

# НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО МЕТЕОРОЛОГИЯ И ХИДРОЛОГИЯ

инж. Петко Георгиев Царев

**Хидроложко моделиране и краткосрочно прогнозиране на притока в родопските язовири за управление на риска от наводнение и устойчиво енергопроизводство**

## **А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

на дисертация

**за присъждане на образователна и научна степен „Доктор”**  
в област на висше образование 5. Технически науки, професионално направление 5.7. Архитектура, строителство и геодезия (Инженерна хидрология, хидравлика и водно стопанство)



**Научен ръководител: доц. д-р Ерам Кеворк Артинян**

гр. Пловдив, 2024 г.



Дисертационният труд е с обем 150 стр., съдържа 55 фигури, 12 таблици, и 35 уравнения и се състои от 11 глави. Използваната литература включва 95 заглавия.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на заседание на разширен научен семинар на департаменти „Хидрология“, „Прогнози и информационно обслужване“ и „Метеорология“, проведен на 19.09.2024 г., съгласно заповед № НД 04-23/12.09.2024 г. на Генералния директор на НИМХ.

Състав на научното жури:

проф. д-р Снежанка Балабанова

проф. д-р Николай Лисев

доц. д-р Ерам Артинян

доц. д-р Венцислав Божков

доц. д-р Весела Захариева

Резервни членове:

проф. д-р Пламен Нинов

проф. д-р Кисляков

доц. д-р Мартина Печинова

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 17.12.2024 г. в ..... часа в Учебния център на НИМХ, гр. София

Материалите по защитата ще са на разположение на интересувалите се в канцеларията на НИМХ и на интернет страницата на института: [www.meteo.bg](http://www.meteo.bg)

---

Номерата на фигурите, таблиците и формулите в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

## **ABSTRACT**

This thesis is concerned with the development of hydrological models and the forecasting of short-term inflows to reservoirs in the Rhodope Mountains. The objective is to facilitate the management of flood risk and to optimise the production of hydropower. The study is primarily concerned with the spatial and temporal distribution of water contributing to river discharge, with a particular focus on the reservoirs of the " Arda" cascade. In light of the rising incidence of extreme weather events attributable to climate change, the accurate forecasting and short-term management of water resources have become indispensable.

A principal objective is to integrate innovative technologies and data sources to enhance the precision and dependability of inflow projections, thereby facilitating more efficacious real-time decision-making. The objective of the study is to develop a short-term forecasting model for the prediction of reservoir inflows and the management of water volumes in a system of cascade hydropower plants along the Arda River. The primary objective is to prevent water spillage and to optimise energy production schedules.

Furthermore, the study will examine the integration of meteorological data, including rainfall and temperature, into hydrological models with the objective of enhancing the precision of inflow forecasts. A significant element of the research is the utilisation of Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing technologies to evaluate catchment characteristics and monitor alterations in land use, which can markedly influence runoff patterns. By analysing historical data and calibrating models with real-time observations, the study illustrates the influence of these variables on hydrological processes in the region.

Furthermore, the dissertation underscores the pivotal role of hydrological forecasting in economic development, particularly in the context of flood warning systems and the optimal utilisation of water resources for economic benefit. It illustrates the integration of operational forecasting systems based on atmospheric hydrodynamic models and discusses the necessity for accurate surface-atmosphere process descriptions. Furthermore, the research offers recommendations for enhancing the resilience of water management strategies in the context of climate variability, with a particular focus on the operation of hydropower facilities and their role in energy security.

The research makes a significant contribution to the field by developing a robust forecasting system for short-term inflow predictions in the Arda River reservoirs. This system, which is calibrated and validated with real-time data, has the potential to enhance flood management and ensure the sustainable production of energy from hydropower plants. The results of the study offer valuable insights for policymakers and engineers in the field of water resource management and renewable energy.

<b>СЪДЪРЖАНИЕ</b>	
<b>ВЪВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>5</b>
<b>ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И АКТУАЛНОСТ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА</b> .....	<b>5</b>
<b>I. ПРОУЧВАНЕ НА НАУЧНА ЛИТЕРАТУРА</b> .....	<b>6</b>
I.1. Проучване на научна литература свързана с различни хидроложки модели използвани при моделиране притока в язовирите с цел намаляване риска от наводнения .....	6
I.2. Видове математически хидроложки модели според описанието на хидроложките процеси .....	6
I.3. Изводи.....	7
<b>II. НАУЧНА ЛИТЕРАТУРА СВЪРЗАНА С ХИДРОЛОЖКА ПРОГНОЗА НА ПРИТОКА В ЯЗОВИРИ И СИСТЕМИ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА ЕНЕРГОПРОИЗВОДСТВОТО ОТ ВЕЦ</b> .....	<b>7</b>
II.1. Модели с възможно приложение при каскада от язовири – Общи ..	7
II.1.1. Модели с възможно приложение при каскада от язовири – специфични .....	8
II.2. Програмни продукти, разработени по темата до момента - експериментална цел .....	8
II.3. Изводи.....	9
<b>III. АНАЛИЗ И СИМУЛИРАНЕ НА ФИЗИЧНИТЕ ПРОЦЕСИ СВЪРЗАНИ С ГЕНЕРИРАНЕТО НА ОТТОК</b> .....	<b>9</b>
III.1. Формиране на оттока и динамика на водата в речния басейн .....	9
III.2. Модели от тип резервоар .....	11
III.3. Хидроложки модел TOPMODEL.....	11
III.4. TOPODYN .....	12
III.5. Компоненти оказващи влияние при прогнозиране на водни обеми в язовири .....	13
III.6. Изводи.....	13
<b>IV. НЕОБХОДИМИ ДАННИ ЗА ИЗВЪРШВАНЕ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО</b> .....	<b>14</b>
IV.1. Систематизиране на данните необходими за хидрологично моделиране и за оптимизиране работата на ВЕЦ с оглед намаляване риска от наводнения .....	14
IV.1.1. Данни за земното покритие.....	14
IV.1.2. Данни за почвите .....	15
IV.1.3. Релеф - цифров модел на терена.....	15
IV.1.4. Полета от измерени/анализирани входни данни.....	15
IV.2. Систематизиране на данни с техническите характеристики на	

разглежданите язовири.....	16
IV.2.1. Язовирна стена „Кърджали“ : .....	17
IV.2.2. Язовирна стена „Студен кладенец“ : .....	18
IV.2.3. Язовирна стена „Ивайловград“:.....	19
IV.3. Систематизиране на данните необходими за осъществяване на хидрологична прогноза .....	19
IV.4. Изводи.....	20
<b>V. ПОДГОТОВКА И ПРЕДСТАВЯНЕ НА ВХОДНИ ДАННИ ЗА ХИДРОЛОГИЧНО МОДЕЛИРАНЕ И ПРОГНОЗИРАНЕ /В ДИАГНОСТИЧЕН И ПРОГНОСТИЧЕН РЕЖИМ/ И ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ РАБОТАТА НА ВЕЦ С ОГЛЕД НАМАЛЯВАНЕ РИСКА ОТ НАВОДНЕНИЯ</b> .....	<b>20</b>
V.1. Данни свързани с физикографските особености на водосборния басейн .....	21
V.2. Хидрометеорологични данни .....	23
V.3. Изводи.....	23
<b>VI. РАЗРАБОТВАНЕ НА ПРИЛОЖЕН МОДЕЛ НА ИЗСЛЕДВАНИЯ ПРОБЛЕМ.....</b>	<b>24</b>
VI.1. Хидроложки модел .....	24
VI.2. Симулиране работата на каскадата .....	25
VI.3. Изводи.....	26
<b>VII. АДАПТИРАНЕ НА СЪЩЕСТВУВАЩ ПРОГРАМЕН ПРОДУКТ ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ИЗЧИСЛИТЕЛЕН ЕКСПЕРИМЕНТ</b> .....	<b>26</b>
VII.1. Териториален обхват на изчисленията .....	26
VII.2. Моделна система.....	26
VII.3. Входни данни хидроложкия модел .....	28
VII.4. Входни данни необходими за изчислителна схема за водохранилищата .....	28
VII.4.1. Интерпретиране на приети управленски практики при провеждане на висока вода през съоръженията .....	28
VII.4.2. Количеството на преработени от ВЕЦ води. ....	29
VII.4.3. Определяне на преливащи водни количества през преливниците .29	
VII.4.4. Интерпретиране на приети управленски практики при язовир „Студен кладенец“ .....	29
VII.4.5. Интерпретиране на приети управленски практики при язовир „ивайловград“.....	29
VII.5. Прилагане на приложния модел на изследвания проблем чрез създаване на автоматизиран изчислителен процес .....	30
VII.5.1. Прогноза за компонентите на баланса на водохранилищата с	

резултати от моделни данни за собствен приток .....	30
VII.5.2. Анализирание на каскадната зависимост на водохранилищата .....	31
VII.6. Изводи.....	33
<b>VIII. ИЗСЛЕДВАНЕ НА АДАПТИРАНИЯ МОДЕЛ.....</b>	<b>33</b>
VIII.1. Анализ на чувствителността на модела към различия в параметрите.....	33
VIII.2. Калибриране на хидроложкия модел и модела на действие ретензия язовир и ВЕЦ за конкретни водосбори .....	34
VIII.3. Валидиране на хидроложкия модел за конкретни водосбори .....	35
VIII.4. Изводи.....	36
<b>IX. ИЗСЛЕДВАНЕ НА СТАТИСТИЧЕСКИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ИЗЧИСЛЕНИЕ НА ХИДРОЛОЖКАТА ПРОГНОЗА И НА ОПТИМИЗАЦИЯТА НА ЕНЕРГОПРОИЗВОДСТВОТО .....</b>	<b>37</b>
IX.1. Анализирание на статистическите характеристики.....	37
IX.1.1. Анализирание на прогнозните резултати .....	37
IX.1.2. Статистически изчисления.....	39
IX.2. Технически особености на каскадата при оптимизация на енергопроизводството .....	39
IX.2.1. Работни характеристики на ВЕЦ.....	39
IX.3. Изводи.....	40
<b>X. ИКОНОМИЧЕСКИ АНАЛИЗ НА ИСТОРИЧЕСКИ ЦЕНИ НА СВОБОДНИЯ ПАЗАР НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ В БЪЛГАРИЯ. ....</b>	<b>40</b>
X.1. Клъстерен анализ – графики .....	40
X.2. Таблични данни .....	40
X.3. Изводи и препоръки от извършения анализ .....	41
<b>ПРИНОС НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....</b>	<b>41</b>
<b>ПУБЛИКАЦИИ .....</b>	<b>46</b>

## ВЪВЕДЕНИЕ

Хидроложкото моделиране и краткосрочното прогнозиране на речния отток са от съществено значение за ефективното управление на риска от наводнения и за осигуряването на устойчиво енергопроизводство. В на дисертационния труд е залегнало пространственото и времево разпределяне на водите участващи в формирането на речния отток като фокуса са Родопските язовири от каскада „Долна Арда“, които играят ключова роля в регулирането на водните ресурси на река Арда, като същевременно предоставят значителен потенциал за производство на електроенергия. В контекста на изменението на климата и нарастващата честота на екстремни метеорологични явления, необходимостта от прецизно прогнозиране и краткосрочно управление на водните ресурси става все по-належаща.

Темата разглежда съвременните подходи и методологии в хидроложкото моделиране, които позволяват по-точно определяне на притока към язовирите. Дисертационния труд се фокусира върху разработването на **краткосрочен модел за прогнозиране на притока** и управление на енергопроизводството чрез освобождаване на водни обеми в язовирите през система от каскадни водноелектрически централи по река Арда, с цел да се избегне преливане. Основната цел е да се прогнозира притокът в язовирите, който оказва влияние върху графициите на работа на водно-електрическите централи в краткосрочен аспект – **пет дни**.

Хидроложките прогнози са важни в две основни направления - издаване на предупреждения за настъпване на опасни хидроложки явления и осигуряване на необходимата информация за оптимално комплексно използване на водните ресурси и максимален икономически ефект.

Днес хидроложките прогнози се изготвят с помощта на оперативни прогностични системи, базирани на хидродинамични модели на атмосферата. В тези модели е важно точното описание на **процесите на границата между атмосферата и земната повърхност, включително участието на растителната покривка**. Чрез различни параметризационни схеми се пресмятат радиационния обмен и пренасянето на потоците топлина и влага **в близост до земната повърхност**.

## ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И АКТУАЛНОСТ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

Целта дисертацията е да се анализират хидроложките характеристики на водосборната област и водохранилищата, включително средногодишните валежи, оттока и изпарението, да се разгледа как тези фактори влияят на водния баланс в района на проучване и в допълнение да се анализират възможностите за хидрологично прогнозиране на каскадния приток в язовирите. Към този момент за разглежданите язовири не е реализиран



хидроложки водобалансов модел за симулиране на процесите между атмосфера и земя с отчитане на каскадната свързаност на язовирите. Това обуславя актуалността и нуждата от развитие на хидрологична прогноза отчитаща влиянието на хидротехническите съоръжения нагоре по течението.

Основната задача на дисертацията е моделиране на динамиката на елементите на водния баланс във водосбора, като изпарение, снежни запаси и почвена влажност, съчетано с изчисление на притока към язовирите. Това включва анализ и моделиране на хидроложките процеси, за да се осигури цялостно разбиране на водния баланс и неговите компоненти в областта на изследване.

Актуалността на дисертацията се обуславя от следните дейности подробно изследване на проблемите при хидроложко прогнозиране на водни нива в язовирите и оттока след тях, включително влиянието на преливните съоръжения и управлението им при провеждане на висока вълна през язовирите, както и в създаване на компютърно приложение, което да може да бъде използвано за симулация и прогноза на воден баланс на язовира при симулирани (прогнозирани) данни за притока и измерени данни за нивата във водохранилището.

