

**НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО МЕТЕОРОЛОГИЯ И ХИДРОЛОГИЯ**

**инж. Валерия Иванова Йорданова**

**ПРОГНОЗИРАНЕ НА РЕЧНИЯ ОТТОК С ИЗПОЛЗВАНЕ НА  
РАЗПРЕДЕЛЕН ХИДРОЛОЖКИ МОДЕЛ**

**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 инж. Снежанка Стоянова Балабанова  
Научен консултант: проф. д-р Валери Григоров Спиридонов**

гр. София, 2019 г.



Дисертационният труд е с обем 130 стр., съдържа 99 фигури, 21 таблици, и 43 уравнения и се състои от 6 глави. Използваната литература включва 50 заглавия.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на заседание на разширен научен семинар на департаменти „Прогнози и информационно обслужване“ и „Хидрология“, проведен на 24.04.2019 г., съгласно заповед № НД 04-12/12.04.2019 г. на Генералния директор на НИМХ.

**Състав на научното жури:**

доц. д-р Снежанка Балабанова  
доц. д-р Ерам Артинян  
проф. д-р Богдан Казаков - УАСГ  
проф. д-р Николай Лисев - УАСГ  
доц. д-р Марина Печинова - УАСГ

**Резервни членове:**

проф. д-р Цвятка Карагъзова  
доц. д-р Венцислав Божков - УАСГ

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

Материалите по защитата ще са на разположение на интересуващите 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**

Streamflow forecasts with sufficient accuracy and lead time are important to water managers and emergency protection services. To provide these forecasts hydrologists need to predict the behavior of complex coupled human–natural systems. Hydrological forecasting models are used extensively for simulation of river flows in both flood and drought events. The evolution of physically based hydrological models in recent years has significantly improved the ability to describe and represent the hydrological processes at a basin scale. In this thesis the TOPKAPI model (TOPographic Kinematic APproximation and Integration) was applied to the Ogosta river for simulating the rainfall-runoff processes for the watershed. TOPKAPI is a fully-distributed, physically-based hydrological model and is widely used for continuous streamflow modelling.

The TOPKAPI model was set up for the period 2009-2014: calibration was performed using five years of data (2009 – 2013) and data for the year 2014 was used for model validation. The model was applied with a grid size of 250m/250m and a time step of 24 h. Due to TOPKAPI physical basis, model parameters were derived from digital elevation maps, soil maps and land cover maps.

An anthropogenic structure such as Ogosta reservoir was implemented in the model to simulate the hydrological response along the river. The reservoir dynamic behavior was simulated using simple operating rules.

This study is essential for promoting the application of the fully distributed hydrological model TOPKAPI within the Hydrological Forecasting division in NIMH and improving the short-term hydrological forecasts.

## **СЪДЪРЖАНИЕ**

ВЪВЕДЕНИЕ .....	1
АКТУАЛНОСТ .....	2
ОСНОВНИ ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ .....	2
ГЛАВА 1 ОБЩ ПРЕГЛЕД НА МЕТОДИ И ПОДХОДИ В ХИДРОЛОЖКОТО МОДЕЛИРАНЕ .....	3
1.1 Преглед на световния опит в областта на хидроложкото моделиране .....	3
1.2 Хидроложки цикъл .....	3
1.3 Хидроложки модели – общи положения, видове .....	4
1.4 Хидроложки модели „валеж-отток“ използвани досега в практиката на НИМХ. 4 .....	4
1.5 Изводи .....	6
ГЛАВА 2 ФИЗИЧЕСКИ РАЗПРЕДЕЛЕН ХИДРОЛОЖКИ МОДЕЛ ТОРКАРИ .....	6
2.1 Представяне на модела ТОРКАРИ .....	6
2.2 Структура на модела .....	13
2.3 Изводи .....	13
ГЛАВА 3 ПРИЛАГАНЕ НА МОДЕЛА ТОРКАРИ ЗА ПИЛОТЕН ВОДОСБОР .....	13
3.1 Обща характеристика на р. Огоста .....	14
3.2 Подготовка на необходимите данни, които са вход в ТОРКАРИ модела .....	17
3.3 Калибриране на модела .....	24
3.4 Изследване на чувствителността на параметрите на модела .....	26
3.5 Валидиране на модела .....	32
ГЛАВА 4 ПРОГНОЗИРАНЕ НА ОТТОКА С МОДЕЛА ТОРКАРИ ВЪВ ВОДОСБОРА НА Р. ОГОСТА .....	34
4.1 Извод .....	38
ГЛАВА 5 СЪЗДАВАНЕ НА МОДЕЛ В ГИС СРЕДА ЗА ПОДГОТОВКА НА ВХОДНА ИНФОРМАЦИЯ ЗА МОДЕЛА ТОРКАРИ .....	39
5.1 Извод .....	39
ГЛАВА 6 СЪЗДАВАНЕ НА ГИС БАЗА ДАННИ ЗА ПРИЛОЖЕНИЕ В ХИДРОЛОЖКОТО МОДЕЛИРАНЕ .....	41
6.1 Изводи .....	42
БЪДЕЩИ ПЛАНОВЕ .....	42
ПРИНОСИ .....	43
ВНЕДРЯВАНЕ .....	43
СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИ СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД .....	44
БЛАГОДАРНОСТИ .....	iv



## ВЪВЕДЕНИЕ

Бедствията свързани с наводнения се признават за една от основните причини за смъртни случаи, икономически загуби и инфраструктурни щети [45]. По данни на Националния статистически институт в нашата страна през последните 10 години възникналите кризисни събития породени от наводнения са средно по около 400 броя всяка година, установените щети възлизат на над 100 000 хил. лева средно за всяка година, средствата за възстановяване са средно около 41 000 хил. лева за година, а разходите за спасителни и неотложни аварийни работи са около 5 500 хил. лева всяка година. Защитата от наводнения и осведомеността все по-често се споменават в обществения и политическия дневен ред през последното десетилетие, придружени от изисквания за подобряване на прогнозите за наводнения.

Оценката на заплахата и риска от природни бедствия е една от най-важните стъпки за ограничаването на негативните последици от бедствията. Индексът за управление на риска (INFORM) [1] е съставен показател, разработен от JRC (Joint Research Centre) като инструмент за определянето на риска от кризи и бедствия. INFORM е полезен за обективното разпределение на ресурсите за управление при бедствия, както и за координирани действия, насочени към прогнозиране, смекчаване и подготвеност за извънредни ситуации. Индексът за управление на риска определя средна стойност на уязвимостта за територията на България 2,3 (по скала от 0 до 10), което е по-ниско от тези за Гърция (2,4) и Сърбия (2,5) и по-високо от тези за Румъния (1,7), Северна Македония (2,0), Албания (1,5), Хърватия (1,1), Словения (0,8), Унгария (1,7), Словакия (1,1) и други.

Прогнозите сочат, че в резултат на климатичните промени честотата на проява на природните бедствия на територията на страната ще нараства, а уязвимостта се характеризира с устойчив тренд, без тенденции за намаляване (по индекса INFORM).

Този тренд ще доведе и до нарастване на щетите и съответно до нарушаване нормалното функциониране на националното ни стопанство и устойчивото развитие на страната. Хората не могат да контролират проявата на естествените опасни процеси (опасността), но могат да повлияят върху степента на уязвимост на социално-икономическите системи и по този начин да ограничат цялостния риск.

Оперативните системи за прогнозиране на наводненията представляват ключова част от стратегиите за подготвеност за екстремни събития, като наводнения и осигуряват ранни предупреждения до няколко дни преди настъпването на наводненията на органите за гражданска защита и на обществеността, за да имат те достатъчно време за вземане на решения и подготовка, като по този начин да се намалят последиците от наводненията. На практика в хидрологията не могат да бъдат измерени всички елементи, които са част от хидроложката система главно поради голямата хетерогенност

и ограниченията на измервателните техники. Това налага моделиране на информацията от наличните измервания в пространството и времето.

## **АКТУАЛНОСТ**

Еволюцията на физически базираните хидроложки модели през последните години значително подобри способността ни да описваме и представяме хидрологичните процеси на ниво водосборен басейн.

Тема на дисертацията е проучване възможността за използване на разпределения физически базиран хидроложки модел TOPKAPI (TOPographic Kinematic APproximation and Integration), който представя речния отток, като функция на метеорологична входна информация и геоморфологичните характеристики във всеки пиксел на водосбора, като се използва информация от цифровия модел на терена, типа на почвите, земното покритие, влиянието на язовирите и др., за прогнозиране на речния отток и подобряване на изготвянето и представянето на прогнози за опасни екстремни явления (наводнения) с цел намаляване негативните последици от наводненията в нашата страна.

## **ОСНОВНИ ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ**

Основните цели на настоящия труд са:

- проучване на научна литература и добри практики свързани с различни хидроложки модели използвани в хидроложкото прогнозиране;
- анализ на физичните процеси и хидрографските характеристики свързани с генерирането на оттока;
- проучване на приложимостта на физически базиран напълно разпределен модел за симулиране на оттока в пилотен водосбор;
- определяне на параметрите, които оказват най-голямо влияние върху хидроложкия режим във водосбора;
- включване работата на язовир в разработения хидроложки модел и представяне на резултатите;
- прилагане на разработения модел в оперативен режим за прогнозиране на елементите на речния отток в ежедневната работа на НИМХ.



# ГЛАВА 1 ОБЩ ПРЕГЛЕД НА МЕТОДИ И ПОДХОДИ В ХИДРОЛОЖКОТО МОДЕЛИРАНЕ

## 1.1 Преглед на световния опит в областта на хидроложкото моделиране

Развитието на хидроложките модели започва от средата на 19-ти век с цел разбиране и прогнозиране на хидрологичните процеси и явления в рамките на даден водосбор. До първата половина на 20-ти век, в хидрологията преобладават подходи, при които водосборите се разглеждат като хомогенно цяло или тип „черна кутия“, подходи, основани на теорията на единичния хидрограф. Последният е прост линеен модел, който възпроизвежда хидрографа на високата вълна от единично събитие на интензивен валеж. След появата на по-мощна изчислителна техника и нови методи и инструменти за измервания, моделите са насочени вече към представяне на пространствената хетерогенност на компонентите на хидроложкия цикъл. Това води до замяна на емпиричните и концептуалните модели с разпределени физически модели. Следващият напредък е интегрирането на по-голям брой процеси в разпределените модели, включително химически, ерозионни и биологични процеси [38][39]. С увеличаване на въздействието на човешките дейности върху хидроложкия цикъл се появява необходимостта от изучаване на антропогенното въздействие в съчетание с физическите процеси. Този нов подход се състои в определянето на свързана система, в която човешките и природните компоненти взаимодействат помежду си и съвместно се развиват в пространството и времето [2].

Поведението на водосборния басейн като затворена хидроложка система, реакцията му към атмосферните входи и описанията на хидроложките процеси в пространствени и времеви мащаби са и ще продължат да бъдат изследователски теми в целия свят. Хидроложките модели са важни и необходими инструменти даващи възможност за предприемане на превантивни мерки и за предупреждение на населението за екстремни хидрометеорологични събития (суша или наводнение), за управление на ресурсите на водите и околната среда.

Формирането на речния отток е сложен процес, при който валежите от сняг или дъжд преминават през различни трансформации докато достигнат до реката или до крайната точка на даден водосбор. По-долу е представено кратко описание на елементите на хидроложкия цикъл, които са в основата на процеса „валеж-отток“.

## 1.2 Хидроложки цикъл

Непрекъснатата циркулация на вода от атмосферата към земята и връщането ѝ в атмосферата чрез кондензация, валежи, изпарение и транспирация се нарича хидроложки цикъл (Фиг.1.2.1). По отношение на водния баланс, хидроложкият цикъл е затворена система. Около 70-75% от

валежите се връщат в атмосферата чрез евапотранспирация и директно изпаряване, а останалите 25-30% се трансформират в отток [42].

Основните процеси, които съставят хидроложкия цикъл са следните [44]:

- Валеж (дъжд или сняг)
- Задържане на вода
- Нагрупване и топене на снежна покривка
- Изпарение/транспирация
- Повърхностен отток
- Инфилтрация
- Ексфилтрация
- Филтриране в подземните води
- Дрениране
- Движение в ненаситена зона
- Подземен отток

За по-доброто описване на хидроложките процеси и как те се влияят от промените в климата и земеползването, сложният хидроложки цикъл може да бъде представен опростено с математически модели.

### **1.3 Хидроложки модели – общи положения, видове.**

Хидроложките модели са важни и имат широк спектър на приложение, като планиране, развитие и управление на водните ресурси; прогнозиране на наводненията, качество на водата, климатични изменения. Изискванията на обществото по отношение на предварителност на прогнозата с хидроложките модели стават все по-високи, което води до необходимостта от усъвършенстване на съществуващите модели и дори от разработване на нови теории. По-долу е направен преглед на различни видове хидроложки модели и са дискутирани предимствата и недостатъците на всеки.

Съществуват различни класификации на хидроложките модели, като най-често използваните методи за класификация зависят от описанието на физичния процес и пространствената дискретизация. Според представянето на процеса, хидроложките модели се разглеждат като емпирични, физически или концептуални модели.

