



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ  
ГРАЂЕВИНСКО-АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ



Драган Иваноски

**РАЗВОЈ МЕТОДОЛОГИЈЕ ЗА ОДРЖИВО  
УПРАВЉАЊЕ ЗАСИПАЊЕМ АКУМУЛАЦИОНИХ  
ЈЕЗЕРА НАНОСОМ**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

НИШ, 2020



UNIVERSITY OF NIS  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND  
ARCHITECTURE



Dragan Ivanoski

**DEVELOPMENT OF METODOLOGY FOR  
SUSTAINABLE MANAGEMENT OF  
SEDIMENTATION IN RESERVOIRS**

DOCTORAL DISSERTATION

**Nis, 2020**

## Подаци о докторској дисертацији

Ментор:	Проф.Д-р. Славиша Р. Трајковић Универзитет у Нишу, Грађевинско-Архитектонски факултет
---------	--

Наслов:	Развој методологије за одрживо управљање засипањем акумулационих језера наносом
---------	---

Резиме:	<p>Акумулациона језера формирана изградњом брана на речним токовима, обезбеђују снабдевање водом која се користи за становништво и индустрију, наводњавање мелиорационих подручја, производњу електричне енергије и за друге потребе. У прошлом веку, број великих брана у свету је порастао са око 1000 на преко 37.000, од којих је 85% изграђено у последњих 50 година. Укупна запремина акумулационих језера која су до данас изграђена је процењена на преко 7000 км<sup>3</sup>. Од тога, процењује се да једна трећина припада тзв. мртвом простору који се не може користити.</p> <p>Акумулације у Македонији су такође суочене са проблемом губитка капацитета проузрокованог седиментацијом наноса. На основи детаљних, углавном теренских истраживања, која су вршена осамдесетих и деведесетих година прошлог века је утврђено да се значајан део транспортованих седимената у речној мрежи, око <math>3 \times 10^6</math> m<sup>3</sup>/год., задржава у природним и вештачким језерима. Пратећи савремене трендове у науци, у овом раду је предложена методологија одређивања продукције и транспорта наноса у сливу, као и дефинисања интензитета седиментације у акумулацијама. При том су примењени напредни, физички базирани рачунски модели за симулацију природних хидролошких, ерозивних и транспортних процеса у систему слив – речна мрежа – акумулација.</p> <p>Предложена методологија претставља својеврсну комбинацију хидролошког и ерозионог модела сливних површина и хидродинамичког модела у отвореним токовима. Обрада огромне количине података је урађена коришћењем напредне GIS платформе, која се задњих неколико година намеће као незаменљива алатка код оваквих врста анализа.</p> <p>Апликација предложене методологије је урађена на примеру акумулације Тиквеш, једне од највећих вештачких акумулација у Македонији. Моделирање хидролошких и ерозивних процеса у сливу и транспортних процеса у речној мрежи је урађено користећи модел SWAT (Soil and Water Assessment Tool) . SWAT је континуирани, полу-дистрибуирани и процесно базирани модел речних сливова способан за симулацију током дугих временских периода. Модел је калибрисан и верификован на основу расположивих података о протоцима воде и седимента прикупљених из постојећих мерних станица које се налазе дуж главног речног тока у сливу. Да би се превазишли проблеми са великим неизвесностима који прате дистрибуирано хидролошко моделирање, у овом истраживању је коришћен секвенцијални алгоритам прилагођавања неизвесности (SUFI-2) за комбиновану калибрацију и анализу неизвесности модела.</p>
---------	--

	<p>Моделирање просторне дистрибуције седимента кроз акумулацију Тиквеш у анализираном периоду је извршено применом хидродинамичког модела SRH-1D(Sedimentation and River Hydraulics -One Dimension).</p> <p>У раду се даје и предлог могућих мера и активности одрживог управљања и контроле седиментације у акумулацији, које се са одређеним прилагођавањем у зависности од локалних услова може применити и код осталих акумулација у држави. Дугорочни ефекти одређених мера се могу ефикасно симулирати користећи предложени модел.</p> <p>На крају рада се дају препоруке за даља истраживања и за побољшање резултата симулација модела коришћених у овом истраживању.</p>
--	---

Научна област:	Грађевинарство
----------------	----------------

Научна дисциплина:	Хидроинформатика
--------------------	------------------

Кључне речи:	акумулације, интензитет седиментације, модел речних сливова; дугорочно моделирање, одрживо управљавање
--------------	--

УДК:	627.81(497.7)(043.3)
------	----------------------

CERIF класификација	T 220 (Građevinarstvo, hidraulika, priobalna tehnologija, mehanika tla)
---------------------	---

Тип лиценце креативне заједнице:	CC BY- NC
----------------------------------	-----------



## Data on Doctoral Dissertation

Doctoral supervisor:	Professor. Slavisa R. Trajkovic, Phd University of Nis, Faculty of Civil Engineering and Architecture
----------------------	--

Title:	Development of methodology for sustainable management of reservoirs sedimentation
--------	---

Abstract:	<p>Reservoirs formed by the construction of dams on river courses, provide water supply used for the population and industry, irrigation of land reclamation areas, electricity production, and other needs. In the last century, the number of large dams in the world has grown from about 1,000 to over 37,000, of which 85% have been built in the last 50 years. The total volume of reservoirs that have been built to date has been estimated at over 7,000 km<sup>3</sup>. Of that, it is estimated that one-third belongs to the so-called dead space that cannot be used.</p> <p>Reservoirs in Macedonia also face the problem of capacity loss caused by sedimentation. Based on detailed, mainly field researches conducted in the eighties and nineties of the last century, it was determined that a significant part of the transported sediments in the river network, about <math>3 \times 10^6</math> m<sup>3</sup>/year, is retained in natural and artificial lakes. Following modern trends in science, this paper proposes a methodology for determining the production and transport of sediments in the basin, as well as defining the sedimentation rate in reservoirs. Advanced, physically based computational models for simulation of natural hydrological, erosive, and transport processes in the catchment - river network - reservoirs system were applied. The proposed methodology is a kind of combination of hydrological and erosion model of catchment areas and hydrodynamic model in open streams. The processing of a huge amount of data was done using an advanced GIS platform, which in recent years has emerged as an indispensable tool in this type of analysis.</p> <p>The application of the proposed methodology was made on the example of the Tikves reservoir, one of the largest artificial reservoirs in Macedonia. Long term modeling of hydrological and erosive processes in the basin and transport processes in the river network was done using the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model. SWAT is a continuous, semi-distributed and process-based river basin model capable of simulation over long periods of time. The model was calibrated and verified on the basis of available data on water and sediment flows collected from existing measuring stations located along the main river flow in the basin. To overcome the high uncertainty problems that accompany distributed hydrological modeling, a Sequential Uncertainty Fitting Algorithm (SUFI-2) was used in this study for combined model calibration and uncertainty analysis.</p> <p>Modeling of the spatial distribution of sediment through the Tikveš reservoir in the analyzed period was performed using the hydrodynamic model SRH-1D (Sedimentation and River Hydraulics - One Dimension). The paper also proposes possible measures and activities for sustainable management and control of sedimentation in the reservoir, which with some adaptation depending on local conditions can be applied to other reservoirs in the country. The long-term effects of certain measures can be efficiently simulated using the proposed model.</p>
-----------	---

	At the end of the paper, recommendations are given for further research and for improving the results of simulations of the models used in this research.
--	---

Scientific field:	Civil Engineering
-------------------	-------------------

Scientific discipline:	Hydroinformatics
------------------------	------------------

Key words:	reservoirs; sedimentation rate; watershed-scale model; long-term modeling; sustsinable management
------------	---

UDC:	627.81(497.7)(043.3)
------	----------------------

CERIF Classification:	T 220 (Civil Engineerng, Hydraulics, Coastal Technology, Soil Mechanics)
-----------------------	--

Creative Commons Licence Type:	CC BY- NC
--------------------------------	-----------

## **САДРЖАЈ:**

<b>I. ДЕФИНИСАЊЕ И СПЕЦИФИЧНИ ЦИЉЕВИ.....</b>	<b>1</b>
1.1 УВОД .....	1
1.2 ДЕФИНИЦИЈА ПРОБЛЕМАТИКЕ.....	2
1.2.1 Акумулације у Македонији .....	2
1.2 ЦИЉ И ЗАДАТАК ДИСЕРТАЦИЈЕ .....	7
1.3 ОРГАНИЗАЦИЈА ДИСЕРТАЦИЈЕ .....	8
<b>II. ТЕОРЕТСКИ АСПЕКТИ ПРОДУКЦИЈЕ НАНОСА И СЕДИМЕНТАЦИЈЕ У АКУМУЛАЦИЈАМА .....</b>	<b>9</b>
<b>ДЕО 1 - ЕРОЗИЈА ЗЕМЉИШТА И ПРОДУКЦИЈА НАНОСА.....</b>	<b>9</b>
2.1 УВОД .....	9
2.2 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ И ДЕФИНИЦИЈЕ.....	9
2.3 КЛАСИФИКАЦИЈА ЕРОЗИЈЕ.....	11
2.4 ФАКТОРИ КОЈИ УТИЧУ НА ПОЈАВУ И РАЗВОЈ ЕРОЗИЈЕ ТЛА.....	12
2.4.1 Климатски фактори.....	12
2.4.2 Геолошке карактеристике тла .....	13
2.4.3 Рељеф .....	13
2.4.4 Биљни покривач.....	14
2.4.5 Утицај човека.....	14
2.5 ПРОЦЕСИ И МЕХАНИЗАМ НАСТАНКА ВОДНЕ ЕРОЗИЈЕ .....	15
2.6 ПРОЦЕНА ЕРОЗИЈЕ У СЛИВНИМ ПОДРУЧЈИМА.....	20
2.6.1 Универзална једначина губитка земљишта .....	20
2.6.2 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) .....	23
2.6.3 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) .....	24
2.6.4 Директна мерења проноса седимената и настављање низова измерених података .....	24
2.7 МОДЕЛИРАЊЕ ХИДРОЛОШКИХ И ЕРОЗИВНИХ ПРОЦЕСА СЛИВНИХ ПОДРУЧЈА .....	26
2.7.1 Подела модела.....	26
2.7.2 Хидролошки модели – стање у науци .....	27
2.7.3 Избор модела .....	33
<b>ДЕО 2 - СЕДИМЕНТАЦИЈА У АКУМУЛАЦИЈАМА.....</b>	<b>34</b>
2.8 УВОД.....	34
2.9 ДОТОК СЕДИМЕНАТА У АКУМУЛАЦИЈЕ .....	35
2.10 ТАЛОЖЕЊЕ МАТЕРИЈАЛА У АКУМУЛАЦИЈАМА .....	36
2.10.1 Уздужни облици седиментних депозита у акумулацијама .....	37

2.10.2	Попречна геометрија депозита у акумулацијама.....	38
2.10.3	Утицај режима управљања на седиментацију у акумулацијама.....	39
2.10.4	Ерозија и обрушавање обала акумулација.....	39
2.11	<b>ЕФИКАСНОСТ ЗАДРЖАВАЊА СЕДИМЕНАТА У АКУМУЛАЦИЈАМА.....</b>	<b>40</b>
2.12	<b>МЕРЕЊЕ СЕДИМЕНТАЦИЈЕ У АКУМУЛАЦИЈАМА.....</b>	<b>42</b>
2.13	<b>ПРЕДВИЂАЊЕ СЕДИМЕНТАЦИЈЕ У АКУМУЛАЦИЈАМА.....</b>	<b>43</b>
2.17.1	Метод редукције површина .....	43
2.14	<b>МОДЕЛИРАЊЕ СЕДИМЕНТАЦИЈЕ У АКУМУЛАЦИЈАМА ПРИМЕНОМ МАТЕМАТИЧКИХ МОДЕЛА .....</b>	<b>45</b>
2.14.1	Нумеричко моделирање.....	46
2.14.2	Избор модела.....	52
<b>ДЕО 3 - МЕТОДИ И МЕРЕ ЗА ОДРЖАВАЊЕ КАПАЦИТЕТА АКУМУЛАЦИЈА .....</b>		<b>53</b>
<b>III. СТУДИЈА СЛУЧАЈА – АКУМУЛАЦИЈА ТИКВЕШ .....</b>		<b>60</b>
3.1	УВОД.....	60
3.2	ГЕОГРАФСКИ ПОЛОЖАЈ АКУМУЛАЦИЈЕ ТИКВЕШ .....	61
3.3	ХИДРОГРАФИЈА.....	77
3.4	БИОГЕОГРАФСКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ .....	79
3.5	<b>ИСТРАЖИВАЊА СЕДИМЕНТАЦИЈЕ У АКУМУЛАЦИЈИ ТИКВЕШ ..</b>	<b>81</b>
3.5.1	Мерења исталоженог наноса у акумулацији током 1991 године.....	83
3.5.2	Мерење исталоженог наноса у акумулацији током 2016 године .....	84
3.5.3	Прорачун линије површина и запремина акумулације .....	87
3.5.4	Утврђивање режима седиментације тиквешке акумулације.....	89
<b>IV. РАЗВОЈ И ПРИМЕНА ХИДРОЛОШКОГ МОДЕЛА СЛИВА АКУМУЛАЦИЈЕ ТИКВЕШ .....</b>		<b>91</b>
4.1	УВОД.....	91
4.2	<b>КОРИШЋЕНЕ ПОДЛОГЕ .....</b>	<b>91</b>
4.2.1	ДЕМ – дигитални елевациони модел .....	91
4.2.2	Климатске подлоге .....	93
4.2.2.1	Климатски генератор .....	93
4.2.3	Веgetабилни покривач и коришћење земљишта (CORINE LU/LC).....	93
4.2.4	Глобална база педолошких карактеристика земљишта - HSWD .....	94
4.2.5	Хидрометријски подаци .....	95
4.2.6	Хидрографска – батиметријска мерења у акумулацији Тиквеш.....	98
4.3	<b>ПАРАМЕТРИЗАЦИЈА МОДЕЛА .....</b>	<b>98</b>
4.3.1	Делинеација сливног подручја .....	98

4.3.2	Дискретизација подсливова и креирање хидролошких јединица .....	99
4.4	КАЛИБРАЦИЈА И ВЕРИФИКАЦИЈА МОДЕЛА.....	103
4.5	МОДЕЛИРАЊЕ СЕДИМЕНТАЦИЈЕ У АКУМУЛАЦИЈИ ТИКВЕШ ...	114
4.6	ПРОГНОСТИЧКА СИМУЛАЦИЈА ЗА ПЕРИОД 1992–2016 ГОДИНЕ ..	116
4.7	АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА .....	119
4.7.1	Анализа резултата хидролошког модела.....	119
4.7.2	Анализа седиментације у акумулацији Тиквеш .....	119
<b>V. РАЗВОЈ И ПРИМЕНА ХИДРОДИНАМИЧКОГ МОДЕЛА</b>		
<b>АКУМУЛАЦИЈЕ ТИКВЕШ .....</b>		<b>122</b>
5.1	УВОД.....	122
5.2	КОРИШЋЕНЕ ПОДЛОГЕ .....	122
5.2.1	Батиметријски подаци .....	122
5.2.2	Хидролошки подаци .....	123
5.2.2.1	Протицаји .....	123
5.2.2.2	Нивои и температура воде у акумулацији Тиквеш.....	123
5.2.2.3	Подаци о седименту .....	124
5.3	ПАРАМЕТРИЗАЦИЈА МОДЕЛА .....	128
5.4	КАЛИБРАЦИЈА МОДЕЛА .....	130
5.4.1	Параметри калибрације.....	131
5.4.2	Резултати калибрације и дискусија.....	132
5.5	ПРОГНОЗНО МОДЕЛИРАЊЕ .....	138
<b>VI. УПРАВЉАЊЕ СЕДИМЕНТИМА У АКУМУЛАЦИЈИ ТИКВЕШ.....</b>		
<b>144</b>		<b>144</b>
6.1	ПОШУМЉАВАЊЕ ТЕРЕНА И ПРОТИВЕРОЗИВНЕ МЕРЕ.....	144
6.2	БАГЕРОВАЊЕ НА ОДРЕЂЕНИМ ЛОКАЦИЈАМА АКУМУЛАЦИЈЕ ..	147
<b>VII. РЕЗИМЕ, ЗАКЉУЧЦИ И ПРЕПОРУКЕ .....</b>		
<b>149</b>		<b>149</b>
Референце .....		163
ПРИЛОЗИ.....		167

## Листа слика:

Слика 1.1	Акумулације у Републици Македонији .....	3
Слика 1.2	Ерозивна подручја у Републици Македонији .....	5
Слика 2. 1	Врсте водне ерозије по месту настанка .....	11
Слика 2.2	Откидање честица тла под утицајем кишних капи .....	15
Слика 2.3	Силе које делују на честицу тла .....	16
Слика 2.4	Браздаста ерозија .....	17
Слика 2.5	Ерозија у јаругама.....	18
Слика 2.6	Шилдсов дијаграм почетног кретања седимената, (Schields, 1936) .....	19
Слика 2.7	Критеријум ерозије-депоновања једнородних материјала (Hjulstrom, 1935) .	19
Слика 2.8	Карта изо - ерозивних области у САД према индексу ерозије Р (Wishmayer&Smith,1965) .....	20
Слика 2. 9	Криве транспорта суспендованих седимената на водомерном профилу (Yang, 1996).....	35
Слика 2.10	Зоне таложења наноса у акумулацијама.....	37
Слика 2.11	Уздужни облици седимената у акумулацијама .....	38
Слика 2.12	Седиментација у најдубљим деловима акумулације.....	39
Слика 2. 13	Криве ефикасности задржавања седимената у акумулацијама по Черчилу и Брунеу.....	40
Слика 2. 14	Промена површина и капацитета у акумулацији Мид у САД, (Блантон 1982).....	43
Слика 2.15	Криве дистрибуције седимената код акумулација, по USBR (1982).....	44
Слика 2.16	Анализа седиментације у акумулацији Теодор Рузвелт применом метода редукције .....	45
Слика 2.17	Једнодимензионални геометријски третман .....	47
Слика 2.18	Дводимензионални геометријски третман .....	48
Слика 2.19	Тродимензионална геометријска дисктеризација код језерских система, Olsen, 2007.....	49
Слика 2.20	Начини спровођења седимената код акумулација .....	55
Слика 2.21	Евакуација седимената преко подводних мутних токова.....	56
Слика 2.22	Формирање ерозивног канала у дну акумулације .....	57
Слика 2.23	Хидрауличко багеровање наноса .....	59
Слика 2.24	Механичко багеровање наноса. ....	59
Слика 3.1	Акумулација Тиквеш.....	60
Слика 3.2	Сливно подручје акумулације Тиквеш .....	61
Слика 3.3	Рељеф слива Црне реке - акумулације Тиквеш .....	62
Слика 3.4	Геолошка карта Републике Македоније и Пелагонијске котлине .....	64
Слика 3.5	Тип земљишта према класификацији FAO .....	66
Слика 3.6	Климатско-вегетационе зоне у Републици Македонији.....	67
Слика 3.7	Кишомерне станице у сливу акумулације Тиквеш .....	71
Слика 3.8	Ружа ветрова за град Битола.....	71
Слика 3.9	Просечне месечне падавине регистроване у станици а) Битола , б) Прилеп и с) Крушево .....	72
Слика 3.10	Просечне месечне температуре ваздуха регистроване у станици а) Битола , б) Прилеп и с) Крушево .....	73
Слика 3.11	Просечна релативна влажност ваздуха регистрована у станици а) Битола , б) Прилеп и с) Крушево .....	74

Слика 3.12 Просечно трајање сунчане радијације регистовано у станици а) Битола и б) Прилеп.....	75
Слика 3.13 Просечна брзина ветрова регистованих у станици а) Битола , б) Прилеп и с) Крушево .....	76
Слика 3.14 Речна мрежа у сливу Црне реке .....	78
Слика 3.15 Мапа земљишног покривача и коришћења земљишта (Corine LU/LC) .....	81
Слика 3.16 Фотографије са теренских истраживања акумулације Тиквеш.....	86
Слика 3.17 Дигитални теренски модел (ДТМ) дна акумулације Тиквеш .....	86
Слика 3.18 Линије површина акумулације Тиквеш – нулто стање и стање од октобра 2016 године .....	87
Слика 3.19 Линија запремина акумулације Тиквеш – нулто стање и стање од октобра 2016 године .....	88
Слика 3.20 Временска дистрибуција седиментације наноса у акумулацији Тиквеш.....	90
Слика 4.1 ДЕМ Републике Македоније .....	91
Слика 4.2 ASTER - глобални дигитални елевациони модел.....	92
Слика 4.3 Композиција ДЕМ-ова Македоније и Грчке .....	92
Слика 4.4 Европска база биогеографских карактеристика земљишта (CORINE LU/LC) .....	94
Слика 4.5 Глобална база педолошких карактеристика - HSWD .....	95
Слика 4.6 База педолошких карактеристика земљишта Македоније, HSWD.....	95
Слика 4.7 Хидрометријске станице на Црној реци .....	96
Слика 4.8 Просечни месечни протицаји у Црној реци у станицама: а) Расим-бегов мост,б) Скочивир, с) Новаци и д) пронос суспендованих седимената за станицу Расим-бегов мост .....	98
Слика 4.9 а) Делинеација сливног подручја и дефинисање подсливова; б) Мапа земљишног покривача и коришћења земљишта; с) Тип земљишта према калсификацији FAO и д) Мапа нагиба терена у сливу.....	102
Слика 4. 10 Дистрибуција ерозивности тла (К-фактора) у Европи (Панагос, 2014) .....	102
Слика 4.11 Шематски приказ концепта водног биланса у SWAT-у .....	105
Слика 4.12 Мерени и симулирани протицаји у мерној станици: а) rs_152; б) rs_203; с) rs_243 и д) пронос седимената у станици rs_152 , у периоду 1969-1991. године – почетна симулација .....	109
Слика 4.13 Мерени и симулирани протицаји у а) rs_152; б) rs_203; с) rs_243 и пронос седимената у д) rs_152 , у периоду калибрације и валидације модела .....	113
Слика 4.14 Хидрографска мрежа непосредног слива акумулације Тиквеш.....	114
Слика 4.15 Депоновани седименти у акумулацији: (а) годишње , (б) кумулативна запремина .....	118
Слика 4.16 Интензитет ерозије земљишта у сливу акумулације Тиквеш .....	120
Слика 5.1 Доток воде у акумулацију у периоду 1969-2016 (SWAT модел) .....	123
Слика 5.2 Промена нивоа воде у акумулацији Тиквеш за период 1969-2016.....	124
Слика 5.3 Доток седимената у акумулацију у периоду 1969-2016. (SWAT модел) .....	125
Слика 5.4 Профил 42 km 26+523.21 .....	125
Слика 5.5 Профил 28 km 17+739.07 .....	126
Слика 5.6 Профил 14 km 7+651.02 .....	126
Слика 5.7 Профил 5 km 2+547.24 .....	127
Слика 5.11 Профил 5 km 0+381.96 .....	133
Слика 5.12 Профил 11 km 5+943.30 .....	134
Слика 5.13 Профил 20 km 12+547.00 .....	134

Слика 5.14 Профил 22 km 13+595,76 .....	135
Слика 5.15 Профил 26 km 15+901,01 .....	135
Слика 5.16 Профил 28 km 17+739,07 .....	136
Слика 5.17 Профил 29 km 18+023,70 .....	136
Слика 5.18 Профил 36 km 22+750,02 .....	137
Слика 5.19 Прогнозни положај талвега за 2016. годину .....	139
Слика 5.21 Профил 11 km 5+943.30 .....	140
Слика 5.22 Профил 20 km 12+547.00 .....	140
Слика 5.23 Профил 22 km 13+595,76 .....	141
Слика 5.24 Профил 26 km 15+901,01 .....	141
Слика 5.25 Профил 28 km 17+739,07 .....	142
Слика 5.26 Профил 29 km 18+023,70 .....	142
Слика 5.27 Профил 36 km 22+750,02 .....	143
Слика 6.1 Подручја у којима су неопходне противерозивне мере .....	144
Слика 6.2 Просечна годишња продукција наноса у сливу акумулације Тиквеш, а) актуелно стање, б) уколико би биле предузете мере пошумљавања пре почетка коришћења .....	145
Слика 6.3 Кумулативна седиментација наноса у акумулацији Тиквеш, а) актуелно стање, б) уколико би биле предузете мере пошумљавања голина пре почетка коришћења .....	146
Слика 6.4 Локације за багеровање у акумулацији .....	147

#### Листа табела:

Табела 1.1 Основне карактеристике постојећих брана и акумулационих језера у Македонији .....	4
Табела 1.2 Категорије интензитета ерозије .....	5
Табела 1.3 Процењена годишња количина депонованих седимената у акумулацијама у Републици Македонији до 1995 године .....	6
Табела 1.4 Процењена годишња количина депонованих седимената у акумулацијама у Републици Македонији према најновијим истраживањима .....	6
Табела 2.1 Вредности фактора еродибилности “К” .....	21
Табела 2.2 Зависност експонента $m$ у односу на нагиб падине .....	22
Табела 2.3 Релативна еродибилност тла у функцији заступљености и стадијума раста култура .....	22
Табела 2.4 Предложене вредности фактора антиерозивних мера $P$ (EPA, 1977).....	23
Табела 2.5 Главне карактеристике и особине модела .....	29
Табела 2.6 .....	42
Табела 2.7 .....	42
Табела 2.8 Главне компоненте транспортних модела модела HEC-RAS и SRH-1D.....	51
Табела 3.1 Заступљеност типова земљишта у сливу (FAO HWSD).....	66
Табела 3.2 Локација и намена метеоролошких станица.....	68
Табела 3.3 Просечне месечне падавине регистроване у главним метеоролошким станицама .....	72
Табела 3.4 Просечне температуре за главне метеоролошке станице во сливу, $T(^{\circ}C)$ ,.....	73
Табела 3.5 Просечна релативна влажност ваздуха за главне метеоролошке станице у сливу (%).....	74



Табела 3.6 Просечно трајање сунчане радијације за главне метеоролошке станице у сливу (h) .....	75
Табела 3.7 Просечна брзина ветрова у главним метеоролошким станицама во сливу (m/s) .....	76
Табела 3.8 Линија површина и линија запремина акумулације .....	88
Табела 3.9 Кумулативна запремина депонованих седимената у акумулацији .....	89
Табела 4.1 Локација хидрометријских станица.....	96
Табела 4.2 Заступљеност вегетативног покривача у сливу акумулације Тиквеш .....	99
Табела 4.3 Заступљеност типова земљишта у сливу (HWSD – класификација).....	100
Табела 4.4 Класификација сливне површине према нагибу терена .....	100
Табела 4.5 Елементи водног биланса .....	106
Табела 4.6 Односи елемената водног биланса у сливу.....	106
Табела 4.7 Елементи биланса седимената .....	106
Табела 4.8 Односа водног биланса - мерени подаци .....	106
Табела 4.9 Евалуација заданог модела за почетну симулацију – период 1969-1991 .....	107
Табела 4.10 Опис параметара изабраних за калибрацију.....	111
Табела 4.11 Евалуација модела у фази калибрације и валидације .....	111
Табела 4.12 Статистички параметри за метеоролошку станицу Прилеп за период 1966–1991 .....	117
Табела 4.13 Запремина депонованих седимената у акумулацији.....	118
Табела 5.1 Фракције седимената и специфична тежина материјала.....	128
Табела 5.2 Положај рачунских профила .....	130
Табела 5.3 Процентуална дистрибуција долазних седимената у акумулацију Тиквеш	128
Табела 5.4 Ефикасност и препорука могућих мера и активности за контролу и управљање седиментацијом наноса у акумулацији Тиквеш.....	148

# I.

## ДЕФИНИСАЊЕ И СПЕЦИФИЧНИ ЦИЉЕВИ ИСТРАЖИВАЊА

### 1.1 УВОД

Акумулациона језера формирана изградњом брана на речним токовима, обезбеђују снабдевање водом становништво и индустрију, наводњавање мелиорационих подручја, производњу електричне енергије и служе за разне друге потребе. У прошлом веку, број изграђених великих брана у свету је порастао са око 1000 на преко 37.000, од којих је 85% изграђено у последњих 50 година.

Укупна запремина акумулационих језера која су до данас изграђена у свету је процењена на преко 7000 км<sup>3</sup>. Од тога, око 4000 км<sup>3</sup> је корисни простор, а остатак припада тзв. Мртвом простору који се не може користити (Basson, 2009).

Просечна старост акумулација у свету је око 35 година, а процењује се да се годишње око 0,5 - 1% акумулационог простора изгуби због седиментације наноса. Највећа просечна стопа седиментације јавља се у сушним регионима, као што су Блиски Исток, Аустралија и Африка. Према прорачунима, у Азији ће бити изгубљено око 80% корисног акумулационог капацитета за производњу хидроенергије до 2035 године, док ће 70% запремине воде коришћене за наводњавање бити изгубљено до 2025 године.

Осим наведеног, забрињавајући је податак да је годишњи прираст расположивог корисног капацитета изградњом нових акумулација у свету мањи од просечног годишњег губитка корисног простора због седиментације (Schleiss & De Cesare, 2010; Sumi & Hirose, 2009). Ово значи да су постојеће акумулације као витални инфраструктурни објекти неодрживи и да су стога хитно потребне ефикасне ублажавајуће мере како би се повећао њихов век коришћења.

Имајући све ово у виду, јасно је да се поред пажљивог планирања и пројектовања нових акумулационих капацитета, намеће потреба за реалном проценом редукације расположивог волумена акумулација током времена, као и за предузимање одговарајућих заштитних мера у свим фазама њихове експлоатације.

Природни циклус седимената је кохерентан и континуирани скуп механичких и хемијских процеса дуж корита реке (Burt & Allison, 2010). Овде се могу разликовати три главна процеса (Kondolf, 1997):

- (1) *продукција седимената*, која је резултат површинске ерозије и неканализираног преношења седимената у горњим пределима речних сливова услед временских непогода, појава браздастих и јаружастих ерозија, потом снежних лавина и глечера, обрушавања брегова водотока, појава клизишта итд;
- (2) *транспорт седимената* дуж речне-каналске мреже и унутар вештачких акумулација и природних језера; и
- (3) *седиментација* или таложење седимената на копну, у акумулацијама, језерима и океанима.

Седиментација се може посматрати као процес током којег акумулације задржавају седименте све док се евентуално потпуно не испуне (Shless, 2016). Са овог аспекта, углавном се намећу два основна питања:

- *колика је количина седимената која је ушла у акумулацију у разматраном периоду, и*
- *како се ови седименти дистрибуишу и таложе у оквиру језера.*

За овако дефинисани проблем, савремена истраживања се врше помоћу два приступа:

- *Хидролошки приступ, који испитује седиментацију наноса у акумулацијама кроз праћење ерозије и стварање наноса у сливу, као и његовог транспорта кроз речну мрежу.*
- *Хидраулички приступ, при чему се теоријски и експериментално проучавају транспортно-дисперзивни процеси и процеси седиментације, кроз дефинисање математичких модела седиментације у акумулационим језерима.*

У досадашњој пракси, инжењерске технике које се користе за одређивање седиментације у акумулацијама се ослањају углавном на теренска истраживања. Теренска осматрања процеса седиментације у акумулацијама су започета давне 1936. године, али се већина (око 80%) свих публикација на ову тему појавила тек од 1980-их (De Cesare & Lafitte, 2007). Извештаји о мерењима су доступни почевши од 60-их година прошлог века, док су прве студије седиментације у акумулацијама објављене почетком 1970-их. Већина метода за постизање одрживог коришћења акумулација је предложена крајем 1980-их и 1990-их година прошлог века.

Крајем прошлог века, од стране Комитета за седиментацију ICOLD-a (International Commission On Large Dams) је усвојена резолуција (Basson,2002) којом се охрабрују истраживачи из свих земаља чланица да развијају методе предвиђања ерозије тла на основу падавина и карактеристика тла у сливу, као и да спроводе прогностичке симулације седиментације у акумулацијама коришћењем напредних математичких модела. На основу ове резолуције, у протекле две деценије је уложено пуно напора у развој моделских техника за симулацију процеса седиментације у акумулацијама.

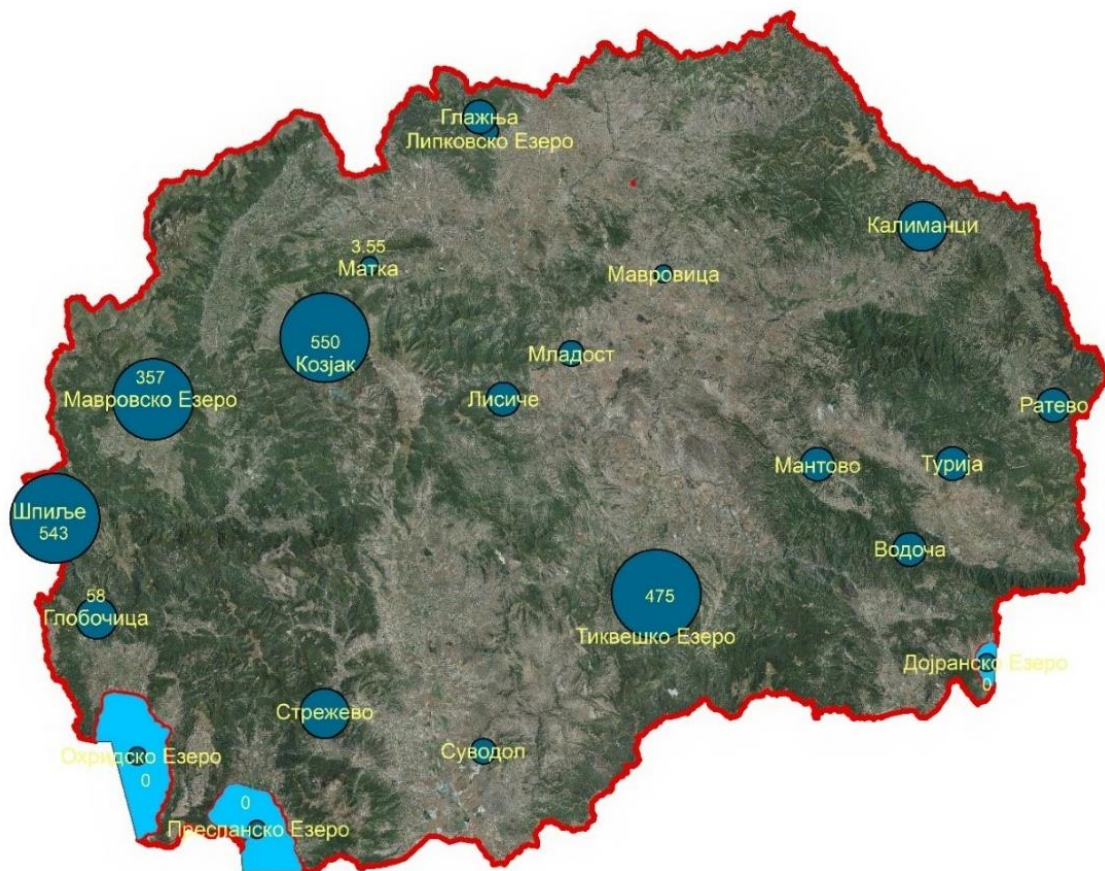
Овај рад је резултат истраживања ерозије и седиментације у сливу акумулације Тиквеш. Резултати су презентовани како би се доказала оправданост оваквог систематског и рационалног приступа у одређивању ступња површинске ерозије и транспорта седимената у речној мрежи. Седиментација и дистрибуција седимената у акумулацији је такође моделована и приказана у раду.

## **1.2 ДЕФИНИЦИЈА ПРОБЛЕМАТИКЕ**

### **1.2.1 Акумулације у Македонији**

Изградња брана у Републици Македонији датира из 1938. године, када је у близини Скопља изграђена брана Матка. Ова је брана још у употреби, а од 2008. године, након изградње нове електране, функционише двоструким капацитетом. До сада је у Македонији изграђено 27 великих брана које формирају акумулациона језера укупне запремине од око  $2,4 \times 10^9 \text{ m}^3$ , слика 1.1 и табела 1.1. Златно време за изградњу брана у

држави је период 1952-1972 године, када је оформљено 13 значајних акумулација: Маврово (висина бране 54 m), Глобочица (82,5 m), Водоча (42 m), Тиквеш (104 m), Калиманци (85 m), Шпиље (101 m), Турија (77,5 m), Липково (29,5 m) (29 m), Младост (27 m), Прилеп (35 m), Ратевска река (49 m) и Глажња (71,5 m). До 1982 године изграђено је пет нових великих брана, од којих је највећа и најважнија брана Стрежево (76 m), посебно значајна за подручје града Битоља. Током протеклих 15 година поновно је интензивирани изградња акумулација, што је резултирало завршетком пројекта Козјак (114 m, највећа брана у Македонији), Лошана (41 m, прва брана са геомембраном), Маркова река (26 m), Лисиче (66 m), Кнежево (75 m) и Света Петка (64,0 m). Бране Козјак, Тиквеш и Шпиље су највећи објекти овог типа, свака формира акумулационо језеро са капацитетом од око пола милијарде кубних метара.



Слика 1.1 Акумулације у Републици Македонији

Поред великих брана, у Републици Македонији је изграђено и око 110 малих брана. Оне су све земљаног типа, изграђене углавном у периоду од 1960 до 1980 године. Мале бране у Македонији формирају акумулациона језера мањег капацитета од 500.000 m<sup>3</sup> и намењене су углавном за наводњавање околног пољопривредног земљишта. Већина њих има висину од 8 до 15 m, а неколико је и нешто више од тога - до 18 m.

#### Ерозивност подручја и анализе седиментације акумулација

У досадашњој пракси у Републици Македонији, процена ерозије земљишта и проноса седимената је генерално вршена коришћењем Метода Потенцијала Ерозије (МПЕ) (Гавриловић, 1972). Примењујући ову емпиријску методу, на основу детаљних теренских

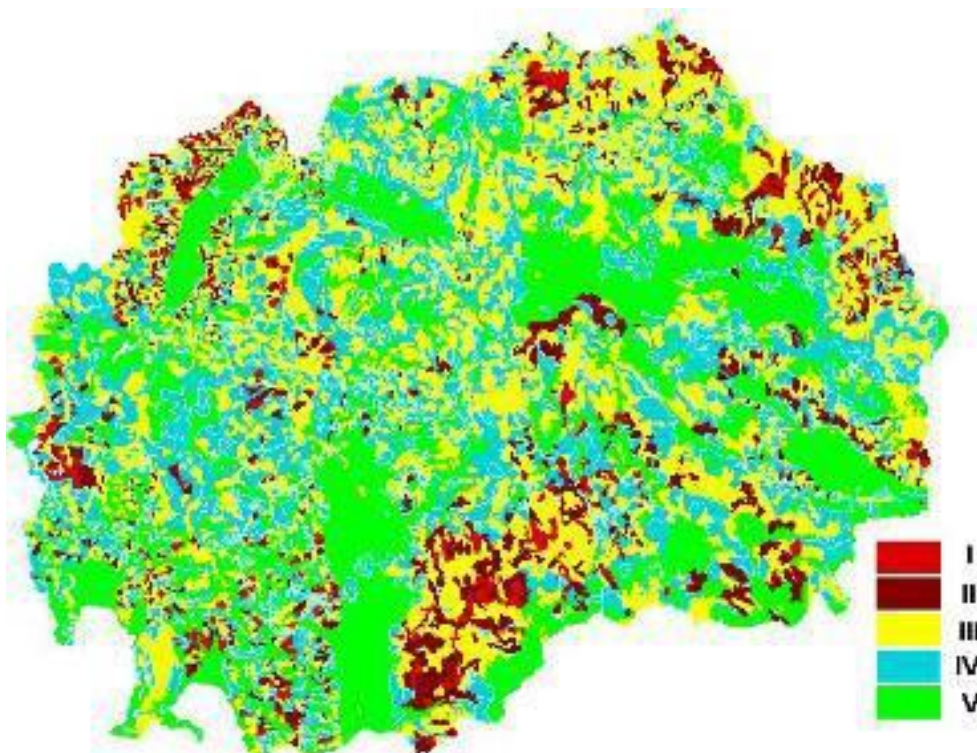
истраживања извршених средином и другом половином прошлог века (Ђорђевић и др., 1993) је израђена карта ерозије, на чијој основи је констатовано да Република Македонија спада у земље са релативно високом површинском ерозијом гла.

Према интензитету ерозије, територија државе је подељена у 5 категорија (слика 1.2, табела 1.2) и то од I категорије која је показатељ изузетно високог степена ерозије до V категорије која означава веома низак ниво ерозије. Процењује се да је око 96.5% укупне територије земље изложено ерозионим процесима. Од ове површине, око 38% је изложено процесима интензивне ерозије (I-III категорија). Укупна годишња производња ерозивних материјала на целој територији је процењена на око  $17 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{год}$  или  $685 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{год}$ . Од тога  $7,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{год}$  или  $303 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{год}$  се транспортује низводно у речној мрежи.

**Табела 1.1** Основне карактеристике постојећих брана и акумулационих језера у Македонији

Брана	Река	Година пуштања у функцији	Тип бране*	Конструктивна висина бране	Запремина бране	Почетни капацитет акумулације	Намена*	
				Hc (m)	$\times 10^3 \text{ m}^3$	$\times 10^6 \text{ m}^3$		
1	Матка	Треска	1938	АБ	38	3	3.55	ХЕ
2	Маврово	Мавровска	1957	З	62	777	357	ХЕ,ИР
3	Липково	Липковска	1958	АБ	40	13	2.25	ИР,ВС
4	Градче	Кочанска	1959	АБ	43	12	2.4	ИР
5	Младост	Оговица	1962	АБ	34	2.56	8	ИР
6	Глобочица	Црн Дрим	1965	ЗК	90	998	2	ХЕ
7	Водоча	Водоча	1966	ЗК	48.7	316.8	26.7	112
8	Прилеп	Ореовачка	1967	Л	38.5	25.5	6	ИР
9	Тиквеш	Црна Река	1968	ЗК	113.5	2722	475	ИР,ХЕ
10	Калиманци	Брегалница	1969	ЗК	92	1389	127	ИР,ХЕ
11	Шпиље	Црн Дрим	1969	ЗК	112	2699	520	ХЕ
12	Турија	Турија	1971	ЗК	93	1978	48	ИР,ВС,ХЕ
13	Глажња	Липковска	1972	Л	80	168	26	ИР,ХЕ
14	Ратевска	Ратевска	1975	Л	53	21.7	10.5	ВС,ИР
15	Паљурци	Луда мара	1977	ЗК	21.5	185	4(2.9?)	ИР
16	Мангово	Лакавица	1978	ЗК	49	261	47(47.5?)	ИР,ВС
17	Суводол	Суводолска	1980	ЗК	38.3	1740	7.9	ВС
18	Мавровица	Мавровица	1999	ЗК	29	400	2.8	ВС,ИР
19	Стрежево	Шемница	1982	ЗК	84.6	4300	112	ИР,ВС,ХЕ
20	Подлес	Водник	1985	Л	22.5	6.7	0.3	ИР
21	Иловица	Иловичка	2004	ЗК	29.8	131	0.5	ВС,ИР
22	Козјак	Треска	2005	ЗК	126	3340	550	Р,ХЕ,ВС
23	Лошана	Лошана	2006	К	45.2	260	1.9	ВС
24	Маркова река	Маркова	2006	ЗК	30	64.6	0.7	ВС
25	Лисиче	Тополка	2008	З	76.9	3295	23	ВС,ИР
26	Кнежево	Злетовска	2011	АК	83	1550	23.5	ВС,ИР,ХЕ
27	Св. Петка	Треска	2012	Л	66	32.5	9.1	ХЕ

\* АБ – армиранобетонска брана; Л – лучна брана; АК – асфалтно камена брана; З – земљана брана; ЗК – земљанокамена брана; К – камена брана; ХЕ – хидроенергетика; ИР – иригација; ВС – водоснабдевање; Р – ретензија



Слика 1.2 Ерозивна подручја у Републици Македонији

Табела 1.2 Категорије интензитета ерозије

Интензитет ерозије тла	Категорија	Површина		Интензитет ерозије
		( $\text{km}^2$ )	(%)	$\text{m}^3/\text{km}^2/\text{год}$
Екстремна ерозија	I	698	2.77	> 3000
Висока ерозија	II	1832	7.38	1500-3000
Средња ерозија	III	6893	27.78	1000-1500
Ниска ерозија	IV	7936	31.98	500-1000
Веома ниска ерозија	V	7463	30.09	70-500

У новије време, укључујући одређене модификације и побољшања МПЕ, извршено је ажурирање процењеног интензитета ерозије у држави (Милевски, И., 2015). Модификовани МПЕ модел заснован на ГИС технологији показује да је просечна годишња продукција седимената у Републици Македонији износи  $691 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ год}^{-1}$ , што се поклапа са вредношћу добивеној традиционалном мапом ерозије. Процењена стопа ерозије је у распону од  $100\text{-}300 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ год}^{-1}$  у густим шумским планинским подручјима, док неке области са великим антрополошким утицајем човека имају преко  $2000 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ год}^{-1}$ .

Имајући у виду значај акумулационих језера за водопривреду, почевши од самог формирања током седамдесетих година прошлог века па све до 1995 године, у почетку у надлежности Националне Хидрометеоролошке Службе а касније и Завода за Водопривреду Македоније, су вршена периодична хидрографска – батиметријска мерења ради дефинисања стопе седиментације, тј. промене капацитета акумулација услед седиментације наноса. Поред стопе седиментације, у оквиру ових истраживања су вршене и анализе просторне дистрибуције седимената у акумулационом простору. На основу ових истраживања је утврђено да се значајан део транспортованих седимената у



речној мрежи, око  $3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{god.}$ , задржава у природним и вештачким језерима (Блинков и Трендафилов, 2004).

**Табела 1.3** Процењена годишња количина депонованих седимената у акумулацијама у Републици Македонији до 1995 године

Акумулација	Волумен акумулације ( $10^6 \text{ m}^3$ )	Количина депонираних седимента ( $10^6 \text{ m}^3/\text{god}$ )
Матка	3.55	0.413
Глажња	26.0	0.036
Липково	2.25	0.004
Младост	8.0	0.019
Ратеве	10.5	0.030
Калиманци	127.0	0.419
Градче	2.4	0.022
Пишица	0.5	0.001
Мантово	47.0	0.028
Стрежево	90.0	0.050
Тиквеш	475.0	1.019
Прилеп	6.0	0.002
Паљурци	4.0	0.027
Водоча	27.0	0.017
Турија	48.0	0.062
Глобочица	58.0	0.103
Шпиље	520.0	0.563
Маврово	357.0	0.009
Укупно	1812.2	2.822

Турбулентне друштвене промене на територији бивше Југославије проузроковале су прекид праћења седиментације у акумулацијама Републике Македоније тако да хидрографска, тј. батиметријска мерења уопште нису спровођена након 1995 године.

Да би се наставило праћење процеса седиментације, у последњих неколико година уложени су напори да се поново успостави пракса снимања већих акумулација широм земље. Почетна мерења су извршена на акумулацијама, Шпиље (2014), Глобочица (2015), Маврово (2015) и Тиквеш (2016). На основу ових мерења утврђен је тренутни капацитет као и запремина исталожених седимената у акумулацијама, Табела 1.4.

**Табела 1.4** Процењена годишња количина депонованих седимената у акумулацијама у Републици Македонији према најновијим истраживањима

Акумулација	Година пуштања у употребу	Година извршених мерења	Волумен акумулације ( $10^6 \text{ m}^3$ )	Количина депонираних седимента ( $10^6 \text{ m}^3$ )	Количина депонираних седимента ( $10^6 \text{ m}^3/\text{god}$ )
Шпиље	1969	2014	520.0	37	0.822
Глобочица	1965	2015	58.0	3.3	0.066
Маврово	1957	2015	357.0	0.3	0.005
Тиквеш	1968	2016	475.0	39.6	0.825

Информације о седиментацији у акумулацијама у Македонији у прошлости су добивене на основу теренских хидрографских-батиметријских истраживања. У суштини, метода батиметријских истраживања је прихваћена у пракси као најтачнија у погледу количине седиментних материјала - транспортованих и депонованих у акумулацијама. Међутим,

ова метода не даје одговоре на питања о просторној и временској варијабилности ерозивних процеса у сливу, као и о утицају великог броја фактора који одређују динамику флуида седимента: климу, топографију, геологију, својства земљишта, покривеност земљишта и антропогени утицај.

## 1.2 ЦИЉ И ЗАДАТАК ДИСЕРТАЦИЈЕ

Брзи развој рачунарске технологије и продубљено разумевање природних процеса у протеклих неколико деценија резултирало су низом напредних математичких модела развијених са растућим способностима за симулацију просторне и временске динамике водотока и седиментних токова у оквиру слива (Guamfi, C at al., 2016). Када су једном калибрисани, чак и са кратким и непотпуним низовима података, ови модели имају предност код симулације репродукције просторне и временске варијабилности хидролошких процеса и ерозије земљишта у сливу (Juez, C. at al., 2018) и могу се применити као врло корисна средства подршке у управљању постојећих и планирању нових акумулација.

Циљ ове дисертације је дефинисање методологије и избор математичког модела за симулацију продукције наноса у сливу – транспорта кроз речну мрежу - седиментације у акумулационо језера. Током истраживања, биће извршена анализа расположивих софтверских пакета који се данас користе у пракси, на основу чега ће бити извршен избор модела који ће бити коришћен у овом раду.

У оквиру истраживања биће обрађене следеће области:

- Истраживање о достигнућима у науци и савремених трендова у области процеса ерозије и продукције наноса у сливу као и транспортно-дисперзивних процеса у речним мрежама и акумулационим језерима.
- Приказ теоријских принципа хидродинамичког модела, транспортно-дисперзивних процеса и седиментације наноса у акумулацијама.
- Компаративна анализа постојећих математичких модела, избор методологије и модела за хидролошко-хидродинамичка моделирања система слив - речна мрежа - акумулационо језеро.
- Систематизација постојећих истраживања и мониторинга која су извршена за акумулације у Републици Македонији у прошлости, допуна и прилагођавање расположивих података неопходних за квалитетну нумеричку анализу седиментационих процеса.
- Идентификација подсистема, односно анализа физичког простора система: слив - речна мрежа - акумулација, топографисање подсистема помоћу софистициране ГИС платформе.
- Моделирање ерозивних процеса, транспорта седимената и засипања акумулације Тиквеш у Македонији применом изабраног модела. Калибрација и верификација модела ће се вршити на основу постојећих мерених података на акумулацији Тиквеш.
- Дефинисање тренда седиментације наноса у акумулацији Тиквеш и прогноза засипања у будућности применом предложене методологије.
- Анализа мера за смањење негативних ефеката од седиментације наноса и продужења експлоатационог периода акумулације у складу са економским, социјалним, политичким и еколошким ограничењима.



### 1.3 ОРГАНИЗАЦИЈА ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ова теза је подељена на 7 поглавља.

**Први део** дефинише проблем и специфичне циљеве ове студије. Поглавље такође садржи информације о претходним истраживањима и специфична питања изазвана депоновањем седимената у акумулацијама у Македонији.

У **другом поглављу** се разматрају теоријски аспекти продукције и транспорта наноса, као и нумеричко моделирање седиментације у рекама и акумулацијама. Овде се даје преглед неких од најатрактивнијих модела за симулацију ерозије и седиментације, са нагласком на релевантне захтеве за сваки модел. Поглавље такође описује одабране математичке моделе ерозије и седиментације.

У **трећем поглављу** се даје опис слива акумулационог језера Тиквеш. Овде се детаљно приказују најзначајније карактеристике слива: физичко-географске, геолошке, педолошке, климатске и хидрографске. Исто тако, у овом поглављу се даје преглед свих досадашњих хидрографских истраживања акумулације Тиквеш.

**Четврто поглавље** се бави дефинисањем методологије и примене хидролошког модела SWAT. Даје се опис базе података која је коришћена, методологија креирања модела, калибрација и верификација. Резултати примене модела су такође представљени у овом поглављу.

У **петом поглављу** се разрађује примена хидродинамичког модела SRH-1D у акумулацији Тиквеш. У оквиру овог поглавља детаљно су описане карактеристике акумулације и њеног непосредног сливног подручја. Примењивост модела, резултати симулације и дискусија су такође представљени.

У **поглављу шест** се процењују могуће мере и стратегије управљања седиментације у акумулацији, а такође се оцењују и најпогодније технике које се могу користити за контролу ерозије и седиментације у сливу.

**Седмо поглавље** резимира читаву дисертацију наводећи главне закључке, препоруке и области за даље истраживање.

## II.

### ТЕОРЕТСКИ АСПЕКТИ ПРОДУКЦИЈЕ НАНОСА И СЕДИМЕНТАЦИЈЕ У АКУМУЛАЦИЈАМА

#### ДЕО 1 - ЕРОЗИЈА ЗЕМЉИШТА И ПРОДУКЦИЈА НАНОСА

##### 2.1 УВОД

Ерозија земљишта представља процес који се одвија на земљиној површини од њеног настанка па све до данас, као нераскидиви део њеног постојања. Овај процес је резултат узајамног дејства већег броја природних фактора и узрокује разарање слојева тла и разношење материјала ван области са које потиче. Притом су узроковане *непосредне - директне штете* у шумско–мелиоративним привредама и водопривреди, као и *посредне - индиректне штете* у економији и туризму.

*Непосредни* - директни утицаји ерозије тла се односе на последице на околину у којој се непосредно одвија ерозија. Ове последице се одликују смањеном пољопривредном продукцијом и смањивањем шумског фонда услед губитака тла са површинских слојева земље, редукацијом дебљине слојева тла, сушењем и пуцањем површинских слојева тла, смањивањем капацитета инфилтрације тла итд.

*Посредни* - индиректни утицаји односе се на последице ерозије низводно од места њеног настанка. Овде могу да се уброје: повећана мутноћа воде у рекама, језерима, акумулацијама и приобалним појасевима, интензивирање седиментације и запуњавање корисног простора у акумулацијама и на речним инундацијама, повећавање протока у речној мрежи, а тиме и повећавање вероватноће појаве поплава, угрожавање водних екосистема при чему се, услед велике концентрације седимената у водотоку, неповратно нарушава животна средина у делтама река и приобалним појасевима вештачких акумулација и природних језера.

У земљама у развоју, а нарочито у развијеним земљама, посредне штете од ерозије огледају се и на економском плану, због великог броја низводних инфраструктурних објеката као што су акумулације и водени путеви, који су директно угрожени запуњавањем еродираним материјалима, као и смањивањем квалитета воде у акумулацијама предвиђеним за водоснабдевање и рекреацију.

##### 2.2 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ И ДЕФИНИЦИЈЕ

*Ерозија* представља процес распадања материјала тла и разношења честица по површини земље. *Разношење* подразумева одстрањивање и транспорт материјала са једне локације на другу, при чему долази и до огољавања земљине површине.

Способност тла да еродира назива се *еродибилност тла* и зависи од величине и физичких карактеристика честица од којих је формирано, као и од природе органских и неорганских материја које држе честице повезаним међу собом. *Ерозивне силе* које

делују на тло детерминисане су већим бројем фактора, као што су: интензитет падавина, нагиб природних косина као и биљни покривач који делује као заштита тла од директног разорног дејства кишних капи.

Сливна површина и припадајући флувијални транспортни систем могу да се поделе на зоне у којима су доминантни процеси ерозије или процеси депоновања материјала тла. Генерално, ерозивни процеси су доминантни у планинским областима са стрмим падинама, док депоновање преовлађује у областима са блажим нагибом и у равничарским областима, премда оба процеса могу да се сретну у свакој природној средини. Отуда, еродирани материјал са стрмих планинских падина може да буде депонован у речним долинама, стварајући делувијалне наносне терасе. Ови наносни материјали могу поново да буду еродирани приликом надоласка воде у речним токовима и пренети низводно ка реципијентима.

Дуготрајни процес формирања облика земљине површине у природним условима може да се третира као резултат *природне* или тзв. *геолошке ерозије*. Код ове врсте ерозије, огољавање површине земље настаје, пре свега, као резултат хемијског распадања стенских маса под утицајем воде, као и биолошких процеса, а знатно мање као резултат механичке ерозије. Активности човека, чија је последица уништавање заштитног биљног покривача, разарање структуре тла и концентрација отицања из сливних површина, резултују појавом тзв. *убрзане ерозије*. Истраживања вршена на разним локацијама широм света показују да је степен ове врсте ерозије за 2 - 3 пута већи у поређењу са геолошком ерозијом.

Временски период неопходан за ревегетацију и стабилизацију подручја оштећених ерозијом, при чему ће степен ерозије бити приближан природном, назива се *период обнављања*.

За квантификацију и практично мерење процеса ерозије, уведен је појам *интензитет* или *степен ерозије*. Интензитет ерозије представља масу одстрањеног тла са одређене површине у одређеном временском периоду (најчешће од једне године) и изражава се у  $t/km^2/god$ . Исто тако, интензитет ерозије може да се изрази и као губитак тла изражен у јединици дубине слоја тла са одређене површине у јединици времена ( $mm/km^2/god$ ).

*Доток седимената* представља количину еродираног материјала који речном мрежом стиже до одређене локације. Ова количина представља збир свих седимената који су изнети из сливног подручја и представља врло битан параметар у анализи акумулационих басена. Будући да се седименти више пута редепонују пре него што напусте сливно подручје, доток наноса је увек мањи од степена ерозије у том сливном подручју. Однос између укупне продукције седимената у сливу и количине седимената која дотиче на одређену локацију назива се *коэффициент транспорта седимената*.

## 2.3 КЛАСИФИКАЦИЈА ЕРОЗИЈЕ

Ерозија може да се класификује према *узрочнику* и према *месту настанка* ерозивног процеса. Према узрочнику, разликује се више врста ерозија:

- *Водна ерозија* или ерозија водом. Ова врста ерозије може надале да се подели на неколико подгрупа:
  - Плувијална ерозија – ерозија кишом
  - Флувијална ерозија – ерозија површинским водотоцима
  - Глацијална или глечерска ерозија – ерозија од глечера и снежних лавина
  - Крашка ерозија – ерозија услед хемијских утицаја воде.
- *Еолска ерозија* или ерозија услед утицаја ветра, и
- *Абразиона ерозија* или ерозија услед комбинованог дејства воде и ветра. Ова ерозија се развија у близини великих водених тела: океана, мора и језера, и то као резултат дејства таласа на приобалне масе тла.

Према месту настанка, водна ерозија може да се подели на: површинску ерозију, ерозију у браздама и јаругама, ерозију у речним токовима и ерозију у приобалним зонама вештачких водних акумулација и природна језера.



Слика 2.1 Врсте водне ерозије по месту настанка

*Глацијална ерозија* настаје као последица кретања великих ледених маса – глечера. Иако се глечери крећу веома малом брзином, они - услед њихове велике масе - откидају делове тла и транспортују их низбрдо по падинама. Карактеристично за глацијалну ерозију је то што се јавља само на путањи кретања ледене масе, а против деструктивног дејства глечера практично не може да се примени никаква заштитна мера. Као резултат

глатијалне ерозије у прошлости, створени су врло карактеристични геолошки облици, као што су планинска језера, тзв. камените реке и сл. Ови геолошки облици срећу се и у нашој земљи: пелистерска и шар-планинска језера, камените реке на Пелистеру итд.

Ерозија настала под утицајем ветрова назива се *еолска ерозија*. Ова ерозија је нарочито значајна у сувим и полусувим регионима у којима се седименти транспортују са висоравни у депресије, где постају подложни водној ерозији.

*Абразивна ерозија* је резултат дејства таласа из великих водених маса: океана, мора и језера на приобалне структуре тла. Услед дејства ветра на водну површину долази до покретања водене масе, при чему се формирају таласи који дејствују на обале. Абразивна ерозија се манифестује у различитим облицима у зависности од структуре и отпорности приобалног тла. Отуда, као последица ове врсте ерозије настају пешчане плаже у областима са слабо отпорним геолошким структурама, као и стрме стеновите обале или клифови који се јављају у областима младих вулканских масива.

## **2.4 ФАКТОРИ КОЈИ УТИЧУ НА ПОЈАВУ И РАЗВОЈ ЕРОЗИЈЕ ТЛА**

Постоји већи број фактора који утичу на појаву ерозије. Међу важнијим могу да се наведу: климатски фактори, геолошка подлога, педолошке карактеристике земљишта, рељеф, густина хидрографске мреже, вегетациони покривач и антропогени фактор. Ерозиони процеси су резултат комбинованог дејства свих претходно наведених фактора.

### **2.4.1 Климатски фактори**

У комплексу свих климатских феномена који се одвијају у атмосфери, као најважнији фактори који утичу на појаву ерозије могу да се наведу: падавине, температура ваздуха и тла и ветрови.

- ***Падавине***

Падавине су један од основних климатских чиниоца за развој површинске ерозије у одређеном подручју. Притом, на величину ерозије тла до одређеног степена утиче укупна годишња количина падавина. Знатно већи утицај на овај процес имају просторна дистрибуција, као и интензитет падавина.

Наиме, у једном подручју у току године може бити веома мало падавина, често само неколико већих кишних догађаја. Због тога може доћи до оштећења биљног покривача, чиме се повећава изложеност тла ерозији. Уколико на том подручју падне већа количина кише релативно великог интензитета, неминовно ће бити изазвана јака ерозија земљишта које је претходно било под утицајем суше, без обзира што је укупна годишња сума падавина релативно мала.

С друге стране, ако у једном подручју има пуно киша, а њихов распоред је такав да одговара развоју вегетације, ерозија тла може бити веома мала и занемарљива.

- **Температуре ваздуха и тла**

Температуре ваздуха и тла и њихове амплитуде су веома значајан фактор у развоју ерозије земљишта. Поређењем тла истог геолошког састава у јужним и северним пределима утврђено је да су ерозивни процеси у јужним подручјима израженији. Између осталог, ово је свакако последица и великих дневних температурних амплитуда у овим регионима, због чега се стене брже распадају, чиме су изложене већој ерозији.

- **Утицај ветра**

Ветрови могу да се поделе према правцу деловања, интензитету, брзини, јачини, температури, влажности итд. Топли ветрови, који се јављају у хладним периодима године, нагло хладе површину земље, чиме убрзавају њено распадање. Ветрови својим деловањем одузимају влажност из тла и биљног покривача, што исто тако ствара повољне услове за развој ерозије земљишта.

## **2.4.2 Геолошке карактеристике тла**

Геолошке карактеристике тла су изузетно важне за развој ерозије. На степен ерозије утичу: врста, чврстоћа и компактност стенских маса. Затим, слојевитост седиментних стена и шкриљавост кристаластих шкриљаца убрзава процес распадања и чини ове стене подложнијим ерозији у односу на магматске стене. На процес распадања магматских стена знатно утиче величина зрна у њиховој структури. Стога, распадање је интензивније уколико су зрна већа.

Поред геолошких карактеристика стенских маса, на процес ерозије утичу и следећа њихова својства: гранулометријски састав, присуство органских материја, минеролошки састав тла, хемијски састав, структура тла итд.

## **2.4.3 Рељеф**

Рељеф има огромно значење за процесе ерозије тла. Веза између рељефа и ерозије је двозначна. Наиме, утицај рељефа на процес ерозије је толики колико је велик и ефекат ерозије на формирање рељефних облика.

На степен ерозије утичу следеће карактеристике рељефа: нагиб, дужина и облик падина. Повећавањем нагиба падина вишеструко се повећава и интензитет ерозије, што понекад доводи до великих промена у рељефу одређених подручја.

Поред нагиба падине, на ерозију битно утиче и дужина падине у правцу нагиба, као и облик уздужног профила падине.

По правилу, ерозија је израженија уколико је уздужни профил падине више изломљен.

#### 2.4.4 Биљни покривач

Великим бројем истраживања потврђено је да је присуство наноса у воденим токовима обратно пропорционално заступљености вегетације у њиховим сливовима. Утицај биљног покривача на смањивање интензитета ерозије у сливу може се сумирати на следећи начин:

- Биљни покривач директно штити тло од разорног дејства кишних капи.
- Велики део воде из падавина задржава се на површини листова и на биљној маси, чиме се продужава време површинског отицаја и умањује максимална вредност протока у речну мрежу.
- Кореновим системом, биљни покривач побољшава структуру тла, чиме повећава и њену моћ упијања воде из падавина.
- Биљни покривач спречава појаву дубоког замрзавања тла. Тиме се смањује могућност појаве екстремних отицаја у хладним периодима, будући да је површински отицај код тла са биљним покривачем далеко мањи него код замрзнутог тла.

#### 2.4.5 Утицај човека

Последњих неколико деценија све више се указује на разорно деловање човека на природу и то у свим сегментима постојања, укључујући и развој ерозије тла. Утицај човека на појаву и развој ерозивних процеса приметан је у прекомерном, непланском и нерационалном сечењу шума, чиме долази до огољавања падина и стварања услова за ерозију тла. У сточарским крајевима, велики број домаћих животиња на пасиштима доприноси разарању структуре тла, чиме се посредно повећава ерозивни процес. Начин коришћења вода у планинским регионима, њихово преусмеравање и нерационална употреба, понекад може да доведе до појаве клизишта и одрона. Пробијање планинских путева за разне намене, изведено без одговарајуће заштите и одводњавања, врло брзо доводи до подложности ексцесивној водној ерозији и неупотребљивости. Међутим, са аспекта ерозије тла, ка овим објектима директно се усмерава велики део воде из падавина, након чега они постају зоне интензивне и прогресивне ерозије тла.

## 2.5 ПРОЦЕСИ И МЕХАНИЗАМ НАСТАНКА ВОДНЕ ЕРОЗИЈЕ

- **Површинска ерозија**

Ова врста ерозије састоји се од два процеса: откидања честица са њихове матичне основе и покретања, односно транспорта честица. Основни разлог откидања честица са основе је утицај кишних капи на површину земље. Енергија удара кишних капи врши механичко разарање структуре тла, при чему се уништава њена кохезија. Притом се стварају веома ситне честице тла, које под дејством реактивног воденог млаза могу да буду еруптиране - распрнуте на релативно велико растојање од места удара кишне капи о тло. Утврђено је да енергија кишних капи може да распрсне одређене честице на растојање и до 0,5 m од места удара.



Слика 2.2 Откидање честица тла под утицајем кишних капи

Енергија из падавина која се преноси на тло је резултат интензитета падавина, величине кишних капи и њихове брзине. Величина кишних капи повећава се у функцији интензитета падавина. Просечна величина дијаметра кишне капи,  $D_{50}$ , изражена у милиметрима, по Lars и Parsons (1943), може се израчунати помоћу следећег израза:

$$D_{50} = 1.24 I^{0.82} \quad (2.1)$$

Где је  $I$  интензитет кише у mm/h. На основу анализе дистрибуције величине кишних капи и њихове брзине при контакту са земљином површином, дефинисана је зависност између интензитета падавина и кинетичке енергије која се преноси на тло. Кинетичка енергија (MJ/ha mm) која се развија од кише интензитета 1 mm на површини земље од једног хектара износи:

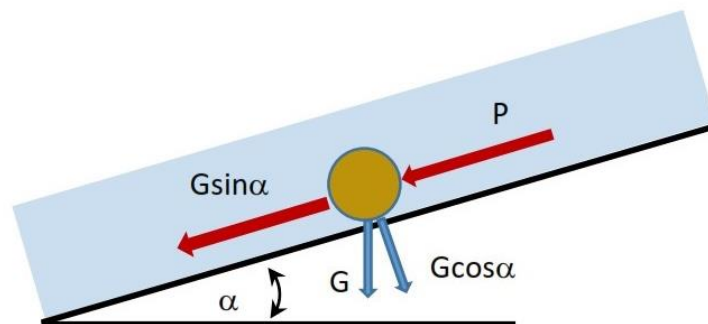
$$E_k = 0,119 + 0,0873 \log_{10} I \quad (2.2)$$



Након насталог поремећаја структуре земљишта услед бомбардовања кишним капима, уколико је терен хоризонталан, вода ће мировати на њему и након извесног времена испарити или се инфилтрирати у тло, а земљишне честице ће заузети статичан положај враћајући претходно изгубљену кохезију. Уколико је терен кос и под одређеним нагибом са хоризонтом, настаје површинско кретање воде из падавина које након извесног времена постаје све интензивније. Кинетичка енергија тока постаје све већа порастом брзине тока, при чему он постаје способан да покрене честице тла које су претходно изгубиле своју кохезију. Притом, при различитој брзини течења воде, покретаће се честице различите величине, а гранична брзина покретања честица, односно на почетку ерозије, зависиће од карактеристика тла као и од нагиба терена.

Процес покретања честица, као друга фаза ерозије тла, динамички може да се опише на следећи начин:

Уколико се честица у облику лопте дијаметра  $d$ , под утицајем воденог тока брзине  $V$ , креће по косини падине, на њу делују сила тока  $P$ , која узрокује кретање и сила отпора на покретање  $F$ , која се супроставља кретању, слика 2.3.



Слика 2.3 Силе које делују на честицу тла

Сила којом ток делује на зрно тла је:

$$P = K \cdot \gamma \cdot A \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2.3)$$

Где је:  $K$  - коефицијент облика зрна тла,  $\gamma$  - запреминска тежина воде,  $A$  - површина попречног пресека честице,  $V$  - брзина тока,  $g$  - убрзање земље.

Сила отпора честица тла на покретање може да се изрази следећом једначином:

$$F = W (\gamma_1 - \gamma) f \cos \alpha - W (\gamma_1 - \gamma) \sin \alpha \quad (2.4)$$

Где је:  $W$  - запремина честице тла,  $\gamma_1$  - запреминска тежина честице,  $f$  - коефицијент трења при котрљању (или клизању код оштроуглих честица),  $\alpha$  - угао косине терена на којем настаје кретање.

Код хоризонталног земљишта, брзина тока и нападна сила су  $V=0$  и  $P=0$ , и у једначини равнотеже сила остаје само сила отпора честице:  $F = W \cdot (\gamma_1 - \gamma) \cdot f$ . Кад се вода инфилтрира у земљу, сила отпора добија облик:  $F = W \cdot \gamma_1 \cdot f$ , што представља максималну вредност ове силе. При овом стању не јавља се кретање честице тла, односно нема ерозије тла.

На основу претходних зависности, може да се закључи да нападна сила воденог тока расте упоредо са повећавањем површине попречног пресека честице тла испод воде нормално у односу на ток, док је сила отпора кретању право пропорционална величини честице и врсти материјала, односно њеној запреминској тежини. Имајући у виду да повећањем величине честица, сила отпора расте брже у односу на силу потиска, постаје јасно зашто ситније честице раније започињу кретање у односу на крупније честице исте запреминске тежине.

Честице лоптастог облика, који се највише подудару са природним обликом зрна, кретању се супростављају преко отпора трења при котрљању. Овај отпор има далеко нижу вредност од отпора трења при клизању и условљава знатно мању силу за покретање честица. Отуда, кретање лоптастих честица могуће је и на косинама блажег нагиба и без присуства воде.

Као општи закључак, може да се наведе да је водна ерозија тла јача уколико је нагиб косина земљишта већи, проток воде јачи, честице тла ситније и заобљеније, које имају мању специфичну тежину и ниску кохезију.

- **Браздаста ерозија**

Порастом површинског отицаја, ток почиње да се концентрише у малим браздама, а његова енергија се повећава. Вучна сила тока се повећава и започиње процес откидања честица из околног тла, односно долази до појаве тзв. браздасте ерозије. Повећавањем ерозије, бразде се повећавају, скупљајући додатне количине воде, при чему евентуално прерастају у све веће канале. Седименти транспортовани у браздама у свом саставу укључују материјале еродирани у самој бразди, као и материјале који су претходно еродирани током површинске ерозије.



Слика 2.4 Браздаста ерозија

- **Ерозија у јаругама**

Јаруге су канали који су по својим димензијама превелики за култивацију са уобичајеним шумско-мелиоративним техникама за санацију еродираних земљишта. У циљу боље илустрације величине ових канала, именоване јаруге називају се канали који не могу да буду савладани теренским возилима која се крећу на точковима, као што су камиони, трактори и сл.



Слика 2.5 Ерозија у јаругама

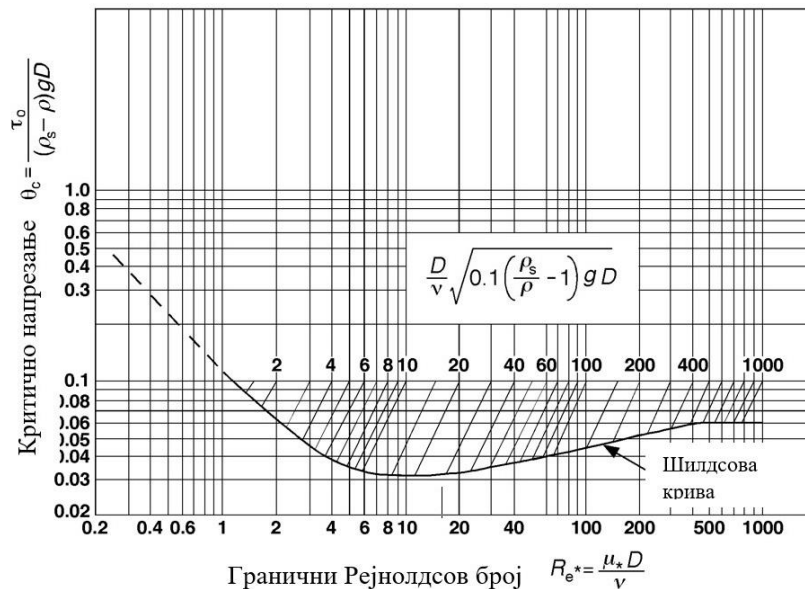
Овај тип ерозије настаје кад су еродибилна тла изложена већим концентрисаним токовима услед киша или топљења снега, а може бити инициран повећавањем и продубљивањем бразда због карактера тла, у случају ако је водени ток вештачки усмерен по шумским стазама, рововима и разним врстама канала које је изградио човек или кад је отицај од падавина повећан услед промена у начину коришћења земљишта у узводном делу слива.

- **Ерозија у речним коритима**

Ова врста ерозије настаје дуж водотока и на њиховим обалама. Ерозија речних корита је природан процес који настаје под дејством енергије воденог тока и одликује се продубљивањем речних корита у њиховом горњем току, одроњавањем и рушењем речних обала, меандрирањем река, стварањем речних острва, спрудова и локалних продубљивања у низинским токовима. У карстним областима може доћи до појаве понора, суфозија и пећинских токова који могу да имају већи број хоризонталних и вертикалних канала.

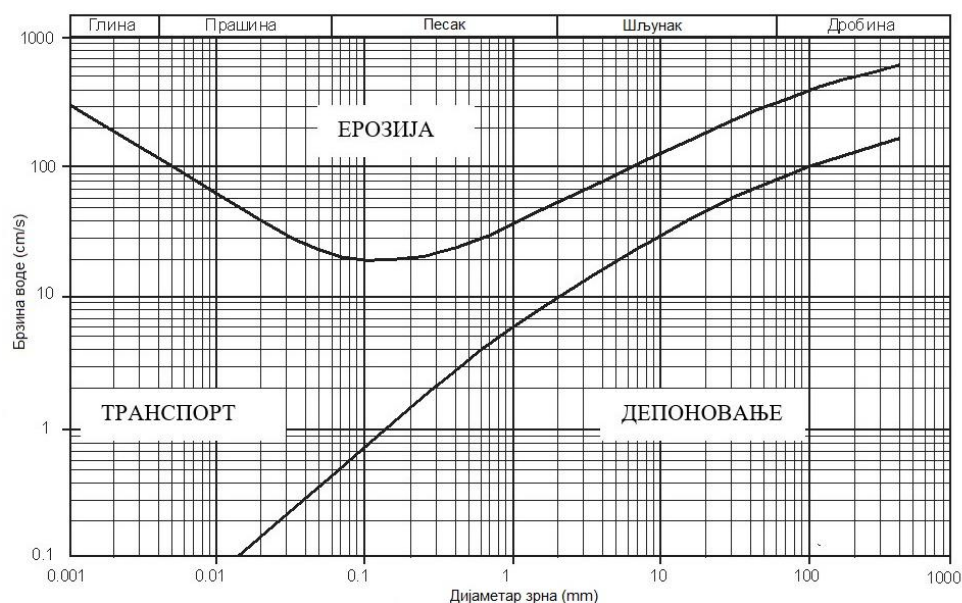
Механизам покретања материјала у речним коритима представља област која је широко проучавана и представља основу за дефинисање процеса ерозије и таложења у речним системима. Притом, већина добијених законитости које описују овај механизам добијена је на основу приступа тангенцијалних напрезања у дну реке, као и приступа брзина покретања седимената. Поред ових приступа, због стохастичког карактера процеса покретања седимената, у истраживањима се често користе и методи из теорије вероватноће.

Шилдс (1936) примењује димензионалну анализу параметара тока и карактеристика наносних честица, при чему је конструисао широко прихваћен дијаграм почетног кретања честица. Параметри који су коришћени за конструкцију овог дијаграма су: тангенцијално напрезање на дну водотока ( $\tau$ ), разлика густине флуида и седимената ( $\rho_s - \rho_v$ ), дијаметар седиментних зрна ( $d$ ), кинематска вискозност флуида ( $\nu$ ) и убрзање земљине теже ( $g$ ).



Слика 2.6 Шилдсов дијаграм почетног кретања седимената, (Schilders, 1936)

Хјулстром (Hjulstrom, 1935) врши детаљну анализу базе података о кретању униформних-једнородних материјала. Његова студија се базира на средњој брзини тока и притом је конструисан дијаграм зависности дијаметра седиментних честица ( $d$ ) и средње брзине тока ( $V_{sr}$ ) у процесима ерозије, транспорта и седиментације наносних честица.



Слика 2.7 Критеријум ерозије-депонувања једнородних материјала (Hjulstrom, 1935)

## 2.6 ПРОЦЕНА ЕРОЗИЈЕ У СЛИВНИМ ПОДРУЧЈИМА

### 2.6.1 Универзална једначина губитка земљишта

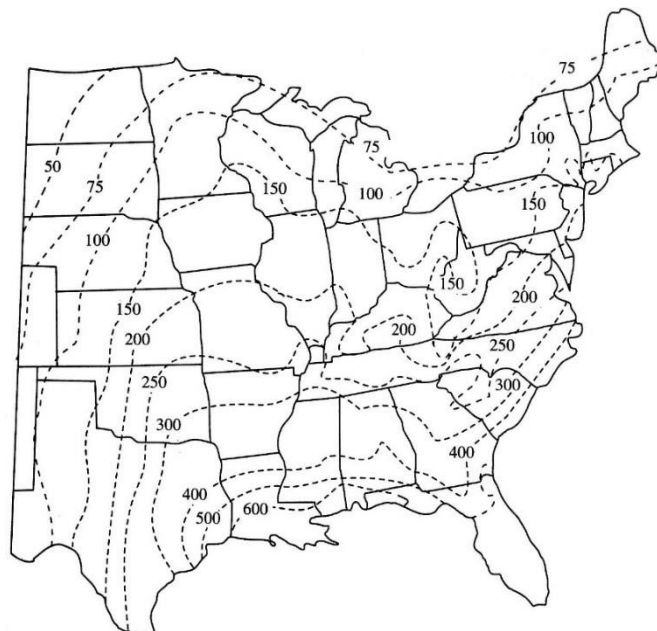
Степен ерозије сливних површина може да се процени тзв. универзалном једначином губитка тла (USLE - Universal Soil Loss Equation). Овај метод је развијен у САД 1965. године, од истраживача Вишмејера и Смита (Wishmeier and Smith, 1965). Универзална једначина губитка тла има следећи облик:

$$S = 1.292 \cdot EI \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \cdot CFRG \quad (2.5)$$

Где је:

- $S$  - продукција седимената за дати дан (ton/ha),
- $EI$  - кишни индекс ерозије ( $0,017m \text{ ton cm}/(m^2 \text{ hr})$ ),
- $K$  - фактор ерозивности тла ( $m^3$ -метричка тона  $cm$ ),
- $C$  - фактор земљишног покривача и управљања,
- $P$  - фактор примењених заштитних мера,
- $LS$  - топографски фактор и
- $CFRG$  - фактор грубе фрагментације тла.

Фактор падавина  $EI$  представља индекс ерозије тла за различите географске локалитете у зависности од разлика у интензитету падавина, трајања и фреквенције падавина за та подручја.



Слика 2.8 Карта изо - ерозивних области у САД према индексу ерозије  $P$  (Wishmayer&Smith,1965)

Фактор еродибилности тла  $K$  представља меру „подложности“ одређеног тла ерозији. Он представља степен ерозије одређеног тла у односу на јединицу ерозивног индекса

одређеног експериментално на култивисаном тлу лоцираном на падини нагиба од 9% и дужине 72.6 ft или 22.13 m. Вредност овог фактора креће се у границама од 0.7 за веома еродибилну иловачу до < 0.1 за пешчана и шљунковита тла са високим коефицијентом инфилтрације.

Фактор дужине нагиба падине L односи се на повећавање количине отицаја који настаје услед повећавања дужине падине при непроменљивом уздужном нагибу. Представља однос између губитка тла за одређену дужину падине у односу на ерозију падине дужине 23.13 m, која се користила у експериментима Вишмајера и Смита.

Фактор нагиба падине односи се на повећавање брзине отицаја са повећавањем стрмости падине. Представља однос губитка тла за одређени нагиб падине у односу на експериментални нагиб падине, који је износио 9 %.

**Табела 2.1** Вредности фактора еродибилности “К”

Врсте тла	Просечна вредност (US јединице)	Присуство органских материја	
		< 2 %	> 2 %
Глина	0.22	0.24	0.21
Заглињена иловача	0.3	0.33	0.28
Крупна пешчана иловача	0.07	--	0.07
Фини песак	0.08	0.09	0.06
Фина пешчана иловача	0.18	0.22	0.17
Тешка глина	0.17	0.19	0.15
Иловача	0.3	0.34	0.26
Фини песак са присуством иловаче	0.11	0.15	0.09
Песак са присуством иловаче	0.04	0.05	0.04
Врло фини песак са присуством иловаче	0.39	0.44	0.25
Песак	0.02	0.03	0.01
Пешчана заглињена иловача	0.2	-	0.2
Пешчана иловача	0.13	0.14	0.12
Прашинаста иловача	0.38	0.41	0.37
Прашинаста глина	0.26	0.27	0.26
Прашинасто-заглињена иловача	0.32	0.35	0.3
Врло фини песак	0.43	0.46	0.37
Врло фина пешчана иловача	0.35	0.41	0.33



Ефекти утицаја фактора дужине и нагиба падина обично се комбинују у један заједнички фактор LS, који може да се израчуна помоћу следећег израза:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^m (0.006541 \cdot S^2 + 0.0456 \cdot S + 0.065) \quad (2.6)$$

Где је:  $\lambda$  = дужина падине (м),  $S$  = нагиб падине (%), и  $m$  = експонент са вредностима према следећој табели.

**Табела 2.2** Зависност експонента  $m$  у односу на нагиб падине

S	< 1	$1 \leq S < 3$	$3 \leq S < 5$	$\geq 5$
m	0.2	0.3	0.4	0.5

Фактор вегетационог покривача  $C$  у себи уједињује утицаје начина управљања вегетативним ресурсом, заступљеност и начин обраде одређене пољопривредне културе, сезонску варијабилност и продуктивност култура, третман остатака од култура итд. Представља однос губитка тла на одређеном подручју са одређеном праксом управљања вегетативним покривачем и губитка тла на експерименталном подручју.

**Табела 2.3** Релативна еродибилност тла у функцији заступљености и стадијума раста култура

Заступљена пољопривредна култура	Релативни губици тла у периоду вегетационог циклуса			
	U %	1 %	2 %	3 %
Необрађена површина	100	100	100	100
Прва година засада кукуруза	15	32	30	19
Друга година засада кукуруза	60	65	51	24
Континуирани засад кукуруза	80	85	60	30
Прва година засада памука	15	34	40	30
Друга година засада памука	35	60	68	46
Континуирани засад памука	45	80	80	52
Затрављене површине	0.4	0.4	0.4	0.4

\* Вегетативни период култура: U = необрађена површина (ugar), 1 = први месец од сетве, 2 = други месец од пролећне сетве, 3 = зрење културе до жетве.

Фактор антиерозивних мера  $P$  узима у обзир све мере које се предузимају за контролу процеса ерозије у одређеном подручју, као на пример: контурисање (обликовање) терена обрадом површинских слојева тла попречним или косим орањем, сађење вегетације по контурама, израда заштитних ровова, терасирање земљишта итд. Овај фактор представља губитак тла на подручју са одређеном противерозивном заштитом у односу на губитке на подручју које је обрађено орањем у правим редовима, паралелним нагибу падине.