## **I. ПРОУЧВАНЕ НА НАУЧНА ЛИТЕРАТУРА**

### **I.1. ПРОУЧВАНЕ НА НАУЧНА ЛИТЕРАТУРА СВЪРЗАНА С РАЗЛИЧНИ ХИДРОЛОЖКИ МОДЕЛИ ИЗПОЛЗВАНИ ПРИ МОДЕЛИРАНЕ ПРИТОКА В ЯЗОВИРИТЕ С ЦЕЛ НАМАЛЯВАНЕ РИСКА ОТ НАВОДНЕНИЯ**

Всички хидроложки модели са опростено описание на реалния свят. Моделите могат да бъдат физически (макетни), изградени в лаборатория мащабни модели на действителността, електрически - аналогови или математически. За ползвателя хидроложките модели се състоят основно от две части – хидроложко ядро и технологична обвивка. Хидроложкото ядро се изгражда на базата на определени хидроложки научни знания чрез дефинирането на променливи, описания на процеси и др. Технологичната обвивка е програмирането, потребителският интерфейс, пред- и пост - обработващите процедури и т.н.

### **I.2. ВИДОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИ ХИДРОЛОЖКИ МОДЕЛИ СПОРЕД ОПИСАНИЕТО НА ХИДРОЛОЖКИТЕ ПРОЦЕСИ**

Два класически вида са хидроложките модели според описаната класификация – детерминистични и стохастични. През 60-те и 70-те години на миналия век тези два фундаментално различни подхода са създадени в две малко или много различни “хидроложки школи”. В следващото десетилетие

от взаимното проникване на двете методологии се ражда и третата група модели така наречените стохастично - детерминистични, които в наше време предоставят много полезната рамка за решаването на някои фундаментални проблеми като взимането в предвид на пространствената изменчивост (мащабните проблеми) и оценката на несигурността на моделирането например. В подробно са представени различните видове хидроложки модели и теоретичните основи, върху които те са изградени.

Хидроложките модели могат да бъдат разглеждани по различни принципи. Описани са следните класификации на хидроложките модели: Физически и символни модели, Разпределени физически базирани модели, Теоретични, емпирични и концептуални модели, Съсредоточени концептуални модели, Линеини и нелинейни модели, Статични и динамични модели, Модели с обобщени и разпределени параметри, Детерминистични модели, Детерминистично - стохастични модели, Емпирични модели и Стохастични модели.

### **I.3. ИЗВОДИ**

Извършения преглед на различните видове хидроложки модели, техните теоретични основи и приложения показва значението на хидроложките модели за разбирането и управлението на водните ресурси.

Разгледано е разнообразието от модели, вариращи от прости концептуални модели до сложни физически базирани модели. Тази класификация подчертава, че изборът на подходящ модел зависи от конкретните нужди и цели на изследването или управлението. Прости модели могат да бъдат полезни за бързи оценки и образователни цели, докато сложни модели предоставят по-подробни и точни резултати, но изискват повече данни и изчислителни ресурси.

## **II. НАУЧНА ЛИТЕРАТУРА СВЪРЗАНА С ХИДРОЛОЖКА ПРОГНОЗА НА ПРИТОКА В ЯЗОВИРИ И СИСТЕМИ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА ЕНЕРГОПРОИЗВОДСТВОТО ОТ ВЕЦ**

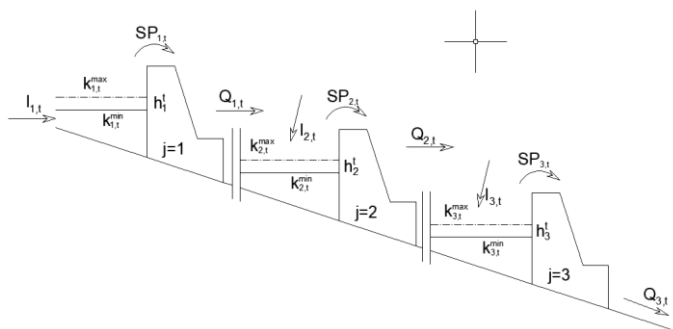
### **II.1. МОДЕЛИ С ВЪЗМОЖНО ПРИЛОЖЕНИЕ ПРИ КАСКАДА ОТ ЯЗОВИРИ – ОБЩИ**

В проведените проучвания по време на изготвяне на дисертационния труд не бе открит конкретен модел с отворен код за симулация на каскада от язовири и оптимизиране на енергопроизводството със стъпка под един ден, а само такива с по-голяма стъпка или насочени към нуждата от напояване - DROP (Dam-Reservoir OPeration). Редица статии разглеждат комплексни хидроложки модели за симулация на системи от язовири, но достъпът до повечето модели е ограничен. Независимо от това следва да се отбележи, че

тази тема е силно разработена с оглед оптимизиране използването на водните ресурси: защита от наводнение, напояване и енергопроизводство. На фигура Фиг.П.1.1 е представена принципна схема на Water Balance Model (WBM) с отворен код и стъпка 1 ден реализиран на програмен език Python.

### П.1.1.МОДЕЛИ С ВЪЗМОЖНО ПРИЛОЖЕНИЕ ПРИ КАСКАДА ОТ ЯЗОВИРИ - СПЕЦИФИЧНИ

Разгледан е разработен краткосрочен експлоатационен модел за оптимална експлоатация на хидравлично свързани водноелектрически централи, в който е предложен иновативен метод за решаване на проблема с хидравличното свързване чрез използване на криви на работните характеристики на турбините на ВЕЦ. Разработеният модел е приложен към съществуваща система от хидроенергийни язовири в Манитоба, Канада. На база на разгледания модел е създадена концептуална диаграма Фиг.П.1.2 описваща компонентите, оказващи най-голямо значение при определяне режима на ВЕЦ към три каскадни язовира.



Фиг.П.1.2 Концептуална диаграма на три каскадни водохранилища

## П.2. ПРОГРАМНИ ПРОДУКТИ, РАЗРАБОТЕНИ ПО ТЕМАТА ДО МОМЕНТА - ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ЦЕЛ

Макар и по конкретната тема да не са открити програмни продукти, в областта съществуват няколко програмни продукта които биха могли да се използват за прогнозиране на обемите в язовири. Един от тях е моделът MIKE NAM, който е приложен при управление на язовирите в Haute-Vilaine, Франция чрез система за подпомагане на вземането на решения и прогнозиране в реално време за ефективно управление на язовирите. Използвайки MIKE OPERATIONS, DHI е разработила система за подпомагане на вземането на решения, която позволява ефективно ежедневно управление между различните заинтересовани страни на тези язовири.

MIKE OPERATIONS е софтуерен продукт, разработен от компанията DHI, специализирана в областта на водните ресурси и околната среда. MIKE OPERATIONS е част от MIKE създаден от DHI, серия от интегрирани софтуерни решения, които предоставят инструменти за моделиране, анализ и управление на водни ресурси.

Софтуерният пакет с отворен код на платформата SURFEX включва различни модели за описване на хидрологични и хидродинамични процеси. Тези модели са били разработени и валидирани в академична среда, имат широка научна подкрепа и като модел на земната повърхност (LSM за land surface model) е вграден в голям брой метеорологични прогнозни и климатични модели. За сравнение, DHI Mike включва специализирани модели за различни хидрологични и хидродинамични приложения, които са били разработени от DHI, имат доказана ефективност в индустриалния сектор но като част от търговски продукт софтуерния код е защитен и не подлежи на потребителски промени. SURFEX предлага голяма гъвкавост и модулност, позволявайки на потребителите да избират и комбинират различни компоненти и модели според конкретните им нужди.

### **III. ИЗВОДИ**

Не е открита на обща моделна система, за краткосрочно прогнозиране на притока в повече от два каскадни язовира. Това налага извода, че е необходимо да бъде създадена конкретна разработка за конкретни каскадно разположени язовири. Подходящ е водосбора на река Арда и хидроенергийната каскада „Долна Арда“.

## **III. АНАЛИЗ И СИМУЛИРАНЕ НА ФИЗИЧНИТЕ ПРОЦЕСИ СВЪРЗАНИ С ГЕНЕРИРАНЕТО НА ОТТОК**

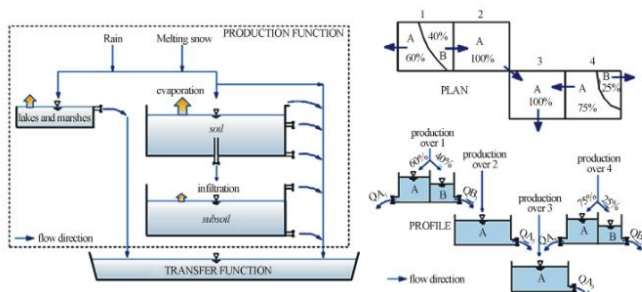
При генерирането на оттока влияние оказват различни компоненти, които обуславят разпределението на валежа в пространството и времето - Фиг. III.1.2 в дисертационния труд.

### **III.1. ФОРМИРАНЕ НА ОТТОКА И ДИНАМИКА НА ВОДАТА В РЕЧНИЯ БАСЕЙН**

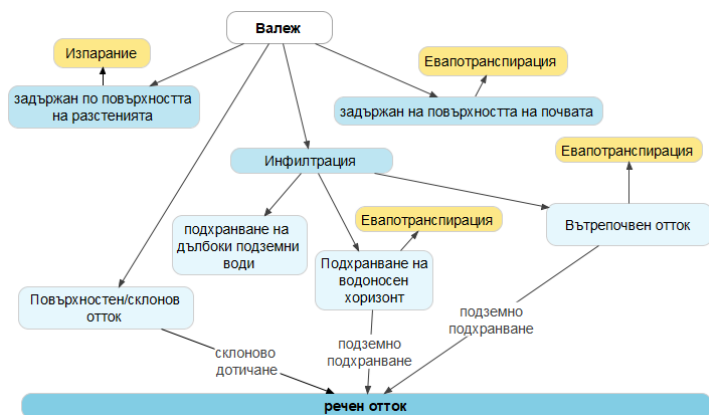
Процесът на формиране на отток следва да се разбира не само като непосредственото появяване на вода, способна да се движи надолу по терена, но и целият комплекс от отделни процеси, които заедно формират наземната част от водния цикъл.

За да се опишат процесите, протичащи във водосборния басейн при трансформирането на валежа в отток, в хидроложкото моделиране са

въведени две функции: производствена (генерираща отток) и трансформираща.



Фиг. III.1.1 Схема на хидроложки модел с производствена функция (в ляво) и трансферна функция (в дясно)



Фиг. III.1.2 Разпределение на валежа на отделни компоненти

Една част от валежите, паднали върху повърхността на водосборната област, се изпарява, друга се просмуква в почвата и по подземен път подхранва речния отток, а трета се стича по склоновете и достига речните легла, където образува речния отток. За определяне на частта от падналия валежен обем, участваща при формирането на оттока се използва производствена функция.

Оттокът, който се образува върху повърхността на водосборната област след падането на валежите и топенето на снеговете, се нарича склонов отток. Склоновият отток и този в речните течения образуват повърхностния отток.

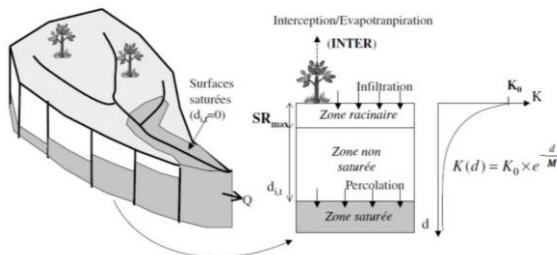
Процесът на достигането на повърхностния отток до речното легло се нарича склоново дотичане, а придвижването на водата след това в речното корито до даден пункт на реката – руслово дотичане. Съществува и едно трето (вътрешно-почвено) стичане, както и много съществени на места варианти отнасящи се до поток в ненаситената зона (порови или капилярни води) или поток в карстови зони. Функцията на трансфер позволява да се определи времето необходимо на дадена водна частица да достигне от дадена точка на склона или речното корито до определен пункт на реката.

### III.2. МОДЕЛИ ОТ ТИП РЕЗЕРВОАР

Както се вижда от името на моделите (тип резервоар), почвата се представя във вид на система от резервоари, разположени един над друг. Приема се, че водата, вследствие на падналите валежи и снеготопене, постъпва в най-горния резервоар. Броят и обемът на резервоарите, както и разположението на изходните отвори, са параметрите на този вид модели.

### III.3. ХИДРОЛОЖКИ МОДЕЛ TOPMODEL

TOPMODEL е хидроложки модел, който представя почвата във вид на система от резервоари и вземащ под внимание релефа във водосборния басейн. Моделът съчетава ефекта от разпределената мрежова топология и динамично изменящите се (допринасящи) зони, в които се формира отток и е описан в разгледани публикации. Приема се, че количеството на повърхностния отток акумулиран към речната мрежа зависи единствено от площта на допринасящите отток зони (активни зони) във водосборния басейн – *asat*. Допринасяща отток зона се получава в тези места, в които нивото на подземните води излиза на повърхността. В този случай водата, вследствие валеж или снеготопене, не може да проникне в почвата и образува повърхностен склонов отток. Повърхностен отток може да възникне и в местата, в които подпочвените води излизат на повърхността в резултат на обратен отток.



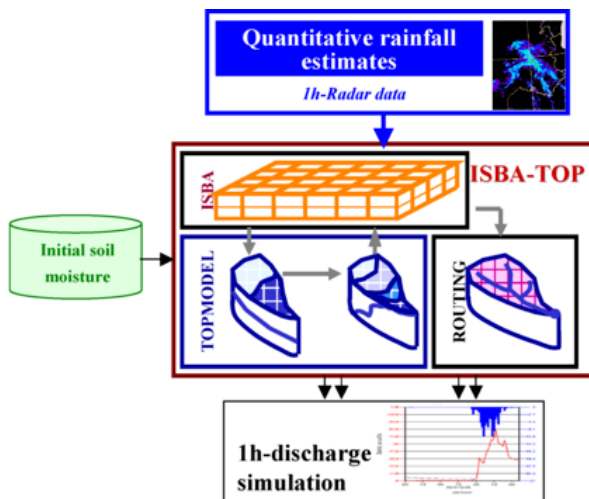
Фиг. III.3.2 Принцип на хидроложки модел

За всяка времева стъпка се определя дефицитът на влажност и следователно големината на допринасящите отток площ, като се отчита наклона и подземното подхранване от по високо разположените зони.