Моделите според типа моделиране на процеса „валеж-отток“ могат да бъдат разделени на:

- Модели със съсредоточени параметри (Lumped models)
- Модели с полуразпределени параметри (Semi-distributed models)
- Модели с разпределени параметри (Distributed models)

### **1.4 Хидроложки модели „валеж-отток“ използвани досега в практиката на НИМХ.**

- Изкуствени невронни мрежи (Artificial Neural Network - ANN) [3]

ANN се прилагат в НИМХ за прогнозиране на водни количества за водосбора на р. Искър - <http://hydro.bg/>. Входни данни са: хидроложки и метеорологични данни от мониторинговите мрежи на института, водното количество от предишния ден, акумулираният валеж от предишните три дни и сезоните. Използваният софтуер е NeuroSolutions - <http://www.neurosolutions.com/>.

- *DHI (Danish Hydraulic Institute) Mike 11* [4] [11]

NAM модулът на модела MIKE 11 е използван от НИМХ в Система за ранно предупреждение за наводнение за река Марица и Тунджа - <https://maritsa.meteo.bg/apache2-default/maritsa/indexbg.php>, както и за прогнозиране на водни количества за водосбора на р. Русенски Лом [5] <http://hydro.bg/>.

- *HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System)* [6][46]

В НИМХ този модел се прилага за прогнозиране на водни количества към хидрометричните станции във водосбора на река Янтра <http://hydro.bg/>. [46]

- *SWAT (Soil and Water Assessment Tool)*

Този модел се разработва и ще се прилага за прогнозиране на елементите на хидроложкия цикъл във водосбора на река Вит.

- *TOPMODEL*

Моделиращата система ISBA-TOPMODEL е използвана в Системата за ранно предупреждение за наводнения за река Арда [12]. - <https://arda.hydro.bg/bg/index.php?glaven=alertmap> и за прогнозиране на водните количества към крайните станции на реките Огоста, Вит и Осъм - <http://195.96.246.183/>

- *LISFLOOD* [13] [14]

В НИМХ за съставянето на ежедневната хидроложка прогноза се използват резултатите от модела LISFLOOD и се валидират екстремни явления.

Идеята за използване на разпределен модел в тази разработка произтича от опита натрупан в нашия институт в областта на хидроложкото моделиране, както и от необходимостта от намиране на модел, който би могъл лесно да се калибрира от наличните световни и национални пространствени данни и да е валиден при различни пространствени резолюции.

ТОРКАРІ (ТОРographic Kinematic APrroximation and Integration) моделът е избран, защото е подходящ за задачите, които може да реши в оперативен и научен аспект, свързани със сложността на хидрологичните процеси в даден водосбор. Основното предимство на този модел е способността му да се прилага и при различни пространствени мащаби без да се губи физическото значение на параметрите на модела. Друго предимство на този модел е, че може да се използва цифровия модел на терена (DEM), картите за почви и земно покритие, за да се оценят параметрите на модела. Това дава възможност да се използва за моделиране на ненаблюдавани водосбори, където моделът

не може да бъде калибриран с използване на измерени данни, както и да се оцени въздействието на промяната в земеползването. Моделът TOPKAPI ще бъде подробно представен в Глава 2.

## **1.5 Изводи**

Развитието на моделите използвани в хидроложкото моделиране е важно за намаляване несигурността при прогнозиране на дадено събитие. Перфектният модел не съществува, но съществуват много различни модели основно базирани на данни и физически базирани модели. Тази глава дава подробна информация за хидроложкото прогнозиране, като са представени обобщено хидроложките модели според техния подход на моделиране. Описани са предимствата и недостатъците и развитието на хидроложките модели. В нея също са описани използваните в практиката на НИМХ модели за прогнозиране и напредъка в хидроложкото моделиране.

## **ГЛАВА 2 ФИЗИЧЕСКИ РАЗПРЕДЕЛЕН ХИДРОЛОЖКИ МОДЕЛ ТОРКАPI**

### **2.1 Представяне на модела ТОРКАPI**

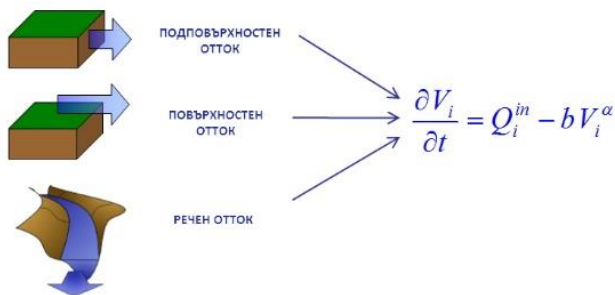
ТОРКАPI е ГИС базиран напълно разпределен физически базиран хидроложки модел, който дава информация с висока резолюция за хидрологичното състояние на даден водосборен басейн. Създаден е през 2000 г., под ръководството на световно известния хидролог проф. Ецио Тодини, от компанията PROGEA (PROtezione e GEstione Ambientale S.r.l – Защита и управление на околната среда) в сътрудничеството с Университета в Болоня, ARPA Emilia-Romagna (Агенция по околна среда на регион Емилия-Романя, Италия) и ET&P Srl (италианска компания за технологии и продукти за околната среда). Моделът се основава на комбиниране на кинематичен модел на разпространение на вълната и топографията на модела. Моделът може да се използва, както като самостоятелна програма така и като част от оперативни прогностични системи работещи в реално време [50].

Моделът се основава на следните основни допускания на ниво клетка:

- Валежите имат една стойност за всяка клетка и са получени, чрез осредняване с използване на интерполационни техники, като Тисен или др..
- Цялото количество валеж, което попада върху почвата се инфилтрира в нея, освен ако почвата вече не е наситена в определена зона (единичната клетка), когато започва да се формира повърхностния отток.
- Наклонът на водната повърхност съвпада с наклона на земната повърхност.
- Локалната пропускливост зависи от общото водно съдържание в почвата, т.е. зависи от интеграла на водното съдържание във вертикална посока.

- Локалната пропускливост, като хоризонтален подповърхностен отток в клетка, зависи от общото водно съдържание в почвата във вертикалния профил.
- Хидравличната проводимост при насищане е постоянна в дълбочина на повърхностния почвен слой и е много по-голяма от тази в по-дълбоките почвени слоеве.

Три нелинейни диференциални уравнения са използвани, за да се опишат подповърхностен, повърхностен и речен отток и прилагане на подхода на Кинематичната вълна.



Фиг.2.1.1 Моделирани резервоари в модела ТОРКАРІ

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} = Q_i^{in} - bV_i^\alpha, \text{ където:} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial t}$$

- промяната на съдържанието на вода във времето за резервоара;

$Q_i^{in}$  - общият приток към резервоара;

$V_i$  - общият обем на резервоара;

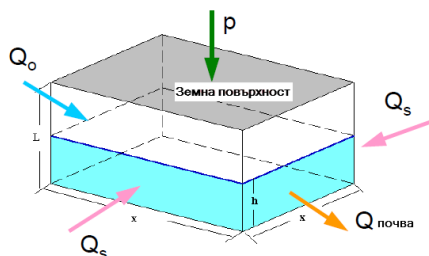
$b$  - константа във времето, но се променя в пространството и е функция от геометрията и физическите характеристики на резервоара;

$\alpha$  - константа във времето и пространството и зависи от типа на резервоара.

В модела ТОРКАРІ актуалната евапотранспирация се изчислява от потенциалната евапотранспирация. Потенциалната евапотранспирация е изчислена на месечна база с прилагане на метода на Торнтуейт.

Модулът за натрупването на сняг и снеготопенето се основава на температурата на въздуха и валежите.

### 3.2.1 Подповърхностен отток



Фиг.2.1.1.1 Схема на почвения резервоар за дадена клетка.

За дадена клетка уравнението е:

$$\frac{\partial V_s}{\partial t} = (pX^2 + Q_o^u + Q_s^u) - \frac{C_s X}{X^{2\alpha_s}} V_s^{\alpha_s}, \text{ където:} \quad (2)$$

$V_s$  - обемът на водата, съхранявана в дадена клетка [ $m^3$ ];

$t$  - време [s];

$p$  - интензивност на валеж [ $m/s$ ];

$X$  - размер на клетката [m];

$Q_o^u$  - водно количество към дадена клетка от повърхностния отток на водосбора, който е от водосбора над тази клетка [ $m^3/s$ ];

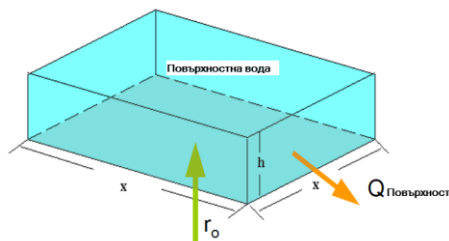
$Q_s^u$  - водно количество към дадена клетка от подповърхностен отток от водосборната област над тази клетка [ $m^3/s$ ].

Хидравличните характеристики на подповърхностния почвен слой зависят от параметрите на почвата и могат да се получат на основа на текстурата на почвата, която е представена в % пясък, % глина и % прах.

$C_s$  - коефициент на хоризонталната пропускливост/проводимост [ $m/s$ ];

$\alpha_s$  - параметър, който зависи от характеристиките на почвата. Стойността зависи от вида на почвата, но обикновено се определя на постоянна стойност, равна на 2,5.

### 3.2.2 Повърхностен отток



Фиг.2.1.2.1 Схема на повърхностния резервоар за дадена клетка.

За дадена клетка уравнението е:

$$\frac{\partial V_{o_i}}{\partial t} = r_{o_i} X W_{o_i} - \frac{C_{o_i} W_{o_i}}{(X W_{o_i})^{\alpha_o}} V_{o_i}^{\alpha_o}, \text{ където:} \quad (7)$$

$V_{o_i}$  - обемът на водата на повърхността на  $i$ -тата клетка [ $\text{m}^3$ ];

$$V_{o_i} = X W_{o_i} h_{o_i}, \text{ където:} \quad (8)$$

$h_{o_i}$  - дълбочина на водата над повърхността на земята [ $\text{m}$ ];

$X$  - размер на клетката [ $\text{m}$ ];

$W_{o_i}$  - ширина на повърхността (свободна от речна мрежа) [ $\text{m}$ ];

$r_{o_i}$  - излишъкът след насищане или е резултат от уравнението на водния баланс на почвения слой, или е резултат от екстрафилтрацията от почвата [ $\text{m/s}$ ];

$C_{o_i}$  - коефициент свързан с формулата на Манинг за повърхностен отток.

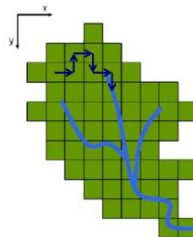
$$C_{o_i} = \tan(\beta_i)^{1/2} / n_{o_i}, \text{ където:} \quad (9)$$

$\tan(\beta_i)$  е повърхностният наклон на  $i$ -тата клетка;

$\alpha_o = 5/3$  експонента получена от комбиниране на формулата на Шези и Манинг;

$n_{o_i}$  - коефициент на повърхностната грапавина по Манинг [ $\text{s/m}^{1/3}$ ]. Този параметър се използва за регулиране на времето до пика и формата на високата вълна и се получава на базата на информация за земното покритие и земеползването.

### 3.2.3 Речен отток

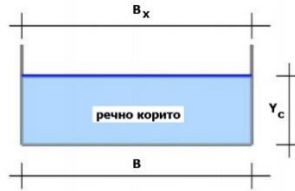


Фиг.2.1.3.1 Схема на придвижване на водата в клетките на модела

Когато наклоните станат твърде малки, под 0,01% (т.е. в равнинните участъци), ТОРКАРІ използва подход базиран на метода на Muskingum-Cunge.

В модела може да има различна форма на речното корито за различните притоци, в зависимост от порядъка на речната мрежа.

- *Правоъгълно напречно сечение на речното корито*



Фиг.2.1.3.2 Правоъгълно напречно сечение

Речният отток в този случай се приема с дървовидна структура на речната мрежа, имаща правоъгълно напречно сечение (Фиг.2.1.3.2).

$$\frac{\partial V_c}{\partial t} = (r_c + Q_c^u) - \frac{\sqrt{S_0}}{n_c} \left( \frac{B_x}{C_x} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{1}{B^{\frac{2}{3}} X^{\frac{5}{3}}} V_c^{\frac{5}{3}}, \text{ където} \quad (11)$$

$t$  - време [s];

$r_c$  - странично водно количество, включващо повърхностен отток и дренирано водното количество от почвата достигащо до канала [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];

$Q_c^u$  - входно водно количество от по-горна клетка [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];

$n_c$  - коефициентът на грапавина по Манинг за канала [ $\text{s}/\text{m}^{1/3}$ ];

$S_0$  - наклон на леглото, който се приема, че е равен на наклона на земната повърхност =  $\tan(\beta)$ ;

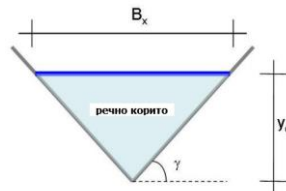
$A_x = B \cdot y_c$  - площ на намокреното сечение [ $\text{m}^2$ ];

$C_x = 2y_c + B$  - намокрен периметър [m];

$B_x = B$  - ширина на сечението на повърхността [m];

$y_c$  - дълбочина на водата в канала [m].