**Табела 2.4** Предложене вредности фактора антиерозивних мера Р (ЕРА, 1977)

Нагиб падине %	Контурисање	Контурисање и израда заштитних ровова или јама
2.0 – 7.0	0.50	0.25
8.0 – 12.0	0.60	0.30
13.0 – 18.0	0.80	0.40
19.0 – 24.0	0.90	0.45
25.0 – 30.0	1.0	0.65

И поред популарности ове методологије за одређивање губитака тла у сливним подручјима, код њене примене треба имати у виду следећа ограничења:

- Универзална једначина губитака тла има строго емпиријски карактер и њени параметри су одређени на основу експерименталних истраживања спроведених у источним и јужним деловима САД-а. Свака примена ове једначине ван тог региона претпоставља критичку анализу и прецењивање фактора ерозивности, у складу са условима који владају на подручју које се анализира.
- Губитак тла, израчунат универзалном једначином, представља просечну вишегодишњу вредност, док реалне вредности годишњих губитака тла могу бити вишеструко веће или мање од ове просечне вредности.
- Израчунати губитак тла не узима у обзир ретензију или задржавање седимената од стране вегетације, задржавање на равним падинама или у депресијама сливног подручја.
- При процени дотока седимената у акумулације треба узети у обзир и ерозију у браздама, јаругама, речним коритима и непосредном приобалном појасу акумулација, који представљају значајан извор еродираних материјала.

У циљу инкорпорације резултата добијених новијим истраживањима и технолошким достигнућима, 1987 године је започео развој ревидиране верзије USLE која добија име RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). Ова верзија модела је промовисана 1995 године и садржи већи број побољшања у односу на свог претходника.

### **2.6.2 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)**

Екстензивна истраживања и продубљено разумевање процеса ерозије резултирали су одређеним побољшавањима USLE. Ревидирана једначина универзалног губитка тла (RUSLE) задржава основну структуру USLE, Једначина (2.6). Ипак, урађене су значајне промене алгорита који се користе за прорачун фактора у RUSLE (Renard et al., 1994). Фактор R је проширен и на територију западних Сједињених Држава (Слика 2.4) и урађене су корекције да би се узеле у обзир падавине на површини зајезерених вода. Фактор K је заснован на варијабилном времену и урађене су корекције са укључивањем утицаја стенских фрагмената у профилу тла. Дужина нагиба и фактори стрмости LS ревидирани су са респектовањем односа између браздасте и међубраздасте ерозије.



Фактор С више не представља сезонски коефициент губитка тла; сад представља континуирану функцију неколико фактора, као што су: претходно коришћење тла (PreviousLandUse), површински покривач (SurfaceCover), вегетабилне културе (CropCanopy), површинска храпавост (SurfaceRoughness) и садржај влаге у тлу (SoilMoisture). Фактор Р је проширен да би укључио карактеристичне услове земљишта са природном вегетацијом, контурисање и терасирање тла.

### 2.6.3 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)

Вилијамс (Williams, 1995) је модификовао USLE да би проценио продукцију седимената за основу површинског отицаја. Полазећи од размишљања како је површински отицај меродавнији индикатор за продукцију седимената од падавина - односно, уколико нема површинског отицаја, неће бити ни проноса седимената - Вилијамс мења фактор ерозивности R (фактор падавина) уводећи тзв. фактор отицаја . Његова анализа открива да коришћење производа запремине отицаја и вршног протока за један догађај даје прецизнија предвиђања о проносу седимената, нарочито за велике догађаје него USLE са применом фактора R. Модификована USLE једначина, или MUSLE, дата је у наставку :

$$S = 11.8 \cdot (Q_{sur} \cdot Q_{peak} \cdot area_{HRU})^{0.56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \cdot CFRG \quad (2.7)$$

Где је:

- sed - продукција седимената за дати дан (ton/ha),
- Qsurf - запремина површинског истицања (mm/ha),
- qpeak - вредност пика површинског истицања (m<sup>3</sup>/s),
- areahru - површина HRU (ha),
- K - фактор ерозивности тла (m<sup>3</sup>-метричка тона cm),
- C - фактор земљишног покривача и управљања,
- P - фактор примењених заштитних мера,
- L - топографски фактор и
- CFRG - фактор грубе фрагментације тла.

Поређење са USLE је урађено проценом просечних годишњих губитака тла употребом USLE и упоређујући са годишњим губицима тла израчунатим за сваки појединачни догађај површинског отицаја током године, применом MUSLE. Метод је затим тестиран и показао је задовољавајућу тачност у примени код сливова са доминантном заступљеношћу пашњака, као и код неких сливова са комбинованим вегетабилним покривачем. Ипак, тачност и употребљивост метода у великој мери зависи од тачности хидролошких улазних података.

### 2.6.4 Директна мерења проноса седимената и настављање низова измерених података

Најпрецизнији метод за одређивање дугорочног проноса седимената из слива је путем директног мерења таложења седимената у акумулацијама (Blanton, 1982) или путем директног мерења протока, концентрације суспендованог и вученог наноса. Уколико су

доступни подаци из дугорочних мерења, може се израчунати дневни и просечни годишњи пронос седимената. Овај податак се затим може користити за процену дугорочне продукције и проноса седимената у сливу.

Ипак, дугорочна мерења протока у рекама нису увек доступна. Подаци из дугорочних мерења концентрације суспендованих седимената су обично ограничени, а мерења проноса вученог наноса се врше веома ретко.

У одсуству дугорочних мерења протока, могуће је да се наставе постојећа краткорочна мерења помоћу емпиријске корелације са подацима из друге мерне станице у сливу или у неком суседном сливу сличних карактеристика.

Краткорочни низови концентрација суспендованих седимената могу да се наставе корелацијом са низовима података о протоку воде.

Једначина у облику:

$$C = a Q^b \quad (2.8)$$

се најчешће користи у регресионим анализама. Овде,  $C$  је концентрација седимената,  $Q$  је проток воде, док су  $a$  и  $b$  регресиони коефицијенти.

Однос између протока и концентрације суспендованих седимената може да варира са променом гранулометријског састава наносних зрна, као и услед сезонских и годишњих варијација протока у реци. Отуда је неопходан довољан обим мерења концентрације суспендованих седимената и протока, да би се обезбедила задовољавајућа тачност применљивости регресионе једначине у широком обиму протока, сезона и година. Једна регресиона једначина може да продуцира прихватљиву корелацију у уском обиму услова. Због тога је најчешће неопходно више регресионих једначина како би се постигле задовољавајуће корелације у широком обиму задатих услова. Расположиви подаци се могу сортирати према протицајима воде, како би се развиле посебне регресионе једначине за ниске, средње и високе протицаје у водотоку. Такође, подаци се могу сортирати по сезони, како би се развиле посебне регресионе једначине за влажне и сушне периоде током године.

Уколико има довољно података, један део се користи за регресиону анализу, а преостали део може да се користи за верификацију.

## 2.7 МОДЕЛИРАЊЕ ХИДРОЛОШКИХ И ЕРОЗИВНИХ ПРОЦЕСА СЛИВНИХ ПОДРУЧЈА

Хидролошка моделирања сливних подручја су задњих неколико деценија постала важан научно-истраживачки и управљачки алат, посебно користан у напорима за разумевање и контролу загађења вода, ерозије тла, транспорта седимената и нутријената, хемијских полутаната итд. Иако је урађено много посла у моделирању појединачних хидролошких процеса, комбиновање ових процеса на много већој, разноликој површини захтева додатну експертизу и ресурсе података. У наредном одељку се разматрају различите врсте модела сливова са предложеним областима апликације. На крају, предлаже се модел који ће се користити и у овој дисертацији за моделирање хидролошких и ерозивних процеса у сливу акумулације Тиквеш, за који се у наставку даје подробнији опис.

### 2.7.1 Подела модела

Хидролошки модели се могу груписати у неколико категорија према примењеним моделским приступима. Свака од ових категорија је укратко описана у даљем тексту, како би се обезбедио контекст за каснију категоризацију доступних хидролошких модела сливова.

**Емпиријски модели** се састоје од математичких функција које се користе за опонашање природних процеса и прилагођавање моделског излаза расположивим подацима. Такви модели обухватају широки распон сложености, од једноставних регресионих модела до модела заснованих на хидроинформатици који користе Вештачке неуралне мреже (АНН), Генетичке алгоритме итд.

У зависности од технике укључене у процес моделовања, модели се могу категоризовати као **детерминистички или стохастички**. Детерминистички модели су математички модели у којима се исходи добијају путем познатих функционалних односа између разних процеса моделираног система. Стохастички модели ће имати већину, ако не и све, улазе или параметре представљене статистичким дистрибуцијама који одређују низ излаза. Иако је већина модела у природи детерминистична, стохастички модели пружају две важне предности. Прво, њихов концептуално једноставан оквир омогућава да се опише хетерогеност кад постоје ограничени детаљи простора или времена. Друго, они пружају доносиоцима одлука могућност утврђивања неизвесности у вези са предвиђањима моделираних процеса.

На просторној основи модели се могу категоризовати као **генерални (lumped), полудистрибуирани или дистрибуирани модели**. Генерални приступ разматра сливно подручје као јединствену рачунску јединицу где су параметри слива и променљиве величине осредњени за ову јединицу. У поређењу са генералним моделима, полудистрибуирани и дистрибуирани модели уводе просторну варијабилност хидролошких процеса, улазних података, граничних услова и карактеристика водотока. Код полудистрибуираних модела, делимично је допуштено да поменуте величине варирају у простору дељењем слива на неколико мањих подсливова који се, према томе,

третирају као појединачне рачунске јединице. Просторна хетерогеност у дистрибуираним моделима представљена је резолуцијом која је обично дефинисана од стране моделера.

**Физички засновани модели** су базирани на разумевању физике хидролошких процеса која контролише одговор слива и користе физички базиране једначине за описивање ових процеса.

Физички засновани модели могу бити даље подељени на моделе засноване на појединим догађајима или на континуираним процесима. Модели засновани на догађајима симулирају појединачне догађаје падавина и отицања са фокусом на инфилтрацију и површински отицај, док континуирани процесни модели експлицитно објашњавају све компоненте отицања, узимајући у обзир прерасподелу влаге између појединих кишних догађаја.

У физичким моделима се симулирају трансфер масе, импулса и енергије коришћењем парцијалних диференцијалних једначина које се решавају различитим нумеричким методама као што су једначине St. Venant-а за површински проток, Richards-ова једначина за проток у незасићеним зонама, Penman-Monteith-ова једначина за евапотранспирацију и Boussinesq-ова једначина за проток подземних вода. Уобичајено, подаци и рачунарски захтеви за решење ових једначина су веома захтевни.

Битна компонента сваког физичког модела је доступност довољног броја података о сваком од моделованих процеса. Значајан напредак у побољшању генерисања, припреме и управљања подацима се реализује коришћењем геопросторних технологија као што су географски информациони систем (ГИС), системи глобалног позиционирања (ГПС) и коришћење даљинских сензора за прикупљање података. Уобичајена припрема модела укључује коришћење даљински снимљених слика терена (аерофото), коришћење модела дигиталних теренских модела (ДТМ) или дигиталних елевационих модела (ДЕМ) за екстракцију хидролошких карактеристика сливова, као што су надморске висине, водни правци и токови, акумулације водних токова итд.

### 2.7.2 Хидролошки модели – стање у науци

Ово поглавље даје преглед тренутног стања доступних модела сливних површина, укључујући коментаре о њиховим предностима и слабостима приликом примене у различитим условима. Истраживање литературе идентификује најчешће коришћене моделе сливова:

**AGNPS** (Agricultural Non-point Source) / **AnnAGNPS** (Annualized Agricultural Non-point Source), **ANSWERS/ANSWERS-2000** (Area Non-point Source Watershed Environment Response Simulation), **GSSHA** (Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis) / **CASC2D** (CASCade of Planes in 2-Dimensions), **HEC-1/HEC-HMS** (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System), **HSPF** (Hydrological Simulation Program-FORTRAN), **KINEROS2** (KINematic Runoff and ERO-Sion), **MIKE SHE** (изворно именован SHE-Système Hydrologique Européen), **PRMS** (Precipitation-Runoff

Modeling System), **SWAT** (Soil and Water Assessment Tool) и **WEPP** (Water Erosion Prediction Project).

У Табели 2.5 се даје преглед основних карактеристика модела, а атрибути наведених модела и примери апликације су детаљно разрађени у тексту који следи.

#### ➤ **Areal Non-Point Source Watershed Environment Simulation (ANSWERS)**

ANSWERS се састоји од две главне моделске компоненте: хидрологије и површинске ерозије. Површина слива је подељена на мреже (мање од  $10.000 \text{ m}^2$ ) где се сва својства (нпр. карактеристике и употреба земљишта, наклон терена, вегетација, хранљиви састојци и пракса управљања) сматрају хомогеним. ANSWERS -2000, проширена верзија ANSWERS, користи податке о изолованим падавинама и врши симулацију на временски корак од 30 секунди код догађаја отицања и дневни временски корак у периоду између догађаја кад се јавља отицање. Симулација је ограничена на средње величине сливова ( $5 \times 10^6$  до  $3 \times 10^7 \text{ m}^2$ ) где доминирају површински хидролошки процеси. Хидрограм површинског отицаја може бити генерисан у било којој изабраној тачки у сливу.

ANSWERS и ANSWERS -2000 су дизајнирани за неконтролисане сливове, као и за процену ефикасности најбољих пракси управљања пољопривредним и градским водама (БМПс) у смањењу продукције седимената и транспорта нутријената у токовима приликом прикупљања површинских отицаја.

Кључна слабост ANSWERS-а је немогућност симулације утицаја подземних вода за базни проток, као и симулација топљења снега. Даље је утврђено да ANSWERS протоколи нису адекватно формулисани да би симулирали интензивне олује у једном догађају и да имају потенцијалне нумеричке проблеме. Такође је напоменуто да ANSWERS -2000 нема рутине за моделирање транспорта седимената кроз речну мрежу; због тога се седименти и хемијске компоненте не симулирају у водотоцима.

#### ➤ **Agricultural Non-Point Source Pollution Model (AGN- PS/AnnAGNPS)**

AGNPS или како је тренутно назван AnnAGNPS је модел развијен да симулира, у дневном временском кораку, транспорт седимената и хранљивих материја из пољопривредних земљишта величине од неколико хектара до 300.000 хектара. AnnAGNPS је полуемпиријски, дистрибуирани, континуирани модел за симулацију сливова са могућностима за приказивање резултата на дневној, месечној или годишњој основи. Модел AnnAGNPS може бити од помоћи у управљању отицаја, ерозије и транспорта нутријената као и приликом вршења разних кост-бенефит анализа. Модел може симулирати неколико најбољих пракси управљања (БМПс), укључујући моделирање језера, вегетативних филтера, приобалне бафере итд. Главна ограничења модела AnnAGNPS су: (1) немогућност симулације базног отицаја; (2) прорачун равнотеже масе прилива и одлива воде није обезбеђен, јер модел не узима у обзир просторно варирање падавина над сливом; и (3) симулација отицаја није у потпуности заснована на физичким законима [6].

**Табела 2.5 Главне карактеристике и особине модела**

	Применљивост	Главне компоненте модела	Површински отицај	Подповршински отицај	Симулација хемијских компоненти	Просторна основа	Временска основа	Модел слива	Доступност
<b>ANSWERS</b>	Применљив код пољопривредних сливова; дизајниран за неконтролисане сливове	Отицај, инфилтрација, исподповршински ток, ерозија земљишта, површински транспорт седимената	Маннингова једначина и једначина континуитета	Не	Не	Д-(дистрибуисани)	Појава	Квадратна мрежа; 1-Д симулација	Јавно Доступан
<b>ANSWERS-2000</b>	Применљив код пољопривредних сливова; дизајниран за неконтролисане сливове; користан у евалуацији ефикасности БМР'а; способност симулације трансформације и интеракције између 4 базена азота ???	Отицај, инфилтрација, водни/речни токови, дренажа, хемијски транспорт и транспорт нутријента	Маннингова једначина	Дарсијева једначина	Азот, Фосфор, транспорт седимената	Д-(дистрибуисани)	К (континуирани)	Мрежа/хелије	Јавно Доступан
<b>AGNPS</b>	Применљив код пољопривредних сливова;	Отицај, инфилтрација, ерозија земљишта, транспорт седимената	CN, TR-55 вршног тока	Не	Не	Д-(дистрибуисани)	заснован на догађају	Хомогене земљишне површине	Јавно Доступан
<b>AnnAGNPS</b>	Применљив код пољопривредних сливова; веома користан у евалуацији широке варијабилности праксе конзервација и остале БМР - ова	Хидрологија, транспорт седимената, нутриента и пестицида, коришћење ДЕМ-а за генерирање теренске и речне мреже.	CN, TR-55 вршног тока	Дарсијева једначина	Азот, Фосфор, пестициди, органски угљик и нутриенти	Д-(дистрибуисани)	К (континуирани) дневни/полу дневни	Хомогене земљишне површине, реке и плавине	Јавно Доступан
<b>GSSHA/CAS C2D</b>	Применљив код пољопривредних сливова и урбаних сливова; веома користан у евалуацији широке варијабилности праксе конзервација и остале БМР - ова	Просторно променљиве падавине; падавински експеси и 2-Д моделирање падвинских токова, влажност земљишта, речни токови; ерозија и транспорт седимената	Једначина 2-Д дифузног водног таласа	Не	Не	Д-(дистрибуисани)	заснован на догађају; Континуирани	2-Д квадратна мрежа - простор на мрежа; 1 - Д речна мрежа	Комерцијални софтвер
<b>HEC-1/HEC-HMS</b>	Применљив код урбаних сливова; веома употребљив код моделирања поплава и утицаја код промене коришћења земљишта	Падавине, загубе, базни ток, оттицај, трансформација водног тока и усмеравања тока	CN, једначина кинематског таласа	Не	Не	СД -(полу-дистрибуисани)	заснован на догађају	Дендритична мрежа	Јавно Доступан
<b>HSPF</b>	Погодан и за пољопривреду и у урбаним сливовима; симулира квалитет воде и транспорт седимента у било којој тачки слива	Отицање / састојке квалитета воде, симулација пропусних / непропусних области, поток кроз канале и мешовитих резервоара	Емпиријски истек	Не	Не	СД -(полу-дистрибуисани)	К (континуирани)	Порозне/непорозне средине, речна мрежа и акумулације, 1-Д симулација	Јавно Доступан
<b>KINEROS2</b>	Погодан за урбане средине и студирају утицаја једног одвода или моделирања олујне епизоде; Такође, може се применити на пољопривредних сливовима.	Дистрибуисани падавински улази, падавински експеси, копнени токови, каналски токови, транспорт седимената, инфилтрација, површинско отицање и ерозија	Једначина Кинематског таласа	Не	Не	Д-(дистрибуисани)	заснован на догађају	Каскада равнине и канала; 1-Д симулација	Јавно Доступан
<b>MIKESHE</b>	Широк дијапазон просторне и временске скале; модуларни дизајн омогућава интеграцију других модела; напредне могућности за квалитет воде, процену параметара и анализа водног буџета	Интерцепција, копнени / речни протикаји, незасићене / засићене зоне, топење снега; интеракција издан / река, дисперзија растворених супстанци, геохемијски процеси, раст биљака, ерозија земљишта и наводњавање	Једначина 2-Д дифузног водног таласа	3-Д подземни токови	Растворене конзервативне растворе на површини, у земљишту, и у подземним водама	Д-(дистрибуисани)	заснован на догађају; Континуиран; Промењливи временски корак	2Д правоугаона/квадратна мрежа копна; 1Д каналска мрежа; 1Д незасићени/3Д засићени подземни токови	Комерцијални софтвер
<b>SWAT</b>	Најпогоднији за примену код пољопривредних и шумских сливова; одличан за обрачуна ТМДЛс и симулације широког спектра праксе конзервације и других БМР-ова; успешно се примењује у сливовима у више земаља широм света.	Хидрологија, време, седиментација, температура и особине земљишта, раст у сева, хранљиве материје, пестициди, пољопривредни менаџмент и токови у речној мрежи/резервоаре.	CN за отицаје, TR-55 за прорачун вршног тока	Странични подповршински ток/површински ток	Азот, Фосфор, пестициди, угљик	СД -(полу-дистрибуисани)	Континуирани; Полу дневни корак	Суб-сливови; HRU; акумулације; подземне воде; главни речни канал и притоке	Јавно Доступан
<b>WEPP</b>	Најпогоднији за примену код пољопривредних сливова и анализу земљишне ерозија код малих сливова	Моделирање времена, смрзавање земљишта, акумулација и топење снега, иригације, инфилтрације, хидраулика површинских токова, водни биланс, раст биљака, ерозија.	Једначина Кинематског таласа	Једначина Грин - Ампта	Не	Д-(дистрибуисани)	К (континуирани)	Сегменти канала и акумулације	Јавно Доступан

### ➤ **Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis (GSSHA)/CASC2D**

**CASC2D** је физички заснован модел који је развијен за предвиђање површинског отицања у аридним и семиаридним басенима. Вода и седименти су симулирани у дводимензионалним мрежама и једnodимензионалним речним каналима. Могуће су и појединачне и дуготрајне непрекидне симулације. Водоток је подељен у ћелије, а вода и седименти се усмеравају од једне ћелије до друге. **GSSHA** је побољшање **CASC2D**, додаје способност симулације засићених и незасићених подземних средина, омогућавајући коришћење модела у различитим климатским условима и сливовима.

**GSSHA** је компонента система Watershed Modeling System америчког Министарства за одбрану (U.S. Department of Defense's) и развијена је да омогући хидролошка моделирања у најсложенијим условима укључујући комплексну просторну организацију у урбаним срединама. **GSSHA** укључује нове или побољшане карактеристике **CASC2D**, као што су способност симулације главних хидролошких јединица за складиштење (нпр. језера, мочварних и акумулационих језера) и побољшање предвиђања транспорта седимената у речној мрежи, посебно током интензивних кишних падавина. Као главно ограничење модела се наводи да ерозија у каналима није ограничена транспортним капацитетом водотока, што значи да модел ствара седимент који има запремину већу од оног што проток може носити. Друга ограничења за модел су њене нумеричке шеме, које су рачунски интензивне и захтевају велике количине података. Стога, модел може постати веома захтеван за средње и велике сливове.

### ➤ **Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF)**

**HSPF** је полудистрибуирани, континуирани модел који симулира процесе квалитета воде на пропусним и непропусним површинама земљишта, у водотоковима и у мешовитим срединама где се кретање воде симулира као површински ток, ток у речној мрежи и ток подземних вода. У моделу се такође симулирају дубина снега и садржај воде, топљење снега, евапотранспирација, пуњење подземних вода, растворени кисеоник, биохемијска потражња кисеоника, температура, пестициди, фекалне колиформе, продукција и транспорт седимената по величини честица, моделирање тока у акумулацијама, транспорт амонијака, нитрат-нитрита, органског азота, ортофосфата, фосфора, фитопланктона и зоопланктона. Модел користи јединице хидролошког одговора на основу јединствених фактора климе и капацитета акумулирања. Могу се симулирати периоди од неколико минута до неколико стотина година. Резултати симулације укључују временску историју протока флуида, продукцију седимената и концентрације нутријената и пестицида, заједно са временском дистрибуцијом количине и квалитета воде у било којој тачки у сливу.

Генерално се користи за процену ефеката промене коришћења земљишта, управљање акумулацијама, анализе управљања извора полутаната и преусмеравања протока; **HSPF** је погодан и за мешовите пољопривредне и градске сливове. Неке од кључних предности модела укључују: (1) свеобухватну анализу земљишта у сливу, водног тока у речној мрежи и изворе загађивања вода, укључујући не-тачкасте (услед вишеструке

употребе пестицида на земљиште), тачкасте и атмосферске изворе; (2) флексибилност и прилагодљивост широком спектру сливова; и (3) добро дизајнирану модуларност и структуру кодова.

Кључна ограничења **HSPF**-а потичу од тога да модел није потпуно дистрибуиран или физички заснован. Као резултат тога, карактеристике слива и климатски параметри се генерализирају у неколико јединица, а у симулацији протока воде се користе и емпиријске и физичке једначине. Поред тога, **HSPF** није адекватан за симулирање интензивних олуја, нарочито код великих подсливова и дугачких речних канала. Модел захтева обимне базе података (нпр., дневне падавине), а доступна документација не пружа свеобухватно упутство за процену параметара. Као резултат, обично је обука корисника обавезна, а процес калибрације **HSPF**-а је веома напоран и дуготрајан.

#### ➤ **Kinematic Runoff and Erosion Model (KINEROS2)**

Модел **KINEROS2** је представљен каскадом површина и канала и може се користити за одређивање ефеката различитих вештачких карактеристика слива, као што су урбане средине, мали акумулациони простори или канали на евакуацију поплавних таласа. Модел није дизајниран за дугорочне симулације, а није уграђена нити компонента евапотранспирације која је важна за баланс воде. Међутим, са комплетним скупом хидролошких и седиментних компоненти, модел може да послужи као корисно средство за проучавање појединачних олујних киша, као и у процењивању пракси управљања водама. Једна од кључних слабости модела је одсуство хемијских компоненти/састојака хранљивих материја које ограничавају моделске способности.

#### ➤ **MIKE SHE**

**MIKE SHE** је потпуно интегрисани, дистрибуирани и физички засновани модел који симулира главне процесе у хидролошком циклусу и обухвата процесе евапотранспирације, површинских токова, подземних токова – у незасићеној и засићеној средини, токова у речној мрежи и њихове интеракције. Углавном се користи за моделирање процеса на разини слива и то од једног земљишног профила, па све до више подсливова са различитим врстама тла. Дистрибуирана природа модела омогућава просторну расподелу параметара водотока, климатских променљивих и хидролошког одговора кроз ортогоналну мрежу и колоне хоризонталних слојева на сваком мрежном квадрату. Модел се може користити за моделирање краткорочних и дугорочних догађаја са променљивим временским корацима. Физички заснована топографија, заједно са осталим карактеристикама слива, као што су вегетација и својства земљишта, је укључена у модел. Са модуларном структуром, **MIKE SHE** је способан за размену података између компонента, као и додавање нових процесних компонената. Флексибилна оперативна структура **MIKE SHE** омогућава коришћење више или само неколико компоненти модела, на основу доступности података.

**MIKE SHE** се сматра најобухватнијим моделом са укљученим практично свим фазама хидролошког циклуса. Нека од значајних подручја примене укључују моделирање и управљање речним сливовима, интегрирано моделирање подземних/површинских вода, наводњавање, промена коришћења земљишта и антропогени ефекти у сливу итд.



Као и **GSSHA**, **MIKE SHE** се суочава са проблемом компјутерске интензивности и може бити презахтеван за средња и велика сливна подручја. Утврђено је да физички базиране једначине протока користе апроксимативна нумеричка решења која су извор проблема рачунске нестабилности при чему постоје ограничења у погледу просторног и временског корака у току симулације. Коначно, **MIKE SHE** је комерцијални модел чиме је његова доступност релативно ограничена.

#### ➤ **Soil and Water Assessment Tool (SWAT)**

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) је континуирани, полудистрибуирани и процесно базирани модел речних сливова способан за симулацију током дугих временских периода. Развијен је за процену ефеката алтернативних начина управљања водним ресурсима и изворима загађења у великим речним сливовима. Модел функционише у дневном временском кораку и осмишљен је тако да предвиђа утицај коришћења и управљања земљиштем на водни режим, продукцију седимената и хемијских процеса у неконтролисаним сливовима. Главне компоненте модела укључују климатске услове, хидрологију, температуру ваздуха, карактеристике и особине земљишта, раст биљака, размене хранљивих материја, пестицида, бактерија и патогена, као и управљање земљиштем.

У моделу, површина слива је подељена у више подсливова, која је затим даље подељена на тзв. Јединице хидролошких одговора (Hydrologic Response Units-HRU). HRU заправо представљају делови подслива на којима се топографске и земљишне карактеристике, вегетациони покривач могу сматрати хомогеним. HRU су представљени као проценат подсливног подручја и не морају бити просторно идентификовани унутар SWAT симулације. Баланс воде је основна, покретачка снага иза свих процеса које симулира SWAT, јер утиче на раст биљака и кретање седимената, као и на циркулацију хранљивих материја, пестицида и патогена. Симулација хидрологије слива је раздвојена на тзв. земљишну фазу, која контролише количину воде, седимената, нутријената и пестицида на површини сваког подслива и транспортну фазу, која описује кретање воде, седимената итд, кроз каналску мрежу слива.

Растући трендови примене SWAT модела у свету, као и техничке и мрежне могућности се могу сматрати предностима модела. Овде се може набројати: веб базирана документација, корисничке групе за подршку, обимна и лако доступна библиотека података, ГИС алати, пре и постпроцесирање, отворени изворни код, редовно одржавање регионалних и међународних конференција и редовно одржавање радионица.

#### ➤ **Water Erosion Prediction Project (WEPP)**

**WEPP** је процесно засновани, дистрибуирани и континуирани модел. Примењује се за симулације хидролошких и ерозионих процеса у малим сливовима. Примарна намена модела је процена ефеката пољопривреде и коришћења земљишта на ерозију земљишта и продукцију седимента за мала, пољопривредно оријентисана подручја (до  $2.6 \times 10^6 \text{ m}^2$ ). **WEPP** се користи у широком спектру апликација, укључујући

мапирање отицања, анализу седимента и моделирање транспорта патогених микроорганизама.

### 2.7.3 Избор модела

Из претходне анализе постојећих модела, јасно је да постоји више интегрисаних модела који се могу користити у овом истраживачком раду.

Међутим, с обзиром на све предности и недостатке, као најприкладнији је одабран модел SWAT. Главне карактеристике модела које су допринеле овој одлуци су:

- SWAT је концептуални и полудистрибуирани модел;
- Компоненте модела симулирају све релевантне хидролошке процесе у предложеним анализама укључујући падавине, ерозију, седиментацију, губитке транспорта, могућност управљања итд.
- Модел је интегрисан у ARC-GIS корисничком окружењу,
- Пре и постпроцесирање модела је релативно лако и једноставно,
- Изворни код модела је слободно доступан што омогућава велики потенцијал за будући развој модела и фину адаптацију на конкретне локалне услове;
- Модел има активну корисничку групу,
- Модел користи веб базирану документацију,
- Модел је обимна и лако доступна библиотека података,
- Редовно се одржавају регионалне и међународне SWAT конференције, и
- Редовно се одржавају SWAT корисничке радионице.

Технички детаљи укључујући основне једначине, нумеричке методе и параметризације модела SWAT описани су у Прилогу 1.

## ДЕО 2 - СЕДИМЕНТАЦИЈА У АКУМУЛАЦИЈАМА

### 2.8 УВОД

Један од основних природних процеса који угрожава животни век акумулација представља седиментација, односно запуњавање наносом. Сматра се да је у акумулацијама широм света исталожено око  $1500 \text{ km}^3$  наносног материјала, што представља 20% њиховог укупног капацитета (Mahmood, 1987). Према истом аутору, годишњи губитак укупног волумена акумулација у светским оквирима износи око 1%, односно око  $70 \text{ km}^3$ . У постојећим акумулацијама у Републици Македонији исталожи се приближно  $3,6 \times 10^6 \text{ m}^3$  ерозивног наноса (Трендафилов, 1996).

Поред смањивања ретенционе способности акумулација, седиментни депозити исталожени непосредно уз тело брана могу да изазову озбиљно нарушавање функционалности испусних органа постављених при дну брана, а понекад чак и да утичу на стабилност ових објеката.

Седименти имају веома неповољно дејство и на пратећу хидромеханичку опрему код брана – уставе, затвараче итд. Абразивно дејство седиментних честица може да изазове оштећење облоге код испусних и евакуационих органа, као и кавитацију и неповољне вибрације током њиховог рада.

Низводно од брана, ерозија и деградација могу да поткопају терен и тиме наруше стабилност и сигурност ових хидротехничких објеката.

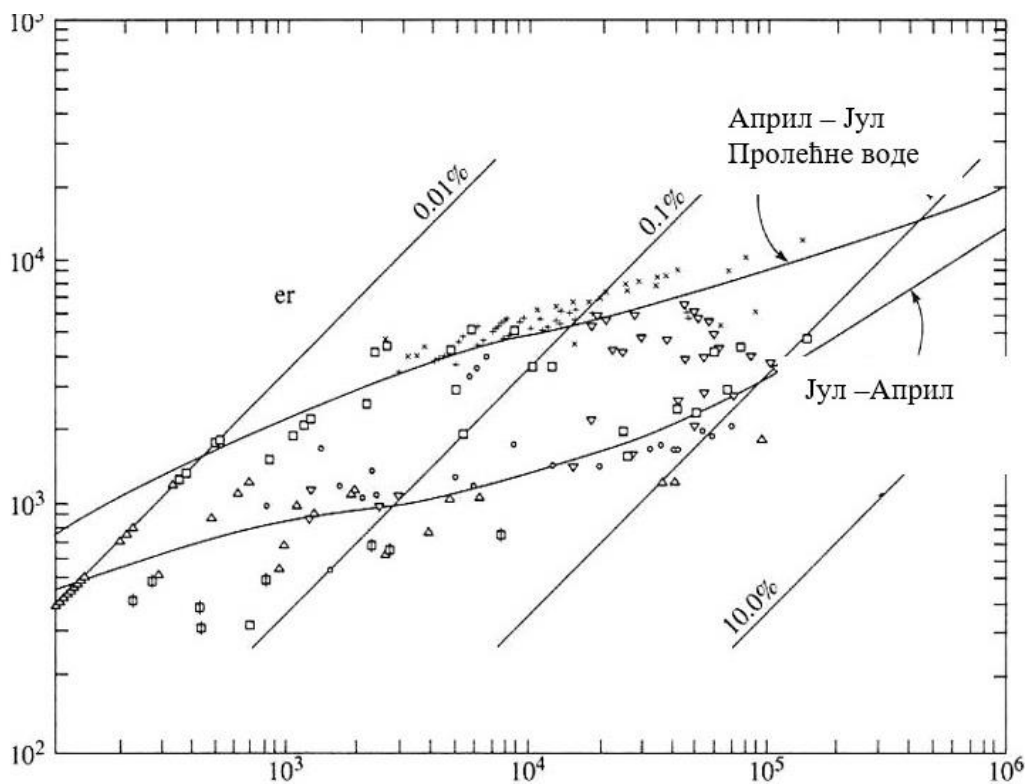
Узимајући у обзир све горенаведено, може се закључити да је запуњавање акумулација наносом процес од изузетног значаја који има озбиљне и дугорочне импликације у правилном искоришћавању ових водних ресурса и стога му се мора посветити изузетна пажња.

У вези са овим процесом, генерално се намећу два основна питања: *колике се количине наноса уносе у акумулацију у одређеном временском периоду и како се нанос дистрибуира и исталожшава у језеру.*

## 2.9 ДОТОК СЕДИМЕНАТА У АКУМУЛАЦИЈЕ

Процена дотока наноса у акумулације може да се изврши рачунањем ерозије и количине транспортованог наноса у речну мрежу или директним мерењем наносних количина на одређеним мерним местима постављеним на одговарајућим локацијама дуж тока река. О првом начину нешто више је дискутовано у претходном поглављу. Овде ћемо се задржати на процени дотока наноса, путем обраде измерених података из водомерних профила.

Код ове анализе, најпре је потребно да се дефинише зависност протока воде у речном кориту са транспортом наноса. Уколико не постоји једнозначна зависност, неопходно је да се подаци о протоку и транспорту наноса раздвоје у зависности од врсте и карактера протицаја. На пример, треба да се одвоје серије са подацима о јесењим и пролећним протоцима у реку, летњим бујичним протоцима итд.



Транспорт суспендованих седиментата (ton/dan)

Слика 2. 9 Криве транспорта суспендованих седимената на водомерном профилу (Yang, 1996)

У даљем поступку, криве транспорта наноса доводе се у везу са линијама трајања протицаја за анализирани период на водомерном профилу, при чему производ ове две криве дефинише линију трајања транспорта седимената.

Укупни транспорт седимената у водомерном профилу за анализирани период дефинише се интеграцијом линије трајања транспорта седимената.

На основу података о дотоку суспендованих седимената коришћењем неке одговарајуће транспортне једначине, могу се проценити и укупне количине вученог наноса који дотиче у акумулацију.

## **2.10 ТАЛОЖЕЊЕ МАТЕРИЈАЛА У АКУМУЛАЦИЈАМА**

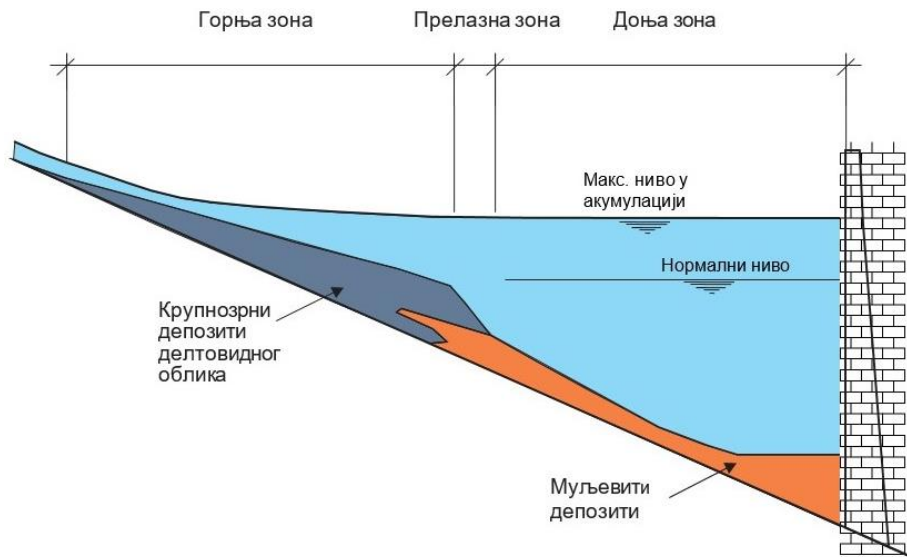
Прекидање водног тока у реци формирањем акумулације ствара услове за таложење речног наноса, што је последица смањивања брзине и енергије речног тока. Сами процес таложења је сложен и зависи од више фактора, као што су: хидролошки режим протицаја у реци, количине и карактеристике транспортованог наноса који река уноси у акумулацију, топографске и морфолошке карактеристике акумулације, оперативни режим акумулације, физичке карактеристике воде у акумулацији и речној мрежи итд. У овом погледу, акумулациони простор може да се подели на три основне зоне: горња или уводна зона, прелазна зона и доња или низводна зона.

*Горња зона* представља зону интензивног таложења крупних седимената који углавном сачињавају вучени нанос у речном кориту. Наносни депозити су најчешће делтоидног облика. Услед осцилација нивоа воде, чело ове делте током времена пропагира у унутрашњост акумулације. Морфологија дна на овом делу акумулације је веома нестабилна, има променљив облик и значајно утиче на даљи процес седиментације.

*Прелазна зона* или зона чела делте, представља област прелаза са горње зоне у преостали део акумулације. Одликује се стрмим уздужним нагибом и наглим смањивањем дијаметра честица наноса.

У *доњој зони* акумулације, дно се састоји од финих седимената који су транспортовани под утицајем густих мутних струјања или нестратификованих токова. Овде се могу пронаћи и аутохтоне органске материје продуциране од алги и осталих водених биљака из акумулације.

У горњој зони су најчешће заступљене и крупне и fine наносне честице, док у осталом делу преовлађују углавном фини депозити. Могу се издвојити више фактора који утичу на процес седиментације, као што су: уливање притока у акумулацију, нагле промене нивоа воде, велики поплавни таласи, појава нестабилности и обрушавања обала акумулације итд.

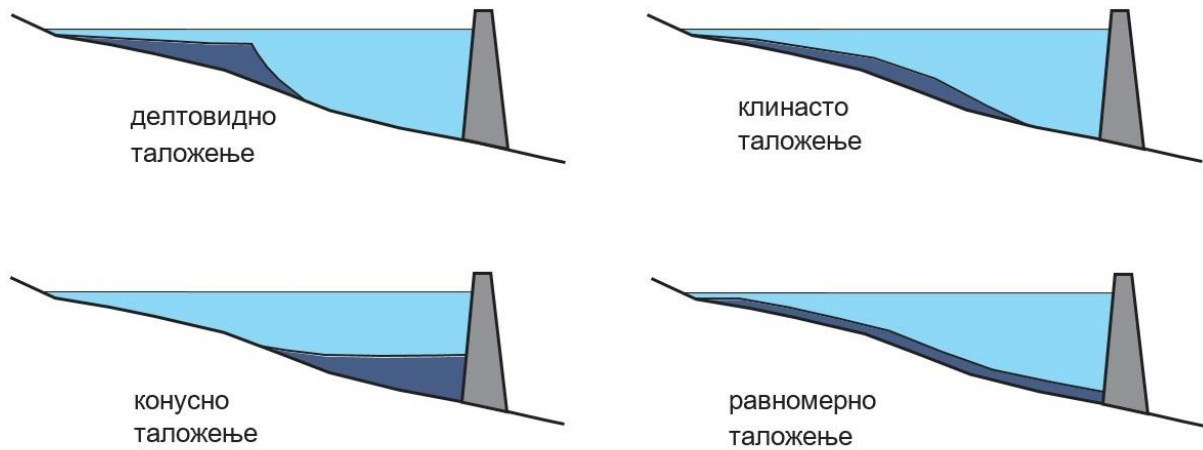


Слика 2.10 Зоне таложења наноса у акумулацијама

### 2.10.1 Уздужни облици седиментних депозита у акумулацијама

Облик исталожених седимената у дну акумулација је променљив и може да варира у зависности од специфичних услова, као што су: геометрија акумулације, проток, карактеристике наноса и начин управљања акумулацијом. Исталожени седименти најчешће се срећу у 4 основна уздужна облика:

1. *Делтовидни облик* – садржи најкрупније фракције седимената који дотичу у акумулацију и таложе се у зони улива у реку.
2. *Клинасти облик* – настаје кад се дебљина исталожених седимената прогресивно смањује приближавањем брани. Најчешће се јавља код дугачких акумулација са уобичајено одржаваним нормалним нивоом воде у акумулацији.
3. *Конусни облик* – одликује се најдебљим седиментним слојевима непосредно уз брану, који се смањују како се иде узводно од ње. Овај облик седиментације настаје код акумулација у којима преовлађују мутни токови који транспортују fine седименте непосредно до бране. Поред тога, ова врста седиментације се среће и код малих акумулација са великим дотоком финих седиментата, као и код већих акумулација које оперишу са ниским нивоима воде приликом прихватања поплавних таласа.
4. *Равномерно таложење* – представља облик таложења који се најређе среће у пракси и јавља се код акумулација са малом ширином, честим флукуацијама нивоа воде и релативно малим дотоком финих седимената.



Слика 2.11 Уздужни облици седимената у акумулацијама

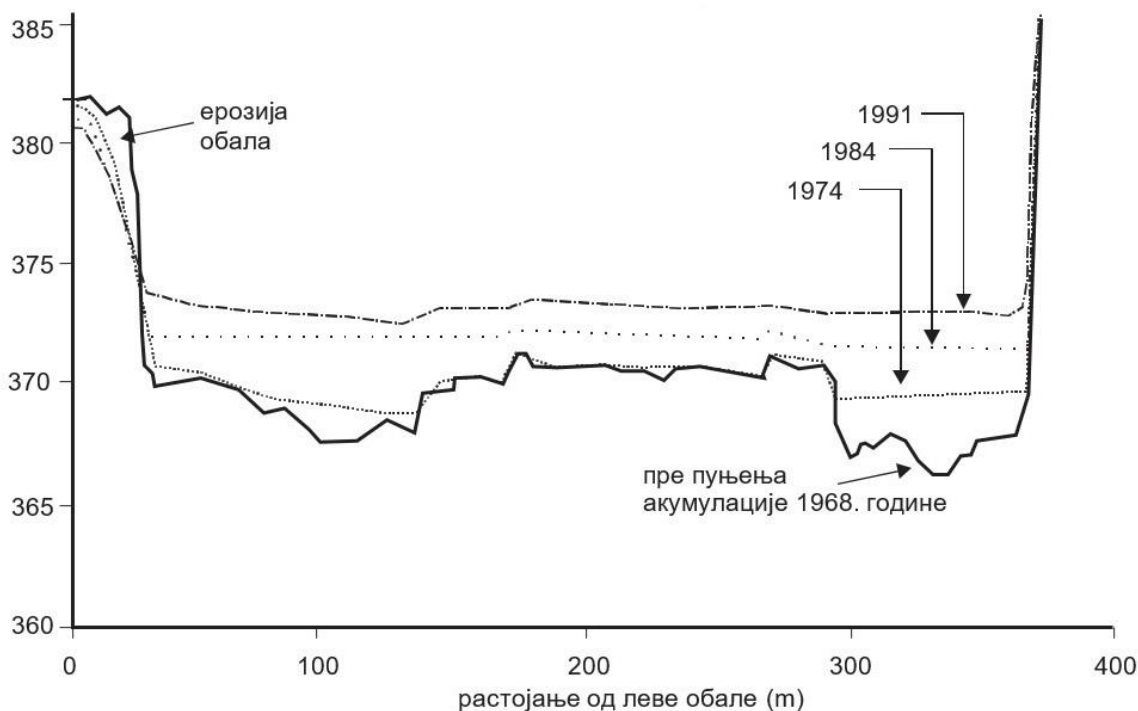
### 2.10.2 Попречна геометрија депозита у акумулацијама

У попречном пресеку, седиментација се у почетку одвија у најдубљим деловима пресека. Притом је површина исталожених седимената готово хоризонтална, независно од сложености облика пресека, као што је приказано на слици 2.12.

Таложење седимената у најдубљим деловима попречних пресека објашњава се следећим процесима:

- мутни токови врше интензиван транспорт и депоновање седимената по талвегу (линија највећих дубина) акумулације.
- дистрибуција суспендованих седимената по вертикали тока је таква да је њихова највећа концентрација фокусирана у најдубљим деловима попречног пресека.

Евентуална појава одређених варијација код описаног облика исталожених седимената најчешће се приписује локалним деформацијама тока код кривина, улива притока у акумулацију, утицају режима управљања акумулације, ерозији и обрушавању обала акумулације итд.



Слика 2.12 Седиментација у најдубљим деловима акумулације

### 2.10.3 Утицај режима управљања на седиментацију у акумулацијама

Режим управљања акумулацијама игра важну улогу у формирању и обликовању седиментних депозита. Отуда, познато је да је у акумулацијама код којих се стално одржава висок водни ниво воде, седиментација најинтензивнија у области улива реке у језеро. Код акумулација са честим манипулацијама са нивоом воде, депоновање седимената се помера у унутрашњост језера, неретко достижући области непосредно уз брану. Ово може да се искористи и као начин за контролу седиментације наноса у акумулацијама. Тако на пример, да би се спречио продор крупних седимената у унутрашњост акумулације у периоду повремених интензивних проноса наноса у речну мрежу, у тим периодима потребно је да се ниво воде одржава на највишој могућој коти.

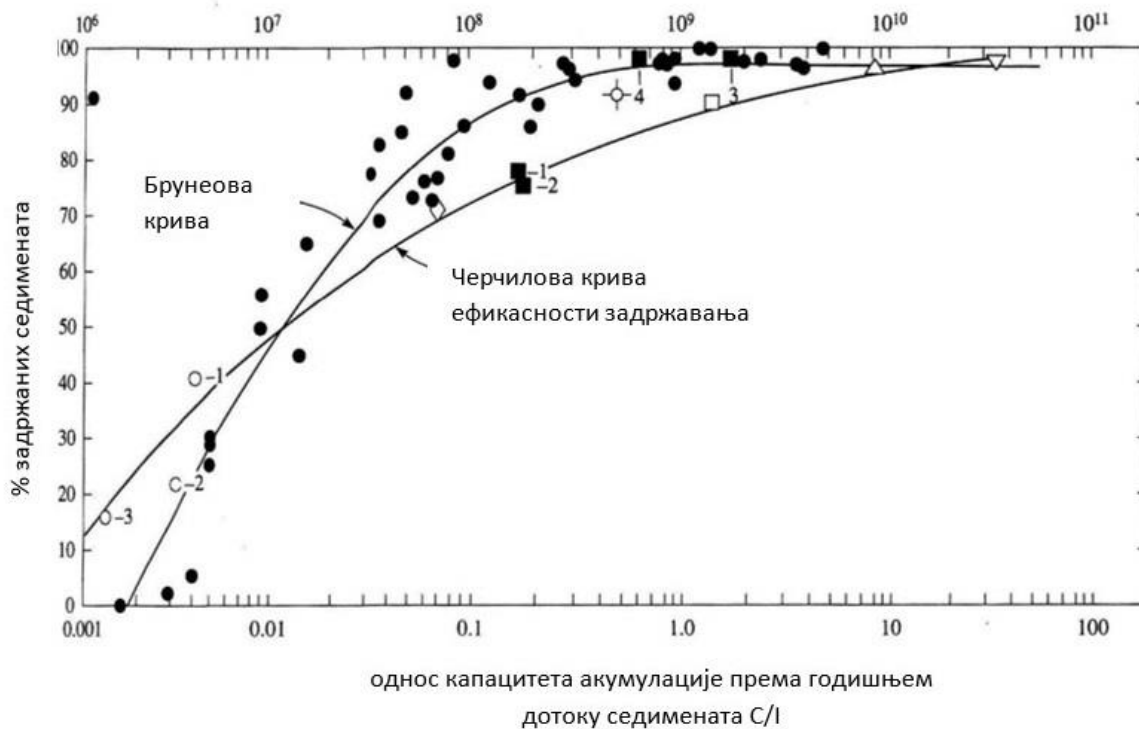
### 2.10.4 Ерозија и обрушавање обала акумулација

Једна од основних карактеристика акумулација је велика дужина обалне линије у поређењу са површином водног огледала. Ерозивни процеси материјала од којих су формиране обале акумулација треба да се сматрају битним извором седимената који се таложе у њима. Осим у погледу запуњавања акумулационих језера седиментима, могућност масивне ерозије обала и појава клизишта мора да се узме у обзир и у погледу сигурности брана, нарочито приликом првог пуњења акумулација, кад су ови објекти посебно рањиви.



## 2.11 ЕФИКАСНОСТ ЗАДРЖАВАЊА СЕДИМЕНАТА У АКУМУЛАЦИЈАМА

Волумен депонованих седимената у акумулацијама зависи од ефикасности акумулација за задржавање седимената и густине депонованих седимената. Ефикасност акумулација за задржавање седимената изражава се као однос између количине задржаних седимената и укупног дотока седимената у акумулацију. Ова карактеристика акумулација зависи од већег броја параметара, као што су: брзина таложења седимената, величина и облик акумулације, брзина кретања воде кроз акумулацију итд. На основу великог броја експерименталних истраживања, развијени су емпиријски методи за одређивање овог параметра. Черчил (Churchill, 1948) дефинише криву ефикасности задржавања седимената у акумулацијама-таложницама и малим акумулацијама, ретардационим акумулацијама, као и акумулацијама код којих се често манипулише са нивоом воде у његовим максималним границама. Бруне (Brune, 1953) је развио криву ефикасности код акумулација са великим корисним простором уз нормално одржан ниво воде.



Слика 2. 13 Криве ефикасности задржавања седимената у акумулацијама по Черчилу и Брунеу

За дефинисање ефикасности задржавања седимената, користећи емпиријске криве Черчила и Брунеа, користе се следећи термини и зависности:

- *капацитет* : представља оперативни волумен акумулације за анализирани период ( $m^3$ ).
- *доток* : представља средњедневни доток у акумулацију у анализираном периоду ( $m^3/s$ )

- *период ретензије* : представља однос између капацитета и дотока у акумулацију
- *дужина* : представља дужину акумулације у делу оперативног волумена (m)
- *брзина* : представља средњу брзину ( $m^3/s$ ) која је добијена као однос дотока са средњом површином попречног пресека акумулације;
- *Средња површина попречног пресека акумулације* : представља однос капацитета и дужине акумулације.
- *Индекс седиментације* : представља однос периода ретензије и брзине.

У пракси је утврђено да се ефикасност задржавања седимената у акумулацијама смањује током времена. Због тога се препоручује спровођење редовних мерења ефективног капацитета и прецењивање ефикасности акумулација за њихово задржавање.

Да би укупни волумен седимената који се депонују у акумулацијама могао да се изрази у јединици масе (тона), неопходне су информације о густини седимената. Основни фактори који утичу на густину исталожених седимената у акумулацијама су: начин управљања, текстура и величина депонованих седиментних честица и збијање или степен консолидације депонованих седимената.

Према Америчком бироу за рекламације (1987), утицај управљања може да се опише помоћу следећих карактеристичних стања нивоа у акумулацијама :

<b>Оперативни број</b>	<b>Стање у акумулацији</b>
1	Седименти су увек под водом
2	Нормално управљање са равномерним осцилацијама нивоа
3	Акумулација је уобичајено празна
4	Речно корито

Почетна густина седиментних депозита може да се израчуна следећом једначином:

$$W_o = W_c p_c + W_m p_m + W_s p_s \quad (2.9)$$

Где је:

$W_o$	- јединачна густина ( $kg/m^3$ ),
$p_c, p_m, p_s$	- процентуално учешће глине, прашине и песка
$W_c, W_m, W_s$	- почетне вредности густине за глину, прашину и песак (табела 2.6 )

**Табела 2.6**

Оперативни број	Почетна маса у kg/m <sup>3</sup>		
	Wc	Wm	Ws
1	416	1120	1550
2	561	1140	1550
3	641	1150	1550
4	961	1170	1550

Милер (Miller,1953) је развио следећу једначину за одређивање густине седимената у акумулацијама након одређеног броја година од почетка њихове експлоатације:

$$W_T = W_o + 0.4343 \cdot K \cdot \left( \frac{T}{T-1} \ln T - 1 \right) \quad (2.10)$$

Где је:

- W<sub>T</sub> - просечна густина седимената у акумулацији након T година од почетка експлоатације (kg/m<sup>3</sup>),
- W<sub>o</sub> - почетна вредност густине депозита према једначини 2.9
- K - коефицијент у функцији управљања акумулацијом и величином седимената (табела 2.7).

**Табела 2.7**

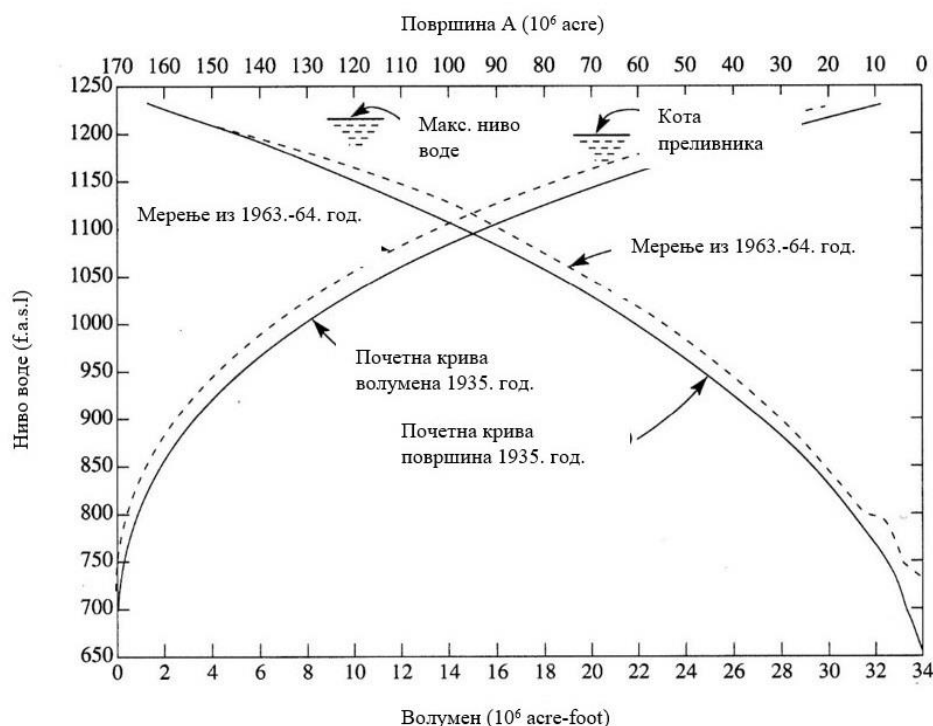
Оперативни број	Коефицијент K		
	Песак	Прашина	Глина
1	0	91	256
2	0	29	135
3	0	0	0

## 2.12 МЕРЕЊЕ СЕДИМЕНТАЦИЈЕ У АКУМУЛАЦИЈАМА

Периодично мерење седиментације наноса представља уобичајену праксу за праћење промена капацитета акумулација. Поред тога, овај метод је најбољи показатељ дотока седимената из узводног слива акумулације.

Један од уобичајених метода за праћење редукације корисног простора током времена је коришћење кривих површина и волумена акумулације. Крива површина представља криву промене површине водног огледала у односу на дубину воде у акумулацији, док крива волумена даје зависност капацитета акумулације, односно њеног корисног волумена, у зависности од дубине воде.

На слици 2.14 приказане су криве површина и волумена акумулације Мид, формиране изградњом бране Хувер у САД, пре првог пуњења и након 30 година употребе. На њој се јасно види редукација површина и волумена у наведеном периоду. Разлика волумена акумулације у периоду између два мерења представља волумен исталожених седимената.



Слика 2. 14 Промена површина и капацитета у акумулацији Мид у САД, (Блантон 1982)

## 2.13 ПРЕДВИЂАЊЕ СЕДИМЕНТАЦИЈЕ У АКУМУЛАЦИЈАМА

### 2.17.1 Метод редукције површина

Метод редукције површина представља емпиријски метод за предвиђање седиментације у акумулацијама, односно њиховог запуњавања седиментима. Метод су 1960. године развили истраживачи Борланд и Милер, а касније га је, 1962. године, ревидирао Лара. По овим истраживачима, дистрибуција седимената код акумулација зависи од следећих фактора: облика акумулације, начина управљања акумулацијом, волумена депонованих седимената у акумулацији и величине и текстуре депонованих седиментних честица.

Метод се реализује у 4 фазе:

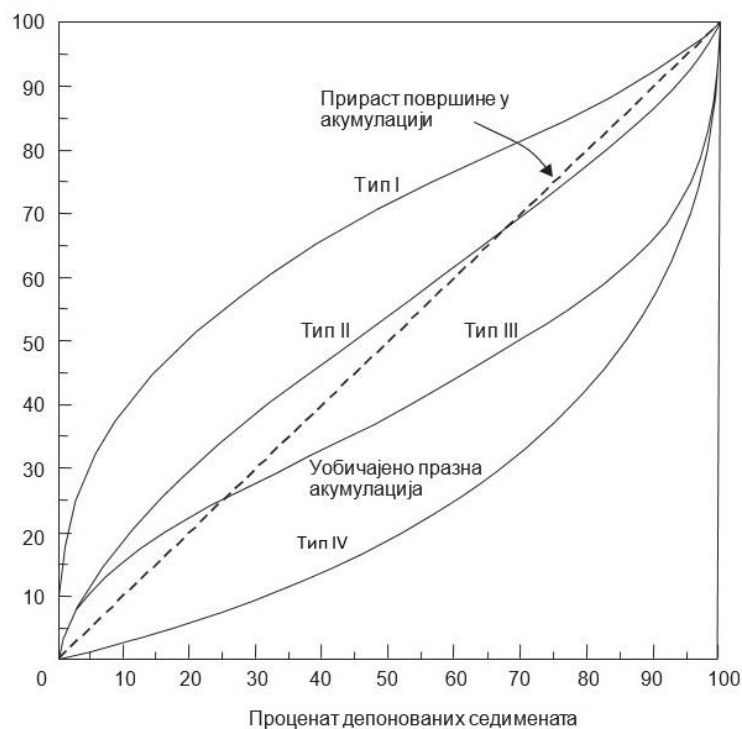
- Прво се одређује волумен седимената који треба да буде дистрибуиран у акумулацију. Код постојећих акумулација, овај волумен се одређује из постојећих историјских информација о тренду смањивања капацитета, под претпоставком да ће се тај тренд задржати и убудуће. Код новопроектваних акумулација, ови подаци се процењују на основу анализе дотока седимената, ефикасности задржавања седимената и специфичне тежине седимената.
- На основу карактеристика акумулације, бира се емпиријска крива за дистрибуцију седимената, слика 7. У постојећим акумулацијама, за које се располаже измереним подацима о седиментним депозитима, при избору емпиријских кривих користе се историјске информације о дистрибуцији седимената.

- Дефинише се ново нулто стање линије волумена, односно кота већ исталожених седимената код бране.
- Коришћењем изабране емпиријске криве врши се дистрибуција седимената у зависности од дубине воде изнад успостављеног нултог стања.

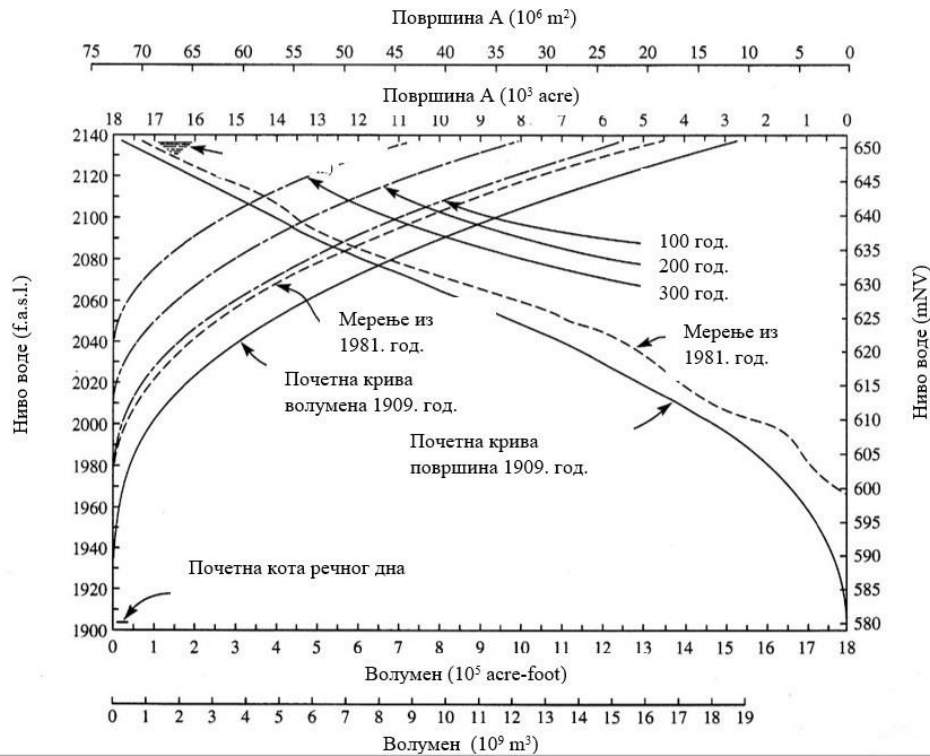
Цела процедура се понавља за сваки волумен седимената који дотиче у акумулацију и представља предмет анализе.

Најпре је био развијен метод равномерног прираста површина, који користи претпоставку да је прираст депонованих седимената у акумулацији равномеран са повећавањем дубине воде (ова функција је представљена испрекиданом линијом на слици 2.15). Затим, на основу великог броја мерења акумулација у САД, од стране Бироа за рекламације САД (1982), развијене су додатне криве за дефинисање дистрибуције седимената у акумулацијама које се користе код пројектовања ових објеката, слика 2.15

На слици 2.16 приказани су резултати анализе седиментације у акумулацији Теодор Рузвелт у САД, за периоде до 300 година од почетка њеног коришћења.



Слика 2.15 Криве дистрибуције седимената код акумулација, по USBR (1982)



Слика 2.16 Анализа седиментације у акумулацији Теодор Рузвелт применом метода редукције површина (Странд и Пембертон, 1982)

## 2.14 МОДЕЛИРАЊЕ СЕДИМЕНТАЦИЈЕ У АКУМУЛАЦИЈАМА ПРИМЕНОМ МАТЕМАТИЧКИХ МОДЕЛА

Моделирање процеса продукције, транспорта и седиментације наноса код акумулација је комплексна активност која може да се подели на четири основне категорије: моделирање процеса продукције воде и наноса из сливног подручја узводно од акумулације, моделирање транспорта наноса и седиментације у акумулационом простору за различита сценарија управљања системом, моделирање локалних хидрауличких феномена и седиментација око хидротехничких грађевина у акумулацији, као на пример, захватне и испусне грађевине, уливи главног водотока и притока у језеро итд. и моделирање ерозије, транспорта и таложења седимената у водотоку низводно од бране.

Моделирање продукције водних количина као и продукције наноса у сливним подручјима узводно од акумулација обично се врши применом хидролошких и ерозионих модела, о којима је више било дискутовано у претходним поглављима.

Моделирање транспортних процеса и седиментације у речној мрежи и акумулацијама врши се применом две врсте модела: нумеричких и физичких модела, а у одређеним условима и њиховом комбинацијом.

### 2.14.1 Нумеричко моделирање

Нумерички модели су развијени за симулацију транспортно-дисперзивних процеса у воденим срединама. Нумерички модели, генерално, могу да се поделе у зависности од третмана просторног и временског континуума. Отуда, по димензионалности се деле на: једнодимензионалне, дводимензионалне и тродимензионалне, док се по временској променљивости деле на: стационарне и нестационарне моделе. Избор одређеног нумеричког модела који ће бити примењен за одређени проблем зависиће пре свега од природе и комплексности проблема који се анализира.

#### *Једнодимензионални модели*

Једнодимензионални математички модели користе се у анализи транспорта седимената код река велике дужине или акумулација код којих транспортни процеси могу да буду симулирани једнодимензионалном апроксимацијом физичког процеса. Они се примењују за симулацију проблема као што су седиментација у акумулацијама у функцији оперативног режима, транспорт седимената кроз акумулацију и преношење седимената низводно од брана.

Транспорт седимената код једнодимензионалних модела описује се помоћу следеће диференцијалне једначине:

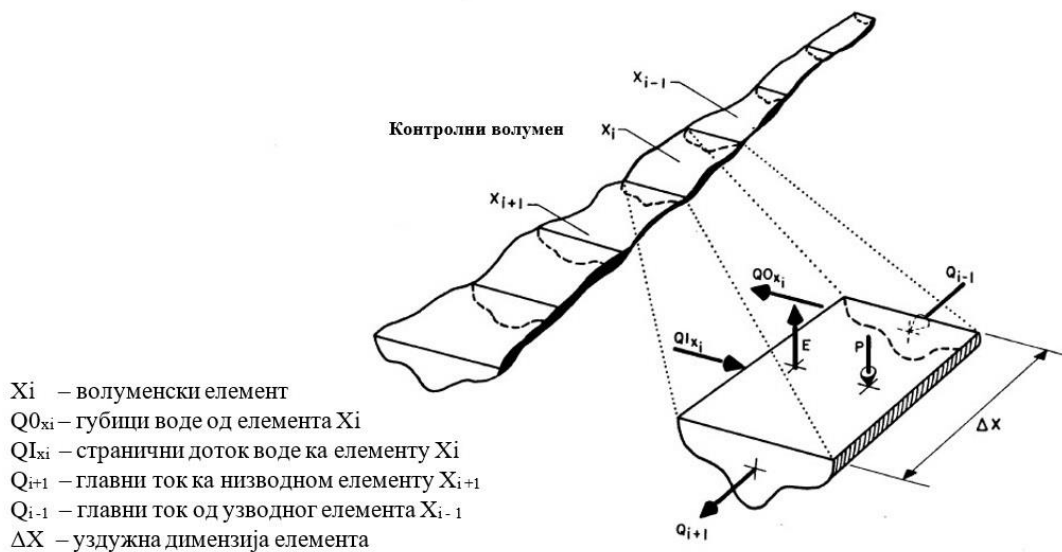
$$\frac{\partial(Ac_i)}{\partial t} + \frac{\partial(Qc_i)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( AD_x \frac{\partial c_i}{\partial x} + S_i \right) \quad (2.11)$$

Где је:	A	–	површина попречног пресека водотока (m <sup>2</sup> )
	Q	–	проток (m <sup>3</sup> /s)
	C <sub>i</sub>	–	просечна концентрација седимената у попречном пресеку водотока (m <sup>3</sup> /m)
	t	–	време (s)
	D <sub>x</sub>	–	кофицијент дисперзије у правцу тока (m <sup>2</sup> /s)
	S <sub>i</sub>	–	продукција / губитак седимената (m <sup>2</sup> /s)

Почетна геометрија модела дефинише се коришћењем попречних пресека реке и карактеристикама речног дна. Ово се дефинише спецификацијом ширине, дубине и дистрибуције величине наносних зрна на дну. Поред наведених параметара, морају се дефинисати и доток седимената на горњој граници модела, као и дистрибуција величине зрна у седиментима.

У нумеричким моделима, хидрауличке и седиментне транспортне једначине решавају се итеративно у серији узастопних временских корака. Хидраулички параметри се израчунавају на почетку сваког временског корака, обично помоћу претпоставке о стационарном протоку, а прорачуни настављају у узводном смеру у складу са стандардним степ методом. Затим се хидраулички параметри добијени хидродинамичким моделом користе за решавање транспортних једначина за седименте, са циљем да се утврди транспорти капацитет дуж водотока за сваки временски корак. Добијени транспортни капацитет се затим упоређује са дотоком седимената, као

и са стањем седимената у речном дну, након чега се одређују количина и гранулометријски састав наноса који се исталожио или би еродирао са моделоване деонице. Биланс или равнотежно стање седимената израчунава се за сваки временски корак и то на свакој од деоница, почевши од узводне границе модела у низводном смеру, односно ка низводној граници. На основу билансирања наносних количина, врши се прилагођавање геометрије речног корита, након чега се геометрија користи у хидрауличким прорачунима у следећем временском кораку. Овим моделима обично се симулирају речна корита са покретним дном које се састоји од више слојева, омогућавајући да се симулира и процес тзв. армирања речног дна.



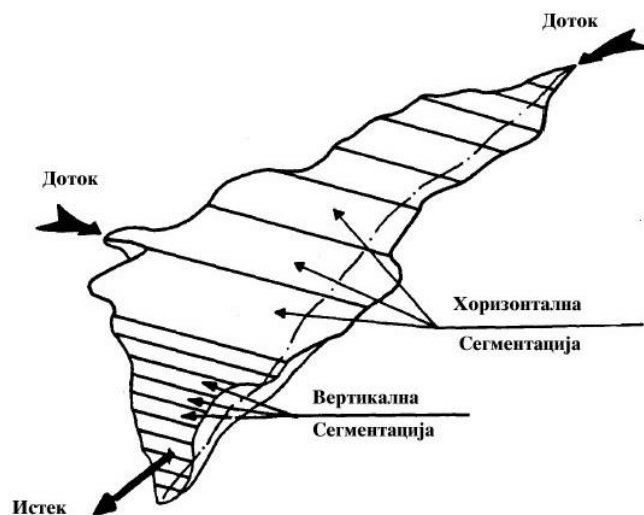
Слика 2.17 Једнодимензионални геометријски третман

Неки од широко коришћених, јавно доступних, 1Д модела протока и седимената у данашњој пракси су HEC-RAS и SRH-1D.

### Дводимензионални модели

Дводимензионални модели се примењују у случајевима кад је неопходан већи обим просторних информација о транспортним и дисперзивним процесима који су предмет моделовања.





Слика 2.18 Дводимензионални геометријски третман

Код ових модела, конвективно–дифузне једначине решавају се за услове на осредњеној дубини или осредњеној ширини водног тела. Гранични услови дефинишу се на улазном профилу, на излазном профилу и код чврстих граница модела.

Транспортна једначина за седименте при дводимензионалном току са осредњеним дубинама тока може да се напише у следећем облику:

$$\frac{\partial Dc_i}{\partial t} + \frac{\partial(Duc_i)}{\partial x} + \frac{\partial(Dvc_i)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x D \frac{\partial c_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y D \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) + S_i \quad (2.12)$$

Где је:

D	–	дубина тока (m)
u, v	–	компоненте брзине у x и y смеру (m/s)
C <sub>i</sub>	–	просечна вертикална концентрација седимената (m <sup>3</sup> /m)
t	–	време (s)
D <sub>x</sub> , D <sub>y</sub>	–	кофицијенти дисперзије у x и y смеру (m <sup>2</sup> /s)
S <sub>i</sub>	–	продукција / губитак седимената (m <sup>2</sup> /s)

2Д модели протока флуида и седимената укључују јавно доступне моделе као што су SSCHE2D, TELEMAC-MASCARET, UnTRIM, Delft3D и SRH-2D.

### Тродимензионални модели

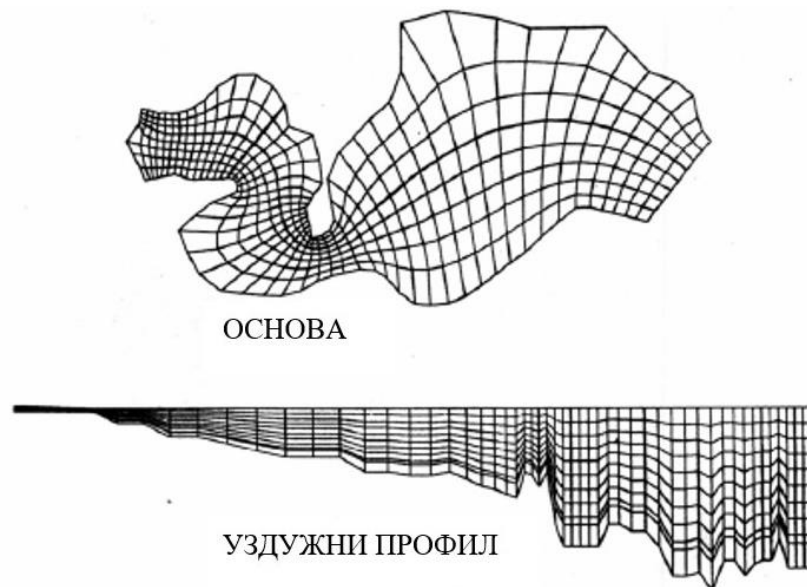
У великом броју случајева из инжењерске праксе, кад модели ниже димензионалности не дају задовољавајуће резултате, неопходна је примена тродимензионалних нумеричких модела. Такве су, на пример, анализе ерозивних и седиментационих процеса у близини мостовских стубова у речним коритима, затим код захватних и испусних грађевина на бранама итд., код којих 1Д и 2Д модели не омогућавају реалну симулацију физичких процеса. Тродимензионални модели решавају комплетне конвективно–дифузне

једначине при почетним и граничним условима. Основна једначина за транспорт седимената дата је у следећем облику:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{\partial(uc_i)}{\partial x} + \frac{\partial(vc_i)}{\partial y} + \frac{\partial(wc_i)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial c_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (ax_i) \quad (2.13)$$

Где су:

- $u, v, w$  – компоненте брзине у  $x$  и  $y$  и  $z$  смеру (m/s)
- $C_i$  – просечна вертикална концентрација седимената (m<sup>3</sup>/m)
- $t$  – време (s)
- $D_x, D_y, D_z$  – коефицијенти дисперзије у  $x$  и  $y$  и  $z$  смеру (m<sup>2</sup>/sec)
- $S_i$  – продукција / губитак седимената (m<sup>2</sup>/sec)



Слика 2.19 Тродимензионална геометријска дискретизација код језерских система, Olsen, 2007

И поред атрактивности 2Д и 3Д модела, 1Д модели се и даље сматрају веома корисним, посебно за апликације са релативно великим просторним доменом или за симулације током дужег временског периода. Имајући у виду да је главни циљ овог рада дугорочна симулација транспортно-дисперзивних процеса отвореног флуидног тока, а уз то респектујући физичке карактеристике акумулације Тиквеш чија дужина износи ~28 km, док је највећа ширина водног огледала око 700 m, одлучено је да се примени 1Д модел површинског тока флуида и транспорта седимената.

У наставку се даје опис најчешће примењиваних јавно доступних 1Д модела који се користе у пракси моделирања отворених флуидних токова: HEC-RAS и SRH-1D.

**HEC-RAS 1D** је једнодимензионални хидраулички модел и модел транспорта седимената који се широко примењује широм света за обављање једнодимензионалних хидрауличких прорачуна стационарног и нестационарног карактера тока. У модел је укључена и рутина за симулацију транспорта седимената, заједно са анализом квалитета

воде. Модел је применљив у условима субкритичног, суперкритичног и мешовитог режима тока. Све компоненте модела деле заједничке геометријске податке и уобичајене рутине за геометријске и хидрауличке прорачуне. Овим моделом се може симулирати комплетна мрежа природних и вештачких водотока.

Модул за транспорт седимента може симулирати транспорт некохезивног материјала заданим функцијама транспорта седимената, док су за симулацију транспорта кохезивног материјала неопходне било стандардне једначине транспорта или приступ Крона и Партениадеса.

**SRH-1D** је једнодимензионални хидраулички модел и модел транспорта седимената за употребу у природним рекама и вештачким каналима, развијен од стране EPA (Агенција за заштиту животне средине) и Рекламација (Биро за рекламацију) као партнери у финансирању. SRH-1D је изворно назван GSTAR 1-D (Yang et al., 2007; Huang and Greimann, 2007). У јуну 2007 године назив модела је промењен у SRH-1D. То је мобилни гранични модел са способношћу да симулира стационарне и нестационарне водне токове, унутрашње граничне услове, комплексне речне мреже, токове у акумулацијама кохезиони и некохезиони транспорт седимената и бочне дотоке.

SRH-1D користи стандардну степ методу за решавање једначину енергије за стационарне-поступно променљиве токове. За симулацију нестационарног протока, SRH-1D решава Сент-Венант-ове једначине. Нумеричка шема која се користи у SRH-1D користи померену (staggered) мрежу. Модел такође користи неконзервативни облик моментне једначине.

SRH-1D симулира физичке процесе важне за кохезивни и некохезивни транспорт седимената. Постоје два приступа моделирању седимената доступних у SRH-1D: нестационарни модел седимената и решење према Екснер-овој једначини. Нестационарни модел седимената рачуна временске промене концентрације суспендованих седимената док Екснер-ов модел игнорише промене концентрације суспендованих седимената током времена. Процеси мешања материјала у речном дну укључују сортирање материјала и окрупњавање (армирање) дна. Консолидација је процес сабијања кохезивних седимената током времена и такође је третирана у моделу. SRH-1D чита једну улазну датотеку која садржи све потребне информације за обављање симулације. Улазна датотека је организована у секвенцијалним записима, а подаци се припремају у ASCII датотекама. Ако се симулација правилно изведе, генерише се низ излазних датотека, такође у формату ASCII датотека.

У Табели 2.8 су резимиране главне компоненте транспортних модела, укључујући једначине транспорта седимената, методе сортирања материјала и методе дефинисања брзине таложења.

**Табела 2.8** Главне компоненте транспортних модела модела HEC-RAS и SRH-1D

Модел		HEC-RAS	SRH-1D	
		Квази-нестационаран	Нестационаран	
Основна једначина		Конзервација масе	Конзервација масе	
Храпавост мобилног дна		Не	Не	
Метод сортирања материјала	Active Layer: two layer method	Да	Да	
	Exner 5: three layer method	Да	Да	
Кохезивни седименти		Да	Да	
Варијабилност вискозитета са температуром воде		Да	Да	
Метод брзине таложења	Ruby (1933)	Да		
	Tofaleti (1968)	Да		
	van Rijn (1993)	Да		
	USIAWRSS (1957)		Да	
Транспортна једначина	Суспендирани нанос	Yang's (1973) stream power for sands	Да	
	Вучени нанос	Meyer-Peter and Müller -1948	Да	Да
		Wong & Parker (2006)		Да
		Wilcock and Crowe (2003)	Да	Да
		Yang's (1984) stream power for gravel	Да	Да
	Укупни нанос	Ackers and White (HR Wallingford, 1990)		Да
		Ackers-White (1973)	Да	Да
		Brownlie (1981)		Да
		Copeland's (1990) modification of Laursen's relationship (Copeland and Thomas 1989)	Да	
		Engelund and Hansen -1972	Да	Да
		Laursen (1968)	Да	Да
		Madden's (1993) modification of Laursen's (1958) relationship		Да
		Toffaletti's (1966) transport function	Да	
		Wu (2000)		Да
	Yang's (1979) for total load	Да	Да	
Yang et al (1996)		Да		

### **2.14.2 Избор модела**

Из претходног осврта, јасно је да је у овом истраживачком раду могу бити коришћени оба предложена модела. Оперативне разлике предложених нумеричких модела су минималне, док је њихова примена у пракси веома успешна.

Ипак, с обзиром на нешто већи избор транспортних једначина које су укључене у модел, као и претходно искуство аутора у примени модела, за даљу примену је изабран нумерички модел SRH-1D.

Технички детаљи укључујући основне једначине, нумеричке методе и параметризације модела SRH-1D описани су у Прилогу 2.

### ДЕО 3 - МЕТОДИ И МЕРЕ ЗА ОДРЖАВАЊЕ КАПАЦИТЕТА АКУМУЛАЦИЈА

У одсуству квалитетних мера заштите и одржавања, доводи се у питање одрживост и испуњавање предвиђеног експлоатационог периода многих акумулација. Ово произлази из чињенице да штете изазване великим губицима корисног простора због седиментације наноса често не могу бити амортизоване профитом који се обезбеђује коришћењем капацитета. Најјачи мотив за примену заштитних мера за контролу седиментације наноса у акумулацијама засад је још увек одржавање капацитета корисног простора и продужавање експлоатационог периода. Последњих година се све више размишља и са аспекта заштите узводне и низводне речне мреже. Заштитне мере које се најчешће примењују у пракси се могу поделити у три групе:

- Активности и мере за контролу ерозије у сливу и речној мрежи, чиме би се смањио доток наноса у акумулацију.
- Коришћење хидродинамичких карактеристика тока за редукацију седиментације у акумулацији. Примењују се методи *хидрауличког усмеравања* суспендованих седимената из акумулације, као и методи *испирања* већ наталожених седимената и њихово испуштање из акумулације.
- Активности базиране на *хидрауличком и механичком багеровању* - ископавању наталожених седимената. Ово је доста ограничен, али ефикасан метод за елиминацију наноса у акумулацијама.

**Прва група** мера се састоји од низа активности које се предузимају у сливном подручју у циљу редукације ерозије тла на месту њеног настанка и транспорта у речну мрежу. Дугорочно гледано, ове мере су веома ефикасне, али су истовремено и веома скупе и захтевају систематску и свеобухватну реализацију.

Борба са интензивном ерозијом и продукцијом седимената у сливовима река је скуп техничких, економских и социјалних мера које покривају све сегменте људског деловања, посебно када се ради о великим сливовима као што је слив реке Црне. У овим сливовима поред речног тока налазе се и: шуме, пољопривредни комплекси, насеља, индустријски и рударски комплекси, инфраструктурне и саобраћајне мреже.

Основни принципи управљања ерозије сливова формулисани су у другој половини 19. века у Француској, а одатле су прихваћени у остатку Европе и света. Исти приступ важи и данас, с тиме да је утицај одређених фактора на ерозивне процесе дубље проучаван и наглашаван, посебно утицај вегетативног покривача.

Основни принципи за уређивање еродибилних сливова су следећи:

- 1. Очување постојећег биљног покривача, посебно шуме, као најбоље антиерозивне заштите и предузимање мера и активности за његово обогаћивање.*
- 2. У подручјима где је вегетацијски покривач делимично или потпуно оштећен, посебно када ти делови нису отпорни на ерозију, потребно је његово обнављање на претходно исправно обрађеној земљи.*
- 3. Гајење пољопривредних култура на теренима са нагибом или повећаним еродибилним потенцијалом треба прилагодити у складу са антиерозивним мерама за то подручје.*
- 4. Код бујичних водотока где су већ развијени ерозивни процеси и исти постају интензивнији, неопходно је да се предузму одговарајуће мере за њихово заустављање или барем успоравање. То се постиже: смањењем разорне моћи воде, учвршћивањем корита водотока, спречавањем даље ерозије у речном кориту и контролисаним депонирањем произведеног седимента у унапред одређеним депонијама.*

Смањење разорне моћи воде се постиже смањењем уздужног нагиба водотока, проширењем речног корита и смањењем проточне водне количине. У том циљу се у сливу користе различити објекти који се истовремено користе и за задржавање или депоновање наносног материјала. Ово подразумева изградњу устава, канала, кинета, напера и тако даље. Проточна количина и производња еродираниг наносног материјала може се смањити предузимањем неколико врста шумско-мелиоративних мера у горњем делу слива, са нагласком на обнову девастираних шума као најбоље антиерозивне заштите. Овде се могу навести следеће мере: мелиорација шума, пашњака, подизање воћњака, винограда, пошумљавање, сађење траве итд. Из наведеног се може закључити да се противерозивне мере у одређеном подручју састоје од обављања различитих грађевинско-техничких и биолошких активности. Ове активности морају бити координисане надопуњавајући се између себе. На пример, извођење техничких активности у сливу не би имало смисла уколико се оне не допуне биолошким мерама (пошумљавања и стабилизације голина) чиме ће бити елиминисани разлози за настанак ерозије. С друге стране, биолошке мере у областима у којима се већ развила ерозија није могуће спровести без претходне стабилизације земљишта низом техничких активности. Поред биолошко-техничких мера, у борби против ерозије се примењују и низ административних, образовно-васпитних и пропагандних активности. Ове мере укључују: доношење закона и прописа који регулишу питања која се односе на уређење ерозивних токова, забрана превеликих испаша стоке, забрана обрезивања лишћа, замена годишњих усева вишегодишњим усевима, забрана орања стрмих падина угрожених ерозијом, организовање курсева, предавања, штампања књига, брошура и рекламних материјала у вези са заштитом од ерозије итд.

