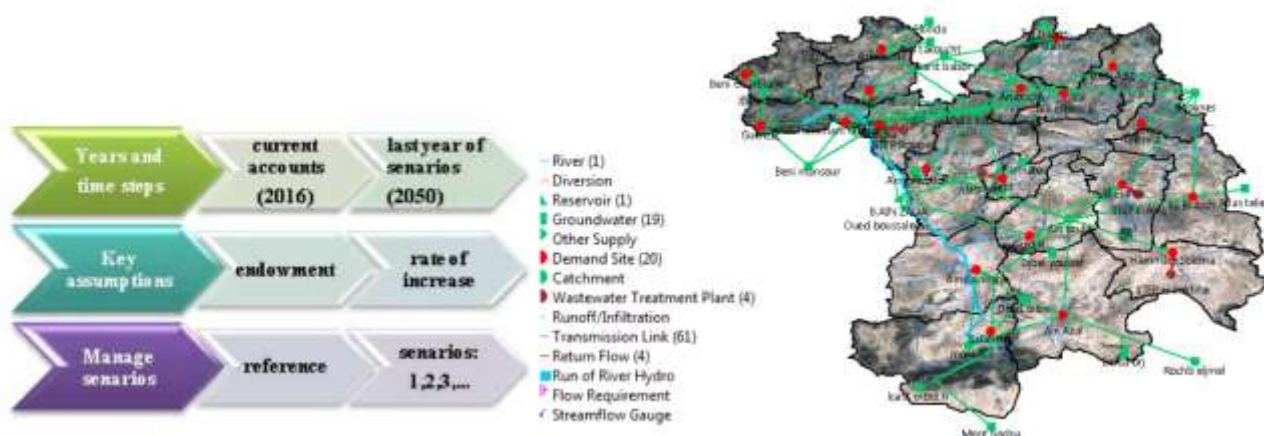


Fig. 12. Methodology and final diagram of scenario building in WEAP for building a scenario of the impact of population on water resources in the province of Setif

Рис. 12. Методологія та кінцева схема побудови сценаріїв у WEAP при побудові сценарію впливу кількості населення на водні ресурси провінції Сетиф