- *Триъгълно напречно сечение на речното корито*



Фиг.2.1.3.3 Триъгълно напречно сечение

Речният отток в този случай се приема с дървовидна структура на речната мрежа, имаща триъгълно напречно сечение (Фиг.2.1.3.3).



$$\frac{\partial V_c}{\partial t} = (r_c + Q_c^u) - \frac{\sqrt{S_0} (\operatorname{cosec} \gamma)^{\frac{2}{3}}}{2^{\frac{2}{3}} n_c (\tan \gamma)^{\frac{1}{3}} X^{\frac{4}{3}}} V_c^{\frac{4}{3}}, \text{ където:} \quad (12)$$

$t$  - време [s];

$r_c$  - странично водно количество, включващо повърхностен отток и дренувано водното количество от почвата достигашо до канала [m<sup>3</sup>/s];

$Q_c^u$  - входно водно количество от по-горна клетка [m<sup>3</sup>/s];

$n_c$  - коефициентът на грапавина по Манинг за канала [s/m<sup>1/3</sup>];

$S_0$  - наклон на леглото, който се приема, че е равен на наклона на земната повърхност =  $\tan(\beta)$ ;

$\tan \gamma = \frac{2y_c}{B_x}$  -  $\gamma$  е ъгъла на страните на канала с хоризонталната ос;

$B_x = \frac{2y_c}{\tan \gamma}$  - ширина на сечението на повърхността [m];

$A_x = \frac{1}{2} B_x \cdot y_c = \frac{y_c^2}{\tan \gamma}$  - площ на намокреното сечение [m<sup>2</sup>];

$C_x = \frac{2y_c}{\operatorname{cosec} \gamma}$  - намокрен периметър [m];

$y_c$  - дълбочина на водата в канала [m].

Хидравличните характеристики на компонентите на речния отток зависят от морфологията на водосбора и могат да бъдат получени от опитни изследвания и от литература. Параметрите на речния отток за правоъгълно напречно сечение са коефициента на грапавина по Манинг за канала и ширината на коритото, а за триъгълното напречно сечение е коефициента на грапавина по Манинг за канала и разстоянието = наклона на страничните канали ( $\cotan \gamma$ ).

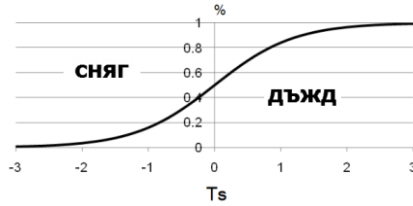
### 3.2.4 Евапотранспирация

В модела ТОРКАРІ актуалната евапотранспирация се изчислява от потенциалната евапотранспирация. Потенциалната евапотранспирация е изчислена на месечна база с прилагане на метода на Торнтруейт.

### 3.2.5 Компонент за натрупването на сняг и снеготопене

Модулът за натрупването на сняг и снеготопенето се основава на температурата на въздуха и валежите.

Процентът на течните валежи се изчислява, като функция на температурата на въздуха и е представено на Фиг.2.1.5.1.



Фиг.2.1.5.1 Процент на течните и твърдите валежи от общия валеж

$$F(T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{T-T_s}{\sigma}}}, \text{ където:} \quad (36)$$

$\sigma = 0,6$  (получено от експериментални данни);

$T_s$  (която обикновено варира между  $-2,15$  и  $1,85^\circ\text{C}$ );

$T$  - температура на въздуха [ $^\circ\text{C}$ ].

Параметрите на снеготопенето са:

$T_s$  - прагова стойност на температурата [ $^\circ\text{C}$ ];

$H_{Active}$  - максимална височина на снежната покривка [mm];

$T_{min}$  - минимална температура, при която започва натрупване на снежна покривка [ $^\circ\text{C}$ ];

$T_{FROST}$  - температура на замръзване на почвите [ $^\circ\text{C}$ ].

### 3.2.6 Компонент за движение на вода към дълбоките почвени слоеве

Въпреки, че вертикалното придвижване на вода в по-дълбоките слоеве за едно отделно явление свързано с валеж не би довело до значително количество вода, която се отдава към речния отток, в модела TOPKAPI е оценена тази компонента

$$P_r = k_{sv} \left( \frac{v}{v_{sat}} \right)^{\alpha_p}, \text{ където:} \quad (37)$$

$P_r$  – проникване [mm];

$k_{sv}$  – вертикална пропускливост при наситена почва [m/s];





$v$  – обем на водата [ $\text{m}^3$ ];

$v_{sat}$  – обем на насищане [ $\text{m}^3$ ];

$\alpha_p$  – степенен показател в зависимост от вида на почвата (11 - за пясък; 25 – за глина).

## 2.2 Структура на модела

Моделът ТОРКАРІ е пакет от програми и работи в ГИС среда с MapWindow GIS, безплатна географска информационна система (ГИС) ([www.mapwindow.org](http://www.mapwindow.org)).

-  PreTRK е софтуер, базиран на MapWindow GIS, който се използва за предварително обработване на географска информация и за създаване на модел ТОРКАРІ.
-  I.TOPKARI – това е програма за управление на параметри и за симулации. В тази програма има над 15 модула, с които се управляват всички данни и параметри за симулиране на отделните компоненти на оттока.
-  TRKVIEW е софтуер за представяне и анализ на резултатите (като редици от данни, графики).
-  TRKMAPS е софтуер за 2D представяне и анализ на резултатите (пространствено, карти).

## 2.3 Изводи

Параметрите на модела имат физическо значение и могат да бъдат получени от различни източници на данни за цифров модел на терена, почви, земно покритие с помощта на GIS.

Този тип физически базиран модел има по-лесно калибриране в сравнение с полуразпределените и концептуални модели.

Моделът може да се използва и за ненаблюдавани водосбори.

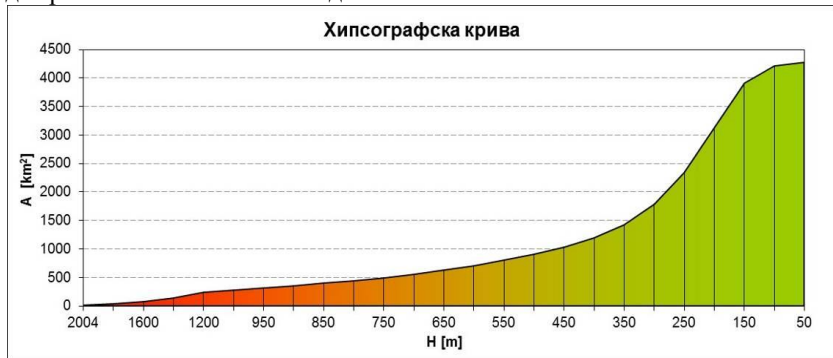
Моделът работи в GIS среда, което дава възможност за визуализиране и пространствени анализи на резултатите.

## ГЛАВА 3 ПРИЛАГАНЕ НА МОДЕЛА ТОРКАРІ ЗА ПИЛОТЕН ВОДОСБОР

В тази работа напълно разпределеният физически базиран модел ТОРКАРІ е използван за симулиране на водните количества във водосбора на река Огоста. При избора на пилотен водосбор е взето под внимание информацията от резултатите на предварителната оценка за значителен потенциален риск от наводнения, които са изготвени за всеки район за басейново управление по отношение на човешкото здраве, стопанската дейност, околната среда и културното наследство. Също така е взета под внимание и информацията за опустошителните наводнения през 2000, 2002, 2005, 2010, 2012 и 2014 година в нашата страна. На база тази информация като пилотен водосбор е избран водосбора на река Огоста. С разработването и прилагането на модела ТОРКАРІ ще се подпомогне прогнозирането на речния отток в този водосбор, с което ще се даде възможност за навременното реагиране на отговорните органи за предпазване на населението и инфраструктурата от природни бедствия (наводнения) в нашата страна.



височини по-малки от 500 m и много малка част от площта на водосбора е с надморски височини от 500 m до 2004 m.



Фиг.3.2.5.1 Хипсографска крива на водосбора на р. Огоста

- Климатична характеристика

По-голямата част от територията на водосбора на р. Огоста се намира в умерено-континенталната климатична област, докато високо-разположените части на водосбора попадат в планинската климатична област.

В планинските части на водосбора средната годишна сума на валежите е 800 – 1000 mm. Най-голяма е тя през пролетта в по-северните планински райони, а в южните – през зимата. В зоната на умерено - континенталния климатичен пояс годишната сума на валежите от 500 – 600 mm в Дунавската равнина, достига до 800 mm в Предбалкана и котловинните полета. Ясно изразена е тенденцията на нарастване в посока юг и във височина. Характеризират се с минимум през февруари и максимум през юни.

В крайдунавската част на водосборния басейн първата снежна покривка се образува средно през първата декада на декември, а последната снежна покривка се стопява средно през първата декада на март.

- Растителност

Релефът, климатичните условия и почвените типове на водосбора обуславят прехода от широколистна горска растителност към тревна растителност. В най-високите части от водосбора, където релефът е планински, преобладават широколистните гори. В по-ниските части от водосбора естествената растителност е по-малко и е основно около населените места и речните долини. По-голямата част от средните и долни части на водосбора, където релефа е по-равнинен, са заети от ненапооявана орна земя.

- Почви

Водосборът на р. Огоста попада в няколко почвеногеографски района. Планинските части на водосбора са заети от Предбалканските зони на псевдоподзолистите и кафявите горски почви, средните части на водосбора попадат в Дунавскоравнинната и Хълмистопредбалканската подзона на

сивите горски почви, а долните части на водосбора се намират в Крайдунавската подзона на черноземите.

По механичен състав почвите са класифицирани като: леки и средни пясъкливо-глинести, каменливи почви в горните части от водосбора; тежко пясъкливо-глинести и глинести почви в средните части на водосбора; леки и средни пясъкливо-глинести почви в долните части на водосбора.

- Хидроложки режим

Река Огоста събира водите си от северните склонове на Стара планина, където падат най-обилните за водосбора валежи - годишните суми превишават 1000 - 1200 mm. Обилните валежи формират и високи модули на речния отток, който в тези части на Стара планина превишава 20-25 l/s/km<sup>2</sup>. В подножието на Стара планина сумата на годишните валежи пада до 650-700 mm, отточният модул - до около 4-5 l/s/km<sup>2</sup>, а гъстотата на речната мрежа намалява до 0,5 km/km<sup>2</sup>. В придунавската част на равнината валежът намалява до 500-600 mm годишно, модулът на оттока - до 0,5-1 l/s/km<sup>2</sup>, а гъстотата на речната мрежа до 0,1-0,2 km/km<sup>2</sup>.

Вътрешногодишното разпределение на оттока в поречие Огоста се характеризира с пълноводието през април-май, когато пролетните дъждове се застъпват с активно снеготопене на задържаната по високопланинските части на басьейна трайна снежна покривка до средата на март. Маловодието е през летните и есенни месеци: от юни-юли до октомври-ноември, като минимумът е най-често през август-октомври.

Опорната хидрометрична мрежа на разглеждания водосбор се състои от 10 хидрометрични станции (ХМС), от които 3 ХМС са на основната р. Огоста, а останалите 7 на притоците ѝ (Фиг.3.1.4).



Фиг.3.1.5 Мерителен мост на хидрометрична станция №17850 на р. Скът (десен приток на р. Огоста) в гр. Мизия.

### 3.2 Подготовка на необходимите данни, които са вход в ТОРКАРІ модела.

Входните данни за модела ТОРКАРІ са:

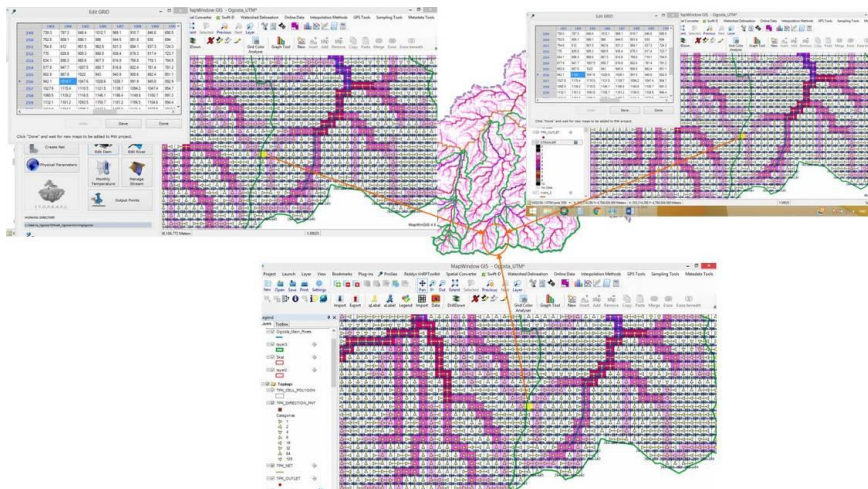
- *Цифров модел на терена (DEM)* – грид;
- *Тип на почвите* – полигони;
- *Растителна покривка* – полигони;
- *Хидрометеорологични данни*: валежа и температурата са представени като грид или като измервания в метеорологичните станции, а наблюдаваният отток в хидрометричните станции.

