

Примена нумеричких метода у моделовању тецишта са освртом на различите реолошке услове; The application of numerical methods in debris flows modeling with a focus on different rheological conditions

Јелка Крушић



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Примена нумеричких метода у моделовању тецишта са освртом на различите реолошке услове; The application of numerical methods in debris flows modeling with a focus on different rheological conditions | Јелка Крушић | | 2023 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0008650>

Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду омогућава приступ издањима Факултета и радовима запослених доступним у слободном приступу. - Претрага репозиторијума доступна је на www.dr.rgf.bg.ac.rs

The Digital repository of The University of Belgrade Faculty of Mining and Geology archives faculty publications available in open access, as well as the employees' publications. - The Repository is available at: www.dr.rgf.bg.ac.rs

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
РУДАРСКО–ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ

Јелка Д. Крушић

**ПРИМЕНА НУМЕРИЧКИХ МЕТОДА У
МОДЕЛОВАЊУ ТЕЦИШТА СА ОСВРТОМ НА
РАЗЛИЧИТЕ РЕОЛОШКЕ УСЛОВЕ**

докторска дисертација

Београд, 2023.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Jelka D. Krušić

**THE APPLICATION OF NUMERICAL METHODS IN
DEBRIS FLOWS MODELING WITH A FOCUS ON
DIFFERENT RHEOLOGICAL CONDITIONS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023

Ментор:

Др Биљана Аболмасов, редовни професор

Универзитет у Београду, Рударско–геолошки факултет

Ужа научна област: инжењерска геологија, геомеханика и геотехничко инжењерство

Чланови комисије за одбрану докторске дисертације:

Др Биљана Аболмасов, редовни професор

Универзитет у Београду, Рударско–геолошки факултет

Ужа научна област: инжењерска геологија, геомеханика и геотехничко инжењерство

Др Милош Марјановић, ванредни професор

Универзитет у Београду, Рударско–геолошки факултет

Ужа научна област: инжењерска геологија, геомеханика и геотехничко инжењерство

Др Славољуб Драгићевић, редовни професор

Универзитет у Београду, Географски факултет

Ужа научна област: физичка географија, геоморфологија

Датум одбране:

ЗАХВАЛНИЦА

Велику захвалност дугујем ментору проф. др Биљани Аболмасов, прије свега на подршци и охрабрењу од самог почетка да се бавим истраживањем у овој области. Захвална сам на размијевању, сугестијама, усмјеравањима и савјетима током трајања студија и истраживања за потребе доктората.

Посебну захвалност заслужује проф. Manuel Pastor, са Грађевинског факултета Политехничког Универзитета у Мадриду кога сматарам почасним чланом доктората. Захваљујем му на знању и помоћи при изради једног дијела резултата доктората као и на уступању програма за коришћење у те сврхе. Такође, др Saeid Moussavi Таууби на великој помоћи током боравка тамо као и касније током истраживања; колега др Милош Марјановић на идејама, практичним савјетима у моментима када сам наилазила на потешкоће у изради доктората; проф. Славољуб Драгићевић на корисним и конструктивним савјетима, охрабрењу и сугестијама приликом израде доктората.

Велику захвалност дугујем проф. Ласлу Чакију који је помогао приликом рада на лабораторијским испитивањима и увијек био ту да испробамо неке нове идеје са постојећом опремом. Такође, колегиници Тини Ђурић која ми је много помогла на изради и интерпретацији лабораторијских испитивања. Колегиници Драгани Ђурић за помоћ обраде геофизичких истраживања и проф. Драгану Миловановићу на сарадњи приликом теренских истраживања

Свим колегама, а уједно и мојим добрим пријатељима који су имали додира са теренским дијелом истраживања: Мими, Каћи и Дамиру. Колегама са Департмана за Геотехнику који су увијек били ту за помоћ, савјет и сугестије.

Захваљујем се и колегама са са Грађевинског факултета, Политехничког Универзитета у Мадриду —Saeid, Jachen, Pedro, Angel, Miguel, хвала на сугестијама и лијепом дружењу које ћу памтити и пријатељству које траје, а почело је мојим истраживањем у Мадриду.