Поради пространствената нееднородност на валежите, която значително въздейства върху генерирането на отток и в контекстът на хипотезата за еднакво подземно подхранване по цялата площ на водосборната област, прави използването на модела доста ограничено. Поради този факт са направени подобрения и разширяване приложението на TOPMODEL. Такъв е моделът TOPODYN.

### III.4. TOPODYN

TOPODYN е динамична версия на TOPMODEL предназначена и съобразена с особеностите на средиземноморските водосборни басейни характеризиращи се с резки покачвания на оттока. Както TOPMODEL, TOPODYN има четири моделни параметъра и отчита пространствената променливост на валежа. В определянето на големината на оттока участват само клетките, в които подхранването с вода е достатъчно голямо като се въвежда максимална стойност на дефицита на влажност в почвата, над който отделната клетката не може да генерира отток надолу по веригата.



Фиг. III.4.3 Принцип на хидроложкия модел TOPODYN с пространствено поле на валежа

### **III.5. КОМПОНЕНТИ ОКАЗВАЩИ ВЛИЯНИЕ ПРИ ПРОГНОЗИРАНЕ НА ВОДНИ ОБЕМИ В ЯЗОВИРИ**

Във водния баланс на водохранилището изпарението има сравнително малка тежест. За нашите язовири то достига от 1,0 до 3,0 % от годишния приток в тях. Въпреки това неговото установяване е необходимо, за да се свърже водния баланс на водохранилището, особено когато има голяма водна площ и малка дълбочина.

Главните фактори, които влияят върху размера на изпарението са температурата на въздуха и на водната повърхност, влажността на въздуха и престоят му над водохранилището, зависещ от скоростта на вятъра и атмосферното налягане. Взаимодействието между тези фактори обаче е сложно и определянето на изпарението по аналитичен път е обвързано с голяма неточност и несигурност ако бъдат използвани прогностични данни. В тази връзка изпарението се установява по емпирични зависимости. От съществуващите методи, проверките у нас са показали, че добри резултати дава методът, а също така и този на Пенман, особено когато свободните коефициенти на зависимостите се установяват от непосредствени измервания.

Освен от изброените дотук фактори, изпарението от водохранилището е функция и от размера на неговата водна площ. За да може по-удобно да се определят изпарените водни обеми  $W_{и}$  е целесъобразно да се използва графична зависимост, получена с помощта на кривата на водните площи и измерените или изчислените месечни суми на изпарението.

Загубата на вода под язовирните стени във вид на филтрация може да достигне съществени размери. Тя се измерва с помощта на специално оставени дренажни сондажи, които се пробиват от инжекционната галерия. Изградените чрез инжектиране противофилтрационни завеси оказват много добро влияние при намаляване на загубите от филтрация, но губят своята водоплътност с течение на времето. Това явление се дължи преди всичко на химичната корозия на циментения камък и на суфозията на инжектирания материал.

Загубите на вода от водохранилището зависят преди всичко от геоложкия строеж на цялата област около язовира.

### **III.6. ИЗВОДИ**

Изследването и симулирането на физичните процеси, свързани с генерирането на отток, показва сложността на хидроложките явления и необходимостта от систематичен подход за тяхното опростено представяне и разбиране. Хидроложкият цикъл, разглеждан като система от взаимосвързани компоненти като валеж, изпарение, снеготопене и инфилтрация, позволява детайлно описание на процесите, водещи до формирането на отток в речните басейни.



Водосборните области, с техните орографски, почвени и растителни характеристики, играят ключова роля в разбирането на връзката между валежите, оттока и изпарението. Установяването на зависимости между тези процеси е основополагащо за модели от типа "валеж-отток", които са трудни за разграничаване един от друг поради тяхната взаимозависимост.

Моделите тип "резервоар" и специфичните хидроложки модели като TOPMODEL и неговите версии, демонстрират различни методи за симулиране на хидроложки процеси. Тези модели осигуряват ценни инструменти за разбиране и прогнозиране на водните обеми в язовири, въпреки ограниченията, свързани с пространствената и времева вариация на входните данни. Теоретичните основи и приложението на тези модели подчертават значението на непрекъснатите изследвания и подобрения в хидроложкото моделиране за по-добро управление на водните ресурси.

#### **IV. НЕОБХОДИМИ ДАННИ ЗА ИЗВЪРШВАНЕ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО**

##### **IV.1. СИСТЕМАТИЗИРАНЕ НА ДАННИТЕ НЕОБХОДИМИ ЗА ХИДРОЛОГИЧНО МОДЕЛИРАНЕ И ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ РАБОТАТА НА ВЕЦ С ОГЛЕД НАМАЛЯВАНЕ РИСКА ОТ НАВОДНЕНИЯ**

Статични и динамични данни необходими за хидрологичната симулация (тип „анализ“) с оглед на определяне на повърхностния и речния отток и за определяне на ретенцията/преливането на язовирите са посочени в Таблица 2, както следва: Валежи (течна фаза или дъжд) [ $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ ]; Валежи (твърда фаза или снеговалеж) [ $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ ]; Температура на въздуха [К (Келвин)]; Специфична влажност на въздуха на 2 м [ $\text{kg}/\text{kg}$ ]; Скорост на вятъра на 10 м [ $\text{m}/\text{s}$ ]; Посока на вятъра на 10 м [градуси]; Атмосферно налягане [Pa (Паскал)]; Глобална или обща слънчева радиация [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]; Атмосферна радиация [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]; Данни за земното покритие; Данни за почвата; Релеф [m]; Криви на обемите; Криви на залетите площи; Криви на преливащите водни количества; Характерни водни количества (Минимален и максимален разход ВЕЦ) [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]; Работни характеристики на ВЕЦ; Коти на характерни водни нива (НВВН, НВРВН, ННВН, Кота Преливник) [m]; Максимални преливни височини [m].

##### **IV.1.1. ДАННИ ЗА ЗЕМНОТО ПОКРИТИЕ**

Използвани са статични данни от ЕСОСЛИМАР-II/Europe. ЕСОСЛИМАР-II е подобрена версия на ЕСОСЛИМАР-I разработена за Европейския континент.

#### IV.1.2. ДАННИ ЗА ПОЧВИТЕ

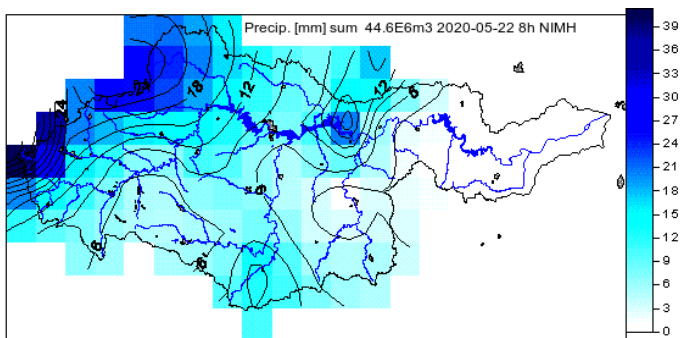
Използвана е Хармонизирана световна база данни за почвите - Harmonized World Soil Database (HWSD). Това е база данни за почвите, която се основава на подробни и комплексни данни за свойствата на почвата с покритие върху цял свят. Тя използва информация от European Soil Database (ESDB) и включва географско описание на различни типове почви, както и свързани с тях атрибутивни данни като текстура, химически състав и др. Конкретно за нуждите на хидроложката симулация и прогноза се използват данни за процентно съдържание на пясък в почвите /Фиг.IV.1.2.1 от дисертационния труд/ и процентно съдържание на глина в почвите - /Фиг.IV.1.2.2 от дисертационния труд/ на база на които се изчисляват почвените хидравлични характеристики.

#### IV.1.3. РЕЛЕФ - ЦИФРОВ МОДЕЛ НА ТЕРЕНА

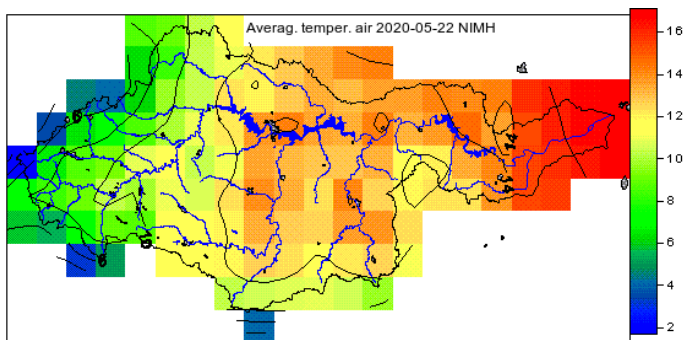
За нуждите на дисертационния труд е използван Цифров модел на терена по сателитни данни с хоризонтална резолюция 90 m и 50 m. За целта са използвани височинни модели ASTER GDEM и SRTM3 V3, Eurasia.

#### IV.1.4. ПОЛЕТА ОТ ИЗМЕРЕНИ/АНАЛИЗИРАНИ ВХОДНИ ДАННИ

Входните полета от измерени/анализирани данни за валеж от дъжд Фиг.IV.1.4./, снеговалеж, температура Фиг.IV.1.4.3 и влажност на въздуха се получават след интерполация на измерени данни от автоматични станции на НИМХ, а полетата от пряка слънчева радиация, достигаща до земната повърхност, дифузна и атмосферна слънчева радиация, скорост и посока на вятъра, атмосферно налягане се получават на основата на резултати от модела ALADIN-BG до 72 часа напред и на данни от модела H-RES на ECMWF до 120 часа напред (5 дни).



Фиг.IV.1.4.2 Интерполация на 24ч. измерен валеж



Фиг.IV.1.4.3 Интерполация на 24ч. средна измерена температура.

Необходимите интерполирани данни се съхраняват в реляционна база данни под БД MariaDB. Визуализациите са необходими само за онагледяване и проверка. В самата симулация се използват числови данни обработени от скрипт, четящ от БД. В БД в текстово поле се записват интерполираните стойности за всяка една клетка от пространствената мрежа на модела, като се разделят с точка и запетая.

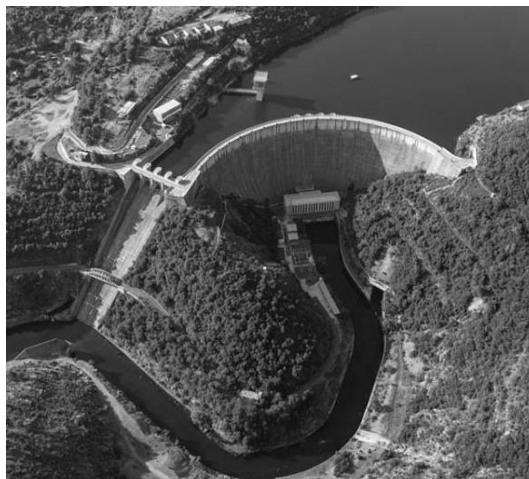
Използваната техника за интерполация е Кригинг. Това е статистически метод, който се използва за интерполация на стойности в пространство, включително за валежи от точкови измервания. Основната идея на метода е да използва пространствената корелация между точките на измерване, за да предскаже стойности на валежите на места, където няма директни измервания. Повече информация е поместена в раздел V.2 на стр. 79 от дисертационния труд.

## IV.2. СИСТЕМАТИЗИРАНЕ НА ДАННИ С ТЕХНИЧЕСКИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА РАЗГЛЕЖДАНИТЕ ЯЗОВИРИ

В каскада Арда са включва три големи язовира: Кърджали, Студен кладенец и Ивайловград с едноименни под язовирни централи. Общият завирен обем на язовирите от каскадата е  $1210 \cdot 106 \text{ m}^3$  и представлява 15.7 % от общо завирените обеми в страната.

Всички технически характеристики на каскадата необходими за осъществяване на прогнозата за преливане са систематизирани и посочени в Таблица 5 от дисертационния труд.

## IV.2.1. ЯЗОВИРНА СЕНА „КЪРДЖАЛИ“ :



фиг.IV.2.1.1 Язовирна стена „Кърджали“

Язовирната стена на язовир Кърджали е построена в периода 1957-1963 г. с цел да акумулира водите на река Арда за производство на електроенергия. Стената е бетонна дъгово-гравитачна, с височина 103.5 метра и дължина 433 метра. Общият завирен обем на водохранилището е 539.9 милиона кубически метра, което го прави един от най-големите язовири в България.

От язовира се подава вода за нуждите на промишлеността в гр. Кърджали и за напояване.

### IV.2.1.1.ХАРАКТЕРНИ ВОДНИ КОЛИЧЕСТВА ПРОВЕЖДАНИ ОТ СЪОРЪЖЕНИЯ НА ЯЗОВИРНАТА СЕНА:

- Преливникът – една клапа - 220 м<sup>3</sup>/с.
- Общото водно количество, за което е оразмерен преливникът на яз. "Кърджали" при сваляне на всичките 4 преливни клапи при НВВН е 3100 м<sup>3</sup>/с.
- Основният изпускател се състои от 2 изпускателя с обща пропускателна способност 880 м<sup>3</sup>/с.
- Има и допълнителен тунелен изпускател оразмерен за провеждането на 1 680 м<sup>3</sup>/с при НВРВН
- ВЕЦ "Кърджали" - подязовирна централа, която включва 4 турбини оразмерени да преработват общо 162 м<sup>3</sup>/с.

## IV.2.2. ЯЗОВИРНА СТЕНА „СТУДЕН КЛАДЕНЕЦ“ :



Фиг.IV.2.2.1 Язовирна стена „Студен кладенец“ – преливни полета

Язовир “Студен кладенец” е изграден първи и заема средно, възлово място в каскадата. В него е съсредоточен 40,4 % от общия обем на язовирите.