Друга група мера је можда интересантнија са аспекта истраживача који се баве проучавањем морфолошких процеса у речним мрежама и акумулацијама. Технике *усмеравања* суспендованих седимената састоје се од спровођења седимената кроз акумулацију и њиховог испуштања кроз испусне органе брана у облику суспензије, док технике *испирања* подразумевају иницирање ерозије већ исталоженог наноса у акумулацији, повећавањем брзине воде.

Обе технике захтевају знатна и дуготрајна снижавања нивоа воде у акумулацији праћена великим губицима воде, као и велике димензије испусних органа. Примена ових техника је оправдана код малих и средње великих акумулација. Код великих акумулација, у циљу избегавања великих снижавања нивоа воде, а тиме и огромних губитака воде, изванредно атрактивну меру за редукцију суспендованих седимената представља испуштање седимената који су транспортовани *подводним струјањима* велике густине. Врло ефикасан пример испуштања подводног тока забележен је 1956. године на акумулацији Ирил Емда у Алжиру. Том приликом, кроз испусне органе бране испуштено је 45% седимената измерених на улазу у акумулацију.

Поступак *усмеравања седимената* подразумева процес манипулације са протикајима или геометријом акумулација у циљу спровођења седимената кроз акумулацију или око ње, при чему ће количина исталожених седимената у акумулационом простору бити минимална.

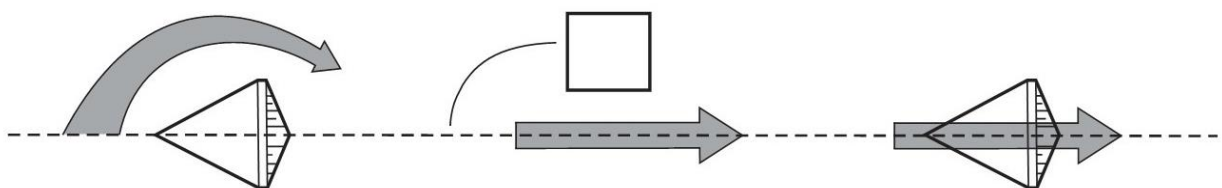
Техника усмеравања седимената може да се класификује у следеће категорије:

*Пропуштање седимената кроз акумулациони простор*, што може да се постигне:

- сезонским пражњењем акумулација
- пражњењем акумулација због предвиђања појаве великих вода
- пражњењем акумулација по претходно утврђеном режиму
- испуштањем мутних потповршинских токова

*Спровођење седимената бајпасом око акумулационог простора*, при чему се разликују:

- акумулације на главном речном току
- акумулације ван главног речног тока

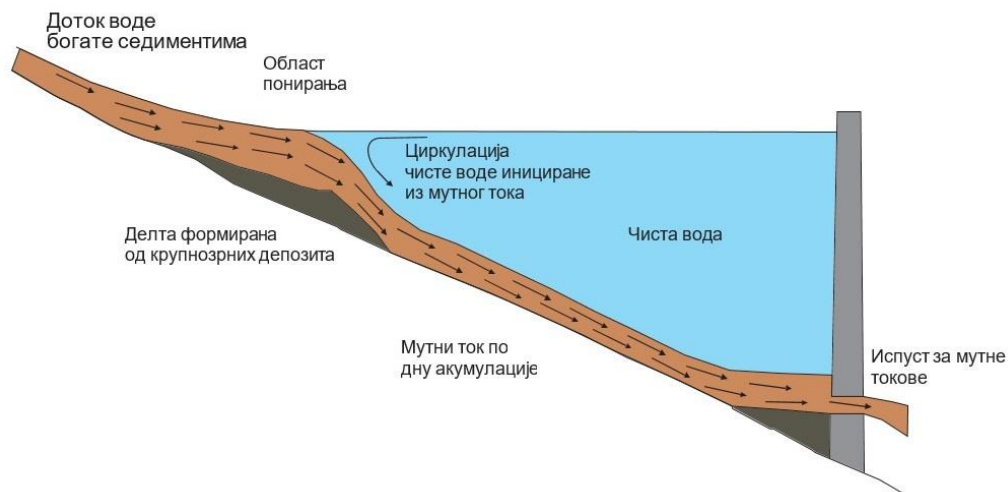


Слика 2.20 Начини спровођења седимената код акумулација



Позитивне стране ове технике су: овим поступком углавном се задржава природни режим транспорта седимената кроз речну мрежу, што ову технику чини еколошки далеко прихватљивијом у поређењу са осталим методима. У неким случајевима, ова техника може да има врло ниске трошкове, али понекад може да захтева градњу великих испуста на брани.

Главни недостатак ове технике представља потреба за испуштањем великих количина воде из акумулације током појаве великих вода. Примена ове технике је најприкладнија за хидролошки мале акумулације, код којих је укупни волумен мањи од волумена таласа велике воде. У неким случајевима, ова техника није у могућности да елиминише претходно исталожене седименте или да спроведе крупније седименте низводно од бране. Стога, да би се превентивно деловало на заштиту капацитета акумулације, са применом се мора почети непосредно након пуштања акумулације у употребу, а понекад су неопходне и друге мере, као испирање и багеровање акумулационог простора.



Слика 2.21 Евакуација седимената преко подводних мутних токова

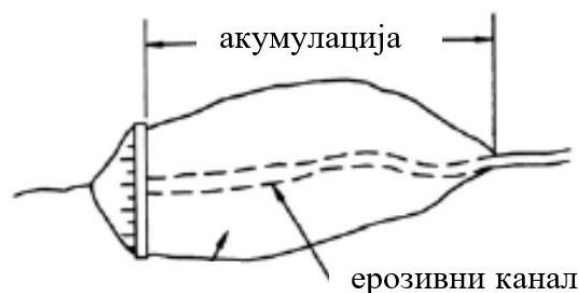
Феномен *подводних струјања* велике густине манифестује се у периодима великих вода, нарочито након интензивних падавина у сливном подручју, кад се региструју велики протицаји у речним токовима. Ови протицаји се одликују високом концентрацијом наноса који се речном мрежом транспортују до акумулације. Кад водена маса велике густине дође у додир са релативно чистом водом у акумулацији, настаје њено понирање под језерску површину и наступа феномен подводног тока. Тачка или зона понирања обично је лоцирана на почетку акумулације, одмах након „делте” крупног наноса. Почевши кретање по дну акумулације, под утицајем гравитације, ова густа водена маса пропагира на изванредно великом растојању у језеро, крећући се релативно малом брзином. Концентрација суспензије у подводном току одржава се помоћу турбуленције тока изазване трењем при дну, где се налази претходно исталожен фини нанос. Уколико подводни ток стигне до бране, може бити пропуштен кроз испусне органе у низводну речну мрежу без знатних поремећаја режима управљања са акумулацијом, односно без

великих спуштања нивоа воде. Ова појава, са своје стране, може бити ефективна мера за смањење таложења финог наноса у акумулационом простору.

**Хидраулично испирање** представља процес релативно брзог пражњења воде из акумулације отварањем испусних органа у циљу привременог успостављања речног режима течења кроз акумулациони простор. Концентрисани ток воде изазива интензивну ерозију депонованих седимената на дну акумулације и њихово спровођење низводно од бране. За разлику од поступка усмеравања седимената, којим се врши спречавање седиментације у акумулацији у време појаве великих вода, хидрауличким испирањем одстрањује се један део већ исталожених седимената у акумулацији.

Хидраулично испирање може да се изврши на два начина: потпуним пражњењем акумулације, што подразумева снижавање нивоа воде до коте испусних органа и стварање услова слободног речног тока кроз акумулацију и делимичним пражњењем акумулације, што представља мање ефективан метод за редукацију седимената и ређе се примењује у пракси.

Током процеса хидрауличног испирања, у дну акумулације се формира ерозивни канал у депонованим седиментним масама који обично прати облик првобитног речног корита.



Слика 2.22 Формирање ерозивног канала у дну акумулације

Док седименти исталожени у ерозивном каналу могу бити евакуисани наредним испирањем, депоновани седименти у простору ван канала, у инундацијама, се не могу одстранити овим методом и они ће континуирано повећавати свој волумен током времена.

Из тог разлога, овај тип редукације седимената има највећи ефекат и примењује се код дугих и уских акумулација, као и код акумулација мале хидролошке величине код којих однос дотока у акумулацију ( $D$ ) и њеног капацитета ( $C$ ) износи  $D/C < 0,3$ .

Код примене овог метода постоје два главна ограничења: 1) потребно је потпуно пражњење акумулације, чиме се она ставља ван употребе за време испирања и 2) испирање изазива испуштање седимената из акумулација са много већом

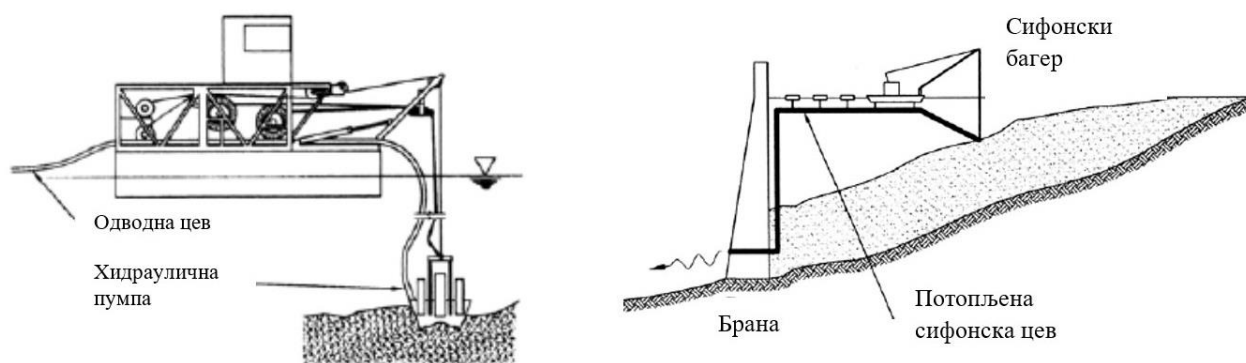
концентрацијом од оне у природном речном систему. Ове високе концентрације седимената могу да изазову бројне негативне последице у низводном току реке. Тако на пример, високо концентрисани токови могу да запуне системе за водоснабдевање и наводњавање низводно од брана, да проузрокују оштећење хидроенергетских постројења у низводним акумулацијама, да узрокују штете код рекреативних центара, док последице по живи свет у низводним екосистемима могу да буду несагледиве.

**Трећа група** мера обухвата одстрањивање седимената из акумулације ископом седимената у сувом и багеровање седимената. Са своје стране, багеровање може да се подели на механичко и хидраулично багеровање. Избор метода за одстрањивање седимената зависиће од већег броја фактора, међу којима могу да се издвоје: волумен депонованих седимената који треба да се одстрани, гранулометријски састав и геометрија депозита, расположиво место за трајно депоновање или поновну употребу седимената ван акумулације, ниво воде у акумулацији, еколошка ограничења и критеријуми итд.

Ископ и багеровање генерално представљају скупа решења за одстрањивање седимената, међутим, кад су седименти већ исталожени у акумулацијама, ови методи су и једине могуће алтернативе за њихову редукацију.

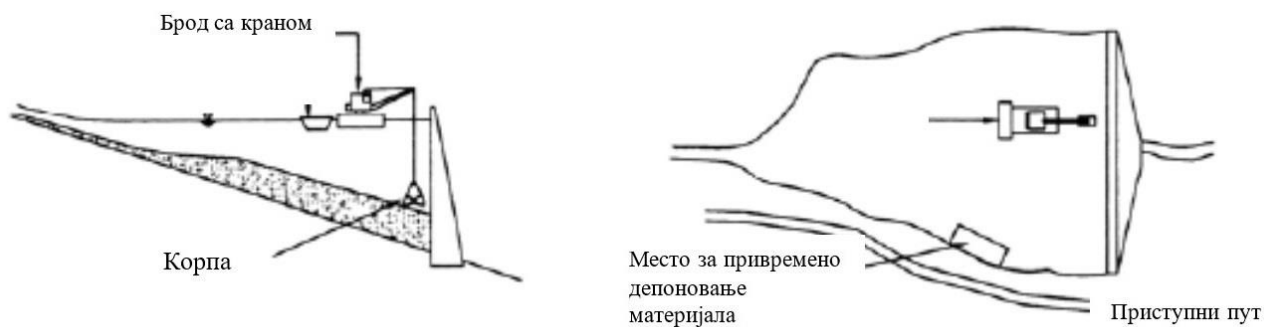
*Ископ у сувом* - Овај метод се користи за прочишћавање акумулационих базена који су уобичајено празни и садрже углавном крупне исталожене седименте који се брзо одводњавају. Примена овог метода ограничена је употребом конвенционалне механизације за рад у сувом. Примењује се код акумулација које се користе сезонски и обично се држе празне. Појава невремена и долазак великих вода може да угрози целу операцију чишћења акумулације.

*Хидраулично багеровање* – За багеровање акумулација може да се користи више врста багерске опреме, између осталих и тзв. сифонски багер, који је конструисан специјално за коришћење у акумулацијама. Код хидрауличких система, седименти се при ископу мешају са водом и у форми густе суспензије се транспортују до локације предвиђене за њихово депоновање. Предности хидрауличног багеровања су нижа појединачна цена у односу на ископ у сувом, висока продуктивност и могућност примене независно од режима управљања водом у акумулацији.



Слика 2.23 Хидрауличко багеровање наноса

Системи за *механичко багеровање* користе багерске корпе за ископ и подизање седимената са дна акумулације. Притом је количина захваћене воде минимална. Ископани материјал може да се истовари у специјално одређену област или да се пренесе у речни ток низводно од бране.



Слика 2.24 Механичко багеровање наноса

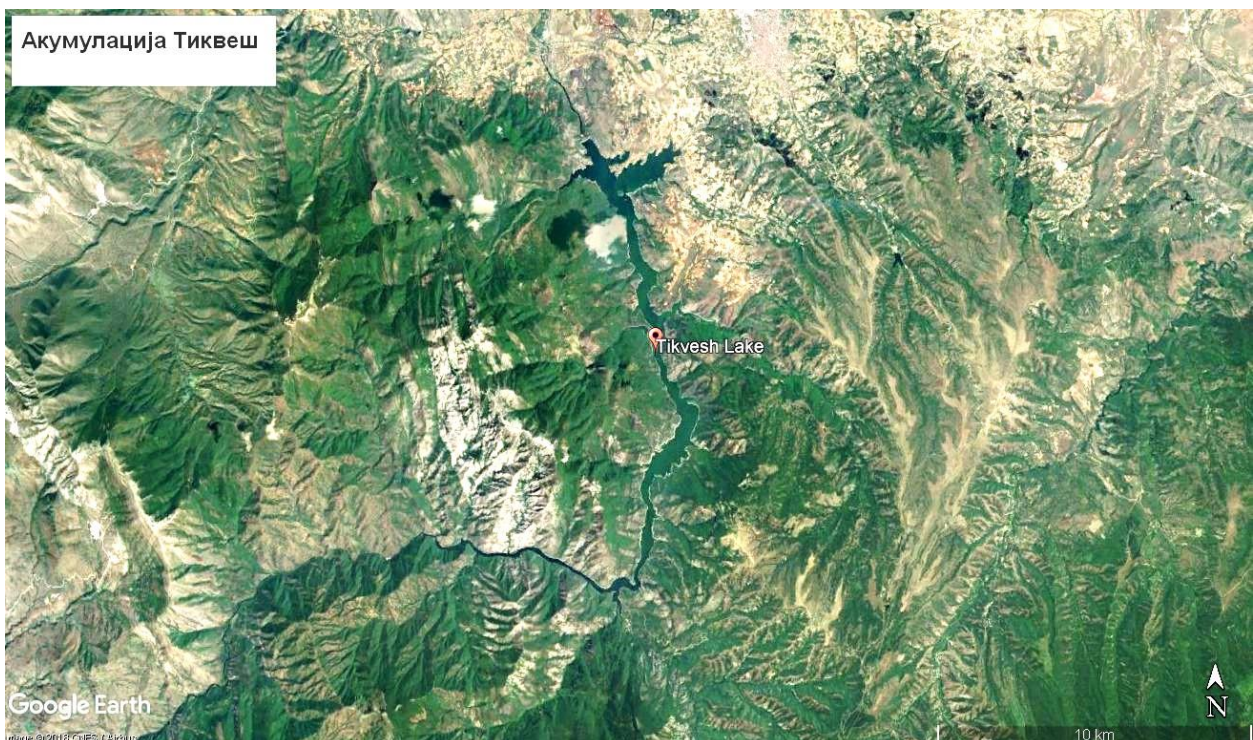
### III.

## СТУДИЈА СЛУЧАЈА – АКУМУЛАЦИЈА ТИКВЕШ

### 3.1 УВОД

Брана Тиквеш је изграђена 1968. године и једна је од највећих грађевина ове врсте у Републици Македонији. Висока је 113 m, а ширина у круни бране износи 388 m. Изградњом бране створена је акумулација дужине од 28 km и просечне ширине 300-700 m. Површина акумулације је  $14,0 \text{ km}^2$ , док је укупна запремина  $475 \times 10^6 \text{ m}^3$ , од чега корисни простор заузима  $397,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ , док је запремина мртвог простора  $77,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Акумулација Тиквеш је уска и дендритична са веома развијеном обалом. Дужина брежне линије износи 83,5 km док је максимална дубина воде 105 m. Главни извори од којих се акумулација снабдева водом су река Црна са притокама: река Каменица, Дабнишка река, Блаштица, Сушица, Галишка река и Даљанска река.

Ова акумулација омогућава наводњавање 18300 ha пољопривредног земљишта у једном од најтоплијих и најсушнијих региона у земљи. Поред ове намене, вода из акумулације се такође користи за производњу електричне енергије у прибранској хидроелектрани са просечном годишњом производњом од 207 GWh.



Слика 3.1 Акумулација Тиквеш



### 3.2 ГЕОГРАФСКИ ПОЛОЖАЈ АКУМУЛАЦИЈЕ ТИКВЕШ

Сливно подручје акумулације Тиквеш представља просторну област која се протеже на две државе - југозападни део Републике Македоније и северни део Републике Грчке. Подручје се простире између  $40^{\circ}51'56''$  и  $41^{\circ}36'20''$  северне географске ширине и  $20^{\circ}56'45''$  и  $22^{\circ}4'58''$  источне географске дужине. Укупна површина сливног подручја (у обе државе) износи  $5356 \text{ km}^2$ , од којих Републици Македонији припада већи део који износи  $4451 \text{ km}^2$ , док Републици Грчкој припада површина од  $905 \text{ km}^2$ .



Слика 3.2 Сливно подручје акумулације Тиквеш

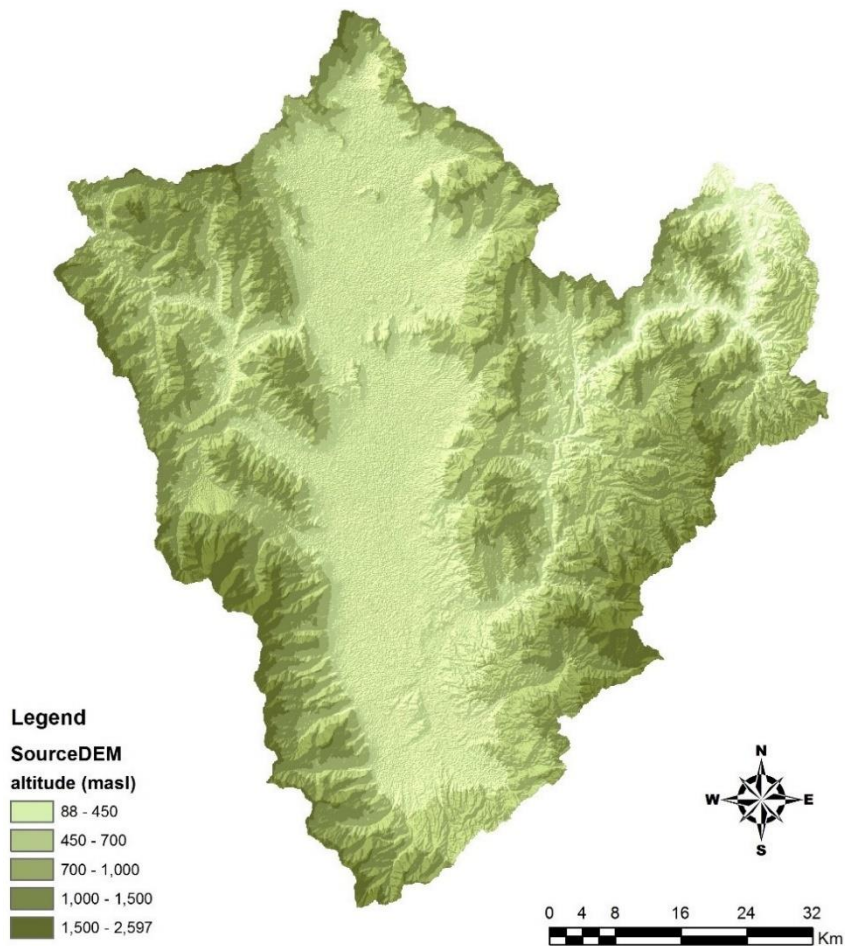
Надморска висина терена у сливу је између  $153 \text{ mNV}$  и  $2598 \text{ mNV}$ , просечна надморска висина је  $890,4 \text{ mNV}$ , просечни нагиб слива износи  $21,62\%$ , док просечни нагиб главног водног тока - реке Црна, износи  $4,41\%$ .

#### Физичко-географске карактеристике слива:

##### ➤ Релјефна структура

Већи и крупнији релјеф у Републици Македонији створен је углавном под дејством тектонских кретања у разним временским периодима, док су мањи морфолошки облици створени разним спољашњим утицајима путем дуготрајних и веома сложених природних процеса.

Рељефна структура у сливном подручју Црне реке је веома хетерогена и одликује се присуством већег броја облика старих, али и млађих рељефних форми: планина, котлина, долина, уских клисура и превоја.



Слика 3.3 Рељеф слива Црне реке - акумулације Тикवेश

Најзначајније форме међу крупнијим рељефом су **планине**. Према надморској висини, планине се деле на: изразито високе, високе, средње и ниске планине.

Као *изразито високе планинске форме* висине веће од 2500 mNV, могу да се издвоје планине: Баба, на којој се налази врх Пелистер 2601 mNV, планина Ниџе, са врхом Кајмакчалан 2520 mNV.

У *високо планински рељеф* висине изнад 2000 mNV спадају следеће планине: Илинска, Плакенска и Бигла, са врхом Сталев камен 1998 mNV.

*Средње планински рељеф* обухвата зону од 1500-2000 mNV. Планине које улазе у ову групу су: Бабуна, са врхом Козјак 1745 mNV, Бушева планина, са врхом Мусица 1788 mNV, Дрен, са врхом Ливада 1664 mNV.

*Ниско планински рељеф* обухвата форме висине до 1500 mNV. Рељефне форме у овој зони више нису праве планине, већ брда, међу којима као карактеристичније у сливном подручју Црне реке могу да се издвоје: Витачево, са претежном висином од 700 до 900 mNV, Древеник, са 1494 mNV и Голем врв (Велики врх) са 1172 mNV у Пелагонијској котлини, Облаковско-снеговска маса са Белкаменом 1430 mNV и Кочишки врх 1346 mNV, исто тако у Пелагонијској котлини.

Највећа равница у сливу Црне реке је Пелагонијска котлина која се дели на три дела: Прилепско, Битољско и Леринско поље. Поред Пелагонијске котлине постоје и друге равнице у сливу, као што су: Мариовска висораван и Демирхисарска котлина, које могу да се издвоје као посебне геоморфолошке целине у сливу Црне реке.

### ➤ Геолошка и педолошка грађа терена

О геологији испитиваног подручја постоји велики број података, који се налазе у разним научним студијама и извештајима. Најдетаљнији подаци налазе се у геолошким картама о подручју и њиховим тумачима, Слика 3.4. Геолошки састав, као и геолошка историја подручја у тесној је корелацији са рељефом и генезом покривача тла, па у том смислу и састав матичних стена, слично као и рељеф, може да се групише у неколико геотектонских и геоморфолошких целина: (а) геолошки састав планинског оквира, (б) геолошки састав таласасто-брежуљкастих (брдовитих) терена, (в) геолошки састав падинских терена и (г) геолошки састав равног дна.

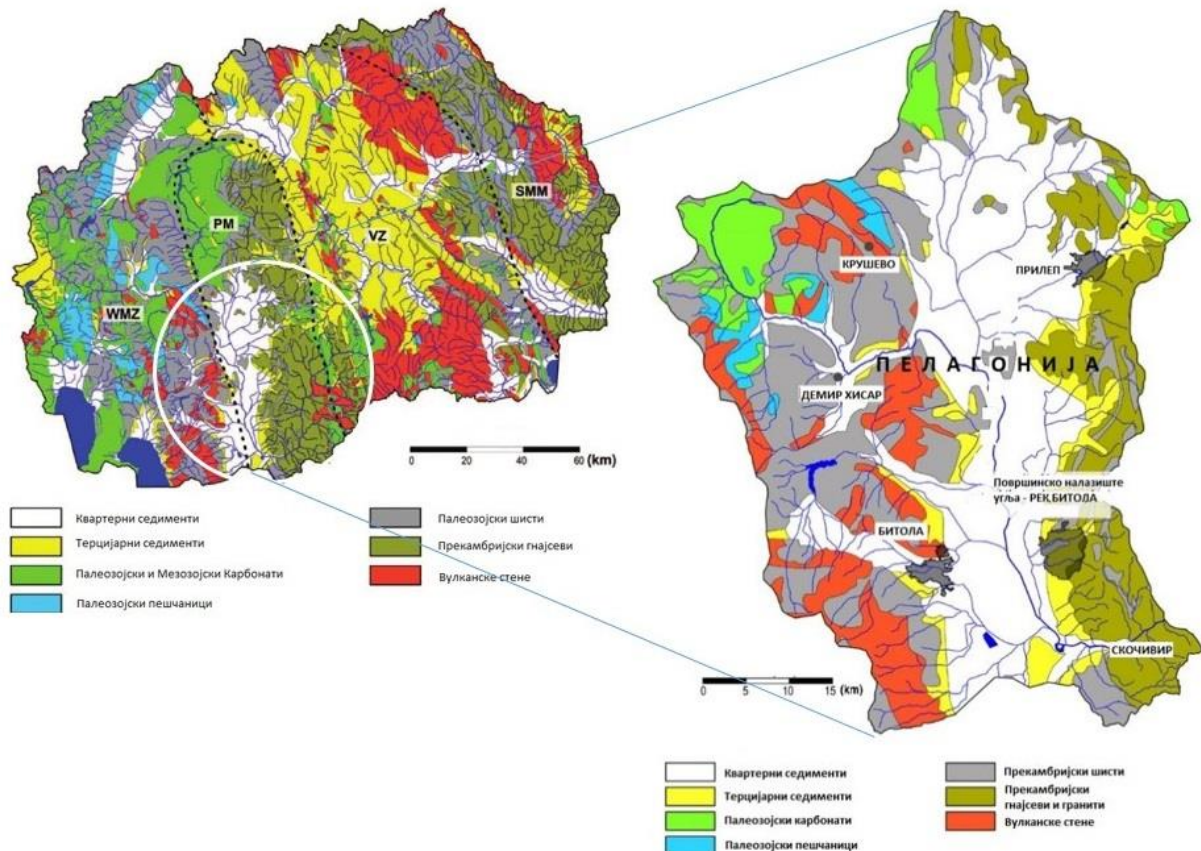
Планински оквир је старији од терцијера, кад су формиране неке магматске стене у западном планинском оквиру (гранити), а формиран је и басен Пелагонијске котлине са тектонским спуштањем у виду две тектонске линије у правцу север-југ. У неогену су ове тектонске линије испуњене водом и седиментима из околних река и формирано је Пелагонијско језеро које је, након пробијања прага код Сочивира, истекло кроз Црну реку у Егејско море. У овом периоду, током Црне реке ношене су огромне количине наноса које су препокривале основно дно реке састављено од чврстих стена, истих оних од којих је формиран и планински оквир. У том периоду на периферном делу басена формиране су језерске терасе од којих је мали део сачуван и данас, док је њихов највећи део препокривен савременим алувијалним или делувилним наносима.

У источном делу испитиваног подручја, планински оквир је састављен од гнајсева, микашиста, док се на мањим локацијама срећу амфиболски и амфиболско-биотитски шкриљци. Најраспрострањенији су гнајсеви, код којих доминирају дволискунски гнајсеви. Микашисти су распрострањени дуж Селечке планине. Магматске стене су састављене од гранита, гранодиорита, а на врло малим локацијама од диорита и дијабаза, који немају веће значење за педогенезу. Планински масиви на западној граници испитиваног подручја претежно су састављени од метаморфних стена, међу којима доминирају шкриљци и то: филити, филитомикашисти, микашисти, хлоритски шкриљци



и др. Поред тога, на неким локацијама утврђено је и присуство амфиболита и амфиболских шкриљаца. Кристалasti шкриљци на већим просторствима пробијени су гранитским масивима.

Кречњачки масиви се јављају у северном делу проучаване области, на путу Прилеп-Битола, као и у околини Плетвара.



Слика 3.4 Геолошка карта Републике Македоније и Пелагонијске котлине

У јужном делу Пелагоније среће се неколико локалитета на чијим седиментима су формиране смолнице. Језерски седименти су састављени од песка, глина, лапоровитих глина и конгломерата, док местимично има слојева кречњака. Ови седименти формирају терасе од којих највиша има 770 m, а најнижа 620-630 m.

У подножју планинског оквира, читавим ободом Пелагонијске котлине, формирани су нагнути терени састављени од делувијалних наноса, настали таложењем еродираниог материјала са виших планинских и брдских терена. Осим у изузетним случајевима, по свом саставу су бескарбонатни и састоје се од распаднутог материјала киселог тла са виших терена или материјала са распаднутих стена. По текстури, ови наноси су песковито-иловести или иловасто-песковити, при чему у вишим деловима делувијалних конуса и ближе коритима бујица имају грубљи састав и богатији су скелетом. На овим

наносима образују се колувијална тла, а на одређеним изравнатим локацијама могућа је и појава циментног шумског тла.

Равно дно котлине састављено је од кристаластих шкриљаца на којима су најпре наталожени језерски седименти покривени савременим делувијалним наносима и алувијалним наносима у околини Црне реке и њених притока. Алувијални наноси најчешће су дубљи и од 10 m. Састављени су од слојева различитог грануломеријског састава, у зависности од интензитета поплавних вода којима су формиран посебни слојеви, па се тако на одређеној дубини јављају слојеви песка или шљунка, док су одређени слојеви (најчешће површински) финије сортирани (иловаст, глинаст или песковито-глинаст).

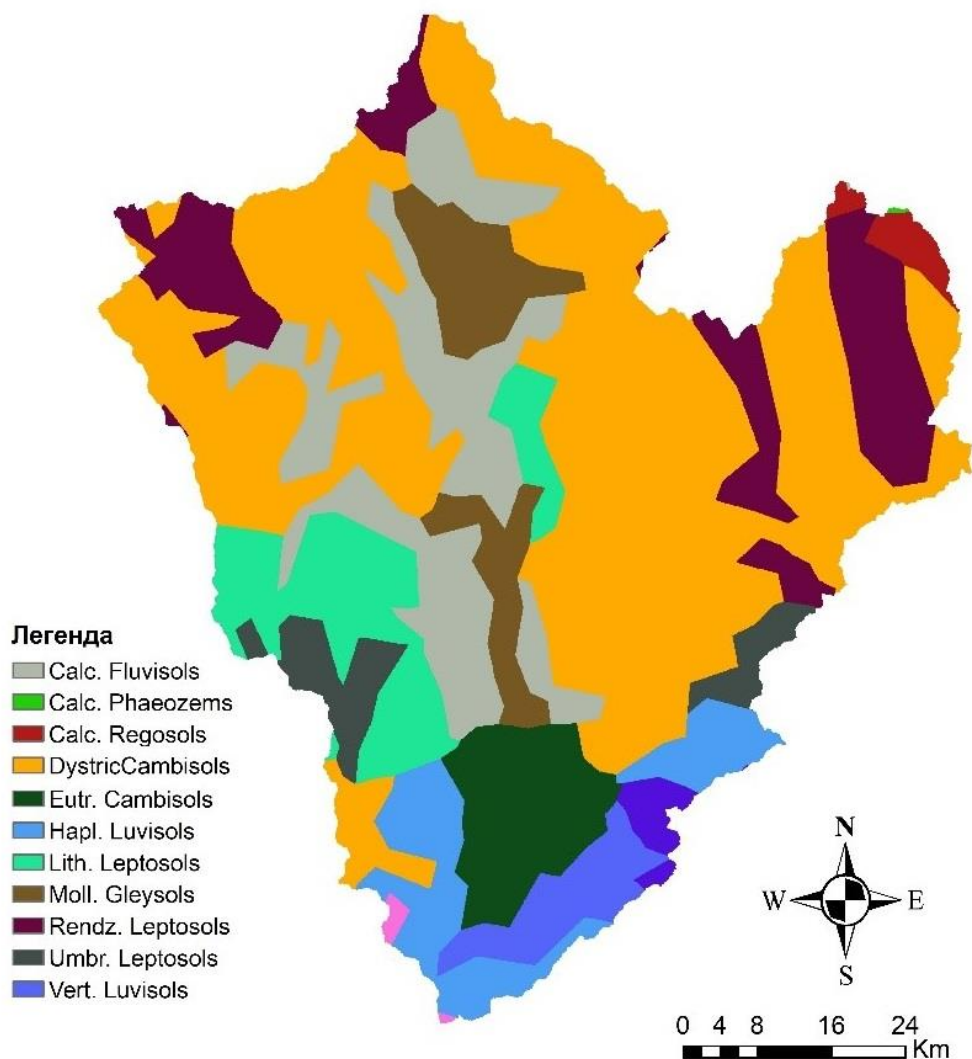
Од велике важности за генезу ових типова тла је минеролошко-петрографски састав ових наноса, као што је: садржај глине, карбонати и др. Поред појаве алувијалних типова тла, на већим површинама формирана су тзв. хидроморфна тла: флувијатилно-ливадска, глејна, хидрогене црнице, тресети, а утврђено је и формирање халоморфних типова тла: солончак и солоњец.

Геологију Мариовске висоравни претежно чине прекамбријске и мезозојске магматске и метаморфне стене, као и плиоценско-квартерни седименти. Из прекамбријског периода најзаступљенији су гнајсмикашисти, гранодиорити и разни шкриљци на којима је формиран највећи део кафеног шумског тла, ранкери, регосоли и литосоли, који се јављају као појединачне картографске јединице или у комплексима.

Од осталих прекамбријских стена срећу се кречњачке секвенце састављене од доломитских и калцитских мермера, на којима се образују кафена тла изнад кречњака и доломита и кречњачко-доломитне црнице. На неким кречњацима образоване су рендзине. Мезозојски комплекс се састоји од магматских стена и тријаских седимената, док се плиоценски седименти састоје од пескова и глина на којима су образовани регосоли у комплексу са циментним шумским тлом и моличним ранкерима. Осим тога, на одређеним локалитетима срећу се и пролувијални и делувијални наноси на којима се образују колувијална и млада циментна тла. Мапа педолошких карактеристика тла у сливу Црне реке према класификацији FAO дата је на Слици 3.5. Мапа укључује 11 врста тла, која су заступљена у сливном подручју са следећим међусобним односом:

**Табела 3.1** Заступљеност типова земљишта у сливу (FAO HWSD)

Тип земљишта		Површина (km <sup>2</sup> )	% од укупне површине слива
Dystric Cambisol	Дистрични камбисол	2416.99	45.13
Calcaric Fluvisol	Колувијална земља	688.01	12.85
Rendzic Leptosol	Кречњачко-доломитна црница	534.46	9.98
Lithic Leptosol	Циметна шумска земља	476.16	8.89
Haplic Luvisol	Лувисол	300.73	5.62
Mollic Gleysol	Мочварно-глејна земља	298.12	5.57
Eutric Cambisol	Еутрични камбисол	272.99	5.10
Umbric Leptosol	Лептосол	168.55	3.15
Vertic Luvisol	Лувисол	148.01	2.76
Calcaric Regosol	Регосол	50.61	0.94
Calcaric Phaeozem	Палеозем са великим процентом хумуса	1.14	0.02



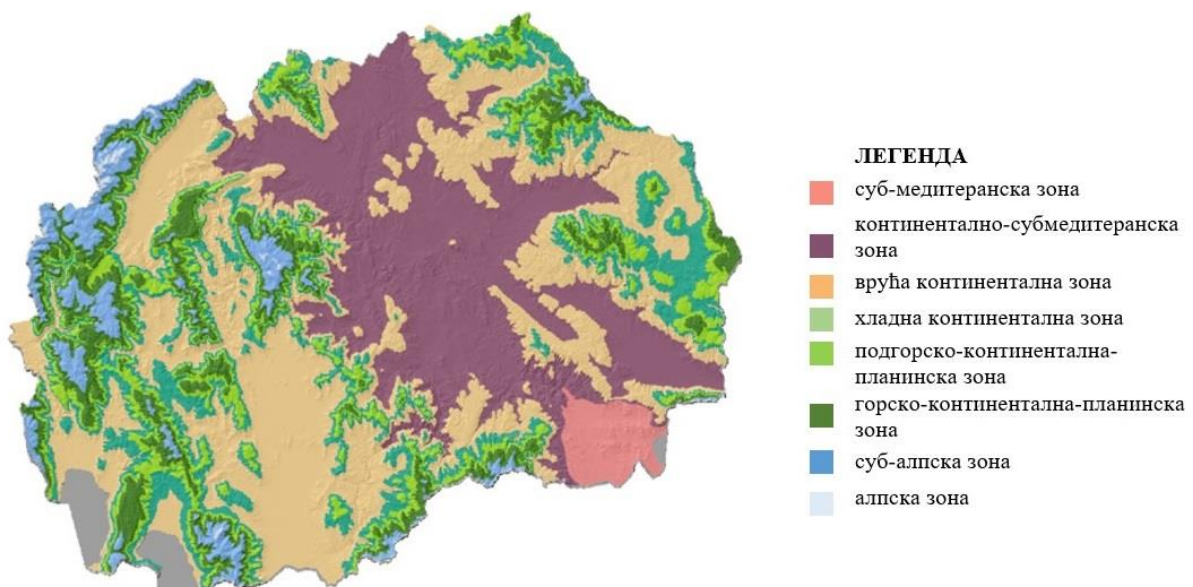
**Слика 3.5** Тип земљишта према класификацији FAO

## Климатске карактеристике

Климатски услови у испитиваном подручју уско су повезани са надморском висином, што условљава и различите климатско-вегетационе појасеве и појасеве тла. Према се подручје налази веома близу медитеранском појасу, присуство високих планинских масива на југу и западу, као и већа надморска висина, доприносе минималном утицају медитеранске климе, која се углавном одражава у падавинском режиму појавом сувих и топлих лета. Генерално, испитивано подручје је под утицајем две зоналне климе: континенталне и донекле планинске климе. Планине које сачињавају планински оквир: Баба, Ниџе и Козјак, налазе се под утицајем планинске климе, док је остали део подручја под утицајем континенталне климе, уз извештан слаб утицај измењене медитеранске климе која се осећа дуж кањона Црне реке у Мариову. Својеврсна специфичност је појава тзв. температурне инверзије у зимском периоду у Пелагонијској котлини, која често утиче на климатске показатеље.

Према подели Филиповског, Ђ. и сар. (1996) Слика 3.6, територија испитиваног подручја припада следећим климатско-вегетационим зонама и зонама тла:

- 1.2 Топло континентало подручје: 600-900 m
- 2.2 Хладно континентало подручје: 900-1100 m
- 3.2 Подгорско континентално планинско подручје: 1100-1300 m (најнижи планински терени)
- 4.2 Горско континентално планинско подручје: 1300-1650 m (средње високи планински терени)
- 5.2 Субалпско планинско подручје (зона): 1650-2250 m и
- 6.2 Алпско подручје: изнад 2250 m.



Слика 3.6 Климатско-вегетационе зоне у Републици Македонији

Климатске карактеристике слива Црне реке у периоду од 1961. до 1991. године анализирани су кроз следеће климатске параметре: температура ваздуха, плувиометријски режим, облачност, релативна влажност ваздуха и ветровитост у региону. Климатски подаци о региону у анализираном периоду били су доступни за 20 мерних станица, Табела 3.2, Слика 3.7. Међу њима, станице лоциране у Крушеву, Прилепу и Битољу су главне метеоролошке станице у којима су мерени сви климатски параметри, док су у осталих 17 кишомерних станица регистровани само подаци о падавинама на дневној основи.

*Плувиометријски режим, тј. падавине*, анализирани на основу њихове појаве, трајања, месечних и годишњих сума, интензитета, агрегатног стања и сл., један су од најзначајнијих елемената који одликују особитости климе у сливу Црне реке.

Средње годишње суме падавина за дотични период крећу се од 443 mm за станицу Скочивир до 763 mm за станицу Крушево. Средње годишње суме падавина су најмање код локалитета који се налазе у фронталној зони умерено-континенталне и медитеранске климе, односно субмедитеранске климе. То су првенствено станице: Скочивир са 443 mm, Старавина са 444 mm и Чаниште са 491 mm средње годишњих сума падавина.

Табела 3.2 Локација и намена метеоролошких станица

Ид.бр.	Име станице	Намена	Латитуда	Лонгитуда	Надморска висина mNV	Psr.mes. mm	ΣPgod. mm
1	Бело Поле	кишомерна	41.417	21.400	608	48.6	583
2	Крушево	климатолошка	41.367	21.250	1230	64.0	763
3	Шешково	кишомерна	41.367	21.917	620	43.5	522
4	Бегниште	кишомерна	41.350	22.000	500	45.4	545
5	Растојца	кишомерна	41.333	21.200	720	55.1	661
6	Прилеп	климатолошка	41.333	21.567	673	44.0	524
7	Славеј	кишомерна	41.333	21.417	602	43.0	516
8	Доленци	кишомерна	41.317	21.100	700	60.4	725
9	Вардино	кишомерна	41.233	21.250	650	53.0	636
10	Рожден	кишомерна	41.183	21.950	925	48.8	586
11	Чаниште	кишомерна	41.167	21.700	600	40.9	491
12	Бешиште	кишомерна	41.133	21.783	910	47.8	573
13	Маково	кишомерна	41.117	21.617	690	49.9	599
14	Старавина	кишомерна	41.083	21.733	860	37.0	444
15	Битола	климатолошка	41.050	21.367	630	49.0	586
16	Новаци	кишомерна	41.033	21.467	577	43.7	524
17	Гнеотино	кишомерна	40.983	21.483	576	53.9	647
18	Скочивир	кишомерна	40.967	21.650	580	36.9	443
19	Бач	кишомерна	40.933	21.567	610	48.0	576
20	Креница	кишомерна	40.933	21.450	585	45.5	546

Највеће средње годишње суме падавина јављају се код станица са умерено-континенталном климом, где је у извесној мери присутан и утицај високих планинских масива. То је углавном подручје од изворишног-горњег дела слива Црне реке који је представљен станицама: Растојца, Доленци и Крушево. Средње годишње суме падавина код ових кишомерних станица износе: Растојца 661 mm, Доленци 725 mm и Крушево 763 mm.

На основу расподеле падавина може се констатовати да се код скоро свих анализираних кишомерних станица максимум јавља у месецима новембру и децембру, након чега следе месеци октобар и јануар. Минималне количине падавина јављају се у месецима јул и август, а затим следе септембар и јун итд.

На основу расподеле падавина по годишњим добима, најбогатији падавинама је период јесени, а затим следе зима, пролеће и лето.

Ванвегетациони период је знатно богатији падавинама од вегетационог, што се свакако негативно одражава на развој и виталност биљног света, као и на повећавање ерозивног потенцијала у сливу.

Распоред средње годишњих количина падавина по месецима и сезонама, као и присуство одређених једногодишњих и вишегодишњих биљака, наводи на констатацију да је највећи део сливног подручја Црне реке под утицајем умерено-континенталне климе.

**Температура ваздуха** је такође један од значајнијих климатских елемената. Анализом вредности средње годишњих, средње месечних, највиших и најнижих средње месечних и средње годишњих, просечних месечних и годишњих максималних и минималних и апсолутних месечних и годишњих максималних и минималних температура ваздуха, детерминише се владајући климатски тип у подручју, односно региону. Температурни режим у сливном подручју акумулације Тиквеш анализиран је на основу података у станицама: Крушево, Прилеп и Битола.

- Средње годишња температура ваздуха је најнижа код станице Крушево. За период 1961-1991, износи 8,4 °C. Средње годишња температура ваздуха за станице Прилеп и Битола у овом периоду је иста и износи 11 °C.
- Апсолутне максималне средње месечне температуре ваздуха за период 1961-1991. су у границама од 27,2 °C код станице Крушево, 41,2 °C код станице Битола, до 41,5 °C код станице Прилеп.
- Амплитуде екстремних температура су прилично велике и крећу се у границама од 35,9 °C за Крушево, 65,1 °C за Прилеп и 69.2 °C за Битола.

- Најтоплији месеци код свих станица у сливу, као уосталом и у читавој Републици Македонији, су јул и август, са средње месечним температурама од 17,9 °C у месецу јулу у Крушеву, 21,5 °C у Прилепу до 21,7 °C у истом месецу у Битоли.
- Најхладнији месец код свих станица је јануар, са средње месечним температурама од -0,3 °C у Прилепу, -0,8 у Битоли до -1,3 °C у Крушеву.

Као остале климатске карактеристике слива Црне реке евидентирани су: магла, облачност, релативна влажност ваздуха.

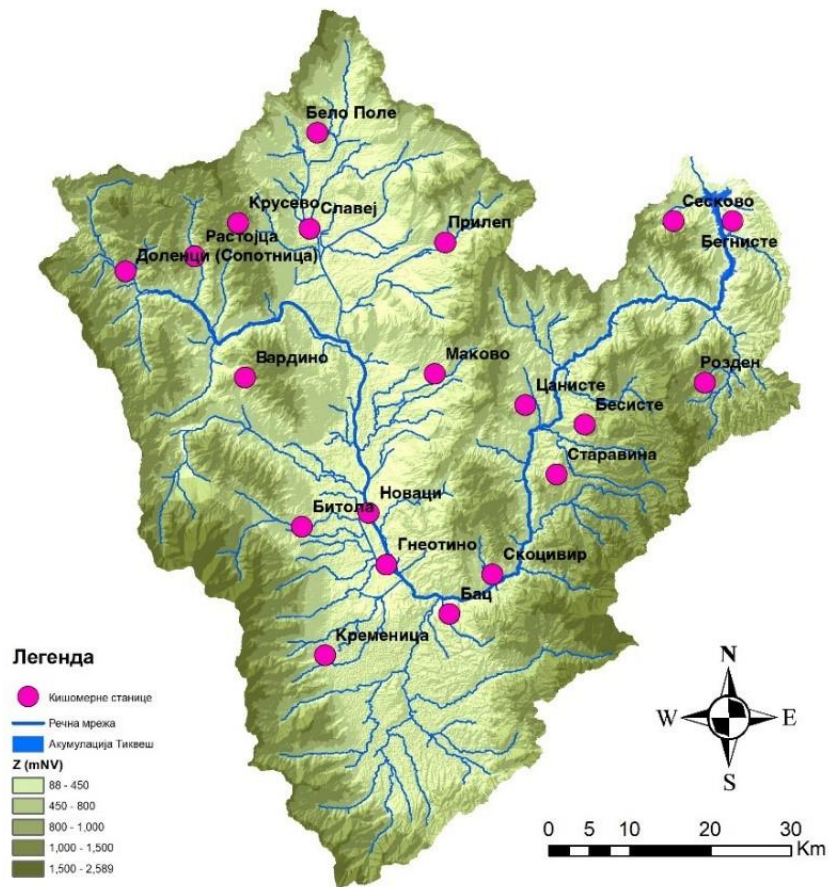
**Облачност** у сливу Црне реке се креће са просечном годишњом облачношћу од 4,86 до 5,21 десетина. Облачност од јануара до августа се смањује, а затим се повећава према децембру. Највећом просечном месечном вредношћу одликује се јануар, а најмањом август.

Средња годишња **релативна влажност** ваздуха у сливу Црне реке за истраживани период кретала се од 69,0% до 73,01% док се средње месечна релативна влажност креће од 55,5% до 83%. Релативна влажност је нешто већа у средњем току Црне реке у битолском делу Пелагонијске котлине у поређењу са прилепским делом. Она има свој годишњи режим и од јануара до августа се смањује, па се затим од овог месеца до децембра повећава са максимумом у јануару и минимумом у августу.

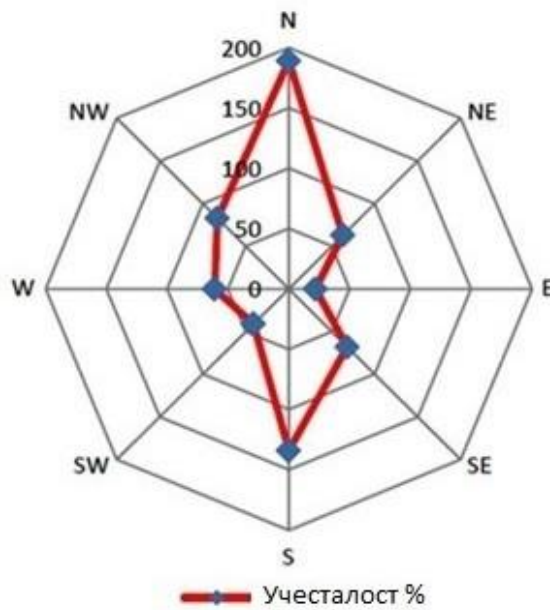
**Ветровитост** је исто тако важан климатски елемент у сливу Црне реке и представља једно од основних обележја климе у региону.

- У *изворишном делу* Црне реке, у Крушевском и Демирхисарском региону, преовлађују ветрови са запада и севера, а у слабијем интензитету се јављају и североисточни, југозападни и источни ветар.
- У *средњем току* Црне реке у Битолском пољу дувају северни и јужни ветар, у прилепском делу Пелагоније дувају ветрови североисточног и југозападног правца, у Мариову дувају ветрови северног, североисточног, северозападног, јужног, југоисточног и југозападног правца.
- У *доњем току* Црне реке најзаступљенији су ветрови: северног, североисточног, јужног и југозападног правца.





Слика 3.7 Кишомерне станице у сливу акумулације Тиквеш

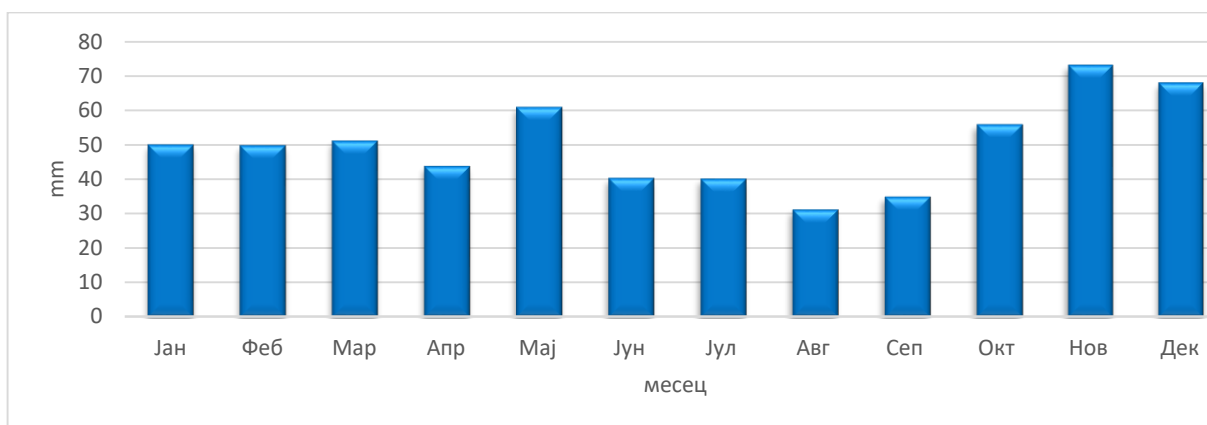


Слика 3.8 Ружа ветрова за град Битола

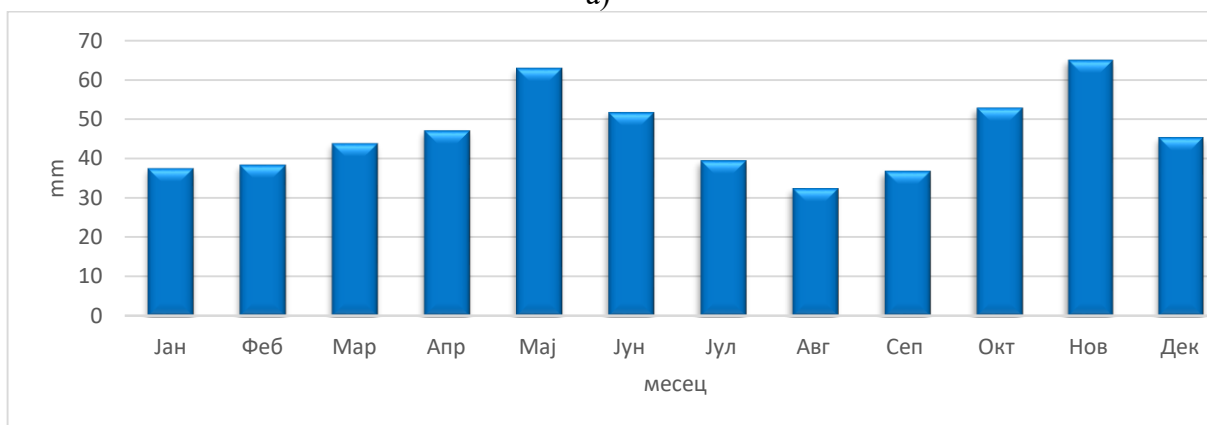


**Табела 3.3** Просечне месечне падавине регистроване у главним метеоролошким станицама

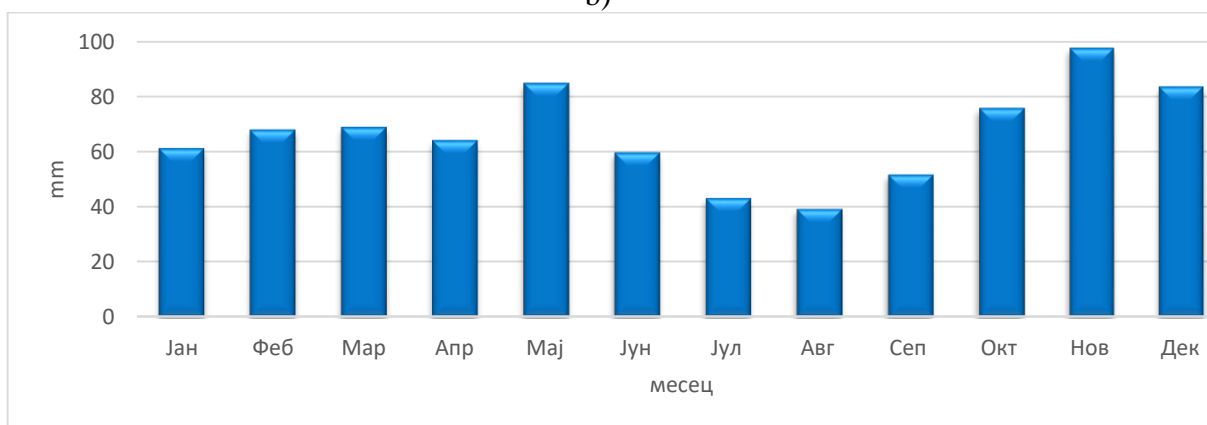
р.б	Станица	Јан	Феб	Мар	Апр	Мај	Јун	Јул	Авг	Сеп	Окт	Нов	Дек	Год.сума
1	Битола	50.2	47.1	48.3	47.5	59.7	38.0	39.3	33.6	36.8	51.5	67.2	66.5	585.7
3	Прилеп	35.7	35.9	41.3	47.3	60.7	48.3	38.8	32.4	34.6	44.8	60.4	43.4	523.6
3	Крушево	61.4	63.3	67.4	67.1	81.0	55.8	47.2	40.6	45.5	71.0	88.2	74.6	763.0



a)



b)

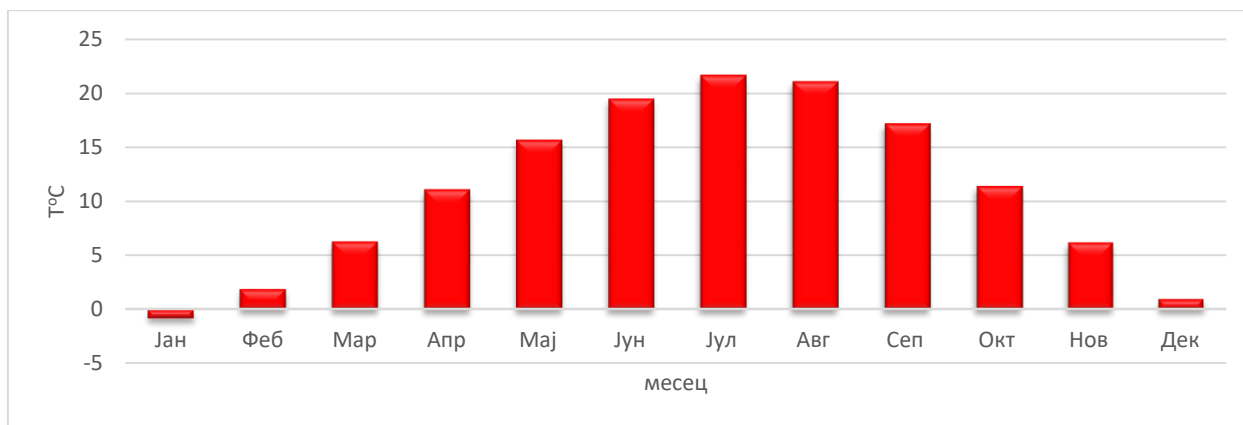


c)

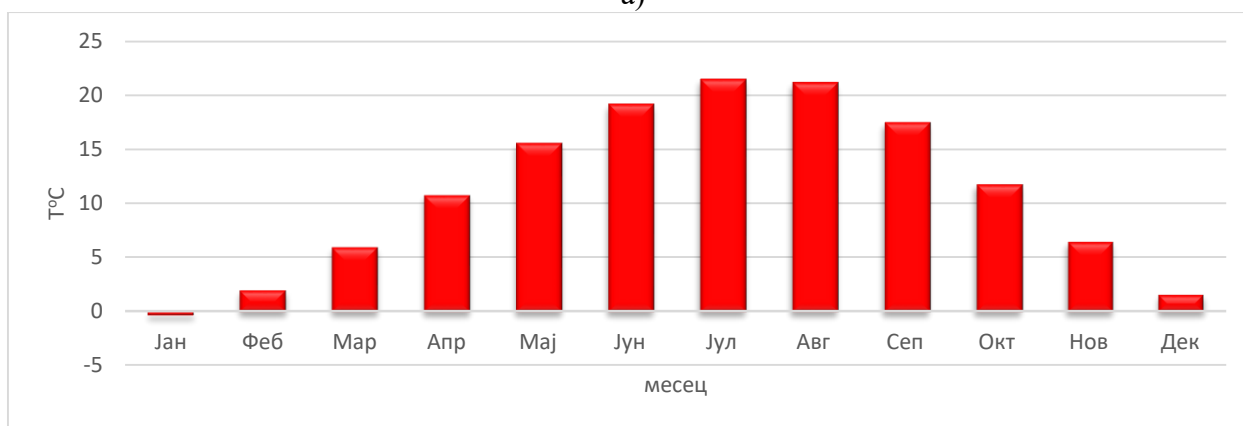
**Слика 3.9** Просечне месечне падавине регистроване у станици а) Битола , б) Прилеп и с) Крушево

**Табела 3.4** Просечне температуре за главне метеоролошке станице во сливу, T(°C)

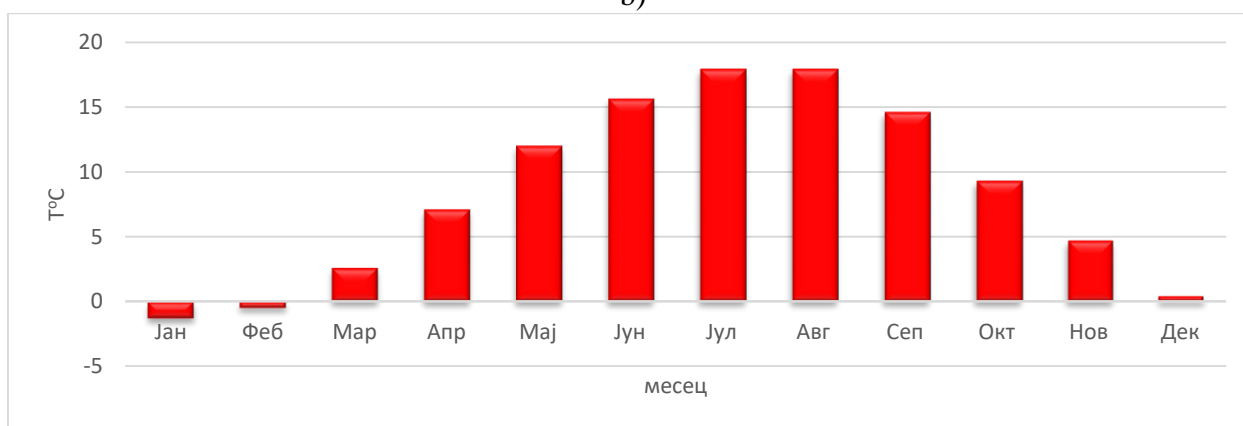
р.б	Станица	Јан	Феб	Мар	Апр	Мај	Јун	Јул	Авг	Сеп	Окт	Нов	Дек	Просек
1	Битола	-0.8	1.9	6.3	11.1	15.7	19.5	21.7	21.1	17.2	11.4	6.2	1	11.03
2	Прилеп	-0.3	2	6	10.8	15.6	19.2	21.5	21.2	17.5	11.8	6.5	1.6	11.12
3	Крушево	-1.3	-0.5	2.6	7.1	12	15.6	17.9	17.9	14.6	9.3	4.7	0.4	8.36



a)



b)

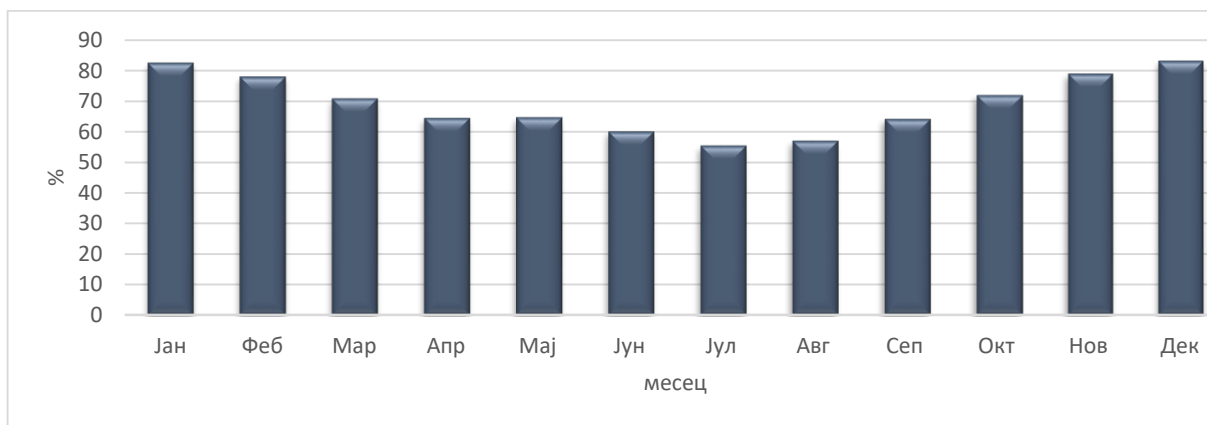


c)

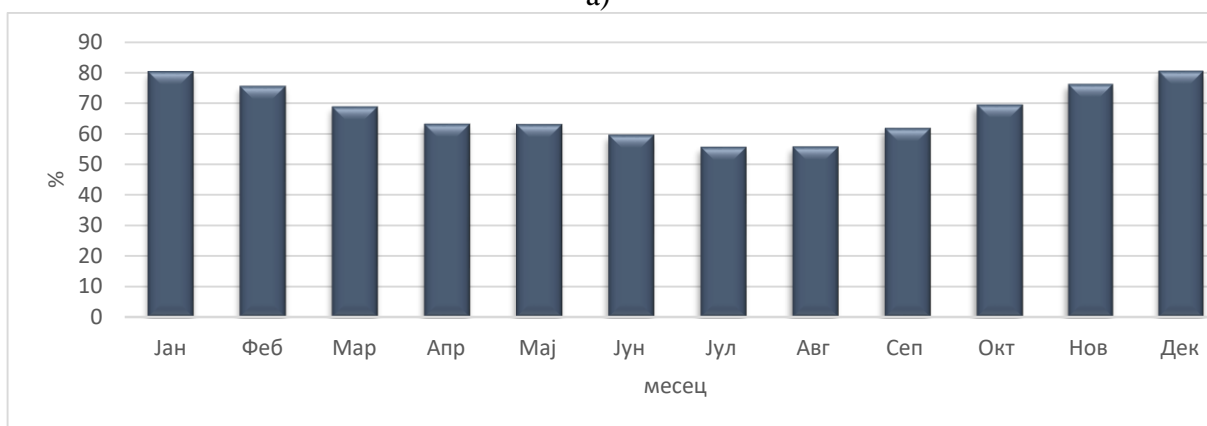
**Слика 3.10** Просечне месечне температуре ваздуха регистроване у станици а) Битола , б) Прилеп и с) Крушево

**Табела 3.5** Просечна релативна влажност ваздуха за главне метеоролошке станице у сливу (%)

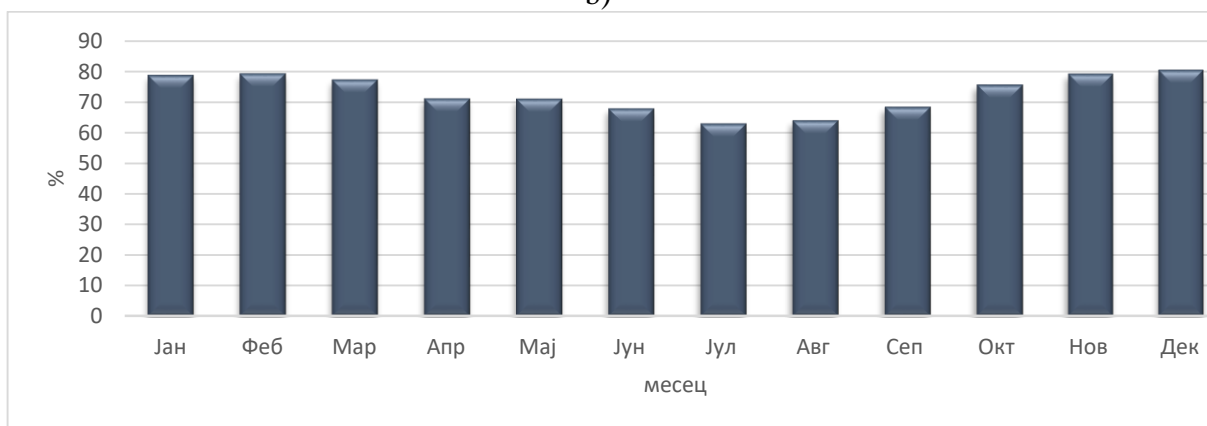
р.б	Станица	Јан	Феб	Мар	Апр	Мај	Јун	Јул	Авг	Сеп	Окт	Нов	Дек	Просек
1	Битола	82.6	78.1	70.87	64.57	64.77	60.17	55.53	57.1	64.17	72	79.03	83.23	69.34
2	Прилеп	80.37	75.6	68.87	63.17	63.07	59.6	55.63	55.8	61.87	69.47	76.23	80.5	67.51
3	Крушево	78.79	79.29	77.36	71.11	71	67.86	62.96	64.04	68.43	75.68	79.18	80.43	73.01



a)



b)

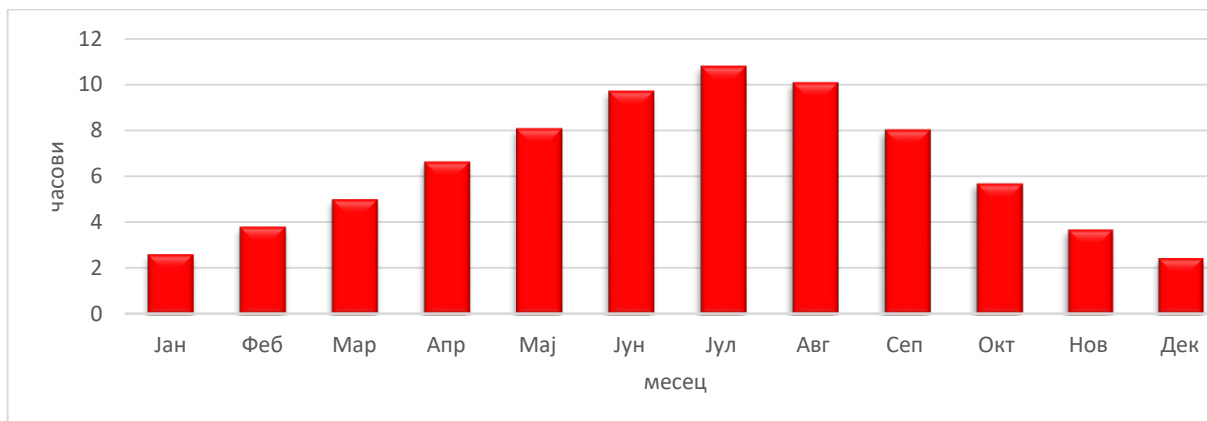


c)

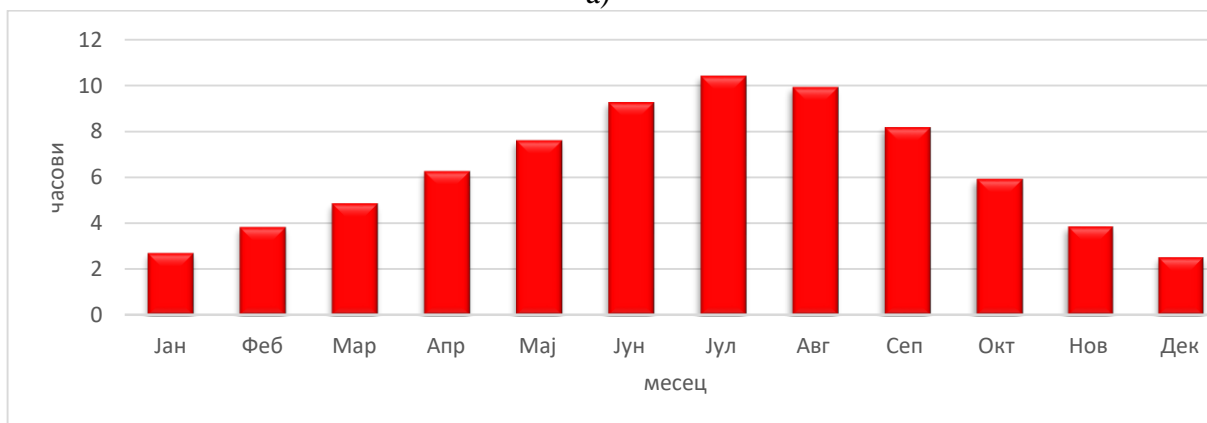
**Слика 3.11** Просечна релативна влажност ваздуха регистрована у станици а) Битола , б) Прилеп и с) Крушево

**Табела 3.6** Просечно трајање сунчане радијације за главне метеоролошке станице у сливу (h)

р.б	Станица	Јан	Феб	Мар	Апр	Мај	Јун	Јул	Авг	Сеп	Окт	Нов	Дек	Просек
1	Битола	2.62	3.82	5.01	6.64	8.08	9.71	10.78	10.07	8.03	5.69	3.7	2.45	6.38
2	Прилеп	2.71	3.84	4.88	6.28	7.61	9.28	10.43	9.93	8.19	5.94	3.87	2.53	6.29



a)

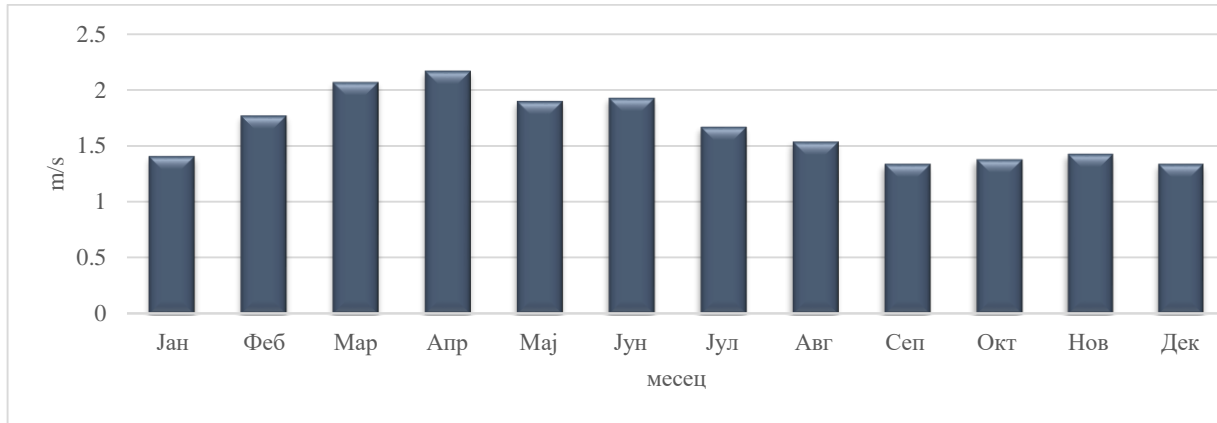


b)

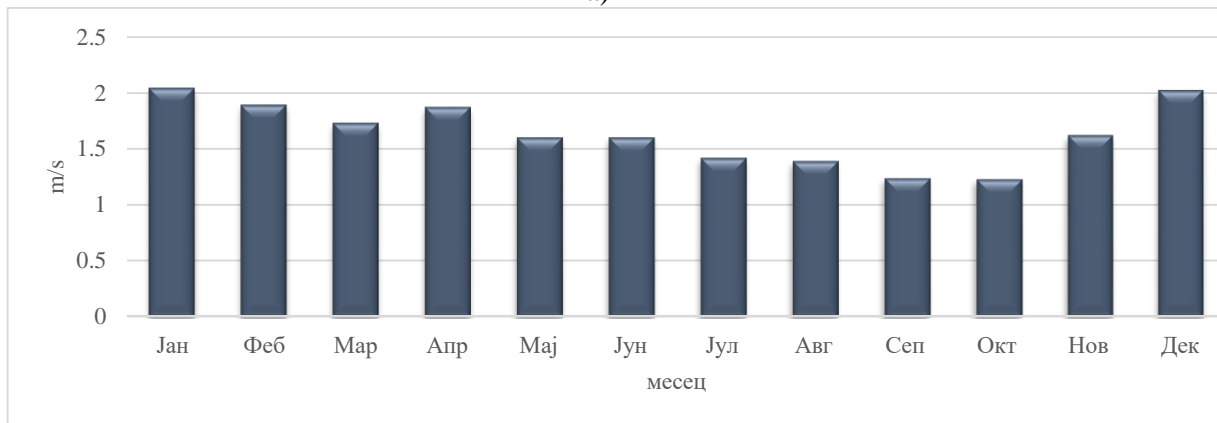
**Слика 3.12** Просечно трајање сунчане радијације регистровано у станици а) Битола и б) Прилеп

**Табела 3.7** Просечна брзина ветрова у главним метеоролошким станицама во сливу (m/s)

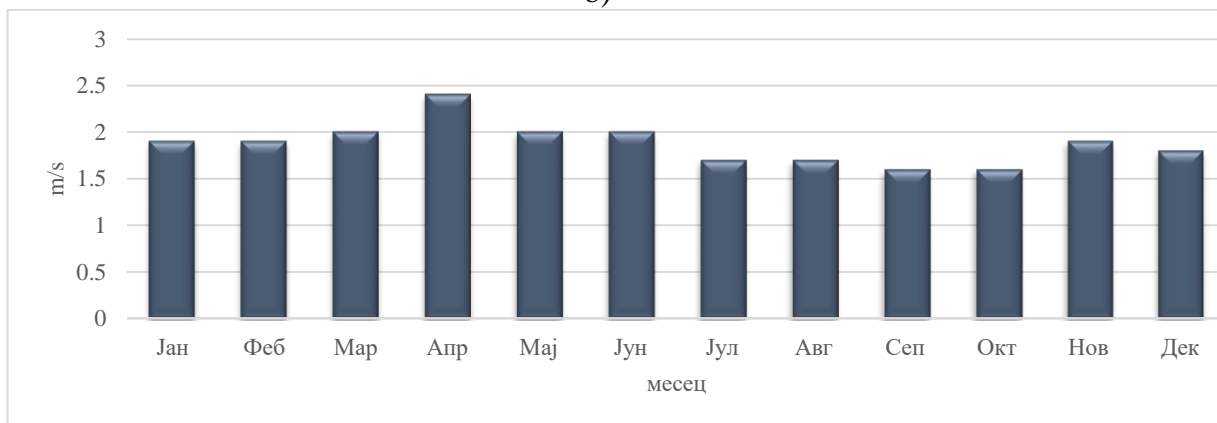
р.б	Станица	Јан	Феб	Мар	Апр	Мај	Јун	Јул	Авг	Сеп	Окт	Нов	Дек	Просек
1	Битола	1.41	1.77	2.07	2.17	1.9	1.93	1.67	1.54	1.34	1.38	1.43	1.34	1.66
2	Прилеп	2.04	1.89	1.73	1.87	1.6	1.6	1.42	1.39	1.24	1.23	1.62	2.02	1.64
3	Крушево	1.9	1.9	2	2.4	2	2	1.7	1.7	1.6	1.6	1.9	1.8	1.88



a)



b)



c)

**Слика 3.13** Просечна брзина ветрова регистрованих у станици а) Битола , б) Прилеп и с) Крушево

### 3.3 ХИДРОГРАФИЈА

Хидрографски услови су уско повезани са рељефом, геологијом и климатским условима. Са околног планинског оквира, а нарочито у западном делу региона, сливају се кратки речни токови бујичног карактера који врше интензивну ерозију и седиментацију еродираниог материјала у дну котлине, што представља основни процес формирања делувијалних конуса на којима су формирана колумбијална тла. У нижим деловима проучаваног региона, хидрографски услови знатно утичу на формирање хидроморфног тла, при чему је јако изражен утицај подземних вода које се одликују јаким сезонским осцилацијама нивоа, као и утицај површинских вода кроз повремене поплаве, нарочито током Црне реке и њених притока. Две основне специфичности хидрографских услова су: релативно равно дно Пелагонијске котлине, што утиче на спору евакуацију вишка вода из котлине што доводи до повремених поплава и кратки бујични токови на њеним притокама који посебно у пролеће носе велике количине воде и еродираниог седимента.

Генерално, хидрографски услови утичу на ерозивне процесе преко (а) речне мреже, (б) повремениог прекомерног влажења површине тла, (в) утицаја подземних вода и (г) наводњавања.

- **Речна мрежа**

Црна река је главни реципијент свих површинских вода у Пелагонијској котлини. Целокупни регион припада Егејском сливу који је највећи слив у држави. Укупна површина слива Црне реке до улива у реку Вардар износи приближно 5775 km<sup>2</sup>, од којих приближно 4000 km<sup>2</sup> припада Пелагонијској котлини <sup>1</sup>. Црна река има неколико главних притока које у већој или мањој мери имају бујични карактер. Најважнија притока Црне реке је Елешка река, која дотиче са грчке стране. Осим тога, има још неколико мањих притока са израженим бујичним карактером, међу којима су најважније: Бистричка река, Вир и Лажечка река. Поред тога, са леве стране Црне реке улива се још неколико река бујичног карактера које прикупљају воде из Битољског поља, као нпр. Мртвачка река, Марулска, Подмолска, Лопатичка, Моичка, Црнечка и Синевир.

Значење речне мреже за педогенетске процесе и редистрибуцију наносног материјала у сливу Црне реке одражава се кроз неколико процеса:

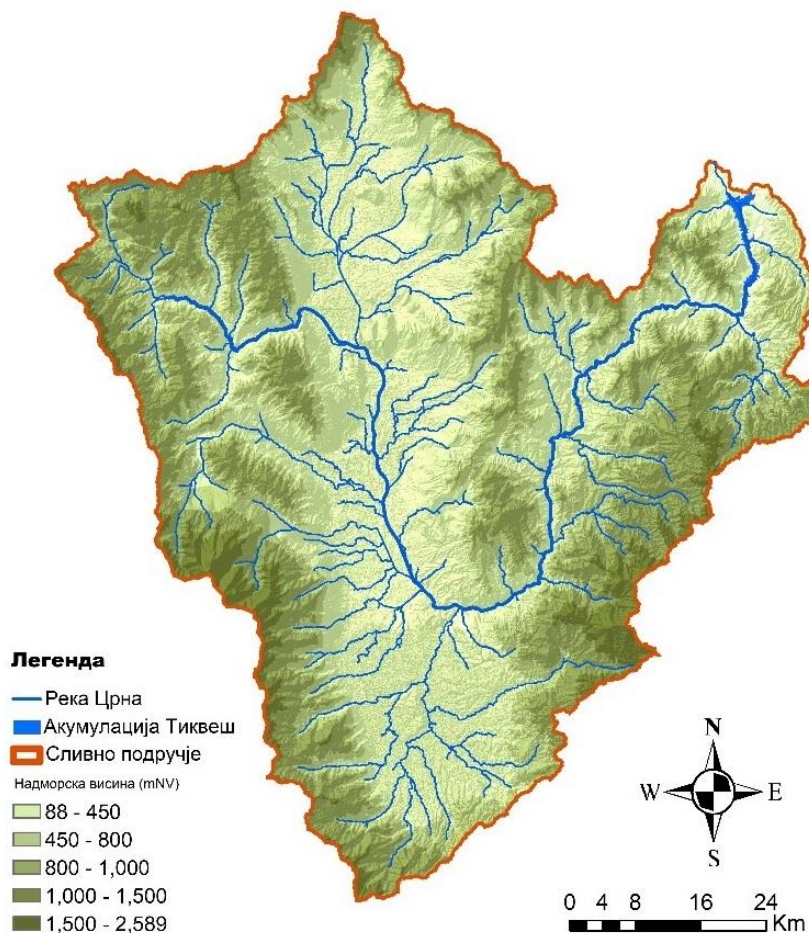
Бујични карактер највећег дела притока узрокује јаке ерозивне процесе (површинску, браздасту и јаружасту ерозију), при чему се формира огромна количина седимента. Овај материјал се затим транспортује на релативно кратко растојање и акумулира у нижим деловима котлине, при чему се формирају делувијални седименти од грубог материјала у подножју планина и фини алувијални седименти у дну котлине.

---

<sup>1</sup> Површина слива до бране Тиквеш износи 5356 km<sup>2</sup>

Овај материјал подиже корита река у котлини и узрокује појаву повремених поплава околних терена.

Повремене поплаве на равним теренима доводе до таложења финог материјала (муља) који обнавља плодност алувијалног тла у котлини. С друге стране, у горњем делу бујица у неким случајевима (интензивне падавине и јака ерозија) долази до акумулације грубог инертног материјала који препокрива плодна тла.