#### 3.2.1 Цифров модел на терена (DEM)

Резолюцията на използвания цифров модел на терена е 250 m в географска координатна система WGS 84 и проекция UTM 35N. Цифровият модел на терена е използван, за да се извлече информация за водосборните области, наклоните, посоката на движение на водата от клетка в клетка и речната мрежа. (Фиг.3.2.1.1)

Всяка клетка от DEM получава стойност за всеки от физическите параметри представени в модела и е изчислителен възел на модела.

Генериране на дренажна мрежа в модула PreTRK на модела ТОРКАРІ и коригиране на ЦМТ, за да може водата да тече в правилната посока към съответния клон на реката.



Фиг.3.2.1.3 Генерирана дренажна мрежа в модула PreTRK и модифицирана дренажна мрежа

На Фигура 3.2.1.3 е показано как в генерираната дренажна мрежа (показано с лявата стрелка) има некоректно представяне на движението на водата и с промяна на стойността на надморската височина на клетката от GRID (в



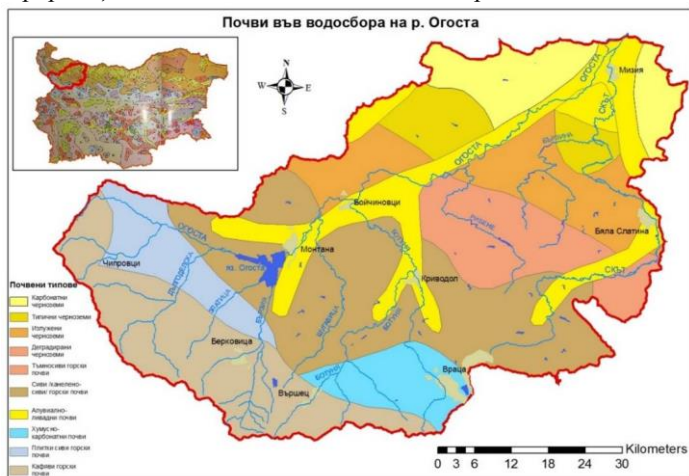
жълто), движението на водата в двата притока е представено вече коректно (показано със стрелка надолу).

На всеки участък от речната мрежа е присвоен порядък по класификацията на Страхлер.

### 3.2.2 Почви

Типовете почви във водосбора на р. Огоста са определени, като е използвана информация от: Атлас на почвите в България [15], FAO[16] и HWSD[18].

- *Информация от Атлас на почвите в България*



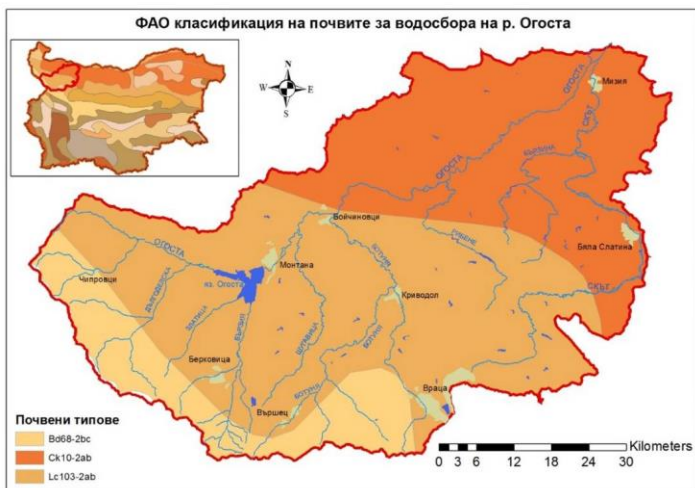
Фиг.3.2.2.2 Почви във водосбора на р. Огоста (източник: Атлас на почвите в България от 1998 г.)

От представената карта на Фиг.3.2.2.2 се вижда, че основните почвени видове във водосбора са черноземи в долните части, сиви /канелено-сиви/ горски почви в средните части и кафяви горски почви в горните части на разглеждания водосбор.

- *Класификацията на Организация по прехрана и земеделие (FAO)*

Във водосбора на р. Огоста има 3 основни типа почви – карбонатни черноземи (Sk10-2ab), сиви горски почви (Lc103-2ab) и кафяви горски (Bd68-2bc) почви (Фиг.3.2.2.3).

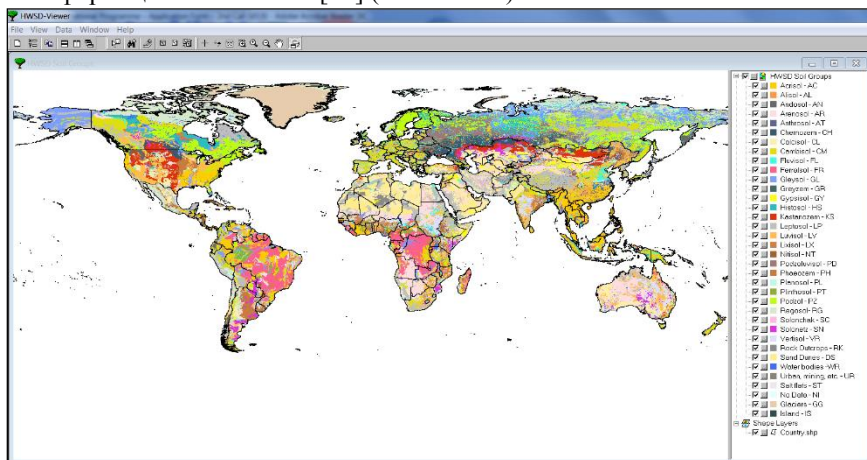




Фиг.3.2.2.3 FAO класификация на почвите за водосбора на р. Огоста

- Хармонизирана световна база данни на почвите (HWSD)

Типовете почви във водосбора на р. Огоста са определени и с използване на информацията от HWSD [18] (Фиг.3.2.2.4).



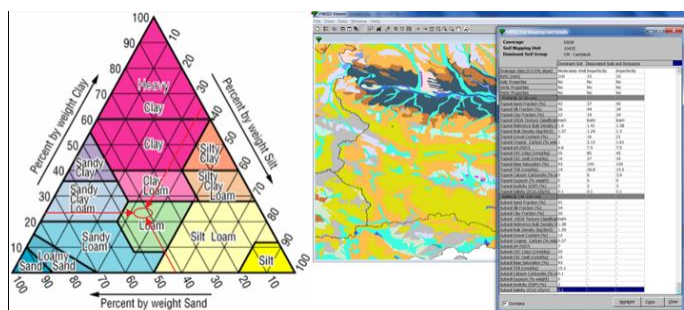
Фиг.3.2.2.4 Хармонизирана световна база данни на почвите (HWSD)

- За определяне на механичния състав на почвите във водосбора на р. Огоста е използвана информация от Атлас на почвите в България от 1998 г. и HWSD.

Информацията е представена за два слоя на почвата – повърхностен (topsoil) от 0-30 cm и подповърхностен (subsoil) от 30-100 cm. В зависимост от



за кафява горска почва – от Фиг.3.2.2.13 за определените проценти пясък – 42%, прах – 36% и глина – 22% е определен тектурен клас праховита почва (loam);



Фиг.3.2.2.13 Определяне на тектурен тип за кафява горска почва

Определени са стойностите на параметрите на почвата хоризонтална пропускливост при насищане ( $K_{sh}$ ), водното съдържание при насищане на почвата ( $\theta^s$ ), остатъчното водно съдържание в почвата ( $\theta^r$ ); дълбочина на почвения слой (L), експонентата в уравнението, описващо компонента на хоризонталното движение на водата ( $\alpha$ ), вертикална пропускливост при насищане ( $K_v$ ), експонентата в уравнението, описващо компонента на вертикалното движение на водата в подповърхностния почвен слой. ( $\alpha_v$ ).

Таблица 3.2.2.2 Начални стойности на параметрите на почвата

Тип почва	Наименование	Механичен състав	$K_{sh}$ [m/s]	$\theta^s$	$\theta^r$	L [m]	$\alpha$	$K_v$ [m/s]	$\alpha_v$
Bd68-2bc	кафяви горски	праховита/Loam	5.47E-05	0.328	0.065	0.8	2.5	5.47E-08	13.8
Ck10-2ab	черноземи	праховита/Loam	6.67E-05	0.275	0.065	1.2	2.5	6.67E-08	17
Lc103-2ab	сиви горски	праховита/Loam	5.47E-05	0.368	0.065	1	2.5	8.19E-08	23.8

### 3.2.3 Земно покритие

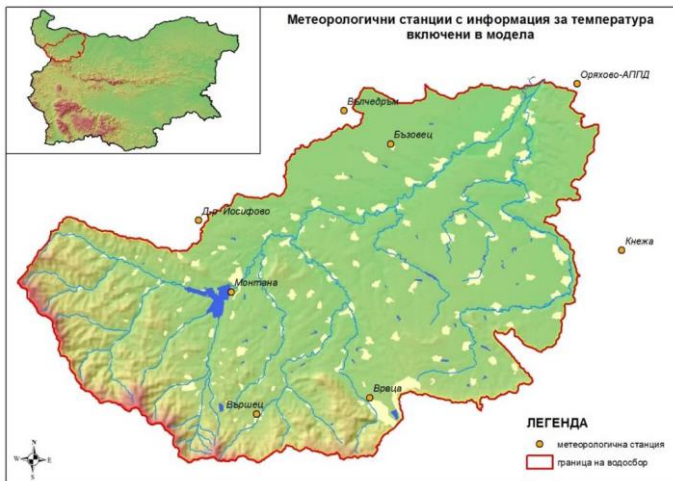
Използвана е информацията от CORINE\_LAND\_COVER\_2012. За всеки клас е определен коефициента на грапавина по Манинг за земната повърхност и месечни стойности на фактора на растежа на растенията в зависимост от земното покритие и земеползването [19] [28].



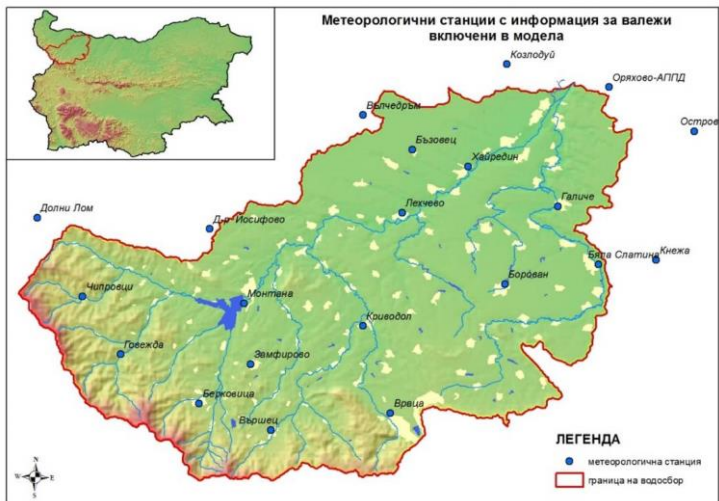
Фиг.3.2.3.1 Земно покритие за водосбора на р. Огоста

### 3.2.4 Хидрометеорологични данни

- Метеорологични данни – Наличните метеорологични данни са 24 часови суми на валежите и средноденонощни температури за периода 2009-2014 и са от мониторинговата мрежа на НИМХ. Във водосбора има 14 метеорологични станции, като за по-доброто представяне на пространственото разпределение на характеристиките на валежа и температурата са използвани и 7 метеорологични станции намиращи се извън водосбора, от които е използвана историческа метеорологична информация.

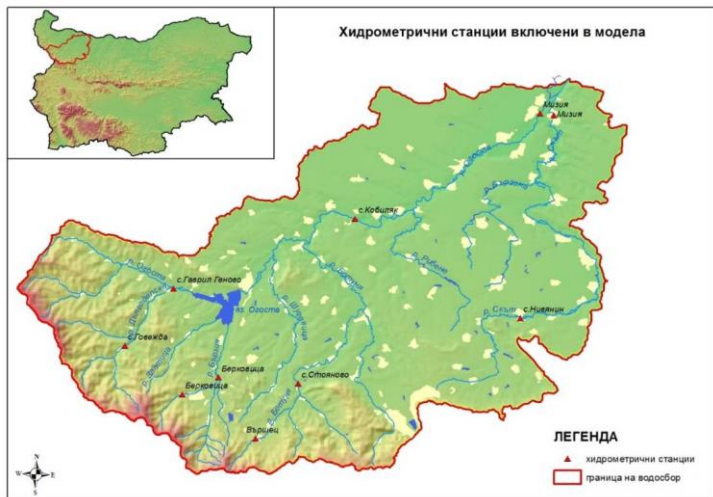


Фиг.3.2.4.1 Метеорологични станции с данни за температура на въздуха използвани в модела



Фиг. 3.2.4.2 Метеорологични станции с данни за валеж използвани в модела

- *Хидроложки данни* – Наличните хидрологични данни са наблюдавани водни стоежи и изчислени водни количества за периода 2009-2014 в мониторинговите пунктове на НИМХ. В пилотния водосбор има 10 хидрометрични станции, от които е използвана историческа хидрологична информация за водно ниво и водно количество. Три от ХМС се намират на основната река Огоста, а останалите 7 - на притоците ѝ (Фиг.3.2.4.3).