Основното предназначение на хидровъзел “Студен кладенец” е добив на електроенергия.

Преливникът е челен, състоящ се от девет броя преливни полета с преливни клапи, едностранно окачена, тип „рибен корем“. С две възможни положения - **вдигната клапа**, при което водния поток е подпиршен и **спусната клапа**, водният поток прелива през твърдия ръб на преливника.

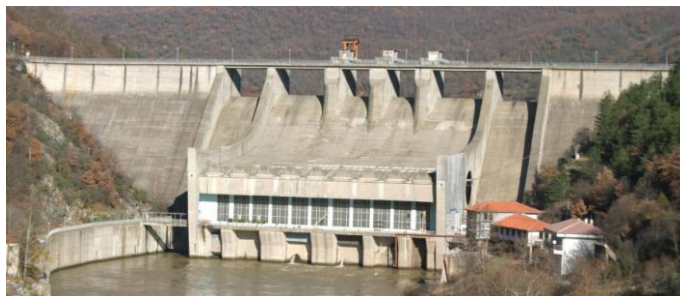
### IV.2.2.1.ХАРАКТЕРНИ ВОДНИ КОЛИЧЕСТВА ПРОВЕЖДАНИ ОТ СЪОРЪЖЕНИЯ НА ЯЗОВИРНАТА СТЕНА

- Преливникът на яз. „Студен кладенец“ включва 9 преливни клапи всяка от които при достигане на НВРВН и максимално отваряне провежда  $230 \text{ m}^3/\text{s}$  Общото водно количество, за което е оразмерен преливника на яз. „Студен кладенец“ при сваляне на всичките 9 преливни клапи при НВВН е  $3\ 600 \text{ m}^3/\text{s}$

- Основният изпускател се състои от два изпускателя с обща пропускателна способност  $180 \text{ m}^3/\text{s}$

- ВЕЦ „Студен Кладенец“ е подязовирна - деривационна централа, която включва 5 турбини Франсис оразмерени да преработват общо  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ . Монтирана е и малка турбина за преработване на екологични води в размер на приблизително  $2 \text{ m}^3/\text{s}$

### IV.2.3. ЯЗОВИРНА СЕНА „ИВАЙЛОВГРАД“:



Фиг. IV.2.3.1 Язовирна стена „Ивайловград“

Язовир "Ивайловград" е най-долното стъпало на каскадата. Той е с най-малък обем (15,6 % от общия за каскадата). Основното му предназначение е добив на електроенергия.

Освен от река Арда, десния приток на язовира е река Крумовица. Хидровъзел "Ивайловград" е третото и последно стъпало на каскадата. Стената е бетонова гравитачна, с максимална височина 73м и дължина по короната 250м.

Водочетният пункт на НИМХ е разположен на около 500 м надолу по течението след язовирната стена.

#### IV.2.3.1. ХАРАКТЕРНИ ВОДНИ КОЛИЧЕСТВА ПРОВЕЖДАНИ ОТ СЪОРЪЖЕНИЯ НА ЯЗОВИРНАТА СЕНА

- Преливникът на яз. "Ивайловград" е с неконтролируема пропускателна способност /без затворни органи/ и е оразмерен за провеждане на 5250 m<sup>3</sup>/s при обезпеченост P=0.1%.

- Основният изпускател се състои от два изпускателя с обща пропускателна способност 270 m<sup>3</sup>/s

- ВЕЦ "Ивайловград" е подязовирна централа, която включва 3 турбини, които са оразмерени да преработват общо 279 m<sup>3</sup>/s.

### IV.3. СИСТЕМАТИЗИРАНЕ НА ДАННИТЕ НЕОБХОДИМИ ЗА ОСЪЩЕСТВЯВАНЕ НА ХИДРОЛОГИЧНА ПРОГНОЗА

За осъществяване на хидрологичната прогноза се използва прогнозна информация с данни за прогнозен период. Данните за изчисление на прогнозна симулация са същите по вид, но от различен източник спрямо тези, които са необходими за изчисление на симулация с измерени данни. Използват се прогнозни данни от ALADIN-BG, като данните се интерполират

в пространствена мрежа, която се използва при хидроложката симулация. Използва се БД MariaBD в която е систематизирана следната информация:

#### **IV.4. ИЗВОДИ**

За ефективното хидрологично моделиране и оптимизация на работата на водноелектрическите централи (ВЕЦ) с оглед намаляване на риска от наводнения е необходимо събирането и систематизирането на разнообразни динамични и статични данни. Динамичните данни включват метеорологични параметри като валежи, температура на въздуха, влажност, скорост и посока на вятъра, атмосферно налягане и радиация. Тези данни се събират чрез интерполация на наземни измервания и моделни резултати, за да се осигури пълно и точно представяне на метеорологичните условия във времето и пространството.

Статичните данни, необходими за хидрологичните симулации, включват информация за повърхностното покритие на почвата, почвените характеристики и релефа. Тези данни са основа за изграждането на хидроложките модели и са получени от утвърдени бази данни като ECOCLIMAP-II и Harmonized World Soil Database (HWSD). Релефът на терена е изобразен чрез цифрови модели като ASTER GDEM и SRTM3, които предоставят необходимата топографска информация за точната дефиниция на водосборните области и анализа на оттока.

Техническите характеристики на язовирите също играят важна роля в хидрологичното моделиране и управлението на водните ресурси. Данни за обемите, площите, преливащите водни количества, разходите на ВЕЦ и работните характеристики на язовирите се систематизират за оптимизиране на тяхната експлоатация и намаляване на риска от наводнения. Тази информация е критична за прогнозиране на преливанията и ефективното управление на водните ресурси в рамките на каскадите от язовири, като се осигурява баланс между производството на електроенергия и защитата от наводнения.

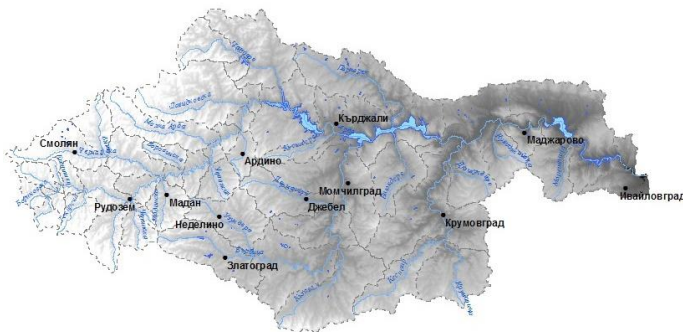
#### **V. ПОДГОТОВКА И ПРЕДСТАВЯНЕ НА ВХОДНИ ДАННИ ЗА ХИДРОЛОГИЧНО МОДЕЛИРАНЕ И ПРОГНОЗИРАНЕ /В ДИАГНОСТИЧЕН И ПРОГНОСТИЧЕН РЕЖИМ/ И ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ РАБОТАТА НА ВЕЦ С ОГЛЕД НАМАЛЯВАНЕ РИСКА ОТ НАВОДНЕНИЯ**

За успешно изпълнение на симулациите с платформа с платформа SURFEX е необходимо да се подготвят водни данни за хидрологичното моделиране и прогнозиране, които включват характеристиките на терена,

хидрологични параметри и климатични условия. Тези данни се запазват във файлове с различен формат.

## V.1. ДАННИ СВЪРЗАНИ С ФИЗИКОГРАФСКИТЕ ОСОБЕНОСТИ НА ВОДОСБОРНИЯ БАСЕЙН

Използваните файлове може да се разделят на две групи. Файлове от първа група се отнасят до физико-географските особености на водосборния басейн. Топографията на водосборната област се характеризира с пет специални файла, генерирани на базата на цифровия модел на терена (DTM) Фиг.V.1.1. Информацията за надморските височини трябва да бъде организирана в специфичен текстов файл, известен като DTM файл. Всяка клетка е представена чрез своята надморска височина. В началото на файла са указани координатите на долния ляв ъгъл на решетката, изобразена в конична картографска проекция Lambert II.



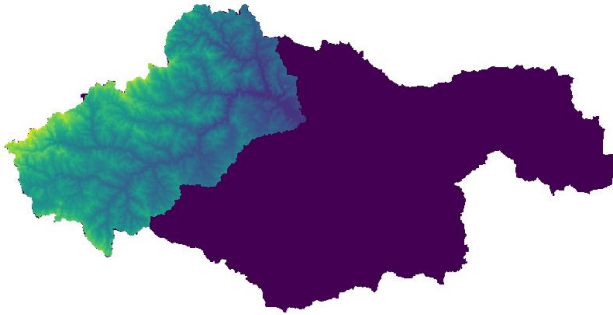
Фиг.V.1.1 Пространствена визуализация на речна мрежа, язовири, населени места и DTM

Като втора стъпка и резултат от направените преобразувания е изчислен растер за натрупване на повърхностния потока от входен DEM Фиг.V.1.3. Изчисляват се и слоевете "stream" и "drainage" - Фиг.V.1.4 от дисертационния труд.

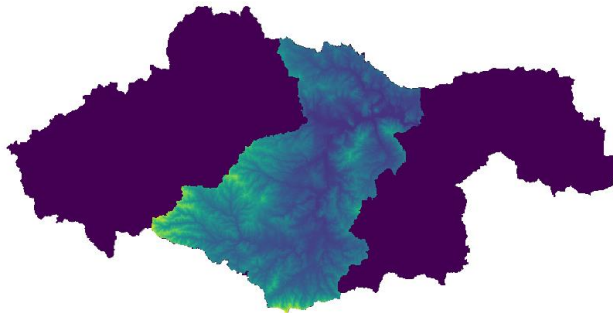
Следващата стъпка е определяне на координатите на точката, върху която ще се изчислява оттока – таблица 4 от дисертационния труд.

След определяне на рамките на под-басейните, следва да се дефинират само собствените под-басейни, чиито отток се акумулира в язовирите - Фиг.V.1.5, Фиг.V.1.6 и Фиг.V.1.7.

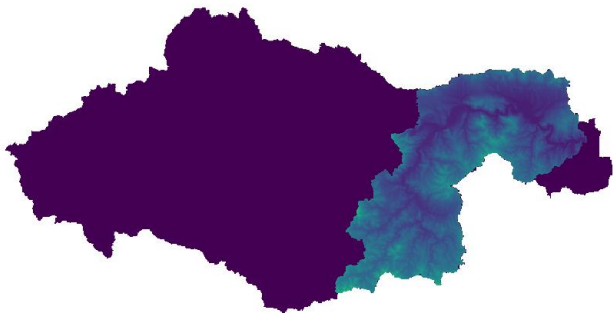




Фиг.V.1.5 Визуализация на под-басейна на язовир Кърджали



Фиг.V.1.6 Визуализация на под-басейна на язовир Студен Кладенец



Фиг.V.1.7 Визуализация на под-басейна на язовир Ивайловград

## V.2. ХИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧНИ ДАННИ

Втората група файлове съдържат динамично изменящи се във времето хидрометеорологични данни. Част от спецификата на метеорологичните данни е, че се събират в отделни станции и имат дискретен характер, въпреки че се отнасят за недискретни явления. Един от проблемите при моделирането на тези данни е да се трансформира точковия характер на информацията в пространствен характер. Затова се използват различни методи за пространствена интерполация, като важното предимство е, че полученият резултат е във вид на растерен слой, който отразява пространствения континуитет (непрекъснатост) на изследваното явление.

Използват се данни за тричасов валеж измерен от автоматични станции. Разделението на валежа на твърд и течен се извършва в зависимост от средната температура на въздуха на мястото на измерване на валежа.

Температурните полета се интерполират линейно спрямо надморската височина.

Като в разглеждания водосбор липсват данни за посоката и силата на вятъра, както и данни за слънчевата и атмосферна радиация, те се заместват с моделираните полета данни от атмосферния модел ALADIN-BG за съответния период. Този процес е особено важен при моделирането на натрупването на сняг и симулирането на процеса на снеготопене.

Метеорологичната информация е организирана в осем специфични ASCII файла с представка "Forc": Валеж в течна фаза - Forc\_RAIN.txt (kg/m<sup>2</sup>/s); Валеж в твърда фаза - Forc\_SNOW.txt (kg/m<sup>2</sup>/s); Атмосферно налягане - Forc\_PS.txt (Pa); Температура на въздуха - Forc\_TA.txt (K); Влажност на въздуха - Forc\_QA.txt (kg/m<sup>3</sup>); Скорост на вятъра - Forc\_WIND.txt (m/s); Пряка слънчева радиация - Forc\_DIR\_SW.txt (W/m<sup>2</sup>/s); Атмосферна радиация - Forc\_LW.txt (W/m<sup>2</sup>/s).

В допълнение към горепосочените файлове, моделът изисква и конфигурационен файл с име "Params\_config.txt".

## V.3. ИЗВОДИ

Подготовката на входни данни за хидрологично моделиране и прогнозиране, както и за оптимизация на работата на ВЕЦ, е сложен процес, който изисква събирането и обработката на широк набор информация. Тези данни включват както физикогеографските особености на водосборния басейн, така и динамично променящите се хидрометеорологични параметри. Статичните данни, като топографията на терена и почвените характеристики, се използват за дефиниране на структурата на водосборния басейн, докато динамичните данни, като валежи, температура и вятър, са необходими за симулация на хидрологичните процеси в реално време.

## VI. РАЗРАБОТВАНЕ НА ПРИЛОЖЕН МОДЕЛ НА ИЗСЛЕДВАНИЯ ПРОБЛЕМ

За нуждите на автономната работа на системата е съставен приложен модел на работа на изследвания проблем, като е заложен и часови график за изпълнение на всяка една от заложените задачи.

Теоретичния модел е разделен на две части. Хидроложки модел и Симулиране работата на каскадата.