Слика 3.14 Речна мрежа у сливу Црне реке

- **Подземне воде**

Подземне воде у Пелагонијској котлини могу да се поделе у две групе и то: плитке подземне воде и артешки аквифери, који се налазе на већој дубини и немају никакав или имају веома мали утицај на педогенезу тла у котлини. С друге стране, плитке подземне воде, услед њихове близине површини и јаке сезонске флукуације, узрокују појаву специфичних хемијских и биолошких услова који директно утичу на правац еволуције тла, као нпр., акумулација велике количине органске материје специфичног хидроморфног карактера, што је резултат неповољних услова за њено разлагање, појава

редукционих услова, у неким случајевима акумулација соли и др. Због свега наведеног, кад се говори о подземним водама, од највећег значаја је њихов ниво, сезонска осцилација, количина и састав лакорастворљивих соли, мобилност подземних вода, а у вези с тим и ниво раствореног кисеоника у њима, од чега зависи појава редукционих услова у профилу тла.

### 3.4 БИОГЕОГРАФСКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

Значење вегетације у сливу издваја се првенствено као фактор који утиче на састав и количину органске материје у тлу, од чега директно зависи и правац педогенетских процеса у региону. Поред тога, вегетација знатно утиче и на интензитет ерозивних процеса, као и на локалну модификацију климатских услова у сливу.

Коришћење земљишта и утицај човека одражава се на више начина који утичу на појаву различитих облика деградације, међу којима је и ерозија тла. Као резултат све бржег развоја пољопривреде и потребе за новим пољопривредним површинама, део површина под природном вегетацијом је био разоран, а вегетација уништена. Овај процес, у комбинацији са масовном непланском сечом, а посебно на нагнутим теренима, изазвао је убрзане ерозивне процесе; као резултат тога, у кратком периоду уништен је површински плодни слој тла. Осим тога, седимент који се добија затрпава плоднија тла у нижим деловима нагиба, угрожава инфраструктурне објекте, а велики део овог наноса се слива и у водотоке и акумулације чиме узрокује њихову интензивну деградацију.

Биогеографске карактеристике слива Црне реке или подаци о вегетабилном покривачу и коришћењу земљишта представљени су кроз заступљеност шума, пашњака, голина, пољопривредног земљишта, урбаних површина и површина обухваћених великим водним телима – природним и вештачким језерима и мочварним областима, Слика 3.15. Ови подаци су део CORINE Land Cover/Land Use (CLC) платформе и дати су у наставку. CLC база података је генерисана у већини земаља Европе користећи визуелну интерпретацију сателитских слика високе резолуције. У неколико земаља, укључујући и Македонију, примењују се полуаутоматска решења, користећи националне базе података, теренске податке са лица места, обраду сателитских слика и коначно - интеграцију ГИС-а .

- *Шуме*

Шуме у сливу су заступљене на укупној површини од 1708 km<sup>2</sup> или 31,9% од укупне површине слива. Од тога, листопадне шуме покривају 1336,8 km<sup>2</sup> или 25,0% укупне површине слива, зимзелене шуме покривају 179,7 km<sup>2</sup> или 3,4%, док су мешане шуме заступљене на површини од 191,6 km<sup>2</sup> или 3,6% од укупне површине слива.



- ***Пашњаци***

У брдско-планинском и високопланинском сливном подручју Црне реке налазе се велики комплекси под пашњацима, чија површина је процењена на око 810,9 km<sup>2</sup>, односно 15,1% површине истраживаног подручја.

- ***Голине***

У ову категорију површина спадају и површине под камењарима, јако деградираним биљним заједницама и сл. Покривају 857,4 km<sup>2</sup> или око 16% површине сливног подручја Црне реке.

- ***Пољопривредно земљиште***

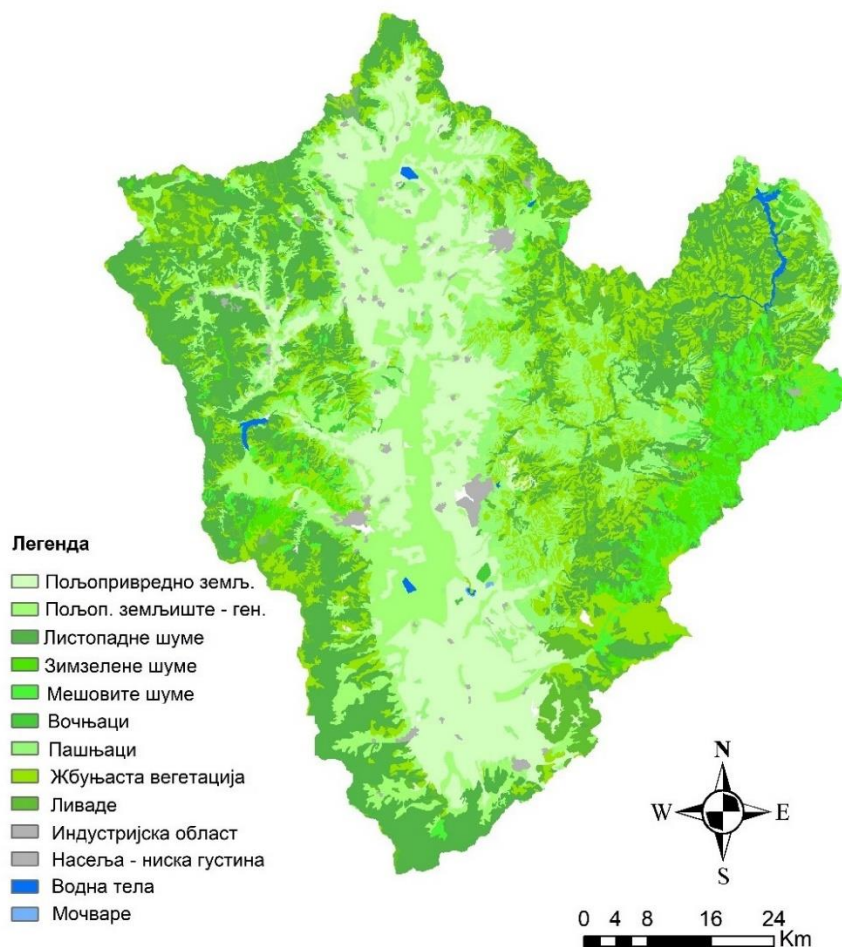
Пољопривредно земљиште у сливу је заступљено на 1876,5 km<sup>2</sup> или 35% укупне површине слива. Ова категорија искоришћености земљишта у највећем делу се среће у Пелагонији, која је највећа житница у Републици Македонији. У ову категорију су укључени и воћњаци и површине под виновом лозом који захватају око 0,4% површине слива.

- ***Урбане средине***

У урбане средине убројане су стамбене површине, затим површине које се користе за потребе индустрије и транспортни коридори. Стамбеним површинама обухваћено је 48,5 km<sup>2</sup> или 0,9% укупне површине слива, док је индустријским површинама обухваћено укупно 32,1 km<sup>2</sup> или 0,6% укупне површине слива.

- ***Водене површине***

Под воденим површинама сматрају се површине обухваћене природним и вештачким језерима, као и мочварне области у сливу. Ова категорија земљишта обухвата укупно 22,3 km<sup>2</sup> или 0,4% укупне површине слива.



Слика 3.15 Мапа земљишног покривача и коришћења земљишта (Corine LU/LC)

### 3.5 ИСТРАЖИВАЊА СЕДИМЕНТАЦИЈЕ У АКУМУЛАЦИЈИ ТИКВЕШ

Мерења наносних количина у акумулацији „Тиквеш“, која је предмет овог рада, датирају од јула 1972 године, када је извршено прво топографско – батиметриско мерење акумулационог простора. Друго мерење је реализовано у јулу 1973 године, чиме је установљена количина исталоженог наноса у акумулацији за период од једне године. Циљеви и задаци ових истраживања били су да се установи режим засипања акумулације и режим кретања наноса у акумулацији, а затим и да се успостави функционална зависност између утицаја природних фактора (пре свега климатских, хидрографских и хидролошких) на исталожени нанос у одређеним временским интервалима.

Праћењем и проучавањем моћности наносних депозита, требало је да се утврди утицај доминантних фактора како би се дошло до потребних сазнања и препорука за продужавање века акумулације и створила основа за нове истраживачке активности.

Након мерења из 1972 године, следи још пет мерења - 1973, 1974, 1976, 1984 и 1991 године. Сва мерења вршена до 1984 године реализовао је Републички хидрометеоролошки завод – Скопље, као део установљене праксе праћења наноса у

акумулацијама у Републици Македонији, док је мерење из 1991 године извршио Завод за водопривреду Републике Македоније у оквиру научно-истраживачког пројекта под називом „Утицај природних фактора на режим ерозивних наноса у сливном подручју акумулације Тиквеш“.

Резултати мерења наслага и праћења кретања наноса у акумулацији у периоду од 1972 до 1984 године дати су у виду извештаја – информација о четири мерења, док су за мерења из 1991 године били доступни само радни материјали који су детаљно обрађени у овом раду.

У првој информацији из 1973 године, поред резултата мерења у акумулацији, детаљно су приказани и обрађени подаци добивени мерењем протока воде и проноса суспендованог наноса на мерном профилу Расим-бегов мост, лоцираном на око 20 км узводно од улива Црне реке у акумулацију Тиквеш. Ова мерења су извршена да би се добила сазнања о међусобном односу вученог и суспендованог наноса у реци, као и да би се дале примарне информације о одређивању количине наноса продуцираног у непосредном сливном подручју акумулације.

Режим кретања и таложења наноса у акумулацији праћен је у преко 23 попречна профила (према подацима из расположивих Информација), од којих је 20 профила постављено по кориту Црне реке, а по један у кориту непосредних притока: Тиквеш, реци Каменици и реци Блаштици. Нулто мерење је спроведено почетком 1972 године и на основу овог мерења су одређиване количине исталоженог материјала у наредним годинама.

Мерења исталоженог наноса у акумулацији у интервалима 1972-1973 године и 1974 - 1976 године реализована су класичним методом, односно помоћу сајле и тега са сигналним уређајем, док су мерења током 1984 године реализована кроз два метода: Класични метод и Метод са ехосондером - тип Колвин-Хуге MS 26Г.

На основу резултата извршених мерења и проучавања наноса у акумулацији „Тиквеш“, реализованих од стране Републичког хидрометеоролошког завода – Скопље, изведене су следеће констатације:

Количине, односно запремина исталоженог наноса у акумулацији за различите временске периоде, као и за целокупни период мерења 1972-1984 године, износе:

1972–1973 године	=	854440	m <sup>3</sup>
1973–1974 године	=	891236	m <sup>3</sup>
1974–1976 године	=	1466432	m <sup>3</sup>
1976–1984 године	=	5280000	m <sup>3</sup>

У периоду од 1. 8. 1972 до 31. 7. 1973 године вршена су симултана мерења протока воде и проноса суспендованог наноса на Црној реци, на профилу Расим-бегов мост. У овом периоду проток воде на мерном профилу износи  $30,6 \text{ m}^3/\text{sek}$ , а на профилу бране Тиквеш  $38,0 \text{ m}^3/\text{sek}$ . Укупна количина воде која је дотекла у акумулацију за наведени период износи  $1198.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Количина пронесеног суспендованог наноса, према измереним протоцима на профилу Расим-бегов мост, за период од 1. 8. 1972 до 31. 7. 1973 године износи  $296438 \text{ m}^3$ . Количина суспендованог наноса из непосредног сливног подручја акумулације одређена је методом аналогije и за исти период износи  $72533 \text{ m}^3$ . На основу ових података, закључено је да укупна количина суспендованог наноса на профилу бране „Тиквеш“ за наведени период износи  $368971 \text{ m}^3$ .

На основу податка о укупној количини исталоженог наноса у акумулацији од  $852440 \text{ m}^3$  и количине суспендованог наноса од  $368971 \text{ m}^3$ , одређена је количина вученог наноса, која износи  $483469 \text{ m}^3$ . Однос између запремине вученог и суспендованог наноса одређен на овај начин износи  $56,7\% : 43,3\%$  у корист вученог наноса или

$$S_{\text{ukupan nanos}} = 2.31 * S_{\text{susp.nanos}} \text{ , и}$$

$$S_{\text{vuceni nanos}} = 1.31 * S_{\text{susp.nanos}}$$

Пронос суспендованог наноса, измерен на профилу Расим-бегов мост за период 1972-1973 године, износи  $14,1 \text{ kg/sek}$ , а на профилу бране Тиквеш, одређен методом аналогije, износи  $17,5 \text{ kg/sek}$  или  $551880 \text{ ton/god}$ .

Пронос суспендованог наноса измерен на профилу Расим-бегов мост за период 1976-1984 године износи  $11,64 \text{ kg/sek}$ .

### **3.5.1 Мерења исталоженог наноса у акумулацији током 1991 године**

Да би се установиле укупне количине исталоженог наноса у акумулацији Тиквеш за период од затварања бране (март 1968 године) закључно са јулом 1991 године и открила зависност између ерозије у сливном подручју и засипања акумулације ерозивним наносом, од стране Завода за водопривреду РМ – Скопље до Министарства за науку РМ био је предложен и прихваћен научно-истраживачки пројекат под насловом УТИЦАЈ ПРИРОДНИХ ФАКТОРА НА РЕЖИМ ЕРОЗИВНИХ НАНОСА У СЛИВНОМ ПОДРУЧЈУ АКУМУЛАЦИЈЕ ТИКВЕШ.

На основу програма реализације пројекта, као и постојећег правилника о праћењу наноса у акумулацијама у Републици Македонији, током 1991 године реализована су батиметријска снимања подводне топографије акумулације. Мерења су вршена на 62

попечна профила акумулације, утврђена геодетским елаборатом израђеним у оквиру исте студије. Постављена су 44 нова профила на којима су по први пут вршена мерења исталоженог наноса. Осталих 18 профила поставио је РХМЗ – Скопје у периоду од 1972 до 1984 године и на њима је претходно извршено укупно 5 мерења у периоду од 1972 до 1984 године, тако да су мерења из 1991 године шеста по реду.

Мерења код свих попречних профила реализована су при котама водног огледала од 261,60 до 262,11 mNV, односно при приближно пуној акумулацији (265 mNV). Будући да су сви мерни профили били испод нивоа воде, мерења су вршена ехосондером. У том периоду се располагало ехосондером марке RAYTHENON, модел DE-719 C.

На основу извршених батиметријских ехосондерских мерења, извршено је картирање подводног дела акумулације, при чему су извучене изохипсе са еквилистанцом од 5 m. Прорачун запремине акумулације одређен је применом метода површина – запремина. Притом је површина водног огледала израчуната са дна акумулације, па све до коте нормалног нивоа воде (265mNB) на сваких 5 m надморске висине. Поступак је спроведен за профиле од нултог стања и профиле утврђене ехосондерским мерењима.

Разлика између укупне запремине акумулације израчунате преко нултих профила који су били извучени из топографске карте 1:5000, креиране пре пуњења акумулације 1968. године и запремине акумулације израчунате преко профила дефинисаних мерењима из 1991. године, представља запремину исталоженог наноса у акумулацији у том периоду, односно за период од 23 године.

Из извршених мерења и прорачуна исталоженог наноса у акумулацији Тиквеш, за период 1968-1991 године изведене су следеће констатације:

Укупна запремина исталоженог наноса у акумулацији у периоду од 1969 до 1991 године износила је  $29,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ , односно  $1274 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{год}$ .

Специфични пронос наноса у акумулацији процењен је на  $237.8 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{год}$ .

### **3.5.2 Мерење исталоженог наноса у акумулацији током 2016 године**

Бурни догађаји повезани са распадом бивше Југославије довели су до застоја у бројним сегментима друштвеног живота у региону. Између осталог, и сектор водопривреде у Македонији доживљава знатну стагнацију, па чак и комплетно замирање појединих сектора. Отуда, након реализованих батиметријских мерења 1991 године, настаје прекид активности у акумулацијама у држави у погледу праћења седимената, све до обнављања мерења током 2014 године.

Најновија ехосондерска снимања конфигурације дна акумулације Тиквеш извршена су током месеца јуна 2016 године. Притом је коришћен савремени батиметријски ехосондерски систем VALEPORT MIDAS SURVEYOR. Систем се састоји од два дела: просторног географског позиционог система (ГПС) и ултрасоничног ехосондера који функционише на фреквенцији од 200 кHz. Овај систем генерише мерне тачке на дну акумулације у апсолутним x, y и z координатама. Уобичајена тачност је 0.1 м по z–оси, односно по дубини и од неколико центиметара у хоризонталној равни (x и y координате).

Мерење је реализовано тако да се при кретању пловила врши континуирано регистровање дубине воде мерено са нивоа воде и то за сваку просторну позицију мерне сонде, при чему се генерише огроман број записа.

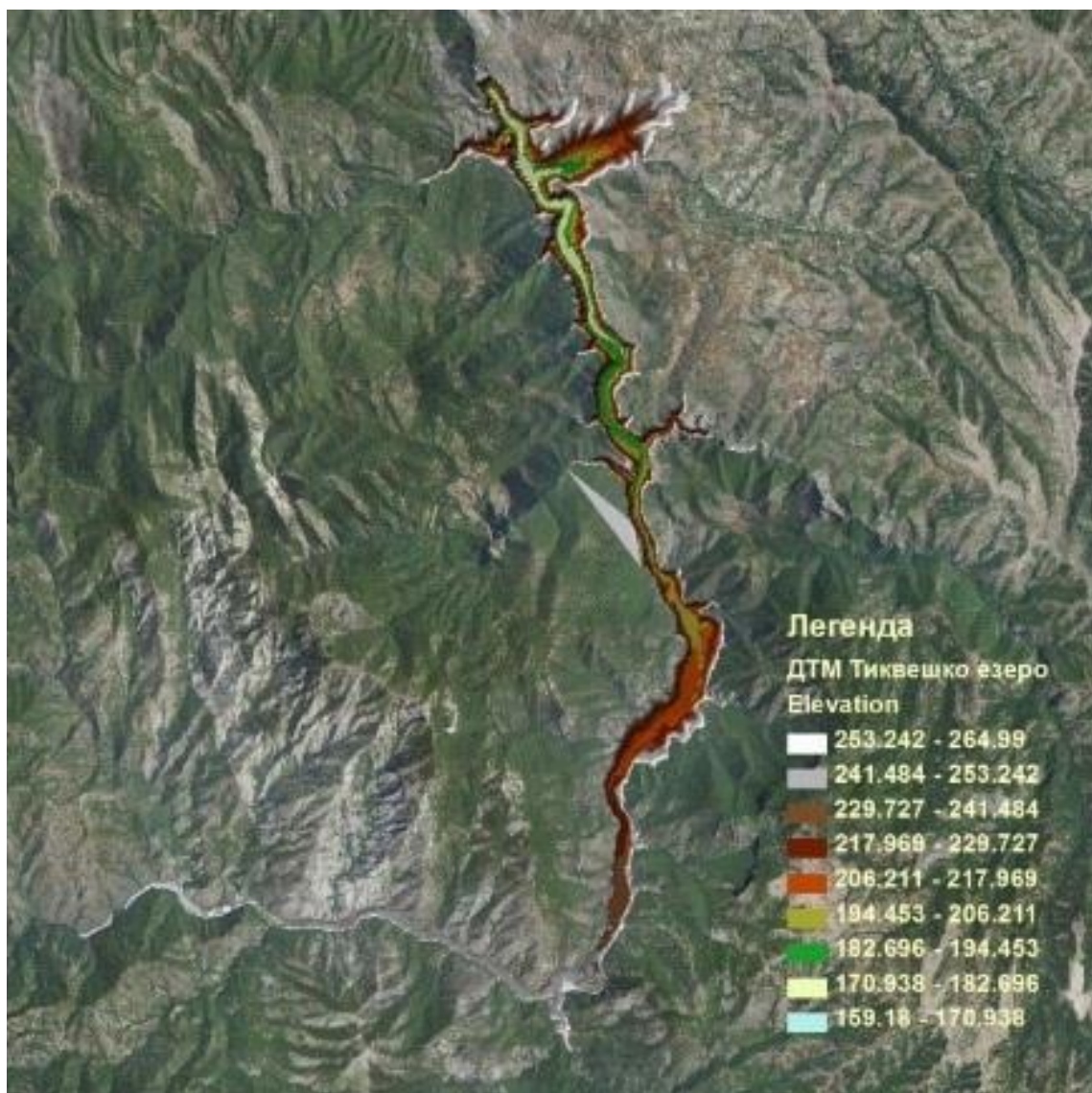
На основу регистрованих дубина воде и за познату коту нивоа воде у акумулацији у периоду вршења мерења, извршен је прорачун апсолутних кота на дну акумулације. Ови подаци су искоришћени за генерисање дигиталног теренског модела (ДТМ) дна акумулације (Слика 3.17).







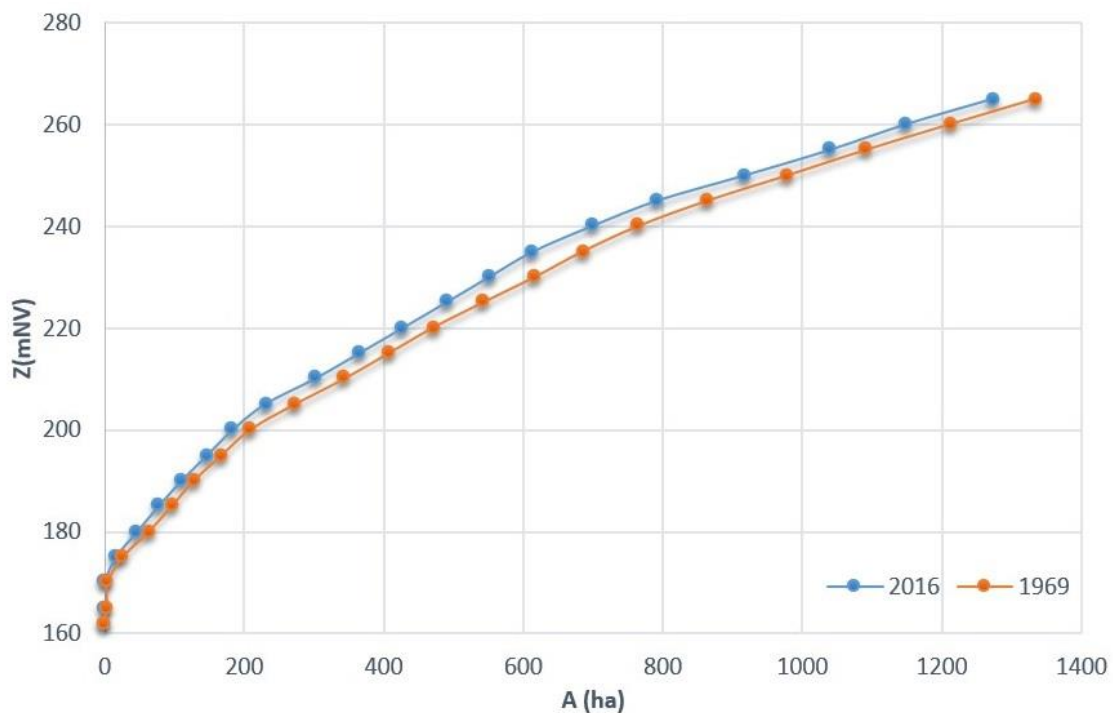
Слика 3.16 Фотографије са теренских истраживања акумулације Тиквеш



Слика 3.17 Дигитални теренски модел (ДТМ) дна акумулације Тиквеш

### 3.5.3 Прорачун линије површина и запремина акумулације

Површине водног огледала су калкулисане софтверски користећи претходно генерисани дигитални теренски модел (ДТМ) акумулације. За сваки ниво воде, почевши од најниже измерене коте терена (165.00 mNV), па све до нормалног нивоа (265.0 mNV), израчуната је површина водног огледала. Зависност површине водног огледала  $A$  (ha) од нивоа воде  $Z$  (mNV) приказана је на следећој слици. Поређења ради, на истој слици је приказана и почетна дистрибуција површина у акумулацији из периода почетка експлоатације објекта.



Слика 3.18 Линије површина акумулације Тиквеш – нулто стање и стање од октобра 2016 године

Елементарна запремина или запремина акумулације између било која два суседна нивоа воде утврђена је интеграцијом површине испод криве површина, а кумулативно сабране елементарне запремине дају криву запремина,  $V = f(Z)$ .

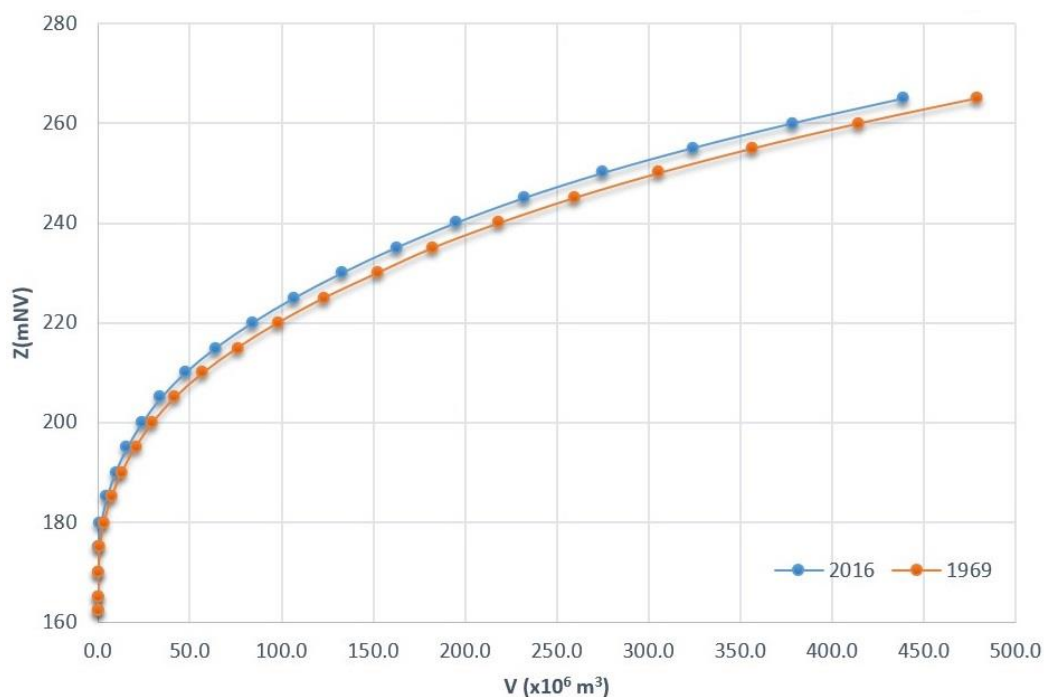
За прорачун елементарних запремина из нумеричких података, у овој студији је коришћен Метод осредњених контурних површина, по којем се елементарна запремина израчунава на следећи начин:

$$DV = (A_i + A_{i-1})/2 \cdot (Z_i - Z_{i-1})$$

Где су:

- DV - елементарна запремина између две узастопне површине водног огледала ( $A_i$  и  $A_{i-1}$ )
- Z - ниво воде за анализиране површине (mNV)





Слика 3.19 Линија запремина акумулације Тиквеш – нулто стање и стање од октобра 2016 године

Линије површина и запремина акумулације Тиквеш израчунате су на основу батиметријских ехосондерских мерења из 2016. године, а у наставку су приказане табеларно.

Табела 3.8 Линија површина и линија запремина акумулације

Ниво воде Z (mNV)	Површина водног огледала A (ha)	Укупна запремина V (x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
265	1273	439.1
260	1149	378.7
255	1040	323.9
250	918	275.0
245	792	232.2
240	699	195.1
235	614	162.3
230	551	133.2
225	490	107.2
220	428	84.2
215	365	64.4
210	302	47.8
205	230	34.5
200	184	24.3
195	147	16.0
190	110	9.6
185	78	4.9
180	47	1.8
175	16	0.002
170	0.28	0.000

Из линије запремина могу се извући следећи подаци:

За коту нормалног нивоа акумулације  $Z_{nn} = 265,0 \text{ mNV}$ , укупна запремина акумулације износи:

$$V_{nn} = 439.1 \times 10^6 \text{ m}^3$$

На основу расположивих података добијених из АД ЕЛЕМ, почетна запремина акумулације при нормалном нивоу износила је <sup>2</sup>:

$$V_{nn} = 478.7 \times 10^6 \text{ m}^3$$

У периоду од почетка експлоатације објекта, у акумулацији се наталожило укупно:

$$V_{nanos} = 39.6 \times 10^6 \text{ m}^3$$

Коти минималног радног нивоа ХЕЦ Тиквеш,  $Z_{mrn} = 233.0 \text{ mNV}$ , одговара запремина од:

$$V_{mrn} = 150.7 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

Тренутна корисна запремина акумулације износи:

$$V_{kor} = V_{nn} - V_{mrn} = 288.4 \times 10^6 \text{ m}^3$$

### 3.5.4 Утврђивање режима седиментације тиквешке акумулације

Просечна стопа седиментације, процењена на основу батиметријског истраживања из 2016. године износи  $0.836 \times 10^6 \text{ m}^3$  годишње, што је 0,18% укупне почетне запремине резервоара. Временска дистрибуција седиментације акумулације од почетка њеног коришћења је приказана у продужетку, Табела 3.9 и Слика 3.20.

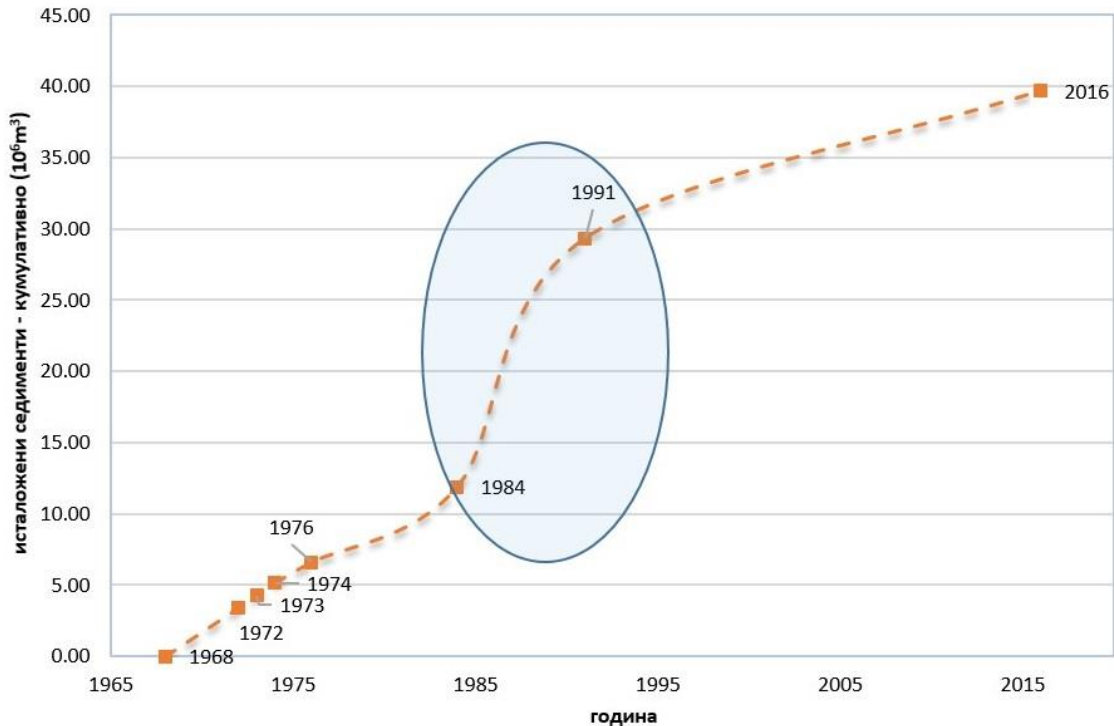
**Табела 3.9** Кумулативна запремина депонованих седимената у акумулацији

Период	Исталожени седименти ( $10^6 \text{ m}^3$ )	Исталожени седименти - кумулативно ( $10^6 \text{ m}^3$ )
1968-1972	3.8	3.8
1972-1973	0.85	4.65
1973-1974	0.89	5.54
1974-1976	1.47	7.02
1976-1984	5.28	12.3
1984-1991	17.0	29.3
1991-2016	10.4	39.7

На слици 3.20 се могу јасно издвојити три карактеристична периода: период 1968-1984, 1984-1991 и 1991-2016. У периоду од 1972 до 1984 просечна седиментација наноса

<sup>2</sup> Према пројектној документацији, почетна запремина акумулације износи  $475 \times 10^6 \text{ m}^3$

износи  $0,653 \times 10^6 \text{ m}^3$  годишње. Тренд засипања акумулације је знатно већи у периоду између 1984-1991 године. Количина депонованих седимената у овом периоду износи  $17 \times 10^6 \text{ m}^3$  у периоду од 7 година или  $2.43 \times 10^6 \text{ m}^3$  годишње. У периоду 1992-2016 године просечна стопа седиментације износи  $0.433 \times 10^6 \text{ m}^3$ .



Слика 3.20 Временска дистрибуција седиментације наноса у акумулацији Тиквеш

Девијација криве седиментације у другом периоду може бити последица неколико фактора :

- Појава великих вода у сливу Црне реке са екстремно високим концентрацијама наносног материјала
- Појава локалних клизишта у сливу или у акумулацији
- Пропусти у хидрографским мерењима
- Комбинација претходно наведених разлога

## IV.

### РАЗВОЈ И ПРИМЕНА ХИДРОЛОШКОГ МОДЕЛА СЛИВА АКУМУЛАЦИЈЕ ТИКВЕШ

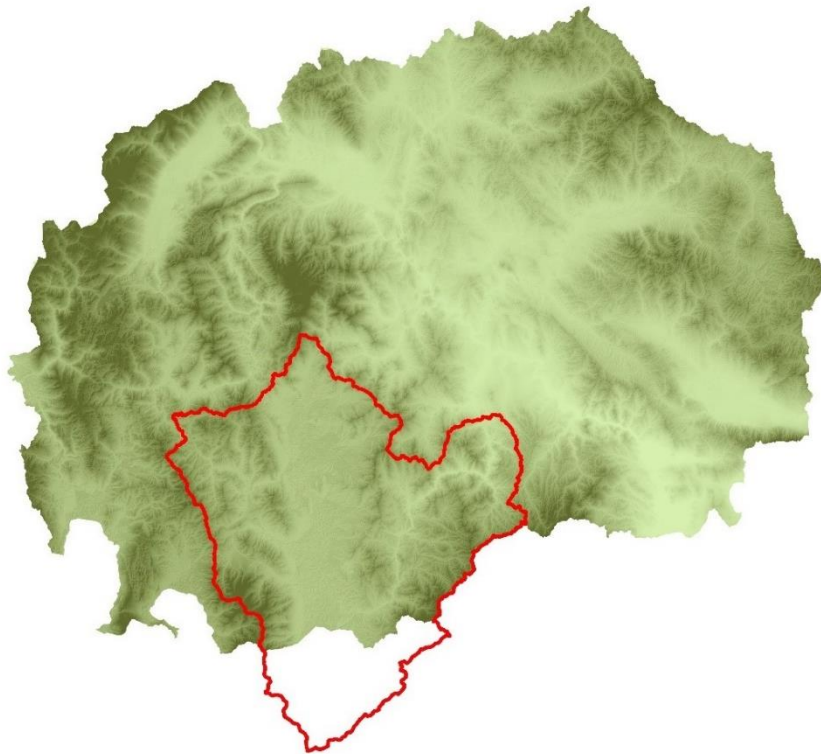
#### 4.1 УВОД

У овом поглављу је детаљно описана методологија креирања и примене модела SWAT у истраживаном подручју. Модел је калибриран/верификован користећи се историјским и хидролошким подацима у сливу. Калибрирани модел се може користити за евалуацију алтернативних пракси управљања водама и регионалног развоја. Процес креирања SWAT модела се може поделити у неколико корака: (1) делинеација слива, (2) дефиниција HRU-а, (3) дефиниција климатских података, (4) креирање улазних датотека, (5) покретање модела, (6) анализа резултата (7) калибрација и верификација модела.

#### 4.2 КОРИШЋЕНЕ ПОДЛОГЕ

##### 4.2.1 ДЕМ – дигитални елевациони модел

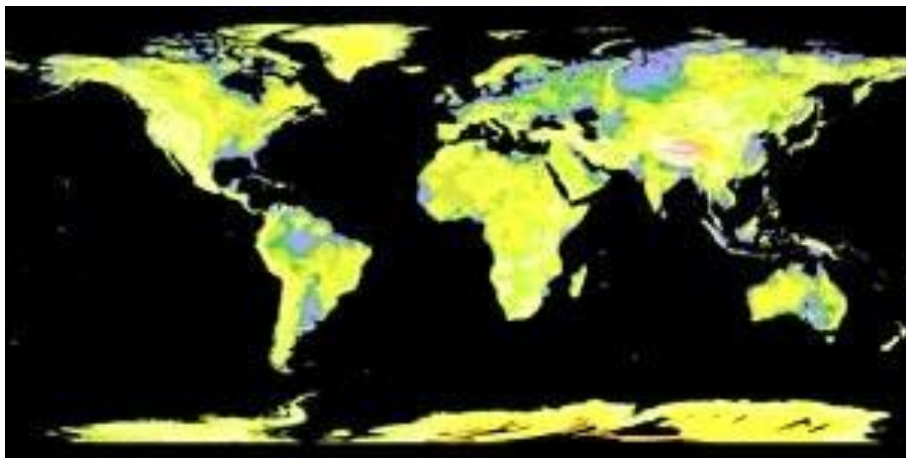
За део територије Македоније, коришћен је ДЕМ – дигитални елевациони модел са просторном резолуцијом од 20x20 m. Овај ДЕМ је креиран на основу стереопарних аерофотограметријских истраживања на територији Републике спроведене током 2009. године у оквиру пројекта за генерисање система идентификације земљишта ЛПИС (Land parcel identification system). ДЕМ карактерише висока тачност и поузданост топографских података које приказује.



Слика 4.1 ДЕМ Републике Македоније

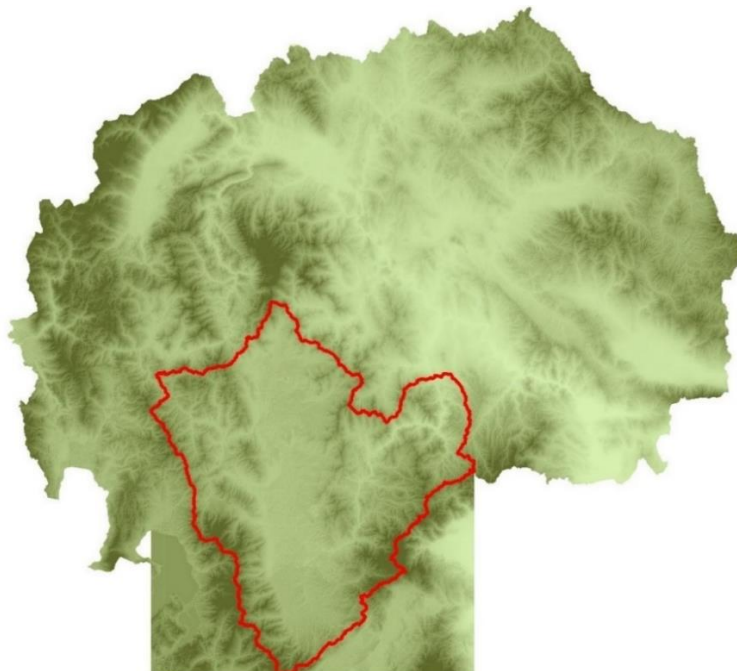
За део територије Грчке користи се део ASTER-а (The Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer) глобалног дигиталног елевационог модела ГДЕМ. ASTER GDEM је производ Министарства економије, трговине и индустрије (METI) Јапана и Националне управе за свемир и аеронаутику (NASA) Сједињених Америчких Држава. Модел се генерише коришћењем стерео слика које прикупља сателит Терра. Покривеност ASTER GDEM-а се протеже од 83 степена северне ширине до 83 степена на југу, чиме покрива 99 посто површине земље. ASTER GDEM се одржава у GeoTIFF формату са резолуцијом од 30 метара.

Подаци из ASTER GDEM-а су слободно доступни корисницима широм света из дистрибуираног активног архивског центра (LP DAAC) и J-space система.



Слика 4.2 ASTER - глобални дигитални елевациони модел

У овом раду ова два ДЕМ-а су спојена у јединствену композицију-мозаик, након чега је формирана топографска основа која се даље користи у моделу, Слика 4.3.



Слика 4.3 Композиција ДЕМ-ова Македоније и Грчке

## **4.2.2 Климатске подлоге**

Климатски подаци у региону коришћени у овој студији се састоје од података о падавинама, температурама, релативној влажности ваздуха, сунчевом зрачењу и брзини ветра. У овом раду су коришћени доступни дневни подаци о падавинама регистровани у 20 кишомерних станица у региону у периоду 1966-1991 године. Остали климатски параметри су преузети од 3 главне метеоролошке станице у сливу акумулације Тиквеш. (Поглавље 3.3. – Климатске карактеристике)

### **4.2.2.1 Климатски генератор**

Због недоступности метеоролошких података у периоду 1992-2016, урађена је прогнозна симулација климатских параметара користећи WXGEN - Weather Generator, програм интегрисан у SWAT окружењу. Коришћењем ове алатке, на основу статистичке анализе расположивих података о дневним падавина, температуре ваздуха, сунчевог зрачења, брзине ветра и релативне влажности ваздуха регистрованих у метеоролошкој станици Прилеп у периоду 1966-1991, извршено је прогностичко моделирање климатских података анализираних подручја за период 1992- 2016.

Овако генерисана база климатских података се даље користи у моделу при чему је извршено прогнозно моделирање продукције седимената у сливу, транспорта у речној мрежи и засипање наноса у акумулацији Тиквеш.

## **4.2.3 Вегетабилни покривач и коришћење земљишта (CORINE LU/LC)**

Биогеографске карактеристике слива Црне реке или подаци о вегетабилном покривачу и коришћењу земљишта представљени кроз заступљеност шума, пашњака, голина, пољопривредног земљишта, урбаних површина и површина обухваћених великим водним телима – природним и вештачким језерима и мочварним областима су преузети са CORINE Land Cover/Land Use платформе.

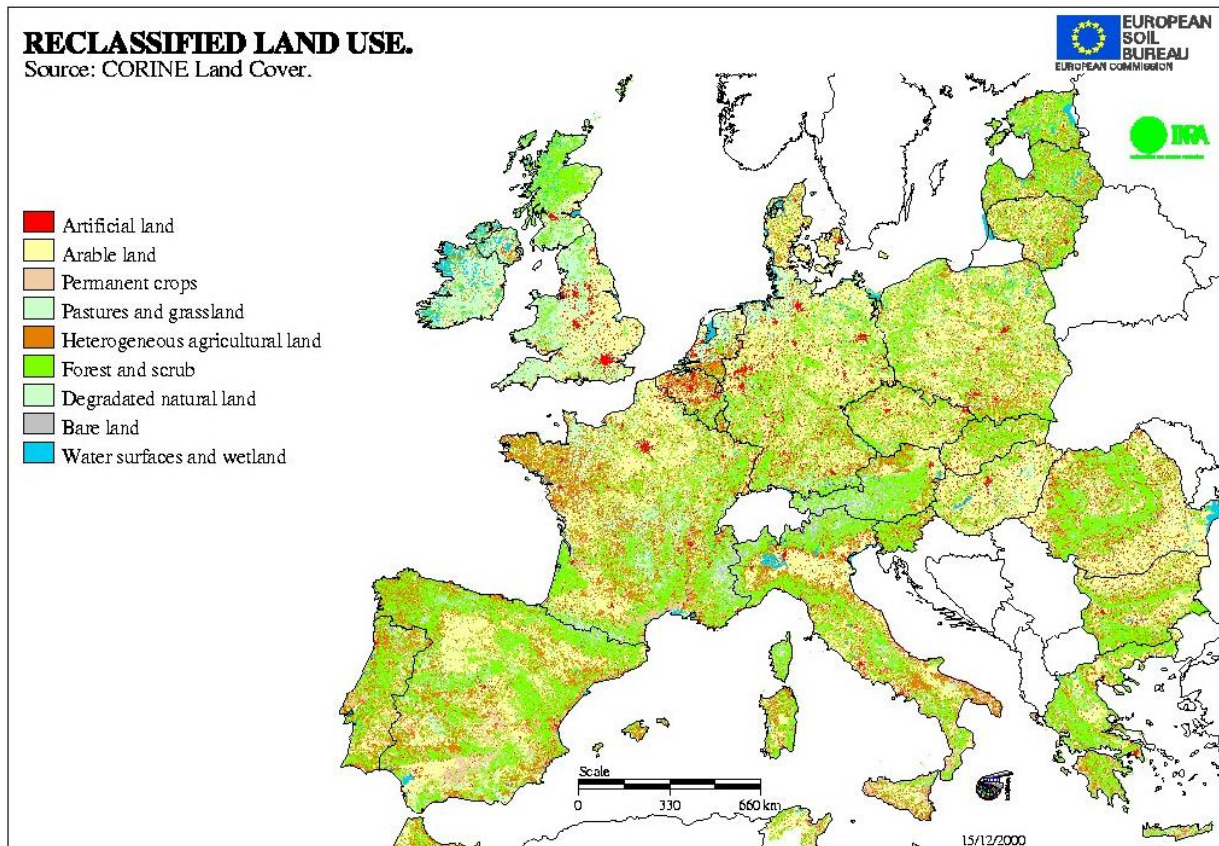
Прикупљање података за креирање базе података CORINE Land Cover (CLC) започето је 1985 године. Ажурирања су вршена 2000, 2006 и 2012 године. База се састоји се од података о земљишном покривачу подељеном у 44 класе. CLC користи минималне мапинг јединице (ММУ) од 25 хектара (ha) за површинске феномене и минималне ширине од 100 m за линеарне феномене.

Eionet мрежа - Национални референтни центар Land Cover (NRC / LC) производи националне базе података CLC које су координисане и интегрисане од стране ЕЕА.

CLC је произведен у већини земаља са визуелном интерпретацијом сателитских слика високе резолуције. У неколико земаља, укључујући и Македонију, примењују се



полуаутоматска решења, користећи националне податке са лица места, обраду сателитских слика и интеграцију ГИС-а.



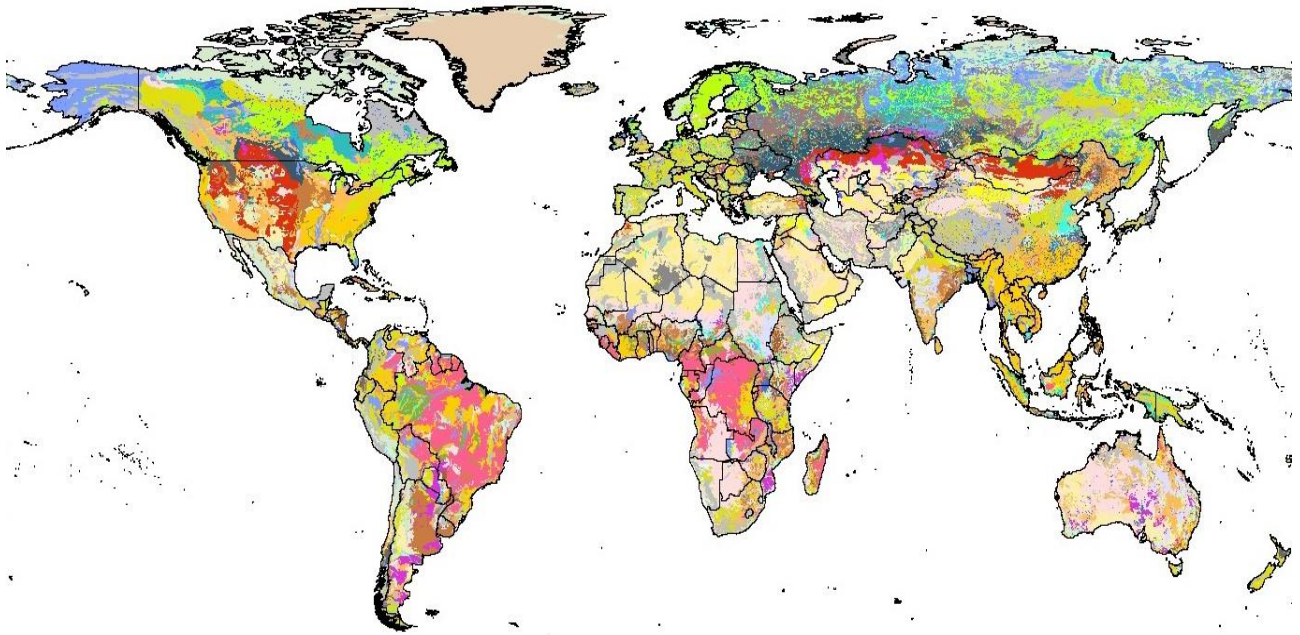
Слика 4.4 Европска база биогеографских карактеристика земљишта (CORINE LU/LC)

#### 4.2.4 Глобална база педолошких карактеристика земљишта - HSWD

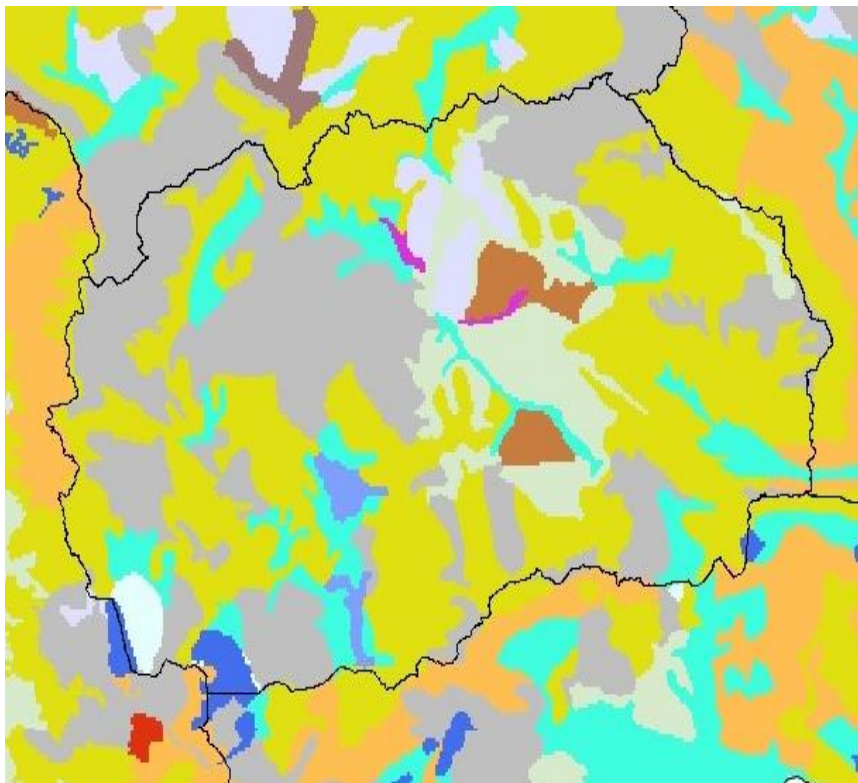
Ова база података је настала као резултат сарадње између FAO и IIASA, ISRIC-World Information, Института за земљиште, Кинеске академије наука (ISSCAS) и Заједничког истраживачког центра Европске комисије (JRC).

Светска база хармонизованих података о земљишту (HWSD) је растерска база података у размеру од 1:5 000 000. База података има више од 15.000 мапираних података добивених комбиновањем постојећих информација регионалних и националних земљишта широм света (SOTER, ESD, Map of China, WISE) са информацијама садржаним у бази података FAO-UNESCO (FAO, 1971-1981).

База је у растерском формату и састоји се од 21600 редова и 43200 колона који су повезани са усклађеним подацима о карактеристикама тла (органиски угљеник, рН вредност, капацитет складиштења воде, дубина земљишта, проценат размене натријума, салинитет земљишта, текстурне класе, гранулометријски састав итд.).



Слика 4.5 Глобална база педолошких карактеристика - HSWD



Слика 4.6 База педолошких карактеристика земљишта Македоније, HSWD

#### 4.2.5 Хидрометријски подаци

Просечни месечни подаци о протицајима воде за главни водоток Црна река за период од 1966. до 1991. године су добивени из Националне хидрометеоролошке службе (НХМС), а обрађени у оквиру сарадње са ЈСА 1998. године. Прикупљени подаци су регистровани



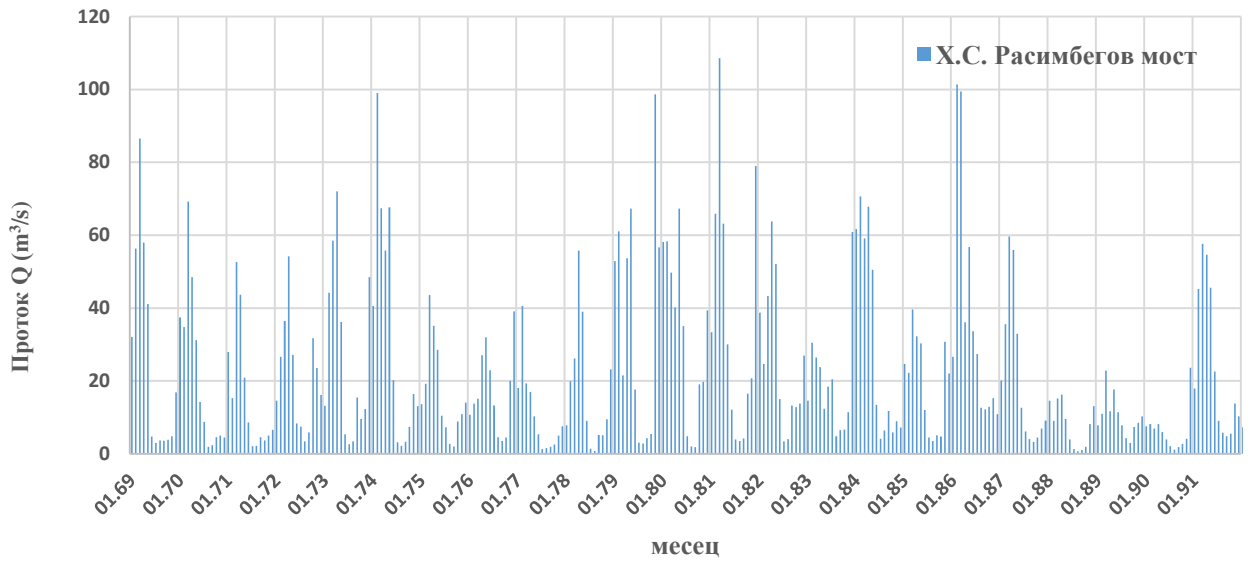
у три постојеће мерне станице на Црној реци: Расим-бегов мост (рс\_152), Новаци (рс\_203) и Скочивир (рс\_243), Табела 4.1 Слика 4.7. Што се тиче података о проносу седимената у реци Црној, релевантне информације које се односе на анализирани период су доступне само за мерну станица Расим-бегов мост (рс 152). Користећи доступне дневне податке о мереним седиментима, генерисана је база података о просечним месечним проносима наноса за период од 1975. до 1991. године, са одређеним пропустима у 1976-ој и 1979-ој. години. Део података је добивен из НХМС-а, а део је прикупљен из постојећих хидролошких алманаха у региону. Без даљњих модификација, ове базе података су коришћене за калибрацију и валидацију протицаја воде и седимента у Црној реци симулираних у моделу.

**Табела 4.1** Локација хидрометријских станица

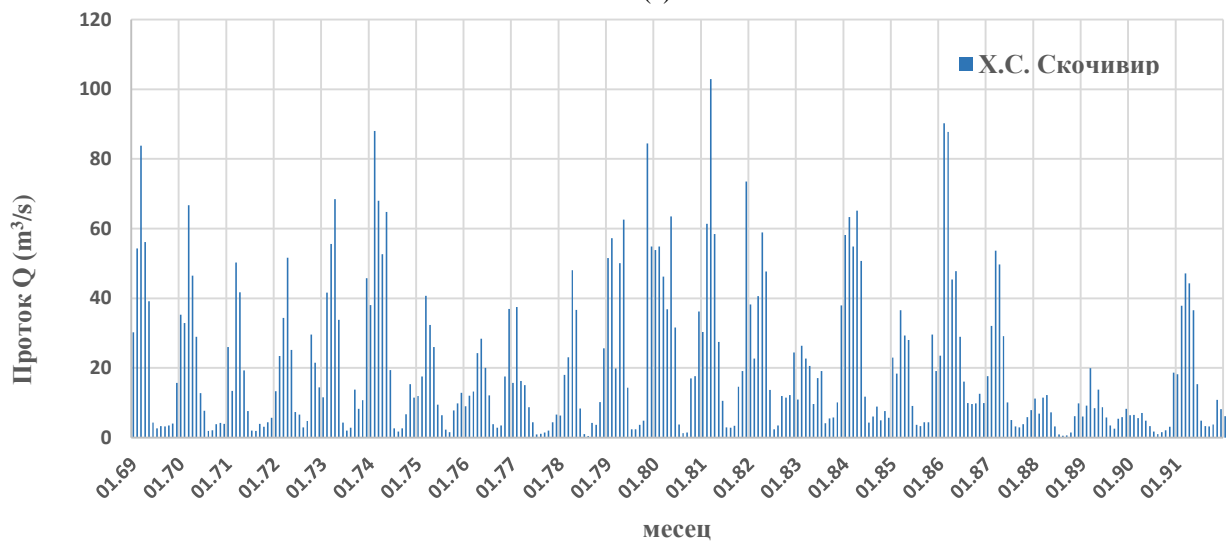
Ид.број	Име станице	Ознака	Латитуда	Лонгитуда	Надморска висина
1	Новаци	рс_203	41.056	21.439	577
2	Скочивир	рс_243	40.972	21.644	566
3	Расимбегов мост	рс_152	41.195	21.720	396
4	Брана Тиквеш	/	41.402	21.943	262.5



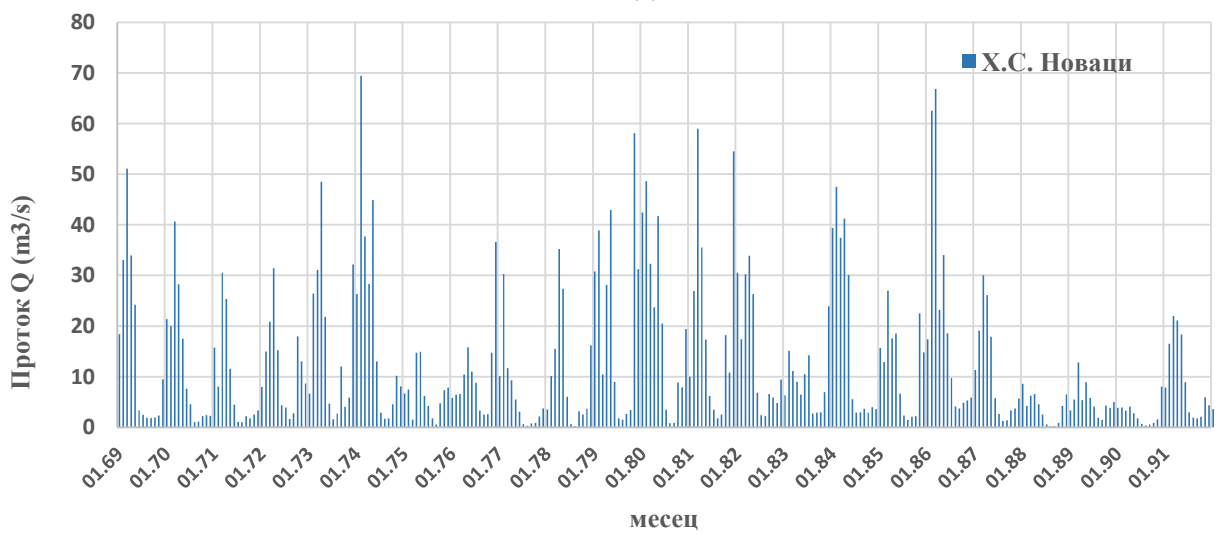
**Слика 4.7** Хидрометријске станице на Црној реци



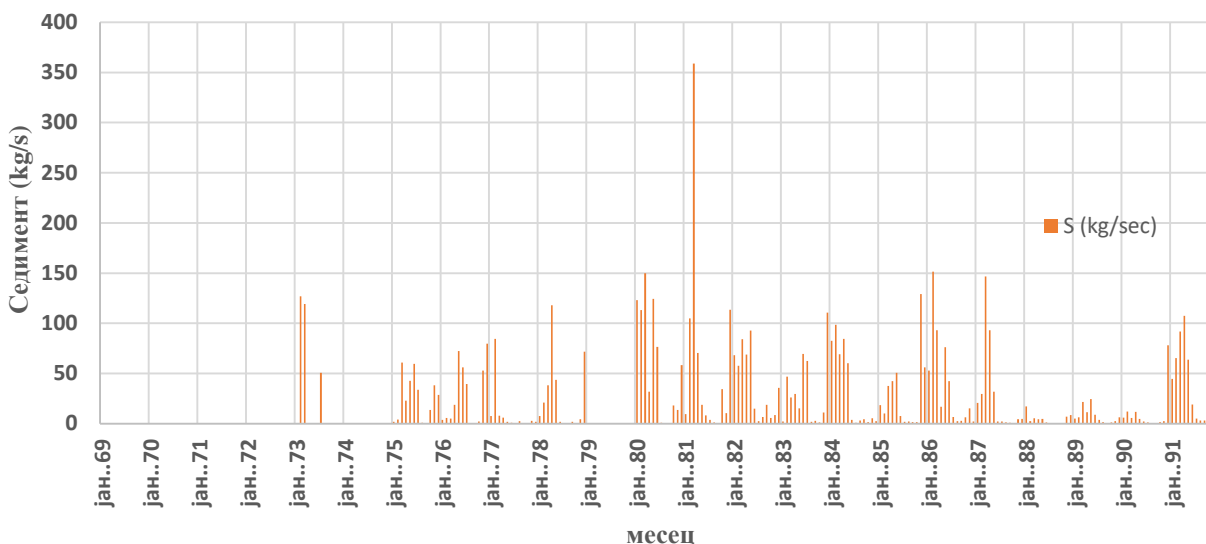
(a)



(b)



(c)



(d)

Слика 4.8 Просечни месечни протицаји у Црној реци у станицама: а) Расим-бегов мост, б) Скочивир, с) Новаци и д) пронос суспендованих седимената за станицу Расим-бегов мост

#### 4.2.6 Хидрографска – батиметријска мерења у акумулацији Тиквеш

Батиметријска мерења у акумулацији Тиквеш су започета још 1972. године када је направљено прво истраживање подводне топографије. Након тога, у периоду од 1973. до 1991. године извршена је серија мерења, након чега је дошло до застоја у мерењима све до 2016. године, када су активности поново покренуте. На основу ових мерења добивени су подаци о временској дистрибуцији седиментације акумулације од почетка њеног коришћења до периода задњих мерења или до 2016. године. Ови подаци су коришћени за верификацију резултата модела који се односе на временску дистрибуцију седиментације акумулације.

### 4.3 ПАРАМЕТРИЗАЦИЈА МОДЕЛА

#### 4.3.1 Делинеација сливног подручја

Најпре, коришћењем ДТМ-а анализираног региона, слив акумулације Тиквеш је био подељен на 309 подсливова са површином од 0.3-110 km<sup>2</sup>, Слика 4.9 а. Узимајући у обзир ограничења и досадашње искуство у науци у вези са применом методе MUSLE која је првобитно развијена за мале сливове (< 40 km<sup>2</sup>), а касније је успешно тестирана на сливовима од 0,01 до 234 km<sup>2</sup> (Villiams and Hann, 1976), усвојено је да површина подсливова не прелази 2-3% од укупне површине целог слива (површина слива до акумулације Тиквеш 5356 km<sup>2</sup>), како би се добили задовољавајући резултати симулације у односу на продукцију седимената (Chaplot, V, 2013)

У овој фази развоја модела дефинисане су физичке и географске карактеристике сваког подслива: површина и нагиб слива, координате тежишта слива, минимална, средња и максимална надморска висина, дужина и нагиб водотока итд., Прилог 1.

#### 4.3.2 Дискретизација подсливова и креирање хидролошких јединица (HRU)

Као што је раније описано, у окружењу просторног модела SWAT, HRU (Hidrologic Responce Unit) представља комбинацију својстава моделираног подручја (тип земљишта, коришћење земљишта/вегетабилни покривач, управљање и топографија) у оквиру којег се хидролошко понашање сматра хомогеним. HRU нису функционално дефинисани у простору, али концептуално одговарају малим хомогеним сливовима. Реални подсливови могу да се састоје од једног или више HRU-а. У процесу дефинисања HRU-а, анализираном подручју се додељују атрибути који се односе на: тип земљишног покривача и коришћење земљишта, педолошке карактеристике земљишта и нагиба терена.

**Подаци о коришћењу земљишта** су преузети са CORINE Land Cover 2000 (CLC 2000). У овој студији параметри су модификовани према класификацији и номенклатури коришћеној у SWAT-у, Слика 4.9 б. Заступљеност вегетације на подручју слива акумулације Тиквеш је приказана у Табели 4.2

Табела 4.2 Заступљеност вегетативног покривача у сливу акумулације Тиквеш

SWAT класификација		SWAT ознака	Површина (km <sup>2</sup> )	% од укупне површине слива
Листопадна шума	Deciduous Forest	FRSD	1336.78	24.96
Пољопривредно земљиште - Зрнасте културе	Agricultural Land-Close-grown	AGRC	1043.20	19.48
Жбунасто земљиште	Range-Brush	RNGB	857.38	16.01
Пољопривредно земљиште	Agricultural Land-Generic	AGRL	811.49	15.15
Пашњак / сењак	Pasture	PAST	507.11	9.47
Тревњаци/ Ливаде	Range-Grasses	RNGE	303.82	5.67
Мешовита шума	Forest-Mixed	FRST	191.57	3.57
Зимзелена шума	Forest-Evergreen	FRSE	179.68	3.35
Стамбена средина - мала густина	Residential-Low Density	URLD	48.52	0.91
Урбана средина - Индустрија	Industrial	UIDU	22.98	0.43
Воћњаци	Orchard	ORCD	21.85	0.41
Водна површина	Water	WATR	21.24	0.40
Урбана средина - Комерцијална	Commercial	UCOM	8.68	0.16
Мочварни регион - без дрвећа	Wetlands-Non-Forested	WETN	1.06	0.02
Урбана средина - Транспорт	Urban Transportation	UTRN	0.42	0.01

- FAO HWSD - мана педолошких карактеристика укључује 11 врста тла, Слика 4.9 с, која су заступљена у сливном подручју са следећим међусобним односом:

Табела 4.3 Заступљеност типова земљишта у сливу (HWSD – класификација)

Тип земљишта		Површина (km <sup>2</sup> )	% од укупне површине слива
Dystric Cambisol	Дистрични камбисол	2416.99	45.13
Calcaric Fluvisol	Колувијална земља	688.01	12.85
Rendzic Leptosol	Варовничко-доломитна црница	534.46	9.98
Lithic Leptosol	Циметна шумска земља	476.16	8.89
haplic Luvisol	Лувисол	300.73	5.62
Mollic Gleysol	Мочурливо – глејна земља	298.12	5.57
Eutric Cambisol	Еутрични камбисол	272.99	5.10
Umbric Leptosol	Лептосол	168.55	3.15
Vertic Luvisol	Лувисол	148.01	2.76
Calcaric Regosol	Регосол	50.61	0.94
Calcaric Phaeozem	са великим процентом хумуса	1.14	0.02

- Пратећи препоруке FAO-а, дискретизација нагиба терена у сливу је извршена у неколико карактеристичних интервала, Слика 4.9 d. Притом, према нагибу терена, слив је подељен на следеће области:

Табела 4.4 Класификација сливне површине према нагибу терена

Класификација рељефне форме	Нагиб терена:	Површина (km <sup>2</sup> )	% од укупне површине слива
благ низински терен	< 10 %	1760.88	32.88
брановидан брдовит терен	10 - 30 %	1542.34	28.80
планински терен	> 30 %	2052.53	38.32

На основу претходно дефинисаних карактеристика, генерисане су HRU јединице, Прилог 2. Притом, сваком подсливу су додељени атрибути доминантног вегетативног покривача, педолошког типа земљишта и нагиба тла. Ови параметри се даље користе у моделирању хидролошких процеса и продукције седимената. Као резултат овог поступка, број генерисаних HRU-а је 306, колико износи број подсливова.

Методолошки, у великим сливовима (> 1000 км<sup>2</sup>), ова процедура генерисања HRU-а је оправдана из више разлога (Vigiak, O. et al., 2015):

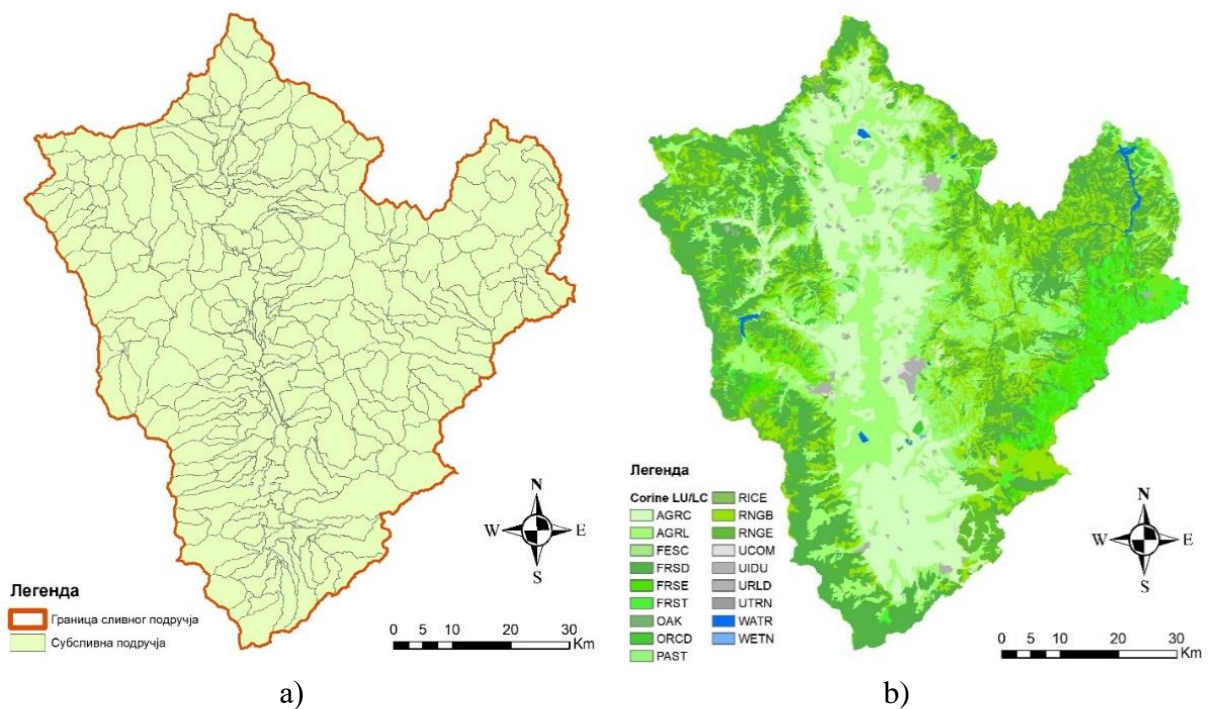
а) да се задржи величина модела унутар ограничења SWAT (Chiang and Yuan, 2014);

б) да MUSLE буде примењен на хидролошки хомогеној целини, односно HRU да одговара површини слива (E. Chen, D.S. Mackay, 2004). Ово је неопходно како би се осигурало да ниједан доток према јединици не би утицао на биланс воде HRUа.

в) ниска резолуција растер датотеке земљишног покривача (CORINE) и педолошких карактеристика земљишта (HSWD) битно ограничава могућност генерисања више HRU у једном подсливу.

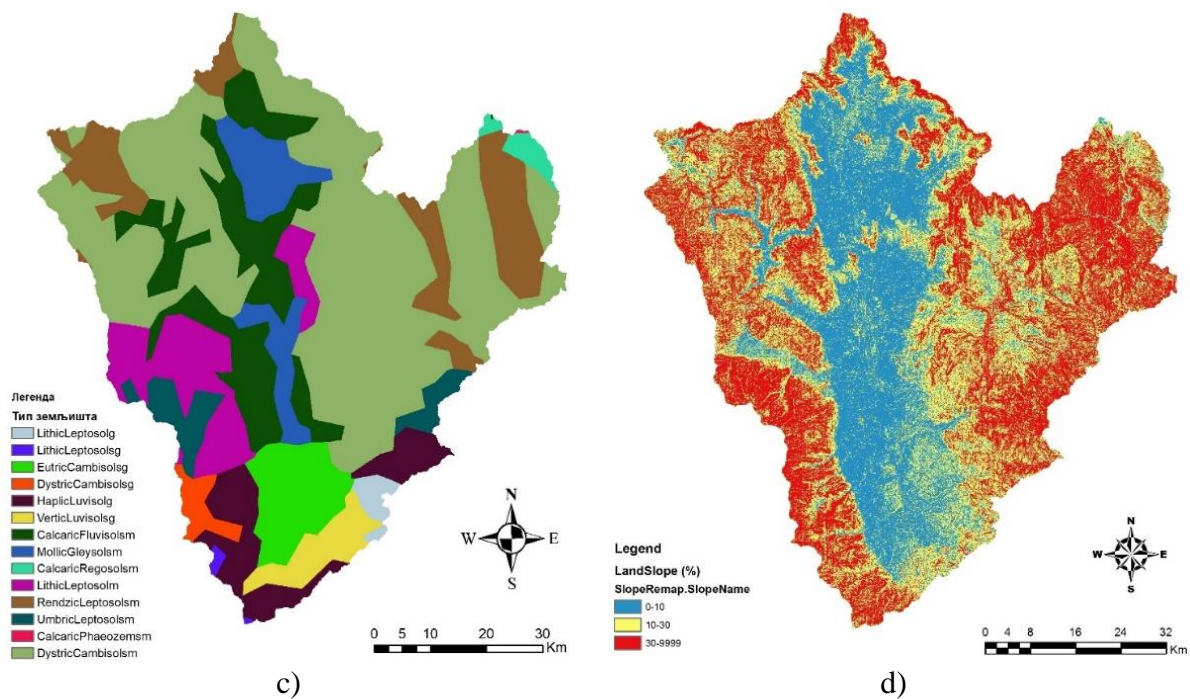
**Фактор ерозивности** земљишта USLE K процењен је коришћењем софтвера Query 1.4 (Borselli, L. et al., 2012) који генерише податке за овај параметар на основу своје глобалне дистрибуције. Добијене вредности овог параметра, изражене у SI јединицама<sup>3</sup>, су у распону од 0,025 до 0,05 t ha h ha<sup>-1</sup> MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup> што је у границама вредности за овај параметар процењених за земље Јужне Европе (Panagos P. et al., 2014), Слика 4.10.

**Фактор управљања земљиштем**, USLE C, се препознаје као фактор на који ће највише утицати праксе управљања земљиштем како би се контролисале стопе губитка земљишта. Просечне вредности C-фактора у ЕУ процењују се на 0.1043 са изузетно високим варијабилности, наиме шуме имају најнижу просечну вредност C-фактора (0.00116), док обрадиво земљиште и ретко вегетирана подручја имају највише вредности, 0.233 и 0.2651-респективно (Panagos P. et al., 2015 ). У недостатку релевантних података за овај фактор у Републици Македонији у овом раду су усвојене процењене вредности за Грчку, с обзиром на то да око 20% слива Тиквешке акумулације припада овој суседној земљи.



<sup>3</sup> Фактор конверзије K-фактора са US у SI јединицама износи 0,1317

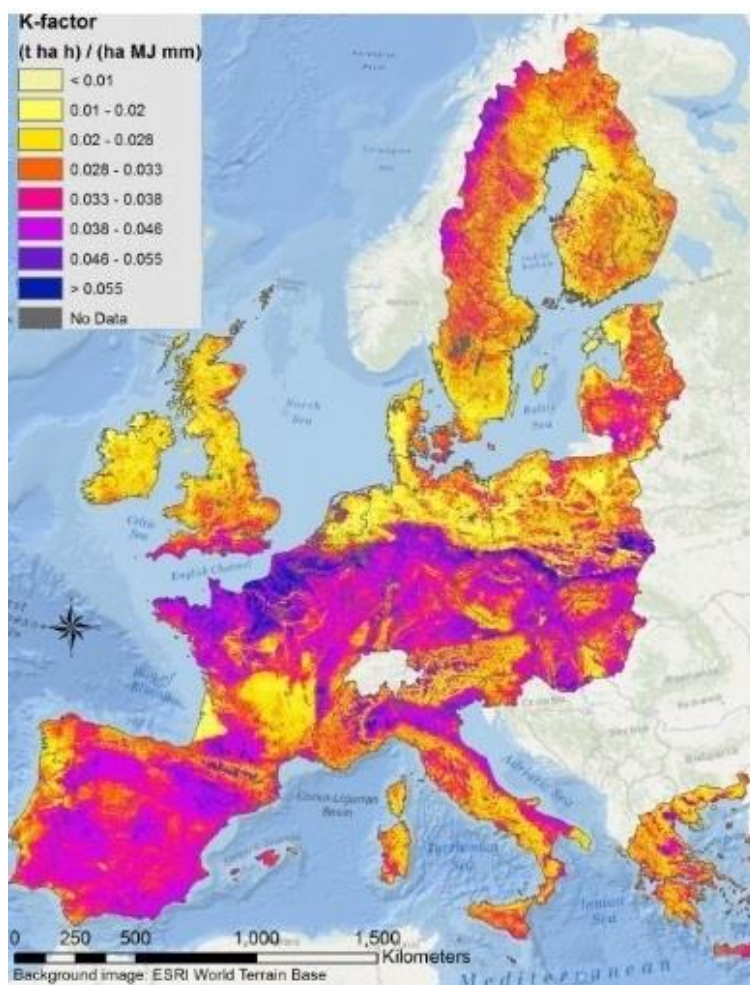




c)

d)

Слика 4.9 а) Делинеација сливног подручја и дефинисање подсливова; б) Мапа земљишног покривача и коришћења земљишта; в) Тип земљишта према калсификацији FAO и д) Мапа нагиба терена у сливу



Слика 4. 10 Дистрибуција ерозивности тла (К-фактора) у Европи (Панагос, 2014)

#### 4.4 КАЛИБРАЦИЈА И ВЕРИФИКАЦИЈА МОДЕЛА

Генерално, у пракси се користе два приступа у калибрацији дистрибуисаних модела: детерминистички и стохастички. Детерминистички приступ је метода „покушаја и грешке“, што значи да се сензитивни моделски параметри итеративно подешавају док се не добије нека врста разумног подударања између симулације и проматрања. С друге стране, техника стохастичке калибрације генерише дистрибуцију вероватноће резултата модела увођењем „најбољег могућег уклапања“ реакције модела на осматране променљиве.

У овом раду, алгоритам SUFI-2 у оквиру софтверског пакета SWAT-CUP (Abbaspour, K. S. et al., 2007, 2015) је коришћен за калибрацију, валидацију, осетљивост и анализу неизвесности модела. Унутар овог алгоритма се третирају све неизвесности везане за улазне параметре модела и настоје да, у итеративном процесу, укључе већину измерених података у оквиру 95% неизвесности предвиђања (95PercentPredictionUncertainty). 95PPU израчунава се на нивоу 2,5% и 97,5% кумулативне дистрибуције излазне варијабле, одређене “latin hypercube” методом узорковања, статистичком методом генерисања случајног узорка вредности параметара из вишедимензионалне дистрибуције.

Да би се проценио квалитет уклапања оба скупа података, резултати симулације модела и измерених података, укључујући и вероватне грешке настале током мерења, коришћена су два индекса, и то су „ $r$  - фактор“ и „ $r$  - фактор“.

$r$  – фактор је проценат измерених података уоквирених у интервалу симулиране 95PPU. Вредност овог фактора је у границама од 0 до 1, где 1 значи 100% слагање измерених података у оквиру несигурности предвиђања модела (тј. савршена симулација модела). У анализи протицаја воде, вредности  $r > 0,7$  могу се сматрати прихватљивим.  $r$  - фактор представља однос између просечне ширине распона 95PPU и стандардног одступања измерених променљивих количина. Пожељно је да вредност овог фактора буде  $R < 1,5$  (Abbaspour, K. S. et al., 2007).

Осим описане процедуре, ефикасност модела у SWAT-CUP се може проценити на основу више различитих објективних функција. Квалитет прилагођености модела мереним вредностима у овом раду је квантификован коришћењем следећих статистика: коефицијента детерминације ( $r^2$ ), коефицијента ефикасности Nash Sutcliff-a (NSE), процента BIAS-a (P-BIAS) и средње квадратне грешке (RSR).



$r^2$  - коефицијент детерминације

$$r^2 = \frac{[\sum_i (Q_{m,i} - \overline{Q_m})(Q_{s,i} - \overline{Q_s})]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \overline{Q_m})^2 \sum_i (Q_{s,i} - \overline{Q_s})^2} \quad 3.1$$

**NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency)** - Nash-Sutcliffe-ов фактор Ефикасности

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \overline{Q_m})^2} \quad 3.2$$

**PBIAS**

$$PBIAS = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)}{\sum_{i=1}^n Q_{m,i}} \quad 3.3$$

**RSR**

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \overline{Q_m})^2}} \quad 3.4$$

где су:  $Q$  променљива величина (пр. проток), индекси  $m$  и  $s$  означају да су вредности мерене, односно симулиране, индекс  $i$  означава  $i$ -ту мерену или симулирану вредност, а линија изнад променљивих означава да су те вредности осредњене.

Коефицијент детерминације  $r^2$  је статистички индикатор који показује колико се добро предвиђања регресије приближавају стварним вредностима података. Вредност коефицијента детерминације је у интервалу 0 - 1, а вредност 1 означава да регресијска предвиђања савршено одговарају стварним подацима.

Nash-Sutcliffe-ов фактор Ефикасности се користи како би се оценила моћ модела да тачно предвиди осматрану променљиву. Вредност овог индикатора може се кретати од  $-\infty$  до 1. Ефикасност 1 ( $NSE = 1$ ) одговара савршеном подударану модела са посматраним подацима. Ефикасност 0 ( $NSE = 0$ ) указује да су предвиђања модела тачна колико и средња вредност посматраних података, док се ефикасност мања од нуле ( $NSE < 0$ ) дешава када је средња вредност осматраних података бољи предиктор од модела. У суштини, што је ефикасност модела ближа 1, то је модел тачнији. Вредности прага који означавају модел довољног квалитета предложене су између  $0,5 < NSE < 0,65$ . (Moriasi, D. N. et al., 2007)

PBIAS (Moriasi et al., 2007) одређује осредњену тенденцију да симулирани подаци буду већи или мањи у односу на мерене вредности. Оптимална вредност овог фактора је нула, а ниже вредности су индикатор да је реч о бољим симулацијама. Позитивне вредности се добијају код модела који потцењују реалне вредности, док се негативне вредности односе на прецењене моделе (Gupta et al., 1999).

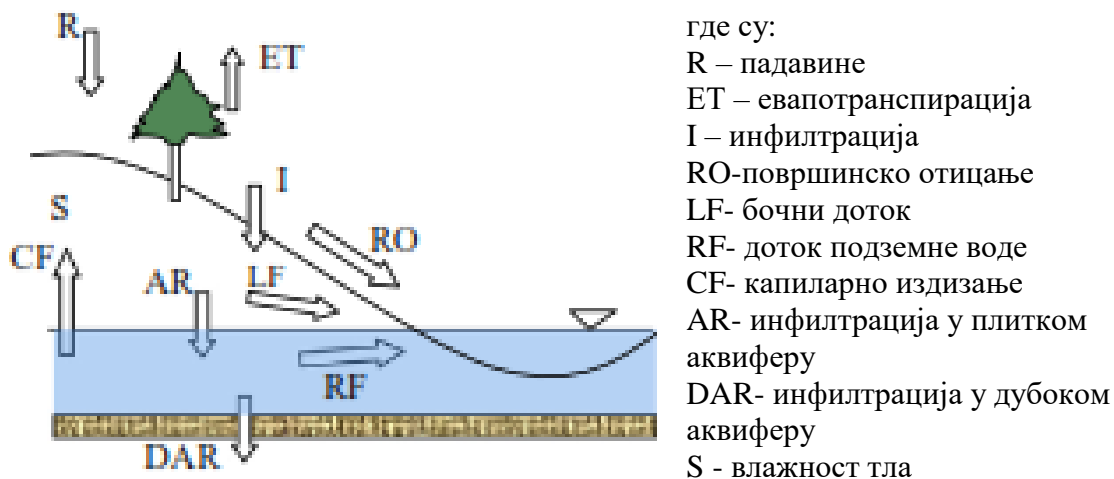
RSR је однос стандардне девијације вредности осматраних података и корена средње квадратне грешке (Root Mean Square Error). Варира у границама од 0 до  $+\infty$ . Колико је мањи индикатор RSR толико је модел прихватљивији (Moriasi et al., 2007).