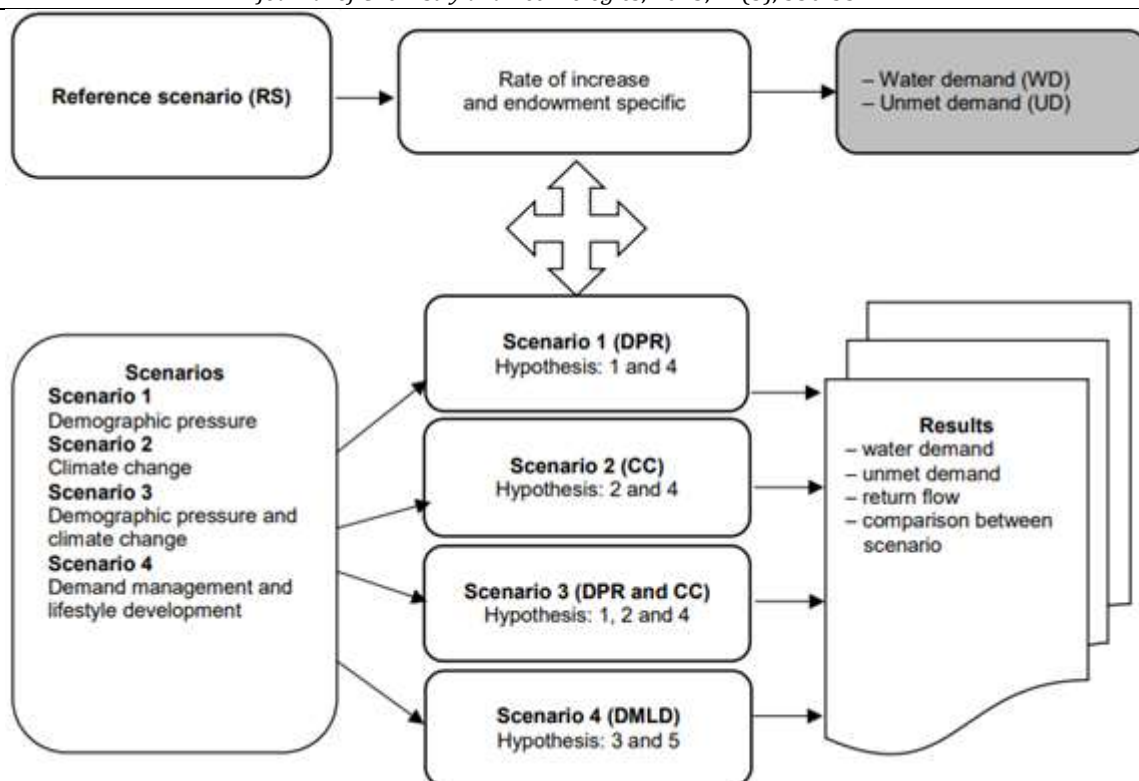


Fig. 13. Organization chart of building scenarios and hypotheses for solving water problems in Setif province in the WEAP model

Рис. 13. Організаційна схема створення сценаріїв та гіпотез для вирішення водних проблем у провінції Сетиф у моделі WEAP

Але, на відміну від інших провінцій Пакистану, провінція Сінд не має альтернативних водних ресурсів. Таким чином вона повністю покладається на водний потік, доступний з Нижнього Інду. Відповідно, зростання населення, зміна клімату, брак чистої води й необхідність дотримання мінімальних вимог до стоку спонукає до майбутніх конфліктів у галузі управління водними ресурсами в регіоні. Для розв'язання цієї проблеми дослідники вирішили оцінити здатність водозбору задовольняти потенційні потреби у воді з метою оптимізації планування та прийняття розумних рішень щодо використання та розподілу води. Створені сценарії WEAP порівнювалися із базовим сценарієм 2015 р. Проаналізований попит на воду та оцінена надійність цих сценаріїв, що допомогло зрозуміти потенційні проблеми та розробити стратегії управління водними ресурсами.

Результати WEAP показали, що за умови збереження нинішніх темпів зростання потреб у воді потреба провінції Сінд у 2050 р. збільшиться до 56.6 одиниць (на 7.84 більше за попереднє). Оскільки провінція Сінд не може збільшити подачу води, вона повинна застосовувати будь яку стратегію водозбереження. Автори запропонували три

стратегії водозбереження для сільського господарства: сплінкерне зрошення (дощування); крапельне зрошення; прокладання іригаційних каналів та створили для них сценарії у WEAP. Результати розрахунків показали, що система спринклерного зрошення економить 35 % сільськогосподарської води; система крапельного зрошення економить 25 %; прокладання каналів може зменшити втрати на просочування на цілих 50 %.

Аналогічні проблеми спостерігались у басейні річки Мара (Кенія), де конкурентне використання збільшило потребу у воді, що негативно вплинуло на річку та викликало необхідність у моделюванні водоспоживання за допомогою WEAP [43]. У дослідженні було заплановано оцінку різних методів та стратегій для пом'якшення практики надмірного споживання води у річці Мара. Для цього водокористування та ресурси в басейні були кількісно визначені та нанесені на карту відповідно до їхнього поточного та майбутнього стану. Моделювання сценаріїв здійснювали до 2045 р., взявши 2010 р. як базовий.

Розрахунки проводили з урахуванням стійкого зростання кількості населених пунктів у басейні й перетворення лісових і

пасовищних земель на ферми. Моделювання потреби у воді та ресурсів басейну річки Мара показало, що у майбутньому басейн відчуватиме збільшення навантаження на свої ресурси: воду та землю. Запропоновані сценарії показали, що посилення впровадження водної політики та підвищення обізнаності у поєднанні зі стратегіями управління попитом допоможуть підтримати водні ресурси в басейні на постійному рівні. Однак у посушливі сезони необхідно приймати відповідні рішення щодо зменшення навантаження на річку. Результати моделювання показали, що поточні проблеми у басейні річки Мара можна пом'якшити лише за допомогою комплексного підходу до водоспоживання. Такий підхід можна використовувати також у випадку зростання населення, мінливості клімату та розширення економічної діяльності щодо іригації.