Фиг.3.2.4.3 Хидрометрични станции включени в модела



### 3.3 Калибриране на модела

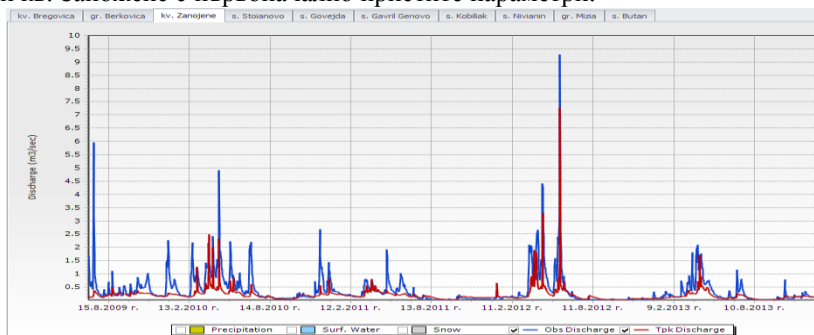
Моделите „валеж-отток“ представят хидрологичните процеси, които протичат в даден водосбор. За да се симулира връзката между валежите и оттока е необходимо да се определят параметрите на хидроложкия модел. По принцип физически базираният модел не изисква калибриране, защото неговите параметри се определят предварително от информация за водосбора, почви и земно покритие [34]. Въпреки това така определени те не могат адекватно да представят моделираните процеси поради пространствената променливост на характеристиките на водосбора. Това е така, защото повечето от стойностите на параметрите са получени, чрез лабораторни експерименти от различни източници и осреднени за даден район. Несигурностите в параметрите на модела са основен източник на грешки в хидроложките модели. Параметрите на хидроложкия модел почти винаги изискват калибриране за отделните водосбори.

Началното насищане на почвата е избрано да бъде 0,5 за всички клетки за началото на калибрационния период (01.07.2009 г.). Прието е, че няма никаква снежна покривка, повърхностен отток и дълбочината на водата в речното корито се увеличава като линейна функция на ширината на коритото. Измерените водни количества и метеорологичните данни за периода 01.07.2009 г. – 01.07.2010 г. са използвани за подгряване на модела (warm-up period). По този начин може да се предположи, че в началото на периода за калибриране симулираното състояние на водосбора ще представлява реалното състояние.



Фиг.3.3.1 Периоди за подгряване, калибриране и валидиране на модела

На Фиг.3.3.2 е представен резултата от модела за водосбора на р. Ботуня при кв. Заножене с първоначално приетите параметри.



Фиг.3.3.2 Симулирани (червена линия) и наблюдавани (синя линия) водни количества в хидрометричните станции за периода 01.07.2010 г. – 31.12.2013 г.

При оценка на резултатите на модела са използвани статистически критерии. Анализирани са следните критерии:

- *MAXQOBS* - максимална наблюдавана стойност на водното количество;
- *MAXQ* - максимална симулирана стойност на водното количество;
- *SHIFT* - време на отместване на *MAXQOBS* и *MAXQ*;
- *RMSE* - средно-квадратично отклонение;
- *R<sup>2</sup> Coefficient of determination* - коефициентът на определяне ( $R^2$ );
- *E Nash and Sutcliffe coefficient*. - коефициентът на Nash-Sutcliffe; на водното количество;
- *d Index of Agreement*. - индекс на съответствие (d);

Статистическата оценка на модела за периода 01.07.2010 г. до 31.12.2013 г. е представена в Таблица 3.3.1.

Таблица 3.3.1 Статистическа оценка за периода 01.07.2010-31.12.2013 г.

Станция	Симуляционен период	MAXQOBS	MAXQ	SHIFT	RMSE	R2	E	d
кв. Бреговица	2010-07-01 08:00 до 2013-12-31 08:00	8.79	9.34	0	0.63	0.65	0.39	0.7
гр. Берковица	2010-07-01 08:00 до 2013-12-31 08:00	47.13	38.4	0	1.86	0.78	0.53	0.8
кв. Заножене	2010-07-01 08:00 до 2013-12-31 08:00	9.28	7.26	0	0.37	0.79	0.51	0.78
с. Стояново	2010-07-01 08:00 до 2013-12-31 08:00	111	59.93	0	2.84	0.83	0.57	0.8
с. Говежда	2010-07-01 08:00 до 2013-12-31 08:00	24.71	13.82	540	1.85	0.65	0.13	0.54
с. Гаврил Геново	2010-07-01 08:00 до 2013-12-31 08:00	63.5	50.55	540	3.25	0.82	0.61	0.83
с. Кобиляк	2010-07-01 08:00 до 2013-12-31 08:00	144.34	67.62	0	8.32	0.77	0.09	0.62
с. Нивянин	2010-07-01 08:00 до 2013-12-31 08:00	32.42	4.3	0	1.86	0.45	0.09	0.21
гр. Мизия	2010-07-01 08:00 до 2013-12-31 08:00	37.21	15.63	3	2.22	0.52	0.06	0.56
с. Бутан	2010-07-01 08:00 до 2013-12-31 08:00	105.35	62.35	317	16.64	0.58	-0.7	0.48

Резултатите показват много добро описание на пиковите на високите вълни, както като амплитуда (оценка и сравнение на *MAXQOBS* и *MAXQ*), така и като време на случване (оценка *SHIFT*). За водосборите в горната и средната част на басейна на р. Огоста, резултатите също са значими. За сега не са добри резултатите за станциите при Кобиляк, Бутан (р. Огоста), Нивянин и Мизия (р. Скът). Водните количества в средното и долното течение са повлияни от работата на язовирите и главно от работата на яз. Огоста.

- Представени са резултатите от симулацията за 2011 г., която е суха година, за да се оцени как моделът симулира средни и ниски води.

**Извод:** Симулираните водни количества са значително занижени. В Таблица 3.3.2 коефициентът на NSE е от 0,13 до 0,58,  $R^2$  е от 0,16 до 0,81 и d е от 0,38 до 0,83.

- Изследвани са и резултатите за 2012 г.. В Таблица 3.3.3 и на Фиг.3.3.4 са показани резултатите от симулацията за 2012 г., която е влажна година, за да се оцени как моделът симулира високи води.

**Извод:** Високите води са по-добре симулирани, като симулираните водни количества са значително занижени. В Таблица 3.3.3 коефициентът на NSE е

от 0,54 до 0,62,  $R^2$  е от 0,53 до 0,92 и  $d$  е от 0,24 до 0,84, като за високите вълни отместването на пика (SHIFT) за всички станции е 0 (нула) с изключение на станциите при гр. Мизия (р. Скът) и при с. Буган (р. Огоста). Отново симулираните водни количества след яз. Огоста и във водосбора на р. Скът за със значително по-ниски резултати.

### 3.4 Изследване на чувствителността на параметрите на модела

Анализът на чувствителността на параметрите на модела е извършен за периода 01.07.2009-31.12.2013 г. за наблюдавани валежи и температура. Поспециално анализът на чувствителността е направен, като фокуса е върху физически базирани параметри, които имат най-голямо влияние върху формирането на оттока. Направени са редица симулации при различни стойности и комбинации на параметрите.

Хоризонтална хидравлична пропускливост при насищане ( $K_{sh}$ ), този параметър се използва за регулиране на количеството на водата, движеща се хоризонтално в повърхностния почвен слой. Резултатите показват, че намаляването на  $K_{sh}$  води до намаляване на дренирането в почвата, увеличаване на повърхностният отток и по този начин увеличаване на пика на водното количество.

Вертикална пропускливост при насищане ( $K_{sv}$ ), този параметър се използва за регулиране на количество вода, движеща се вертикално в повърхностния слой на почвата. Резултатите показват, че увеличаването на стойността на  $K_{sv}$  води до увеличаване на проникването и намаляване на повърхностния отток.

Експонентата  $\alpha_p$  в уравнението, описващо компонента на вертикалното движение на водата. Стойността зависи от вида на почвата и се използва при инфилтрирането, за да се регулира количеството на водата, която се движи вертикално в почвения повърхностен слой. Обикновено варира между 11 (пясък) и 25 (глина). Увеличаването на тази стойност на параметъра води до намаляване на просмукването и увеличаване на водните количества.

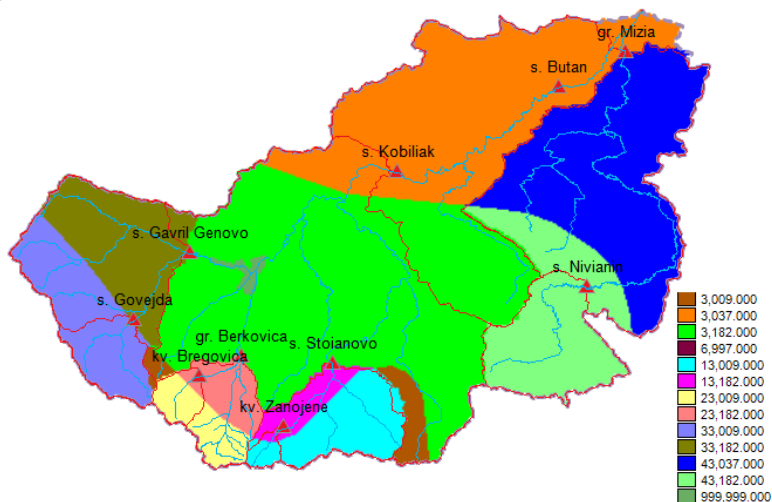
$L$  - дебелината на повърхностния почвен слой, този параметър се използва за регулиране на количеството вода, която може да се съхранява в повърхностния слой на почвата и влияе върху количеството вода, която се движи в почвата хоризонтално (drainage) и вертикално (percolation).

Коефициентът на грапавина на речното корито по Манинг ( $n_c$ ) и Коефициентът за грапавина на земната повърхност по Манинг ( $n_o$ ) не са съществено променени спрямо първоначално приетите и главно са променени в долното течение на основните реки за формиране на високите вълни.

В случая почвените типове във водосбора са само три от FAO, за точното определяне на почвените параметри, които оказват влияние върху формирания отток в отделните водосбори за всеки водосбор са определени стойности на параметрите за отделните почвени типове. На Фиг.3.4.3 е



представено разделянето на почвените типове по водосбори, за които са определени стойностите на параметрите. Новите параметри за почвените характеристики по водосбори, като входна информация в модела са представени в Фиг.3.4.4.



Фиг.3.4.3 Схема на почвените типове по водосбори, за които са определени стойностите на почвените параметри

SOIL PARAMETERS

Code	Horizontal Per...	Saturated Wa...	Residual Wate...	Soil Depth [m]	Horizontal No...	Vertical Perm...	Vertical Non-L...	Description
3009	2.8E-005	0.4	0.027	0.58	2.5	5.66E-08	18	Bd68-2bc
3037	6.65E-005	0.4	0.027	0.6	2.5	3.2E-08	18	Ck10-2ab
3182	7.2E-005	0.43	0.075	0.87	2.5	3.1E-10	18.5	Lc103-2ab
6997	1E-009	0.002	0.001	0.01	2.5	1E-10	12	Water
13009	1.4E-006	0.4	0.027	0.275	2.5	5.49E-08	18	Bd68-2bc
13182	1.7E-004	0.43	0.075	0.874	2.5	1.59E-08	18.5	Lc103-2ab
23009	2.4E-004	0.4	0.027	0.81	2.5	9.04E-09	18	Bd68-2bc
23182	2.4E-003	0.43	0.075	0.901	2.5	1.71E-08	18.5	Lc103-2ab
33009	3.8E-005	0.4	0.027	0.288	2.5	3.6E-08	18	Bd68-2bc
33182	7.8E-004	0.43	0.075	0.867	2.5	6E-07	18.5	Lc103-2ab
43037	6.65E-005	0.4	0.027	0.6	2.5	3.2E-08	18	Ck10-2ab
43182	5.27E-004	0.43	0.075	1	2.5	1.8E-07	18.5	Lc103-2ab
999999	1E-009	0.002	0.001	0.01	2.5	1E-10	12	Lake

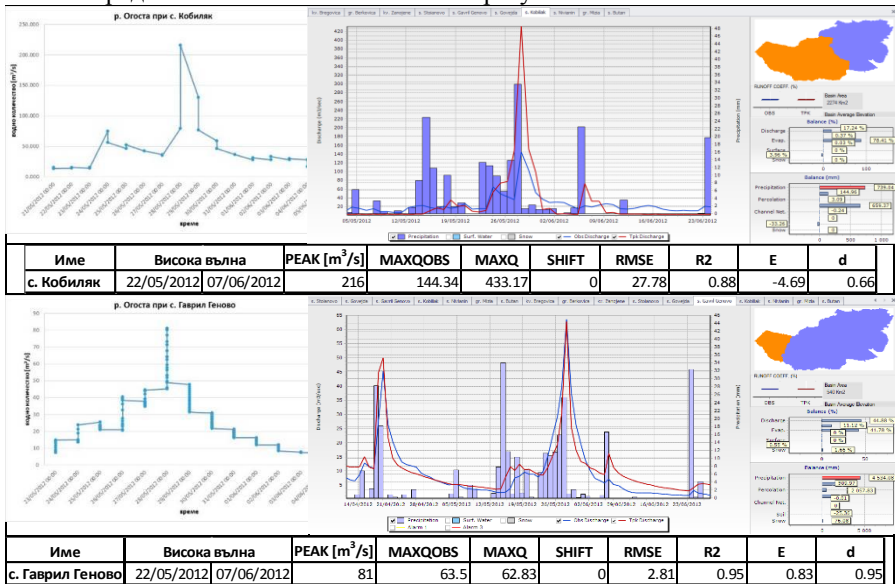
Фиг.3.4.4 Входна информация в модела

Чувствителният анализ е направен главно по отношение на високите вълни и пиковите им. В анализа е използвана информация за високите вълни във водосбора на р. Огоста в периодите 2010 – 2013 г..