У наставку је описан поступак даље параметризације, калибрације и валидације модела слива Тиквешке акумулације.

(1) У првом кораку, модел је покренут без икакве калибрације - задани модел, са унапред дефинисаним базама података. Почетне процене вредности значајних параметара су направљене на основу доступних података, литературе и експертиза аналитичара. Резултати примарне симулације су упоређени са опажањима (протицаји, продукција и транспорт седимента) и урађена је примарна анализа перформанси заданог модела како би се добиле основне смернице за даљу калибрацију.

Примарна симулација модела извршена је за период 1966-1991. године, од чега су прве три године коришћене као период за "загревање" модела.

Најпре је извршена евалуација модела провером елемената прорачунатог водног биланса у сливу, Слика 4.11. У овом кораку је коришћен помоћни алгоритам коме се читавају различити излази модела и упоређују се са номиналним распонима дефинисаним на основу претходних искустава и процене програмера модела.



Слика 4.11 Шематски приказ концепта водног биланса у SWAT-у

У овом кораку су одређени следећи елементи водног биланса дефинисаних у оквиру модела.

**Табела 4.5** Елементи водног биланса

Променлива величина	количина (mm)
Падавине - R	537,8
Површинско отицање - RO	32,93
Бочни доток _LF	78,14
Инфилтрација у плитки аквифер - AR	116,79
Доток подземне воде - RF	90,84
Инфилтрација у дубоки аквифер - DAR	5,84
Капиларни протицај - S	20,22
Евапорација и Транспирација - ET	310,6

**Табела 4.6** Односи елемената водног биланса у сливу

Однос	%
Проток у р.мрежи/Падавине	0,38
Базни проток/Укупни проток	0,84
Површинско отицање/Укупни проток	0,16
Инфилтрација/Падавине	0,22
Дубока Инфилтрација/Падавине	0,01
ЕТ/Падавине	0,58

**Табела 4.7** Елементи биланса седимената

Променлива величина	количина (t/ha)
Просечна продукција седимената у сливу	4.87
Максимална продукција седимената у сливу	48
Просечна промена проноса седимената у речној мрежи	- 4.72
% седимената депонованих у речној мрежи	96,9
% транспортованих седимената у речној мрежи	3.1

Компарација излаза модела је урађена са односима елемената водног биланса добивеним анализом мерених података за падавине у сливу и протицајима у мерној станици Расимбегов мост за период од 1966 до 1991. године.

**Табела 4.8** Односа водног биланса - мерени подаци

Однос	%
Коефициент отицања	0,254
ЕТ/Падавине	0,71

У оквиру ове прве процене перформанси модела може се закључити да су елементи водног биланса логични са извесним одступањима у односу на номиналне распоне вредности. Очито је да модел прецењује вредности протицања у речној мрежи на рачун евапорације и транспирације у сливу. Однос просечне вредности укупног протицаја у мерној станици Расим-бегов мост и падавина регистрованих у сливу је виши за око 13% у односу на исти однос добивен на основу мерених вредности за исти тај период. Евапотранспирација процењена у моделу је за 12% нижа у односу на вредности које су прорачунате на основу мерених података. Може се приметити да је процењена вредност продукције седимената у сливу 4,87 t/ha или 633 - 730 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> (за запреминску густину седимената 1,3-1,5 t/m<sup>3</sup>)

што је веома близу вредности које су декларисане у сличним радовима за овај регион у Републици Македонији. Велико одступање од очекиваних вредности има транспорт седимената у речној мрежи. Наиме, анализа биланса седимената наводи на закључак да се 97 % од количине која се продуцира у сливу депонује у сливу и у речној мрежи и да су транспортоване количине веома мале. Овај податак говори да модел потцењује транспорт седимената у речној мрежи и да је потребно да се параметри који су повезани са овим процесом преиспитају и калибришу у даљој процедури.

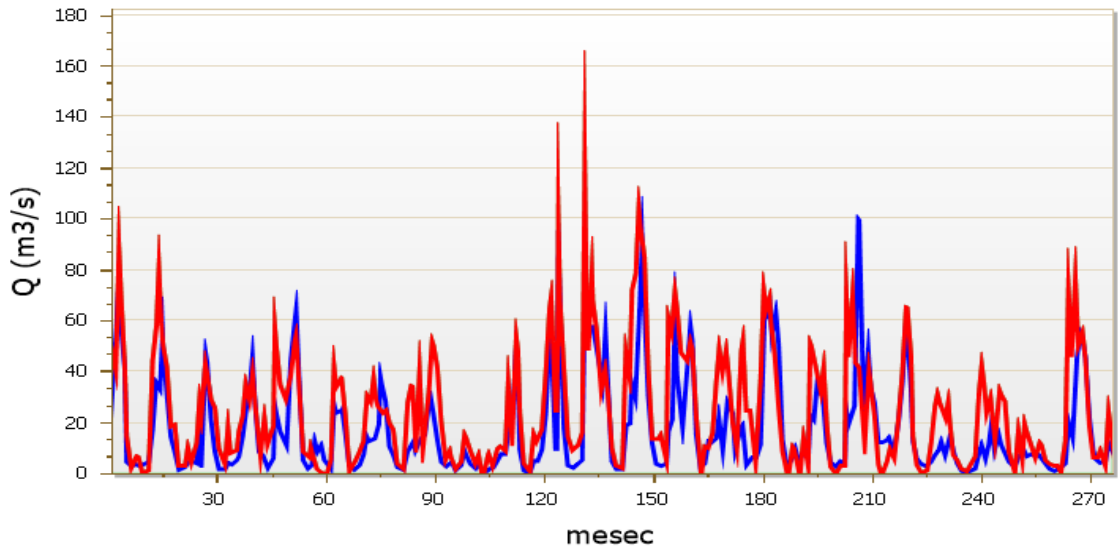
У другом кораку евалуације модела коришћени су расположиви мерени подаци о протицању воде и проноса седимената у поменуте три хидролошке станице: Расим-бегов мост (rs\_152), Скочивир (rs\_203) и Новаци (rs\_243), поглавље 2.5, у периоду 1969-1991. године. Резултати симулације протицаја и поређење са мереним протицајима у наведеним станицама приказани су на Слици 4.12.

Квалитет преклапања моделских излаза са мереним подацима или квалитет ефикасности модела је квантификован коришћењем следећих објективних функција:  $r^2$ , Nash–Sutcliffe-овог коефицијента ефикасности, P-BIAS и RSR.

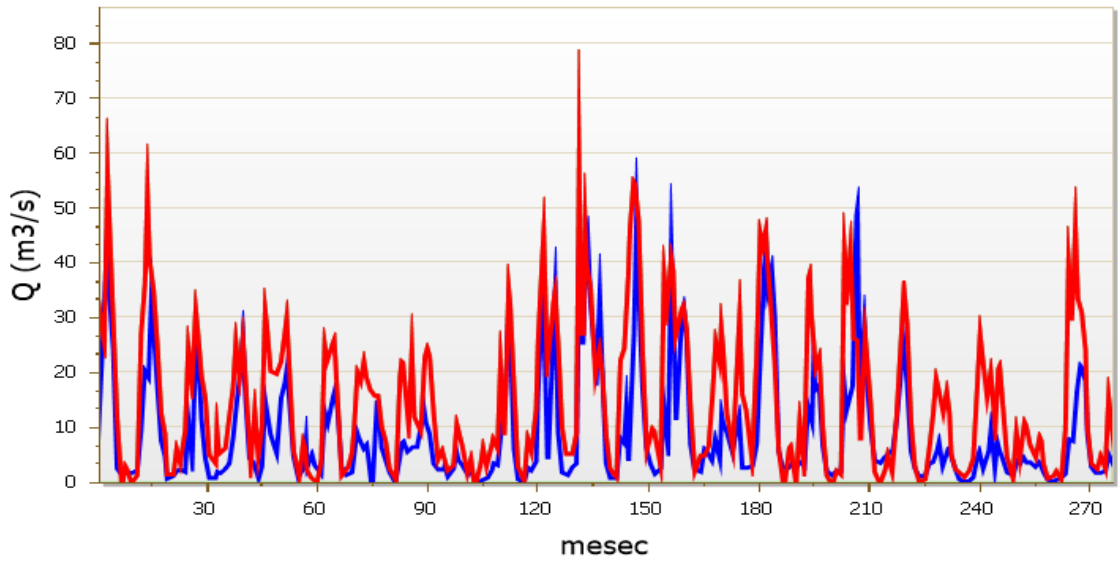
**Табела 4.9** Евалуација заданог модела за почетну симулацију – период 1969-1991

Фаза модела Променлива величина	Почетна симулација			
	$r^2$	NS	PBIAS	RSR
Q 152	0.7	0.35	-44.3	0.8
Q 203	0.71	0.25	-59.6	0.86
Q 243	0.69	0.32	-47.9	0.82
S 152	0.47	-0.21	85.3	1.1

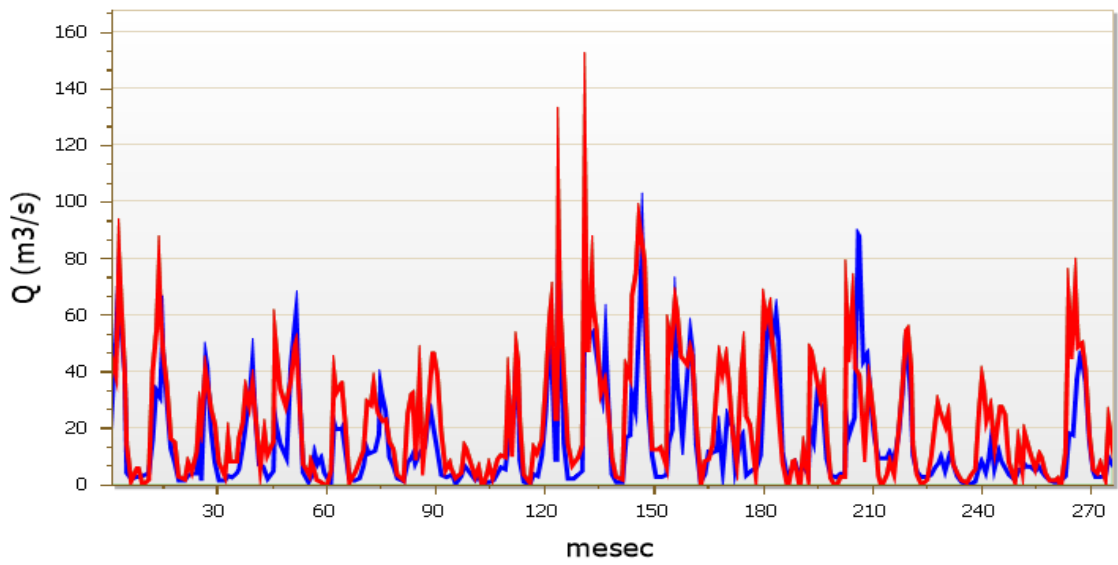
Да модел у почетној симулацији задовољавајуће подражава протицаје у речној мрежи говори анализа средњег квадратног одсупања  $r^2$  и NSE. Вредности ове функције за све три мерне станице су на граници прихватљивости ( $r^2 > 0.7$  и  $NS > 0.5$ ) што значи да су почетне вредности моделских параметара добро претпостављене, прва симулација протицаја је веома коректна и да има смисла даље калибрисати модел са циљем побољшања излазних резултата. Вредности PBIAS указују да модел прецењује просечне вредности протицаја ( $PBIAS_{Q152} = -44.3$  -  $PBIAS_{Q203} = -59.6$ ), али веома потцењује количине седимената транспортованих кроз речну мрежу ( $PBIAS_{s152} = 85.3$ ).



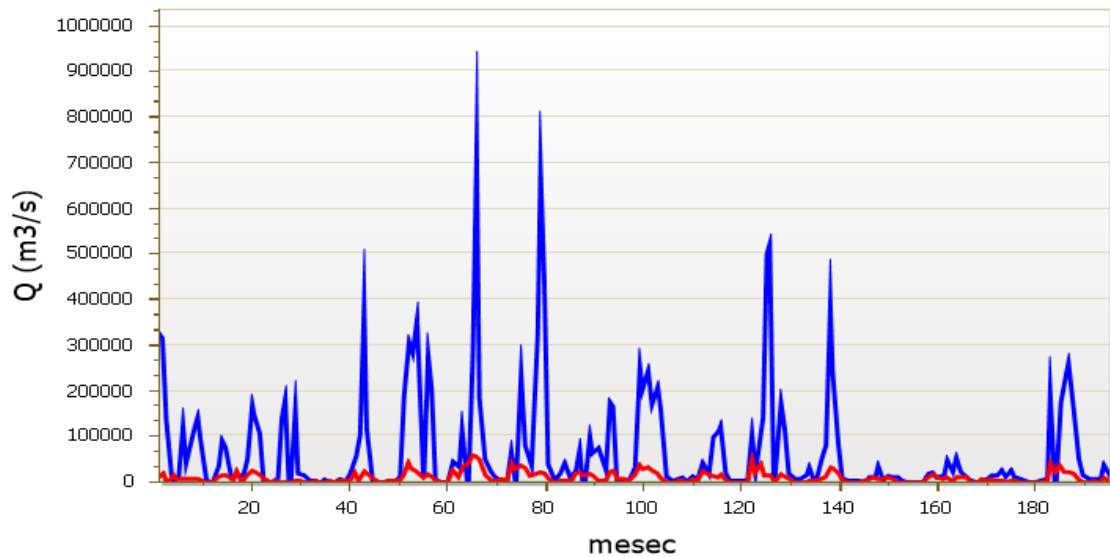
a)



b)



c)



d)

**Слика 4.12** Мерени и симулирани протицаји у мерној станици: a) rs\_152; b) rs\_203; c) rs\_243 и d) пронос седимената у станици rs\_152, у периоду 1969-1991. године – почетна симулација

Из претходне анализе се може закључити да је основни модел добро постављен, а резултати почетне симулације водног биланса су реални. Вредности протицаја у речној мрежи су блиски мереним вредностима у изабраним мерним станицама. Исто се може закључити и у погледу симулације продукције седимената у сливу, док модел транспорта седимената у речној мрежи најслабије подражава реалне процесе, а моделиране вредности проноса наноса су много мање у односу на вредности које се региструју у репрезентативној мерној станици Расим-бегов мост, rs 152. Калибрација значајних параметара ће свакако побољшати понашање модела и излазни резултати ће бити прихватљивији.

(2) На основу перформанси заданог модела, целокупно раздобље симулације је подељено на периоде калибрације и валидације, водећи рачуна да оба периода имају довољан број влажних и сушних година. Калибрација модела извршена је коришћењем расположивих података о протицању воде и проноса седимената у поменуте три хидролошке станице: Новаци, Скочивир и Расим-бегов мост, поглавље 2.5, у периоду 1969-1985, док је валидација модела извршена за период 1986-1991. Одабран је 17-годишњи период калибрације, водећи рачуна да буде заступљено довољно податка из влажних и сувих субпериода.

(3) Процес је започет укључивши све параметре који се односе на хидролошки циклус, протицаје воде и транспорт седимената у речној мрежи. Изабраним параметрима су додељени почетни распони вредности који се обично крећу од +/- 20-30% од почетне вредности. Табела 3.19.

(4) Када је модел параметризован и додељени су почетни распони параметра, у првој итерацији модел је покренут 500 пута. Број симулација је обично 300 – 500 и зависи од броја параметара, брзине извршења модела и могућности система.

(5) након завршетка свих 500 симулација, у постобради су израчунате објективне функције:  $r^2$ , Nash–Sutcliffe-овог коефицијента ефикасности, P-BIAS, RSR и 95PPU за све проматране варијабле.

Након тога су предложени нови распони параметара за другу итерацију којим се модификују претходни распони усредсређујући се на најбољи скуп параметара тренутне итерације (Abbaspour, K.C. et al., 2004, 2007).

(6) Затим је изведена друга итерација, а поступак се наставља све док се не постигну задовољавајући резултати (у смислу  $r$  - фактора и  $g$  - фактора) или се примети да односна итерација не резултује са додатим побољшањем у објективним функцијама. Обично су три до пет итерација довољне за постизање задовољавајућих резултата док су у овом случају биле довољне 3 итерације како би се завршио процес калибрације.

Листа изабраних параметара који су калибрисани у моделу, њихов почетни и финални распон вредности (после треће итерације) је дата у табели 4.10, а резултати симулације протицаја и проноса седимента су приказани на Слици 4.13.

У процесу калибрације протицаја, мерени подаци су обухваћени у оквир 95 PPU у следећем односу: станица 152 Расим-бегов мост 76%, станица 203 Новаци 79% и станица 243 Скочивир 78%, док  $g$  - фактор има препоручену вредност  $< 1.5$  у сва три случаја. Код калибрације проноса седимента, 77% мерених података улази у опсег 95 PPU док  $g$  - фактор има вредност од 1,12.

Што се тиче границе прихватљивости, не постоји чврсто правило које би вредности ова два фактора требале имати, слично чињеници да за  $r^2$  или NS нема чврстих вредности - што су они већи, то је боље. За  $r$  - фактор, предложена је вредност  $> 70\%$  за протицаје, док је препоручена вредност  $g$  - фактора око 1. За седimente, мањи  $r$  - фактор и већи  $g$  - фактор би могли бити прихватљиви (Abbaspour, K.C. et al., 2004).

Квалитет преклапања моделских излаза са мереним подацима или ефикасности модела су још квантификовани коришћењем следећих објективних функција:  $r^2$ , Nash–Sutcliffe-овог коефицијента ефикасности, P-BIAS и RSR.

Према Моријасију (Moriasi, D. N. et al., 2015) може се сматрати да је модел калибрисан на задовољавајућем нивоу ако се постигну следеће вредности објективних функција:  $NSE > 0,50$ ,  $RSR \leq 0,70$ ,  $PBIAS \pm 25\%$  за проток речне мреже, и  $PBIAS \pm 55\%$  за транспорт седимента. Вредности објективних функција за квалитативну процену модела приказане су у Табели 4.11.

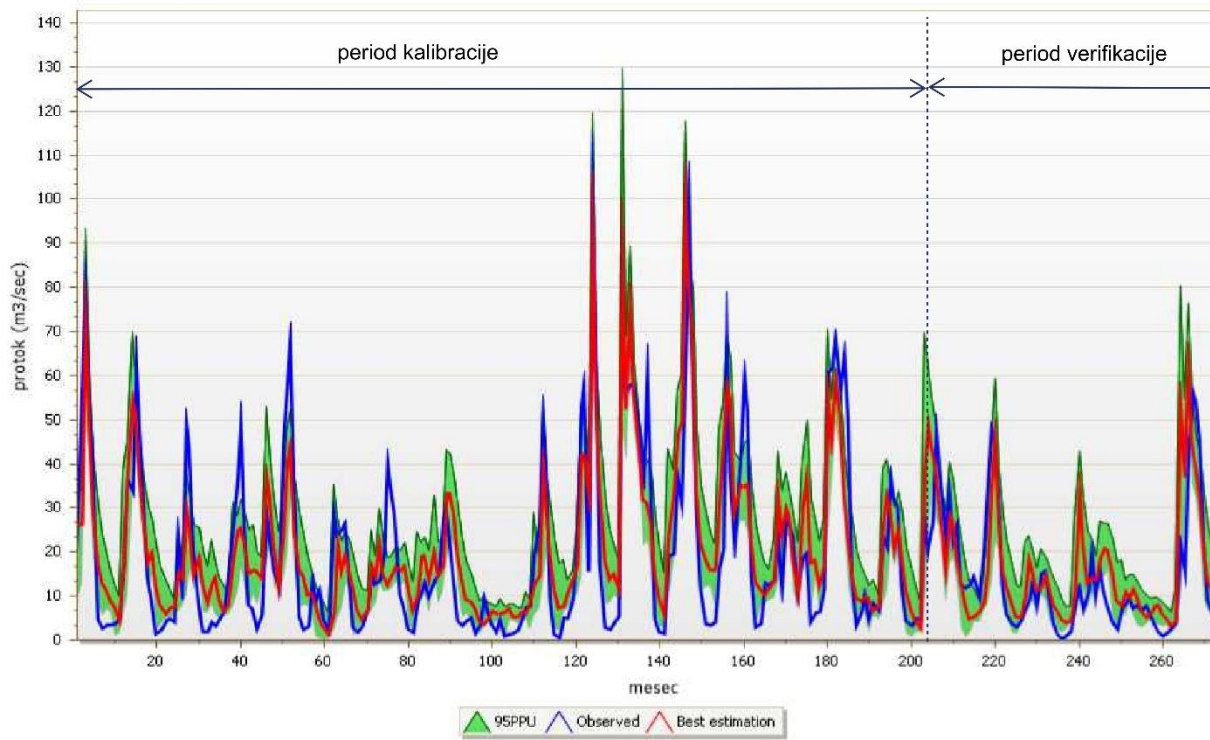
Табела 4.10 Опис параметара изабраних за калибрацију

	Опис параметра			Почетни распон		Финални распон	
	Назив	Дефиниција	Метод	Min	Max	Min	Max
Површинско отицање	CN2	Почетна вредност SCS броја криве	Relative	-0.2	0.2	-0.091	-0.017
	SOL_AWC	Расположиви водни капацитет земљишта %	Relative	-0.2	0.8	0.501	0.640
	EPCO	Биљни компензациони фактор	Replace	0	1	0.231	0.374
	ESCO	Компензациони фактор евапорације земљишта	Replace	0	1	0.471	0.584
	SURLAG	Време закашњења површинског отицања	Replace	1	24	4.711	7.033
	SOL_K	Saturated hydraulic conductivity (mm h <sup>-1</sup> ) Хидрауличка спроводљивост засићеног земљишта	Relative	-0.3	0.3	-0.387	-0.250
	CH_N2	Манингов "n" коефицијент главног водотока	Replace	0	0.1	0.022	0.033
	CH_K2	Ефективна хидрауличка спроводљивост главног водотока	Replace	0	300	2.486	13.858
Базно отицање	ALPHA_BF	Алфа фактор базног отицања	Replace	0	1	-0.011	0.069
	GW_REVAP	"revap" коефицијентат подземне воде	Replace	0.02	0.2	0.151	0.238
	GW_DELAY	Кашњење подземног дотока (дани)	Replace	0	500	3.048	38.633
	GW_QMN	Гранична дубина подземне воде у плитком аквиферу за почетак повратног тока		0	5000	1.445	1.882
Седименти у речној мрежи	ADJ_PKR			0.5	2.0	1.03	1.57
	SPCON	Линеарни параметар једначине седимената	Replace	0.0001	0.01	0.0001	0.007
	SPEXP	Експоненцијални параметар једначине седимената	Replace	1	1.5	1.220	1.461
	CH_EROD	Фактор еродибилности речног корита	Replace	0	0.6	0.000	0.373
	CH_COV	Фактор вегетацијске покривености речног корита	Replace	0	1	0.181	0.634

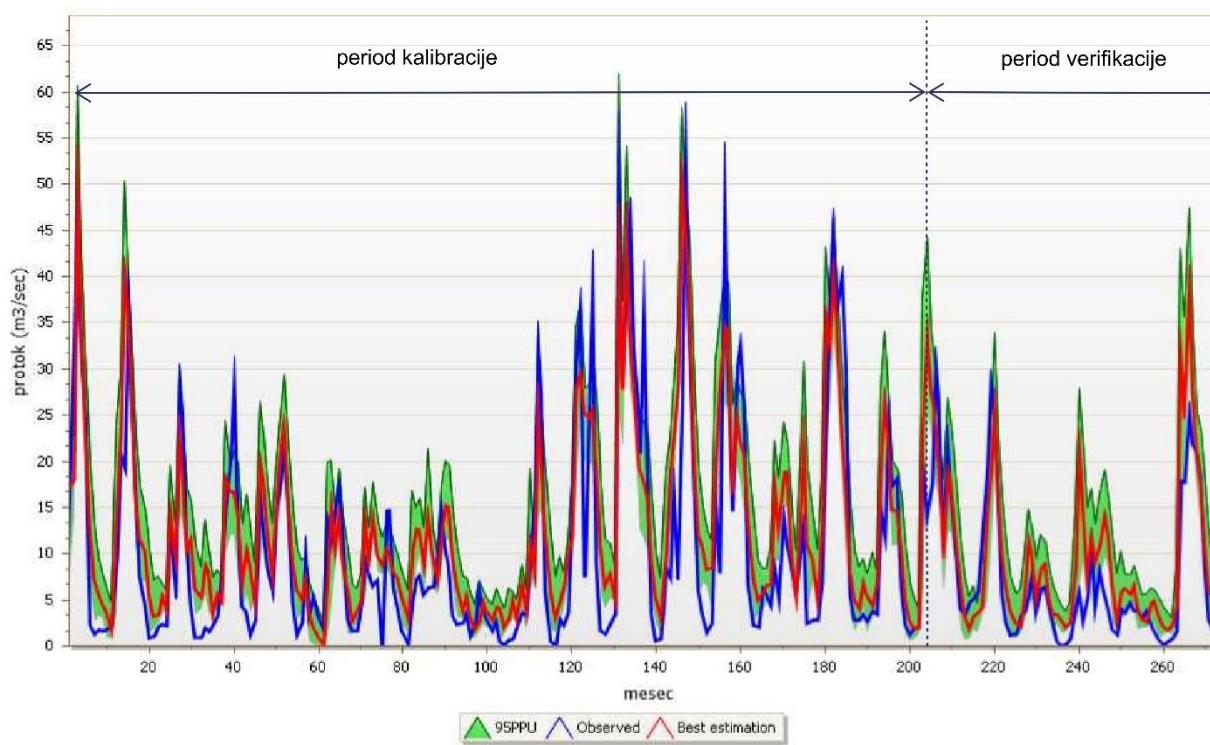
Табела 4.11 Евалуација модела у фази калибрације и валидације

Фаза модела	Калибрација						Верификација						
	Варијабила	P - factor	r- factor	r <sup>2</sup>	NS	PBIAS	RSR	P - factor	r- factor	r <sup>2</sup>	NS	PBIAS	RSR
Q <sub>152</sub>		0.76	1.07	0.74	0.74	1.5	0.51	0.79	1.09	0.70	0.70	-5.8	0.55
Q <sub>203</sub>		0.79	1.04	0.74	0.73	-9.4	0.52	0.72	1.12	0.71	0.65	-24.9	0.59
Q <sub>243</sub>		0.78	1.01	0.73	0.73	0.7	0.52	0.79	1.11	0.72	0.69	-15.6	0.56
S <sub>152</sub>		0.77	1.12	0.46	0.42	20.1	0.76	0.88	1.03	0.59	0.59	-3.0	0.64

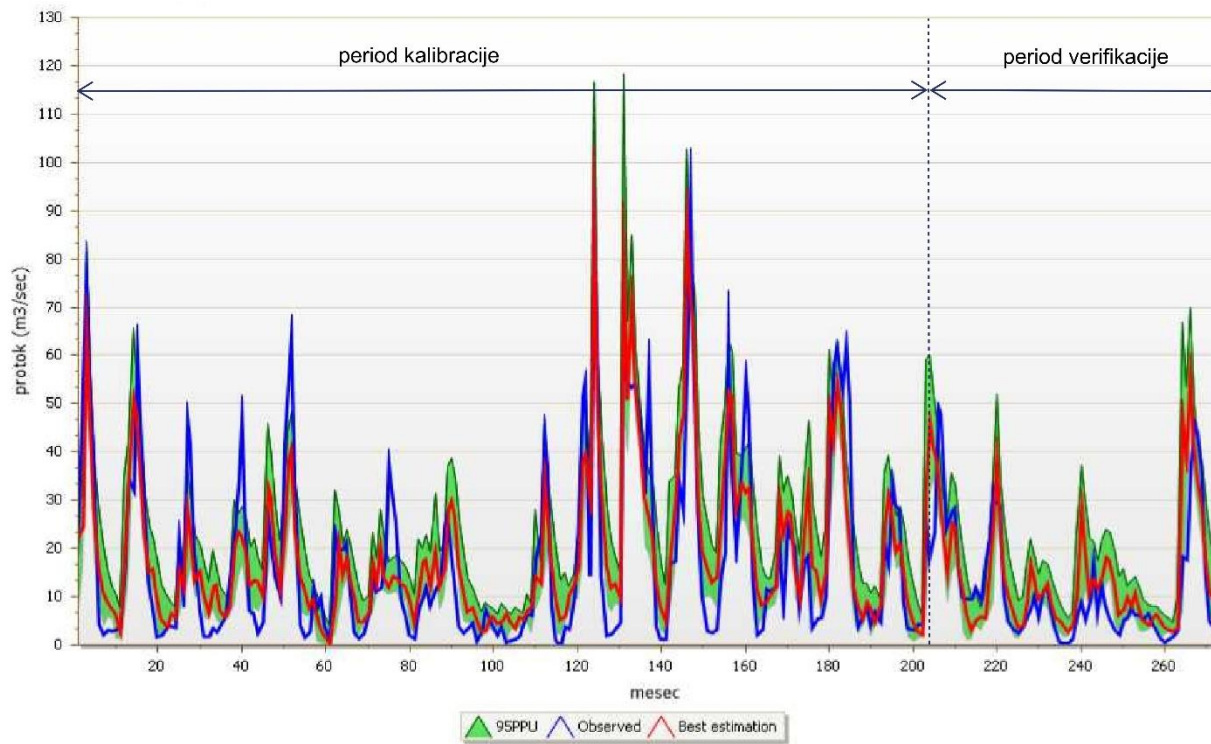




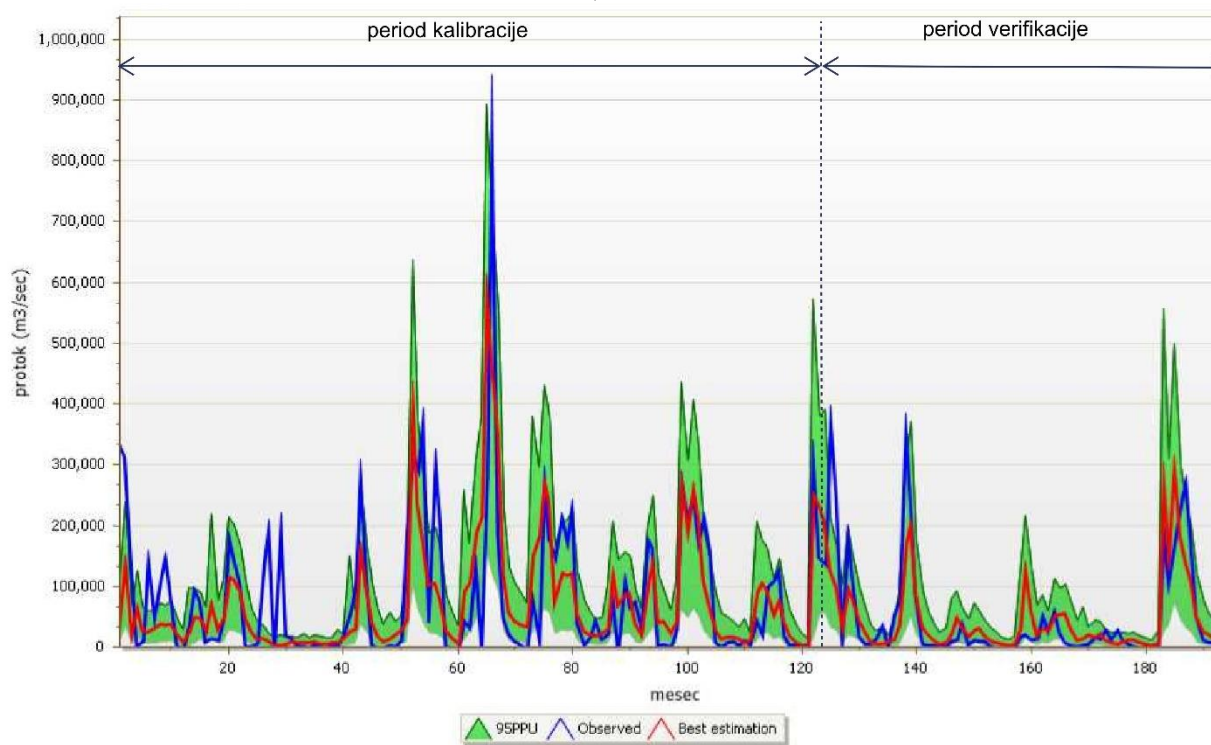
a)



b)



c)

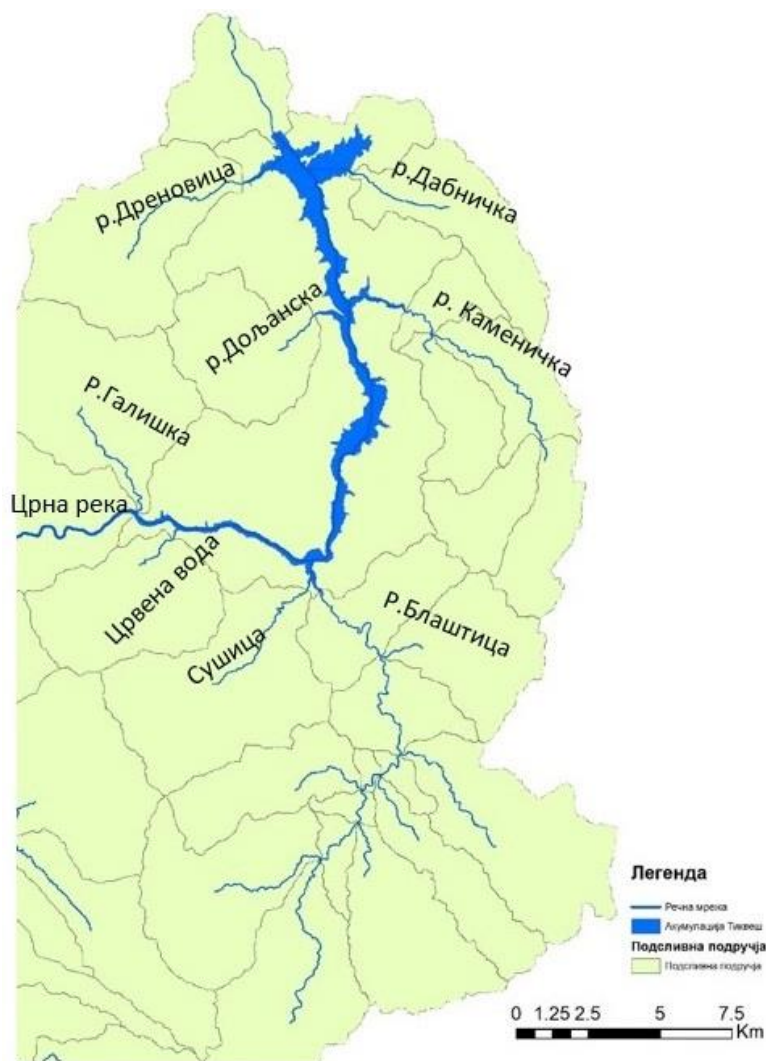


d)

**Слика 4.13** Мерени и симулирани протицаји у а) rs\_152; б) rs\_203; в) rs\_243 и пронос седимената у д) rs\_152 , у периоду калибрације и валидације модела

#### 4.5 МОДЕЛИРАЊЕ СЕДИМЕНТАЦИЈЕ У АКУМУЛАЦИЈИ ТИКВЕШ

Након што је модел калибрисан на протицаје, продукције и транспорт седимената у речној мрежи, извршено је моделирање седиментације акумулације Тиквеш. У фази моделирања седиментације, непосредни слив акумулације Тиквеш је третиран као један слив дуж целе акумулације на дужини од око 28 км. У акумулацију се директно улива неколико водотока: главни водоток - Црна река и 8 бочних притока: Галишка река, река Црвена вода, река Сушица, река Блаштица, Каменичка река, Дољанска река, Дабничка река и Дреновачка река.



Слика 4.14 Хидрографска мрежа непосредног слива акумулације Тиквеш

Укупна маса седимената (ton) која улази у акумулацију у анализираном периоду израчуната је сумирањем појединачних маса транспортованих седимената сваког од наведених водотока.

$$S_{ak.} = \sum_{i=1}^n S_i \quad (\text{ton})$$

Где су:  $S_{ak}$  - укупна маса седимената транспортованих у акумулацији ((ton);  $S_i$  - маса седимената транспортованих из сваке од притока акумулације,  $i=1-9$ , (ton)

Да би се претворила маса у запремину депонованих седимената, потребна је информација о густини седимената. Главни фактори који утичу на густину седимената у резервоарима су: величина и текстура одложених честица, сабијање током времена или степен консолидације седимената и пракса управљања.

Просечна густина акумулираног седимента у акумулацији је процењена на  $1,35 \text{ t/m}^3$  и одређена је коришћењем методе Лара-Пембертон (Lara, J. M. and Pemberton, E. L., 1963). Метода је примењена на основу гранулометријских анализа узорка материјала узетих из резервоара током батиметријских истраживања спроведених 1991 и 2016 (Ivanoski, D., 2016).

Ефикасност задржавања седимента у акумулацији је процењена на 98%. Ове вредности су добивене помоћу Брунеових криви за нормалне акумулације (Brune, G. M., 1953).

Запремина седимената у акумулацији у анализираном периоду је добијен трансформацијом масе у запремину и њене корекције због ефекта задржавања седимента у акумулацији:

$$W_{\text{res.}} = \frac{M_s}{D_{\text{bulk}}} * T_{\text{eff.}} \quad (\text{m}^3)$$

Где су:  $W_{\text{ак.}}$  - укупна запремина депонованих седимената у акумулацији ( $\text{m}^3$ );  $S_{\text{ак.}}$  - укупна маса депонованих седимената у акумулацији (ton);  $D_{\text{bulk}}$  - запреминска тежина депонованих седимената у акумулацији ( $\text{ton/m}^3$ );  $T_{\text{eff}}$  – ефикасност задржавања седимента у акумулацији.

#### 4.6 ПРОГНОСТИЧКА СИМУЛАЦИЈА ЗА ПЕРИОД 1992–2016 ГОДИНЕ

Користећи калибрисани и верификовани модел за период 1969–1991 године, у даљој анализи је спроведена прогностичка симулација хидролошких процеса, продукције и транспорта седимената у речној мрежи, као и процеса депоновања седимената у акумулацији Тиквеш у периоду 1992-2016. године. Излазни резултати модела упоређени су са измереним подацима добивеним на последњем батиметријском истраживању спроведеном у 2016 години.

Како је претходно наведено, због недоступности метеоролошких података у периоду 1992 -2016, урађена је прогнозна симулација климатских параметара у сливу користећи WXGEN - Weather Generator, програм интегрисан у SWAT окружењу. Коришћењем овог програмског модула, на основу статистичке анализе расположивих података о дневним падавинама, температури ваздуха, сунчевог зрачења, брзине ветра и релативне влажности ваздуха регистрованих у метеоролошкој станици Прилеп у периоду 1966-1991, Табела 4.12 , извршено је прогностичко моделирање климатских података анализираног подручја за период 1992- 2016.

Овако генерисана база климатских података се даље користила у калибрисаном моделу при чему је извршено прогнозно моделирање хидролошких процеса, продукције седимената у сливу, транспорт у речној мрежи и засипање наносом у акумулацији Тиквеш.

Процењене количине седимената депонованих у акумулацији у анализираном периоду 1969–2016. године дате су у Табели 4.13 и Слици 4.15.

Табела 4.12 Статистички параметри за метеоролошку станицу Прилеп за период 1966–1991

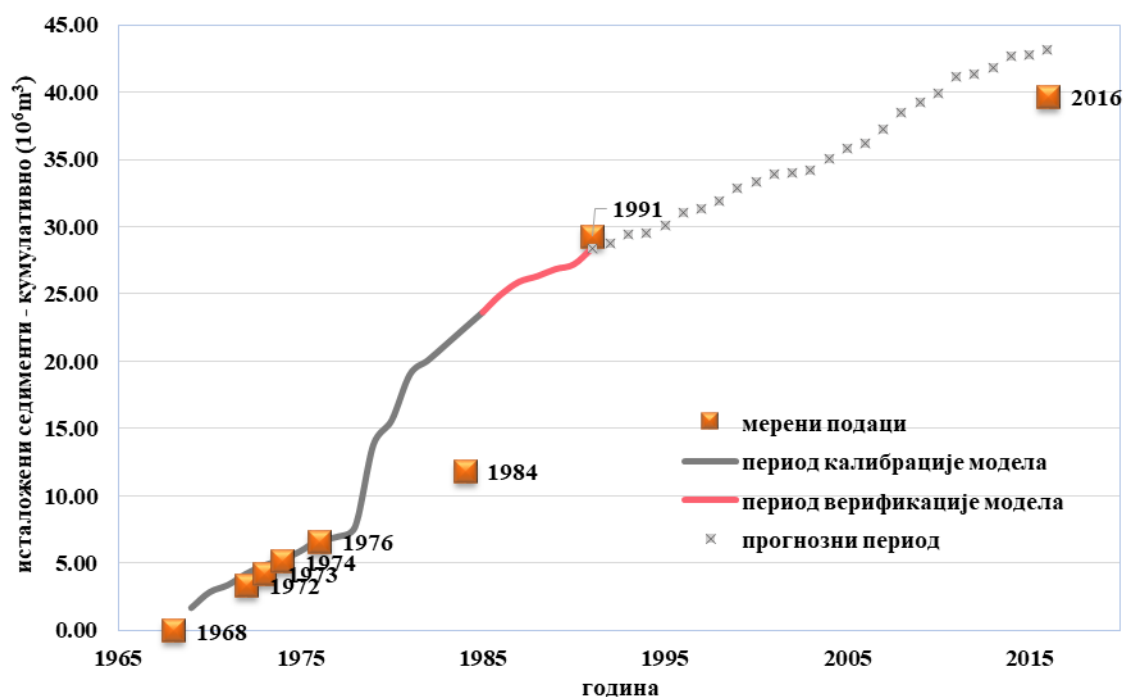
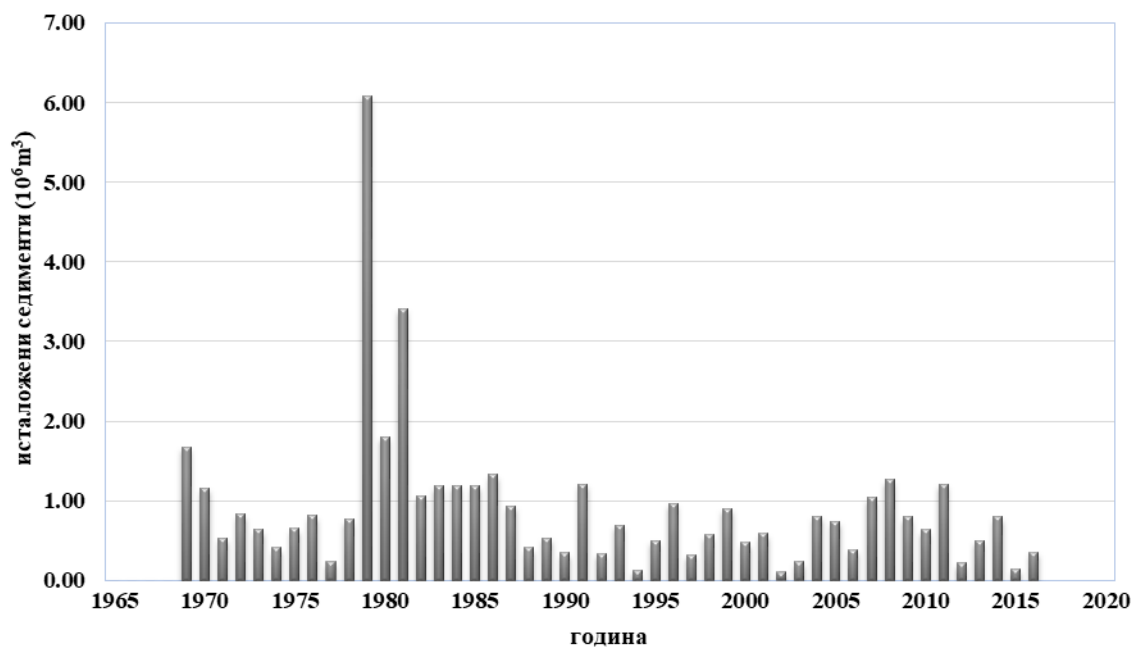
Станица	Метеоролошка станица Прилеп											
	латитуда	41.33	лонгитуда	21.57								
надм.висина	620.00	mNV										
месец	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
tmpmx	3.84	5.35	10.32	15.85	21.40	26.77	30.31	30.69	25.32	17.84	10.30	5.08
tmpmn	-2.41	-1.87	0.88	4.19	8.08	11.19	13.01	12.93	9.75	6.41	2.22	-1.06
tmpstmx	4.28	4.81	5.46	4.61	4.51	4.61	4.71	4.42	4.79	5.64	4.99	4.26
tmpstdmn	4.05	4.21	3.48	3.07	2.73	2.76	2.64	2.67	3.07	3.75	4.13	4.11
pcpmm	35.74	35.87	41.29	47.25	60.71	48.32	38.78	32.40	34.61	44.78	60.39	43.44
pcpstd	3.44	3.51	3.98	4.23	4.68	4.95	4.45	4.38	3.87	5.04	6.70	3.27
pcpskw	6.76	5.32	6.85	5.00	3.65	5.33	6.13	8.60	4.98	8.39	8.63	3.43
pr_w(1)	0.23	0.23	0.25	0.28	0.28	0.24	0.14	0.14	0.15	0.17	0.20	0.23
pr_w(2)	0.59	0.59	0.59	0.58	0.57	0.43	0.49	0.42	0.43	0.53	0.61	0.61
pcpd	11.22	10.25	11.67	11.75	12.39	9.06	6.72	5.81	6.28	7.69	10.31	11.36
rainhhmx	55	39.4	59	46	35.2	56.4	77.9	44.6	36.5	88.8	120.2	25.8
solarav	6.7583073	10.0738	15.13335	20.19049	23.9398	26.73092	25.95125	23.09244	18.52338	12.33099	7.478316	5.475759
dewpt	0.8725341	0.839222	0.77698	0.7262	0.705754	0.612312	0.513539	0.504466	0.591032	0.718866	0.821354	0.861786
windav	2.6734185	2.781411	2.713893	2.547249	2.29536	2.300387	2.490297	2.256889	2.207628	2.260812	2.474619	2.659075

<b>tmpmx</b>	просек максималних дневних температура ваздуха током месеца	pr_w(1)	вероватност да влажни дан наступи након сувог дана у месецу
<b>tmpmn</b>	просек минималних дневних температура ваздуха током месеца	pr_w(2)	вероватност да влажни дан наступи након влажног дана у месецу
<b>tmpstmx</b>	станд.дев. максималних дневних температура	pcpd	просечан број дана са падавинама током месеца
<b>tmpstdmn</b>	станд.дев. минималних дневних температура	rainhhmx	максимум 0,5 часовне кише током месеца за цели период
<b>pcpmm</b>	просек укупних месечних падавина	solarav	просечна дневна сунчана радијација током месеца
<b>pcpstd</b>	станд.дев. дневних падавина	dewpt	просечна дневна релативна влажност током месеца
<b>pcpskw</b>	експес дневних падавина	windav	просечна дневна брзина ветра током месеца



Табела 4.13 Запремина депонованих седимената у акумулацији

Година	Мерени подаци ( $10^6\text{m}^3$ )	SWAT модел ( $10^6\text{m}^3$ )	PBIAS %
1973	4.65	4.84	-4.04
1974	5.54	5.25	5.24
1976	7.01	6.72	4.15
1984	12.3	22.46	-82.8
1991	29.3	28.41	3.10
2016	39.7	43.15	-8.68



Слика 4.15 Депоновани седименти у акумулацији: (а) годишње, (б) кумулативна запремина

## 4.7 АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

### 4.7.1 Анализа резултата хидролошког модела

Калибрација модела нема великог утицаја на вредност  $r^2$ , али значајно побољшава вредности објективне функције NSE-коэффицијента. Као што је и очекивано, вредности објективних функција променљивих вредности протока воде су ниже у периоду верификације, што није случај са транспортованим количинама седимента, где се вредност објективних функција повећава. Ово је последица значајних одступања симулираних и измерених вредности варијабилна на почетку процеса калибрације, што смањује вредности објективних функција, Слика 4.13д. Разлог за ове разлике би могао бити нижи квалитет измерених података о седиментима у овом периоду.

Процењене вредности просечне ерозије у сливу Тиквешке акумулације за период 1969-1991. године износе  $5,75 \text{ t ha}^{-1}\text{god}^{-1}$ . Ова вредност указује на веома високу стопу ерозије у сливу која је знатно виша од просека европских земаља процењеног на  $2,40 \text{ t ha}^{-1}\text{god}^{-1}$  за референтну 2012 годину, виша од просечне ерозије у суседним земљама Грчкој ( $4.2 \text{ t ha}^{-1}\text{god}^{-1}$ ) и Бугарској ( $2.03 \text{ t ha}^{-1}\text{god}^{-1}$ ), али нижа од пријављених просечних вредности у Италији ( $8.35 \text{ t ha}^{-1}\text{god}^{-1}$ ). (Panagos, P. et al., 2017).

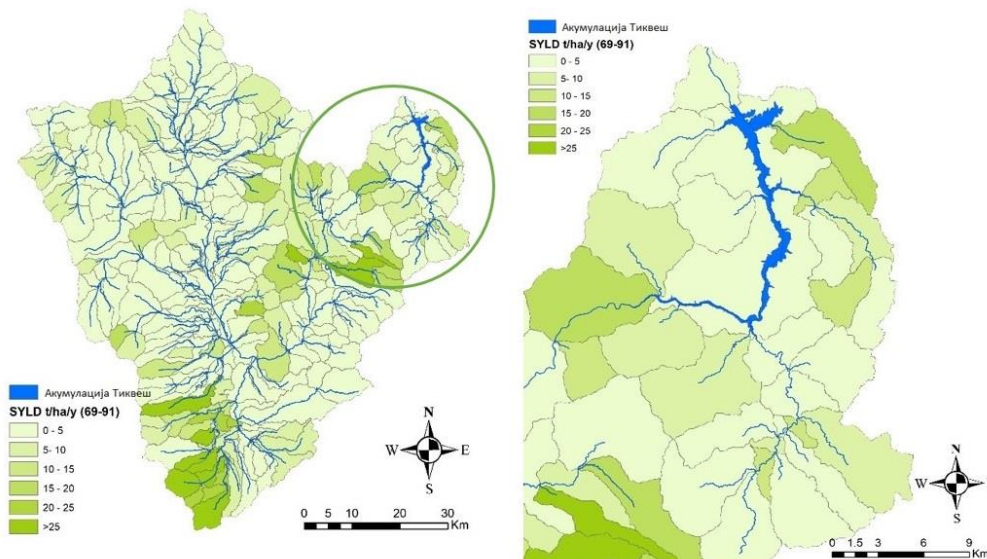
Просторна дистрибуција интензитета ерозије у сливу показује да је, упркос утицају главног водотока, акумулација Тиквеш очигледно под јаким утицајем њених директних притока, где је процењена продукција седимената у распону од 3 - 25 t/ha/god., Слика 4.16. То је вероватно поље за будућа истраживања у погледу смањења ерозионих процеса у сливу, како се препоручује позитивном праксом одрживог управљања акумулацијама (Annandale, George W. et al., 2016).

### 4.7.2 Анализа седиментације у акумулацији Тиквеш

Процена депонованих седимената у акумулацији је углавном у распону од + - 10% у односу на кумулативну количину израчунату на основу података забележених из батиметријских мерења. Највеће одступање се примећује у односу на годину 1984 када симулација модела резултира значајно већом масом депонованих седимената у акумулацији (PBIAS = -82,8%). С обзиром на то да су у периоду од 1978 до 1980 године евидентиране високе вредности протока воде и седимената у речној мрежи, резултати добивени моделском симулацијом се могу сматрати поузданим. Ово указује на то да су се вероватно појавили одређени пропусти током хидрографских мерења изведених 1984 године, што је резултирало неправилним проценом количине исталожених седимената за тај период, Слика 3.24.



Такође се може приметити да модел прецењује укупну количину седимената на крају анализираниог периода за око 8,7 % у односу на измерене податке. Ова разлика би се могла исправити ако је у моделска ограничења укључен и процес консолидације депонованих седимената, што је временски зависна варијабила која утиче на запреминску тежину, односно на густину депозита. Калибрација метеоролошког модела, која у овом случају није урађена због недостатка релевантних података, такође ће допринети даљем повећању тачности и поузданости модела.



Слика 4.16 Интензитет ерозије земљишта у сливу акумулације Тиквеш

Што се тиче смањења запремине акумулације током времена, на основу моделске симулације могу се извући следећи закључци:

Варијабилност брзине седиментације у различитим периодима је очигледна и директно зависи од природних услова који превладавају у сливу;

Што се тиче интензитета седиментације акумулације, досадашњи период експлоатације може се поделити у три потпериода: од 1969 до 1977 године, од 1978 до 1985 године и од 1986 до 2016 године.

У периоду од 1969 до 1977 године, просечан годишњи губитак запремине је износио  $0.773 \times 10^6 \text{ m}^3$  или 0,163% од укупне почетне запремине ( $475 \times 10^6 \text{ m}^3$ );

У периоду од 1979 до 1986 године, који је забележен као изузетно влажан период у региону, годишњи губитак ефективне запремине акумулације је изузетан, и износи око  $18.02 \times 10^6 \text{ m}^3$  или у просеку  $2.00 \times 10^6 \text{ m}^3$  годишње, што представља губитак од 0,42% укупне почетне запремине. Према резултатима модела, максимална годишња количина депонованих седимената у овом периоду се дешава 1979 године и износи  $6,1 \times 10^6 \text{ m}^3$  што је скоро 1,28% укупне почетне запремине, или 14,1% укупне запремине депонованог материјала у акумулацији;

У периоду од 1987 до 2016 године стопа седиментације је смањена, а просечни годишњи губитак запремине износи  $0,605 \times 10^6 \text{ m}^3$  (0,127%);

Укупан губитак запремине акумулације у целом анализираном периоду који се протеже од 1969 до 2016 године или у току 48 година експлоатационог периода износи око  $43.1 \times 10^6 \text{ m}^3$  или у просеку  $0.898 \times 10^6 \text{ m}^3$  годишње, што представља просечни годишњи губитак од 0,19% од укупне почетне запремине;

Просечна стопа седиментације акумулације у анализираном периоду 1969-2016 на годишњем нивоу се креће од 0,02 до 1,28% од почетне запремине.

## V.

# РАЗВОЈ И ПРИМЕНА ХИДРОДИНАМИЧКОГ МОДЕЛА АКУМУЛАЦИЈЕ ТИКВЕШ

## 5.1 УВОД

Дугорочна временска дистрибуција седимената у акумулацији Тиквеш је моделирана применом изабраног једнодимензионалног хидродинамичког модела SRH-1D. Модел је методолошки развијен и примењен у неколико фаза: креирање улазних датотека (1), параметризација модела (2), калибрација модела (3), прогнозно моделирање (4).

## 5.2 КОРИШЋЕНЕ ПОДЛОГЕ

У овом одељку су описани подаци коришћени за покретање нумеричких симулација процеса дистрибуције седимената у акумулацији Тиквеш. Ова база се састоји од батиметријских података, података о дотоку воде и промене нивоа у акумулацији, температура воде као и од података о седиментима. Као што је познато код моделирања транспорта воде и седимената, није увек могуће имати све потребне податке, па се тако мора радити оним што је доступно.

У овом раду су били доступни подаци о протицајима у реци Црна у периоду 1969-2016 и о нивоима воде у акумулацији за исти период 1969-2016. Међутим, било је врло мало информација о проносу наноса у реци Црна и у мањим притокама које дотичу директно у акумулацију. Да би се то превазишло, развијен је модел за математичку симулацију хидролошких процеса у сливу акумулације као и процеса продукције и транспорта суспендованог наноса (поглавље 3). Помоћу овог модела израчунати су протицаји воде и пронос наноса у свим водотоцима који се уливају у акумулацију Тиквеш.

### 5.2.1 Батиметријски подаци

У овом раду су коришћени батиметријски подаци из 1972 године, који се сматрају као топографска мерења пре пуњења резервоара, и подаци из 1973, 1976, 1984, 1991 и 2016 године када су спроведена редовна ехосондерска истраживања дна акумулације. Мерења су извршена на укупно 42 пресека који представљају главни водоток на око 26 км дужине и 20 профила на притокама (рукавац Блаштица, Каменичка и Дреновска река) на дужини од око 5 km. Ове информације су добивене од стране НХМС (Националног хидрометеоролошког сервиса Републике Македоније), организације одговорне за прикупљање и обраду хидрометеоролошких података у држави. Батиметријска мапа нултог стања акумулације је генерисана на основу података из 1972 године.

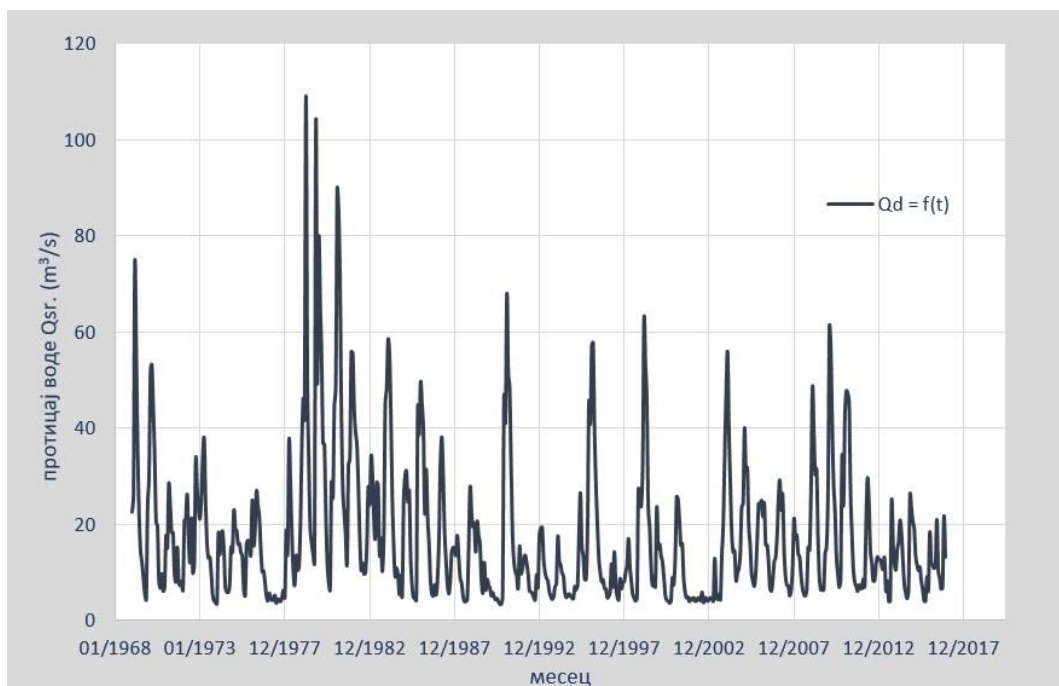
## 5.2.2 Хидролошки подаци

Подаци о хидрологији се састоје од месечних протицаја на узводном крају водотока, као и средњих месечних флукуација нивоа акумулације на низводној страни. Уношење ових података у модел извршено је коришћењем хидрограма протицаја (време – протицај) на узводним контролним профилима и нивограма акумулације на низводним контролним профилима.

Губитак енергије због трења на речном кориту прорачунат је методом просечних нагиба, док је Манингова једначина изабрана за израчунавање отпора тока.

### 5.2.2.1 Протицаји

Подаци о средњим месечним протицајима у водотоцима који улазе у акумулацију Тиквеш су добивени математичким моделом SWAT (поглавље 4). Подаци који се односе на протицаје у главном водотоку који снабдева акумулацију, реци Црној, за период од 1969 до 2016 године, приказани су на слици 5.1.

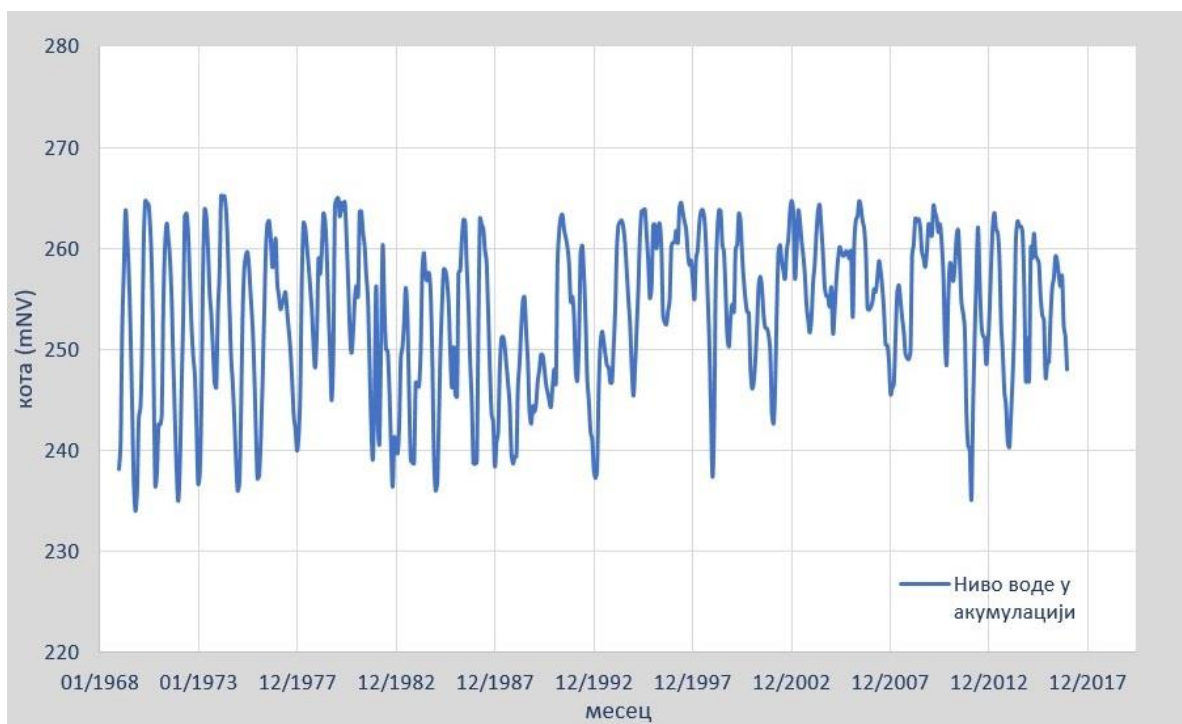


Слика 5.1 Доток воде у акумулацију у периоду 1969-2016 (SWAT модел)

### 5.2.2.2 Нивои и температура воде у акумулацији Тиквеш

Информације о просечним месечним нивоима акумулације Тиквеш су добивени од стране А.Д. ЕЛЕМ-а (А.Д. Електране Македоније), компаније за производњу електричне енергије за период 1969-2016. Средња вредност коте нивоа акумулације у овом периоду је 253,6 mNV, док је медијана низа 254,8 mNV.

Максимални ниво воде који је регистрован у досадашњем експлоатационом периоду износи 265,2 mNV, док је минимални ниво 234 mNV. Углавном, нивои акумулације флукутирају између највише вредности 265 mNV и 252 mNV, док максимална амплитуда флукутације нивоа износи 31,2 m.



Слика 5.2 Промена нивоа воде у акумулацији Тиквеш за период 1969-2016

Температура воде је варијабилна у току године. Просечне месечне температуре измерене у разматраном периоду су дате у наредној табели.

Табела 5.1 Температура воде у Тиквешкој акумулацији

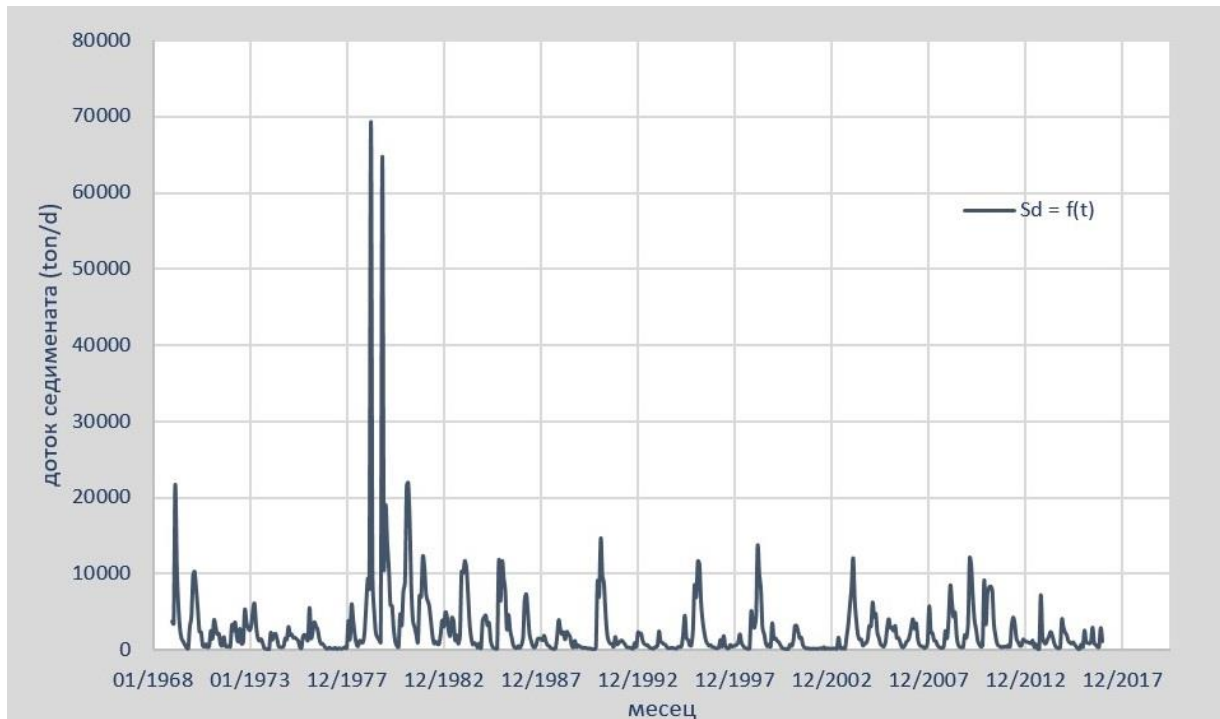
Месец	Јан.	Феб.	Март	Април	Мај	Јун	Јули	Август	Септ.	Окт.	Нов.	Дец.	Год.
Т (°C)	7.7	7.3	10	14.2	20.2	24.2	26.2	26.8	23.7	19.7	16.1	11	17.3

### 5.2.2.3 Подаци о седименту

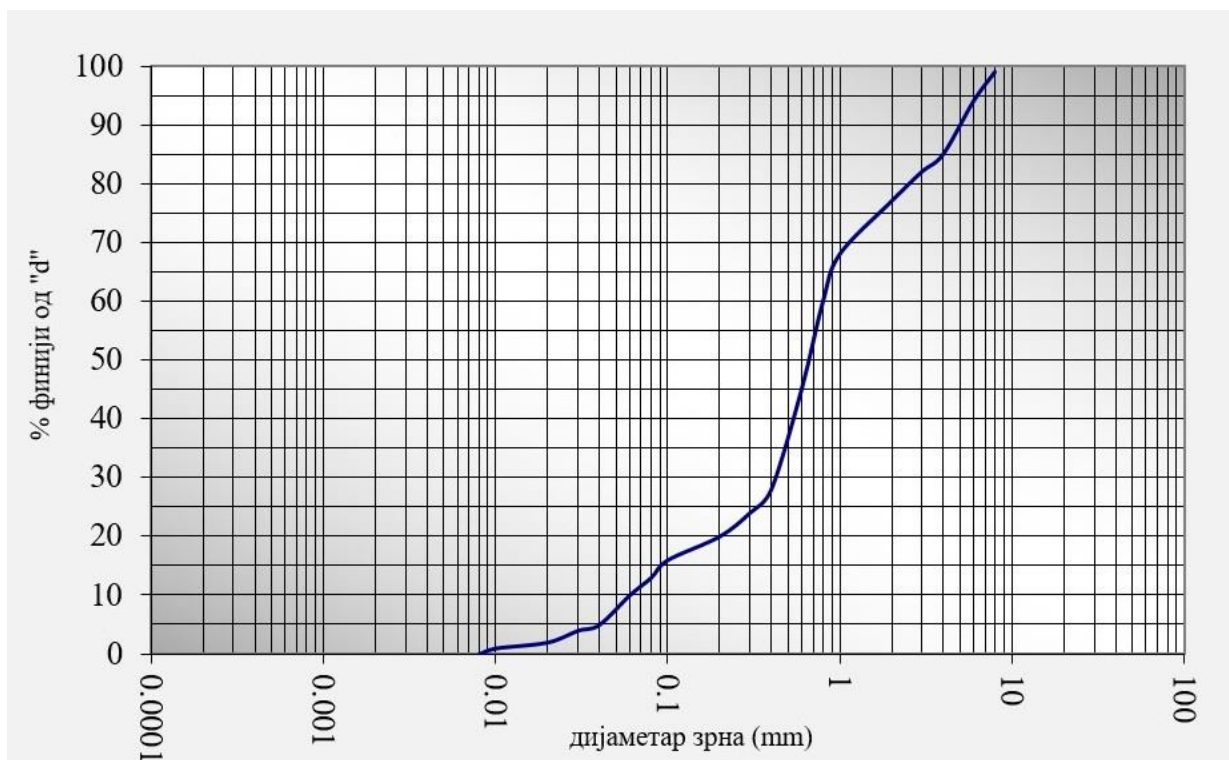
Количина улазних седимената је генерисана уз помоћ математичког модела SWAT. У овом раду нумерички модел је зазнован на осредњене месечне вредности проноса наноса у периоду од 1969 до 2016 године, Слика 5.3.

Гранулометриски састав материјала у симулираном домену је познат на одређеним локацијама (информације добивене теренским истраживањима), док за делове који леже између тих локација је извршена одговарајућа интерполација. Распон дистрибуције величине наносног материјала на дну акумулације је приказан на сликама 5.4 до 5.8.

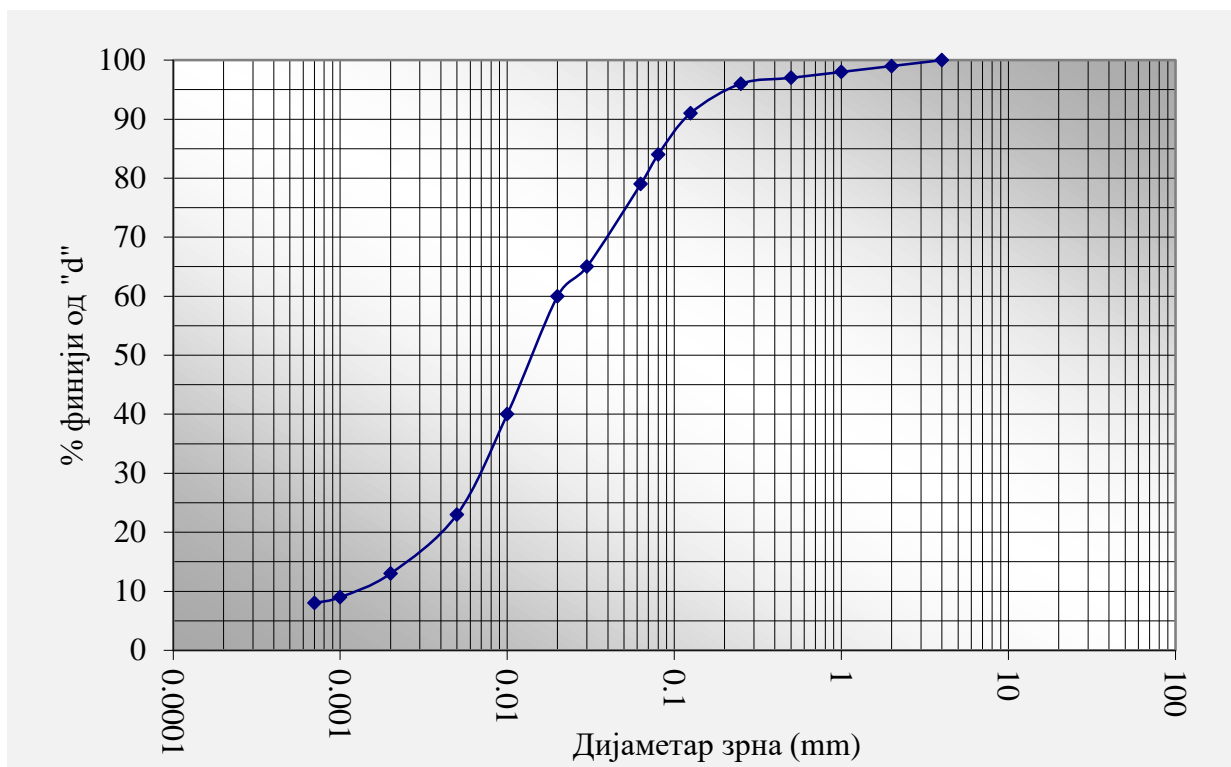
Материјал у дну акумулације и долазна суспензија имају релативно висок проценат финих честица, у величини муља и глине.



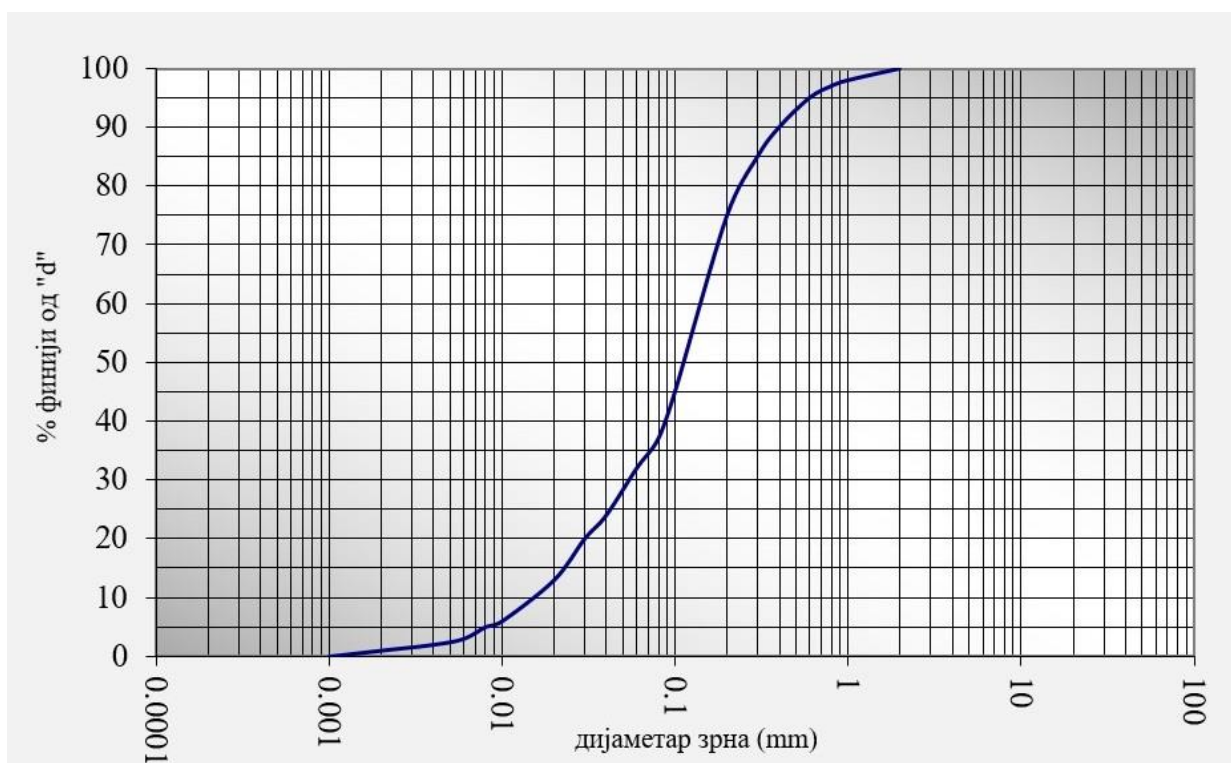
Слика 5.3 Доток седимената у акумулацију у периоду 1969-2016. (SWAT модел)



Слика 5.4 Профил 42 km 26+523.21

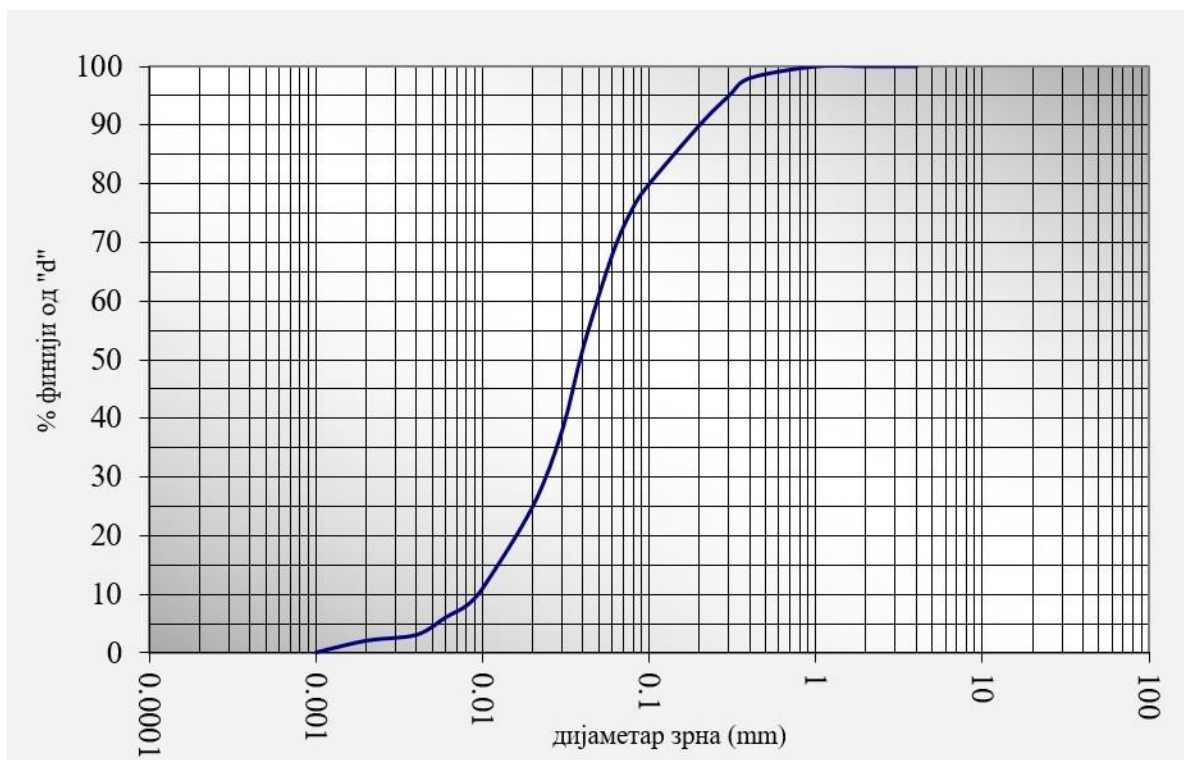


Слика 5.5 Профил 28 km 17+739.07

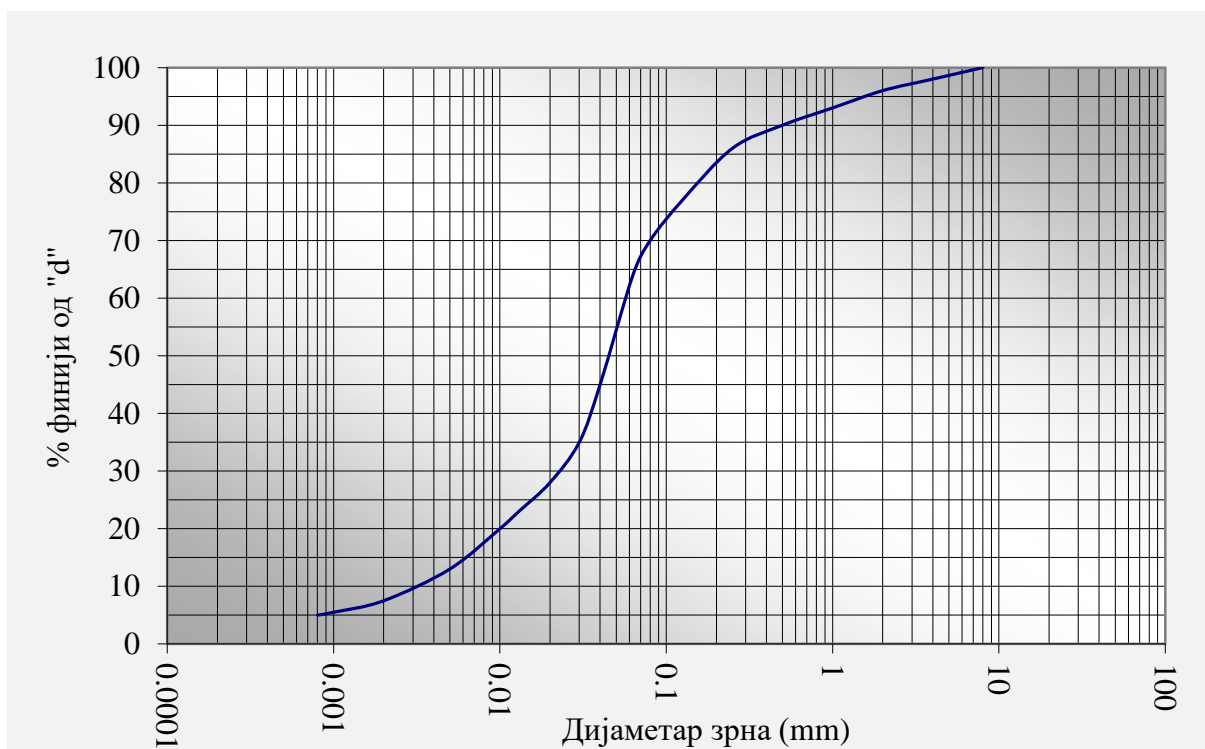


Слика 5.6 Профил 14 km 7+651.02





Слика 5.7 Профил 5 km 2+547.24



Слика 5.8 Профил 2 km 0+381.96



### 5.3 ПАРАМЕТРИЗАЦИЈА МОДЕЛА

За овај рад су специфициране 9 фракција величине седимената. Табела 5.2 приказује њихове доње и горње границе. Сува запреминска тежина материјала је дефинисана користећи табелу 2.6, за услове нормалног управљања акумулације са равномерним осцилацијама нивоа.

Табела 5.2 Фракције седимената материјала

Редни број	Доња граница	Горња граница
1	0.0025	0,004
2	0.004	0.008
3	0.008	0.016
4	0.016	0.031
5	0.031	0.062
6	0.062	0.125
7	0.125	0.25
8	0.25	0.5
9	0.5	1.0

Како није било расположивих мерених података о гранулометријском саставу долазних суспендованих седимената у периоду за који је модел калибриран, апроксимативно су коришћени подаци од узетих проба исталожених седимената са дна реке Црне у региону ушћа у акумулацију Тиквеш. Претпоставка је да већ исталожени материјал довољно тачно репрезентује састав долазећих седимената у акумулацију.

У наредној табели се приказује дистрибуција усвојеног гранулометријског састава и границе долазећег седимента.

Табела 5.3 Процентуална дистрибуција долазних седимената у акумулацију Тиквеш

симбол класе	опис материјала	величина зрна (mm)	% дистрибуција седимената у суспензији
clay	глина и прашина	0.004-0.0625	0.79
vfs	веома фини песак	0.0625-0.125	0.12
fs	фини песак	0.125-0.25	0.04
s	песак	0.25-0.5	0.02
cs	груби песак	0.5-1.0	0.01
vcs	веома груби песак	1.0-2.0	0.01

Моделирана област је претежно у фази седиментације наносног материјала. Стога је преодоминантан фактор обнављања за таложење ( $\alpha_{r,d}$ ), чија је усвојена вредност 0,25. Усвојена вредност фактора обнављања за ерозију ( $\alpha_{r,s}$ ) је 1.0, (Han and He, 1990).