Вплив зростання населення Лівану, включаючи ліванців, палестинців та сирійських біженців, разом зі зміною клімату поставило водні ресурси долини Бекаа у небезпечне становище та обумовило використання імітаційного моделювання водних ресурсів [44]. З метою контролю наявної ситуації дослідники створили у програмі WEAP базовий сценарій (стан басейну у 2013 р.) для оцінки стану водного балансу без виконання додаткових дій щодо його покращення. Базовий сценарій показав незадоволений попит, що зростає, зменшення обсягу підземних вод і річкового стоку, а також погану якість річкової води, яка з часом буде погіршуватись. Створили п'ять спеціальних сценаріїв для оцінки ефектів від впливу низки поліпшень (покращення якості води, підвищення ефективності водопровідної мережі та контроль забору підземних вод), які порівнювались з еталонним сценарієм. Сценарії створювались з метою кількісної та якісної оцінки водних ресурсів, які відчували значний стрес, що обмежувало доступність води й погіршувало її якість у басейні річки Верхня Литані у долині Бекаа (ULRB). Щомісячний річковий стік оцінювали за допомогою моделювання вододілу. Сценарії розраховували забезпеченість водотоків у невимірюваних зонах річки Верхня Литані та її притоку. Автори мали мету дослідити комплексне управління водними ресурсами під впливом зміни клімату, зростання населення та погіршення якості води в басейні цієї річки.

Щоб досягти збалансованих стійких водних ресурсів, по-перше, використано моделювання декількох моделей глобальної циркуляції (GCMs), які використовували для прогнозування майбутніх змін клімату. По-друге, для оцінки водного балансу в басейні річки Верхня Литані використовували програму WEAP. За допомогою WEAP автори планували передбачити майбутній стан водного ресурсу, побудувавши сценарії розрахунку зменшення негативних наслідків зміни клімату та зростання населення, щоб забезпечити майбутній водний баланс і чистоту води в межах цільової території.

Побудований сценарій прогнозування майбутнього клімату до 2100 року показав критичну ситуацію – кількість опадів зменшиться приблизно на 87 мм з 2013 по 2095 рік. Це відповідає середньому зниженню кількості опадів приблизно на 0.23 % на рік. Зроблено висновок, що в майбутньому басейн Верхньої Литані зіткнеться з посушливішим кліматом, що призведе до невдоволення потреб у воді та погіршення запасів води. Підкреслюється необхідність зменшення забруднення води, що обмежує доступність придатних для використання вод і скорочення розриву між попитом і пропозицією води в межах басейну річки Верхня Литані.

Сценарій впливу зростання населення показав, що населення збільшується з середнім темпом зростання 2 % на рік, що також викличе навантаження на водні ресурси, посилюючи потребу у воді. Незадоволений попит усіх секторів попиту на воду з часом посилиться внаслідок зростання населення і зменшення кількості опадів, що призведе до надмірного забору річкової води та підземних вод. Зростання населення, шкідлива діяльність людини викличе погіршення якості річкової води. Скидання стічних вод у річку без будь-якого очищення призведе до того, що вода стане непридатною для використання.

У роботі автори запропонували п'ять варіантів удосконалення еталонного сценарію. Вони включають групу різних модифікацій, наприклад, покращення якості води у річці Литані, підвищення ефективності водопровідних мереж і контроль забору підземних вод.

Висновки

Програмне забезпечення Water Evaluation and Planning System (WEAP) широко

використовується для аналізу складних водних систем та вивчення стратегій управління попитом та пропозицією у різних країнах світу. Показано, що WEAP ефективно використовується на різних рівнях: на місцевому, регіональному та національному. Дослідники відзначають, що ефективність використання водних басейнів річок після моделювання їх поведінки у WEAP зростає, що допомагає вирішити безліч питань, пов'язаних із попитом на водні ресурси, визначенням переваг у перерозподілі води, правилами використання ресурсів, управлінням відбору води з поверхневих вод, постачання підземних вод до споживача та ін. Особлива увага приділяється розробці сценаріїв водокористування на довгострокову перспективу.