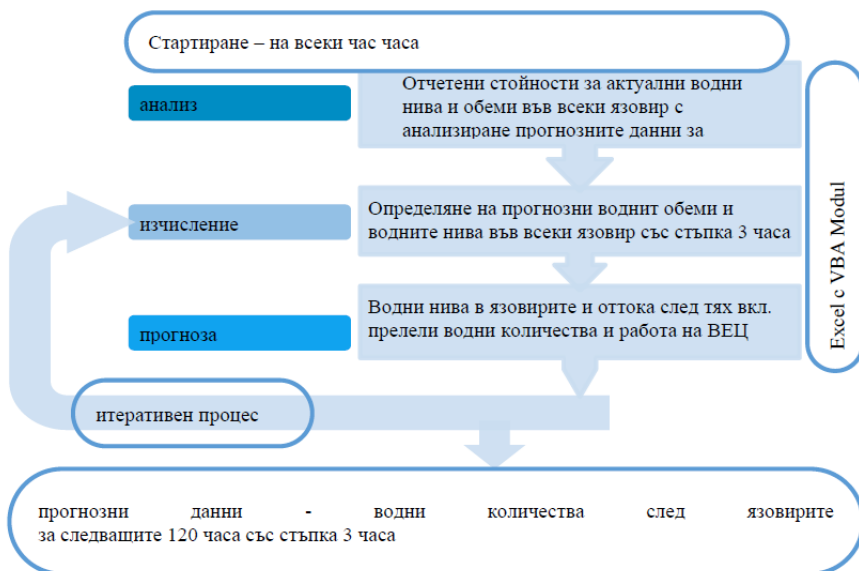
### VI.1. ХИДРОЛОЖКИ МОДЕЛ



Фиг. VI.1.1 Схема на работа на хидроложкия модел

Първата част от приложния модел на изследвания проблем - Фиг. VI.1.1 обхваща адаптирането и изпълнението на хидрологичния модел SURFEX – TOP - Фиг. VI.1.1. Системата следва да стартира автоматизирано и ежедневно, което гарантира стабилността и непрекъснатостта на работа. Като резултат на динамичното изменение на условията (ISBA: DIF), се изчисляват нови прогнозни стойности за повърхностен и вътрепочвен отток, както и за изпарение за същата единица площ. Последната фаза изчисление е определяне на разпределението на водата до речните легла (Runoff: DT92).

## VI.2. СИМУЛИРАНЕ РАБОТАТА НА КАСКАДАТА



Фиг. VI.2.1 Изчислителна схема за прогнозиране на водните обем в язовирите от каскадата и оттока след язовирите

Втората част от приложния модел на изследвания проблем - Фиг. VI.2.1 се фокусира върху анализа и прогнозирането на водните нива и обеми в язовирите. Тази част от модела следва да използва данни, отчетени в реално време, за актуалните водни нива и обеми във всеки язовир, заедно с прогнозните данни за приток. Системата стартира през кратки интервали от време, което да осигурява почти непрекъснат аналитичен и изчислителен процес. След извършване на необходимите изчисления, моделът генерира прогнози за водните нива в язовирите и оттока след тях със стъпка 3 часа, включително преливане на водни количества и работата на ВЕЦ. Процесът е итеративен, което означава, че се повтаря многократно с цел уточняване и оптимизация на резултатите. За край на итеративния процес е определен момента на стационариране на водното ниво под НВВН. Водните нива и обеми се представят за следващите 120 часа със стъпка от 3 часа. Процесът на изчисление и прогнозиране се осъществява чрез използване на модел, разработен в Excel с VBA (Visual Basic for Applications). Резултатът е изчислен прогнозен отток след всеки язовир за 5 дни напред в реляционна база данни, за последваща визуализация на сайта на прогнозата.

### **VI.3. ИЗВОДИ**

Предложеният приложен модел за хидроложко моделиране и прогнозиране на работата на каскада „Арда“ е съобразен с подробните входни данни със стъпка 3 часа за хидроложко моделиране налични в НИМХ. От една страна това са измерванията от автоматични станции на най-важните параметри: валежи (течна и твърда фаза), температура на въздуха и влажност на въздуха с относително добро покритие на територията на водосбора. От друга страна това са данните, получавани ежедневно през 12 ч., от прогнозните метеорологични модели. От значение е именно факта, че за **инициализация** на прогнозната част на моделирането се използват **наземни измервания**, които за споменатите метеорологични променливи засега значително превъзхождат по качество данните от сателитни или други глобални източници на информация.

## **VII. АДАПТИРАНЕ НА СЪЩЕСТВУВАЩ ПРОГРАМЕН ПРОДУКТ ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ИЗЧИСЛИТЕЛЕН ЕКСПЕРИМЕНТ**

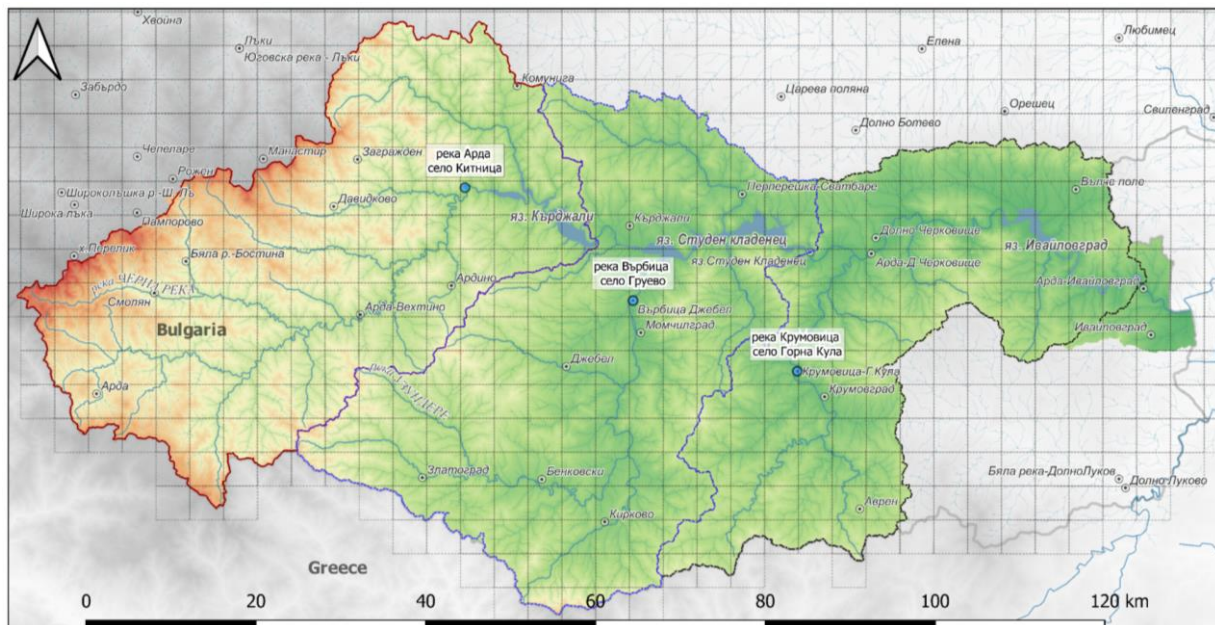
### **VII.1. ТЕРИТОРИАЛЕН ОБХВАТ НА ИЗЧИСЛЕНИЯТА**

За провеждане на изчислителния експеримент е използвана каскада "Арда". Каскада "Арда" е единствената система от големи язовири у нас, изградени на една река - Фиг. VII.2.1.

### **VII.2. МОДЕЛНА СИСТЕМА**

Както бе споменато във въведението, използвана и в разработката е обединена моделна система за изготвяне на хидроложки прогнози между повърхностната схема ISBA и хидроложки модел. В платформата SURFEX версия 7.3 е вградена схема за симулиране на процесите между земната повърхност и атмосферата – ISBA. Хидроложкия модел съчетан с ISBA е в два варианта: версия DT92 и TOPMODEL, основаващ се на топографията на басейна. На Фиг. VII.2.2 схематично е посочена моделната система на използвания модел.

ISBA – 3L разглежда почвата във три слоя, а ISBA-DF има за цел да опише обмена на топлина и вода между почвата, растителността и атмосферата в моделната колона.



**Условни знаци**

■ Язовири

— Реки

□ Клетки на хидрологичен модел

● Хидрометрични станции

○ Валежмерни станции

**Собствен водосбор**

--- язовир Ивайловград

— язовир Кърджали

--- язовир Студен кладенец

**Надморска височина**



Фиг. VII.2.1 Карта на териториален обхват на изчисленията с очерчания на водосборите.

### **VII.3. ВХОДНИ ДАННИ ХИДРОЛОЖКИЯ МОДЕЛ**

Настройките необходими за извършване на моделирането се извършват в OPTIONS nam файл. Този файл съдържа различни опции и настройки, които се използват при изпълнението на SURFEX и определя параметрите за моделиране на повърхността на земята, като почвата, растителността, хидрологията и други фактори, които влияят на потока на влагата, температурата, влажността, повърхностния отток и други характеристики на атмосферата. Описани са използваните списъци с параметри.

### **VII.4. ВХОДНИ ДАННИ НЕОБХОДИМИ ЗА ИЗЧИСЛИТЕЛНА СХЕМА ЗА ВОДОХРАНИЛИЩАТА**

Входните данни необходима за изчислителната схема на водохранилищата включват следните елементи:

- Резултат от хидроложка симуляция: Това е основният източник на информация за водния баланс във водосборните области. Резултатите от хидроложката симуляция, извършена с помощта на модел като TOPMODEL, предоставят симулирани водни количества в точки от речната мрежа, които се явяват приток в язовирите.

- Анализ на хидравличната свързаност между язовирите:
- Актуални нива и обеми на язовирите:
- Данни за използването на водата – характерни водни количества
- Хидравлични и водостопански характеристики на съоръженията:
- Технически характеристики на язовирите, включително и инструкциите за провеждане на високи вълни през всеки един от тях.

За разглежданата каскада данните са систематизирани и посочени в Таблица 5 от дисертационния труд.

#### **VII.4.1. ИНТЕРПРЕТИРАНЕ НА ПРИЕТИ УПРАВЛЕНСКИ ПРАКТИКИ ПРИ ПРОВЕЖДАНЕ НА ВИСОКА ВОДА ПРЕЗ СЪОРЪЖЕНИЯТА**

В процеса на работа по дисертационния труд са разгледани оперативните правила за провеждане на високи води през язовирите. Язовир „Кърджали“ е от съществено значение за националната сигурност и достъп до оперативните правила за този язовир не бе предоставен. Приети са аналогични правила както при язовир „Студен кладенец“, но съобразени със техническите характеристики на язовир „Кърджали“.

Три са основните хидрологични характеристики, които оказват влияние върху водостопанските изчисления при провеждане на високи води: Количеството на преработени от ВЕЦ води, преливащи водни количества и интерпретиране на приети управленски практики.

#### **VII.4.2. КОЛИЧЕСТВОТО НА ПРЕРАБОТЕНИ ОТ ВЕЦ ВОДИ.**

Количествата зависят от напора на водния стълб в язовира описан в ключовите характеристиките на работа на агрегатите при различни напори. (Фиг.IX.2.2 Линейна зависимост на специфичния разход спрямо котата на водното ниво) Колкото е по-висок напора, толкова по-малко вода ще бъде преработена от ВЕЦ за единица време.

#### **VII.4.3. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПРЕЛИВАЩИ ВОДНИ КОЛИЧЕСТВА ПРЕЗ ПРЕЛИВНИЦИТЕ**

Преливащите водни количества могат да се определят еднозначно по хидравлична формула, която включва редица емпирично намерени коефициенти. Използвана е основната хидравлична формула за оразмеряване на преливници „практически“ профил се представя съгласно:

$$Q = \sigma_n \sigma_\phi \sigma_n \varepsilon m_{np} b \sqrt{2gH_0^{\frac{3}{2}}} \quad (29)$$

#### **VII.4.4.ИНТЕРПРЕТИРАНЕ НА ПРИЕТИ УПРАВЛЕНСКИ ПРАКТИКИ ПРИ ЯЗОВИР „СТУДЕН КЛАДЕНЕЦ“**

Управленските практики са интерпретирани като е отразено основното правило да не се допуска преливане при „вдигнати“ клапи, а спускането на клапите да се извършва спрямо притока в язовира.

Работното положение на клапите на язовир "Студен кладенец", съобразно нормативните документи, е "вдигнати". Това определя нова кота на най-високо работно водно ниво (кота НВРВН), която съответства на горния ръб на клапите и е равна на 225.00 m. За сравнение, проектната кота НВРВН, която съвпада с котата на "твърдия ръб", е 220.00 m.

При очаквана висока вълна, е възможно извършването на манипулации с една или повече клапи - до максимум девет. Тези манипулации се извършват в определен ред.

Може да се прибегва до задействане на облекчителните съоръжения на язовирната стена, с цел притъпяване върха на високата вълна, преди достигане на КВН = 225.00 m.

#### **VII.4.5. ИНТЕРПРЕТИРАНЕ НА ПРИЕТИ УПРАВЛЕНСКИ ПРАКТИКИ ПРИ ЯЗОВИР „ИВАЙЛОВГРАД“**

Язовирната стена разполага със следните облекчителни съоръжения:

- Основен изпускател: това са две тръби с кръгло сечение, които се използват за изпускане на водата от язовира.
- Преливник: челен преливник, който се състои от шест преливни полета. Двете крайни полета, разположени от двете страни на преливния



фронт, имат преливен ръб на височина 120.200 m. Останалите четири полета имат преливен ръб на височина 121.000 m, което е с 80 см повишение. Двете странични полета имат ширина от 17.25 m, докато двете средни полета имат ширина от 9.50 m.

В зависимост от големината на очакваната висока вълна, могат да се извършват манипулации с основния изпускател. Тези манипулации се извършват в определен ред, при който вълната се "потапя" и енергията се "гаси" във водобойния кладенец. Това става при условие, че основният изпускател функционира едновременно с отвеждащите тръбопроводи към турбините на ВЕЦ "Ивайловград", като се предполага, че турбините работят на пълна мощност.