Представени са и статистическите резултати, като в таблиците са показани стойностите за: PEAK [ $m^3/s$ ] – максимално изчислено водно количество от лимниграфа; MAXQOBS – максимално среднодневно водно количество; MAXQ – максимално симулирано водно количество; SHIFT – време на отместване на MAXQOBS и MAXQ; RMSE - Root Mean Squared Error; R2 –

коэффициентът на определяне; E – коэффициентът на Nash-Sutcliffe; d - индекс на съответствие.

През 2012 г. в периода 22.05.2012 – 07.06.2012 г. във водосбора, вследствие на валежи е преминала висока вълна. По-долу на Фиг.3.4.5 са представени хидрографите на високите вълни във всички наблюдавани хидрометрични станции в разглеждания водосбор. За всяка станция са показани хидрографите на симулираните и наблюдаваните водни количества в периода на високата вълна. Представени са и статистическите резултати.



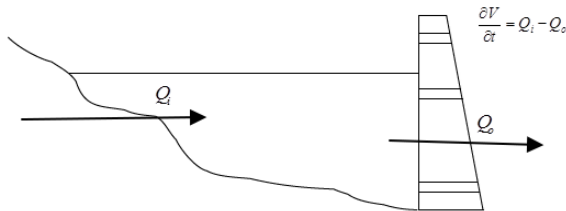
Фиг.3.4.5 Високи вълни – период 22.05.2012 г. – 07.06.2012 г., симулирани от модела водни количества и статистика без включен язовир.

**Извод:** От графиките се вижда, че моделът с калибрираните параметри добре описва високите вълни и статистическите оценки са значими, както по отношение на пика на високата вълна, така и по отношение на времето на настъпване на пика. Симулираните хидрографи на високите вълни са с по-стръмно покачване и по-стръмно спадане, което е в резултат на това че данните и стъпката на модела е 24 часова, с което не може достатъчно подробно да бъде представено развитието на процесите в почвения слой. Станциите при с. Кобиляк и с. Бутан са повлияни от работата на язовир Огоста и затова статистическите резултати не са добри, но все пак коефициентът на корелация и времето на настъпване на пика за станцията при с. Кобиляк са задоволителни.

- Моделът ТОРКАРІ дава възможност да се вземе предвид и влиянието на работата на язовирите върху оттока след тях. Язовирите временно съхраняват водни количества при високи вълни. Обикновено пикът на вълната след язовира при изпускане на водни обеми от язовира е по-нисък от пикът на притока в язовира. По този начин язовирът може да намали или да смекчи максималното водно количество при високи вълни или да забави времето на настъпване на пика на високата вълна.

Във водосбора на р. Огоста има над 90 язовира. В поречието Огоста има над 52 броя язовири, от които 2 комплексни и значими Огоста и Среченска Бара и 10 по-големи с обем около и над 1 млн. m<sup>3</sup>. В поречието Скът има над 40 броя язовири [33].

В ТОРКАРІ модела е включен модул за задържането на вода в язовира (Фиг.3.4.6), който се базира на закона за запазване на масата (mass balance law) като:



Фиг.3.4.6 Схема на работа на язовира

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_i - Q_o, \text{ където:} \quad (43)$$

- $V$  - воден обем на язовира;
- $Q_i$  - приток към язовира;
- $Q_o$  - изпусканото водно количество от язовира, което може да бъде изразено чрез типа и геометрията на шлюзовете или на базата на зависимостта водно ниво към воден обем в язовира, водно ниво и освободено водно количество.

Освобождането на водата от резервоара може да бъде симулирано по два различни начина:

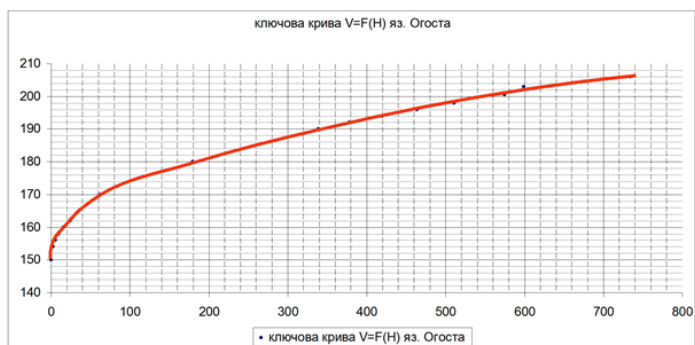
- Използване на външни данни за:
  - ✓ водно ниво (H) или завирен обем (V);
  - ✓ изпуснатото водно количество;
  - ✓ водно ниво или обема на водата и изпуснатото водно количество.
- Използване на автоматична симулация с използването на ключова крива H-V, ключова крива H-Q и ключова крива на H-Q<sub>max</sub>.

В симулациите е включена работата на яз. Огоста. Язовир Огоста се намира непосредствено до град Монтана и е вторият по големина в България след язовир „Искър“.

Язовирът е представен с дефиниране на клетките на водното огледало и с представяне на типа на земното покритие.

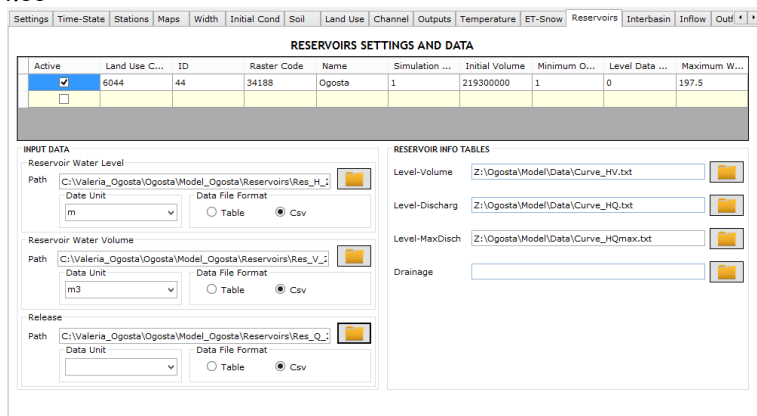
Направено е запитване към „НС“ ЕАД Монтана за данни за периода 2009-2014 г. и са получени следните данни:

- Дневни стойности за наличния обем и дневни стойности за водно ниво за периода 2009-2014.
- Ключова крива на завирените обеми (Фиг.3.4.10), която представя зависимостта на наличния обем в язовира, като функция на водното ниво.



Фиг.3.4.10 Ключова крива на завирените обеми

Получените данни за водно ниво, водно количество и воден обем в язовира са използвани, като входни данни за модела ТОРКАРІ, както е показано на Фиг.3.4.11

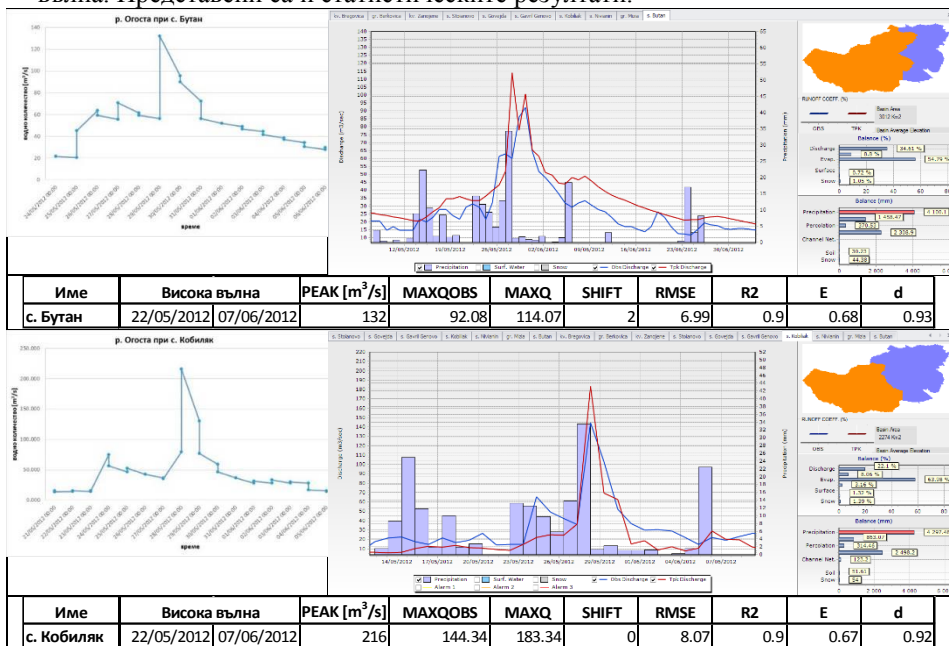


Фиг.3.4.11 Входна информация за работата на яз. Огоста

Информацията е обработена и е конвертирана във формат, който се изисква за входната информация в модела TOPKAPI.

Чувствителният анализ е направен главно по отношение на високите вълни и пиковите им.

През 2012 г. в периода 22.05.2012 – 07.06.2012 г. във водосбора, вследствие на валежи е преминала висока вълна. По-долу на Фиг.3.4.18 са представени хидрографите на високите вълни в станциите по течението на река Огоста след язовир Огоста. За всяка станция са показани хидрографите на симулираните и наблюдаваните водни количества в периода на високата вълна. Представени са и статистическите резултати.



Фиг.3.4.18 Високи вълни – период 22.05.2012 г. – 07.06.2012 г., симулирани от модела водни количества и статистика.

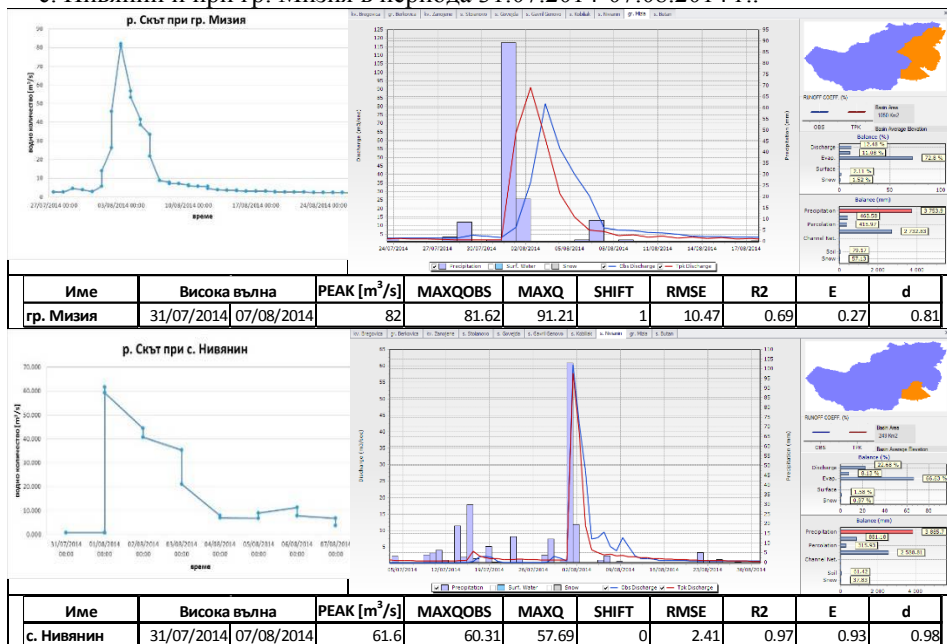
**Анализ:** От данните получени за язовир Огоста за изпуснати водни количества и задържан обем в язовира се вижда, че в дните преди високата вълна (19-23.05.2012 г.) има изпускане на по-големи водни количества 19-20 m<sup>3</sup>/s, а в дните до пика на високата вълна 25-28.05.2012 г. изпуснатите водни количества са по-малки около 8,5 m<sup>3</sup>/s. По данни от „НС“ ЕАД Монтана, в периода до 10.06.2012 г. задържания обем в язовира се увеличава. Това е дало отражение върху формираната висока вълна в реката след язовира и е симулирано много добре от модела с включена работа на язовира.

**Извод:** От графиките се вижда, че за станциите след язовира резултатите са значително по-добри. Включването на работата на язовира в модела заедно с калибрираните параметри добре описва високите вълни и статистическите оценки са значими, както по отношение на пика на високата вълна, така и по отношение на времето на настъпване на пика. Отчетена е и ретензионната способност на язовир Огоста. Вероятно може да се получат и по-добри резултати при наличие на данни за работата на яз. Среченска бара, а също така и информация за прехвърляните води към водосбора.