Слід зазначити, що багато авторів використовують WEAP у комплексі з іншим сумісним програмним забезпеченням (MODFLOW (модель ґрунтових вод), QUAL2E (модель якості води) та ін.) для визначення впливу майбутніх змін клімату та антропогенної діяльності на поведінку водних ресурсів та на їх стан.

У розглянутих статтях спостерігається однаковий підхід до розв'язання поставлених задач. Спочатку дослідниками аналізуються всі наявні водні ресурси на території. Визначаються ключові характеристики водойм (площа поверхні, течія, типи живлення водойми, якість води та ін.); основні фактори, що впливають на водну систему. Відповідно, робота у WEAP вимагає від дослідника введення великої бази даних для кожного елемента водної мережі.

Для багатьох авторів наступним етапом було створення методології дослідження. Методологія будується на декількох факторах. По-перше, на картографічній базі даних (БД) з трьох шарів будується ділянка попиту (водокористувачі), яка залежить від загальної системи розподілу води [30; 40; 41; 44], фізичної форми гідрографічної мережі та водоносних горизонтів, що охоплюють досліджувану територію. Потім розробляється концептуальний сценарій ефективного управління мережею поверхневих вод у програмному забезпеченні WEAP. На останньому етапі встановлюються

зв'язки між вузлами та БД, розраховується приплив і відтік води для кожного водного вузла в мережі поверхневих вод із обраним інтервалом часу. Розраховується постачання води для задоволення попиту.

Обов'язковим етапом у WEAP є побудова базового сценарію, на основі якого будуються поточний та перспективний сценарії. Сценарії можна створювати в залежності від різних факторів (демографічних, соціальних чинників, забезпеченості водними ресурсами, мінливості клімату, рівня економіки, стану мереж розподілу води та ін.). Побудова таких альтернативних сценаріїв дає змогу досліджувати як загальне, так і децентралізоване водоспоживання протягом певного часу.

Багато дослідників у галузі управління водними ресурсами зараз використовують нові можливості програмного забезпечення WEAP, з додаванням зведених карт і кліматичних карт, для створення і розрахунку сценаріїв, що враховують глобальну зміну клімату [35; 45]. Це дозволяє дослідникам швидко отримати детальний огляд впливу змін клімату в конкретному водному басейні, а планувальникам - визначити додаткові фактори, які можуть вплинути на розподіл водних ресурсів. Можливість врахування зміни клімату при розробці майбутніх сценаріїв робить WEAP потужним інструментом для інформування про адаптацію водних об'єктів до зміни клімату. Вбудований в WEAP модуль стоку використовує не тільки гідрологічні дані, але й опади та температуру, вологість, швидкість вітру. Користувачі бета-версії цієї функції, під час проекту SEI в Кіто, Еквадор, змогли розрахувати 240 різних ситуаційних сценаріїв, пов'язаних із WEAP, за три години, у порівнянні з двома місяцями для попередньої версії WEAP [45].

Враховуючи те, що Україна є однією з найменш забезпечених водними ресурсами Європейських країн [46; 47], дослідникам варто звернути увагу на можливість використання програмного забезпечення Water Evaluation and Planning System (WEAP) для оцінювання та планування водних ресурсів країни або окремих водних басейнів.

References

[1] [Water Code of Ukraine. (1995). Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine] (in Ukrainian). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text>

[2] Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy. <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2000/60/contents>.