## **VII.5. ПРИЛАГАНЕ НА ПРИЛОЖНИЯ МОДЕЛ НА ИЗСЛЕДВАНИЯ ПРОБЛЕМ ЧРЕЗ СЪЗДАВАНЕ НА АВТОМАТИЗИРАН ИЗЧИСЛИТЕЛЕН ПРОЦЕС**

Използва се водобалансов метод, свързващ концепции използвани за описание на процесите произтичащи във водосборния басейн (ISBA-DIF DT92 ) и баланса на язовирното езеро.

Създаден е на основата на софтуера MSExcel в Windows среда, като автономната му работа се гарантира от VBA модул.

Приложението чете от база данни последните измерени стойности на нивата в язовирите и последната изчислена прогноза за приток от хидроложкия модел.

### **VII.5.1.ПРОГНОЗА ЗА КОМПОНЕНТИТЕ НА БАЛАНСА НА ВОДОХРАНИЛИЩАТА С РЕЗУЛТАТИ ОТ МОДЕЛНИ ДАННИ ЗА СОБСТВЕН ПРИТОК**

Приложението динамично изчертава графики с представяне на прогноза за собствен приток, разход от ВЕЦ и обем и в трите язовира., също така обобщава изчисления отнасящи се до височина над/до преливен ръб на съответния язовир. Посочени са и максималните стойности на преливните височини на трите преливника.

Ръчно четене от базата данни

Ръчно експортиране на данни

Refresh  
MySQL DATA

save & close

EXPORT last.txt

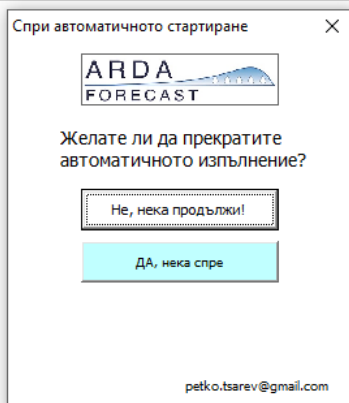
EXPORT \*.csv

CODE NUM	Язовир	АВТ. Станция	ОБЕМ	КЪМ	Свободен ОБЕМ	LAST stoej	Н разлика до НВРВН
-	-	-	m <sup>3</sup> 10 <sup>3</sup>	-	m <sup>3</sup> 10 <sup>3</sup>	cm (Валникова)	cm
23	Кърджали	61751	273 549.938	2019/01/24 12:00:00	223 685.760	307 64	16 51
24	Студен кладенец	61801	220 133.299	2019/01/24 12:00:00	167 638.988	217 61	6 91
25	Ивайловград	61901	125 797.781	2019/01/24 12:00:00	30 904.563	117 81	2 19

CODE NUM	Язовир	АВТ. Станция	5 дневен сумарен приток	прогноза към дата	Прогнозен ОБЕМ само от собствен приток	ОБЕМ разлика до НВРВН
-	-	-	m <sup>3</sup> 10 <sup>3</sup>	yyy-dd-dá hh:mm:ss	m <sup>3</sup> 10 <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> 10 <sup>3</sup>
23	Кърджали	61751	6 544.174	2019/01/28 20:00:00	280 094.112	217 141.587
24	Студен кладенец	61801	49 768.906	2019/01/28 20:00:00	269 902.205	117 870.082
25	Ивайловград	61901	88 211.765	2019/01/28 20:00:00	214 009.546	- 57 307.202

CODE NUM	Язовир	АВТ. Станция	Преливане	Дата начало преливане
-	-	-	m3103	yyy-dd-dá hh:mm:ss
23	Кърджали	61751	FALSE	-
24	Студен кладенец	61801	FALSE	-
25	Ивайловград	61901	TRUE	2019/01/26 08:00:00

МАХ приливо Q	Прелял обем
m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> 10 <sup>3</sup>
0.00	0.00
0.00	0.00
292.45	9448.69



Фиг. VII.5.1 Начална визуализация на приложението

## VII.5.2. АНАЛИЗИРАНЕ НА КАСКАДНАТА ЗАВИСИМОСТ НА ВОДОХРАНИЛИЩАТА

Изчисленията се извършват с тримесечна стъпка в табличен вид като се прилага следния модел на работа:

1. Започва се с анализиране на преливане само от собствен приток чрез определяне на " Прогнозен обем във водохранилището само от собствен приток в 103m<sup>3</sup> като се отчита прогнозен Собствен приток l/s и се извършва

проверка за Преливане от собствен приток и въведено в приложението Предварително изтакане чрез ВЕЦ.

*ii.* Извършва се прогноза за разхода през ВЕЦ. Поради факта, че започването на енергопроизводството и анализиране на нуждата от стартиране на водните централи при водохранилищата е процес свързан с прогнозиране на енергопотреблението в приложението е прието, че водните количества като част от очаквания приток при висока вода след достигане на предварително заложен обем във водохранилището, следва да бъдат проведени през турбините на ВЕЦ. Поради тези обстоятелства е прието, че при регистрирано преливане, за поемане на високата вълна работят всички хидрогенератори.

*iii.* Прогнозира се ходографа на обема във водохранилището при работа на ВЕЦ

*iv.* Определя се възможността за преливане при работещи всички хидрогенератори и очаквания моделиран приток, като се прогнозира разхода от водохранилището

*v.* Извършва се прогноза на обема във водохранилището при:

- прогнозен разход на горното водохранилище
- прогнозен собствен приток

$$Q_{i-1}^{outFlow} = Q_i^{inFlow} = Q_{i-1}^{maxHPP} + Q_{i-1}^{OF} + Q_i^{own} \quad (33)$$

Формула (33) описва разхода от горното водохранилище, което представлява приток към разглежданото водохранилище, където  $Q_{i-1}^{maxHPP}$ ,  $Q_{i-1}^{OF}$  и  $Q_i^{own}$  представляват максималния разход на ВЕЦ, прелели водни количества от разположеното по-горе водохранилище и притока от собствения водосбор на разглежданото водохранилище.

*vi.* Анализира се възможността за преливане на водохранилището на база работата на каскадата и очаквания собствен приток.

*vii.* Аналогично се изчислява прогноза за разхода през ВЕЦ, както в точка *ii*, като се отчита каскадната свързаност и се определят изразходените обеми

*viii.* Прогнозира се кота водно ниво във водохранилището.

*ix.* Определя се височината до/над преливането чрез която се изчислява преливащото водно количество и прелелия обем.

*x.* След това се изчислява потенциално преляло водно количество и прелелия воден обем, като се прогнозира обема и котата на водното ниво във водохранилището при работа на ВЕЦ, потенциалното преливане за предходния 3 часов период и приток от каскадата.

*xi.* С цел минимизиране на грешката, изчисленията по точки *ix* и *x* се повтарят итеративно до стационариране на колебанията в разхода от водохранилището.

## **VII.6. ИЗВОДИ**

В тази част се разглежда адаптирането и допълването на съществуващ софтуерен продукт за провеждане на изчислителни експерименти, като се акцентира върху териториалния обхват и използваната моделна система.

Използваната моделна система обединява повърхностната схема ISBA и хидроложки модел съдържащи се в платформата SURFEX (версия 7.3). Двата варианта на хидроложкия модел са DT92 и TOPMODEL, като и двата използват геоморфоложко маршрутизиране с параметризирани скорости на движение на водата.

## **VIII. ИЗСЛЕДВАНЕ НА АДАПТИРАНИЯ МОДЕЛ**

### **VIII.1. АНАЛИЗ НА ЧУВСТВИТЕЛНОСТТА НА МОДЕЛА КЪМ РАЗЛИЧИЯ В ПАРАМЕТРИТЕ**

ISBA 3L-TOP се отнася до 3-слойната версия на схемата ISBA от платформата SURFEX, наречена ISBA-3L свързана с хидрологичен модел TOPODYN. Тази версия описва почвата чрез три слоя - повърхностен, коренов и дълбок почвен слой.

ISBA-DF-DT92 се отнася до комбинация от два модела - ISBA-DF дифузна версия на ISBA, в която почвените характеристики се изчисляват на принципа на дифузията и DT92 - модел за хидрологичен отток, който разглежда променливи във времето параметри. DF се отнася за вертикалното дифузно симулиране на влагата и топлината в почвата. На Фиг. VII.2.2 е илюстрирано вертикалното разделение в почвата за ISBA-3L и ISBA-DF.

Анализът на чувствителността на модела към различията в параметрите показва, че има значителни вариации в статистическите показатели в зависимост от комбинацията на параметрите. Например, някои комбинации имат висок коефициент на детерминация и комплексния индекс, което означава, че те добре съответстват на наблюдаваните данни. Моделът ISBA-DIF с хидроложка част DT92 за река Върбица показва висока ефективност  $E = 0.875$  и  $NRMSE\% = 1.9$ , което предполага, че тази конкретна конфигурация на модела е подходяща за симулиране на условията в тази река.

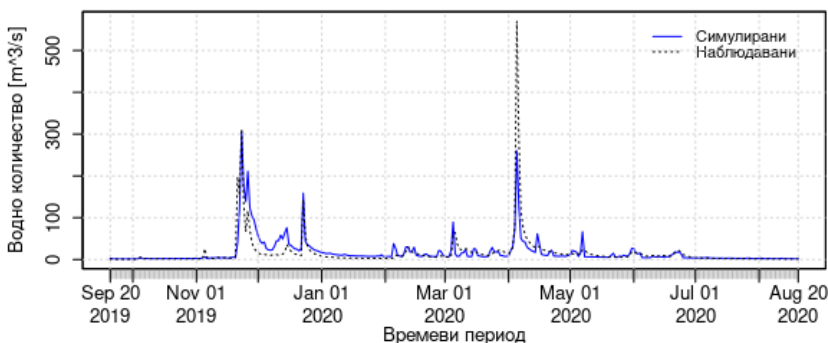
За конкретната разработка на дисертационния труд и последващото калибриране и валидиране на хидроложкия модел и на модела Язовир + БЕЦ за конкретните водосбори се използвани следните схеми: CRUNOFF = 'TOPD'; CKSAT = 'EXP'; CISBA = '3-L'.

## VIII.2. КАЛИБРИРАНЕ НА ХИДРОЛОЖКИЯ МОДЕЛ И МОДЕЛА НА ДЕЙСТВИЕ РЕТЕНЗИЯ ЯЗОВИР И ВЕЦ ЗА КОНКРЕТНИ ВОДОСБОРИ

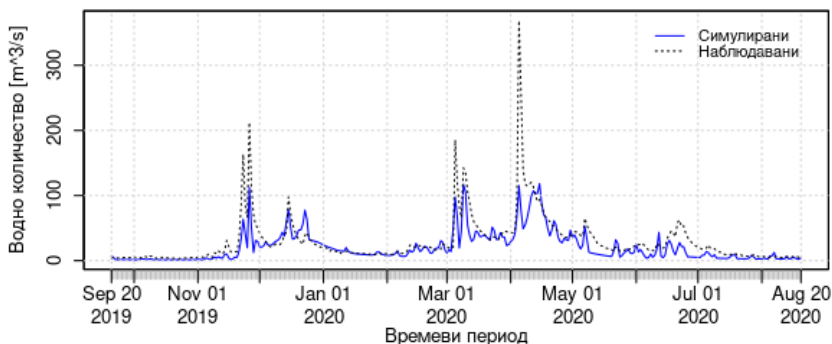
За калибриране на хидроложкия модел на водосборите осигуряващи притока в каскадните язовири е извършено калибриране със средно дневни стойности на водни количества за период от 335 дни от 20.09.2019 г. до 20.08.2020 г. с данни от три хидрометрични станции: **река Върбица** при село Груево – основен приток на яз. Студен Кладенец, **река Арда** при село Китница – основен приток на яз. Кърджали и **река Крумовица** при село Горна Кула – основен проток на яз. Ивайловград

Разглеждания времеви период обхваща месеци с кратък сух период, снеговалежи и периоди с наблюдавани високи, средни и ниски води, в това число периодът обхваща измерени водни количество значително различаващи се от обичайно измерваните. Хардуерните и софтуерни ограничения обуславят избора да се използват средно дневни водни количества, които в същността си включват тричасовите измерени стойности. При така дефинираните периоди и стойности, една симулация е с продължителност около 35 минути. След всяка симулация се извършва промяна на калибрационните параметри XF\_PARAM\_BV; XC\_DEPTH\_RATIO\_BV; XSPEEDR; XSPEEDG; XRTOP и това води до значително затрудняване на калибрационния етап.

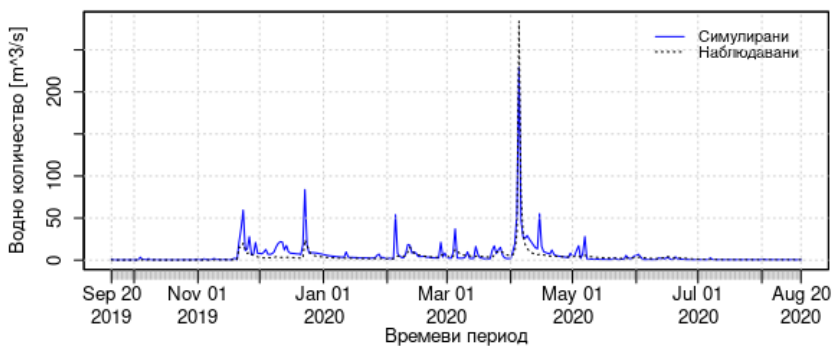
Детайлният анализ позволи идентифицирането на най-чувствителните параметри и разработването на стратегии за тяхната калибровка. Например, наблюдава се, че увеличение в XF\_PARAM\_BV довежда до повишен повърхностен отток в модела. От друга страна, промените в XC\_DEPTH\_RATIO\_BV бяха свързани с промени в проникването на водата в почвата, което влияе върху подземните води и може да доведе до промени в режима на дълбокото дрениране. Крайните калибрирани коефициенти са изведени таблично.