Хвала свим мојим пријатељима, који су били ту за мене и подржавали ме на овом путу.

На крају, највећу захвалност дугујем мојој породици, мајци Нади, тати Драгиши и брату Јовану на свој пажњи, бризи и подршци током свих ових година, брату Матији и драгом о. Браниславу.

Јелка

ПРИМЕНА НУМЕРИЧКИХ МЕТОДА У МОДЕЛОВАЊУ ТЕЦИШТА СА ОСВРТОМ НА РАЗЛИЧИТЕ РЕОЛОШКЕ УСЛОВЕ

Сажетак

Тецишта су комплексне појаве нестабилности које захтјевају истраживања и испитивања која до сада нису рађена код нас у области геотехнике. По механизму, начину активирања и понашању покренутог материјала се знатно разликују од клизишта. Циљ ове дисертације је била примјена нумеричких модела пропагације тецишта на примјеру двије појаве које су се десиле у Србији као посљедица дјеловања циклона Тамара. Детаљно истраживање тецишта подразумијева теренско картирање, теренска истраживања и лабораторијска испитивања одабраних узорака са терена. Од теренских истраживања на примјеру тецишта Селанац урађена су геофизичка истраживања Електричне томографије док је за оба тецишта урађено снимање терена беспилотном летилицом. Лабораторијска испитивања су имала за циљ анализу гранулометријског састава и утврђивање граница консистениције. Добијени резултати су поређени са литературним вриједностима а неки од параметера су коришћени као улазни подаци у SPH geoflow софтверу. Израда нумеричких модела пропагације је урађена примјеном софтвера који су базирани на различитим аналитичким приступима, RAMMS базиран на методу коначних запремина и SPH geoflow метод моделовања флуидних дјелића. Коначни резултати више параметра: висина, максималних брзина кретања и приноса материјала услед еродовања подлоге добијени повратном анализом примјеном оба програма. Коришћен је исти конститутивни модел односно Воелмијев реолошки модел. Модели су валидирани поређењем са теренским истраживањима и анализираним дигиталним моделима терена двије епохе.

Кључне ријечи: тециште, нумерички модели пропагације, циклон Тамара, геофизичка истраживања, лабораторијска испитивања, Селанац, Лева река, RAMMS, SPH geoflow, реолошки модел

Научна област: Геолошко инжењерство

Ужа научна област: Инжењерска геологија, геомеханика и геотехничко инжењерство

УДК: 624.131.537(043.3)

THE APPLICATION OF NUMERICAL METHODS IN DEBRIS FLOWS MODELING WITH A FOCUS ON DIFFERENT RHEOLOGICAL CONDITIONS

Abstract

Debris flows are complex phenomena that require research and investigations that have not been conducted in the field of geotechnics in our country so far. In terms of mechanism, activation, and behavior of the moving material, they significantly differ from landslides. The goal of this dissertation was the application of numerical models of debris flows propagation using the example of two events that occurred in Serbia because of the action of cyclone Tamara. Detailed research on debris flows involves field mapping, field investigations, and laboratory testing of selected samples from the field. Geophysical investigations using Electrical Tomography were carried out for the Selanac debris flow based on field research, while drone surveys were conducted for both debris flows. Laboratory tests aimed to analyze the granulometric composition and determine the consistency limits. The obtained results were compared with literature values, and some parameters were used as input data in the SPH Geoflow software. The development of numerical propagation models was done using software based on different analytical approaches, RAMMS based on the Finite Volume Method, and SPH Geoflow method for modeling fluid particles. The results include parameters such as height, maximum velocities, and material yield due to substrate erosion, obtained through a backward analysis using both programs. The same constitutive model, Voellmy's rheological model, was used. The models were validated by comparing them with field investigations and analyzed digital terrain models from two epochs.