Пошто је већина седимената који улазе у акумулацију фино зрнасте муљевите и глинасте структуре, коришћен је кохезивни модел SRH-1D. Wu-ова формула (Wu et al., 2000) је одабрана за израчунавање транспортног капацитета седимента, док су неки од параметара кохезивног транспорта седимената добивени из литературе за сличне случајеве (Greiman, B. and Huang, J., 2018). Под нормалним околностима, ови параметри, који карактеришу честице пречника мањих од 62,5  $\mu\text{m}$ , треба одредити на лицу места или лабораторијским тестовима. Они су у великој мери зависни од локалних услова и могу се веома разликовати од случаја до случаја, увек захтевајући теренску проверу. Током истраживања за овај рад није било могуће одредити ове параметре на терену. Због тога су коришћени подаци из теренских и лабораторијских истраживања доступних у бази података USBR (1995).

Карактеристике кохезивних седимената су одређене на следећи начин: гранична вредност за тангенцијално напрезање за масивну ерозију ( $\tau_{me}^c$ ) је 8.46 Pa (STMERO), а прорачуната је користећи следећу једначину, (Veeyermen, 1995):

$$\tau_{me}^c = 0.308828 * 10^{(0.0182P_c)} \quad 5.1$$

где је  $P_c$  проценат глине у гранулометријском саставу седимената.

Интензитет ерозије за кохезивне седименте при наведеним граничним тангенцијалним напрезањем и градијентом интензитета површинске ерозије од  $M_{se} = 0,1$  Pa/hr, износи  $Q_{me} = 0,85$  Pa/hr (ERSTME). Гранични проценат глине у речном кориту (ER\_LIM), изнад којег се степен ерозије других честица седимента ограничава степеном ерозије глине, је процењен на 10%. Дебљина активног слоја је усвојена 1m.

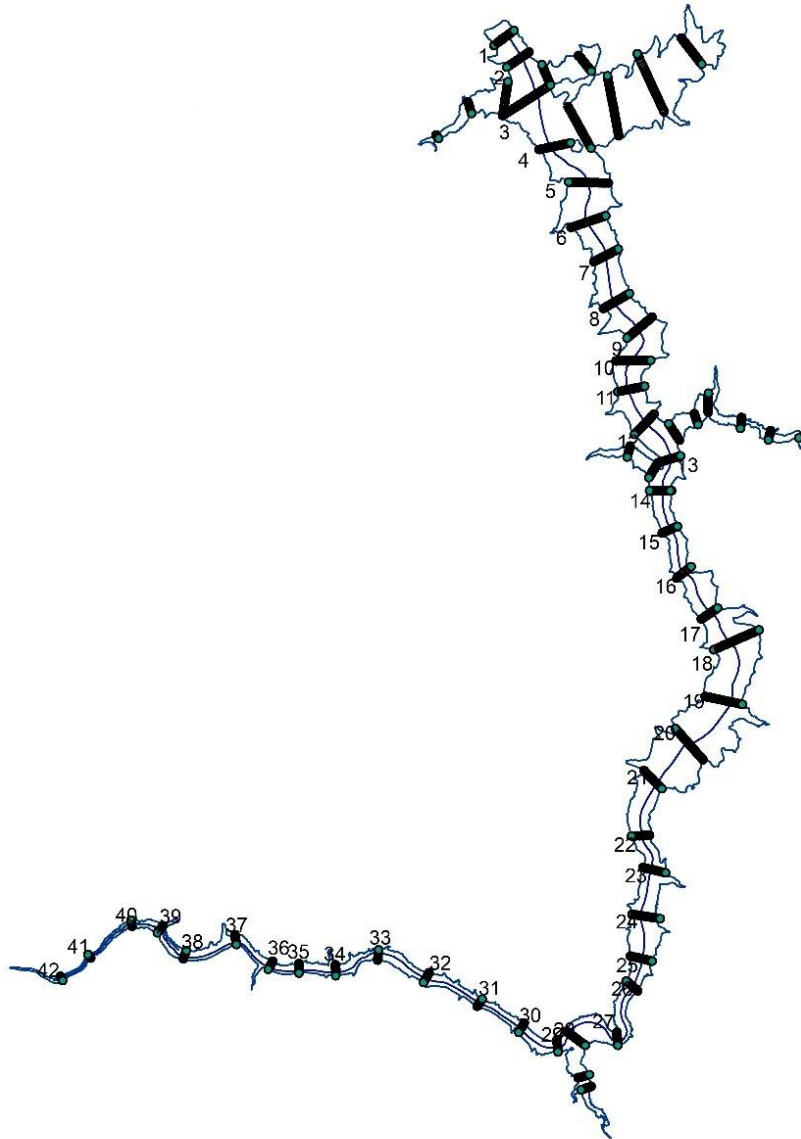
## 5.4 КАЛИБРАЦИЈА МОДЕЛА

Модел је калибриран за период између 1972. и 1991. године. Овај период је изабран због коришћења доступних података из хидрографских истраживања из 1972. и 1991. године. Попречни пресеци акумулације дефинисани током мерења коришћени су за калибрацију модела SRH-1D.

Попречни пресеци из 1972. године коришћени су за дефинисање почетне геометрије акумулације. Цео рачунски домен дужине од 26,5 km почевши од улива реке Црне све до бране Тиквеш подељен је на 42 карактеристична попречна профила, Табела 5.2, Слика 5.9

Табела 5.4 Положај рачунских профила

Профил	стационажа (km)	Профил	стационажа (km)
1	0+000.00	22	13+595.76
2	0+381.96	23	14+133.31
3	0+965.20	24	14+830.52
4	1+776.23	25	15+469.90
5	2+547.24	26	15+901.01
6	3+147.16	27	16+850.52
7	3+715.33	28	17+739.07
8	4+417.93	29	18+023.70
9	4+944.51	30	18+655.66
10	5+476.92	31	19+372.81
11	5+943.30	32	20+249.40
12	6+499.77	33	21+051.94
13	7+163.30	34	21+769.73
14	7+651.02	35	22+308.74
15	8+239.67	36	22+750.02
16	8+923.08	37	23+376.74
17	9+658.64	38	24+185.41
18	10+188.97	39	24+741.21
19	11+118.45	40	25+178.76
20	12+009.73	41	25+984.87
21	12+770.04	42	26+523.21



Слика 5.9 Рачунски домен акумулације Тиквеш

#### 5.4.1 Параметри калибрације

Следећи параметри прилагођени су да симулирају промену морфологије профила према мереним подацима:

- $Wu$ -ов параметар критичног тангенцијалног напрезања, ( $\theta_c$ ).
- Гранично напрезање за парцијално депонирање честица глине и муља, ( $\tau_{d,part}$ ). STDEP, који се користи за одређивање иницијалног стања таложења наноса,
- Гранично напрезање за површинску ерозију честица глине и муља ( $\tau_{se}^c$ ), STPERO,
- Нагиб криве интензитета, или коефицијент за масивну ерозију ( $M_{m,e}$ ), ER\_MASS.

Остали параметри су усвојени на основу података из литературе, (Greiman, B. and Huang, J., 2018), за сличне услове у акумулацијама.

У процесу калибрације су варирани изабрани параметри ерозије и седиментације модела, сваки пут упоређујући моделиране и мерене морфологије талвега и изабраних контролних попречних профила у акумулацији. Квалитет прилагођавања мерених и прорачутих вредности конфигурације талвега акумулације је одређен користећи следеће статистике: коефицијенат детерминације ( $r^2$ ) и Nash Sutcliff-ов (NSE) коефицијенат ефикасности.

Као резултат калибрације модела, Wu-ов параметар критичног тангенцијалног напрезања  $\theta_c = 0.026$ , параметар ерозије STPERO = 0.25 Pa, коефицијент за масовну ерозију ERMAS = 0.63 Pa/hr и параметар седиментације STDEP = 0.00025 Pa, су дали најбоље резултате.

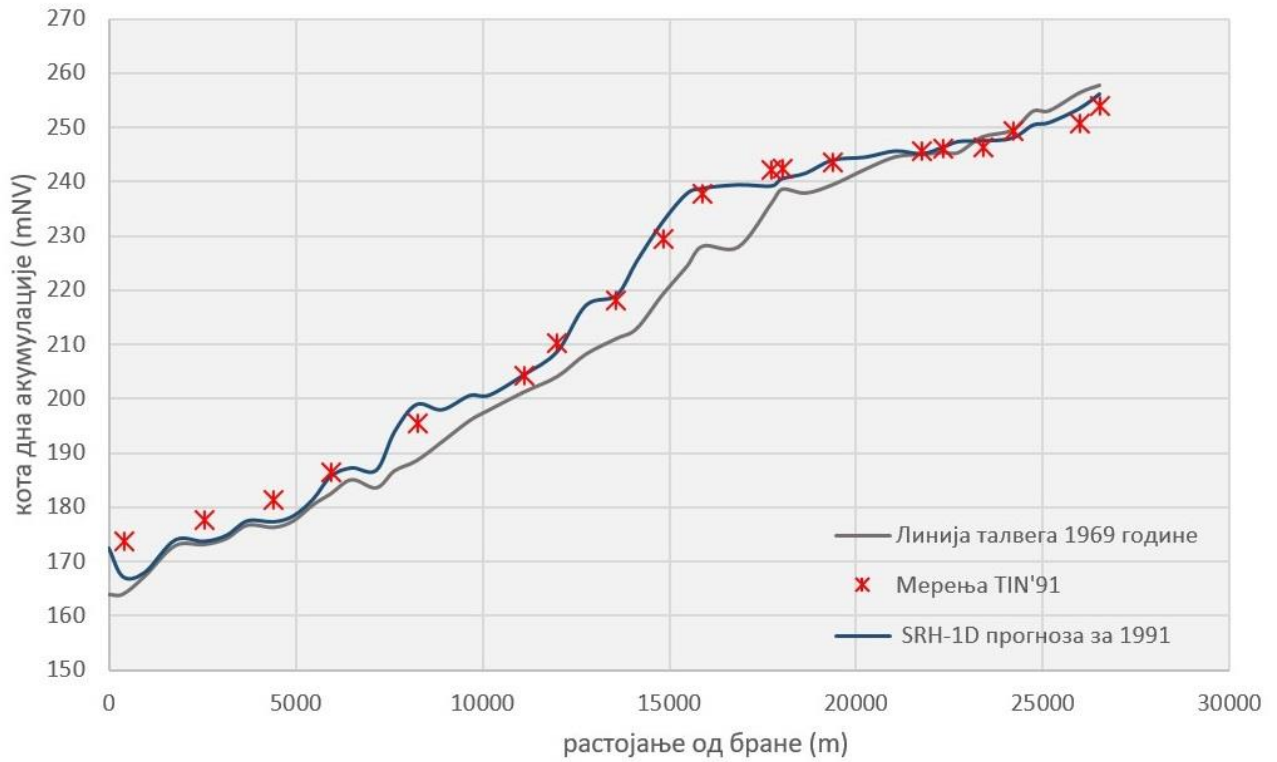
Ова комбинација параметара је резултовала вредностима квалитативних статистика  $r^2 = 0.965$  и NSE = 0.993.

#### 5.4.2 Резултати калибрације и дискусија

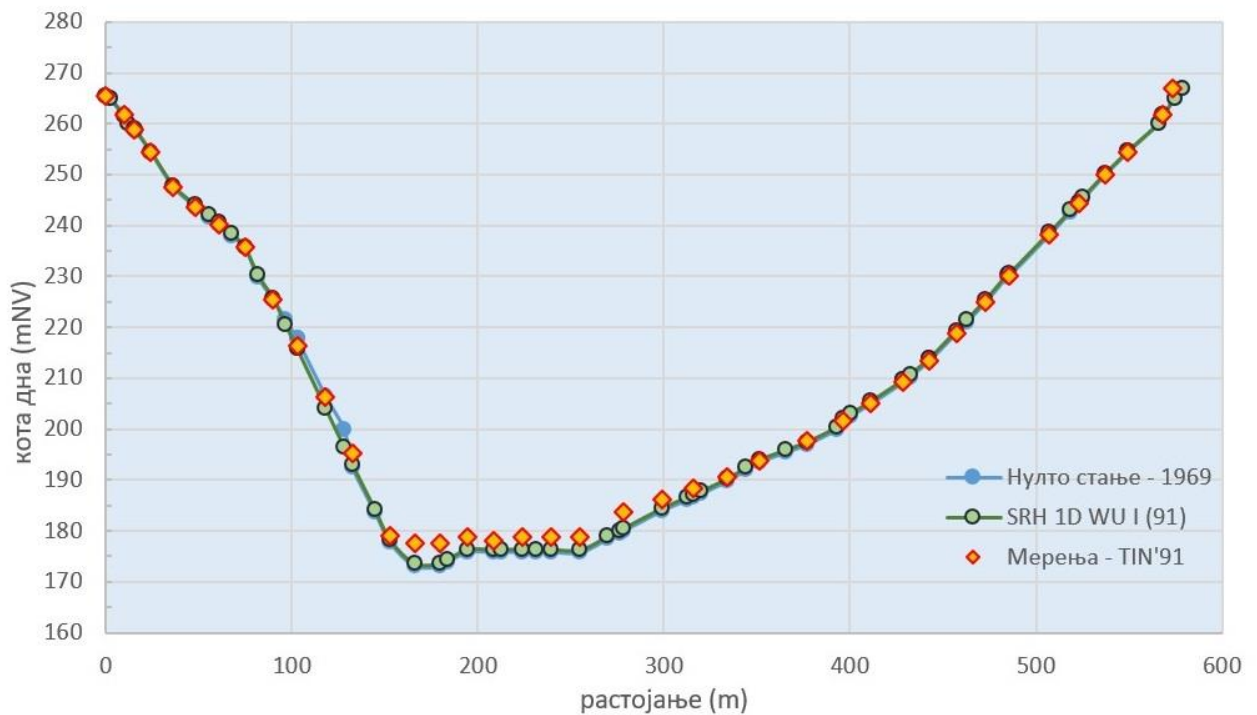
Израчунати талвег је упоређен са посматраним, као што је приказано на слици 5.9. Може се видети да се предвиђени и посматрани талвег добро слажу код већег броја попречних профила. Ови резултати показују да SRH-1D може симулирати еволуцију уздужног профила акумулације уз прихватљиву тачност, Слика 5.10. Резултати подразумевају да модел може описати селективне процесе фракционих депозита и ерозије унутар акумулације прилично добро у условима нестационарних протицаја.

Област моделирања је представљена са 42 профила попречних пресека акумулације. У даљој анализи извршена су упоређивања карактеристичних симулираних и мерених попречних профила (слика 5.11 - 5.18).

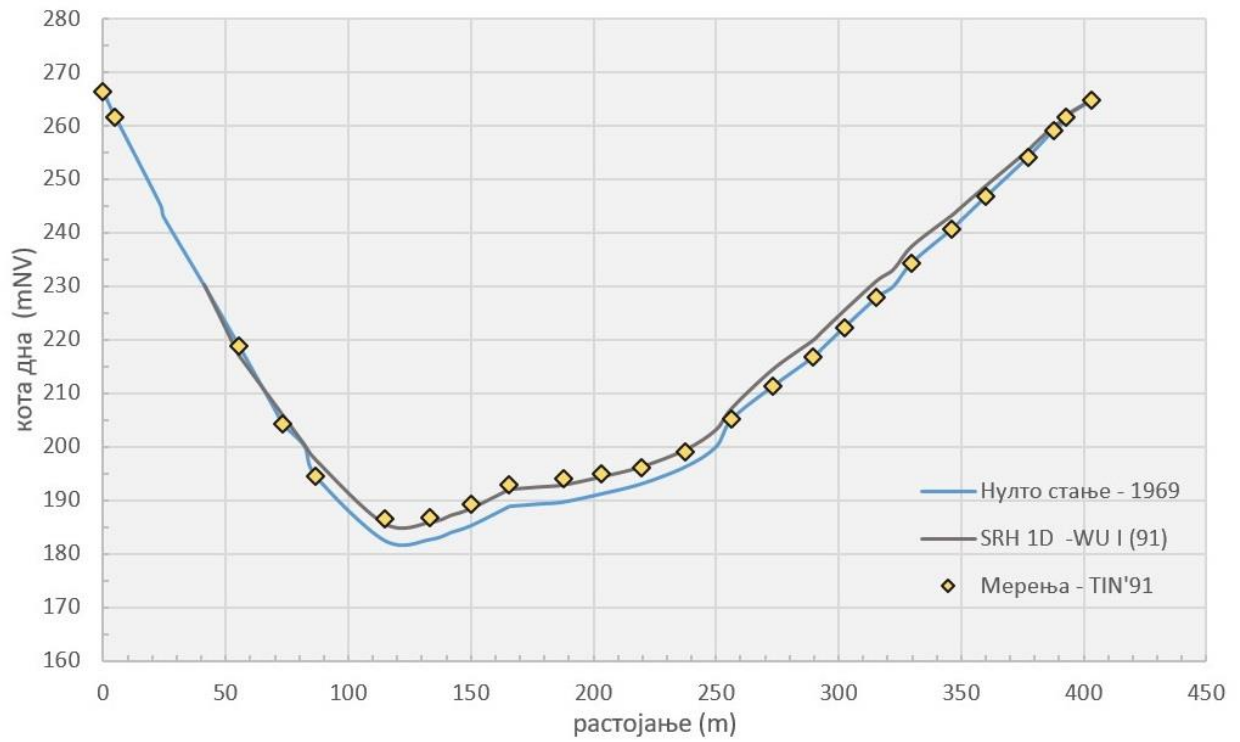
Код свих меродавних профила, симулирана промена морфологије терена се прилично добро поклапа са измереном, осим код профила 20 и 28, у близини ушћа реке Блаштице, где се депонирање на плавини реке чини доста веће од измереног.



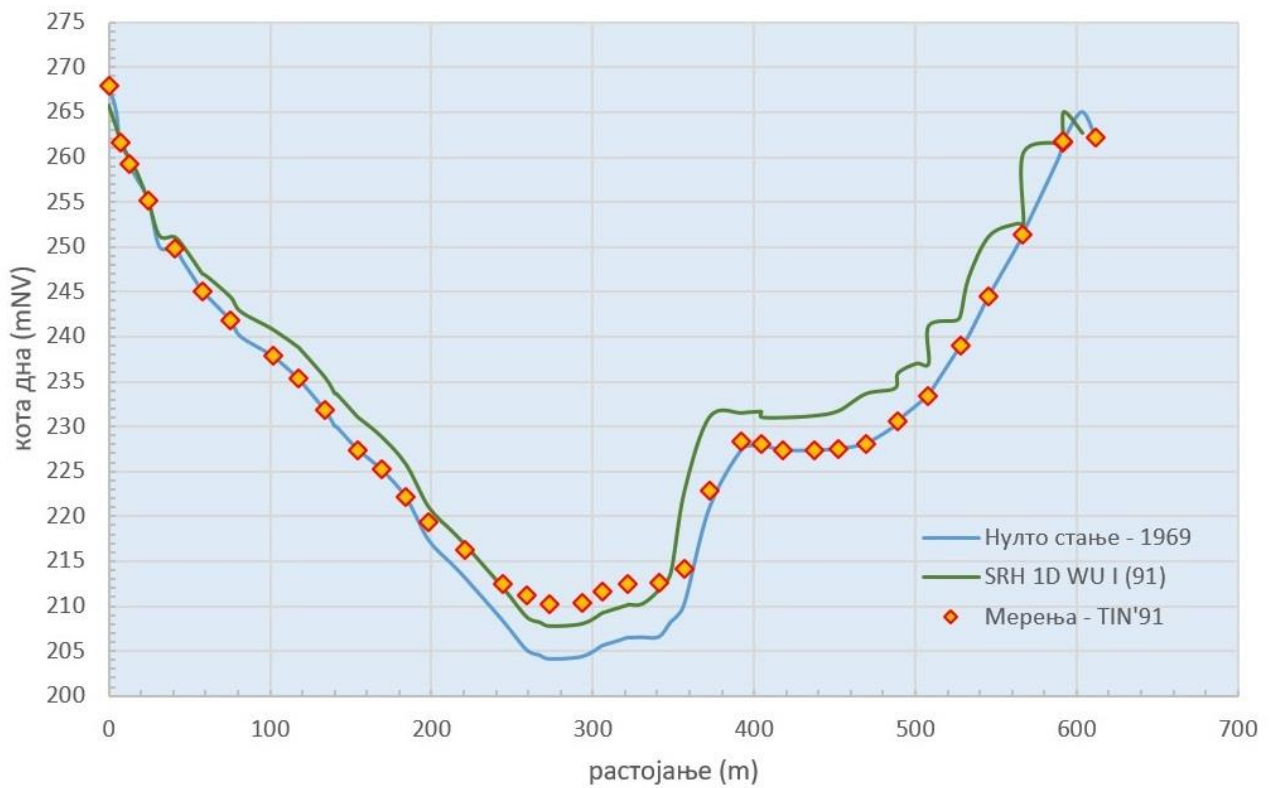
Слика 5.10 Еволуција уздужног профила по линији талвега акумулације



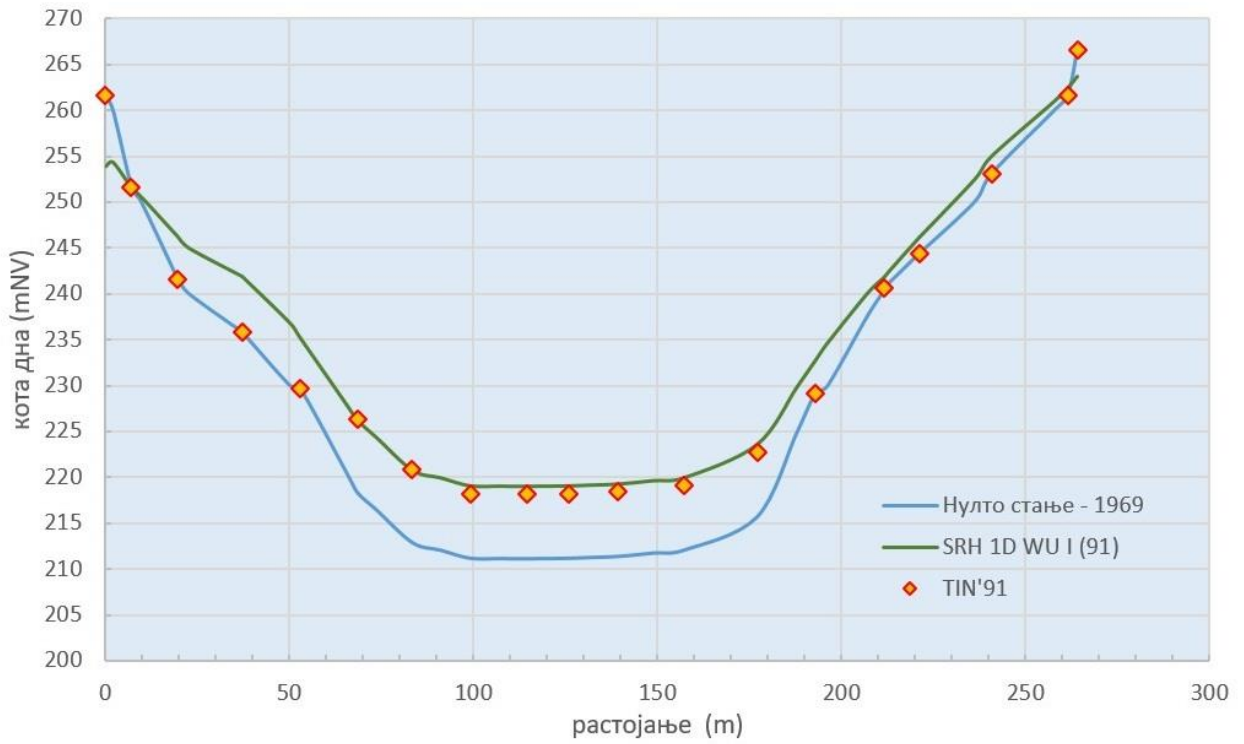
Слика 5.11 Профил 5 km 0+381.96



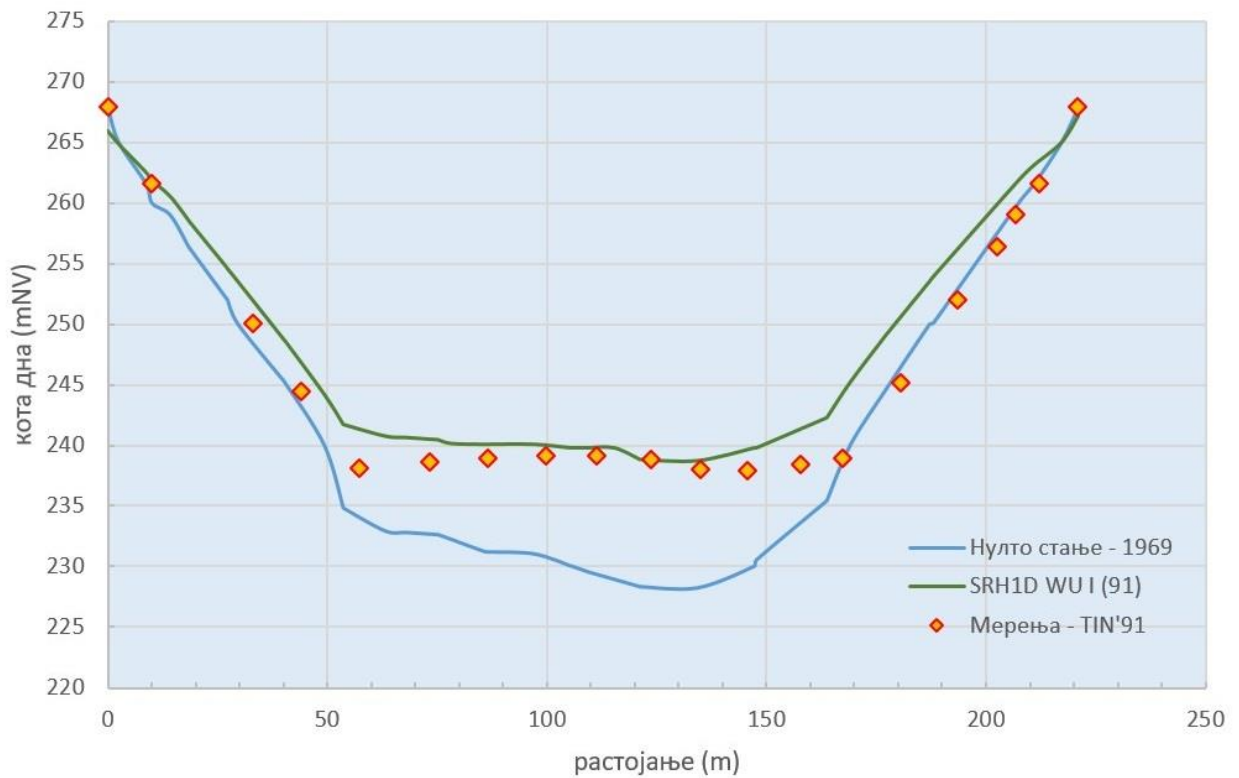
Слика 5.12 Профил 11 km 5+943.30



Слика 5.13 Профил 20 km 12+547.00

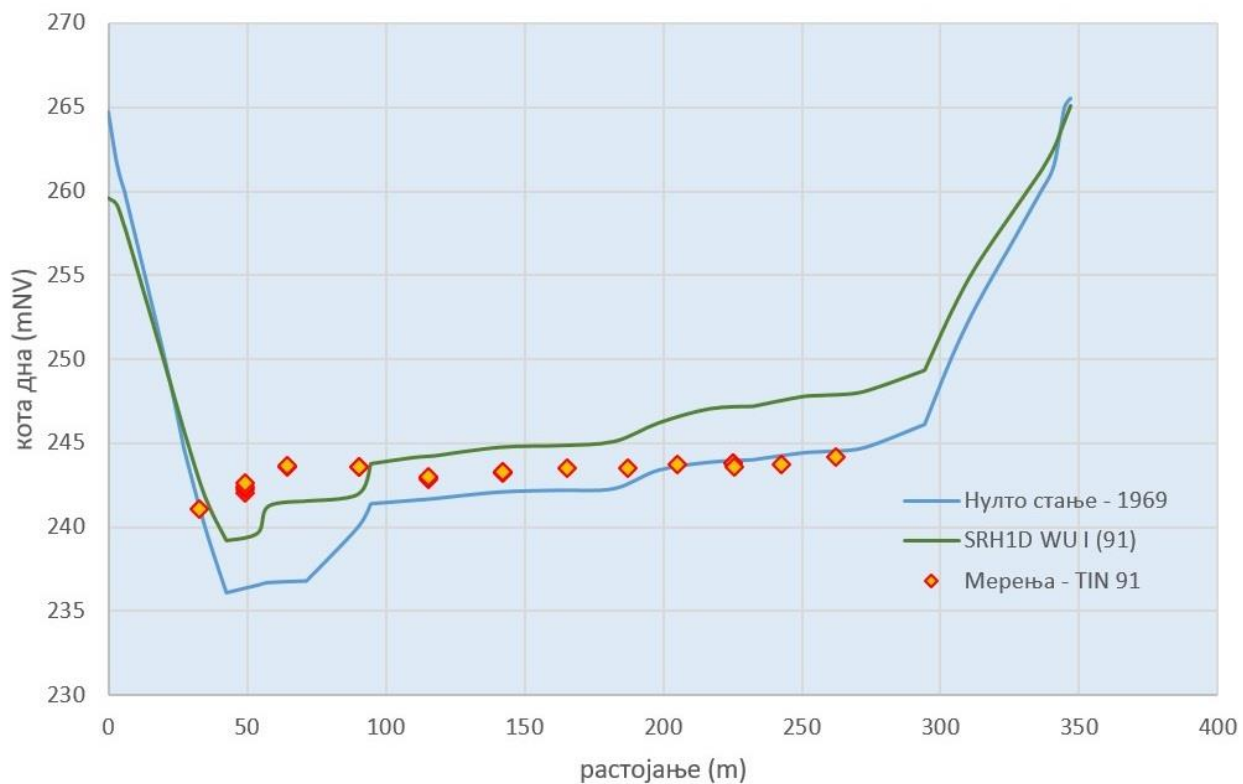


Слика 5.14 Профил 22 km 13+595,76

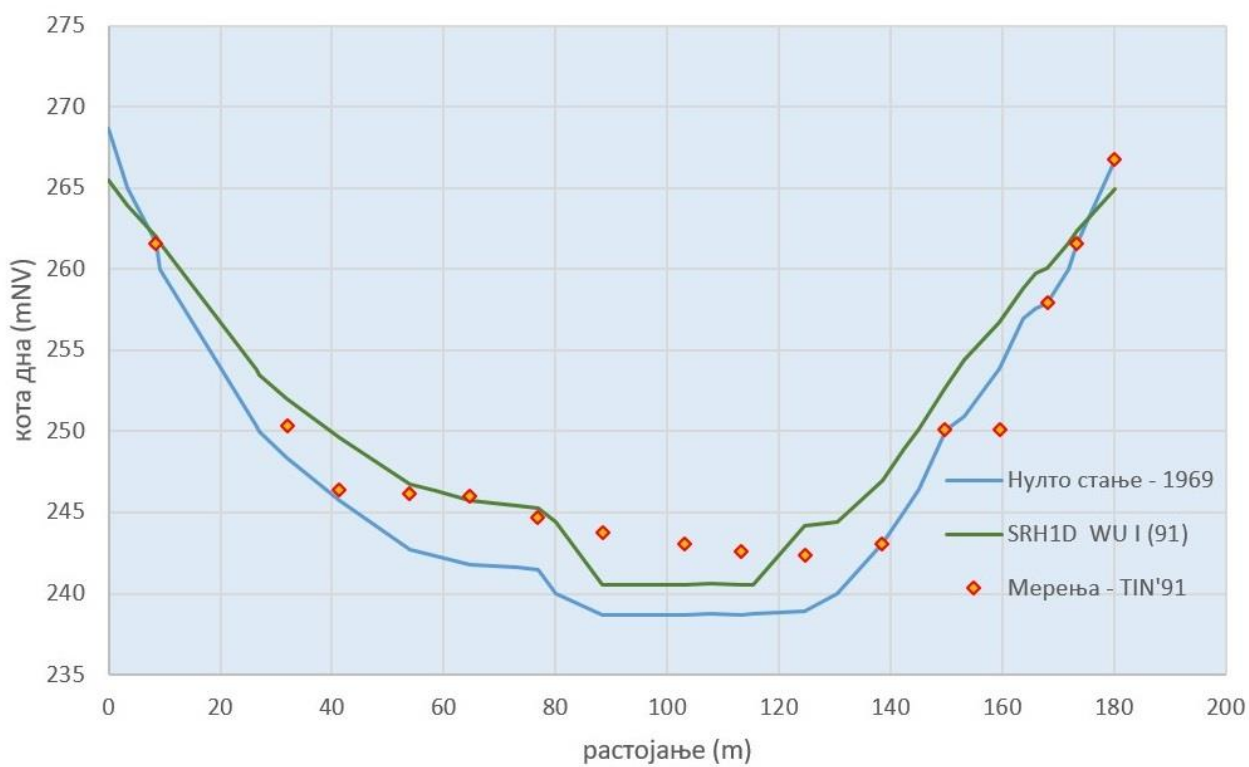


Слика 5.15 Профил 26 km 15+901,01

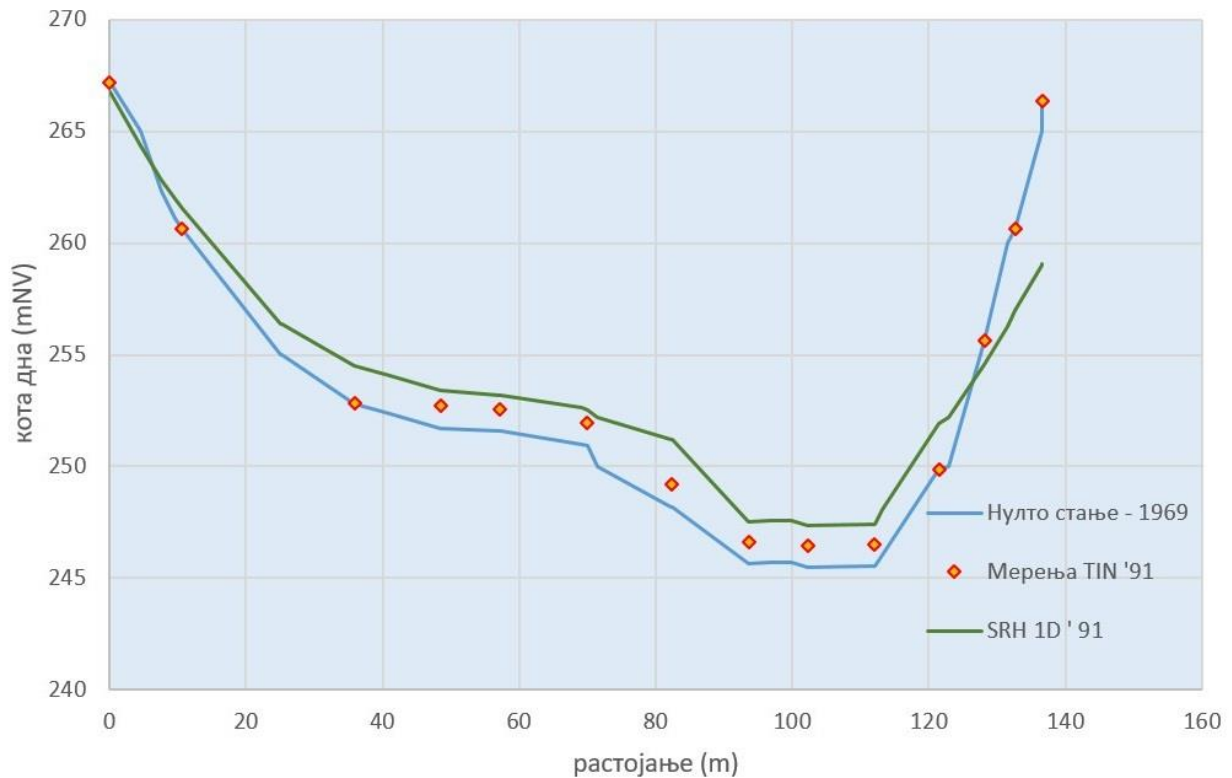




Слика 5.16 Профил 28 km 17+739,07



Слика 5.17 Профил 29 km 18+023,70



Слика 5.18 Профил 36 km 22+750,02

Постоје већа одступања између мерених и моделираних профила за одсеке око ушћа (слике 5.16, 5.17 и 5.18). То би се могло приписати формирању вртложних секундарних струјања на уливу реке Црне и реке Блаштице у акумулацију.

Такође се може видети да постоји релативно велико одступање између моделованих и мерених попречних профила у дубљим деловима акумулације (km 0+000 до km 5+000). У овим случајевима, модел потцењује количину депонованих седимената. Разлог за ово неслагање може бити већа ширина акумулације и смањивање транспортног капацитета водотока, специфични локални услови тока који постоје у овим подручјима, локална брежна ерозија материјала која није обухваћена моделом итд.

Са друге стране, чини се да програм прецењује депозит на речним терасама (профил 20 и профил 28). Разлог за то би могао бити неуспех модела да адекватно симулира сложене профиле на одговарајуће делове једнаког преноса. Са друге стране модел се добро понаша код једноставнијих профила чији су геометријски облици адекватно дефинисани.

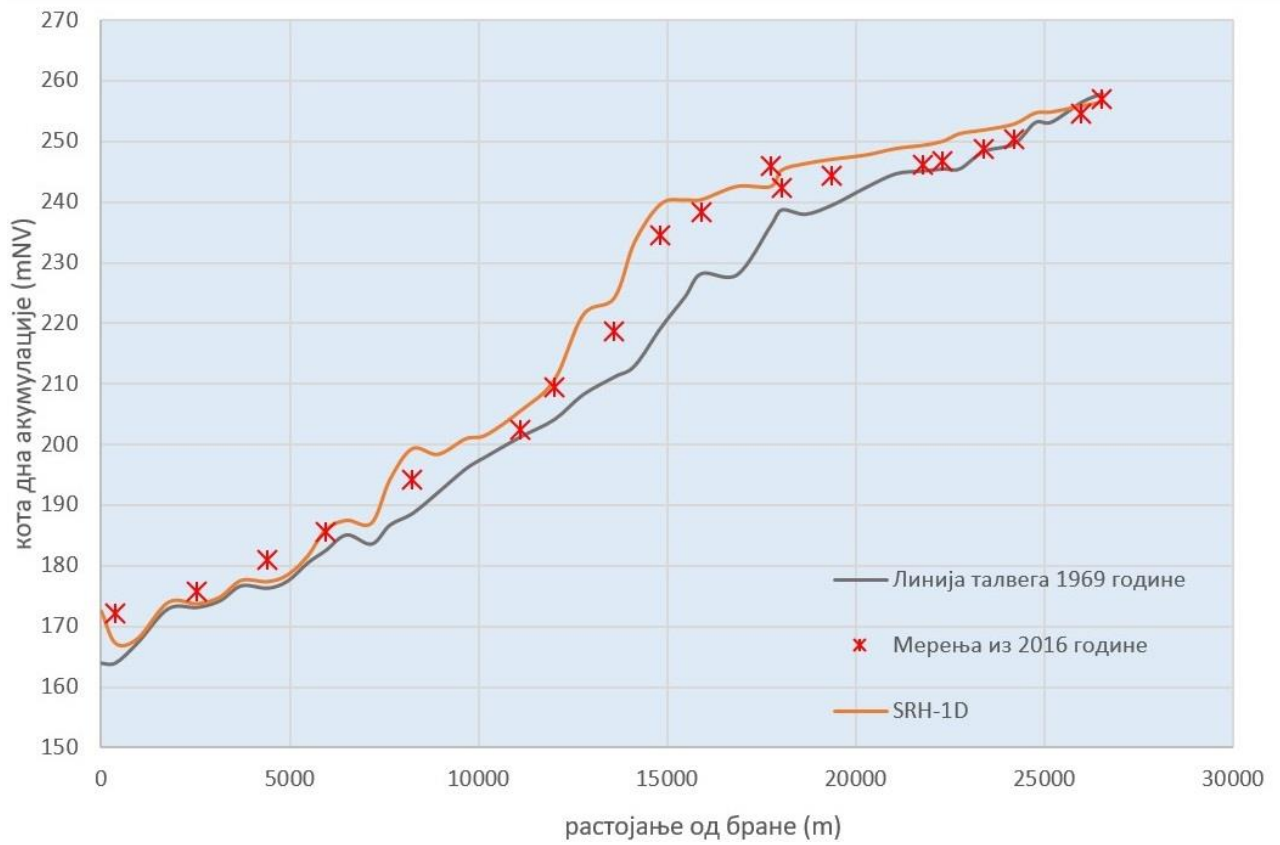
Генерално, највећи део седиментације се догодио у централном делу акумулације Тиквеш (km 12+000 до km 20+000). У осталом делу акумулације постоји мало седиментације, а у делу од km 20+000,00 до ушћа реке Црне је приметна и ерозија талвега речног корита. Опсервације такође показују да је већина материјала депонована у старо речно корито реке Црне и један мањи део на речним терасама (поплавне равнице).

У принципу, 23-годишња симулација је показала да модел може израчунати промене у дну акумулације, нето ерозију и седиментацију наносног материјала са прихватљивом прецизношћу. Ови резултати су показали да се модел SRH-1D може користити за предвиђање будућих промена дна акумулације насталих због ерозије и депоновања седимената.

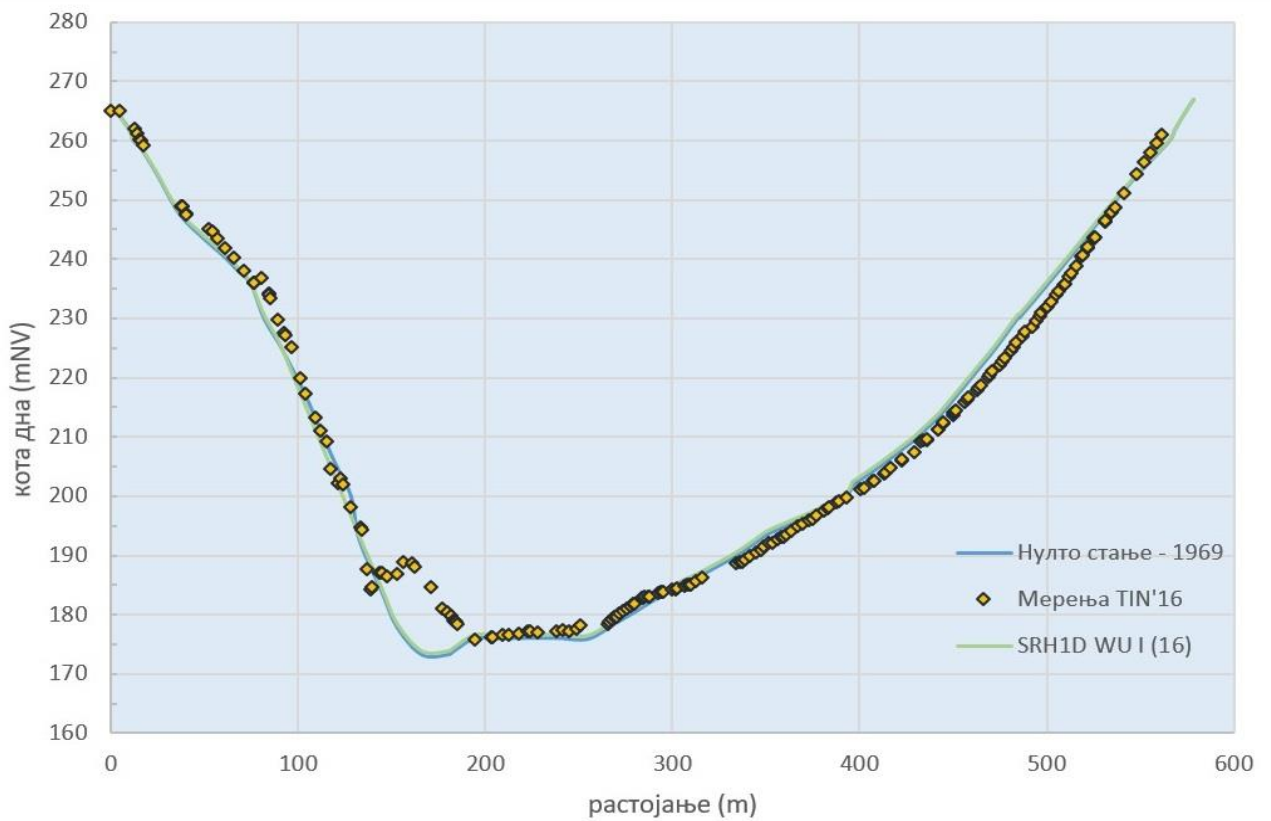
## 5.5 ПРОГНОЗНО МОДЕЛИРАЊЕ

Након калибрације модела коришћењем измерених података, прогностички прорачуни су спроведени у периоду од 26 година да би се процениле могуће промене у топографији дна резервоара. Симулиране промене на одабраним профилима због депоновања наносног материјала се виде на Сликама 5.19 до 5.27. Из анализираних профила утврђено је да се већина таложења дешава дуж талвега са дебљинама депонованог материјала у распону од 3 m до 5 m. Потопљене речне терасе су повишене за 3 до 7 m изнад талвега. Ово показује континуирано повећање депонованих седимената . Тренд седиментације је сличан оном који је утврђен током процеса калибрације модела. Већи део седимента који се транспортује у акумулацији депонован је дуж главног канала, а нешто мањи део на терасама акумулације. Модел је предвидео више седиментације на ушћу Црне реке у акумулацији Тиквеш, као и на ушћу реке Блаштице.

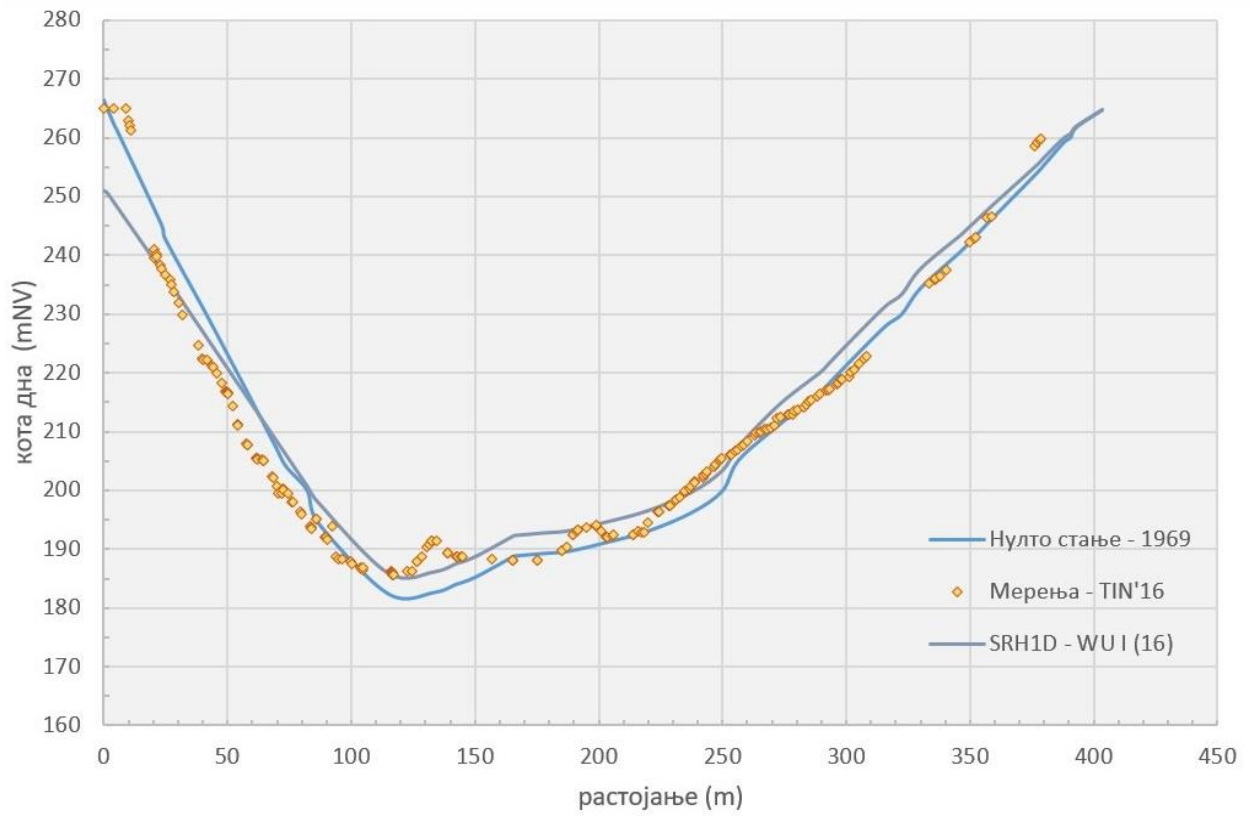
Упоређивање моделованих профила са измереним подацима из 2016. године указује да модел знатно прецењује количину депонованог седимента у прогнозном периоду. Имајући у обзир да су долазне количине воде и седимената за прогнозни период исто тако продукт моделске симулације – коришћењем SWAT модела, као и факат да је дистрибуција седимената зависна од протока воде  $S = f(Q)$ , генерисана на основу података из литературе и калибрације модела, а не на бази теренских мерења, резултати модела се могу прихватити као сасвим добра апроксимација природних процеса седиментације у акумулацији Тиквеш током прогнозног периода од 1992 до 2016 године.



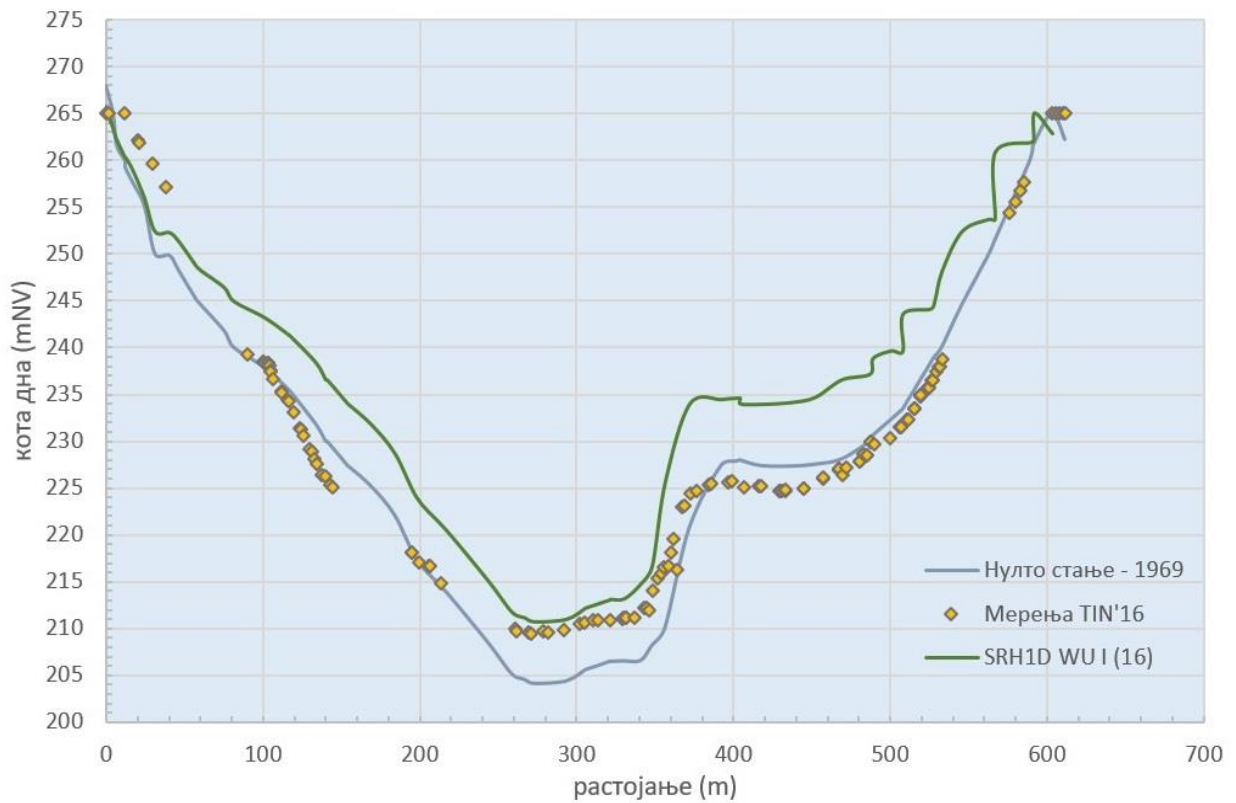
Слика 5.19 Прогнозни положај талвега за 2016. годину



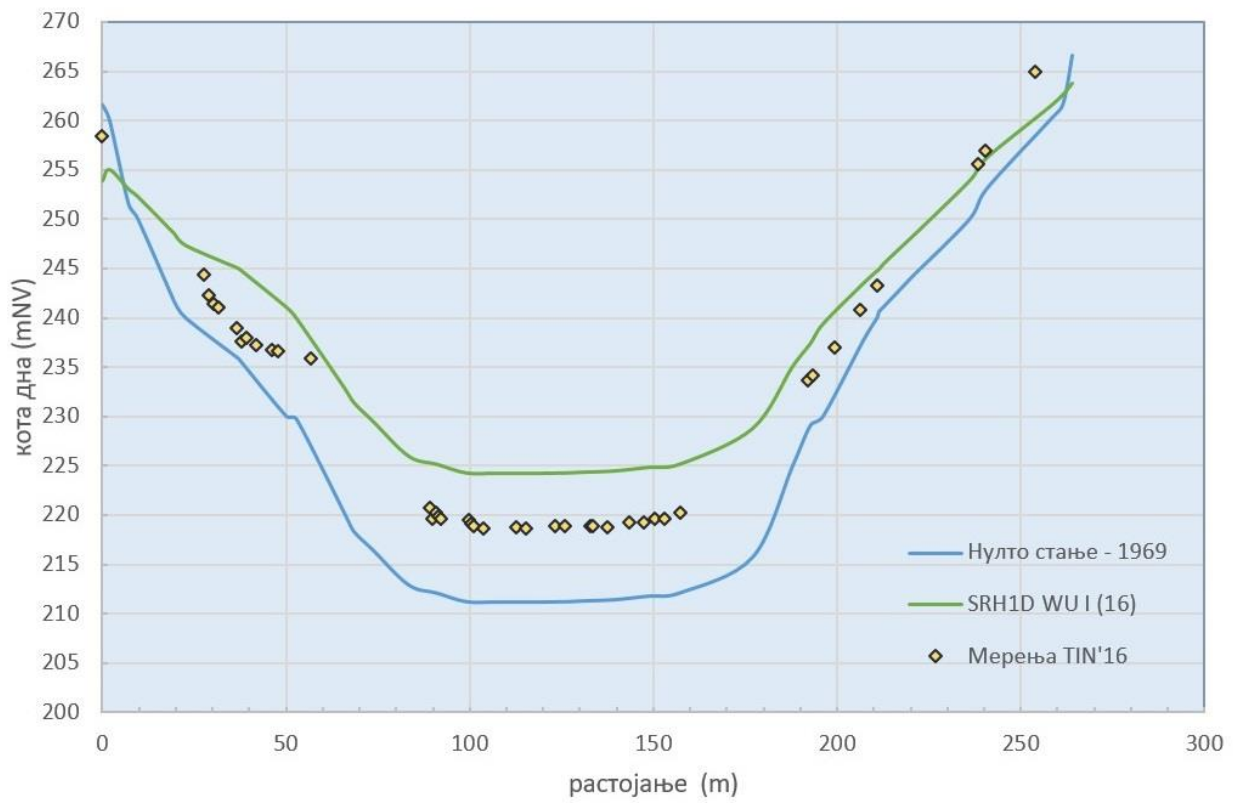
Слика 5.20 Профил 5 km 0+381.96



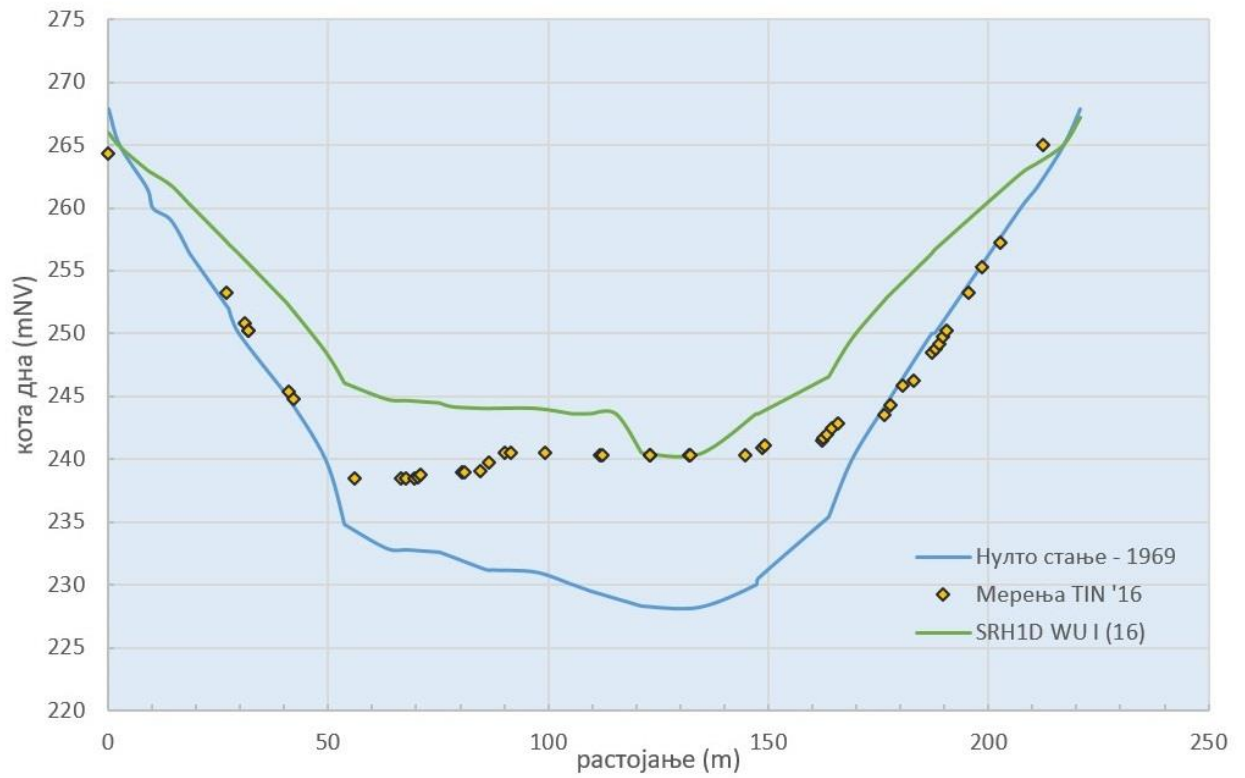
Слика 5.21 Профил 11 km 5+943.30



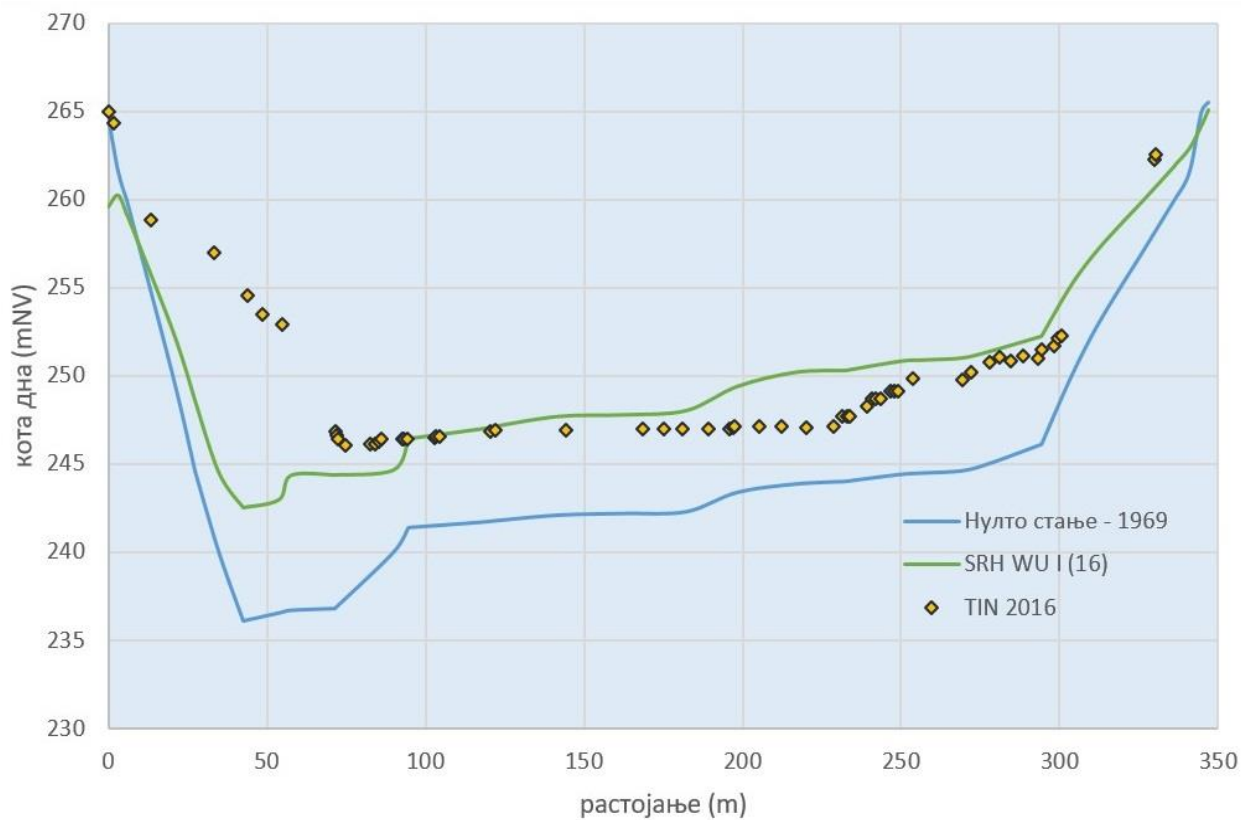
Слика 5.22 Профил 20 km 12+547.00



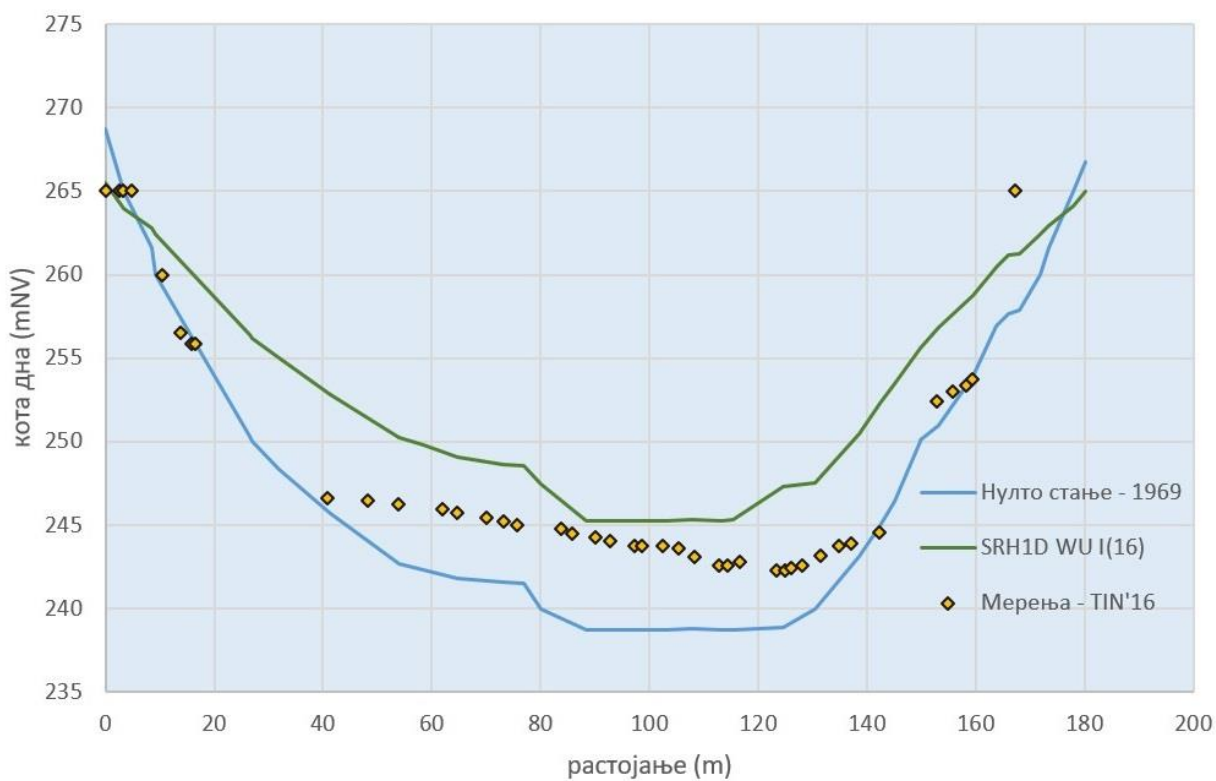
Слика 5.23 Профил 22 km 13+595,76



Слика 5.24 Профил 26 km 15+901,01

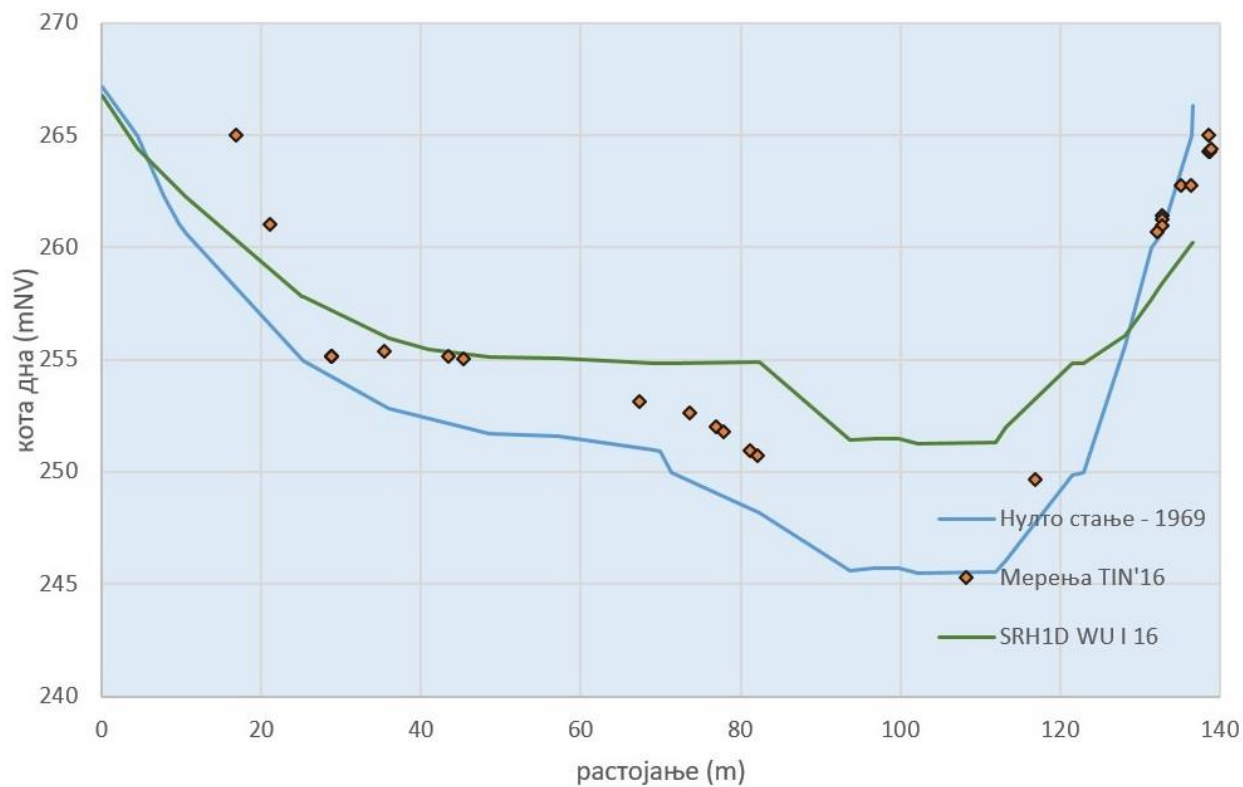


Слика 5.25 Профил 28 km 17+739,07



Слика 5.26 Профил 29 km 18+023,70





Слика 5.27 Профил 36 km 22+750,02



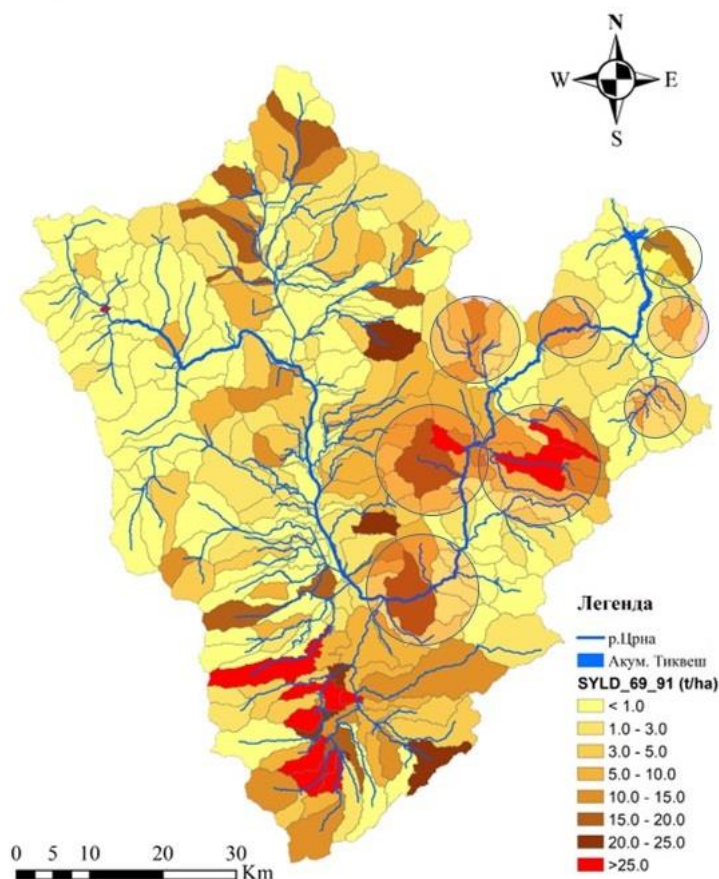
## VI.

### УПРАВЉАЊЕ СЕДИМЕНТИМА У АКУМУЛАЦИЈИ ТИКВЕШ

На основи принципа одрживог управљања акумулационих простора описаних у поглављу 2, у овом поглављу си разрађене могуће мере које се могу применити у сливу акумулационог језера Тиквеш.

#### 6.1 ПОШУМЉАВАЊЕ ТЕРЕНА И ПРОТИВЕРОЗИВНЕ МЕРЕ

Прва дугорочна мера је противерозивна регулација водотока у непосредном сливу акумулације у којима је евидентирана интензивна ерозија: река Сушица, река Блаштица, Каменичка река и Дреновска река. Тиме се подразумева изградња попречних преграда одређене висине чиме се смањује уздужни нагиб водотока, а истовремено се трајно задржава одређена количина ерозивног седимента.

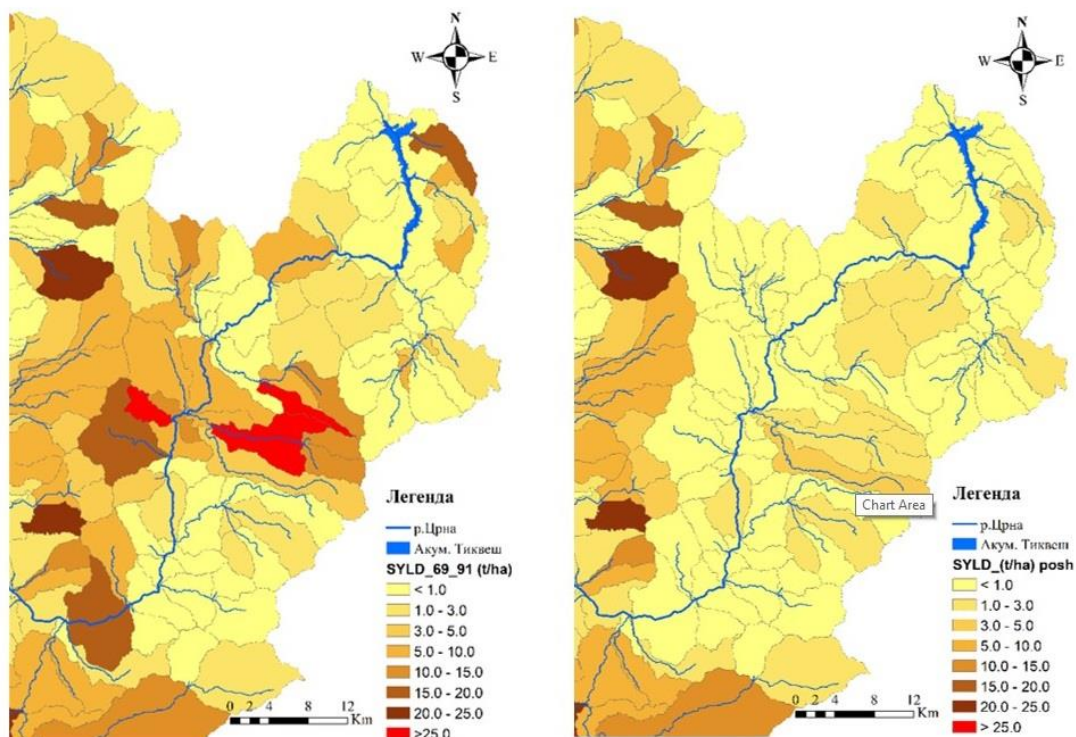


Слика 6.1 Подручја у којима су неопходне противерозивне мере

Извођење техничких активности у речним коридорима у сливу не би имало смисла уколико се оне не допуне биолошким мерама (пошумљавања и стабилизације косина) у сливу чиме ће бити елиминисани разлози за настанак ерозије. С друге стране, биолошке мере у областима у којима се већ развила ерозија није могуће спровести без претходне

стабилизације земљишта низом техничких активности као што је изградња контурних ровова, орање по изохипсама итд.

Пошумљавање голина и пашњака код којих је ерозија терена интензиван процес је најефективнија, али временски најзахтевнија мера. Наиме, уколико се анализира утицај фактора вегетабилног покривача (С-фактор) у једначини метода MUSLE која се користи за прорачунавање продукције наноса у сливу (Поглавље 2), може се утврдити да промена доминантне културе на једном подручју може смањити продукцију наноса чак за више од 80 пута. Наиме, С-фактор за добро развијена шумска подручја износи 0,0014 док је код пашњака овај коефицијент 0,1130. Наравно, неопходан је један међупериод од тренутка формирања засада до пуног развоја шумске средине, који може трајати и неколико десетина година, и то је фактор који елиминише краткорочни ефекат ове мере. Пример ефикасности ове мере се може видети у наставку. На слици 6.2 а) је представљен слив акумулације Тиквеш од уласка у Скочивирску клисуру са приказаном просечном годишњом продукцијом наноса прорачунатом моделом развијеним у овом раду. У садашњим условима, просечна годишња продукција наноса у сливу акумулације Тиквеш износи 5,45t/ha, док просечна годишња количина седимената који се транспортују кроз речну мрежу у акумулацији Тиквеш је 917000 m<sup>3</sup>/god. Од ове количине, процењено је да око 98% или 899000 m<sup>3</sup>/god остаје депоновано у акумулацији док се остатак транспортује низводно од бране до улива у реку Вардар.

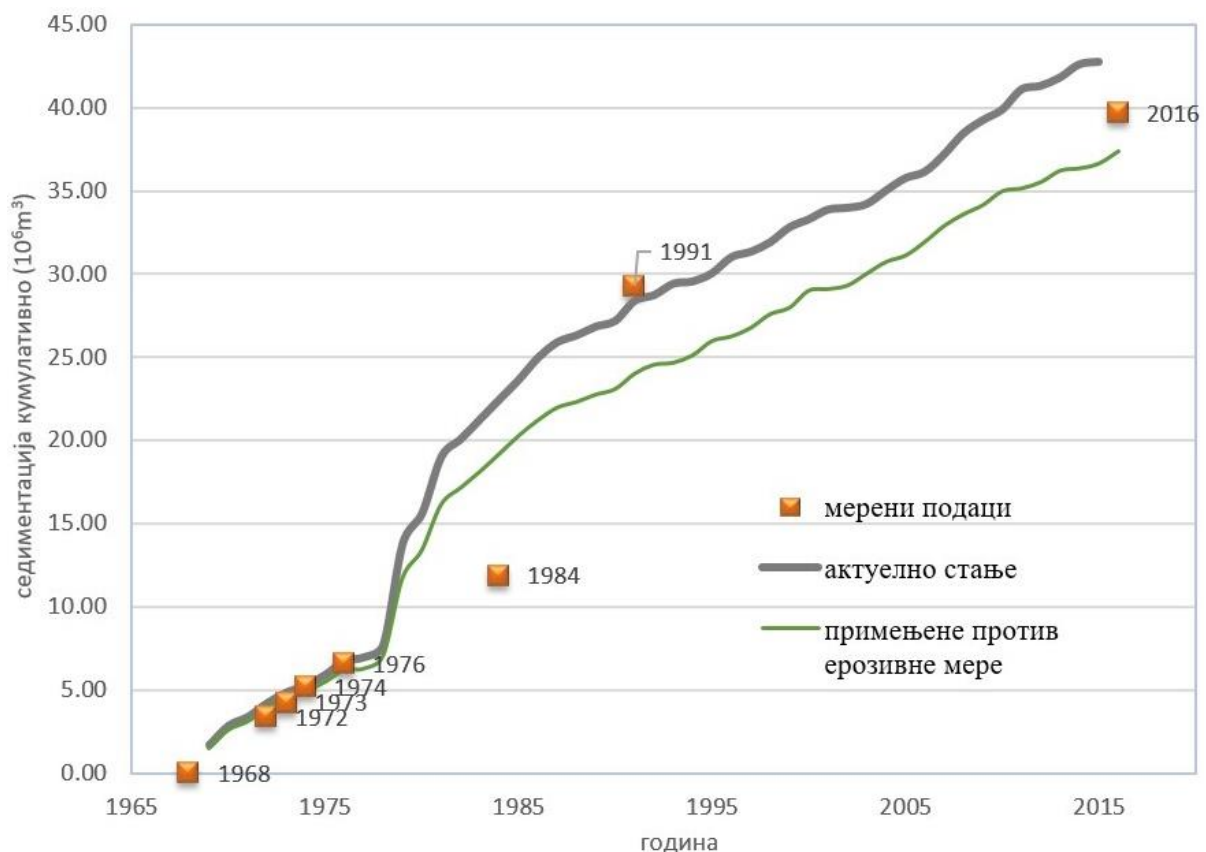


Слика 6.2 Просечна годишња продукција наноса у сливу акумулације Тиквеш, а) актуелно стање, б) уколико би биле предузете мере пошумљавања пре почетка коришћења

На одређеним подручјима Скочивирске клисуре, од којих је неколико у непосредном сливу акумулације Тиквеш, просечна годишња продукција наноса је далеко већа од поменутог просека (5.45 t/ha), слика 6.2 а.

Стање ерозивности у сливу би било много повољније уколико би пре почетка експлоатације акумулације биле предузете мере пошумљавања изразито ерозивних терена – пашњака и голина, Слика 6.2 б. На овај начин, укупна годишња продукција наноса у сливу би била редукована са 5,45 t/ha на 4,3 t/ha.

Ово би се свакако одразило и на количине наноса које би биле депоноване у акумулацији Тиквеш. Наиме, уколико би пошумљеност слива била, како је симулирано у примеру, просечни доток седимената у акумулацији би износио 779000 m<sup>3</sup>/god, што је за 120000 m<sup>3</sup>/god мање него што је актуелно стање које износи 899000 m<sup>3</sup>/god. Количина депонованог седимента у акумулацији у 1991. години би у овом случају износила 24,0 Мm<sup>3</sup>, што у односу на актуелну количину од 28.4 Мm<sup>3</sup> представља смањење за 15.5%. слика 6.3. Сличан је однос кумулативно депонованих седимената прогнозираних за 2016. годину.



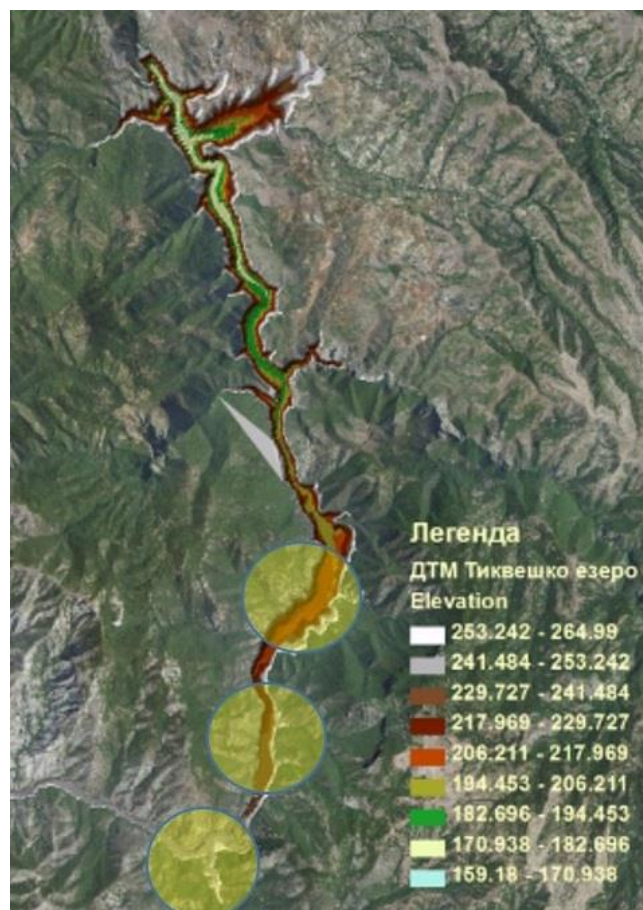
**Слика 6.3** Кумулативна седиментација наноса у акумулацији Тиквеш, а) актуелно стање, б) уколико би биле предузете мере пошумљавања голина пре почетка коришћења

## 6.2 БАГЕРОВАЊЕ НА ОДРЕЂЕНИМ ЛОКАЦИЈАМА АКУМУЛАЦИЈЕ

На основу седиментационог моделирања Тиквешке акумулације и обрасца седиментације предвиђеног за 2016. годину може се видети да је исталоживање седимената најинтензивније у одређеним областима.

Генерално, највећи део исталоженог материјала је регистрован у делу акумулације од km 12+000 до km 20+000. Опсервације такође показују да је већина материјала депонована у речно корито реке Црне и један мањи део на речним терасама (поплавне равнице). Ово су подручја која би потенцијално могла бити подложна багеровању (слика 6.4).

Треба водити рачуна да багеровање не може бити економски оправдано осим ако се ископани материјал не искористи наменски и рационално. Ситнозрни кохезивни депозити на ушћу реке Црне се могу ефективно искористити за рекултивацију огољених површина у сливу пре подизања нових шумских засада. Извађени крупнозрни материјал из ушћа акумулације се такође може користити у грађевинарству.



Слика 6.4 Локације за багеровање у акумулацији

Преглед свих могућих мера за контролу седиментације у акумулацији Тиквеш, њихова ефективност и препоручљивост је дата у наредној табели.