- [3] Concepts of the National Target Program for the Development of the Water Sector (in Ukrainian). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1029-2009-%D1%80#Text>.
- [4] Dudley, W.O., Bryan, D., Chambers, B. (1996). STOAT - A fully dynamic sewage treatment works simulation model Jeremy. https://www.researchgate.net/publication/296931207_STOAT_-_A_fully_dynamic_sewage_treatment_works_simulation_model.
- [5] STOAT: Wastewater Plant Modelling Tool. <https://www.wrcgroup.com/services/stoat-wastewater-works-modelling-freeware/>
- [6] Sieker. The Stormwater Experts. STOAT – Software for dynamic modelling of WWTP. <https://www.sieker.de/en/software/software-gis/product/stoat-software-for-dynamic-modelling-of-wwtp-47.html>.
- [7] Serdarevic, A, Dzubur, A. (2016). Wastewater process modeling, *Coupled Systems Mechanics*, 5(1), 21–39. doi: <https://doi.org/10.12989/csm.2016.5.1.021>.
- [8] Minhaj Putri Ghina, O., Pratama, M. A., Adityosulindro, S., Hartono, D. M. (2020). Modeling performance of industrial park wastewater treatment plant by STOAT software. *Environmental Engineering Study Program*, 16424, E3S, Web of Conferences 211, 02018.
- [9] Hassan, H. H., Ragheb, A. M. (2019). Modelling of an SBR WWTP to Enhance the Performance under Hydraulic Shock Load Using STOAT Software. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 13, 704–714. doi: [10.17265/1934-7359/2019.11.005](https://doi.org/10.17265/1934-7359/2019.11.005).
- [10] Soil & Water Assessment Tool. <https://swat.tamu.edu/>.
- [11] Malago, A., Venhor, M., Gericke, A., Vigiak, O., Bouraoui, F., Grizzetti, B., Kovacs, A. (2015). Modelling nutrient pollution in the Danube River Basin: a comparative study of SWAT, MONERIS and GREEN models. *Joint Research Centre technical reports*, JRC99193. <http://doi.org/10.2788/156278>.
- [12] Osypov, V., Osadcha, N., Hlotka, D., Osadchyi, V., Nabyvanets, J. (2018). The Desna River Daily Multi-Site Streamflow Modeling Using SWAT with Detail Snowmelt Adjustment. *Journal of Geography and Geology*, 10(3), 92–110. <https://doi.org/10.5539/jgg.v10n3p92>.
- [13] Psomas, A., Panagopoulos, Y., Konsta, D., Mimikou, M. (2016). Designing Water Efficiency, Measures in a Catchment in Greece Using WEAP and SWAT Models. *Procedia Engineering*, 162, 269–276. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.058>
- [14] Touseef, M., Chen, L., Yang, W. (2021) Assessment of Surface Water Availability under Climate Change Using Coupled SWAT-WEAP in Hongshui River Basin, *J. Geo-Inf.*, 10, 298. <https://doi.org/10.3390/jigi10050298>
- [15] Salehpoor, J., Ashrafzadeh, A., Moussavi, S. A. (2018). Water Resources Allocation Management in the Hablehroud Basin Using a Combination of the SWAT and WEAP Models, *Iran-Water Resources Research*, 14(3), 239–253.
- [16] Kishiwa, P., Nobert, J., Kongo, V., Ndomba, P. (2018). Assessment of impacts of climate change on surface water availability using coupled SWAT and WEAP models: case of upper Pangani River Basin, Tanzania, *Proc. IAHS*, 378, 23–27. <https://doi.org/10.5194/piahs-378-23-2018>
- [17] Abdallah, A. M., Rosenberg, D. E. (2019). A data model to manage data for water resources systems modeling Environmental, *Modelling & Software*, 115, 113–127. doi: [10.1016/j.envsoft.2019.02.005](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.02.005)