Keywords: debris flow, numerical propagation models, cyclone Tamara, geophysical investigations, laboratory testing, Selanac, Leva River, RAMMS, SPH geoflow, rheological model

Scientific field: Geological engineering

Scientific subfield: Engineering geology, geomechanics, and geotechnical engineering

UDC number: 624.131.537(043.3)

САДРЖАЈ

1	УВОД	1
1.1	Предмет и циљ докторске дисертације	1
1.2	Полазне хипотезе	2
1.3	Садржај докторске дисертације	2
2	ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ	4
2.1	ОСНОВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ тецишта	5
2.2	Основна реолошка својства материјала.....	12
2.2.1	Њутнов флуид.....	14
2.2.2	Бингамов модел (<i>Bingham, 1922</i>)	14
2.2.3	Фрикциони модел.....	15
2.2.4	Воелмиев модел (<i>Voellmy, 1955</i>).....	16
2.3	Дефинисање приноса материјала (<i>Entrainment</i>)	16
2.3.1	Модел ерозије по Хунгру (<i>Hungr et al. (2005)</i>)	17
2.3.2	Егаширин модел (<i>Egashira, 1993</i>)	17
2.3.3	Бланков модел (<i>Blanc, 2008</i>)	18
2.4	Основни принципи нумеричког моделовања пропагације тецишта	18
3	ПОДРУЧЈА ИСТРАЖИВАЊА.....	22
3.1	ТЕЦИШТЕ СЕЛАНАЦ.....	24
3.1.1	Геоморфолошке карактеристике подручја	25
3.1.2	Геолошка грађа терена	26
3.2	ТЕЦИШТЕ ЛЕВА РЕКА.....	29
3.2.1	Геоморфолошке карактеристике подручја.....	30
3.2.2	Геолошка грађа терена.....	30
4	МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА ТЕЦИШТА	32
4.1	Методe даљинске детекције	32
4.1.1	Фотограметријско снимање терена беспилотном летилицом.....	33
4.2	Геофизичка истраживања	35
4.3	Одабир узорака	37
4.4	Лабораторијска ипитивања	39
5	МЕТОДЕ МОДЕЛОВАЊА.....	42
5.1	RAMMS (<i>Rapid Mass Movement Software</i>)	42
5.1.1	Моделовање приноса материјала.....	44

5.2	Метод моделовања флуидних дјелића SPH – (<i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i>)	44
5.2.1	Пропагацијски модел	46
5.2.2	Конститутивне једначине двофазних пропагацијских модела.....	46
5.2.3	Примјер бесконачне косине.....	47
6	ОДРЕЂИВАЊЕ ОСНОВНИХ МОРФОМЕТРИЈСКИХ КАРАКТЕРИСТИКА	48
6.1	Тециште Селанац	48
6.1.1	ДМТ ЕПОХЕ I	51
6.1.2	ДМТ ЕПОХЕ II	52
6.1.3	Анализа ДМТ–а из двије епохе	55
6.1.4	Анализа модела добијених електрометријском томографијом.....	57
6.2	Тециште Лева река	60
6.2.1	ДМТ ЕПОХЕ I.....	62
6.2.2	ДМТ ЕПОХЕ II.....	63
6.2.3	Анализа ДМТ– а из двије епохе.....	65
7	ИНЖЕЊЕРСКО-ГЕОЛОШКА СВОЈСТВА ПОКРЕНУТОГ МАТЕРИЈАЛА	66
7.1	ТЕЦИШТЕ СЕЛАНАЦ.....	66
7.2	ТЕЦИШТЕ ЛЕВА РЕКА.....	71
7.3	ПОРЕЂЕЊЕ ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА СА ДОСАДАШЊИМ ИСТРАЖИВАЊИМА.....	74
8	МОДЕЛОВАЊЕ ПРОПАГАЦИЈЕ ТЕЦИШТА.....	76
8.1	Моделовање тецишта Селанац.....	76
<i>Модел I</i>	.....	76
<i>Модел II</i>	.....	78
<i>Модел III</i>	.....	80
<i>Модел Селанац SPH 1</i>	.....	83
<i>Модел Селанац SPH 2</i>	.....	87
<i>Модел Селанац SPH 3</i>	.....	91
8.1.2	Поређење теренских и нумеричких истраживања	95
8.2	Моделовање тецишта Лева река	96
8.2.1	Моделовање у RAMMS DBF програму.....	97
<i>Модел I</i>	.....	97
<i>Модел II</i>	.....	99
8.2.2	Моделовање у SPH Geoflow програму	103
<i>Модел Лева река SPH 1</i>	.....	103
<i>Модел Лева река SPH 2</i>	.....	108
<i>Модел Лева река SPH 3</i>	.....	111