Табела 6.1 Ефикасност и препорука могућих мера и активности за контролу и управљање седиментацијом наноса у акумулацији Тиквеш

Активности и мере	Ефекат примењене мере	Препоручљивост примене метода
<b>Контрола ерозије у сливу и речној мрежи</b>		
техничке <u>мере</u> : изградња устава, канала, кинета, напера	значајан - одмах после изградње објекта	да
шумско-мелиоративне мере: мелiorација шума, пашњака, подизање воћњака, винограда, пошумљавање, сађење траве итд.	значајан - дугорочна мера	да
административне, образовно - васпитне и пропагандне активности	значајан - дугорочна мера	да
<b>Одстрањивање седимената из акумулационог простора</b>		
<b>а) Коришћење хидродинамичких карактеристика тока</b>		
усмеравање седимената	ограничени ефекат - потребно усагласити режим коришћења акумулације и рада ХЕ, еколошки неприхватљив у низводном току реке Црна	не
испирање седимената	ограничени ефекат - потребно потпуно испразнити акумулацију и зауставити рад ХЕ, еколошки неприхватљив у низводном току реке Црна	не
<b>б) Багеровање седимената</b>		
ископ у сувом	ограничени ефекат - примењивост само у делти акумулације при ниским нивоима воде, високи трошкови, негативни еколошки утицаји на одлагалишту ископаног материјала	Да, уз претходну техничко-економску и еколошку анализу
хидрауличко багеровање	ограничени ефекат - примењивост само код малих акумулација, финансијски и технички захтевна метода, негативни еколошки утицаји на одлагалишту ископаног материјала	не
механичко багеровање	ограничени ефекат - примењивост само код малих акумулација, финансијски и технички захтевна метода, негативни еколошки утицаји на одлагалишту ископаног материјала	Да, уз претходну техничко-економску и еколошку анализу

## VII. РЕЗИМЕ, ЗАКЉУЧЦИ И ПРЕПОРУКЕ

Општи циљ дисертације је дефинисање методологије и избор прогностичког модела за дугорочну симулацију хидролошких процеса у сливовима, потом ерозије и продукције наноса, транспорта наноса у речној мрежи, као и процеса седиментације, односно запуњавања акумулационих језера наносом. Слив акумулације Тиквеш, који се налази у југозападном делу Републике Македоније, је изабран као репрезентативан слив за анализу у овом раду. Овај слив је изабран због његове величине који се са површином од 5356 km<sup>2</sup> може категоризовати у велике сливове, као и због релативно добре доступности података неопходних за развој, калибрацију и верификацију хидролошког прогностичког модела.

Из прегледа и анализе потенцијалних модела који би се могли применити да би се постигао задати циљ у овој студији, идентификована је интегрисана ARCGIS верзија SWAT (SoilandWaterAssesementTool) модела. Поред доступности изворног кода модела, што омогућава будући развој и специфично подешавање моделских перформанси, као и постојање веома активне корисничке групе за пружање техничке подршке, изабрани модел има следеће карактеристике:

- Модел је свеобухватан и симулира водни биланс и биланс седимената у речној мрежи и акумулацији у широком распону климатских услова.
- Модел је физички или концептуално заснован, полудистрибуисани као алтернатива емпиријским и генералним (lumped) моделима.
- Модел је једноставан за параметризовање, калибрацију и верификацију на основу ограничених скупова података који су доступни у нашим регионима.
- Модел подржава дневни временски корак како би се симулирали отицаји кратких временских догађаја.
- Модел је у стању да симулише ефекте различитих пракси управљања земљиштем (као што су промена коришћења земљишта), прекомерне апстракције подземне воде и различитих операција акумулација на водне ресурсе унутар слива.
- Модел је континуирани како би се могао користити у дугорочним симулацијама.
- Модел има ГИС интерфејс који ће се користити у анализи података о сливу, параметризацији и калибрацији модела.

Овај рад представља прву примену ARC GIS SWAT модела са сврхом дугорочне симулације седиментације у акумулацијама у Македонији.

Основни подаци коришћени за развој модела у овом раду су били: топографија терена, педолошке карактеристике земљишта, подаци о коришћењу земљишта и вегетацији, хидрометеоролошки подаци и подаци о седименту.

**Топографија слива** у ГИС окружењу је генерисана преко дигиталног елевационог модела (ДЕМ) са просторном резолуцијом од 20 x 20 m. Овај ДЕМ је креиран на основу постојећег ДЕМ-а Републике Македоније и као део ASTER-овог (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) глобалног дигиталног елевационог модела–GDEM из којег је издвојен део слива који се простире на територији Републике Грчке.

**Мапа недолошких карактеристика** земљишта у сливу је креирана користећи глобалну базу података FAO HWSO (Harmonized World Soil Database). Ова мапа укључује 11 врсти тла које су заступљене у сливном подручју и то и следећем проценту: Dystric Cambisols 45.13%, CalcaricFluvisols 12,85%, RendzicLeptosols 9.98%, Lithic Leptosols 8.89%, Naplic Luvisols 5,62%, MollicGleysols 5.57%, EutricCambisols 5.10%, UmbricLeptosols 3.15%, VerticLuvisols 2,76%, и CalcaricRegosols 0.94%, CalcaricPhaeozem 0.94%. Садржај глине, прашине и песка, текстура земљишта, садржај воде у тлу, хидрауличка проводљивост и подаци о садржају органског угљеника су део наведене базе података.

**Подаци о коришћењу земљишта и вегетацији** су преузети са CORINE Land Cover платформе. У овом раду, релевантни параметри су модификовани према класификацији и номенклатури коришћеној у SWAT моделском окружењу. Учесће вегетације у анализираном сливу је следеће: *листопадне шуме* покривају 1336,8 km<sup>2</sup> или 25,0% укупне површине слива, *зимзелене шуме* покривају 179,7 km<sup>2</sup> или 3,4%, док су *мешане шуме* заступљене на површини од 191,6 km<sup>2</sup> или 3,6% од укупне површине слива, *пашињаци*, чија површина је процењена на око 810,9 km<sup>2</sup>, односно 15,1% површине истраживаног подручја, *површине под камењарима, јако деградираним биљним заједницама и сл.* покривају 857,4 km<sup>2</sup> или око 16% површине сливног подручја. *Пољопривредно земљиште* у сливу је заступљено на 1876,5 km<sup>2</sup> или 35% укупне површине слива. *Стамбеним површинама* обухваћено је 48,5 km<sup>2</sup> или 0,9% укупне површине слива, док је *индустријским површинама* обухваћено укупно 32,1 km<sup>2</sup> или 0,6% укупне површине слива. *Водним површинама* сматрају се површине обухваћене природним и вештачким језерима, као и мочварне области у сливу. Ова категорија земљишта обухвата укупно 22,3 km<sup>2</sup> или 0,4% укупне површине слива.

**Климатски подаци** у региону се састоје од података о падавинама, температурама, релативној влажности ваздуха, сунчевом зрачењу и брзини ветра. У овом раду су коришћени доступни дневни подаци о падавинама регистрованим у 20 кишомernih станица у периоду 1966-1991. године. Остали климатски параметри су преузети са 3 главне метеоролошке станице у сливу акумулације Тиквеш лоциране у градовима Битољ, Прилеп и Крушево. Због недоступности дневних метеоролошких података у периоду 1992-2016, урађена је прогнозна симулација климатских параметара користећи WXGEN - Weather Generator, програма интегрисаног у SWAT окружењу. Коришћењем ове алатке, на основу статистичке анализе расположивих података о дневним падавинама, температуре ваздуха, сунчевог зрачења, брзине ветра и релативне

влажности ваздуха регистрованих у метеоролошкој станици Прилеп у периоду 1966-1991, извршено је прогностичко моделирање климатских података анализираним подручја за период 1992-2016. Овако генерисана база климатских података се даље користи у моделу при чему је извршено прогнозно моделирање продукције седимената у сливу, транспорта у речној мрежи и засипање наноса у акумулацији Тиквеш.

Просечни месечни подаци о протицајима воде за главни водоток, Црна река, за период од 1966. до 1991. године су добивени из националне хидрометеоролошке службе (НХМС) ,а обрађени у оквиру сарадње са ЈСА 1998 године. Прикупљени подаци су регистровани у три постојеће мерне станице на Црној реци: Расим-бегов мост (рс\_152), Новаци (рс\_203) и Скочивир (рс\_243).

Релевантни подаци о проносу седимената у реци Црна, који се односе на анализирани период су доступни само за мерну станицу Расим-бегов мост (рс 152). Користећи доступне дневне податке о мереним седиментима, генерисана је база података о просечним месечним проносима наноса за период од 1975 до 1991 године, са одређеним пропустима из 1976 и 1979 године. Део података је добивен из НХМС-а, а део је прикупљен из постојећих хидролошких алманаха у региону. Без даљњих модификација, ове базе података су коришћене за калибрацију и валидацију протицаја воде и седимената у Црној реци симулираних у моделу.

Батиметријска мерења у акумулацији Тиквеш су започета још 1972 године када је направљено прво истраживање подводне топографије акумулације. Затим, у периоду од 1973 до 1991 године је извршена серија хидрографских мерења, након чега је дошло до застоја у мерењима све до 2016 године, када су активности поново покренуте. На основу ових мерења, добивени су подаци о временској и просторној дистрибуцији седиментације акумулације од почетка њеног коришћења до периода задњих мерења или до 2016 године. Ови подаци су коришћени за верификацију резултата модела који се односе на дистрибуцију седиментације наноса у акумулацији.

У поступку параметризације модела, најпре, слив реке Црне је био подељен на 309 подсливова са површином од 0.3-110 km<sup>2</sup>. Усвојено је да површина подсливова не прелази 2-3% од укупне површине целог слива, имајући у виду ограничења модела и досадашње искуство у науци у вези са применом методе MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) која је првобитно развијена за мале сливове (< 40 km<sup>2</sup>), а касније је успешно тестирана на сливовима величине до 234 km<sup>2</sup>.

У овој фази развоја модела дефинисане су физичке и географске карактеристике сваког подслива: површина и нагиб слива, координате тежишта слива, минимална, средња и максимална надморска висина, дужина и нагиб водотока итд.



HRU (**H**idrologic**R**esponse**U**nit) је основни елемент примењеног модела и представља комбинацију својстава моделираног подручја (тип земљишта, коришћење земљишта / вегетациони покривач, управљање и топографија) у оквиру којег се хидролошки одговор средине сматра хомогеним. HRU нису функционално дефинисани у простору, али концептуално одговарају малим хомогеним сливовима. Реални подсливови могу да се састоје од једног или више HRU-а. У процесу дефинисања HRU-а, анализираном подручју су се доделили атрибути који се односе на: педолошке карактеристике земљишта, тип земљишног покривача и коришћење земљишта и нагиба терена. Ови параметри се даље користе у моделирању хидролошких процеса и продукције седимената. На основу претходно дефинисаних услова, генерисано је 309 хидролошких јединица – HRU, колико износи и број подсливова.

У првом кораку евалуације, модел је покренут без икакве калибрације, са унапред дефинисаним базама података. Почетне процене вредности значајних параметара су направљене на основу доступних података, литературе и експертизе аналитичара. Резултати примарне симулације су упоређени са опажањима (протицаји, продукција и транспорт седимента) и урађена је примарна анализа перформанси модела како би се добиле основне смернице за даљу калибрацију.

На основу анализе примарне симулације модела је закључено да :

1. Вредности елемената водног биланса су логични са извесним одступањима у односу на њихове номиналне распоне вредности.
2. Модел прецењује вредности протицања у речној мрежи на рачун евапорације и транспирације у сливу.
3. Процењена евапотранспирација у моделу је за 13% нижа у односу на вредности које су прорачунате на основу мерених података.
4. Процењена вредност продукције седимената у сливу је веома близу вредности које су декларисане у сличним радовима за овај регион у Републици Македонији.
5. Модел значајно потцењује транспорт седимената у речној мрежи.

У другом кораку евалуације модела је направљена упоредба симулираних протицаја воде и проноса седимената у реци Црној са мереним подацима у три контролне хидролошке станице: Расим-бегов мост(rs\_152), Скочивир(rs\_203) и Новаци(rs\_243), у периоду 1969 -1991 године.

Квалитет подударности моделских излаза са мереним подацима или квалитет ефикасности модела квантификован је коришћењем следећих објективних функција: коефицијента детерминације ( $r^2$ ), коефицијента ефикасности Nash Sutcliff-а (NSE), процента BIAS-а (P-BIAS) и средње квадратне грешке (RSR).

На основу примарне евалуације основног модела утврђено је да је **основни модел добро постављен, а да су резултати почетне симулације водног биланса реални**. Вредности протицаја у речној мрежи су блиски мереним вредностима у контролним мерним станицама. Исто се може закључити и у погледу симулације продукције седимената у сливу, док модел транспорта седимената у речној мрежи најслабије прогнозира реалне процесе, а моделиране вредности проноса наноса су много мање у односу на вредности које су регистроване у репрезентативној мерној станици Расим-бегов мост, rs 152.

Након примарне процене, извршена је **анализа сензитивности параметара, калибрација и валидација** модела.

У овом раду, примењена је техника **стохастичке калибрације** применом алгоритма SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting - 2). Унутар овог алгоритма се третирају све неизвесности везане за улазне параметре модела и настоји се, у итеративном процесу, укључити већину измерених података у оквиру 95% неизвесности предвиђања (95 Percent Prediction Uncertainty). 95PPU израчунава се на нивоу 2,5% и 97,5% кумулативне дистрибуције излазне варијабле, одређене "latin hypercube" методом узорковања, статистичком методом генерисања случајног узорка вредности параметара из вишедимензионалне дистрибуције.

Да би се проценио квалитет подударања оба скупа података, резултати симулације модела и измерених података, укључујући и вероватне грешке настале током мерења, коришћена су два индикатора, а то су „ $p$  - фактор“ и „ $r$  - фактор“. Фактор  $p$  је проценат измерених података уоквирених у интервалу симулиране 95PPU. Вредност овог фактора је у границама од 0 до 1, где 1 значи 100% слагање измерених података у оквиру несигурности предвиђања модела (тј. савршена симулација модела). У анализи протицаја воде, вредности  $p > 0,7$  се сматрају прихватљивим. Фактор  $r$  представља однос између просечне ширине распона 95PPU и стандардног одступања измерених променљивих количина. Пожељно је да вредност овог фактора буде  $r < 1,5$ .

У овој фази развоја модела, целокупно раздобље симулације је подељено на периоде калибрације и валидације, водећи рачуна да оба периода имају довољан број влажних и сушних година. Калибрација модела извршена је коришћењем расположивих података о протицању воде и проноса седимената у поменуте три хидролошке станице: Новаци, Скочивир и Расим-бегов мост, у периоду 1969-1985, док је верификација извршена за период 1986-1991. Одабран је 17-годишњи период калибрације, водећи рачуна да буде заступљено довољно података из влажних и сувих субпериода.

Процес је започет укључивши све параметре модела који се односе на хидролошки циклус, протицаје воде и транспорт седимената у речној мрежи. Најпре је урађена **анализа сензитивности** која је резултовала издвајањем скупа најосетљивијих параметара који највише утичу на резултате модела:

- **Параметри површинског отицања:** Почетна вредност SCS броја криве - **CN2**, Расположиви водни капацитет земљишта% - **SOL\_AWC**, Биљни компензациони фактор - **EPCO**, Компензациони фактор евапорације земљишта - **ESCO**, Време закашњења површинског отицања - **SURLAG**, Хидрауличка спроводљивост засићеног земљишта - **SOL\_K**, Манингов "n" коефицијент главног водотока - **CH\_N2**, Ефективна хидрауличка спроводљивост главног водотока - **CH\_K2**.
- **Параметри базног отицања:** Алфа фактор базног отицања - **ALPHA\_BF**, "revar" коефицијент подземне воде - **GW\_REVAR** , Кашњење подземног дотока - **GW\_DELAY** , Гранична дубина подземне воде у плитком аквиферу за почетак повратног тока - **GW\_QMN**.
- **Параметри транспорта седимената у речној мрежи:** Линеарни параметар једначине седимената - **SPCON**, Експоненцијални параметар једначине седимената - **SPEXP**, Фактор еродибилности речног корита - **CH\_EROD** , Фактор вегетацијске покривености речног корита - **CH\_COV**.

Изабраним параметрима су одређени распони вредности од  $\pm 20\div 30\%$  од почетних вредности. Када су одређени почетни распони параметра, у првој итерацији модел је покренут 500 пута. Препоручени број симулација је обично 300 – 500 и зависи од броја параметара, брзине извршења модела и могућности система.

Након завршетка свих 500 симулација, у постобради су израчунате објективне функције:  $r^2$ , Nash–Sutcliffe-овог коефицијента ефикасности, P-BIAS и RSR и 95PPU за све проматране варијабле.

Затим су предложени нови распони параметара за другу итерацију којим се модификују претходни распони усредсређујући се на најбољи скуп параметара тренутне итерације.

Онда је изведена друга итерација, а поступак је настављен све док се не постигну задовољавајући резултати (у смислу р - фактора и г - фактора) или се примети да текућа итерација не резултује са додатим побољшањем вредности објективних функција у односу на претходну итерацију. Обично су три до пет итерација довољне за постизање задовољавајућих резултата док су у овом случају биле довољне 3 итерације како би се завршио процес калибрације.

У процесу калибрације протицаја, мерени подаци су обухваћени у оквиру 95 PPU у следећем односу: станица 152 Расим-бегов мост 76%, станица 203 Новаци 79% и станица 243 Скочивир 78%, док г - фактор има препоручену вредност  $< 1.5$  у сва три случаја. Код калибрације проноса седимената, 77% мерених података улази у опсег 95 PPU док г - фактор има вредност од 1,12.

Након калибрације модела извршена је анализа индикатора основног и калибрисаног модела. Утврђено је да калибрација модела нема великог утицаја на вредност коефицијента детерминације  $r^2$ , али значајно побољшава вредности коефицијента ефикасности NSE.

Као што је очекивано, вредности објективних функција променљивих вредности протока воде су ниже у периоду верификације:  $r^2 = 0.70 \div 0.72$ ;  $NS=0.65 \div 0.70$ ;  $PBIAS = -5.8 \div -24.9$ ;  $RSR = 0.56 \div 0.59$ , упоређујући их са вредностима ових индикатора у фази калибрације:  $r^2 = 0.73 \div 0.74$ ;  $NS=0.73 \div 0.74$ ;  $PBIAS = -9.4 \div 1.5$ ;  $RSR= 0.51 \div 0.52$ .

Ово није случај са вредностима индикатора транспортованих количина седимената у станици Расимбегов мост, где се вредност објективних функција повећава у периоду верификације:  $r^2 = 0.59$ ;  $NS=0.59$ ;  $PBIAS = -3.0$ ;  $RSR= 0.64$ , у односу на период калибрације модела:  $r^2 = 0.46$ ;  $NS=0.42$ ;  $PBIAS = 20.1$ ;  $RSR= 0.76$ .

Овакво понашање модела је последица значајних одступања симулираних и измерених вредности варијабла на почетку процеса калибрације, што смањује вредности објективних функција. Разлог за ове разлике би могао бити нижи квалитет измерених података о седиментима у овом периоду.

Након што је модел калибрисан на протицаје, продукцију и транспорт седимената у речној мрежи, извршено је моделирање седиментације у акумулацији Тиквеш. У овој фази непосредни слив акумулације Тиквеш је третиран као један слив дуж целе акумулације на дужини од око 28 км. У акумулацију се директно улива неколико водотока: главни водоток - Црна река и 8 бочних притока: Галишка река, река Црвена вода, река Сушица, река Блаштица, Каменичка река, Дољанска река, Дабничка река и Дреновачка река.

Укупна маса седимената која улази у акумулацију у анализираном периоду израчуната је сумирањем појединачних маса транспортованих седимената сваког од наведених водотока, након чега је израчуната укупна запремина депонованих седимената у акумулацији. Притом, просечна густина акумулираног седимента у акумулацији је процењена на  $1,35 \text{ t/m}^3$  и одређена је коришћењем методе Лара-Пембертон примењене на основу гранулометријских анализа узорка материјала узетих из акумулације током батиметријских истраживања спроведених 1991. и 2016. године. Ефикасност задржавања седимената у акумулацији је процењена на 98%. Ове вредности су добивене помоћу Брунеових зависности.

Користећи калибрисани и верификовани модел за период 1969–1991. године, у даљој анализи је спроведена прогностичка симулација хидролошких процеса, продукције и транспорта седимената у речној мрежи, као и процеса депоновања седимената у акумулацији Тиквеш у периоду 1992–2016 године. Излазни резултати модела упоређени

су са измереним подацима добивеним на последњем батиметријском истраживању спроведеном у 2016 години.

Развој и примена прогностичког модела слива акумулације Тиквеш у овом истраживачком раду је резултирала следећим закључцима:

- 1) Модел је веома успешно примењен за симулацију хидролошких процеса у сливу акумулације Тиквеш, што је резултирало доста прецизним дефинисањем продукције, транспорта и депоновања седимената на тиквешком акумулационом језеру у периоду 1969-2016 године.
- 2) Процењене вредности просечне ерозије у сливу Тиквешке акумулације за период 1969-1991 године износе  $5,75 \text{ t ha}^{-1}\text{g}^{-1}$ . Ова вредност указује на врло високу стопу ерозије у сливу која је знатно виша од просека европских земаља процењена на  $2,40 \text{ t ha}^{-1}\text{g}^{-1}$  за референтну 2012 годину, виша од просечне ерозије у суседним земљама Грчкој ( $4.2 \text{ t ha}^{-1}\text{g}^{-1}$ ) и Бугарској ( $2.03 \text{ t ha}^{-1}\text{g}^{-1}$ ), али нижа од пријављених просечних вредности у Италији ( $8.35 \text{ t ha}^{-1}\text{g}^{-1}$ )
- 3) Просторна дистрибуција интензитета ерозије у сливу показује да је, упркос утицају главног водотока, акумулација Тиквеш очигледно под јаким утицајем њених директних притока, где је процењена продукција седимената у распону од  $3 - 25 \text{ t ha}^{-1}\text{g}^{-1}$ .
- 4) Временска дистрибуција брзине седиментације резервоара у периоду 1969-1991 дефинисана је са високом тачношћу која отвара могућност детаљне анализе карактеристичних потпериода у односу на седиментацију и губитак корисног простора. Процена кумулативно депонованих седимената у акумулацији је углавном у распону од  $\text{PBIAS} = + - 10\%$  у односу на кумулативну количину израчунату на основу података регистрованих батиметријским мерењима.
- 5) Највеће одступање  $\text{PBIAS}$ -а се примећује у односу на годину 1984 када симулација модела резултира значајно већом масом депонованих седимената у акумулацији ( $\text{PBIAS} = -82.8\%$ ). С обзиром на то да су у периоду од 1978 до 1980 године евидентиране екстремно високе вредности протока воде и седимената у речној мрежи, резултати добивени моделском симулацијом се могу сматрати поузданим. Ово указује на то да су се вероватно појавили одређени пропусти током хидрографских мерења изведених 1984 године, што је резултирало неправилним проценом количине исталожених седимената за тај период.
- 6) Упркос великој неизвесности модела у вези са подацима о климатским параметрима, прогноза седиментације акумулације за период од 1991 до 2016 године коришћењем временског генератора показује прихватљиве резултате.

7) Модел прецењује укупну количину седимената на крају анализираниог периода за око 8.7% у односу на измерене податке. Ова разлика би се могла исправити ако је у моделска ограничења укључен и процес консолидације депонованих седимената, што је временски зависна варијабила која утиче на запреминску тежину, односно на густину депозита.

Што се тиче смањења запремине резервоара у току времена, на основу моделске симулације могу се извући следећи закључци:

- 8) Варијабилност седиментације резервоара у различитим периодима је очигледна и директно зависи од природних услова који преовладавају у сливу;
- 9) У погледу интензитета седиментације резервоара, досадашњи период експлоатације се може поделити у три подпериода: од 1969 до 1977 године, од 1978 до 1985 године и од 1986 године до 2016 године.
- a) У периоду од 1969 до 1977 године, просечан годишњи губитак запремине резервоара износио је  $0.773 \times 10^6 \text{ m}^3$  или 0,163% од укупне почетне запремине ( $475 \times 10^6 \text{ m}^3$ );
- b) У периоду од 1978. до 1986. године који је забележен као изузетно влажан период у региону, годишњи губитак ефективне запремине акумулације је изузетан, и износи око  $18.02 \times 10^6 \text{ m}^3$  или у просеку  $2.00 \times 10^6 \text{ m}^3$  годишње, што представља губитак од 0,42% укупне почетне запремине. Према резултатима модела, максимална годишња количина депонованих седимената у овом периоду се дешава 1979 године и износи  $6,1 \times 10^6 \text{ m}^3$  што је скоро 1,28% укупне почетне запремине резервоара или 14.1% укупне запремине депонованог материјала у акумулацији;
- c) У периоду од 1987 до 2016 године стопа седиментације је смањена, а просечни годишњи губитак запремине акумулације износи  $0,605 \times 10^6 \text{ m}^3$  (0,127%);
- 10) Укупан губитак запремине резервоара у целом анализираниом периоду који се протеже од 1969 до 2016 године или у току 48 година експлоатационог периода износи око  $43.1 \times 10^6 \text{ m}^3$  или у просеку  $0.898 \times 10^6 \text{ m}^3$  годишње, што представља просечни годишњи губитак од 0,19% од укупне почетне запремине;
- 11) Просечна стопа седиментације акумулације у анализираниом периоду 1969-2016 на годишњем нивоу креће се од 0.02 до 1,28% од почетне запремине.

**ДРУГИ ДЕО** овог рада се односи на моделирање дугорочне просторне дистрибуције наносног седимента унутар акумулације Тиквеш. Анализом хидродинамичких и транспортних процеса у акумулационом језеру, димензионалности и перформанси доступних нумеричких модела, изабран је нумерички модел SRH-1D чије су основне карактеристике:

- модел је јавно доступан,
- хидраулички и транспортни модел покретних граница за симулацију токова у отвореним речним мрежама и акумулацијама може да симулира стационарне или нестационарне услове протока воде,
- применљиви су сложени гранични услови модела,
- транспорт кохезионих и некохезионих седимената је укључен у моделу,
- омогућава се симулација бочних дотока седимената,
- укључује способност извођења потпуно нестационарних симулација транспорта седимената,
- укључује робусне алгоритме за моделирање хидрауличких феномена и транспорта седимената, укључујући сортирање седимената
- процес пре и постпроцесирања модела је релативно једноставан,
- постоји обимна расположива и лако доступна пратећа документација.

База података коришћена за покретање нумеричких симулација процеса дистрибуције седимената у акумулацији Тиквеш се састоји од батиметријских података, података о дотоку воде и промене нивоа и температуре воде у акумулацији као и од података о седиментима.

У овом раду су коришћени батиметријски подаци из 1972. године, који се сматрају као топографска мрежа пре пуњења резервоара, и подаци из 1973, 1976, 1984, 1991 и 2016 године када су спроведена редовна ехосондерска истраживања дна акумулације. Мрежа су извршена на укупно 42 профила који представљају главни водоток на око 26 км дужине и 20 профила на притокама (река Блаштица, река Каменичка и Дреновска река) на дужини од око 5 km. Ове информације су добивене од стране НХМС (Националног хидрометеоролошког сервиса Републике Македоније), институције одговорне за прикупљање и обраду хидрометеоролошких података у држави. Батиметријска мапа нултог стања акумулације је генерисана на основу података из 1972 године.

Подаци о просечним месечним протицајима у водотоцима који улазе у акумулацију Тиквеш су добивени математичким моделом описаним раније.

Информације о просечним месечним нивоима акумулације Тиквеш су добивени од стране А.Д. ЕЛЕМ-а (А.Д. Електране Македоније), компаније за производњу електричне енергије за период 1969-2016. Средња вредност коте нивоа акумулације у овом периоду је 253,6 mNV, док је медијана низа 254,8 mNV. Максимални ниво воде који је регистрован у досадашњем експлоатационом периоду износи 265,2 mNV, док је минимални ниво 234 mNV. Углавном, нивои акумулације флукутирају између највише вредности 265 mNV и 252 mNV, док је максимална амплитуда флукутације нивоа износила 31,2 m.

Количина улазних седимената је генерисана уз помоћ математичког модела SWAT. У овом раду нумерички модел је заснован на осредњене месечне вредности проноса наноса у периоду од 1969. до 2016. године. Гранулометријски састав материјала у симулираном домену је познат на одређеним локацијама (информације добивене теренским истраживањима), док за делове који леже између тих локација је извршена одговарајућа интерполација.

Пошто је већина седимената који улазе у акумулацију фино зрнасте муљевите и глинасте структуре, коришћен је кохезиони модел SRH-1D. Wu-ова формула (Wu et al., 2000) е одабрана за израчунавање транспортног капацитета, док су неки од параметара кохезивног транспорта седимената добивени из литературе за сличне случајеве.

Модел је калибрисан за период између 1972. и 1991. године применом метода параметарске калибрације што значи да су се сензитивни моделски параметри итеративно подешавали док се нису добила прихватљива подударача између симулације и проматрања. Коришћене су информације о морфолошким променама 42 карактеристична попречна профила акумулације које су регистроване током теренских мерења.

Следећи параметри су прилагођени да симулирају промену морфологије профила према мереним подацима: **гранично напрезање за парцијално депоновање честица глине и муља** ( $\tau_{d,part}$ ), који се користи за одређивање иницијалног стања таложења наноса, **гранично напрезање за површинску ерозију честица глине и муља** ( $\tau_{s,e}^c$ ) и **нагиб криве интензитета ерозије или којефицијент за масивну ерозију** ( $M_{m,e}$ ).

У процесу калибрације су варирани параметри седиментације и ерозије модела, сваки пут упоређујући моделиране и мерене морфологије попречних профила и талвега акумулације.

Као резултат калибрације модела, Wu-ов параметар критичног тангенцијалног напрезања  $\theta_c = 0.026$ , параметар ерозије STPERO = 0.25 Pa, коефицијент за масовну ерозију ERMAS = 0.63 Pa/hr и параметар седиментације STDEP = 0.00025 Pa, су дали



најбоље резултате. Ова комбинација параметара је резултовала вредностима квалитативних индикатора  $r^2 = 0.965$  и  $NSE = 0.993$ .

На основу резултата калибрисаног модела могу се издвојити следећи закључци:

1. Прогнозирани талвег акумулације употребом модела и евидентирани талвег теренским мерењима добро се слажу код већег броја попречних профила. Резултати подразумевају да модел може симулирати селективне процесе фракционих депозита и ерозије унутар акумулације прилично добро у условима нестационарних протицаја.
2. Постоје већа одступања између мерених и моделираних профила за одсеке око ушћа реке Црне у акумулацију. То би се могло приписати конфигурацији терена и формирању вртложних секундарних струјања на уливу реке Црне и реке Блаштице у акумулацију.
3. Постоји релативно велико одступање између моделованих и мерених попречних профила у дубљим деловима акумулације. У овим случајевима, модел потцењује количину депонованих седимената. Разлог за ово неслагање може бити већа ширина акумулације и смањивање транспортног капацитета водотока, специфични локални услови тока који постоје у овим подручјима, локална брежна ерозија материјала која није обухваћена моделом итд.
4. Модел прецењује депозит на речним терасама. Разлог за то би могао бити неуспех модела да адекватно симулира сложене профиле на одговарајуће делове једнаког преноса. Са друге стране, модел се добро понаша код једноставнијих профила чији су геометријски облици адекватно дефинисани.
5. У принципу, 23-годишња симулација је показала да модел може предвидети промене у дну акумулације, ерозију и седиментацију наносног материјала са прихватљивом прецизношћу. Ови резултати су показали да се модел може користити приликом анализе будућих промена дна акумулације насталих због ерозије и депоновања седимената.

Након калибрације модела коришћењем измерених података, спроведени су **прогностички прорачуни** у периоду од 1992-2016 године, како би се процениле промене у топографији дна акумулације. За ову симулацију, као улазни параметри, коришћене су серије података добивеним у претходној фази (SWAT модел) .

Упоређивање моделованих профила са измереним подацима из 2016 године указује да модел знатно прецењује количину депонованог седимента у прогнозном периоду. Имајући у обзир да су долазне количине воде и седимената за прогнозни период исто тако продукт моделске симулације – коришћењем SWAT модела, као и чињенице да је дистрибуција седимената у зависности од протока воде генерисана на основу података

из литературе и калибрације модела, а не на бази теренских мерења, резултати модела се могу прихватити као сасвим добра апроксимација природних процеса седиментације у алумулацији Тиквеш током прогнозног периода.

Анализа могућих мера за очување и продужавање експлоатационог периода акумулације Тиквеш, спроведена у задњем делу овог рада, резултирала је издвајањем неколико најприкладнијих конкретних метода и активности које су применљиве и препоручљиве за контролу и одрживо управљање седиментацијом:

1. Прва препоручена мера је противерозивна регулација водотока у непосредном сливу акумулације у којима је евидентирана интензивна ерозија: река Сушица, река Блаштица, Каменичка река и Дреновска река. Тиме се подразумева изградња попречних преграда одређене висине чиме се смањује уздужни нагиб водотока, а истовремено се трајно задржава одређена количина ерозивног седимента. Ово је веома ефикасна мера која даје ефекте одмах после изградње објекта.
2. Друга препоручена мера је пошумљавање голина и пашњака у сливу акумулације дужином Скочивирске клисуре. Симулација ерозије применом препорученог модела у овом раду је показала да би ерозивност у сливу била доста мања уколико би пре почетка експлоатације акумулације биле предузете мере пошумљавања изразито ерозивних терена – пашњака и голина. Наиме, укупна годишња продукција наноса у сливу би била редукована са 5,45 t/ha на 4,3 t/ha или за 21,1%, док количине наноса које би се исталожиле у акумулацији би биле редуковане за око 15.5 %.
3. Трећа препоручена мера која се може применити за одстрањивање наноса из акумулационог простора где је седиментација најинтензивнија је ископ у сувом или механичко багеровање. Треба напоменути да је примена ове методе ограничена просторно и временски, а не треба занемарити и економске и еколошке утицаје.
4. Коначно, поред наведених мера, препоручљиво је спровођење и одређених друштвених мера које се односе не само на ову акумулацију него на општи проблем борбе друштва против ерозије земљишта. Овде спадају административне мере, образовно-васпитне и пропагандне активности које би биле спроведене од стране корисника акумулације и од одговарајућих државних институција. Овим би се мерама значајно смањио антропошки утицај на развој ерозије у сливу.

## ПРЕПОРУКЕ ЗА ДАЉА ИСТРАЖИВАЊА

На основи резултата овог рада, препоручују се даља истраживања са циљем бољег разумевања процеса ерозије у сливу акумулације Тиквеш, транспорта наноса и интензитета запуњавања акумулације током времена.

Креирани модел би требало даље надограђивати и рафинисати укључујући податке и параметре који нису били доступни током израде овог рада. Укључивање метеоролошких, климатских и хидролошких података из више мерних станица у сливу би свакако повећало тачност и доверљивост модела. Ово се односи и на податке које се односе на педолошке карактеристике тла, коришћења земљишта, управљањем акумулације као хидроенергетским потенцијалом итд.

Препоручује се уградња додатних софистицираних станица за мониторинг седимената као и повећање обима мерења транспорта седимента у постојећим станицама на Црној реци – ултрасонични и доплер мерни системи итд. Поред праћења суспендованих седимената, требало би да се успостави програм праћења и вученог наноса у кориту реке Црна. Користећи ове податке би се свакако повећала тачност хидродинамичког модела примењеног у овом раду.

Са циљем утврђивања дотока укупног наноса у акумулацију, неопходан је наставак редовних теренских и лабораторијских истраживања седимената акумулације Тиквеш. Хидрографска (батиметријска) истраживања би требало предузимати једном у 5 до 10 година.

У овом истраживању дате су препоруке за мере одржавања с обзиром на проблеме ерозије у макроскопском обиму у оквиру слива. Било би прикладније и ефикасније да се проблем ерозије решава на основу анализе малих и локализованих подручја са јединственом топографијом, коришћења и типа земљишта, социјалних и друштвених услова и тд.

Овај рад је вероватно дао користан допринос интегрисаном приступу моделовања ерозије тла у сливу, транспорта наноса у речној мрежи и таложење у акумулацији Тиквеш. Неопходно је проширити ову студију и на остале системе слив-речна мрежа-акумулација у другим деловима Македоније са различитим топографским, земљишним, климатским и геолошким карактеристикама. На тај начин би се могле квалитативно побољшати сазнања о закономерностима у процесу дугорочне седиментације ових веома значајних водних ресурса у држави и региону.

## Референце

- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., Srinivasan, R. & Reichert, P. Modelling of hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *J. Hydrol.* 2007, 333, 413–430.
- Abbaspour, K.C., Johnson, A., van Genuchten, M.Th. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone J.* 2004, 3, 1340–1352.
- Abbaspour, K.C., SWAT-CUP-2012. SWAT Calibration and Uncertainty Program—A User Manual; Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology: Dubendorf, Switzerland, 2012.
- Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefa, S., Srinivasan, R., Yang, H., Klove, B., A Continental-Scale Hydrology and Water Quality Model for Europe: Calibration and Uncertainty of a High-Resolution Large-Scale SWAT Model. *J. Hydrol.* 2015, 524 (1), 733–752.
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., van Griensven, A., Van Liew, M.W., Kannan, N., Van Liew, M.W., Jha, M.K., 2012b. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *Trans. ASABE* 2012, 55, (4) : 1491–1508.
- Annandale, George W., Gregory L. Morris, and Pravin Karki. *Extending the Life of Reservoirs: Sustainable Sediment Management for Dams and Run-of-River Hydropower. Directions in Development.* Washington, DC: World Bank, 2016.
- Basson, G. “Mathematical modeling of Sediment Transport and Deposition in Reservoirs - Guidelines and Case Studies”, International Commission on Large Dams Sedimentation Committee Report, 2002
- Basson, G. R. Management of siltation in existing and new reservoirs. General Report Q. 89. Proc. of the 23rd Congress of the Int. Commission on Large Dams CIGB- ICOLD (vol. 2). 2009.
- Blinkov I., Trendafilov A., Land degradation in the Republic of Macedonia, Conference land degradation in the Balkan countries, Beograd 2004
- Borselli L., Torri D., Poesen J., Iaquina P. A robust algorithm for estimating soil erodibility in different climates. *CATENA*, 2012, 97:85-94 DOI: 10.1016/j.catena.2012.05.012
- Brune, G. M. “Trap Efficiency of Reservoirs.” *Transactions of the American Geophysical Union* 34 , 1953, (3): 407–18.
- Burt, T., & Allison, R. *Sediment cascades: An integrated approach.* Chichester: John Wiley, 2010.
- Chaplot, V. Impact of spatial input data resolution on hydrological and erosion modeling: Recommendations from a global assessment. *J. Phys. Chem. Earth*, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2013.09.020>
- CLC 2006: Corine Land Cover. <http://sia.eionet.europa.eu/CLC2006>, 2012.

- Churchill, M. A. Discussion of paper by L. C. Gottschalk “Analyses and use of reservoir sedimentation data,” in Federal Inter-agency Sedimentation Conference Proceedings, pp. 139–140, U.S. Geol. Surv., Denver, Colo., 1948.
- De Cesare, G., & Lafitte, R. Outline of the historical development regarding reservoir sedimentation. 32nd IAHR Congress, Venice, 2007.
- Djordjevic M, Trendafilov A, Jelic D, Georgievski S, A. Popovski. Erosion map of the Republic of Macedonia. Memoir. Water Development Institute, Skopje. 1993 (in Macedonian)
- Djordjevic M, Trendafilov A, Jelic D, Georgievski S, A. Popovski. Erosion map of the Republic of Macedonia. Memoir. Water Development Institute, Skopje. 1993 (in Macedonian)
- E. Chen, D.S. Mackay, Effects of distribution-based parameter aggregation on a spatially distributed agricultural nonpoint source pollution model, *J. Hydrol.*, 295 ,2004, pp. 211-224
- Exner, F. M., *Zur Physik der Dunen*, Sitzber. Akad. Wiss Wien, Part IIa, Bd. 129 (in German), 1920.
- Exner, F. M., *Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen*, Sitzber. Akad. Wiss Wien, Part IIa, Bd. 134 (in German), 1925.
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, *Harmonized World Soil Database (version 1.1)*. FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria, 2009.
- Gavrilović, S. *Engineering of Torrents and Erosion*, Journal of Construction (Special Issue), Belgrade, Yugoslavia. 1972.
- Greimann, B. P. and Huang, J. V. *User’s Manual for SRH 1-D (Sedimentation and River Hydraulics – One Dimension, Version 4.0)*. U.S. Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado. 2018.
- Gyamfi, C.; Ndambuki, J.M.; Salim, R.W. *Simulation of Sediment Yield in a Semi-Arid River Basin under Changing Land Use: An Integrated Approach of Hydrologic Modelling and Principal Component Analysis*. *Sustainability* 2016, 8, 1133.
- Han, Q., and He, M. "A mathematical model for reservoir sedimentation and fluvial processes," *Int. J. of Sediment Res.*, 5 (2), IRTCES, pp. 43–84, 1990.
- Hjulstrom, F., *The Morphological Activity of Rivers as Illustrated by River Fyris, 1935*, Bulletin of the Geological Institute, Uppsala, vol.25, chap.3.
- Hwang, K.-N, and Mehta, A.J. “Fine sediment erodibility in Lake Okeechobee,” Coastal and Oceanographic Engineering Dept., Univ. of Florida, Report UFL/COEL-89/019, Gainesville, FL, 1989.
- Hydrol. Sci. J.* (2014), 10.1080/02626667.2014.916408
- Ivanoski, D., *Bathymetry surveys in Tikvesh reservoirs*, Faculty of Civil Engineering, Skopje, 2016.

J. Otis Laws , Donald A. Parsons, The relation of raindrop-size to intensity, Eos Transactions American Geophysical Union,1943

Juez, C., Tena, A., Fernández-Pato, J., Batalla, R.J., García-Navarro, P. Application of a distributed 2d overland flow model for rainfall/runoff and erosion simulation in a mediterranean watershed Cuadernos de Investigación Geográfica 44, 2018. <http://doi.org/10.18172/cig.3320>.

Kondolf, G. M. PROFILE: Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels. Environmental Management, 1997, 21(4), 533–551

Krone, R.B. “Flumes studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes,” Technical Report, Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, California,1962.

L.-C. Chiang, Y. Yuan, NHD Plus dataset, Watershed subdivision and SWAT model performance

Lara, J.M. and Pemberton, E.L., Initial unit-weight of deposited sediments, Paper No. 28, Proc. Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, U.S.D.A., USA,1963.

Miller,C.R., Determination of the Unit Weight of Sediment for use in Sediment Volume Compaction . In: Reservoir Sedimentation: technical guideline for Bureau of Reclamation, Strand,R.I. and Penibertori, E.L. (Eds).USBR,Denver, USA, 1953

Mehta, A. J. and Partheniades, E. “Depositional Behavior of Cohesive Sediments.” Tech report No. 16, Univ. of Florida, Gainesville, FL,1973.

Mehta, A.J., and Partheniades, E. “An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediment,” Journal of Hydraulic Research, Vol. 13(4), 361-381,1975.

Milevski, I. An approach of GIS based assessment of soil erosion rate on country level in the case of Macedonia. 2015. DOI:10.18509/GBP.2015.13.

Panagos P., Ballabio C., Lugato E., Jones A., Borrelli P., Condition of agricultural soil: Factsheet on soil erosion, EUR 29020, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978- 92-79-77328-0, doi:10.2760/728794, JRC110011

Panos Panagos ,Katrin Meusburger, Cristiano Ballabio, Pasquale Borrelli, Christine Alewell, Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS, Science of the Total Environment, 479–480 (2014) 189–200.

Panos Panagos, Pasquale Borrelli, Katrin Meusburger, Christine Alewell,Emanuele Lugato., Luca Montanarella,. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale, Land Use Policy 48 (2015) 38–50

Partheniades, E. “Erosion and deposition of cohesive soils,” Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 91(1), 105-139,1965.

Renard, K. and Freimund, J. R.: Using monthly precipitation data to estimate R-factor in the revised USLE, J. Hydrol., 157, 287–306, 1994.

- Schleiss, A. J., & De Cesare, G. Physical model experiments on reservoir sedimentation. IAHR Hydrolink, 4, 54–57,2010
- Shields,A. Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bed-Load Movement, California Institute of Technology,Pasadena,1936.
- Sumi, T., & Hirose, T. Accumulation of sediment in reservoirs. Water storage, transport and distribution (pp.224–252). Paris, France: UNESCO-IHE and EOLSS Publish- ers Co. Ltd.,2009
- Van Rijn, L.C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries, and coastal seas, Aqua Publications, 1006 AN Amsterdam, The Netherlands. 1993.
- Vigiak, O., Malago, A., Bouraoui, F., Vanmaercke, M., Poesen, J., Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins. Sci. Total Environ, 2015,538, 855–875.
- Vermeyen, T. “Erosional and depositional characteristics of cohesive sediments found in Elephant Butte Reservoir, New Mexico,” Technical Report R-95-15., Water Resources Services, Technical Service Center, Bureau of Reclamation, Denver, CO.1995
- Williams J.R., Hann R.W. , Optimal operation of large agricultural watersheds with water quality constraints, Texas Water Resources Institute, Texas A&M University System, Texas, U.S. Technical Report TR96 , 1976
- Williams, J.R. and Berndt, H.D., Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers [online], 20 (6), 1100–1104. 1997 Available from: [http://itia.ntua.gr/hsj/redbooks/122/iahs\\_122\\_0168.pdf](http://itia.ntua.gr/hsj/redbooks/122/iahs_122_0168.pdf)
- Wishmeier,W,H., and Smith,D.D. Soil-Loss Estimation as a Tool in Soil and Water Management Planning, Institute of Association of Scientific Hydrology, Publication no.59,pp 148-159.1962.
- Wishmeier,W,H., and Smith,D.D., Predictiong Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of the Rocy Mountains, US Department of Agriculture, Agricultura Handbook no.282.1965
- Wu, W., S.S.Y. Wang, and Y. Jia . "Nonuniform sediment transport in alluvial rivers," Journal of Hydraulic Research, Vol. 38(6):427-434., 2000.
- Филиповски, Ѓ. и сор. (1996) :“Карактеристики на климатско-вегетациско-почвените зони (региони) во Република Македонија”, МАНУ, Скопје 1996

**ПРИЛОЗИ**



## ПРИЛОГ 1. Опис Модела SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

### 1 Основа хидролошког модела SWAT

SWAT симулира хидролошки циклус слива у две фазе, у тзв. земљишној фази и у транспортној фази. Земљишна фаза хидролошког циклуса дефинише кретање воде, као и уношење седимената, хранљивих материја и пестицида ка главном каналу у сваком подсливу. У транспортној фази хидролошког циклуса моделује се кретање воде, седимената, итд. кроз каналску мрежу, од сливног подручја па све до излаза из моделоване области.

Следећи делови дају опис обе фазе (тј. земљишне и транспортне фазе) и њихових компонената, као што је симулирано у SWAT-у. Ипак, опис се фокусира на релевантне компоненте и процесе садашњег рада, тако да нису описани делови који се односе на хемијска моделовања. Пуни опис свих процеса у SWAT-у дат је у Neitsch et al. (2001).

#### 1.1 Земљишна фаза хидролошког циклуса

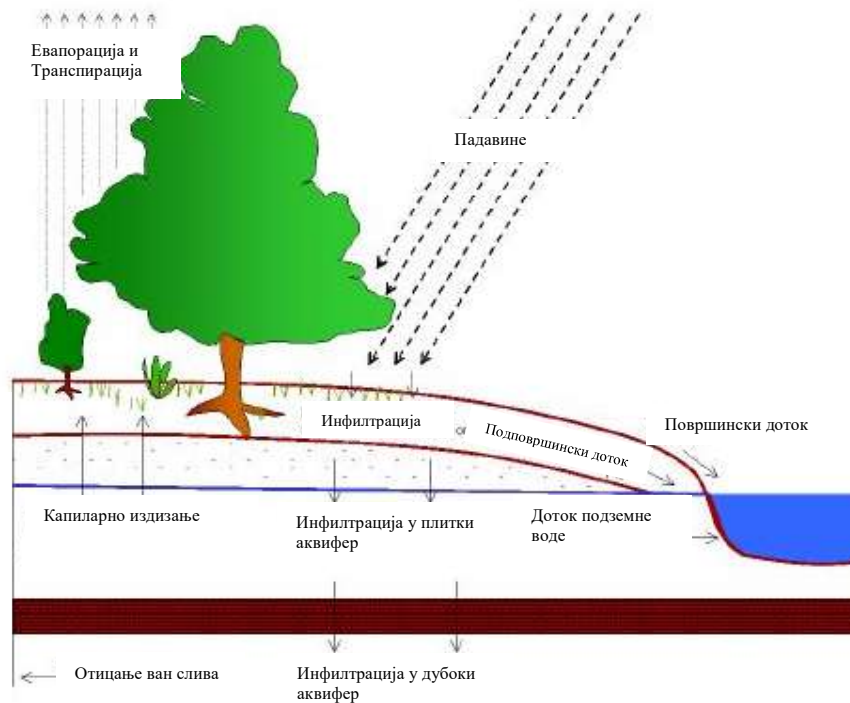
У SWAT-у је, у земљишној фази, хидролошки циклус (слика 1) симулиран на основу једначине водног биланса:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_d - Q_{sur} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Где је:

- $SW_t$  крајњи садржај воде у тлу у анализираном временском интервалу (mm)
- $t$  време (дан)
- $SW_o$  почетни садржај воде у тлу (mm)
- $R_d$  дневне падавине (mm)
- $Q_{sur}$  површински доток (mm)
- $E_a$  дневна евапотранспирација (mm)
- $w_{seep}$  количина воде која се инфилтрира у дубље слојеве тла (mm)
- $Q_{gw}$  доток подземне воде (mm)

Падавине могу да се задрже у крошњама вегетације или да стигну до површине тла. Вода ће се на површини тла инфилтрирати у тло или истећи по тлу као површинско истицање. Површински отицај ће се кретати релативно брзо ка неком потоку-каналу и допринеће краткорочном повећавању протока у потоку. Инфилтрирана вода може да се задржи у тлу, а касније да буде искоришћена од биљака или може полако да направи пут до површинских токова преко система подземних (потповршинских) канала, на пример, латералних потповршинских токова.



**Слика 1** Елементи земљишне фазе хидролошког циклуса у SWAT-у (Neitsch et al., 2001)

SWAT рачуна површинско истицање за сваку HRU (Хидролошка јединица) посебно. Кад вредност падавина пређе нулу, израчунавају се површинско истицање и инфилтрација (на пример, коришћењем метода SCS). Уколико је могуће генерисање површинског истицања (вредност површинског истицања  $> 0$ ), онда се рачунају: пик хидрограма истицања, губици тока, продукција седимената, хранљиве материје и пестициди за сваку HRU. Ако површинско истицање није могуће, онда ће се симулација тока у тло извршити након прорачуна евапотранспирације, раста култура и подземних токова. Након симулације кретања воде у тло, биће генерисан проток кроз речну мрежу за HRU. Излазне променљиве за суб-сливове рачунају се за све HRU. Коначно, проток и седименти се транспортују путем речне мреже.

## 1.2 Метеоролошки услови у сливу

Метеоролошки услови генеришу улазне информације о влаги и енергији из атмосфере који контролишу воднобилансно стање слива. У принципу, модел омогућава да дневне вредности падавина, максимална и минимална температура ваздуха, соларна радијација, брзина ветра и релативна влажност ваздуха буду улаз генерисан на основу базе посматраних података или генерисан у току симулације.

Сваком суб-сливу SWAT додељује најближу метеоролошку станицу или кишомер као меродавне (Di Luzio et al., 2001).

### 1.3 Вегетациона акумулација воде

Вегетациона акумулација представља задржавање воде која је пала по биљним површинама, одакле касније постаје подложна испаравању. Ако се користи SCS метод за рачунање површинског истицања, вегетационо складирање је узето у обзир при прорачуну као део вредности CN броја. Ова променљива, исто тако, укључује и површинско складирање и инфилтрацију пре површинског истицања и процењује се као 20% од задржавања вредности за дати дан (види део 4.8.2.5).

SWAT омогућава унос максималног износа воде који може бити складиран у крошњама биљака при максималном индексу лисне површине. Ова вредност и индекс лисне површине биће употребљени у моделу за рачунање максимума складирања у било које време у периоду раста вегетације.

### 1.4 Евапотранспирација

Евапотранспирација укључује испаравање воде из река и језера, са земљине површине и вегетативног покривача, као и транспирацију са листова биљака.

SWAT нуди три опције за процену потенцијалне евапотранспирације (Neitsch et al, 2001.):

Penman-Monteith (Allen et al., 1989),

Priestley-Taylor (Allen, 1998) и

Hargreaves (Hargreaves & Allen, 2003).

Уколико постоји могућност испаравања воде са тла, SWAT прво рачуна износ испаравања за слојеве тла. Потенцијално испаравање воде са тла процењује се коришћењем експоненцијалних функција дубине тла и садржаја воде. Транспирација са биљака симулира се као линеарна функција потенцијалне евапотранспирације и индекса лисне површине.

### 1.5 Површинско истицање

SWAT симулира површинско истицање за сваку HRU, коришћењем дневних или полу-дневних информација о падавинама, уз могућност примене два метода, и то кроз модификовани SCS метод или методом инфилтрације Грина и Ампта (Green and Ampt) (Neitsch et al, 2001).

У SCS методу, вредност броја CN варира нелинеарно са садржајем влаге у тлу, достижући најнижу вредност кад тло достиже тачку сушења и повећава се до 100, упоредо са постепеним повећавањем zasiћености тла.

По SCS методу, површинско истицање се израчунава изразом:

$$Q_p = \frac{(R_d - I_a)^2}{(R_d - I_a + S)} \quad (2)$$

Где је:

- $Q_p$  акумулирани површински отицај или ефективне падавине (mm),
- $R_d$  висина падавина у току дана (mm),
- $I_a$  почетна апсорпција падавина (mm) која укључује површинско складирање, вегетативно задржавање и инфилтрацију пре површинског истицања,
- $S$  параметар задржавања (mm).

Параметар задржавања  $S$  је просторно дистрибуиран и разликује се у оквирима слива. Ова неједнакост је последица промена карактеристика тла, коришћења земљишта, нагиба падина и промена садржаја воде у тлу, као и управљања сливом.

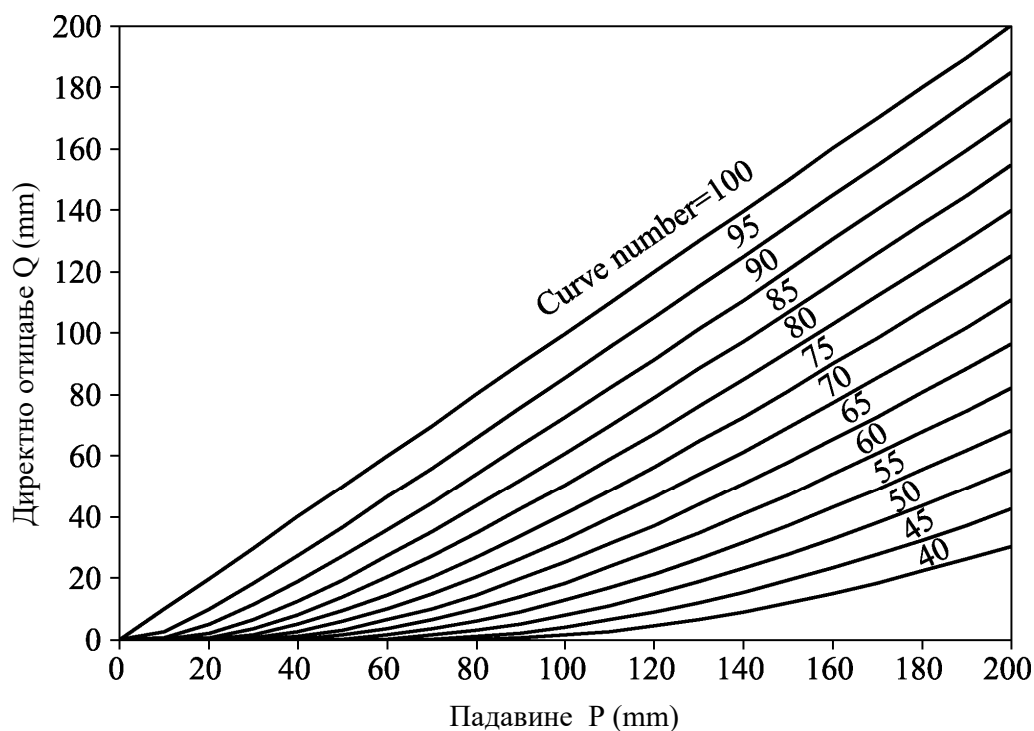
Параметар задржавања  $S$  дефинисан је следећим изразом:

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

Где  $CN$  представља број криве за тај дан. Почетна апстракција, између осталог, и најчешће се представља као  $0.2S$ , па једначина 3.1 добија следећи облик:

$$Q_p = \frac{(R_d - 0.2S)^2}{(R_d + 0.8S)} \quad (4)$$

До површинског истицања ће доћи ако  $R_d > I_a$ . Графичко решење једначине (3 и 4) за различите вредности броја  $CN$  приказано је на слици 2.



Слика 2 Однос површинског истицања и кише у SCS методу.

SCS дефинише три почетна услова влажности:

- 1 – тачка венења биљака (wilting point),
- 2 – просечна влажност, као и
- 3 – мокра (пун капацитет).

Крива влажности број 1 је најнижа вредност CN броја и претпоставља се за суве услове. Криве влажности 2 и 3 израчунате су помоћу једначина:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 \cdot (100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp(2.533 - 0.0636 \cdot (100 - CN_2)))} \quad (5)$$

$$CN_3 = CN_2 \cdot \exp[0.00673 \cdot (100 - CN_2)] \quad (6)$$

Где је CN1 крива влажности број 1, CN2 је крива влажности број 2, а CN3 је крива влажности број 3.

Прорачун пика хидрограма истицања при одређеној појави падавина у SWAT-у врши се применом Модификованог Рационалног Метода (Neitsch et al., 2001). У модификованом рационалном методу, пик истицања представља функцију међусобног односа дневних падавина које падају у трајању једнаком времену концентрације (Tc) суб-слива, запремине

површинског истицања и времена концентрације суб-слива. Процент падавина који се јавља у оквиру времена концентрације слива ( $T_c$ ) процењује се као функција укупних дневних падавина, применом стохастичке технике. Време концентрације слива процењује се Манинговом формулом, разгледајући површинско течење и течење у речној мрежи (Neitsch et al., 2001).

Коригована рационална формула која се користи за процену пика истицања изражава се следећом једначином:

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} \cdot Q_{surf} \cdot Area}{3.6 \cdot t_{conc}} \quad (7)$$

Где су:

- $q_{peak}$  - пик површинског истицања ( $m^3/s$ ), а,
- $\alpha_{tc}$  - киша која пада у време концентрације (mm),
- $Q_{surf}$  - површинско истицање (mm),
- $Area$  - површина суб-слива ( $km^2$ ),
- $t_{conc}$  - време концентрације за суб-слив (h) и
- 3,6 - фактор конверзије.

### 1.6 Транспортни губици – Губици услед инфилтрације дуж тока

За процену губитака при трансмисији, SWAT користи Лејнов метод (1982). Губици воде у реци су у функцији од ширине и дужине реке, као и трајања истицања. Губици преноса процењују се следећом једначином:

$$t_{loss} = K_{ch} \cdot TT \cdot P_{ch} \cdot L_{ch} \quad (8)$$

Где су:

$t_{loss}$  губитак воде дуж реке ( $m^3$ ),

$K_{ch}$  ефективна хидрауличка водопрпусност дна реке (mm/h),

TT време путовања тока (h),

$P_{ch}$  натопљени обим реке (m), и

$L_{ch}$  дужина реке (km).

### 1.7 Инфилтрација

Термин инфилтрација односи се на продирање воде у тло са његове површине ка дубљим слојевима. Уколико се за прорачун површинског истицања користи SCS CN метод, онда није могуће директно моделовање инфилтрације, будући да CN метод функционише са дневним временским кораком. Због тога се инфилтрација у овом случају рачуна као разлика између количине падавина и количине површинског истицања. Уколико се примењује

метод Green & Ampt, инфилтрација се рачуна директно, претпостављајући вишак воде на површини тла у целом временском периоду.

### **1.8 Редистрибуција**

Редистрибуција, што представља дефиницију за стално кретање воде кроз тло након њеног уношења путем падавина или наводњавања површине тла, је узрокована разликама у садржају воде у оквирима профила тла. У циљу предвиђања протока кроз сваки слој тла, SWAT користи тзв. технику за акумулирање. До течења у дубљим слојевима тла (или перколације) долази након превазилажења апсорбционог капацитета слоја тла, док нижи слојеви нису засићени. Проток се дефинише спроводљивошћу слоја тла у засићеном стању.

### **1.9 Латерални ток**

Странични потповршински ток је ток испод површине тла, али изнад зоне водозасићености тла. Странични потповршински ток у тлу (0-2м) израчунава се истовремено са прорачуном редистрибуције воде. За предвиђање страничног протока у сваком слоју тла користи се кинематички модел за акумулирање воде. Модел води рачуна о просторној варијацији хидрауличке спроводљивости, нагибу слојева тла и садржају воде у оквирима HRU.

### **1.10 Моделовање и управљање процесом раста биљака и земљишним покривачем**

Модел SWAT користи унифицирани алгоритам за симулацију раста свих врста биљака (Neitsch et al., 2001).

SWAT је у стању да направи разлику између једногодишњих и вишегодишњих биљака. Једногодишње биљке расту од датума сађења до датума жетве. Вишегодишње биљке одржавају свој систем корења током целе године, при чему он постаје неактиван у зимским месецима. Оне настављају са растом кад просечна дневна температура ваздуха достигне њихов неопходни температурни минимум. За процену одстрањивања воде и хранљивих материја из зоне корена користи се модел за раст биљака и производњу биомасе.

SWAT омогућава кориснику да дефинише праксе за управљање у свакој HRU. Корисници могу да дефинишу почетак вегетационог периода (сађење) и крај сезоне раста (бербу), да дефинишу време додавања и количину вештачког ђубрива, додавање пестицида, наводњавање тла итд. Осим тога, могу да се моделују и други процеси, као што је испаша стоке, аутоматско ђубрење и наводњавање површина, управљање опцијама за коришћење воде итд.

### **1.11 Ерозија**

Процена ерозије и продукције седимената у SWAT-у врши се помоћу Модификоване Универзалне Једначине Губитка Тла (MUSLE, Вилијамс, 1975), поглавље 2.6.3, за сваку Хидролошку Јединицу (HRU). MUSLE користи дневну количину површинског истицања за симулацију ерозије тла и продукцију седимената у сливном подручју. Хидролошки модел врши процену дневне количине и максималног пика хидрограма површинског истицања који се, заједно са површином слива, користе за прорачун ерозивне енергије тока.

### **1.12 Моделовање тока у речним токовима**

Део воде која тече низводно може да се изгуби услед испаравања и инфилтрације кроз дно реке. Други потенцијални губитак је захватање воде из реке за употребу у пољопривреди

или за људску употребу. Проток може да се допуни падавинама директно на површини река и / или допуњавањем воде из тачкастих извора. Ток у отвореним каналима дефинисан је као ток са слободном водном површином. SWAT користи једначину Манинг за дефинисање протока и брзине тока. Пропагација воде кроз речну мрежу симулира се применом метода променљивих запремина, метода развијеног од Вилијамса (Viliams, 1969) или методом Muskingum (Cunge, 1969). И метод променљиве акумулације и Muskingum метод су варијације метода кинематичког таласа.

### 1.13 Транспорт наноса

Транспорт наноса у рекама зависи од одвијања два истовремена процеса: процеса таложења седимената и процеса ерозије материјала у речном кориту.

Симулација транспорта седимената у SWAT-у врши се на основу теорије о проточној моћности (stream power) реке. Bagnold (1977) дефинише израз stream power (проточна моћност) као производ густине воде, протока и пада нивоа воде.

$$\Omega = \rho g Q S \quad (9)$$

Где су:

$\Omega$  - Проточна снага водотока,  $\rho$  - густина воде ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  – убрзање земљине теже ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ),  $Q$  - проток ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $S$  - уздужни нагиб реке ( $\text{m/m}$ ).

Вилијамс (1980) користи дефиницију Bagnold-а да би развио метод за утврђивање деградације у функцији од пада реке и брзине воде. У SWAT-у (верзија 2012), поред поједностављене једначине Bagnold-а [21], симулација транспорта седимената у рекама допуњена је са четири софистицираније транспортне једначине. Алтернативни методи су: (1) модификована једначина Bagnold-а [21]; (2) једначина Kodoatie-а [23]; (3) једначина Molinas-а и Wu-а [24]; и (4) једначина Jang-а [25]. Ове четири транспортне једначине развијене се на основу физички базираних процеса и материјала са речног дна.

Све корисничке информације о моделу су доступне на <https://swat.tamu.edu/>



## ПРИЛОГ 2. Опис Модела SRH-1D

SRH-1D је једнодимензионални хидраулички модел и модел транспорта седимената за употребу у природним рекама и вештачким каналима. Модел је развијен од стране Агенције за заштиту животне средине (EPA) бироа за рекламацију (RECLAMATION). SRH-1D је изворно назван GSTAR 1-D (Yang С.Т., Huang, J, and Greimann, B.P. 2005). У јуну 2007 године назив модела је промењен у SRH-1D. То је модел са мобилним границама са капацитетом да симулира стационарне и нестационарне токове, унутрашње граничне услове, комплексне речне мреже, токове у акумулацијама, транспорт кохезивних и некохезивних седимената.

### 1. Хидродинамика тока

#### 1.1. Основне једначине

##### 1.1.1. Стационарни ток

Енергетска једначина за поступно-промењливе токове између два профила т.ј. низводног попречног профила (1) и узводног попречног профила (2) је:

$$Z_2 + \beta_2 \frac{v_2^2}{2g} - Z_1 - \beta_1 \frac{v_1^2}{2g} = h_f - h_c \quad (2.1)$$

где су:

$Z_1, Z_2$  – ниво воде у профили 1 и 2 (m)

$V_1, V_2$  – просечне брзине тока у профили 1 и 2 (m/s)

$\beta_1, \beta_2$  – коефициент дистрибуције брзине у профили 1 и 2

$g$  – земљино убрзање (m<sup>2</sup>/s)

$h_f$  – губици на трење између профила 1 и 2 (m)

$h_c$  – губици због контракције или експанзије тока између профила 1 и 2 (m)

##### 1.1.2. Нестационарни ток

Једнодимензионални нестационарни токови су дефинисани законом за конзервацију масе (једначина континуитета):

$$\frac{\partial(A + A_d)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \quad (2.2)$$

и једначине за конзервацију енергије или т.з. енергетске једначине :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial Z}{\partial x} = -gAS_f \quad (2.2)$$

где су:

$Q$  – проток (m<sup>3</sup>/s),

$A$  – површина попречног профила (m<sup>2</sup>),

$A_d$  – неефективна површина попречног профила (m<sup>2</sup>),

$q_{lat}$  – латерални јединачни доток (m<sup>2</sup>/s),

$t$  – временска независна промењлива (s),

$x$  - просторна независна промењлива (m),  
 $g$  - земљино убрзање ( $m/s^2$ ),  
 $\beta$  - коефицијент дистрибуције брзине,  
 $Z$  - ниво водне површине (m),  
 $S_f$  - наклон линије енергије

## 1.2 Хидраулички губици

Уздужни хидраулички губици или губици трења тока у стационарним условима могу бити прорачунати на два начина примењујући следеће једначине:

$$h_{fa} = \sqrt{S_{f1} S_{f2}} (x_2 - x_1)$$

$$h_{fb} = \left[ \frac{2Q}{K_1 + K_2} \right]^2 (x_2 - x_1) \quad (2.3)$$

$S_{f1}$  и  $S_{f2}$  = нагиб енергије у попречном профилу 1 и профилу 2;  $x_1, x_2$  = уздужна координата профила 1 и профила 2) (m);  $Q$  = протицај ( $m^3/s$ );  $K_1, K_2$  = проточни модул у профилу 1 и 2 ( $m^3/s$ ). Минимална вредност  $h_{fa}$  и  $h_{fb}$  се усваја као актуелни губитак на трење између профила 1 и 2 .

За познати проток , дефинисање нагиба енергије  $S_f$  се врши користећи модул протока  $K$  :

$$S_f = \left( \frac{Q}{K} \right)^2 \quad (2.4)$$

који се прорачунава помоћу Манингове једначине:

$$Q = K S_f^{1/2} = \frac{C_m}{n} A R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (2.5)$$

где су :

$n$  - Манингов коефицијент;  
 $A$  - површина попречног профила ( $m^2$ );  
 $R$  - хидраулички радиус ( $A/P$ ) (m)  
 $P$  - навшени периметар профила (m); и  
 $C_m$  - фактор конверзије који износи 1.486 за Енглеске мерне јединице и 1.0 за SI јединице .

Једначина за прорачун губитака контракције и експанзије тока је :

$$h_c = C_c \left| \frac{\beta_1 V_1^2}{2g} - \frac{\beta_2 V_2^2}{2g} \right| \quad (2.6)$$

где су:  $C_c$  = коефицијент контракције односно експанзије дефинисан од стране корисника. Коефицијент експанзије се користи уколико је брзинска висина у низводном профилу (1) мања него у узводном профилу (2). Слично томе, коефицијент контракције се примењује када је брзинска висина у низводном профилу (1) већа него у узводном профилу (2).

Губици на трење у случају нестационарног тока су претстављени преко нагиба енергије  $S_f$ , који се прорачунава једначином :

$$S_f = \frac{Q|Q|}{K^2} \quad (2.7)$$

где  $Q$  и  $K$  имају исто значење као што је дефинисано раније.

### 1.3. Нумеричко решење

У SRH-1D окружењу се користе различите нумеричке шеме за симулацију стационарног и нестационарног тока – за стационарни ток се користи стандардни степ метод док се за решење нестационарних диференцијалних једначина користи имплицитна Прајсманова шема.

- **Стационарни ток**

Основна једначина стационарног тока се може написати на следећи начин:

$$f(Z_2) = Z_2 + \frac{\beta_2 V_2^2}{2g} - Z_1 - \frac{\beta_1 V_1^2}{2g} - h_f - h_c = 0 \quad (2.8)$$

Ова нелинеарна алгебарска једначина може бити решена користећи Њутон-Рафсонов итеративни метод.

Нека је  $Z_2^*$  претпостављена вредност непознате величине  $Z_2$ . Њутон-Рафсонов метод даје бољу естимацију вредности  $Z_2$  користећи следећи однос:

$$Z_2' = Z_2^* - \frac{f(Z_2^*)}{f'(Z_2^*)} \quad (2.9)$$

где је:

$$f'(Z_2^*) = 1 - \beta_2 \frac{V_2^2}{gR} - \frac{\partial h_f}{\partial Z_2} \quad (2.10)$$

- **Нестационарни ток**

Нумеричка шема примењена у SRH-1D користи т.з. померену мрежу (staggered grid).  $A$  тачке су лоциране на попречним профилима док су  $Q$  тачке лоциране у тежишту контролног волумена између два попречна профила.

Дискретизација једначине континуитета је извршена помоћу једне  $A$  - тачке и две  $Q$  – тачке, образујући диференцијалну једначину:

$$A_i^n + A_{di}^n + A_i^{n-1} - A_{di}^{n-1} = -\frac{\Delta t}{\Delta x_i} (\overline{Q}_{i+1} - \overline{Q}_{i-1}) \quad (2.11)$$

где црта изнад промењливе означава временски пондерисане вредности осредњене помоћу фактора  $\theta$  који има временску димензију. Временски осредњени протицај,  $Q_i$ , се може написати као :

$$\bar{Q}_i = \theta Q_i^n + (1 + \theta)Q_i^{n-1} \quad (2.12)$$

а једначина континуитета (2.11) се може написати у итеративној форми, где  $m$  означава број итерације:

$$\Delta A_i^m = \alpha_i \Delta Q_i^m + \delta \Delta Q_{i+1}^m + \gamma_i \quad (2.13)$$

где су којефицијенти :

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \frac{\theta \Delta t}{\Delta x_i} \\ \delta_i &= -\frac{\theta \Delta t}{\Delta x_i} \\ \gamma_i &= -A_i^n - A_{di}^n + A_i^{n-1} A_{di}^{n-1} + (\bar{Q}_i - \bar{Q}_{i+1}) \frac{\Delta t}{\Delta x_i} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Ова шема такође користи конзервативну форму динамичке (моментне) једначине. Дискретна форма динамичке једначине је развијена користећи две А - тачке и три Q – тачке са пондер фактором  $\theta$  израженим у временској димензији:

$$Q_i^n - Q_i^{n-1} + \frac{\Delta t}{\Delta s_i} (\bar{F}_e - \bar{F}_w) = \Delta t g \frac{\bar{A}_i + \bar{A}_{i-1}}{2} \left( \frac{\bar{Z}_i + \bar{Z}_{i-1}}{\Delta s_i} - S_{fi} \right) \quad (2.15)$$

где су:

$$\begin{aligned} \bar{F}_e &= \beta \frac{(\bar{Q}_i + \bar{Q}_{i+1})^2}{4\bar{A}_i} \\ \bar{F}_w &= \beta \frac{(\bar{Q}_i + \bar{Q}_{i+1})^2}{4\bar{A}_{i-1}} \\ S_{fi} &= \frac{4\bar{Q}_i |\bar{Q}_i|}{(\bar{K}_i + \bar{K}_{i+1})^2} \end{aligned} \quad (2.16)$$

На тај начин динамичка једначина (2.15) може бити написана у следећем итеративном облику:

$$\begin{aligned}
\Delta Q_i^m + \theta \frac{\Delta t}{\Delta x_i} & \left( \frac{\partial \bar{F}_e}{\partial Q_i^n} \Delta Q_i^m + \frac{\partial \bar{F}_e}{\partial Q_{i+1}^n} \Delta Q_{i+1}^m + \frac{\partial \bar{F}_e}{\partial A_i^n} \Delta A_i^m - \frac{\partial \bar{F}_w}{\partial Q_i^n} \Delta Q_i^m - \frac{\partial \bar{F}_w}{\partial Q_{i-1}^n} \Delta Q_{i-1}^m \right. \\
& \left. - \frac{\partial \bar{F}_w}{\partial A_{i-1}^n} \Delta A_{i-1}^m \right) - \theta \Delta t g \frac{\Delta A_i^m + \Delta A_{i-1}^m}{2} \left( \frac{Z_{i-1}^{n+1} - Z_i^{n+1}}{\Delta S_i} - S_{fi}^{n+1} \right) \\
& - \theta \Delta t g \frac{\Delta A_i^m + \Delta A_{i-1}^m}{2} \left( \frac{\Delta A_{i-1}^m}{T_{i-1}^{n+1} \Delta S_i} - \frac{\Delta A_i^m}{T_i^{n+1} \Delta S_i} - \frac{\partial \bar{S}_{fi}}{\partial A_i^n} \Delta A_i^m \right. \\
& \left. - \frac{\partial \bar{S}_{fi}}{\partial A_{i-1}^n} \Delta A_{i-1}^m - \frac{\partial \bar{S}_{fi}}{\partial Q_i^n} \Delta Q_i^m \right) \\
& = -Q_i^n + Q_i^{n-1} - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (\bar{F}_e - \bar{F}_w) \\
& + \Delta t g \frac{\Delta A_i^m + \Delta A_{i-1}^m}{2} \left( \frac{Z_{i-1} - Z_i}{\Delta S_i} - S_{fi} \right)
\end{aligned} \tag{2.17}$$

## 2. Транспорт седимената

### 2.1. Основне једначине

Екснерова једначина (Ехнер, 1920; 1925) је развијена претпостављајући да су промене волумена седимата у суспензији пуно мање од промена волумена седимената у речном кориту, што се може прихватити као тачно у случају дугорочних симулација стационарних токова. Једначина очувања масе седимената у том случају се редуцира на :

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial A_d}{\partial t} - q_s = 0 \tag{2.18}$$

$\varepsilon$  - волумен седимената на јединачни волумен активног слоја у дну реке

$A_d$  - волумен седимената у дну реке на јединачну дужину;

$Q_s$  - волуметриски протицај седимената;

$q_s$  - латерални дотицај седимената по јединици дужине.

Интегрирајући једначину у оквиру контролног волумена између два анализирана попречна профила добија се једначина дебљине депонираног материјала ( $\Delta Zb$ ) за одређену фракцију седимената у анализираном профилу речног рока ,  $i$  :

$$\varepsilon_i W_i \Delta x_i \Delta Z b_i = q_{s,i} \Delta x_i \Delta t + (Q_{s,i-1} - Q_{s,i}) \Delta t \tag{2.19}$$

Како је наведено у даљем тексту, SRH-1D омогућава коришћење више транспортних формула са симулацију некохезивних материјала. Треба напоменути да је свака од понуђених транспортних формула је развијена за одређене услове тока и ранг величине седимената и даје прихватљиве резултате само ако се примени у сличним условима. Генерално, не постоји универзална једначина која може бити аплицирана за све величине зрна и у свим условима тока са задовољавајућом тачношћу. Углавном, већина транспортних формула је развијено претпостављајући униформну градацију седимената. У таквом

случају, транспортни капацитет је модификован за активну класу седимената према једначини :

$$Q_i^* = p_i Q_i^T \quad (2.20)$$

где је :  $p_i$  маса анализираних фракција седимената у активном слоју, и  $Q_i^T$  је транспортни капацитет одређен формулом претпостављајући униформну градијенту седимената.

## 2.2. Транспортне једначине

Доступне транспортне функције седимената у SRH-1D (BH = вучени нанос; УН = укупни нанос).

1. Meyer-Peter и Müller (1948) – модификована од Wong-a and Parker-a (2006)	BH
2. Laursen (1958)	УН
3. Модификована Laursen – ова формула (Madden, 1993)	УН
4. Engelund и Hansen (1972)	УН
5. Ackers и White (1973)	УН
6. Ackers и White (HR Wallingford, 1990)	УН
7. Yang (1973) + Yang (1984)	УН
8. Yang (1979) + Yang (1984)	УН
9. Brownlie (1981)	УН
10. Yang et al. (1996)	УН
11. Parker (1990)	BH
12. Wilcock и Crowe (2003)	BH
13. Wu at all (2000)	УН

Између 13 транспортних формула доступних у модел SRH-1D, на основу детаљне анализе и претходна проучавања , за апликацију у овом раду је изабрана широко примењивана формула Wu at all. (2000).

## 2.3 Wu at all ( 2000)

Транспортна једначина Wu at all (2000) рачуна суспендирани и вучени нанос одвојено а укупни нанос се рачуна као њихова сума :

$$q_b + q_s = q_t \quad (2.21)$$

Вучени нанос се рачуна користећи једначину:

$$\frac{q_{bi}}{p_i \sqrt{g(s-1)d_i^3}} = 0.0053 \left[ \left( \frac{n'}{n} \right)^{1.5} \frac{\tau_b}{\tau_{ci}} - 1 \right]^{2.2} \quad (2.22)$$

где је ;  $n' = 0.05 d_{50}^{1/6}$  , укупни Манингов коефицијент отпора дна водотока.

Критично тангенцијално напрезање се рачуна према:

$$\tau_{ci} = \theta_c (s-1) d_i \xi_i \quad (2.23)$$

а фактор изложености,  $\xi_i$ , се рачуна користећи једначину:

$$\xi_i = \left( \frac{p_{hi}}{p_{ei}} \right)^\alpha \quad (2.24)$$

где је  $\alpha = 0.6$ , шта се може калибрирати према условима тока. Вероватноћа могућности прикривања и изложивања честица наноса,  $p_{hi}$  и  $p_{ei}$  се израчунава:

$$p_{hi} = \sum_{j=1}^N \frac{p_j d_j}{(d_i + d_j)}, \quad p_{ei} = \sum_{j=1}^N \frac{p_j d_i}{(d_i + d_j)} \quad (2.25)$$

Критично тангенцијално напрезање  $\theta_c = 0.03$ , а ова вредност је препоручена од стране аутора, али ипак се може модификовати према специфичним условима на терену.

Пронос суспендираних седимената се израчунава применом једначине:

$$\frac{q_{si}}{p_i \sqrt{g(s-1)d_i^3}} = 0.0000262 \left[ \left( \frac{\tau_b}{\tau_{ci}} - 1 \right) \frac{U}{\omega_{fi}} \right]^{1.74} \quad (2.26)$$

## 2.5 Кохезивни седименти

Према дефиницији која прати номенклатуру Америчке Геофизичке Уније, кохезивним се сматрају седименти чије честице пролазе кроз сито од  $62,5 \mu\text{m}$ . Транспорт муља и глине се израчунава одвојено од преосталих фракција. Модел препознаје присуство глине ако било која фракција гранулације има геометријску просечну величину зрна мању од  $0,004 \text{ mm}$ . Слично томе, присуство муља се препознаје ако је величина честица између  $0,004$  и  $0,0625 \text{ mm}$ . Транспорт фракције са  $d_{sr} \geq 0,0625 \text{ mm}$  израчунава се традиционалним једначинама транспорта, у овом случају једначинама WU-а. За мање честице, користи се метода описана у наставку.

### 2.5.1 Таложење

Појава ерозије или таложења је у зависности од вредности тангенцијалних напрезања у речном кориту,  $\tau_b$ . Депоноване глине и муља настаје када је  $\tau_b$  мање од критичног тангенцијалног напрезања у дну водотока.

Два типа таложења кохезивног наноса су укључена во SRH-1D:

- Потпуно таложење
- Парцијално таложење

Кронова (1962) једначина се користи када је тангенцијално напрезање ( $\tau$ ) мање од критичног тангенцијалног напрезања за цели нанос ( $\tau_{d,full}$ ) и све се седиментне честице и флокуле могу исталожити.

$$V_d = P_d \times \omega \text{ за } \tau \leq \tau_{d,full} \quad (2.27)$$

где су

- $V_d$  – брзина таложења
- $P_d$  – вероватноћа таложења

Вероватноћа таложења је дата једначином:

$$P_d = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,full}} \quad \text{за} \quad \tau \leq \tau_{d,full} \quad (2.28)$$

где су

- $\tau$  – тангенцијално напрезање на дну
- $\tau_{d,full}$  – критично тангенцијално напрезање за цели нанос

Многи експерименти су изведени како би се утврдиле вредности критичног тангенцијалног напрезања за цели нанос кохезивних седимената. Оне варирају између 0.06-1.1 N/m<sup>2</sup> у зависности од типа седимента и његове концентрације. Krone, R.V. (1962) је спровео серију експеримената како би утврдио критично тангенцијално напрезање за цели нанос. За наносот на брегу Сан Франциска тој је утврдио да  $\tau_{d,full} = 0.06$  N/m<sup>2</sup> када је  $c < 0.3$  g/l;  $\tau_{d,full} = 0.078$  N/m<sup>2</sup> када је  $0.3 < c < 10$  g/l. Mehta и Partheniades (1975) су открили да  $\tau_{d,full} = 0.15$  N/m<sup>2</sup> за каолинит у дистирираној води.

Парцијалното таложење се јавља када је тангенцијално напрезање веће од критичног тангенцијалног напрезања за цели нанос, али мање од критичног тангенцијалног напрезања за парцијално таложење (Van Rijn, 1993). У овај опсег напрезања, релативно снажне флокуле се исталожавају док релативно слабије флокуле остају у суспензији. Једначина за парцијално таложење гласи:

$$V_d = P_d \omega \left(1 - \frac{c_{eq}}{c}\right) \quad \text{за} \quad \tau_{d,full} < \tau < \tau_{d,part} \quad (2.29)$$

где је

- $c_{eq}$  – равнотежна кохезивна концентрација наноса

Вероватноћа таложења ја претстављена једначином:

$$P_d = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,part}} \quad \text{за} \quad \tau_{d,full} < \tau < \tau_{d,part} \quad (2.30)$$

Интензитет таложења износи  $P_d = 0$  када ја тангенцијално напрезање веће од критичног тангенцијалног напрезања за парцијално таложење.

$$P_d = 0 \quad \text{за} \quad \tau \geq \tau_{d,part} \quad (2.31)$$

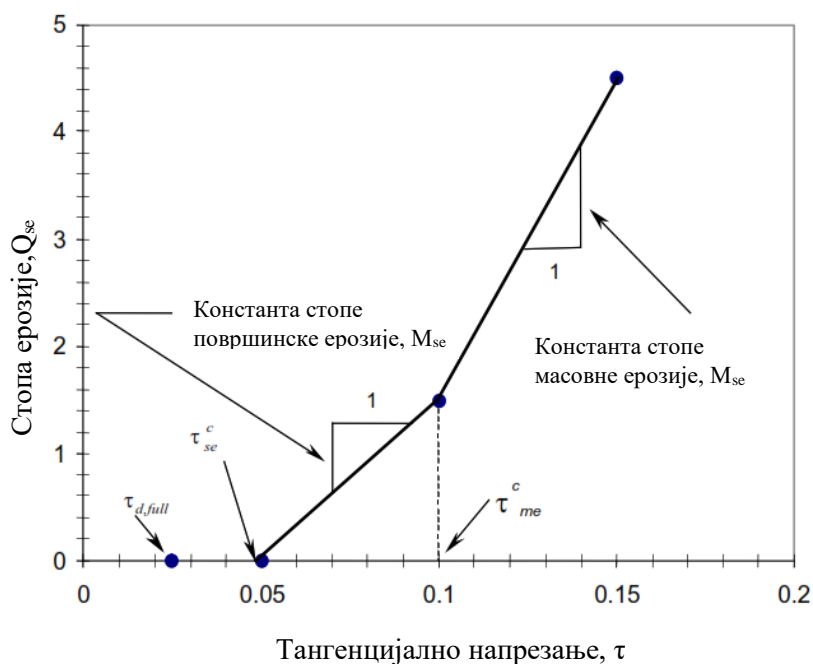
Одређивање критичних тангенцијалних напрезања за потпуно и парцијално таложење су још увек непотпуно јасни, али тачност модела седиментације увелико зависи од ових вредности. Када су стварне вредности за  $\tau_{d,full}$  и  $\tau_{d,part}$  несигурни, као у овом случају, оне постају примарни параметри за калибрацију модела.