### 3.5 Валидиране на модела

Моделът е валидиран за високите вълни през 2014 г.. През тази година има редица наводнения в цялата страна. Най-значителното наводнение в басейна на р. Огоста е в периода 31.07.2014 – 05.08.2014 г. във водосбора на р. Скът. На 31.07.2014 г. са наводнени с. Малорад в общ. Борован, с. Комарево в общ. Бяла Слатина и с. Нивянин общ. Борован. На 02.08.2014 г. водното ниво на р. Скът се покачва и през нощта срещу 03.08.2014 г. гр. Мизия е наводнен. На 30.07.2014 г. са наводнени гр. Монтана и гр. Враца (р. Огоста).

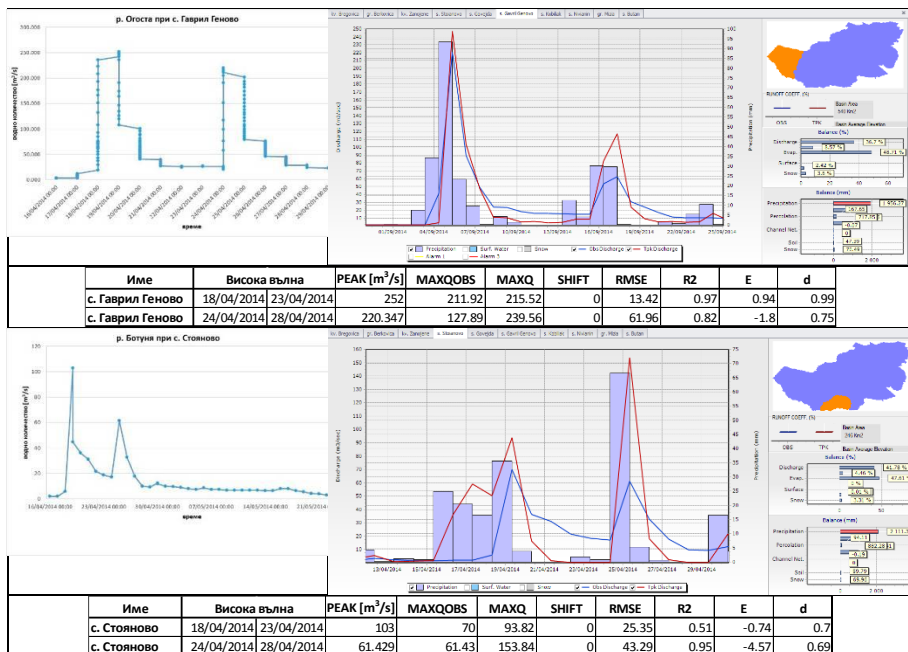
По-долу на Фиг.3.5.1 са представени високите вълни на р. Скът при с. Нивянин и при гр. Мизия в периода 31.07.2014-07.08.2014 г..



Фиг.3.5.1 Високи вълни – период 31.07.2014 г. – 07.08.2014 г., симулирани от модела водни количества и статистика.

**Извод:** С модела много добре са симулирани наводненията във водосбора на р. Скът. Недобрите статистически резултати при гр. Мизия и отместването на пика се дължат на това, че изчислените водни количества са на база на водните нива в 08 и 20 часа, а в случая високата вълна е преминала през нощта на 02 срещу 03.08.2014 г..

По-долу на Фиг.3.5.2 са представени високите вълни на р. Огоста при с. Гаврил Геново и р. Ботуня при с. Стояново в периода 18-28.04.2014 г..



Фиг.3.5.2 Високи вълни – периодите 18–23.04.2014 г. и 24–28.04.2014 г., симулирани от модела водни количества и статистика.

**Извод:**

От представените по-горе резултати се вижда, че симулираните с модела водни количества за р. Ботуня при с. Стояново са значително завишени спрямо изчислените среднодневни водни количества. Изчислените водни количества са на базата на измерени водни стоежи в 08 и 20 часа и в този случай не винаги може да се регистрира абсолютния максимум.

От представените по-горе резултати се вижда, че симулираните с модела водни количества за р. Огоста при с. Гаврил Геново са значително по-големи от изчислените среднодневни водни количества, но са симулирани добре пиковите регистрирани от лимниграфа, с който е оборудвана станцията.

### **3.6 Изводи**

Всичките резултати са подробно анализирани и са направени съответните изводи за конкретните случаи по-горе. Тук само са обобщени основни изводи:

Опитът при калибрирането на модела и сравнението между калибрирани и некалибрирани симулации показва, че стойностите на параметрите по литературни източници са много обобщени и е необходимо да се използват различни почвени параметри за един и същи почвен тип.

Моделът ТОРКАРІ показва много добри резултати при симулирането на високи вълни, пиковите на високите вълни и време на настъпване на пика.

Анализирайки статистическите резултати моделът може да бъде успешно използван за прогнозиране на оттока във водосбора на р. Огоста.

## **ГЛАВА 4 ПРОГНОЗИРАНЕ НА ОТТОКА С МОДЕЛА ТОРКАРІ ВЪВ ВОДОСБОРА НА Р. ОГОСТА**

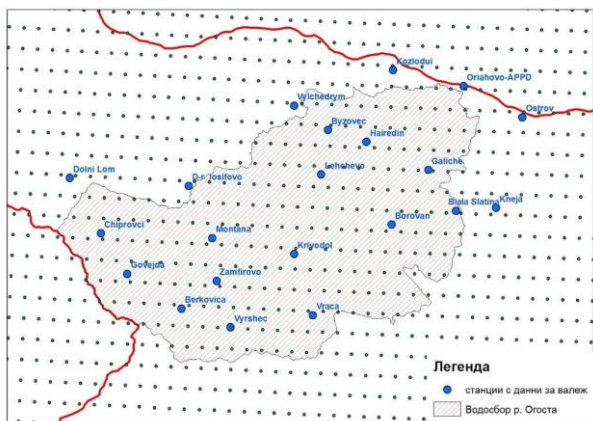
С калибрираните параметри за модела прогнозирането на оттока във водосбора на р. Огоста започна на 31.10.2018 г.. Стойностите на физически базираните параметри за модела са получените след калибриране и валидиране на модела (Фиг.3.4.4). Файлът, който съдържа информация със стойностите за тези параметри и е използван за прогностичния период е създаден за 25.10.2013 г., защото условията във водосбора са същите, каквито са в началния период (няма сняг, няма повърхностен отток, нивата и водните количества в станциите са близки като стойности).

Оперативните ХМС във водосбора, за които всеки ден се получава информация за водни нива и определени по временни ключови криви водни количества в 08:00 часа са ХМС 16800 р. Огоста при с. Кобиляк и ХМС 16850 р. Огоста при с. Бутан. Допълнително се получава и информация за водните нива сутрин в две станции във водосбора – на р. Огоста при с. Гаврил Геново и на р. Дългоделска Огоста при с. Говежда, в които по временни ключови криви се определя водното количество.

Входната прогностична метеорологична информация е от числения модел ALADIN България и WRF.

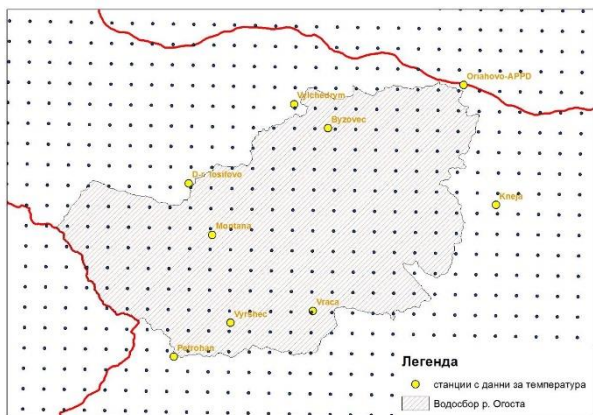
На Фиг.4.1 са показани преизчислените точки от мрежата на числения модел ALADIN и метеорологичните валежомерни станции използвани в модела ТОРКАРІ за водосбора на р. Огоста.





Фиг.4.1 Мрежа на числения модел ALADIN и валежомерни станции използвани в модела TOPKAPI.

На Фиг.4.2 са показани преизчислените точки от мрежата на числения модел ALADIN и метеорологичните станции, в които се измерва температурата на въздуха и които са използвани в модела TOPKAPI за водосбора на р. Огоста.



Фиг.4.2 Мрежа на числения модел ALADIN и станции с измервания за температура на въздуха използвани в модела TOPKAPI.

Моделът TOPKAPI дава възможност входната информация за валежите и температурата да бъде в точки (метеорологичните станции) или пространствено разпределени и представени в гريد.

С използване на създадения модел в ArcGIS, който подробно е представен в Глава 5, за всяка дъждомерна станция е определена прогностичната стойност за валежа и температурите на въздуха за следващите три дни.

Резултатът от модела за водосбора на р. Огоста е прогнозирани водни количества за четирите ХМС, за които ежедневно се получават данни.

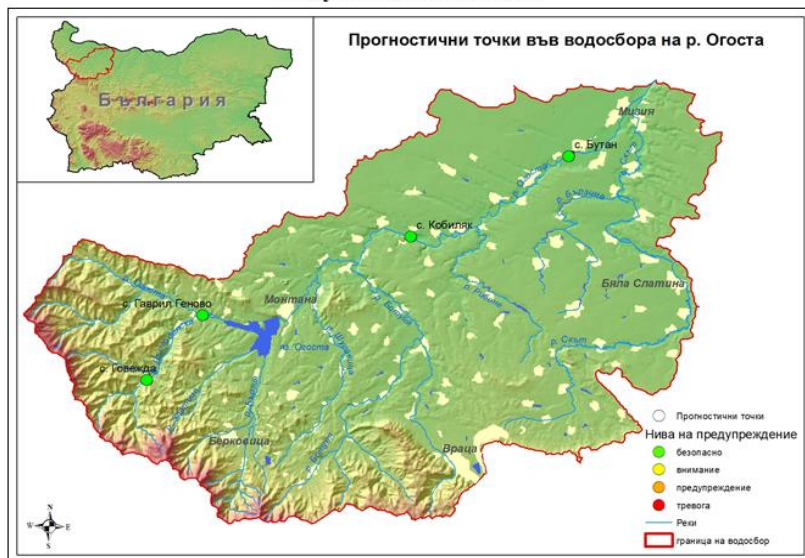
Прогнозата е представена, като графики и таблици с прогнозирани водни количества за следващите три дни и измерени водни количества за девет дена назад. Файлт е „Дневен бюлетин за прогнозирани водни количества за водосбора на р. Огоста“ и се публикува всеки ден на страницата <http://hydro.bg>. На графиките са изобразени и нивата на предупреждение – внимание (жълто), предупреждение (оранжево) и тревога (червено). Водните количества, които съответстват на праговете са определени статистически на базата на историческа хидрологична информация. За останалите станции във водосбора могат да бъдат представени графики само с прогностични данни.

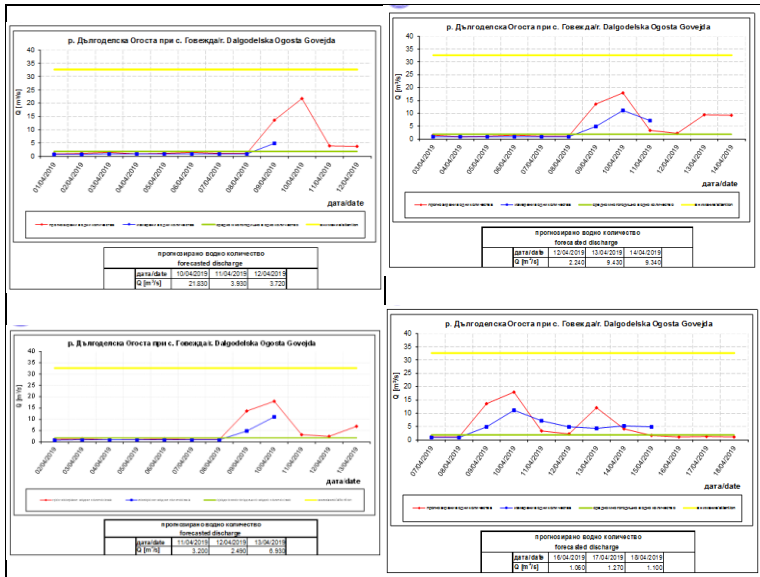
По-долу е представено прогнозирането на оттока за станция на р. Дългоделска Огоста при с. Говежда в резултат на валежи в периодите 08.04.2019 – 10.04.2019 г. и 12.04.2019 - 15.04.2019 г.. На Фиг.4.5 е представено последователно ежедневната прогноза на водните количества за периода 09-18.04.2019 г..



**НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО МЕТЕОРОЛОГИЯ И ХИДРОЛОГИЯ**

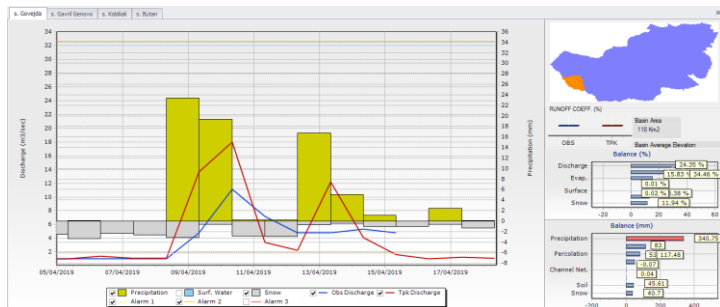
**Дневен бюлетин за прогнозирани водни количества за водосбора на р. Огоста**  
**Daily bulletin 09.04.2019**





Фиг.4.5 Дневен бюлетин за прогнозирани водни количества във водосбора на р. Огоста

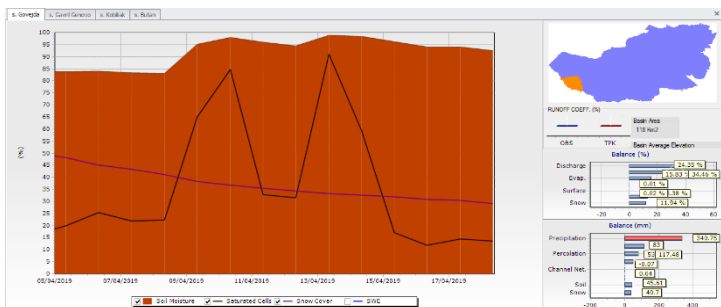
На Фиг.4.6 е показан резултата от модела TOPKAPI - сравнени са симулираните водни количества с изчислените по временни ключови криви водни количества за горепосочения период.



Фиг.4.6 Резултати от модела TOPKAPI за периода 09–18.04.2019 г.

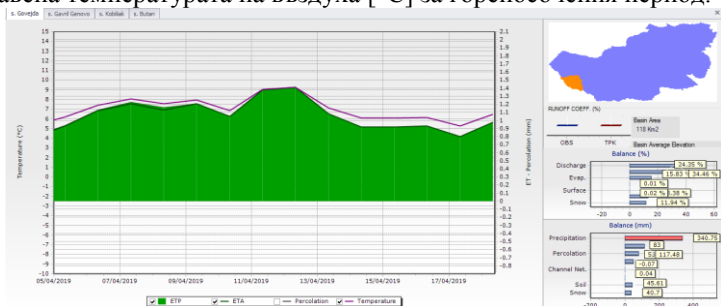
На Фиг.4.6 с жълто са представени валежите, със сиво е представено снеготопенето, синята линия е изчислените водни количества по временна ключова крива, а с червено са представени симулираните водни количества за горепосочения период.

На Фиг.4.7 е представена почвената влажност в %.



Фиг.4.7 Почвена влажност от модела TOPKAPI за периода 09-18.04.2019 г.

На Фиг.4.8 в зелено е представена евапотранспирацията [mm], а с лилаво е представена температурата на въздуха [°C] за горепосочения период.



Фиг.4.8 Евапотранспирация и среднодневни температури на въздуха от модела TOPKAPI за периода 09-18.04.2019 г.

**Извод:** Както се вижда от Фиг.4.8 температурите в периода 09-18.04.2019 г. са положителни, което е довело до отразеното в модела снеготопене, в резултат почвената влажност е над 70%. В резултат, на което валежите в първия и във втория период са довели до покачване на водното ниво и съответно до увеличаване на водното количество, както показват и регистрираните и симулираните от модела данни. Поради високата почвена влажност и количествата на валежите (19-25 mm) за по реалистични можем да приемем резултатите от модела, тъй като данните за измерените водни количества по временни ключови криви са на база измерения воден стоеж само в 08 часа сутринта.

#### 4.1 Извод

Моделът може успешно да бъде приложен за прогнозиране на оттока, което ще помогне за изготвяне на предупреждения при екстремни явления и ще повиши обществената осведоменост в случаи на наводнения.

## ГЛАВА 5 СЪЗДАВАНЕ НА МОДЕЛ В ГИС СРЕДА ЗА ПОДГОТОВКА НА ВХОДНА ИНФОРМАЦИЯ ЗА МОДЕЛА ТОРКАРІ

В подготовката на входните прогностични данни за валеж и температура от различни прогностични модели (ALADIN, WRF), което е свързано с ежедневна обработката на голям набор от данни в различен грид е използвана функционалността на ModelBuilder за автоматизиране на процесите в ArcGIS.

ModelBuilder е интерактивна програма с графичен интерфейс, която се използва за създаване, редактиране и управление на модели в ГИС среда. Тези модели обединяват инструменти за изпълнение на поредица от гео-процеси изпълнени в определена последователност. В тези модели изходът от един инструмент е вход в друг инструмент.

За пространственото разпределение на данните е използван ArcGIS Geostatistical Analyst. Това е програма към ESRI ArcGIS продуктите (ArcView, ArcEditor, ArcInfo) и използва сложни статистически методи.

За намиране на най-подходящия метод на интерполация за конкретния случай са използвани различни интерполационни методи (*Inverse Distance Weighted – IDW, Radial Basis Functions – RBF, Гео-статистически - Kriging*) и е направен анализ на резултатите.

Моделът в ModelBuilder с всички използвани инструменти, които са необходими, за да се получи крайният резултат (таблица с прогнозни стойности към метеорологичните станции включени в модела ТОРКАРІ) е представен на Фиг.5.7.

### 5.1 Извод

Създаденият инструмент дава възможност за автоматично получаване на данните, като входна информация в модела на базата на пространствените полета за валеж и температура от прогностичните метеорологични модели ALADIN, WRF и ECMWF.



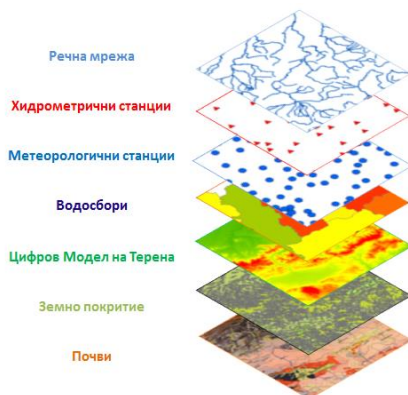
## ГЛАВА 6 СЪЗДАВАНЕ НА ГИС БАЗА ДАННИ ЗА ПРИЛОЖЕНИЕ В ХИДРОЛОЖКОТО МОДЕЛИРАНЕ

Географските информационни системи (GIS) са мощен и ефикасен инструмент в помощ на специалистите в хидрологията при анализа на характеристиките на водосборите и в създаването на прецизни и детайлни хидроложки и хидравлични модели [37].

Моделирането на речния отток може да се извърши с използване на различни набори от данни, но някои от тези данни са необходими независимо от използвания модел за формиране на оттока. За определяне на речната мрежа, очертаване на водосборни области, определяне на площта на водосборната област, определяне на средната надморска височина, определяне на наклона на водосборната област е необходим Цифров модел на релефа. За да се определи повърхностния отток са необходими не само данни за количествата на валежите, но и за местоположението на дъждомерните станции, за да може да се определи в кой водосбор са валежите. Също така са необходими данни и характеристики за почвите и земното покритие.

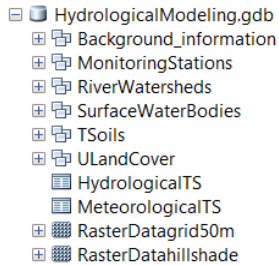
Базата от гео-данни улеснява съхранението, редактирането на пространствени данни, предварително обработване и анализ на данни за хидроложкия или хидравличен модел, автоматизирането на повтарящи се задачи на гео-обработка и изготвяне на карти за визуализация на резултатите от моделите.

В дисертацията е разработена ArcGIS гео-база данни в подкрепа на хидроложкото моделиране и анализи. Тя съдържа основно информация за речната мрежа, водосборите, мониторинговите станции, цифровия модел на терена, земното покритие и почви, които са представени на Фиг.6.2.



Фиг.6.2 Основна информация

Структурата на базата данни е представена на Фиг.6.3.



Фиг.6.3 ArcGIS база данни

## 6.1 Изводи

Така създадената база дава възможност да се съхраняват голям обем от ГИС данни в един файл. Базата данни може да се надгражда и редактира. Това може да се извършва централизирано, всички да използват една основа в своята работа и в зависимост от компетенциите си да допълват и нанасят корекции в отделните елементи и слоеве в базата данни. Приложението в хидроложкото моделиране главно се изразява в разработване и управление на пространствени данни, автоматично извличане на параметри, подготовка на данни за модела, улесняване и подпомагане на конструирането на хидроложкия модел, обработване, визуализиране и анализиране на резултата от модела.

### БЪДЕЩИ ПЛАНОВЕ

1. Прилагане на създадения модел за прогнозиране на оттока в ненаблюдавани водосбори.
2. Определяне на параметри на модела, които по-добре да описват ниските води и създаване на модел, който да може да се използва за прогнозиране на екстремни явления – засушаване, във водосбора на р. Огоста.
3. При бъдещо развитие на хидрометеорологичната мрежа във водосбора да се премине към времева стъпка на модела 1 час.



## **ПРИНОСИ**

- **Приноси с научно-фундаментален характер**
  - Разширени са проучванията за възможността за използване на физически базиран напълно разпределен хидроложки модел за моделиране на речния отток в България.
  - Определени са и е направена оценка на подходящи за хидроложкия модел параметри от различни източници на данни за цифровия модел на терена, почвите и земното покритие за представяне на пространствената променливост на елементите на оттока.
  - Създаден е модел за симулиране на оттока във водосбора на р. Огоста с използване на програмен пакет TOPKAPI.
- **Приноси с научно-приложен характер**
  - Създаден е модел за прогнозиране на речния отток във водосбора на р. Огоста.
  - Създаден е модел в ГИС среда за подготовка на входна информация за създадения хидроложки модел с използване на различни интерполационни методи.
  - Създадена е ГИС база данни за приложение в хидроложкото моделиране.

## **ВНЕДРЯВАНЕ**

Разработеният разпределен хидроложки модел TOPKAPI за пилотен водосбор и получените резултати (прогнозиран водни количества за водосбора на р. Огоста) са представени на разширен семинар на департамент „Прогнози и информационно обслужване“ и департамент „Хидрология“ с предложение за внедряване в оперативната практика на департамент „Прогнози и информационно обслужване“.

Със Заповед №РД-11-6/10.01.2019 г. е внедрен „Напълно разпределен хидроложки модел за прогнозиране на водни количества във водосбора на р. Огоста“, като част от ежедневната хидрологична прогноза на НИМХ.

## **СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИ СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

1. Eng. Valeriya Yordanova, Assoc. Prof. Snezhanka Balabanova, PhD, Eng. Vesela Stoyanova, „Application of the topkapi model on the Ogosta river basin“, публикувана в “Electronic book with full papers from XXVII Conference of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management”, ISBN 978-954-90537-2-2, стр. 357-364

2. Eng. Vesela Stoyanova, Assoc. Prof. Snezhanka Balabanova, PhD, Eng. Valeriya Yordanova, „Evaluation of the thresholds for flood forecasting and warning“, публикувана в “Electronic book with full papers from XXVII Conference of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management”, ISBN 978-954-90537-2-2, стр. 435-443

Двете статии са цитирани - Nelly Hristova, Ivan Penkov, Kalin Seymenov, Fluctuation and climate elasticity of annual streamflow in Bulgaria, Annual of Sofia University “St. Kliment ohridski” Faculty of geology and geography, book 2 – Geography, Volume 111



## БЛАГОДАРНОСТИ

Бих искала да изразя безкрайната си благодарност към своя ръководител доц. д-р Снежанка Балабанова, за нейното търпение, непрекъснато ръководство, подкрепа и всеотдайност през целия период на разработването на тази дисертация. Нейните съвети, предложения и насърчаване по време на трудните фази на разработването на темата ми дадоха сили да успея да завърша тази дисертация. Освен това тя успя да организира посещението на всяка една от хидрометричните станции намиращи се в разглеждания като пилотен водосбор – водосбора на река Огоста, което ми даде възможност да получа представа за водосборите, хидрометричните станции, начините на измерване, останали белези от минали наводнения, което значително допринесе за разбирането при разработването на представената тук дисертация.

Изказвам най-сърдечната си благодарност и на моя консултант, проф. Валери Спиридонов за неговите насоки по време на подготовката на дисертацията.

Изказвам своята благодарност към колегите от Департамент „Хидрология“, които ми подготвиха и предоставиха информация за хидрометричните станции, също така и за избрани високи вълни.

Изказвам своите благодарности към колегите от Департамент „Метеорология“ за предоставената метеорологична информация.

Изказвам своята благодарност и на доц. Андрей Богачев, доц. Илиян Господинов и проф. Валери Спиридонов за подготовка и предоставяне на прогностична информация от модела ALADIN, а също така и на г-н Валери Николов за прогностичната информация от модела WRF.

Изказвам своята благодарност и на доц. Ирена Илчева за консултациите свързани с работата на язовирите в разглеждания водосбор, както и на доц. Веска Георгиева за консултациите в областта на агрометеорологията.

Бих искала да изкажа огромни благодарности на моите колеги за желанието им да обсъждат идеи, да споделят опит и знания, както и толерантността им към ангажираността ми при написването на дисертационния ми труд.

Благодаря на сина си и на съпруга си за търпението и подкрепата през годините на израстването ми в професионален план, на родителите си за цялостната подкрепа и обич и на всички близки, които ми вдъхваха вяра и кураж, за да продължавам успешно напред.