8.3	Поређење теренских и нумеричких истраживања.....	116
9	ДИСКУСИЈА И ПРЕДЛОГ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА	119
9.1	Предлог даљих истраживања	121
10	ЗАКЉУЧАК	123
11	ЛИТЕРАТУРА.....	125

Списак слика

Слика 2.1 а) основни елементи тецишта у плану и б) морфометријске карактеристике у пресеку	5
Слика 2.2 Дијаграм зависности садржаја чврстих честица, влажности и запреминске тежине на различитим примјерима у свијету; од водотока до тецишта (Hutchinson, 1988).....	7
Слика 2.3 Трофазни дијаграм на основу садржаја честица према Phillips and Davies (1991), из Авансо, С. (2013), модификован.....	8
Слика 2.4 Примјери тецишта са скицама основних геометријских елемената: а) плитко тециште регистровано у Бајиној Башти на стрмој падини б) тециште Лева река код Краљева формирано у јарузи.....	9
Слика 2.5 Приказ тецишта а) у пресеку и б) у плану са карактеристичним таложењем материјала.....	10
Слика 2.6 Почетак зоне депозиције тецишта Селанац	10
Слика 2.7 Приказ механизма настанка појава нестабилности према Coussot i Meunier, 1996, са подручјем истраживања различитих дисциплина према Locat and Lee (2005)	11
Слика 2.8 Упоредни напонско-деформацијски дијаграм њутновских и не-њутновских течности	13
Слика 2.9 Бингамов (Bingham, 1922) критеријум течења	14
Слика 2.10 Бингамов модел понашања приликом течења	15
Слика 2.11 Егашира модел прорачуна приноса материјала на јединичном елементу	18
Слика 2.12 Главни аспекти класификовања модела тецишта (према Truillo et. al.2022)	19
Слика 2.13 Приказ различитих приступа моделовања континуума који су коришћени у раду према Truillo et. al.(2022).....	21
Слика 3.1 Порушени објекти на подручју Крупња као посљедица масовних појава нестабилности (фото Аболмасов, 2015).....	22
Слика 3.2 Неки од примјера тецишта регистрованих на терену са оштећењима која су регистрована(фото Аболмасов, 2015).....	23
Слика 3.3 Тродневне падавине регистроване у падавинским станицама (RHMZ) на подручју Љубовије и Краљева и њиховој околини са положајем предметних подручја (Abolmasov et. al. 2020).....	24
Слика 3.4 Иницијална зона активирања тецишта (фото Аболмасов, 2015).....	24
Слика 3.5 Фотографије тецишта у марту 2017 а) чеони ожилјак б) покренута дробина у зони чеоног ожилјка в) зона транспорта.....	25
Слика 3.6 Сателитски снимак тецишта, јун 2014. године	26
Слика 3.7 Дигитализована геолошка карта терена детаљ на 1:10.000 са ОГК 1:100 000 , лист Љубовија (Кубат и др., 1977).....	27
Слика 3.8 Геолошки пресјек дуж правца кретања материјала са уцртаним елементима тецишта	28
Слика 3.9 Фотографије тецишта у априлу 2017	29