- [18] Abdallah, A. M., Rheinheimer, D. E., Rosenberg, D. E., Knox, S., Harou, J. J. (2022). An interoperable software ecosystem to store, visualize, and publish water resources systems modelling data. *Environmental, Modelling & Software*, 151, 105371. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105371>
- [19] Water Evaluation And Planning. <https://www.weap21.org/index.asp?action=216>.
- [20] De Condappa, D., Chaponnière, A., Lemoalle, J. (2009). A decision-support tool for water allocation in the Volta Basin, *Water International*, 34, 71–87. doi: [10.1080/02508060802677861](https://doi.org/10.1080/02508060802677861)
- [21] Amisigo, B. A., McCluskey, A., Swanson, R. (2014). Modeling impact of climate change on water resources and agriculture demand in the Volta Basin and other basin systems in Ghana. *Sustainability*, 7(6), 6957–6975.
- [22] Yao, A. B., Mangoua, O. J., Georges, E. S., Kane, A., Goula, B. A. (2021). Using “Water Evaluation and Planning” (WEAP) Model to Simulate Water Demand in Lobo Watershed (Central-Western Cote d’Ivoire), *Journal of Water Resource and Protection*, 13(3), 216–235. doi: [10.4236/jwarp.2021.133013](https://doi.org/10.4236/jwarp.2021.133013), March 2021
- [23] Ndeketea, A., Dundu, M. (2022). Alternative water sources as a pragmatic approach to improving water security," *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 13, 200071. doi: [10.1016/j.rcradv.2022.200071](https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200071)
- [24] Alfarra, A., Kemp-Benedict, E. (2012). Modeling Water Supply and Demand for Effective Water Management Allocation in the Jordan Valley, *Nanotechnology Science and Applications*, 1(1), 1–7. doi: [10.14511/jasa.2012.010101](https://doi.org/10.14511/jasa.2012.010101)
- [25] Sapkota, P., Bharati, L., Gurung, P., Kaushal, N., Smakhtin, V. (2013). Environmentally sustainable management of water demands under changing climate conditions in the Upper Ganges Basin, India. *Hydrological Processes. The Hydrology of Large Rivers*. 27(15), 2197–2208. doi: [10.1002/hyp.9852](https://doi.org/10.1002/hyp.9852)
- [26] Agarwal, S., Jyoti, P., Patil, V. C., Singh, G. A. (2018). Assessment of Water Supply–Demand Using Water Evaluation and Planning (WEAP) Model for Ur River Watershed, Madhya Pradesh, India. *The Institution of Engineers (India). Ser. A*, 100, 21–32. <https://doi.org/10.1007/s40030-018-0329-0>
- [27] Harma, K. J., Johnson, M. S., Cohen, S. J. (2012). Future water supply and demand in the Okanagan Basin, British Columbia: a scenario-based analysis of multiple, interacting stressors. *Water Resources Management*, 26, 667–689. doi: [10.1007/s11269-011-9938-3](https://doi.org/10.1007/s11269-011-9938-3)
- [28] Alemayehu, T., McCartney, M., Kebede, S. (2010). The water resource implications of planned development in the Lake Tana catchment, Ethiopia, *Ecohydrology & Hydrobiology*. 10, 211–221. doi: [10.2478/v10104-011-0023-6](https://doi.org/10.2478/v10104-011-0023-6)
- [29] Condom, T., Escobar, M., Purkey, D., Pouget, J. C., Suarez, W., Ramos, C., Apaestegui, J., Zapata, M., Gomez, J., Vergara, W. (2011). Modelling the hydrologic role of glaciers within a Water Evaluation and Planning System (WEAP): a case study in the Rio Santa watershed (Peru), *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 8, 869–916. doi: [10.5194/hessd-8-869-2011](https://doi.org/10.5194/hessd-8-869-2011)
- [30] Ndeketea, A., Dundu, M. (2022). Alternative water sources as a pragmatic approach to improving water