Фиг. VIII.2.1 Наблюдавани и симулирани стойности на среднодневни водни количества [m³/s] при река Върбица при село Груево



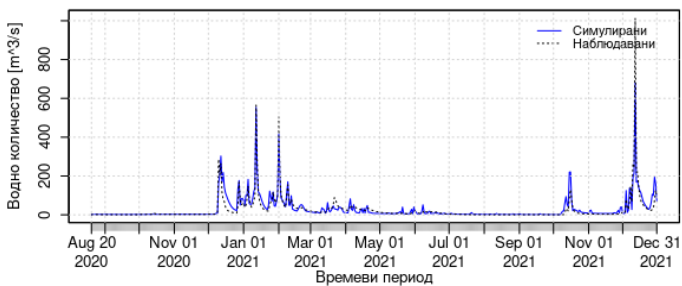
Фиг.VIII.2.2 Наблюдавани и симулирани стойности на средnodневни водни количества [m<sup>3</sup>/s] при река Арда при село Китница



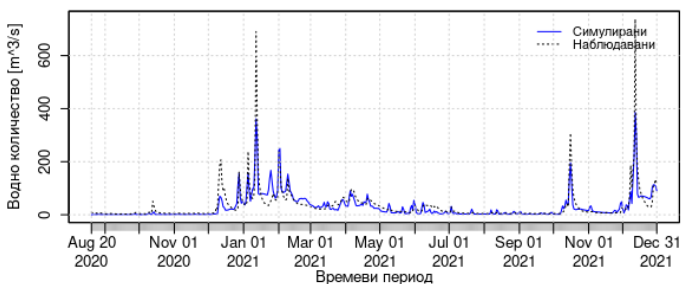
Фиг.VIII.2.3 Наблюдавани и симулирани стойности на средnodневни водни количества [m<sup>3</sup>/s] при река Крумовица при град Горна Кула

### VIII.3. ВАЛИДИРАНЕ НА ХИДРОЛОЖКИЯ МОДЕЛ ЗА КОНКРЕТНИ ВОДОСБОРИ

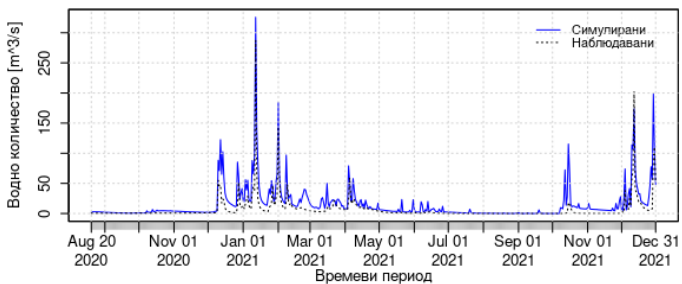
За валидиране на хидроложкия модел и модела на действие на ретензията на язовирите за водосборите осигуряващи притока в каскадните язовири е извършено сравнение със средно дневни стойности на водни количества за период от 499 дни от 20-08-2020г. до 31-12-2021 г. с данни от трите хидрометрични станции използвани за калибрирането: река Върбица при село Груево – основен приток на яз. Студен Кладенец, река Арда при село Китница – основен приток на яз. Кърджали, река Крумовица при село Горна Кула – основен проток на яз. Ивайловград



Фиг. VIII.3.1 Наблюдавани и симулирани стойности на среднодневни водни количества [m<sup>3</sup>/s] при река Върбица при село Груево



Фиг. VIII.3.2 Наблюдавани и симулирани стойности на среднодневни водни количества [m<sup>3</sup>/s] при река Арда при село Китница



Фиг. VIII.3.3 Наблюдавани и симулирани стойности на среднодневни водни количества [m<sup>3</sup>/s] при река Крумовица при град Горна Кула

#### VIII.4. ИЗВОДИ

Тук се разглежда 3-слойния модел ISBA-3L, моделът с дифузно разпределение на влагата и топлината в почвата ISBA-DF, по-отделно съчетани с двата теоретични модела за оттока TOPODYN и DT92 в платформата SURFEX. Вертикалното дискретизиране на почвата и различни

хидрологични модели са анализирани спрямо тяхната чувствителност към промени в параметрите. Показани са статистически резултати за пет комбинации от параметри, включително коефициент на Nash или ефективност (E), коефициент на детерминация ( $R^2$ ), нормализиран корен на средноквадратична грешка (NRMSE%).

В заключение, адаптираният модел SURFEX демонстрира висока чувствителност към промени в параметрите, което изисква внимателен избор и калибриране на параметрите за постигане на точни и надеждни анализи и съответно прогнози. Валидирането потвърждава ефективността на модела за различни хидрологични условия, правейки го подходящ за използване в практическото моделиране.

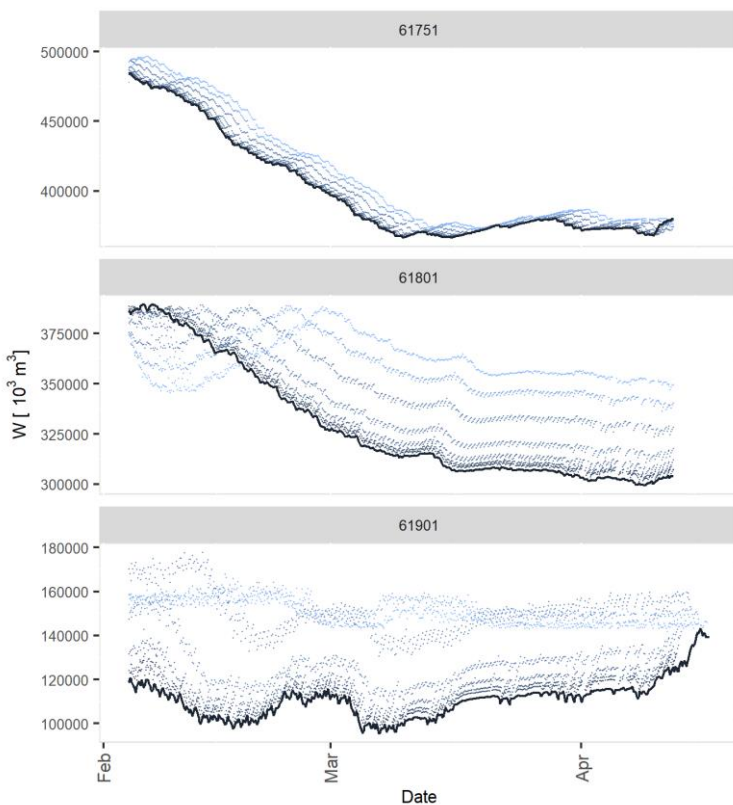
## **IX. ИЗСЛЕДВАНЕ НА СТАТИСТИЧЕСКИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ИЗЧИСЛЕНИЕ НА ХИДРОЛОЖКАТА ПРОГНОЗА И НА ОПТИМИЗАЦИЯТА НА ЕНЕРГОПРОИЗВОДСТВОТО**

### **IX.1. АНАЛИЗИРАНЕ НА СТАТИСТИЧЕСКИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

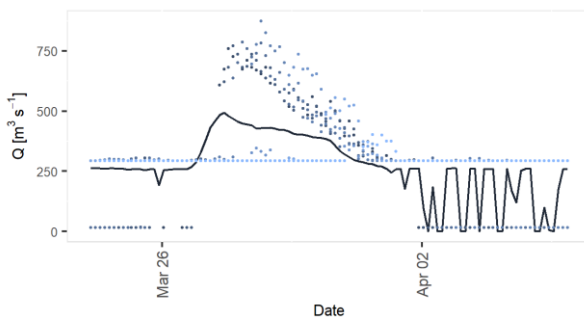
#### **IX.1.1. АНАЛИЗИРАНЕ НА ПРОГНОЗНИТЕ РЕЗУЛТАТИ**

Анализирана е работата на хидроложкия модел и приложението за изчисление на обеми и преливане на каскадните язовири за минал период. Статистическите резултати от сравнението между прогнозираните и реалните обеми в язовирите най-силно зависят от самата хидроложка прогноза за притока в язовирите, от друга страна хидроложката прогноза зависи от качеството на прогнозното поле на валежа, неговата прецизност във времето и пространството. Несигурността се обуславя и от факта, че трудно може да бъде прогнозирана работа на ВЕЦ, чиито разход оказва голяма влияние върху точността на прогнозата. На Фиг. IX.1.1.1 с потъмняването на времевата серия са показани ходови линии на обемите, като с плътна линия са посочени отчетените обеми в язовира. По-светлата редица показва, прогноза изчислена по-рано. Най-светлата графика е 92 часа преди отчетената стойност (3ч., 6ч., 12ч., 24ч., 48ч., 72ч., 96ч. преди измерените обеми), най-тъмната - актуалната измерена стойност. Графиката е комбинация от множество симулации извършени в разглеждания период като са взети в предвид съответните прогнозиран водни обеми/водни количества в конкретния период преди отчитането на актуалния обем или водно количество. При язовир Ивайловград /61901/ най-ясно графично се констатира натрупаната грешка при прогнозиране работния режим на ВЕЦ на по-горе разположен язовир.





Фиг. IX.1.1.1 Прогнозни и отчетени водни обеми във язовирите за периода от 2019-02-04 02:00 до 2019-04-16 20:00



Фиг. IX.1.1.2 Отчетени водни количества след яз. Ивайловград за периода от 2019-02-04 02:00 до 2019-04-16 20:00

На Фиг. IX.1.1.2 е показан прогнозирания отток включително преливане. Като старта на преливане е прогнозиран сравнително добре с изключение на дългосрочната прогноза от 96 час преди събитието.

## **IX.1.2. СТАТИСТИЧЕСКИ ИЗЧИСЛЕНИЯ**

Разгледани са прогнози стартирани съответно 3ч., 6ч., 12ч., 24ч., 48ч., 72ч., 96ч. преди измерените актуални данни от автоматични станции за водно ниво на язовирите. За оценка на точността на прогнозираните водни обеми в язовирите са използвани Nash - Sutcliffe – E коефициент на ефективност и анализ на процентното отклонение - PBIAS.

## **IX.2. ТЕХНИЧЕСКИ ОСОБЕННОСТИ НА КАСКАДАТА ПРИ ОПТИМИЗАЦИЯ НА ЕНЕРГОПРОИЗВОДСТВОТО**

При оптимизация на енергопроизводството от язовирни водноелектрически централи е необходимо да се вземат под внимание следните фактори:

- избягване и/или минимизиране на непреработените водни количества /прелели или освободени от облекчителните съоръжения/
- достигане на висока крайна стойност на произведената електроенергия в контекста на свободен пазар на електроенергия
- съобразяване с работните характеристики на изградените водноелектрически централи за работа с висок коефициент на полезно действие.

Оптимизацията на енергопроизводството може да се постигне чрез използване на подходящи алгоритми за управление на процесите, които да определят оптималното ниво на водата в язовира. Това ще доведе до производство на най-голямо количество електроенергия при възможно най-високата цена на свободния пазар.

### **IX.2.1. РАБОТНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ВЕЦ**

Работната характеристика на една турбина по същество е линейна характеристика и показва изменението на КПД в зависимост от натоварването ѝ. Тя може да се получи чрез директно сечение на експлоатационните универсални характеристики при определен напор или чрез сечение на главната универсална характеристика и допълнителни изчисления. За нуждите на дисертацията - работните характеристики са изведени линейно, като са определени техните линейни уравнения и са представени графично на Фиг. IX.2.1.

Изведена е линейната зависимост на специфичния разход  $m^3/kWh$ . спрямо котата на водното ниво при всяка една от централите.

### **IX.3. ИЗВОДИ**

Хидроложката прогноза за язовирите показва значителна зависимост от точността на валежните прогнози и работния режим на ВЕЦ, като несигурността нараства при дългосрочни прогнози. Оптимизацията на енергопроизводството изисква прецизно управление на водните нива и използване на подходящи алгоритми, за да се минимизират загубите и максимизира производството на електроенергия на свободния пазар.

### **X. ИКОНОМИЧЕСКИ АНАЛИЗ НА ИСТОРИЧЕСКИ ЦЕНИ НА СВОБОДНИЯ ПАЗАР НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ В БЪЛГАРИЯ.**

Извършен е клъстерен анализ за различните периоди на цените на електроенергия на свободния пазар в България. Свободният пазар на електроенергия в България представлява система, в която производителите на електроенергия, доставчиците и крайните потребители имат свободата да купуват и продават електроенергия на конкурентни цени.

Разгледани бяха историческите цени в четири годишен период от 01-01-2018г.- до 31-12-2022 г. в сегмент “Ден напред” търгуван на „Българска независима енергийна борса“ (БНЕБ) ЕАД <https://ibex.bg> БНЕБ е създадена през януари 2014 г. като 100% дъщерно дружество на „Български Енергиен Холдинг“ ЕАД. БНЕБ ЕАД притежава десетгодишна лицензия (NoЛ-422-11), издадена от Комисията за енергийно и водно регулиране за дейността „организиране на борсов пазар на електрическа енергия” в Република България. От архивните данни са определени средни цени за 1 MW по часове и месеци, като периодите на анализ са съобразени с излизането на небитовите потребители на свободния пазар, като разглеждания период е разделен на 2 и са извършени анализи за следните периоди: от 01-01-2019 г.- до 31-12-2020 г. – две години; от 01-01-2021 г. до 31-12-2022 г. – две години; от 01-01-2019 г. до 31-12-2022 г.– общ анализ за четири години

#### **X.1. КЛЪСТЕРЕН АНАЛИЗ – ГРАФИКИ**

На Фиг.Х.1.1, Фиг.Х.1.2 и Фиг.Х.1.3 от дисертационния труд графично са изобразени клъстерите при направените анализи.