Слика 3.10 Дигитализована геолошка карта терена детаљ на 1:5.000 са ОГК 1:100 000 , лист Краљево	31
Слика 3.11 Геолошки пресјек дуж правца кретања материјала са уцртаним елементима тецишта	32
Слика 4.1 Модел беспилотне летилице DJI Phantom 4 pro коју је коришћен за снимање тецишта (преузето са https://www.dji.com/phantom-4-pro-v2?site=brandsite&from=eol_phantom-4-pro)	33
Слика 4.2 Позиција камере и преклапања снимака а) тециште Селанац б) тециште Лева река.....	34
Слика 4.3 Поступак снимања беспилотном летилицом.....	35
Слика 4.4 а) Графички приказ ERT методе б) мјерни инструменти на терену в) позиционирање профила на тецишту Селанац.....	36
Слика 4.5 Положај ERT профила на дигиталном моделу терена	37
Слика 4.6 Узимање узорка са терена а) мјесто узетог узорка S2 у иницијалној зони б) узимање узорка са тецишта Лева река (фото Миловановић, 2017)	38
Слика 4.7 Мјеста узетих узорка на тециштима	39
Слика 4.8 а) сита коришћена за одређивање гранулометријског састава б) апаратура коришћена за опит хидрометрисања.....	40
Слика 4.9 Падајући конус	41
Слика 5.1 Топографија у декартовом координатном систему Z(X,Y) гдје је површина дефинисана x,y,z локалним координатним системом.....	43
Слика 5.2 SPH двофазни модел материјалних тачака и интеграције у односу на тачку I (Pastor et. al, 2009).....	45
Слика 5.3 Графички приказ фаза коју је корелисан са висином чврсте и флуидне фазе..	47
Слика 5.4 Примјер прорачуна напона на моделу бесконачне косине.....	47
Слика 5.5 Поједностављен приказ нумеричког прорачуна на примјеру јединичног елемента бесконачне косине.....	48
Слика 6.1 Ортофото снимак тецишта Селанац добијен UAV фотограметријским снимањем са карактеризацијом основних геометријских елемената	49
Слика 6.2 Мало тециште.....	50
Слика 6.3 Пукотине у иницијалној зони на фотографијама из периода мај 2015 – март 2017	50
Слика 6.4 Повремени водоток у зони активирања у марту 2015. године	51
Слика 6.5 Зона депозиције са положајем акумулације	51
Слика 6.6 Дигитални модели терена са уцртаним положајем накнадно активираниог тецишта Селанац а) ДМТ 1а резолуције 30x30m б) ДМТ 1а резолуције 5x5 m.....	52
Слика 6.7 Положај оријентационих и контролних тачака	53
Слика 6.8 Дигитални модел терена 5x5m (изведен из модела 10x10 m) са уцртаним положајем активираниог тецишта Селанац.....	55

Слика 6.9 Карта разлика добијена преклапањем двије епохе ДТМ-а	56
Слика 6.10 Резултати ERT_1 профила	58
Слика 6.11 Резултати ERT_2 и ERT_3 профила.....	58
Слика 6.12 Резултати ERT_4 и ERT_5 профила.....	59
Слика 6.13 Резултати ERT_6 и ERT_7 профила.....	60
Слика 6.14 Ортофото снимак тецишта Лева река добијен фотограметријским снимањем са карактеризацијом основних геометријских елемената	61
Слика 6.15 Акумулација која се створила преграђивањем ријеке (фотографија 11.9.2015)	62
Слика 6.16 Дигитални модел терена зохзот са уцртаним положајем накнадно активираног тецишта	62
Слика 6.17 Положај оријентационих и контролних тачака	63
Слика 6.18 Дигитални модел терена ДМТ2б 10x10 ст са уцртаним положајем активираног тецишта Лева река	64
Слика 6.19 Карта разлика добијена преклапањем двије епохе ДМТ-а	65
Слика 7.1 Приказ гранулометријског састава на 6 узорак покренутог материјала тецишта Селанац.....	66
Слика 7.2 Резултати опита добијања мијешане криве сијањем и хидрометрисањем на узорку SM-1	67
Слика 7.3 Резултати одређивања границе течења на узорку помоћу конуса пенетрације	68
Слика 7.4 USCS дијаграм на основу параметара конзистенције.....	71
Слика 7.5 Резултати опита добијања мијешане криве сијањем и хидрометрисањем на узорку LM-1	72
Слика 7.6 Резултати одређивања границе течења на узорку тецишта Лева река помоћу конуса пенетрације.....	73
Слика 7.7 USCS дијаграм на основу параметара конзистенције на узорку тецишта Лева река.....	74
Слика 7.8 Поређење резултата гранулометријског састава са резултатима <i>Brideau et.al, 2019</i>	74
Слика 7.9 Поређење резултата опита конуса пенетрације са резултатима <i>Brideau et.al, 2019</i>	75
Слика 8.1 Прелиминарни модел на ДТМ зохзо т са различитим улазним параметрима (<i>Krušić, et al. (2017)</i>).....	77
Слика 8.2 Попречни пресек у зони депозиције на најпрецизнијем моделу 2.19. д) (<i>Krušić, et al. (2017)</i>)	78
Слика 8.3 Иницијална зона тецишта	78
Слика 8.4 Модел финалних дубина тецишта Селанац на прецизнијем моделу терена са прорачуном приноса материјала (<i>Krušić et. al., 2019</i>)	79