- security, Resources, *Conservation & Recycling Advances*, 13, 200071. doi:10.1016/j.rcradv.2022.200071
- [31] Oseke, F. I., Anornu, G. K., Adjei, K. A., Martin Obada Eduvie, M. O. (2021). Predicting the impact of climate change and the hydrological response within the Gurara reservoir catchment, Nigeria, *Journal of Water and Land Development*, 51(X-XII), 129–143. doi:10.24425/jwld.2021
- [32] Sahoo, S., Dhar, A., Debsarkar, A., Pradhan, B., Alamri, A. M. (2020). Future Water Use Planning by Water Evaluation and Planning System Model, *Water Resources Management*, 34, 4649–4664. doi:10.1007/s11269-020-02680-8
- [33] Mehboob, M. S., Panda, M. R., Kim, Y. (2020). Modeling water supply and demand under changing climate and socio-economic growth over Gilgit-Baltistan of Pakistan using WEAP, *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, 116
- [34] Yassin, M. (2019). Development of Integrated Water Resources Planning Model for Dublin using WEAP21, (Doctoral dissertation). Retrieved from Dissertations and Theses database. <https://doi.org/10.21427/gcqp-8477>
- [35] Javadinejad, S., Hannah, D., Ostad-Ali-Askari, K., Krause, S., Zalewski M., Boogaard, F. (2019). The Impact of Future Climate Change and Human Activities on Hydro-climatological Drought, Analysis and Projections: Using CMIP5 Climate Model Simulations, *Water Conservation Science and Engineering*, 1–18, doi:10.1007/s41101-019-00069-2
- [36] Bhave, A. G., Conway, D., Dessai S., Stainforth, D. A. (2016). Water Resource Planning Under Future Climate and Socioeconomic Uncertainty in the Cauvery River Basin in Karnataka, India, *Climate Risk Management*, 14, 1–10. doi:10.1002/2017WR020970
- [37] Lina, G., Terrazas, V., Forni, L., Escobar, A. (2020). Integrating equality in evaluation of water access for irrigation in an Andean community, *Aqua-LAC*, 12(1). doi:10.29104/phi-aqualac/2020-v12-1-04
- [38] Goshime, D. W., Haile, A. T.; Rientjes, T., Absi, R., Ledésert, B., Siegfried, T. (2021). Implications of water abstraction on the interconnected Central Rift Valley Lakes sub-basin of Ethiopia using WEAP Citation Data, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 38, 100969. doi:10.1016/j.ejrh.2021.100969
- [39] Kandera, M., Výleta, R., Liová, A., Danáčová, Z., Lovasová, L. (2021). Testing of Water Evaluation and Planning (WEAP) model for water resources management in the Hron River basin. *Acta Hydrologica Slovaca*, 22(1), 30–39. doi:10.1088/1755-1315/609/1/012055
- [40] Goyburo, A., Rau, P., Lavado, W., Drenkhan, F., Buytaert, W. (2020). Present and future water security under socioeconomic and climate changes in the Vilcanota-Urubamba basin, *EGU General Assembly 2020*, EGU2020-5306. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-5306>
- [41] Bouznad, I. E., Elahcene, O., Belksier, M. S. (2020). Management model for water demand using the WEAP tool: Case of Setif Province – Algerian highlands, *Journal of Water and Land Development*, 45, 19–28. doi:10.24425/jwld.2020.133042
- [42] Hassan, D., Bano, R., Burian, S. J., Ansar, K. (2017). Modeling Water Demand and Supply for Future Water Resources Management. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8(5), 1745–1750.
- [43] Metobwa, O. G., Khaldoon Abdalah Mourad, K. A., Ribbe, L. (2018). Water Demand Simulation Using WEAP 21: A Case Study of the Mara River Basin, Kenya, *International Journal of Natural Resource Ecology and Management*, 3(1), 9–18
- [44] Abou Slaymane, R. A., Soliman, M. R. (2022). Integrated water balance and water quality management under future climate change and population growth: a case study of Upper Litani Basin, Lebanon. *Climatic Change*, 172(28). P.1-24. doi:10.1007/s10584-022-03385-0
- [45] Faster and more detailed water modelling now available with updates to WEAP. <https://www.sei.org/featured/faster-detailed-water-modelling-weap/>
- [46] [Law of Ukraine on the National Program for the Development of Water Management]. (in Ukrainian). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2988-14#Text>
- [47] [State Agency of Water Resources. Regional office of water resources in Dnipropetrovska oblast]. (in Ukrainian). http://dovr.gov.ua/Info/Zvitnist/Info_OhVodRes.html