## 2.5.2 Ерозија

До ерозије муља и глинених материјала долази у случајевима када је вредност  $\tau_b$  већа од критичног тангенцијалног напрезања за расподелу појединих честица из корита  $\tau_{cs}$ . Модел распознаје две врсте ерозије кохезивног материјала: ерозија честица или површинску ерозију и масивну ерозију (ерозија већих маса седимента, тј. блокова). Први тип односи се на случајеве када се ерозија манифестира расипањем појединих честица или малих агрегатних група. Други тип се односи на случај када је корито уништено ерозивним процесима, где водена струја откида читаве блокове депонираног наносног материјала. Ерозија честица се јавља када је задовољен услов  $\tau_b > \tau_{cs}$ , док се масивна ерозија јавља када  $\tau_b > \tau_{cm}$ , при чему се  $\tau_{cm}$  односи на критично тангенцијално напрезање за масовну ерозију.

Најдоверљивији начин за одређивање емпиријских параметара потребних за моделирање ерозије кохезивних материјала је путем лабораторијских и теренских испитивања. На Слици 2.1 су претстављени идеалне карактеристике процеса ерозије и таложења који могу да се одреде физичким испитивањима. Углавном, физичким испитивањима треба да се одреде следеће вредности: критична тангенцијална напрезања при таложењу, површинска ерозија, масовна ерозија, како и стопе површинске и масовне ерозије.



Слика 2,1 Ерозивне карактеристике кохезивних материјала

Једначина за прорачун површинске ерозије Partheniades'-а (1965) гласи:

$$Q_{se} = \begin{cases} M_{se} \frac{\tau - \tau_{se}^c}{\tau_{se}^c} & \tau \geq \tau_{se}^c \\ 0 & \tau \leq \tau_{se}^c \end{cases} \quad (2.32)$$

где  $Q_{se}$  (lb/ft<sup>2</sup>/hr или kg/m<sup>2</sup>/hr) претставља интензитет површинске ерозије;  $\tau - \tau_{se}^c$  (lb/ft<sup>2</sup> или kg/m<sup>2</sup>) се односи на тангенцијално напрезање на речном дну и критичном тангенцијалном

напрезању за површинску ерозију;  $M_{se}$  (lb/ft<sup>2</sup>/hr или kg/m<sup>2</sup>/hr) претставља константу интензитета површинске ерозија.

Масовната ерозија је уобичајено у произвољној зависности од садржине и поставке модела, као и од временског фактора. Према налазима Hwang and Mehta (1989), максимална стопа масовне ерозије износи 0,6 g/s/m<sup>2</sup>. Модел користи једначину за прорачун масовне ерозије која је слична једначини површинске ерозије:

$$Q_{se} = M_{me} \left( \frac{\tau - \tau_{me}^c}{\tau_{me}^c} \right) + P_{se} \quad \tau \geq \tau_{me}^c \quad (2.33)$$

где  $Q_{me}$  (lb/ft<sup>2</sup>/hr или kg/m<sup>2</sup>/hr) претставља интензитет масовне ерозије;  $\tau$  и  $\tau_{me}^c$  (lb/ft<sup>2</sup> или kg/m<sup>2</sup>) се односи на тангенцијално напрезање на речном дну и критичном тангенцијалном напрезању за масовну ерозију;  $M_{me}$  (lb/ft<sup>2</sup>/hr или kg/m<sup>2</sup>/hr) претставља константу интензитета масовне ерозија.

ПРИЛОГ 3 Топографске и географске карактеристике подсливова реке Црна

Подслив	Површина (ha)	Нагиб терена (%)	Дужина слива (m)	SII	Нагиб водотока (%)	Ширина водотока (m)	Дубина водотока (m)	Географска ширина Lat	Географска дужина Long_	Просечна надморска висина (мНВ)	Минимална надморска висина (мНВ)	Максимална надморска висина (мНВ)
1	2875.520	36.216	10314.600	15.239	13.556	9.679	0.498	41.574744	21.406331	1108.1	643.0	2050.0
2	1257.200	28.497	6164.996	15.239	11.367	5.892	0.358	41.547426	21.447423	895.2	643.0	1461.0
3	4164.360	18.835	15067.880	18.287	5.592	12.087	0.578	41.507712	21.373602	796.3	613.0	1570.0
4	3859.520	19.040	17102.439	18.287	7.083	11.548	0.560	41.520657	21.420702	813.4	613.0	1831.0
5	25.000	1.683	1264.975	121.914	0.375	0.562	0.075	41.458257	21.399683	613.9	610.0	617.0
6	1993.440	10.238	11610.580	60.957	5.681	7.769	0.430	41.480071	21.449068	697.2	610.0	1271.0
7	1699.080	27.323	11567.149	15.239	5.700	7.059	0.404	41.493395	21.320016	871.7	607.0	1274.0
8	1760.000	16.870	10426.144	18.287	6.199	7.209	0.409	41.464022	21.309486	711.2	607.0	1275.0
9	536.920	16.725	7851.636	18.287	7.956	3.536	0.255	41.473776	21.348720	744.5	606.0	1234.0
10	1420.720	20.836	11715.778	15.239	7.587	6.340	0.376	41.449477	21.273363	783.5	607.0	1496.0
11	5013.200	20.994	12142.073	15.239	5.914	13.510	0.622	41.447663	21.558621	837.3	636.0	1494.0
12	933.520	6.500	7738.377	60.957	2.896	4.928	0.318	41.462543	21.365470	626.8	603.0	836.0
13	818.280	2.506	6884.874	91.436	2.274	4.553	0.301	41.445139	21.380801	612.8	604.0	764.0
14	1189.320	28.560	7450.214	15.239	8.690	5.699	0.350	41.416085	21.531375	843.2	637.0	1416.0
15	2757.880	7.038	18061.261	60.957	3.730	9.439	0.490	41.459527	21.459734	669.7	606.0	1280.0
16	3096.280	10.909	20781.455	60.957	3.221	10.118	0.513	41.423570	21.436803	715.7	606.0	1497.0
17	1425.840	26.026	6279.554	15.239	11.713	6.354	0.376	41.416690	21.924297	320.7	153.0	890.0
18	11024.200	41.315	28411.110	15.239	4.056	21.677	0.853	41.329578	21.957234	515.6	261.0	1427.0
19	1777.880	9.745	16131.535	60.957	7.313	7.253	0.411	41.427046	21.298887	764.7	600.0	1781.0
20	903.400	0.766	7240.854	121.914	0.239	4.832	0.314	41.423543	21.358550	605.1	599.0	618.0
21	1542.240	24.385	7149.504	15.239	4.335	6.660	0.388	41.406131	21.014354	1069.2	941.0	1502.0
22	3309.720	33.770	13986.682	15.239	3.931	10.531	0.527	41.405402	21.089890	1305.5	941.0	1762.0
23	1463.800	25.966	6780.143	15.239	6.545	6.455	0.380	41.415162	21.614849	953.3	744.0	1429.0
24	2035.360	41.086	7484.651	15.239	10.111	7.866	0.434	41.408027	21.164960	1265.2	834.0	1773.0
25	1759.840	40.769	7601.808	15.239	11.811	7.209	0.409	41.407095	21.207174	1297.8	833.0	1790.0
26	2214.680	29.405	9516.732	15.239	9.006	8.275	0.449	41.396270	21.656733	1067.8	744.0	1736.0
27	1888.480	24.605	10918.864	15.239	4.690	7.521	0.421	41.373689	22.020015	527.0	263.0	777.0
28	654.320	0.595	7166.417	121.914	0.102	3.982	0.276	41.394224	21.357968	600.6	597.0	606.0
29	2816.840	17.376	18577.363	18.287	5.707	9.560	0.494	41.401215	21.302090	759.7	597.0	1667.0
30	2918.040	44.549	10873.423	15.239	11.329	9.764	0.501	41.369903	21.881620	852.3	267.0	1503.0
31	4415.280	4.770	14999.474	91.436	2.531	12.519	0.591	41.386216	21.478324	637.6	600.0	986.0
32	1290.480	15.509	8275.067	24.383	7.601	5.985	0.362	41.383563	21.598573	804.1	672.0	1301.0
33	2648.600	29.229	9150.925	15.239	10.115	9.213	0.482	41.352988	21.628564	988.1	671.0	1603.0
34	879.840	6.936	5638.011	60.957	1.780	4.756	0.310	41.356871	21.339851	622.4	596.0	798.0
35	665.680	0.903	12056.854	121.914	0.128	4.023	0.277	41.413256	21.385801	605.2	596.0	613.0
36	1193.320	33.975	9388.915	15.239	8.423	5.710	0.350	41.366655	21.260265	1131.2	636.0	1434.0
37	3069.640	29.197	12615.677	15.239	8.092	10.066	0.511	41.391465	21.271706	928.6	635.0	1666.0
38	1873.800	4.163	11570.458	91.436	0.819	7.486	0.420	41.391053	21.406560	612.5	596.0	784.0
39	1020.960	1.907	17435.454	121.914	0.210	5.200	0.329	41.364791	21.404133	613.5	596.0	785.0
40	2219.200	22.845	8191.514	15.239	3.699	8.285	0.449	41.371283	21.032827	1062.2	841.0	1760.0

Подслив	Површина (ha)	Нагиб терена (%)	Дужина слива (m)	SII	Нагиб водотока (%)	Ширина водотока (m)	Дубина водотока (m)	Географска ширина Lat	Географска дужина Long_	Просечна надморска висина (мНВ)	Минимална надморска висина (мНВ)	Максимална надморска висина (мНВ)
41	1047.840	22.055	5670.559	15.239	16.100	5.282	0.333	41.361334	21.068548	1079.4	840.0	1756.0
42	1455.400	29.579	8586.539	15.239	8.427	6.432	0.379	41.384383	21.564464	870.0	653.0	1405.0
43	918.560	11.209	4211.148	60.957	3.417	4.880	0.316	41.347246	21.581450	714.5	652.0	1008.0
44	614.680	35.405	5369.970	15.239	8.932	3.835	0.269	41.349941	22.014325	509.7	263.0	746.0
45	816.520	0.848	9878.742	121.914	0.219	4.547	0.301	41.351156	21.428361	604.3	595.0	617.0
46	1225.680	0.602	10710.336	121.914	0.093	5.803	0.354	41.372014	21.382644	599.5	595.0	614.0
47	17.760	0.719	755.980	121.914	0.208	0.457	0.065	41.340508	21.385438	596.1	595.0	597.0
48	1959.760	14.138	15622.317	24.383	3.747	7.690	0.427	41.371454	21.515854	730.1	601.0	1229.0
49	228.240	0.976	4291.493	121.914	0.200	2.117	0.181	41.348488	21.363912	597.9	594.0	603.0
50	1952.520	27.640	8668.326	15.239	8.356	7.673	0.427	41.365269	21.112138	1207.6	831.0	1751.0
51	1215.440	35.586	7953.057	15.239	8.673	5.773	0.353	41.357990	21.143681	1163.2	831.0	1554.0
52	1948.120	48.775	7267.372	15.239	16.530	7.662	0.426	41.334938	21.928569	904.9	263.0	1470.0
53	639.840	14.870	12495.555	24.383	6.819	3.929	0.273	41.344652	21.321156	737.0	595.0	1447.0
54	1090.400	35.132	8275.778	15.239	8.102	5.409	0.338	41.313008	22.018094	746.9	316.0	1037.0
55	429.720	4.485	7218.965	91.436	1.409	3.094	0.233	41.339007	21.551964	656.4	628.0	729.0
56	1065.480	36.462	10649.281	15.239	9.991	5.335	0.335	41.337578	21.021212	1104.0	743.0	1798.0
57	1609.360	21.041	11178.864	15.239	7.158	6.833	0.395	41.321514	21.571790	822.3	630.0	1490.0
58	2654.640	2.450	20786.358	91.436	0.826	9.226	0.483	41.344265	21.514967	628.9	595.0	949.0
59	903.400	10.252	12854.255	60.957	6.450	4.832	0.314	41.337143	21.325359	702.2	593.0	1425.0
60	65.240	0.979	2470.660	121.914	0.139	0.998	0.110	41.338209	21.381802	595.9	594.0	598.0
61	512.440	27.934	4713.991	15.239	9.464	3.439	0.250	41.335587	21.073214	972.4	715.0	1162.0
62	466.440	1.495	7154.823	121.914	0.794	3.250	0.241	41.322597	21.510250	632.1	615.0	672.0
63	1125.760	3.698	10451.047	91.436	2.116	5.514	0.342	41.309243	21.530176	664.1	616.0	837.0
64	2173.560	41.632	10689.869	15.239	10.700	8.183	0.445	41.314977	21.004459	1235.7	743.0	1895.0
65	1202.280	41.268	8145.361	15.239	7.482	5.736	0.352	41.324800	22.040370	650.8	313.0	954.0
66	1026.280	28.939	6416.833	15.239	5.657	5.216	0.330	41.283735	22.028606	865.4	619.0	1031.0
67	1003.480	31.219	6521.808	15.239	8.288	5.146	0.327	41.314179	21.076668	903.4	685.0	1219.0
68	940.960	33.382	5314.701	15.239	8.925	4.951	0.319	41.323699	21.113441	947.5	685.0	1173.0
69	600.760	0.727	7872.813	121.914	0.155	3.783	0.266	41.324684	21.386316	597.0	593.0	605.0
70	1112.920	26.610	7411.981	15.239	4.615	5.476	0.341	41.276223	22.052764	864.3	621.0	980.0
71	97.320	29.574	1651.960	15.239	7.459	1.269	0.129	41.306684	21.097282	749.2	679.0	1005.0
72	582.640	1.569	10450.458	121.914	0.833	3.714	0.263	41.304126	21.499952	633.3	608.0	696.0
73	165.480	2.547	5448.305	91.436	0.571	1.745	0.159	41.301342	21.484798	623.7	609.0	653.0
74	3496.080	13.136	15531.778	24.383	5.300	10.883	0.539	41.310951	21.324729	708.2	593.0	1443.0
75	1698.560	45.270	10547.027	15.239	10.544	7.057	0.404	41.295658	21.030838	1244.4	714.0	1914.0
76	1093.960	7.338	8835.900	60.957	2.989	5.420	0.338	41.277095	21.504284	673.2	620.0	883.0
77	1349.600	37.654	10319.819	15.239	11.777	6.148	0.368	41.281840	21.056376	1132.4	679.0	1898.0
78	637.440	27.850	5498.721	15.239	7.992	3.920	0.273	41.295334	21.106595	806.5	660.0	1099.0
79	300.040	1.761	6525.584	121.914	1.015	2.494	0.202	41.294178	21.516929	645.6	620.0	686.0
80	1303.280	28.029	11170.458	15.239	7.694	6.020	0.363	41.293830	21.586421	953.0	638.0	1535.0
81	3207.880	52.676	10663.717	15.239	11.987	10.335	0.521	41.321398	21.866322	845.6	263.0	1552.0

Подслив	Површина (ha)	Нагиб терена (%)	Дужина слива (m)	SII	Нагиб водотока (%)	Ширина водотока (m)	Дубина водотока (m)	Географска ширина Lat	Географска дужина Long_	Просечна надморска висина (мНВ)	Минимална надморска висина (мНВ)	Максимална надморска висина (мНВ)
82	401.960	24.855	5193.869	15.239	7.016	2.972	0.227	41.283032	21.108997	759.6	660.0	1024.0
83	5226.640	35.145	17412.733	15.239	4.747	13.852	0.633	41.337038	21.189864	923.7	637.0	1527.0
84	2484.880	24.126	11183.717	15.239	4.799	8.867	0.470	41.299487	21.150625	869.1	637.0	1256.0
85	400.720	0.865	6604.529	121.914	0.336	2.967	0.227	41.290568	21.448327	605.5	596.0	619.0
86	1823.720	7.083	8848.204	60.957	2.335	7.365	0.415	41.271443	21.468986	634.8	596.0	802.0
87	2296.880	44.383	8686.194	15.239	13.144	8.458	0.455	41.254722	21.880295	792.6	269.0	1422.0
88	3874.760	1.069	14614.916	121.914	0.164	11.575	0.561	41.301330	21.411754	600.6	591.0	653.0
89	653.080	12.818	6847.838	24.383	3.080	3.977	0.275	41.260334	21.431680	642.5	591.0	803.0
90	1616.920	37.307	8777.788	15.239	12.325	6.852	0.396	41.290737	21.672196	955.3	573.0	1651.0
91	1209.400	34.721	8165.240	15.239	11.429	5.756	0.352	41.293601	21.701374	931.9	573.0	1507.0
92	3213.880	19.757	12092.245	18.287	6.709	10.347	0.521	41.265856	21.560653	835.2	638.0	1469.0
93	1478.960	28.268	11425.139	15.239	6.748	6.495	0.382	41.300081	21.283324	1075.1	608.0	1415.0
94	3691.800	49.902	11412.001	15.239	10.420	11.244	0.551	41.282531	21.827820	669.2	260.0	1453.0
95	2028.680	38.133	9859.575	15.239	13.019	7.851	0.433	41.255648	21.059223	1197.1	682.0	1994.0
96	1068.360	44.974	6066.417	15.239	15.540	5.343	0.335	41.239962	21.825995	813.9	315.0	1262.0
97	1404.040	35.921	9434.478	15.239	10.629	6.295	0.374	41.284196	21.726680	892.9	494.0	1499.0
98	2118.160	33.155	9816.488	15.239	9.464	8.057	0.441	41.273762	21.754696	969.8	494.0	1473.0
99	4193.600	34.935	14968.814	15.239	7.144	12.138	0.579	41.277568	21.642023	943.1	515.0	1660.0
100	281.160	11.954	3893.747	60.957	4.974	2.399	0.197	41.258592	21.693001	597.6	515.0	707.0
101	1489.000	44.779	7286.661	15.239	9.049	6.521	0.383	41.252671	21.982734	656.1	263.0	1262.0
102	1950.560	24.832	18828.490	15.239	4.559	7.668	0.427	41.245931	21.319988	865.3	591.0	1492.0
103	1776.280	41.576	7738.255	15.239	8.862	7.249	0.411	41.239579	22.023397	757.1	344.0	1112.0
104	1284.320	21.290	8863.351	15.239	4.623	5.968	0.361	41.269683	21.204715	727.0	624.0	1045.0
105	4271.240	33.660	19389.545	15.239	4.496	12.272	0.584	41.314553	21.239517	1011.3	625.0	1527.0
106	1947.640	28.896	7617.422	15.239	9.014	7.661	0.426	41.256859	21.115731	900.8	681.0	1369.0
107	2456.040	11.366	9633.646	60.957	0.138	8.805	0.468	41.239362	21.343565	673.6	592.0	1286.0
108	12.400	22.805	673.848	15.239	17.157	0.369	0.056	41.240026	21.219565	656.7	623.0	753.0
109	1800.040	3.283	10411.169	91.436	0.126	7.307	0.413	41.260880	21.388120	599.4	588.0	786.0
110	91.400	1.033	2542.376	121.914	0.243	1.222	0.125	41.236851	21.392534	592.7	588.0	595.0
111	46.240	6.732	1422.254	60.957	0.891	0.812	0.095	41.235878	21.215633	634.9	623.0	745.0
112	2753.400	26.531	9840.042	15.239	5.713	9.430	0.490	41.240332	21.169459	880.1	625.0	1314.0
113	3392.440	46.314	10816.144	15.239	12.083	10.688	0.532	41.228112	21.917985	934.9	270.0	1586.0
114	3721.600	26.945	13328.347	15.239	2.570	11.299	0.552	41.247875	21.261964	791.4	607.0	1493.0
115	1327.800	41.259	7406.783	15.239	15.809	6.088	0.366	41.226269	21.068902	1307.9	749.0	1991.0
116	732.680	30.448	5067.595	15.239	4.207	4.261	0.288	41.239180	21.721947	614.0	401.0	1128.0
117	1400.920	20.508	10736.732	15.239	7.405	6.287	0.374	41.230708	21.681397	640.5	400.0	1195.0
118	341.560	15.673	3937.767	24.383	5.672	2.696	0.212	41.237768	21.420895	637.1	585.0	848.0
119	652.440	19.174	7650.925	18.287	4.540	3.975	0.275	41.220167	21.200684	708.1	623.0	971.0
120	2140.640	9.290	9635.900	60.957	3.459	8.108	0.443	41.237450	21.473056	649.7	587.0	923.0
121	2962.560	18.368	16740.652	18.287	5.241	9.853	0.504	41.206836	21.355655	792.9	586.0	1468.0
122	1088.440	54.388	7049.970	15.239	10.167	5.403	0.338	41.221488	21.990622	744.0	342.0	1354.0

Подслив	Површина (ha)	Нагиб терена (%)	Дужина слива (m)	SII	Нагиб водотока (%)	Ширина водотока (m)	Дубина водотока (m)	Географска ширина Lat	Географска дужина Long_	Просечна надморска висина (мНВ)	Минимална надморска висина (мНВ)	Максимална надморска висина (мНВ)
123	1075.680	34.435	9362.174	15.239	9.088	5.365	0.336	41.212736	21.258645	955.4	637.0	1488.0
124	1369.840	6.167	11623.595	60.957	2.792	6.203	0.370	41.221446	21.499836	645.9	586.0	911.0
125	498.160	5.200	4981.564	60.957	0.365	3.381	0.247	41.221993	21.430100	600.8	583.0	833.0
126	354.520	0.972	8045.118	121.914	0.405	2.757	0.216	41.209610	21.454101	593.7	583.0	618.0
127	3491.480	45.464	12859.352	15.239	5.667	10.874	0.538	41.228402	21.774286	677.5	313.0	1225.0
128	706.520	24.162	5958.843	15.239	6.974	4.169	0.284	41.215912	21.714944	533.9	362.0	840.0
129	28.680	29.538	1149.117	15.239	11.718	0.610	0.079	41.202665	21.730062	423.3	359.0	497.0
130	217.880	49.380	3013.503	15.239	18.227	2.058	0.178	41.198769	21.994097	729.5	459.0	1029.0
131	3653.800	35.889	11574.012	15.239	7.118	11.175	0.548	41.203101	21.109223	1119.0	749.0	1722.0
132	1532.920	46.349	9550.458	15.239	10.410	6.636	0.387	41.198175	21.935964	1105.0	570.0	1585.0
133	99.800	69.937	1496.812	9.144	46.003	1.288	0.130	41.202941	21.978297	788.5	513.0	1202.0
134	186.640	44.759	3374.335	15.239	14.509	1.876	0.167	41.191018	21.970729	785.7	571.0	1062.0
135	1300.040	43.123	10796.732	15.239	9.727	6.011	0.363	41.165976	22.015706	1018.1	519.0	1574.0
136	2797.800	44.503	12198.864	15.239	10.076	9.521	0.493	41.181047	22.040858	1071.6	461.0	1705.0
137	3768.120	27.476	9159.209	15.239	7.225	11.383	0.555	41.200836	21.846775	1055.3	756.0	1583.0
138	340.960	44.641	4798.600	15.239	11.978	2.693	0.212	41.175172	21.965367	849.7	601.0	1176.0
139	2108.920	41.893	9750.580	15.239	9.596	8.036	0.440	41.150600	21.994351	1092.0	601.0	1593.0
140	1113.720	30.016	9683.595	15.239	6.078	5.478	0.341	41.163725	21.824555	953.2	687.0	1278.0
141	2564.480	38.185	9790.580	15.239	9.310	9.036	0.476	41.165262	21.916808	1215.4	671.0	1821.0
142	2641.040	28.344	14408.225	15.239	6.798	9.197	0.482	41.178970	21.771684	786.7	359.0	1346.0
143	1195.960	30.475	13229.058	15.239	7.733	5.718	0.351	41.143378	21.836320	1077.9	689.0	1714.0
144	1966.640	35.683	13616.875	15.239	7.000	7.706	0.428	41.150188	21.873623	1247.3	757.0	1820.0
145	3542.160	7.555	19565.525	60.957	3.644	10.969	0.542	41.202745	21.517273	667.0	582.0	1314.0
146	3953.040	21.178	25698.805	15.239	3.180	11.715	0.566	41.214996	21.579088	856.0	583.0	1464.0
147	6751.320	31.214	19027.779	15.239	4.566	16.152	0.701	41.175488	21.164245	948.7	637.0	1647.0
148	1242.600	1.149	14146.560	121.914	0.202	5.850	0.356	41.190608	21.452248	588.8	578.0	608.0
149	2584.560	7.687	11241.463	60.957	1.452	9.079	0.477	41.186269	21.404814	612.4	581.0	787.0
150	3814.000	14.047	20069.789	24.383	4.124	11.466	0.558	41.174317	21.562210	752.1	584.0	1415.0
151	2363.480	12.633	14690.601	24.383	4.612	8.604	0.461	41.146731	21.547267	707.6	583.0	1264.0
152	3682.920	28.933	16614.032	15.239	4.701	11.228	0.550	41.163234	21.735657	662.2	361.0	1314.0
153	4279.960	20.524	15109.646	15.239	6.874	12.287	0.584	41.185417	21.663309	800.5	414.0	1463.0
154	12.640	42.457	651.127	15.239	11.269	0.373	0.057	41.138523	21.698391	448.4	411.0	536.0
155	39.040	15.264	1308.528	24.383	8.926	0.734	0.089	41.141554	21.265047	628.5	605.0	723.0
156	2470.320	29.714	11434.133	15.239	7.487	8.836	0.469	41.181549	21.270428	900.6	605.0	1468.0
157	3215.960	24.871	14871.657	15.239	4.318	10.351	0.521	41.145301	21.207630	822.0	607.0	1429.0
158	279.120	0.727	6473.280	121.914	0.208	2.388	0.196	41.151358	21.464911	584.7	580.0	594.0
159	211.200	0.623	3819.188	121.914	0.224	2.020	0.175	41.144557	21.468797	583.7	580.0	589.0
160	914.840	24.274	5458.133	15.239	10.808	4.869	0.315	41.134987	21.686384	633.0	412.0	1011.0
161	1021.360	36.728	7668.082	15.239	8.399	5.201	0.329	41.142487	21.649123	746.1	421.0	1065.0
162	1124.920	34.668	6645.950	15.239	12.016	5.511	0.342	41.117692	21.234385	1010.9	607.0	1429.0
163	1482.600	5.465	8646.194	60.957	5.291	6.504	0.382	41.146250	21.380788	615.2	580.0	1036.0

Подслив	Површина (ha)	Нагиб терена (%)	Дужина слива (m)	SII	Нагиб водотока (%)	Ширина водотока (m)	Дубина водотока (m)	Географска ширина Lat	Географска дужина Long_	Просечна надморска висина (мНВ)	Минимална надморска висина (мНВ)	Максимална надморска висина (мНВ)
164	1097.720	36.995	7886.539	15.239	11.491	5.431	0.339	41.124306	21.131834	1104.1	730.0	1647.0
165	948.720	31.957	9986.316	15.239	6.463	4.976	0.320	41.132207	21.741746	695.2	411.0	1059.0
166	2838.320	40.268	13668.103	15.239	8.384	9.603	0.496	41.130147	21.942881	1254.4	668.0	1821.0
167	247.680	1.124	3602.620	121.914	0.141	2.223	0.187	41.122970	21.401020	581.0	572.0	586.0
168	1656.080	17.060	14527.271	18.287	5.123	6.951	0.400	41.166351	21.363639	777.7	579.0	1326.0
169	1214.120	12.079	10570.753	24.383	4.711	5.770	0.353	41.129968	21.359717	661.1	580.0	1089.0
170	147.240	1.955	4435.635	121.914	0.123	1.627	0.152	41.132258	21.426429	580.5	575.0	584.0
171	241.480	0.845	4175.046	121.914	0.090	2.189	0.185	41.126684	21.420653	580.1	578.0	583.0
172	1118.880	39.116	8253.768	15.239	10.207	5.494	0.342	41.109165	21.879300	1323.3	882.0	1750.0
173	3719.840	33.691	16262.195	15.239	5.368	11.295	0.552	41.112714	21.805085	989.8	510.0	1418.0
174	1420.120	28.239	8126.539	15.239	8.430	6.338	0.376	41.115558	21.175383	912.8	728.0	1432.0
175	4901.760	22.832	16393.444	15.239	4.444	13.329	0.617	41.116058	21.617162	846.6	441.0	1322.0
176	1366.120	25.547	9877.199	15.239	4.472	6.193	0.370	41.110595	21.690731	658.0	415.0	925.0
177	2251.760	10.353	15457.342	60.957	3.005	8.358	0.452	41.123017	21.547059	682.1	578.0	1051.0
178	2024.920	6.878	10359.575	60.957	4.377	7.842	0.433	41.109408	21.505685	636.6	576.0	1074.0
179	178.000	2.569	9751.636	91.436	0.145	1.823	0.164	41.115546	21.416772	581.5	575.0	590.0
180	1362.200	0.810	11622.763	121.914	0.056	6.182	0.370	41.137392	21.441084	581.3	577.0	586.0
181	159.000	9.059	4011.493	60.957	3.073	1.704	0.156	41.090337	21.168506	791.1	741.0	917.0
182	1612.080	41.100	10128.326	15.239	9.189	6.839	0.395	41.089655	21.876387	1331.7	883.0	1820.0
183	720.200	31.251	5119.432	15.239	13.701	4.218	0.286	41.099054	21.142880	997.6	768.0	1470.0
184	1196.920	30.926	7503.402	15.239	12.558	5.720	0.351	41.080281	21.122531	1141.7	787.0	1862.0
185	1110.320	31.457	6263.107	15.239	8.208	5.468	0.341	41.086919	21.692455	743.4	437.0	1127.0
186	153.840	1.186	4913.036	121.914	0.103	1.670	0.154	41.098356	21.443434	578.6	574.0	581.0
187	1783.360	8.273	12086.682	60.957	4.296	7.267	0.412	41.088034	21.493654	653.6	575.0	1100.0
188	3237.800	25.137	14448.936	15.239	12.826	10.393	0.522	41.070480	21.201482	1106.7	741.0	2591.0
189	1360.000	32.063	7895.656	15.239	11.848	6.176	0.369	41.071123	21.637824	984.1	448.0	1403.0
190	2573.880	12.900	22209.201	24.383	2.748	9.056	0.477	41.138624	21.326437	687.6	577.0	1258.0
191	7071.720	18.964	25818.805	18.287	2.931	16.608	0.714	41.106193	21.308385	766.4	577.0	1347.0
192	887.520	3.200	9739.331	91.436	1.493	4.781	0.311	41.071817	21.476221	596.2	574.0	739.0
193	1176.120	24.392	5875.290	15.239	10.622	5.661	0.348	41.086029	21.570529	910.1	676.0	1307.0
194	4634.280	31.088	27666.623	15.239	4.338	12.888	0.603	41.078370	21.816917	1107.9	511.0	1810.0
195	1562.240	0.705	12034.600	121.914	0.079	6.712	0.390	41.090730	21.418809	578.5	575.0	589.0
196	1264.320	30.942	6589.260	15.239	11.064	5.912	0.359	41.058495	21.587003	1041.3	679.0	1433.0
197	1006.800	17.297	7948.082	18.287	6.282	5.157	0.327	41.067914	21.539667	698.4	541.0	1099.0
198	1137.840	5.033	11804.428	60.957	2.119	5.549	0.344	41.046339	21.371701	598.7	575.0	826.0
199	1840.520	7.973	13478.276	60.957	3.054	7.405	0.417	41.060649	21.365412	622.1	576.0	988.0
200	10.640	27.843	667.696	15.239	10.580	0.336	0.053	41.053695	21.744032	814.1	780.0	885.0
201	1548.880	17.514	6609.626	18.287	7.794	6.677	0.389	41.041350	21.538075	723.8	528.0	1225.0
202	307.880	0.853	4434.457	121.914	0.133	2.533	0.204	41.047250	21.423504	576.6	573.0	580.0
203	657.120	1.740	9182.052	121.914	0.659	3.992	0.276	41.059859	21.460376	584.0	573.0	666.0
204	3464.160	35.674	20109.789	15.239	5.390	10.823	0.537	41.051595	21.821108	1251.0	781.0	1865.0

Подслив	Површина (ha)	Нагиб терена (%)	Дужина слива (m)	SII	Нагиб водотока (%)	Ширина водотока (m)	Дубина водотока (m)	Географска ширина Lat	Географска дужина Long_	Просечна надморска висина (мНВ)	Минимална надморска висина (мНВ)	Максимална надморска висина (мНВ)
205	2353.520	40.477	13906.682	15.239	12.629	8.583	0.460	41.036389	21.173197	1476.0	768.0	2598.0
206	4708.520	27.251	14191.312	15.239	7.816	13.011	0.607	41.054876	21.256040	1035.7	660.0	2456.0
207	382.120	24.473	4275.046	15.239	11.131	2.883	0.222	41.037545	21.748985	952.1	794.0	1268.0
208	1013.880	40.008	6144.285	15.239	15.322	5.178	0.328	41.008308	21.759622	1310.6	903.0	1844.0
209	3357.520	43.983	15938.297	15.239	8.528	10.622	0.530	41.026604	21.809304	1303.1	792.0	2165.0
210	2237.560	39.823	10146.072	15.239	8.276	8.326	0.451	41.051084	21.672071	774.7	446.0	1289.0
211	2952.440	30.106	12389.991	15.239	3.638	9.833	0.504	41.043028	21.716910	886.2	499.0	1435.0
212	1649.480	3.627	15632.367	91.436	0.699	6.934	0.399	41.034252	21.386305	596.4	574.0	895.0
213	2641.760	19.720	20791.921	18.287	6.215	9.199	0.482	41.016087	21.331952	827.8	574.0	1869.0
214	3815.760	44.458	15912.611	15.239	10.387	11.469	0.558	41.025183	21.140154	1518.8	787.0	2439.0
215	1672.000	46.426	9904.062	15.239	13.389	6.991	0.401	41.001831	21.791468	1575.9	903.0	2352.0
216	1294.400	28.881	8396.610	15.239	10.262	5.996	0.362	41.031109	21.639684	1041.6	539.0	1403.0
217	1241.440	38.644	7872.691	15.239	14.622	5.847	0.356	41.005119	21.706944	1054.4	499.0	1651.0
218	1614.640	22.267	15135.210	15.239	8.760	6.846	0.396	40.999826	21.333016	915.5	578.0	1904.0
219	411.960	0.730	3632.082	121.914	0.093	3.016	0.229	41.013152	21.446995	574.8	572.0	577.0
220	1551.080	38.368	10501.585	15.239	11.104	6.683	0.389	41.018669	21.258227	1145.1	667.0	2172.0
221	1030.760	0.728	8302.519	121.914	0.180	5.230	0.331	41.002127	21.419773	577.6	572.0	589.0
222	1496.000	49.028	8017.788	15.239	16.903	6.540	0.384	40.992022	21.209279	1927.0	1062.0	2598.0
223	24.600	1.170	1350.538	121.914	0.101	0.556	0.074	40.999594	21.452002	573.5	572.0	575.0
224	1885.080	28.980	16286.459	15.239	9.588	7.513	0.421	40.985362	21.332684	1021.1	578.0	2140.0
225	129.160	0.827	2315.513	121.914	0.141	1.504	0.144	40.993443	21.454379	574.1	572.0	576.0
226	128.240	4.147	8476.610	91.436	0.042	1.498	0.144	41.025508	21.457531	575.7	572.0	579.0
227	2376.960	3.954	15666.459	91.436	0.633	8.634	0.462	41.035284	21.479513	594.4	572.0	691.0
228	931.320	38.862	4623.574	15.239	13.751	4.921	0.317	40.996953	21.664673	789.4	538.0	1173.0
229	10.560	6.374	1394.680	60.957	0.408	0.335	0.053	40.983847	21.479499	573.5	571.0	577.0
230	668.720	0.916	10255.555	121.914	0.042	4.034	0.278	41.000888	21.463049	574.4	571.0	578.0
231	24.080	2.016	955.391	91.436	0.567	0.549	0.074	40.974895	21.483107	574.3	571.0	578.0
232	2015.280	6.721	11355.311	60.957	4.285	7.820	0.432	41.010263	21.510999	630.5	571.0	1056.0
233	0.280	6.283	52.426	60.957	1.989	0.038	0.012	40.976499	21.486020	573.0	571.0	576.0
234	1224.360	15.617	12682.418	24.383	3.710	5.799	0.354	41.005809	21.549943	746.1	571.0	1052.0
235	28.040	1.872	1489.949	121.914	0.336	0.602	0.078	40.973760	21.487360	574.0	570.0	577.0
236	2.880	6.143	379.411	60.957	0.089	0.154	0.031	40.972012	21.492838	572.9	570.0	576.0
237	1001.840	16.052	8388.549	18.287	9.899	5.141	0.327	40.959747	21.364923	729.6	581.0	1416.0
238	1079.360	44.957	6702.275	15.239	16.560	5.376	0.337	40.982150	21.751209	1375.2	872.0	1982.0
239	2159.680	7.578	18170.012	60.957	4.587	8.151	0.444	40.978187	21.420066	650.3	572.0	1408.0
240	1994.560	43.472	11495.900	15.239	11.009	7.771	0.430	40.971405	21.704846	1051.7	557.0	1873.0
241	2519.920	43.797	9453.179	15.239	14.329	8.942	0.473	40.971574	21.241421	1751.1	1062.0	2426.0
242	1240.320	8.398	10475.433	60.957	2.980	5.844	0.356	40.985349	21.537875	663.5	571.0	897.0
243	2122.000	35.026	8866.072	15.239	14.811	8.066	0.441	40.967490	21.659533	919.8	555.0	1869.0
244	2791.120	25.706	13321.484	15.239	6.131	9.507	0.492	41.013358	21.606417	951.6	568.0	1434.0
245	8.320	16.567	542.843	18.287	8.164	0.290	0.048	40.964524	21.628382	578.0	564.0	615.0



Подслив	Површина (ha)	Нагиб терена (%)	Дужина слива (m)	SII	Нагиб водотока (%)	Ширина водотока (m)	Дубина водотока (m)	Географска ширина Lat	Географска дужина Long_	Просечна надморска висина (mНВ)	Минимална надморска висина (mНВ)	Максимална надморска висина (mНВ)
246	3120.520	46.068	9730.925	15.239	15.881	10.165	0.515	40.951215	21.768333	1728.8	872.0	2524.0
247	2403.880	38.095	17330.256	15.239	10.158	8.692	0.464	40.960818	21.313635	1268.2	581.0	2350.0
248	1463.600	33.135	7869.260	15.239	13.618	6.454	0.380	40.938526	21.653521	978.8	566.0	1640.0
249	883.800	1.649	6901.930	121.914	0.576	4.769	0.311	40.951948	21.482268	584.1	571.0	613.0
250	4.920	3.235	686.985	91.436	0.184	0.212	0.039	40.950655	21.461049	578.9	576.0	580.0
251	1468.080	2.822	14399.230	91.436	3.841	6.466	0.381	40.937483	21.404807	599.8	577.0	1128.0
252	1919.360	6.056	10170.702	60.957	2.554	7.594	0.424	40.959869	21.525148	603.5	568.0	828.0
253	18.240	5.902	1118.112	60.957	1.976	0.465	0.066	40.950466	21.552238	578.6	568.0	590.0
254	4898.160	17.619	15944.571	18.287	2.828	13.323	0.617	40.949656	21.591840	701.8	565.0	1016.0
255	432.800	3.779	6172.935	91.436	1.868	3.107	0.234	40.932908	21.548740	597.0	568.0	684.0
256	4198.760	26.232	25156.551	15.239	6.359	12.147	0.580	40.941633	21.353957	985.4	573.0	2175.0
257	1018.160	11.871	11063.717	60.957	5.570	5.191	0.329	40.917792	21.377665	671.2	576.0	1316.0
258	1.320	9.753	208.284	60.957	5.281	0.096	0.023	40.923071	21.428635	586.9	581.0	592.0
259	1471.400	4.418	14026.215	91.436	0.261	6.475	0.381	40.912869	21.433053	589.6	577.0	619.0
260	818.440	4.796	7189.260	91.436	0.389	4.554	0.301	40.926067	21.472655	589.1	578.0	623.0
261	1519.880	7.876	8974.945	60.957	0.323	6.602	0.386	40.888449	21.462991	596.3	574.0	626.0
262	1497.400	41.846	9200.387	15.239	16.376	6.543	0.384	40.903920	21.300841	1261.9	666.0	2180.0
263	1144.920	9.051	10853.768	60.957	3.354	5.570	0.345	40.902077	21.380593	625.2	582.0	978.0
264	2352.360	18.841	20456.652	18.287	4.875	8.580	0.460	40.907682	21.624365	922.8	568.0	1566.0
265	1607.360	24.138	19467.170	15.239	6.555	6.827	0.395	40.880505	21.354714	822.9	581.0	1879.0
266	1904.000	35.004	8294.823	15.239	11.851	7.558	0.422	40.918099	21.700226	1308.2	883.0	1871.0
267	2019.000	43.958	11153.646	15.239	13.645	7.828	0.433	40.882454	21.292240	1309.6	666.0	2309.0
268	2203.320	10.525	14609.646	60.957	1.836	8.250	0.448	40.894263	21.570623	684.4	577.0	847.0
269	5581.240	35.033	17441.484	15.239	9.357	14.409	0.650	40.897409	21.763439	1620.8	881.0	2523.0
270	3853.360	9.661	13283.372	60.957	1.156	11.537	0.560	40.896473	21.516056	609.2	569.0	731.0
271	655.960	9.369	6308.305	60.957	1.268	3.988	0.276	40.858193	21.474961	611.5	584.0	675.0
272	4648.040	25.090	24425.058	15.239	6.424	12.911	0.604	40.864168	21.363756	904.7	581.0	2158.0
273	1650.000	10.518	11736.732	60.957	1.465	6.936	0.399	40.865106	21.539711	646.7	585.0	762.0
274	1835.480	10.369	10200.509	60.957	5.382	7.393	0.416	40.831219	21.461944	643.6	592.0	1145.0
275	1517.440	25.272	11440.753	15.239	8.924	6.596	0.386	40.816524	21.395971	911.0	597.0	1629.0
276	1164.520	43.003	8337.544	15.239	16.216	5.627	0.347	40.830749	21.292282	1342.0	805.0	2162.0
277	2664.560	30.056	17346.215	15.239	5.944	9.246	0.483	40.836218	21.373894	869.6	592.0	1663.0
278	9587.640	20.734	30236.084	15.239	4.557	19.935	0.807	40.854954	21.634555	928.2	588.0	1975.0
279	435.320	11.191	3819.066	60.957	1.938	3.118	0.234	40.827815	21.491829	624.5	588.0	671.0
280	1123.120	10.298	14043.839	60.957	1.559	5.506	0.342	40.821235	21.565821	660.0	593.0	824.0
281	182.320	6.448	3400.488	60.957	0.412	1.850	0.165	40.823829	21.444680	607.6	597.0	618.0
282	86.320	8.298	2587.939	60.957	0.811	1.181	0.123	40.816967	21.508969	606.8	591.0	652.0
283	1880.960	40.895	7900.265	15.239	15.898	7.503	0.420	40.806609	21.299053	1311.9	805.0	2091.0
284	1273.200	15.205	8305.950	24.383	5.225	5.936	0.360	40.801453	21.419245	697.0	604.0	1201.0
285	2262.640	15.431	16769.180	24.383	4.419	8.382	0.453	40.811390	21.621162	811.4	621.0	1391.0
286	1024.400	8.647	8141.341	60.957	0.381	5.210	0.330	40.800899	21.477426	616.2	593.0	668.0

Подслив	Површина (ha)	Нагиб терена (%)	Дужина слива (m)	SII	Нагиб водотока (%)	Ширина водотока (m)	Дубина водотока (m)	Географска ширина Lat	Географска дужина Long_	Просечна надморска висина (мНВ)	Минимална надморска висина (мНВ)	Максимална надморска висина (мНВ)
287	1270.000	8.820	8617.788	60.957	0.615	5.928	0.359	40.798981	21.525644	627.0	597.0	694.0
288	11.680	7.987	566.274	60.957	1.943	0.356	0.055	40.797127	21.535197	618.4	612.0	628.0
289	94.040	7.811	1775.391	60.957	1.633	1.243	0.127	40.796811	21.543264	624.0	611.0	652.0
290	1290.560	13.179	12354.600	24.383	2.210	5.985	0.362	40.755032	21.532285	710.2	610.0	896.0
291	1181.360	9.417	12957.687	60.957	1.829	5.676	0.349	40.762964	21.490828	664.9	606.0	847.0
292	707.760	9.464	10822.052	60.957	3.474	4.174	0.284	40.794332	21.440667	638.5	603.0	984.0
293	4443.520	17.417	19646.703	18.287	3.726	12.567	0.593	40.790200	21.636089	862.4	618.0	1355.0
294	4922.960	39.852	17177.443	15.239	6.730	13.364	0.618	40.774710	21.341317	1111.8	623.0	1907.0
295	1556.200	21.303	11088.204	15.239	7.855	6.696	0.390	40.752761	21.423129	839.4	613.0	1507.0
296	1690.520	12.848	10897.321	24.383	2.569	7.037	0.403	40.758496	21.555311	705.8	615.0	912.0
297	295.360	8.001	3977.056	60.957	0.855	2.471	0.200	40.768321	21.463829	629.0	612.0	660.0
298	1351.280	35.906	10179.087	15.239	9.274	6.152	0.368	40.756096	21.386966	1035.6	623.0	1630.0
299	146.360	8.553	4142.620	60.957	1.400	1.621	0.151	40.756267	21.487424	653.2	619.0	687.0
300	2853.160	18.427	12733.768	18.287	4.249	9.634	0.497	40.750080	21.621904	834.2	647.0	1204.0
301	1677.800	19.295	12084.550	18.287	2.789	7.005	0.402	40.731365	21.574674	819.7	616.0	1002.0
302	1674.560	22.155	12382.540	15.239	6.105	6.997	0.401	40.733246	21.437155	806.0	621.0	1384.0
303	922.520	13.266	9112.813	24.383	4.872	4.893	0.316	40.729574	21.465278	727.9	633.0	1079.0
304	3242.640	36.084	9745.240	15.239	9.502	10.402	0.523	40.715273	21.364956	1254.4	773.0	1753.0
305	1093.000	38.611	8047.250	15.239	10.886	5.417	0.338	40.698658	21.440969	1076.0	719.0	1602.0
306	1091.920	37.447	7906.539	15.239	12.066	5.414	0.338	40.688030	21.396669	1330.3	770.0	1877.0
307	2437.680	22.941	16773.078	15.239	6.159	8.765	0.466	40.699969	21.490260	952.6	630.0	1674.0
308	3163.520	20.676	23429.373	15.239	3.995	10.249	0.518	40.712876	21.518300	878.4	606.0	1591.0
309	4182.640	39.828	14979.646	15.239	7.664	12.119	0.579	40.662523	21.435355	1357.4	724.0	2119.0

ПРИЛОГ 4. Карактеристике HRU у сливу р. Црна

Под-Слив	Површина (ha)	Коришћење земљишта	Тип земљишта	Нагиб терена (%)	Доминантан нагиб терена (%)	Комбинација параметара
1	2875.52	FRSD	DystricCambisolsm	>30	36.20927155	1_FRSD_DystricCambisolsm_>30
2	1257.2	FRSD	DystricCambisolsm	>30	28.49696447	2_FRSD_DystricCambisolsm_>30
3	4164.36	AGRC	RendzicLeptosolsm	0-5	18.83549754	3_AGRC_RendzicLeptosolsm_0-5
4	3859.52	AGRC	DystricCambisolsm	0-5	19.03958626	4_AGRC_DystricCambisolsm_0-5
5	25	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	1.683083528	5_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
6	1993.44	AGRC	DystricCambisolsm	0-5	10.23813898	6_AGRC_DystricCambisolsm_0-5
7	1699.08	OAK	RendzicLeptosolsm	10-30	27.32262698	7_OAK_RendzicLeptosolsm_10-30
8	1760	AGRC	DystricCambisolsm	0-5	16.87036212	8_AGRC_DystricCambisolsm_0-5
9	536.92	AGRC	RendzicLeptosolsm	0-5	16.72513312	9_AGRC_RendzicLeptosolsm_0-5
10	1420.72	FRSD	DystricCambisolsm	10-30	20.83567202	10_FRSD_DystricCambisolsm_10-30
11	5013.2	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	20.99444233	11_RNGB_DystricCambisolsm_10-30
12	933.52	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	6.49968937	12_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
13	818.28	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	2.506487197	13_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
14	1189.32	RNGB	CalcaricFluvisolsm	>30	28.55960999	14_RNGB_CalcaricFluvisolsm_>30
15	2757.88	AGRL	DystricCambisolsm	0-5	7.037894848	15_AGRL_DystricCambisolsm_0-5
16	3096.28	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	10.909067	16_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
17	1425.84	FRSD	CalcaricRegosolsm	10-30	26.02587102	17_FRSD_CalcaricRegosolsm_10-30
18	11024.2	FRSD	RendzicLeptosolsm	>30	41.31535959	18_FRSD_RendzicLeptosolsm_>30
19	1777.88	AGRC	DystricCambisolsm	0-5	9.745198055	19_AGRC_DystricCambisolsm_0-5
20	903.4	AGRL	MollicGleysolsm	0-5	0.766097307	20_AGRL_MollicGleysolsm_0-5
21	1542.24	FRSD	RendzicLeptosolsm	10-30	24.3845444	21_FRSD_RendzicLeptosolsm_10-30
22	3309.72	FRSD	RendzicLeptosolsm	>30	33.77036339	22_FRSD_RendzicLeptosolsm_>30
23	1463.8	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	25.96555639	23_RNGB_DystricCambisolsm_10-30
24	2035.36	FRSD	DystricCambisolsm	>30	41.08595575	24_FRSD_DystricCambisolsm_>30
25	1759.84	FRSD	DystricCambisolsm	>30	40.7685314	25_FRSD_DystricCambisolsm_>30
26	2214.68	FRSD	DystricCambisolsm	10-30	29.40489715	26_FRSD_DystricCambisolsm_10-30
27	1888.48	PAST	CalcaricRegosolsm	10-30	24.60473823	27_PAST_CalcaricRegosolsm_10-30
28	654.32	AGRL	MollicGleysolsm	0-5	0.595308753	28_AGRL_MollicGleysolsm_0-5
29	2816.84	AGRC	DystricCambisolsm	0-5	17.376156	29_AGRC_DystricCambisolsm_0-5
30	2918.04	FRSD	DystricCambisolsm	>30	44.54941968	30_FRSD_DystricCambisolsm_>30
31	4415.28	AGRC	MollicGleysolsm	0-5	4.770483856	31_AGRC_MollicGleysolsm_0-5
32	1290.48	AGRL	DystricCambisolsm	5-10	15.50851501	32_AGRL_DystricCambisolsm_5-10
33	2648.6	FRSD	DystricCambisolsm	10-30	29.22874722	33_FRSD_DystricCambisolsm_10-30
34	879.84	AGRC	DystricCambisolsm	0-5	6.935949096	34_AGRC_DystricCambisolsm_0-5
35	665.68	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	0.903327434	35_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
36	1193.32	FRSD	DystricCambisolsm	10-30	33.97466075	36_FRSD_DystricCambisolsm_10-30
37	3069.64	FRSD	DystricCambisolsm	10-30	29.19665781	37_FRSD_DystricCambisolsm_10-30
38	1873.8	AGRC	MollicGleysolsm	0-5	4.162502076	38_AGRC_MollicGleysolsm_0-5
39	1020.96	AGRL	MollicGleysolsm	0-5	1.906601113	39_AGRL_MollicGleysolsm_0-5
40	2219.2	RNGB	RendzicLeptosolsm	10-30	22.84541411	40_RNGB_RendzicLeptosolsm_10-30
41	1047.84	RNGE	RendzicLeptosolsm	10-30	22.05508817	41_RNGE_RendzicLeptosolsm_10-30
42	1455.4	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	29.57932638	42_RNGB_DystricCambisolsm_10-30
43	918.56	AGRL	DystricCambisolsm	0-5	11.20853301	43_AGRL_DystricCambisolsm_0-5
44	614.68	RNGE	CalcaricRegosolsm	>30	35.40542254	44_RNGE_CalcaricRegosolsm_>30
45	816.52	AGRL	MollicGleysolsm	0-5	0.847777369	45_AGRL_MollicGleysolsm_0-5
46	1225.68	AGRL	MollicGleysolsm	0-5	0.601507755	46_AGRL_MollicGleysolsm_0-5
47	17.76	AGRC	MollicGleysolsm	0-5	0.718882342	47_AGRC_MollicGleysolsm_0-5
48	1959.76	AGRC	DystricCambisolsm	0-5	14.13830684	48_AGRC_DystricCambisolsm_0-5
49	228.24	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	0.976103357	49_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
50	1952.52	RNGB	RendzicLeptosolsm	10-30	27.64041778	50_RNGB_RendzicLeptosolsm_10-30
51	1215.44	FRSD	RendzicLeptosolsm	>30	35.58574308	51_FRSD_RendzicLeptosolsm_>30
52	1948.12	FRSD	RendzicLeptosolsm	>30	48.77485246	52_FRSD_RendzicLeptosolsm_>30
53	639.84	AGRC	DystricCambisolsm	0-5	14.87037887	53_AGRC_DystricCambisolsm_0-5
54	1090.4	FRSD	DystricCambisolsm	>30	35.13174884	54_FRSD_DystricCambisolsm_>30
55	429.72	URLD	MollicGleysolsm	0-5	4.485294058	55_URLD_MollicGleysolsm_0-5
56	1065.48	FRSD	DystricCambisolsm	>30	36.4621606	56_FRSD_DystricCambisolsm_>30
57	1609.36	PAST	DystricCambisolsm	0-5	21.04108838	57_PAST_DystricCambisolsm_0-5
58	2654.64	AGRC	MollicGleysolsm	0-5	2.450146941	58_AGRC_MollicGleysolsm_0-5
59	903.4	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	10.25170709	59_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
60	65.24	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	0.978801834	60_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
61	512.44	FRSD	RendzicLeptosolsm	10-30	27.93418608	61_FRSD_RendzicLeptosolsm_10-30
62	466.44	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	1.495143391	62_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
63	1125.76	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	3.698233661	63_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
64	2173.56	FRSD	DystricCambisolsm	>30	41.63200235	64_FRSD_DystricCambisolsm_>30
65	1202.28	FRSD	DystricCambisolsm	>30	41.26817167	65_FRSD_DystricCambisolsm_>30
66	1026.28	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	28.93902284	66_RNGB_DystricCambisolsm_10-30

Под-Слив	Површина (ha)	Коришћење земљишта	Тип земљишта	Нагиб терена (%)	Доминантан нагиб терена (%)	Комбинација параметара
67	1003.48	FRSD	DystricCambisolsm	10-30	31.21877699	67_FRSD_DystricCambisolsm_10-30
68	940.96	FRSD	RendzicLeptosolsm	10-30	33.38171186	68_FRSD_RendzicLeptosolsm_10-30
69	600.76	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	0.727499571	69_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
70	1112.92	FRSD	DystricCambisolsm	>30	26.60950215	70_FRSD_DystricCambisolsm_>30
71	97.32	AGRL	DystricCambisolsm	10-30	29.57407977	71_AGRL_DystricCambisolsm_10-30
72	582.64	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	1.568624857	72_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
73	165.48	AGRL	MollicGleysolsm	0-5	2.54733295	73_AGRL_MollicGleysolsm_0-5
74	3496.08	AGRC	DystricCambisolsm	0-5	13.13582271	74_AGRC_DystricCambisolsm_0-5
75	1698.56	FRSD	DystricCambisolsm	>30	45.27017261	75_FRSD_DystricCambisolsm_>30
76	1093.96	AGRL	DystricCambisolsm	0-5	7.338162297	76_AGRL_DystricCambisolsm_0-5
77	1349.6	FRSD	DystricCambisolsm	>30	37.65441255	77_FRSD_DystricCambisolsm_>30
78	637.44	FRSD	RendzicLeptosolsm	>30	27.85044833	78_FRSD_RendzicLeptosolsm_>30
79	300.04	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	1.76095294	79_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
80	1303.28	FRSD	DystricCambisolsm	10-30	28.02901566	80_FRSD_DystricCambisolsm_10-30
81	3207.88	FRSD	DystricCambisolsm	>30	52.67616606	81_FRSD_DystricCambisolsm_>30
82	401.96	FRSD	RendzicLeptosolsm	>30	24.85471039	82_FRSD_RendzicLeptosolsm_>30
83	5226.64	FRSD	DystricCambisolsm	>30	35.14471295	83_FRSD_DystricCambisolsm_>30
84	2484.88	FRSD	RendzicLeptosolsm	10-30	24.12642094	84_FRSD_RendzicLeptosolsm_10-30
85	400.72	AGRC	MollicGleysolsm	0-5	0.86520644	85_AGRC_MollicGleysolsm_0-5
86	1823.72	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	7.082935034	86_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
87	2296.88	FRSD	DystricCambisolsm	>30	44.38282633	87_FRSD_DystricCambisolsm_>30
88	3874.76	AGRC	MollicGleysolsm	0-5	1.068522511	88_AGRC_MollicGleysolsm_0-5
89	653.08	AGRC	CalcaricFluvisolsm	10-30	12.81761307	89_AGRC_CalcaricFluvisolsm_10-30
90	1616.92	RNGB	DystricCambisolsm	>30	37.30701226	90_RNGB_DystricCambisolsm_>30
91	1209.4	RNGE	DystricCambisolsm	>30	34.7209595	91_RNGE_DystricCambisolsm_>30
92	3213.88	PAST	DystricCambisolsm	10-30	19.75687811	92_PAST_DystricCambisolsm_10-30
93	1478.96	FRSD	DystricCambisolsm	10-30	28.26802693	93_FRSD_DystricCambisolsm_10-30
94	3691.8	RNGB	DystricCambisolsm	>30	49.90228691	94_RNGB_DystricCambisolsm_>30
95	2028.68	FRSD	DystricCambisolsm	>30	38.13330808	95_FRSD_DystricCambisolsm_>30
96	1068.36	FRSD	DystricCambisolsm	>30	44.97388618	96_FRSD_DystricCambisolsm_>30
97	1404.04	RNGE	DystricCambisolsm	10-30	35.9210976	97_RNGE_DystricCambisolsm_10-30
98	2118.16	RNGB	RendzicLeptosolsm	>30	33.15471311	98_RNGB_RendzicLeptosolsm_>30
99	4193.6	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	34.93473971	99_RNGB_DystricCambisolsm_10-30
100	281.16	AGRL	DystricCambisolsm	10-30	11.95361679	100_AGRL_DystricCambisolsm_10-30
101	1489	FRSD	RendzicLeptosolsm	>30	44.77863023	101_FRSD_RendzicLeptosolsm_>30
102	1950.56	FRSD	DystricCambisolsm	>30	24.83239632	102_FRSD_DystricCambisolsm_>30
103	1776.28	FRSD	RendzicLeptosolsm	>30	41.57640227	103_FRSD_RendzicLeptosolsm_>30
104	1284.32	AGRC	CalcaricFluvisolsm	>30	21.29022466	104_AGRC_CalcaricFluvisolsm_>30
105	4271.24	FRSD	DystricCambisolsm	>30	33.66011333	105_FRSD_DystricCambisolsm_>30
106	1947.64	FRSD	DystricCambisolsm	10-30	28.89642736	106_FRSD_DystricCambisolsm_10-30
107	2456.04	AGRC	DystricCambisolsm	0-5	11.36637305	107_AGRC_DystricCambisolsm_0-5
108	12.4	PAST	DystricCambisolsm	>30	22.80483679	108_PAST_DystricCambisolsm_>30
109	1800.04	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	3.283167463	109_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
110	91.4	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	1.032636503	110_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
111	46.24	AGRL	DystricCambisolsm	0-5	6.731516316	111_AGRL_DystricCambisolsm_0-5
112	2753.4	FRSD	DystricCambisolsm	10-30	26.53068994	112_FRSD_DystricCambisolsm_10-30
113	3392.44	FRSD	DystricCambisolsm	>30	46.3137952	113_FRSD_DystricCambisolsm_>30
114	3721.6	FRSD	CalcaricFluvisolsm	>30	26.94462343	114_FRSD_CalcaricFluvisolsm_>30
115	1327.8	FRSD	DystricCambisolsm	>30	41.25888473	115_FRSD_DystricCambisolsm_>30
116	732.68	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	30.44836376	116_RNGB_DystricCambisolsm_10-30
117	1400.92	PAST	DystricCambisolsm	10-30	20.50782925	117_PAST_DystricCambisolsm_10-30
118	341.56	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	15.67330607	118_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
119	652.44	FRSD	DystricCambisolsm	10-30	19.17431888	119_FRSD_DystricCambisolsm_10-30
120	2140.64	AGRC	LithicLeptosolm	0-5	9.289731859	120_AGRC_LithicLeptosolm_0-5
121	2962.56	AGRL	DystricCambisolsm	0-5	18.36842667	121_AGRL_DystricCambisolsm_0-5
122	1088.44	FRSD	RendzicLeptosolsm	>30	54.38837609	122_FRSD_RendzicLeptosolsm_>30
123	1075.68	FRSD	CalcaricFluvisolsm	>30	34.43472818	123_FRSD_CalcaricFluvisolsm_>30
124	1369.84	AGRC	LithicLeptosolm	0-5	6.166934797	124_AGRC_LithicLeptosolm_0-5
125	498.16	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	5.200147636	125_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
126	354.52	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	0.971666196	126_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
127	3491.48	FRSD	DystricCambisolsm	>30	45.46419597	127_FRSD_DystricCambisolsm_>30
128	706.52	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	24.16150811	128_RNGB_DystricCambisolsm_10-30
129	28.68	PAST	DystricCambisolsm	10-30	29.53753815	129_PAST_DystricCambisolsm_10-30
130	217.88	RNGB	RendzicLeptosolsm	>30	49.37957891	130_RNGB_RendzicLeptosolsm_>30
131	3653.8	FRSD	DystricCambisolsm	>30	35.88877325	131_FRSD_DystricCambisolsm_>30
132	1532.92	FRST	RendzicLeptosolsm	>30	46.3493193	132_FRST_RendzicLeptosolsm_>30
133	99.8	FRSD	RendzicLeptosolsm	>30	69.93717594	133_FRSD_RendzicLeptosolsm_>30

Под-Слив	Површина (ha)	Коришћење земљишта	Тип земљишта	Нагиб терена (%)	Доминантан нагиб терена (%)	Комбинација параметара
134	186.64	RNGB	RendzicLeptosolsm	>30	44.75920626	134_RNGB_RendzicLeptosolsm_>30
135	1300.04	FRST	RendzicLeptosolsm	>30	43.12298475	135_FRST_RendzicLeptosolsm_>30
136	2797.8	FRST	DystricCambisolsm	>30	44.51077571	136_FRST_DystricCambisolsm_>30
137	3768.12	FRSD	DystricCambisolsm	10-30	27.47641714	137_FRSD_DystricCambisolsm_10-30
138	340.96	FRSE	RendzicLeptosolsm	>30	44.64143378	138_FRSE_RendzicLeptosolsm_>30
139	2108.92	FRST	RendzicLeptosolsm	>30	41.89335422	139_FRST_RendzicLeptosolsm_>30
140	1113.72	PAST	RendzicLeptosolsm	10-30	30.01589026	140_PAST_RendzicLeptosolsm_10-30
141	2564.48	FRST	DystricCambisolsm	>30	38.18470727	141_FRST_DystricCambisolsm_>30
142	2641.04	FRSD	DystricCambisolsm	10-30	28.34372885	142_FRSD_DystricCambisolsm_10-30
143	1195.96	PAST	DystricCambisolsm	>30	30.47518892	143_PAST_DystricCambisolsm_>30
144	1966.64	FRSE	DystricCambisolsm	>30	35.68257657	144_FRSE_DystricCambisolsm_>30
145	3542.16	AGRC	DystricCambisolsm	0-5	7.554939249	145_AGRC_DystricCambisolsm_0-5
146	3953.04	PAST	DystricCambisolsm	10-30	21.17815373	146_PAST_DystricCambisolsm_10-30
147	6751.32	FRSD	DystricCambisolsm	>30	31.2136475	147_FRSD_DystricCambisolsm_>30
148	1242.6	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	1.148850625	148_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
149	2584.56	AGRL	DystricCambisolsm	0-5	7.687146939	149_AGRL_DystricCambisolsm_0-5
150	3814	AGRC	DystricCambisolsm	0-5	14.04690558	150_AGRC_DystricCambisolsm_0-5
151	2363.48	PAST	DystricCambisolsm	0-5	12.63280176	151_PAST_DystricCambisolsm_0-5
152	3682.92	PAST	DystricCambisolsm	10-30	28.93273749	152_PAST_DystricCambisolsm_10-30
153	4279.96	PAST	DystricCambisolsm	10-30	20.52366083	153_PAST_DystricCambisolsm_10-30
154	12.64	FRSD	DystricCambisolsm	>30	42.45731492	154_FRSD_DystricCambisolsm_>30
155	39.04	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	15.26443765	155_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
156	2470.32	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	29.71421136	156_RNGB_DystricCambisolsm_10-30
157	3215.96	FRSD	DystricCambisolsm	10-30	24.8712396	157_FRSD_DystricCambisolsm_10-30
158	279.12	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	0.726616577	158_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
159	211.2	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	0.622623314	159_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
160	914.84	PAST	DystricCambisolsm	10-30	24.27377021	160_PAST_DystricCambisolsm_10-30
161	1021.36	PAST	DystricCambisolsm	>30	36.72844925	161_PAST_DystricCambisolsm_>30
162	1124.92	FRSD	CalcaricFluvisolsm	>30	34.667581	162_FRSD_CalcaricFluvisolsm_>30
163	1482.6	AGRL	DystricCambisolsm	0-5	5.464535502	163_AGRL_DystricCambisolsm_0-5
164	1097.72	FRSD	DystricCambisolsm	>30	36.99454747	164_FRSD_DystricCambisolsm_>30
165	948.72	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	31.95722574	165_RNGB_DystricCambisolsm_10-30
166	2838.32	FRST	DystricCambisolsm	>30	40.26793542	166_FRST_DystricCambisolsm_>30
167	247.68	AGRC	MollicGleysolsm	0-5	1.123670099	167_AGRC_MollicGleysolsm_0-5
168	1656.08	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	17.06004187	168_RNGB_DystricCambisolsm_10-30
169	1214.12	AGRC	DystricCambisolsm	0-5	12.07850134	169_AGRC_DystricCambisolsm_0-5
170	147.24	AGRL	MollicGleysolsm	0-5	1.95529198	170_AGRL_MollicGleysolsm_0-5
171	241.48	AGRL	MollicGleysolsm	0-5	0.845161331	171_AGRL_MollicGleysolsm_0-5
172	1118.88	FRSE	DystricCambisolsm	>30	39.11611093	172_FRSE_DystricCambisolsm_>30
173	3719.84	PAST	DystricCambisolsm	>30	33.69065068	173_PAST_DystricCambisolsm_>30
174	1420.12	FRSD	DystricCambisolsm	>30	28.23903426	174_FRSD_DystricCambisolsm_>30
175	4901.76	PAST	DystricCambisolsm	10-30	22.83185941	175_PAST_DystricCambisolsm_10-30
176	1366.12	PAST	DystricCambisolsm	10-30	25.54671958	176_PAST_DystricCambisolsm_10-30
177	2251.76	AGRL	MollicGleysolsm	0-5	10.35318663	177_AGRL_MollicGleysolsm_0-5
178	2024.92	AGRC	MollicGleysolsm	0-5	6.877775297	178_AGRC_MollicGleysolsm_0-5
179	178	AGRL	MollicGleysolsm	0-5	2.569218651	179_AGRL_MollicGleysolsm_0-5
180	1362.2	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	0.80982129	180_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
181	159	AGRL	LithicLeptosolm	0-5	9.059114372	181_AGRL_LithicLeptosolm_0-5
182	1612.08	FRSE	DystricCambisolsm	>30	41.09958047	182_FRSE_DystricCambisolsm_>30
183	720.2	FRSD	LithicLeptosolm	>30	31.25067821	183_FRSD_LithicLeptosolm_>30
184	1196.92	FRSD	LithicLeptosolm	10-30	30.92599754	184_FRSD_LithicLeptosolm_10-30
185	1110.32	FRSD	DystricCambisolsm	10-30	31.45670125	185_FRSD_DystricCambisolsm_10-30
186	153.84	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	1.185998478	186_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
187	1783.36	AGRC	MollicGleysolsm	0-5	8.272574554	187_AGRC_MollicGleysolsm_0-5
188	3237.8	AGRL	LithicLeptosolm	5-10	25.13726858	188_AGRL_LithicLeptosolm_5-10
189	1360	RNGB	DystricCambisolsm	>30	32.06261609	189_RNGB_DystricCambisolsm_>30
190	2573.88	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	12.89954352	190_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
191	7071.72	AGRC	LithicLeptosolm	0-5	18.9641669	191_AGRC_LithicLeptosolm_0-5
192	887.52	AGRC	MollicGleysolsm	0-5	3.199522823	192_AGRC_MollicGleysolsm_0-5
193	1176.12	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	24.39161694	193_RNGB_DystricCambisolsm_10-30
194	4634.28	FRSE	DystricCambisolsm	10-30	31.08825067	194_FRSE_DystricCambisolsm_10-30
195	1562.24	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	0.70475657	195_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
196	1264.32	RNGB	DystricCambisolsm	>30	30.94195371	196_RNGB_DystricCambisolsm_>30
197	1006.8	UIDU	DystricCambisolsm	10-30	17.29690307	197_UIDU_DystricCambisolsm_10-30
198	1137.84	AGRC	LithicLeptosolm	0-5	5.033309813	198_AGRC_LithicLeptosolm_0-5
199	1840.52	AGRC	LithicLeptosolm	0-5	7.972981045	199_AGRC_LithicLeptosolm_0-5
200	10.64	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	27.84301128	200_RNGB_DystricCambisolsm_10-30

Под-Слив	Површина (ha)	Коришћење земљишта	Тип земљишта	Нагиб терена (%)	Доминантан нагиб терена (%)	Комбинација параметара
201	1548.88	PAST	DystricCambisolsm	10-30	17.51421213	201_PAST_DystricCambisolsm_10-30
202	307.88	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	0.853197025	202_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
203	657.12	AGRC	MollicGleysolsm	0-5	1.740380718	203_AGRC_MollicGleysolsm_0-5
204	3464.16	FRSE	DystricCambisolsm	10-30	35.67355461	204_FRSE_DystricCambisolsm_10-30
205	2353.52	FRSD	LithicLeptosolm	>30	40.47736846	205_FRSD_LithicLeptosolm_>30
206	4708.52	RNGB	LithicLeptosolm	10-30	27.25097494	206_RNGB_LithicLeptosolm_10-30
207	382.12	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	24.4732974	207_RNGB_DystricCambisolsm_10-30
208	1013.88	FRSE	DystricCambisolsm	>30	40.00822857	208_FRSE_DystricCambisolsm_>30
209	3357.52	FRSE	DystricCambisolsm	>30	43.98282784	209_FRSE_DystricCambisolsm_>30
210	2237.56	RNGB	DystricCambisolsm	>30	39.82266949	210_RNGB_DystricCambisolsm_>30
211	2952.44	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	30.10604479	211_RNGB_DystricCambisolsm_10-30
212	1649.48	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	3.626935826	212_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
213	2641.76	AGRL	LithicLeptosolm	0-5	19.72026968	213_AGRL_LithicLeptosolm_0-5
214	3815.76	FRSD	LithicLeptosolm	>30	44.45784455	214_FRSD_LithicLeptosolm_>30
215	1672	FRSE	UmbricLeptosolsm	>30	46.42627618	215_FRSE_UmbricLeptosolsm_>30
216	1294.4	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	28.88052675	216_RNGB_DystricCambisolsm_10-30
217	1241.44	FRSD	DystricCambisolsm	>30	38.64396674	217_FRSD_DystricCambisolsm_>30
218	1614.64	AGRL	LithicLeptosolm	>30	22.26661798	218_AGRL_LithicLeptosolm_>30
219	411.96	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	0.730306685	219_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
220	1551.08	FRSD	LithicLeptosolm	>30	38.36781678	220_FRSD_LithicLeptosolm_>30
221	1030.76	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	0.727636023	221_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
222	1496	RNGE	UmbricLeptosolsm	>30	49.02777005	222_RNGE_UmbricLeptosolsm_>30
223	24.6	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	1.169917583	223_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
224	1885.08	FRSD	UmbricLeptosolsm	0-5	28.97978953	224_FRSD_UmbricLeptosolsm_0-5
225	129.16	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	0.826600044	225_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
226	128.24	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	4.146527847	226_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
227	2376.96	AGRC	MollicGleysolsm	0-5	3.954208372	227_AGRC_MollicGleysolsm_0-5
228	931.32	FRSD	DystricCambisolsm	>30	38.86166332	228_FRSD_DystricCambisolsm_>30
229	10.56	AGRL	MollicGleysolsm	0-5	6.374056975	229_AGRL_MollicGleysolsm_0-5
230	668.72	AGRL	MollicGleysolsm	0-5	0.916369723	230_AGRL_MollicGleysolsm_0-5
231	24.08	AGRL	MollicGleysolsm	0-5	2.015508042	231_AGRL_MollicGleysolsm_0-5
232	2015.28	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	6.721031786	232_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
233	0.28	AGRL	MollicGleysolsm	5-10	6.283464159	233_AGRL_MollicGleysolsm_5-10
234	1224.36	PAST	DystricCambisolsm	10-30	15.61663798	234_PAST_DystricCambisolsm_10-30
235	28.04	AGRL	MollicGleysolsm	0-5	1.871871492	235_AGRL_MollicGleysolsm_0-5
236	2.88	AGRC	MollicGleysolsm	0-5	6.143390543	236_AGRC_MollicGleysolsm_0-5
237	1001.84	AGRL	LithicLeptosolm	0-5	16.05202716	237_AGRL_LithicLeptosolm_0-5
238	1079.36	FRSD	DystricCambisolsm	>30	44.95687746	238_FRSD_DystricCambisolsm_>30
239	2159.68	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	7.577933702	239_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
240	1994.56	FRSD	DystricCambisolsm	>30	43.47167608	240_FRSD_DystricCambisolsm_>30
241	2519.92	RNGB	UmbricLeptosolsm	>30	43.79661012	241_RNGB_UmbricLeptosolsm_>30
242	1240.32	AGRC	DystricCambisolsm	0-5	8.397891005	242_AGRC_DystricCambisolsm_0-5
243	2122	RNGB	DystricCambisolsm	>30	35.02639893	243_RNGB_DystricCambisolsm_>30
244	2791.12	PAST	DystricCambisolsm	10-30	25.70627182	244_PAST_DystricCambisolsm_10-30
245	8.32	AGRL	DystricCambisolsm	10-30	16.56727977	245_AGRL_DystricCambisolsm_10-30
246	3120.52	FRSE	UmbricLeptosolsm	>30	46.06782956	246_FRSE_UmbricLeptosolsm_>30
247	2403.88	FRSD	UmbricLeptosolsm	>30	38.09496356	247_FRSD_UmbricLeptosolsm_>30
248	1463.6	FRSD	DystricCambisolsm	>30	33.13497521	248_FRSD_DystricCambisolsm_>30
249	883.8	AGRC	MollicGleysolsm	0-5	1.648826053	249_AGRC_MollicGleysolsm_0-5
250	4.92	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	3.235433885	250_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
251	1468.08	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	2.822011985	251_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
252	1919.36	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	6.055919414	252_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
253	18.24	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	5.901659172	253_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
254	4898.16	PAST	DystricCambisolsm	10-30	17.61945753	254_PAST_DystricCambisolsm_10-30
255	432.8	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	3.779007946	255_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
256	4198.76	AGRL	UmbricLeptosolsm	0-5	26.23161432	256_AGRL_UmbricLeptosolsm_0-5
257	1018.16	AGRL	LithicLeptosolm	0-5	11.87133387	257_AGRL_LithicLeptosolm_0-5
258	1.32	AGRL	CalcaricFluvisolsm	10-30	9.752800465	258_AGRL_CalcaricFluvisolsm_10-30
259	1471.4	AGRL	CalcaricFluvisolsm	0-5	4.418082942	259_AGRL_CalcaricFluvisolsm_0-5
260	818.44	AGRC	CalcaricFluvisolsm	0-5	4.796175429	260_AGRC_CalcaricFluvisolsm_0-5
261	1519.88	AGRC	EutricCambisolsg	0-5	7.876306177	261_AGRC_EutricCambisolsg_0-5
262	1497.4	FRSD	LithicLeptosolm	>30	41.84601213	262_FRSD_LithicLeptosolm_>30
263	1144.92	AGRL	LithicLeptosolm	0-5	9.050981114	263_AGRL_LithicLeptosolm_0-5
264	2352.36	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	18.84125067	264_RNGB_DystricCambisolsm_10-30
265	1607.36	FRSD	LithicLeptosolm	0-5	24.13810401	265_FRSD_LithicLeptosolm_0-5
266	1904	RNGB	DystricCambisolsm	10-30	35.00417458	266_RNGB_DystricCambisolsm_10-30
267	2019	FRSD	LithicLeptosolm	>30	43.95810051	267_FRSD_LithicLeptosolm_>30

Под-Слив	Површина (ha)	Коришћење земљишта	Тип земљишта	Нагиб терена (%)	Доминантан нагиб терена (%)	Комбинација параметара
268	2203.32	AGRC	EutricCambisolsg	10-30	10.52484315	268_AGRC_EutricCambisolsg_10-30
269	5581.24	RNGB	HaplicLuvisolg	10-30	35.03302553	269_RNGB_HaplicLuvisolg_10-30
270	3853.36	AGRC	EutricCambisolsg	10-30	9.660886949	270_AGRC_EutricCambisolsg_10-30
271	655.96	AGRC	EutricCambisolsg	10-30	9.368694763	271_AGRC_EutricCambisolsg_10-30
272	4648.04	AGRC	HaplicLuvisolg	10-30	25.08988287	272_AGRC_HaplicLuvisolg_10-30
273	1650	AGRC	EutricCambisolsg	10-30	10.51750762	273_AGRC_EutricCambisolsg_10-30
274	1835.48	AGRC	EutricCambisolsg	0-5	10.36905029	274_AGRC_EutricCambisolsg_0-5
275	1517.44	FRSD	HaplicLuvisolg	10-30	25.27234134	275_FRSD_HaplicLuvisolg_10-30
276	1164.52	FRSD	DystricCambisolsg	>30	43.00317234	276_FRSD_DystricCambisolsg_>30
277	2664.56	FRSD	HaplicLuvisolg	10-30	30.0558988	277_FRSD_HaplicLuvisolg_10-30
278	9587.64	AGRC	EutricCambisolsg	10-30	20.73425137	278_AGRC_EutricCambisolsg_10-30
279	435.32	AGRC	EutricCambisolsg	10-30	11.19052201	279_AGRC_EutricCambisolsg_10-30
280	1123.12	AGRC	EutricCambisolsg	10-30	10.29783608	280_AGRC_EutricCambisolsg_10-30
281	182.32	AGRC	EutricCambisolsg	0-5	6.448202643	281_AGRC_EutricCambisolsg_0-5
282	86.32	AGRC	EutricCambisolsg	5-10	8.297989067	282_AGRC_EutricCambisolsg_5-10
283	1880.96	FRSD	DystricCambisolsg	>30	40.89461042	283_FRSD_DystricCambisolsg_>30
284	1273.2	AGRC	HaplicLuvisolg	10-30	15.20508731	284_AGRC_HaplicLuvisolg_10-30
285	2262.64	RNGE	VerticLuvisolsg	10-30	15.43076178	285_RNGE_VerticLuvisolsg_10-30
286	1024.4	AGRC	EutricCambisolsg	5-10	8.646773933	286_AGRC_EutricCambisolsg_5-10
287	1270	AGRC	EutricCambisolsg	5-10	8.81979161	287_AGRC_EutricCambisolsg_5-10
288	11.68	AGRC	EutricCambisolsg	0-5	7.987210012	288_AGRC_EutricCambisolsg_0-5
289	94.04	AGRC	EutricCambisolsg	5-10	7.810777466	289_AGRC_EutricCambisolsg_5-10
290	1290.56	AGRC	VerticLuvisolsg	10-30	13.17945455	290_AGRC_VerticLuvisolsg_10-30
291	1181.36	AGRC	EutricCambisolsg	10-30	9.417453106	291_AGRC_EutricCambisolsg_10-30
292	707.76	AGRC	EutricCambisolsg	0-5	9.464062308	292_AGRC_EutricCambisolsg_0-5
293	4443.52	RNGE	VerticLuvisolsg	10-30	17.41655667	293_RNGE_VerticLuvisolsg_10-30
294	4922.96	FRSD	DystricCambisolsg	10-30	39.85185155	294_FRSD_DystricCambisolsg_10-30
295	1556.2	AGRC	HaplicLuvisolg	10-30	21.30250546	295_AGRC_HaplicLuvisolg_10-30
296	1690.52	AGRC	VerticLuvisolsg	10-30	12.84754582	296_AGRC_VerticLuvisolsg_10-30
297	295.36	AGRC	EutricCambisolsg	5-10	8.00082791	297_AGRC_EutricCambisolsg_5-10
298	1351.28	FRSD	HaplicLuvisolg	10-30	35.90603574	298_FRSD_HaplicLuvisolg_10-30
299	146.36	AGRC	EutricCambisolsg	5-10	8.553348968	299_AGRC_EutricCambisolsg_5-10
300	2853.16	AGRC	VerticLuvisolsg	10-30	18.42699992	300_AGRC_VerticLuvisolsg_10-30
301	1677.8	FRSD	VerticLuvisolsg	10-30	19.29545143	301_FRSD_VerticLuvisolsg_10-30
302	1674.56	AGRC	EutricCambisolsg	10-30	22.15455415	302_AGRC_EutricCambisolsg_10-30
303	922.52	AGRC	EutricCambisolsg	10-30	13.26566149	303_AGRC_EutricCambisolsg_10-30
304	3242.64	FRSD	HaplicLuvisolg	10-30	36.08440499	304_FRSD_HaplicLuvisolg_10-30
305	1093	FRSD	VerticLuvisolsg	10-30	38.61146849	305_FRSD_VerticLuvisolsg_10-30
306	1091.92	FRSD	VerticLuvisolsg	10-30	37.44745368	306_FRSD_VerticLuvisolsg_10-30
307	2437.68	FRSD	VerticLuvisolsg	10-30	22.94141839	307_FRSD_VerticLuvisolsg_10-30
308	3163.52	FRSD	VerticLuvisolsg	10-30	20.67630953	308_FRSD_VerticLuvisolsg_10-30
309	4182.64	FRSD	HaplicLuvisolg	>30	39.82768337	309_FRSD_HaplicLuvisolg_>30

ПРИЛОГ 5 Запремина исталожених седимената у акумулацију Тиквеш 1968-2016

година	Запремина $\times 10^6 \text{ m}^3$	Запремина кумулативно $\times 10^6 \text{ m}^3$
1968	0.00	0.00
1969	1.68	1.68
1970	1.16	2.84
1971	0.53	3.37
1972	0.83	4.20
1973	0.64	4.84
1974	0.41	5.25
1975	0.65	5.90
1976	0.82	6.72
1977	0.24	6.96
1978	0.77	7.72
1979	6.08	13.80
1980	1.81	15.61
1981	3.41	19.02
1982	1.06	20.08
1983	1.19	21.27
1984	1.19	22.46
1985	1.19	23.65
1986	1.33	24.98
1987	0.94	25.92
1988	0.42	26.33
1989	0.53	26.86
1990	0.34	27.21
1991	1.21	28.41
1992	0.34	28.75
1993	0.69	29.44
1994	0.13	29.57
1995	0.50	30.07
1996	0.97	31.04
1997	0.32	31.36
1998	0.57	31.93
1999	0.90	32.83
2000	0.48	33.31
2001	0.59	33.90
2002	0.10	34.00
2003	0.24	34.24
2004	0.81	35.05
2005	0.74	35.79
2006	0.39	36.17
2007	1.04	37.21
2008	1.27	38.48
2009	0.79	39.28
2010	0.64	39.91
2011	1.21	41.12
2012	0.22	41.35
2013	0.50	41.85
2014	0.79	42.64
2015	0.15	42.79
2016	0.36	43.15