#### **X.2. ТАБЛИЧНИ ДАННИ**

С градация на зеления цвят в таблици 9, 10 и 11 от дисертационния труд са онагледени цените на електроенергия като със зелен цвят е означено повишаването на стойностите (цени или проценти), С червеното наголямата негативна разлика от средната стойност за разглеждания период.

### **Х.3. ИЗВОДИ И ПРЕПОРЪКИ ОТ ИЗВЪРШЕНИЯ АНАЛИЗ**

От извършения клъстерен анализ се открояват шест часови диапазона с най-висока цена за разглежданите периоди. Това са часовете 07-08, 08-09, 17-18, 18-19, 19-20, 20-21.

На база извършения анализ е изготвена таблица с препоръки за работа на ВЕЦ в часовете със статистически определени най-високи цени. Основния принцип е избягване на преливане през преливник с препоръка за преработване на водни обеми **предварително, преди прогнозираното** преливане при максимална височина на водното огледало в язовира.

## **XI.ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **XI.1. КРАТКО ОПИСАНИЕ НА СЪДЪРЖАНИЕТО НА ДИСЕРТАЦИЯТА**

В глава I е извършен преглед на научната литература относно различните видове хидроложки модели.

В глава II е разгледана и обобщена информация от научната литература относно модели с възможно приложение при каскада от язовири, както и относно научна литература за софтуерни приложения, които биха могли да бъдат използвани за изпълнение на такива модели.

В глава III са разгледани варианти на изследването и симулирането на физичните процеси, свързани с генерирането на отток, в зависимост от сложността на хидроложките явления и необходимостта от систематичен подход за тяхното опростено представяне и разбиране.

В глава IV са описани необходимите данни за извършване на симулация и прогноза на притока в язовирите за ефективното хидрологично моделиране и оптимизация на работата на водноелектрическите централи (ВЕЦ), с оглед намаляване на риска от наводнения.

Глава V описва начините и резултата от събирането, обработката и форматирането на необходимите данни за конкретните нужди за изпълнение на задачите на дисертацията: данни свързани с физикогеографските особености на водосборния басейн, които са статични и динамичните данни от метеорологичните и хидрологични измервания, както и от метеорологичните прогнози.

Глава VI е посветена на разработване на приложен модел на изследвания проблем. Схемата на работа е разделена на две части. Първата част от приложния модел на изследвания проблем обхваща адаптирането и изпълнението на хидрологичния модел SURFEX – TOP. Втората част от приложния модел на изследвания проблем се фокусира върху анализа и прогнозирането на водните нива и обеми в язовирите.

Глава VII описва адаптирането на съществуващ програмен продукт за хидроложко моделиране SURFEX-TOP. Подробно са обяснени характеристиките на модела, необходимите входни данни и параметри за провеждане на изчисленията.

В глава VIII са изследвани характеристиките на адаптирания модел. Направен е анализ на чувствителността на модела към различия в параметрите. Тук е описано калибрирането на параметрите на модела.

Глава IX представя статистическите резултати при изчисление на хидроложката прогноза за оптимизация на енергопроизводството. Статистическите резултати между прогнозираните и реалните обеми в язовирите най-силно зависят от хидроложката прогноза за притока в язовирите но хидроложката прогноза зависи от качеството на прогнозното поле на валежа, неговата прецизност във времето и пространството. Несигурността се обуславя и от факта, че трудно може да бъде прогнозирана работа на ВЕЦ.

Глава X е посветена на икономически анализ на историческите цени на свободния пазар в България за конкретен период от време с цел да се обоснове оптимизирането на енергопроизводството от ВЕЦ. От извършения кълстерен анализ се открояват шест часа с най-висока цена за разглежданите периоди: от 7 до 9ч. и от 17 до 21ч.

## **XI.2. ОБОБЩЕНИЕ НА ИЗПОЛЗВАНИТЕ ХИДРОЛОГИЧНИ МОДЕЛИ**

В изследването се използва обединена моделна система за хидроложки прогнози, включваща схемата за симулиране на процесите на границата между атмосфера и земя ISBA (Interface Soil Biosphere Atmosphere) и хидроложкия модел TOPMODEL. В платформата SURFEX, разработена от научни колективи под ръководството на Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), са интегрирани и двата компонента: ISBA и хидроложкия модел. Изчисленията на модула на оттока в ISBA могат да се извършват чрез различни теоретични модели, като често използвани са версията DT92 и TOPMODEL, базиращ се на топографията на басейна. Втората версия се нарича съкратено ISBA-TOP. В двата случая за изчисляване на водните количества при речните сечения се използва геоморфоложко маршрутизиране, характерно за TOPMODEL, при което скоростите на движение на водата се задават като параметри.

ISBA е параметризационна схема в SURFEX, предназначена за естествена земна покривка. SURFEX включва и параметризационни схеми за други типове покривка – езеро, море и урбанизирани територии (FLake, Watflx, TEB). ISBA симулира динамиката на елементите на водния баланс (изпарение, снежни запаси, влажност на почвата и др.) чрез едно-дименсионален модел. Освен точното задаване на динамичните входни

метеорологични данни, за адекватността на симулациите допринася и по-детайлното описание на статичните параметри на повърхността (топография, свойства на растителната покривка и почвите) чрез цифрови карти. Първоначално ISBA-TOP се поддържа само от 3-слоината версия за почвата в ISBA, наречена ISBA-3L. Моделът описва почвата чрез три слоя: първият много тънък повърхностен слой, където се управляват взаимодействието почва-атмосфера, кореновата зона, където водата е на разположение за растенията и дълбоката почва, в която влагата се променя в зависимост от инфилтрацията от горната зона и ексфилтрацията. В рамките на всяка от трите зони влагата и топлината са разпределени равномерно. Овлажнените зони са дефинирани като области, при които дефицитът на вода е нула, а оттока се определя като вода над насищането прехвърлена до речното корито с помощта на топографски метод - вариант на използвания от хидроложкия модел TOPMODEL.

По настоящем като алтернатива на ISBA-3L в SURFEX е въведено многослойно, вертикално дифузно симулиране на влагата и топлината в почвата под името ISBA-DF. То се съчетава с изчислителна схема на модула на оттока тип DT92 и маршрутизиране тип TOPMODEL. TOP и DT92 са различни начини за трансформиране на влагата в почвата в повърхностен и вътречувен (филтрационен) отток.

TOPMODEL е модел, основан на предположението, че хидрологичните процеси в даден водосборен басейн са силно повлияни от топографията, което води до образуване на зони с различна почвена влажност. Този модел предполага, че влажността на почвата зависи от капацитета на почвата да абсорбира вода и е свързана с нейната дълбочина. TOPMODEL използва опростена математическа формулировка, базирана на индекси на водонасищане, за да разпредели водата в басейна.

DT92 е концептуална схема, която отчита разделянето на валежите формирани се на земната повърхност на вода инфилтрирана в почвата и вода образуваща повърхностен отток. Схемата изначало е адаптирана и калибрирана за водосборния басейн на река Арно и отчита хетерогенността на земната повърхност. За използване в модела на общата циркулация тя е разширена, за да се отчетат по-големите в количествено измерение компоненти на оттока в регионите с планински терен.

Самото разпределя на водата по речната мрежа при двата варианта се осъществява по един и същ начин като предварително се задават скоростите на стичане по склона и в речната мрежа на вътречувения и повърхностния отток. Времето на дотичане от всяка клетка /пиксел на модела/ се изчислява като разстоянията до устието се определят от топографията и се разделят на зададените като параметри скорости.

ISBA се прилага в мрежа от пространствени клетки, като всяка получава хомогенно метеорологично въздействие. Те се припокриват от обикновено много по-фината мрежа клетки използвани от TOPMODEL.

Симулираните от ISBA водни обеми се прехвърлят странично в почвените зони като прехвърлянето се изчислява от хидроложкият модел TOPMODEL, като по този начин осигурява „2D симулация“ Освен това, моделът анализира последващото движение на водата по повърхността на склона и в речната мрежа.

### **XI.3. ПОСТИГНАТИ РЕЗУЛТАТИ**

Извършено е моделиране на динамиката на елементите на водния баланс във водосбора, като изпарение, снежни запаси и почвена влажност, съчетано с изчисление на притока към язовирите.

Разработено е приложение на система за краткосрочна прогноза за притока и разхода на язовирите от каскада Арда с отчитане на каскадния ефект на водохранилищата.

Съставена е изчислителна схема за оптимално действие на водно-електрическите централи в зависимост от прогнозирания приток.

Подробно са изследвани проблемите при хидроложко прогнозиране на водни нива в язовирите и оттока след тях, включително влиянието на преливните съоръжения и управлението им при провеждане на висока вълна през язовирите.

Методът може да бъде използван в съчетание с всеки разпределен хидроложки модел.

Създадено е компютърно приложение, което може да бъде използвано за симулация и прогноза на воден баланс на язовира при симулирани (прогнозирани) данни за притока.

Създават се възможности за краткосрочна оптимизация на енергопроизводството на база очакван приток през следващите 120 часа.

В заключение, изследването показва, че успешното хидрологично моделиране и оптимизация на енергопроизводството зависят от интегрирането на съвременни софтуерни инструменти, систематичното събиране на данни и адаптирането на модели, които да отговарят на специфичните нужди и условия на изследваните обекти. Това е ключово за устойчивото управление на водните ресурси и ефективното използване на енергийния потенциал на ВЕЦ. Ефективното управление на водните ресурси и минимизирането на риска от наводнения изисква комбинирането на различни модели и подходи, които да отразяват сложността на хидроложките процеси. Продължаващите изследвания и усъвършенстването на съществуващите методи и модели ще допринесат за по-доброто управление и устойчиво използване на водните ресурси в контекста на променящите се климатични условия.

## ПРИНОС НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Приноси с научно-теоретичен характер:

- Предложени са нови методи за краткосрочна оптимизация на хидроенергийното производство, основани на очакван приток и прогнозни данни, което допринася за развитието на оптимизационните модели в хидрологията.

Приноси с научно-приложен характер:

- Адаптиран е разпределен хидроложки модел за водосбора на рака Арда за прогнозиране притока в язовирите от каскадата.

- Разработена е универсален продукт за симулиране и прогнозиране на динамиката на водните обеми и стоежи във водохранилищата и оттока след каскадни язовири.

- Разработено е и внедрено компютърно приложение, което симулира и прогнозира водния баланс на язовирите, като използва симулирани данни за притока и измерени данни за нивата във водохранилищата.

- Приложението и резултатите от модела са систематизирани и валидирани за каскадата на река Арда, като са предоставени конкретни данни за техническите характеристики на язовирите и преливните съоръжения. Влиянието на преливните съоръжения и управлението им по време на провеждане на висока вълна в язовирите е от особена важност за оптималното функциониране на хидротехническите съоръжения.

Приноси с приложен характер:

- За да бъде приложена разработената схема, е създадено компютърно приложение, което може да симулира и прогнозира водния баланс на язовира, използвайки симулирани (прогнозирани) данни за притока и измерени данни за нивата във водохранилището.

- Разработена е универсален продукт за симулиране и прогнозиране на динамиката на водните обеми и стоежи във водохранилищата и оттока след каскадни язовири.

- Системата за прогнозиране на оттока ARDAFORECAST, внедрена със заповед на директора на Националния институт по метеорология и хидрология (НИМХ) и системата за обслужване на Междуправителната оперативна система за водите в Горна Тунджа (МОСВ), са примери за внедряването на разработената схема.



## ПУБЛИКАЦИИ

В изпълнение на група показател Г за придобиване на научна степен доктор - Област 5. Технически науки 5.7. Архитектура, строителство и геодезия и покриването на минималните изисквания съгласно Закон за развитието на академичния състав в Република България и Правилник за прилагане на Закона за развитието на академичния състав, са публикувани статии и доклади в нереферирани списания с научно рецензиране, както следва:

- Артинян, Е., & Царев, П., 2023: Хидроложки водобалансов модел за симулиране на естествения отток на реките в България. Годишник на Университета по архитектура, строителство и геодезия, София, том. 56, 2023, стр. 251-259 ISSN 2534-9759
- E. Artinyan, P. Tsarev, 2017. Reservoirs cascade simulation add-on for riverflow forecasting of Arda and Tundzha rivers. Danube conference 2017. ISBN 978-954-90537-2-2, p.264-267
- P. Tsarev, G. Koshinchanov, 2021 Combining ground data from rain gauges and satellite data for the purpose of analyses and forecasts of floods and flash floods, XXIX Conference of the Danubian Countries, September 6–8, 2021, Brno, the Czech Republic ISBN 978-80-7653-031-7 p. 165-170

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Изготвянето на този дисертационен труд беше възможно благодарение на подкрепата и насоките на множество хора и институции, на които съм изключително благодарен. На първо място, искам да изразя своята дълбока благодарност към моя научен ръководител, доц. д-р Ерам Артинян, чийто професионализъм, търпение и експертни знания бяха безценни през целия процес на изследване и писане. Неговите конструктивни съвети и непрестанна подкрепа ми помогнаха да преодоля многобройните предизвикателства и да постигна високо академично ниво.

Искрено благодаря и на всички преподаватели и колеги за техните вдъхновяващи лекции, семинари и дискусии, които обогатиха моите знания и ме насърчиха да се развивам в областта на хидрологията. Особено съм признателен на проф. д-р Добри Димитров, проф. Пламен Нинов, проф. д-р Снежанка Балабанова, д-р инж. Георги Кошинчанов, д-р инж. Весела Стоянова, д-р инж. Николай Недков, инж. Камелия Крумова за тяхната помощ и съвети по време на изследователските етапи.

Не на последно място, искам да благодаря на моето семейство и приятели за тяхната безусловна подкрепа и разбиране. Техните насърчителни думи и вяра в моите способности ми дадоха силата и мотивацията да завърша този труд.

Тази дисертация е резултат не само на моите усилия, но и на всички, които ми помогнаха по пътя към постигането на тази академична цел.