Слика 8.5 а) издвојена зона одношења материјала у зони транспорта б) модел дубине приноса материјала у зони транспорта в) коначни модел депозиције г) модел максималних брзина течења тецишта Селанац.....	81
Слика 8.6 Дефинисање иницијалне нестабилне зоне помоћу у SPH коду.....	82
Слика 8.7 SPH модел I симулације кретања материјала и коначних дубина депоновања	84
Слика 8.8 SPH модел I прорачуна степена приноса материјала ег у зони транспорта	85
Слика 8.9 SPH модел I прорачуна достигнутих максималних брзина течења	86
Слика 8.10 SPH модел II симулације кретања материјала и коначних дубина депоновања	88
Слика 8.11 SPH модел II прорачуна степена приноса материјала ег у зони транспорта	89
Слика 8.12 SPH модел II прорачуна достигнутих максималних брзина течења	90
Слика 8.13 SPH модел III симулације кретања материјала и коначних дубина депоновања	92
Слика 8.14 SPH модел III прорачуна степена приноса материјала ег у зони транспорта	93
Слика 8.15 SPH модел III прорачуна достигнутих максималних брзина течења.....	94
Слика 8.16 Модел SPH3 а) према параметру помјерања фаза б) висина флуидне фазе в) висина чврсте фазе	95
Слика 8.17 Упоредни приказ коначних дубина материјала на мјесту пресјека ERT 5	96
Слика 8.18 Прелиминарни модел са приказом а) финалних дубина б) максималних висина тока в) промјене висине тока у тачки (Krušić, et al. (2017)	98
Слика 8.19 Иницијална зона тецишта за позицијом попречног профила коришћеног за валидацију података	99
Слика 8.20 Издвојена зона одношења материјала у зони транспорта	100
Слика 8.21 Модел финалних дубина тецишта Лева река на прецизнијем моделу терена са прорачуном приноса материјала (Krušić et. al., 2018).....	101
Слика 8.22 Модел максималних брзина течења тецишта Лева река	102
Слика 8.23 Дефинисање иницијалне нестабилне зоне у SPH коду.....	103
Слика 8.24 SPH 1 модел симулације кретања материјала и коначних дубина депоновања тецишта Лева река	105
Слика 8.25 SPH 1 модел прорачуна степена приноса материјала ег у зони транспорта тецишта Лева река	106
Слика 8.26 SPH 1 модел прорачуна достигнутих максималних брзина течења тецишта Лева река.....	107
Слика 8.27 SPH 2 модел симулације кретања материјала и коначних дубина депоновања тецишта Лева река	109
Слика 8.28 SPH 2 модел прорачуна степена приноса материјала ег у зони транспорта тецишта Лева река	110

Слика 8.29 модел прорачуна достигнутих максималних брзина течења тецишта Лева река.....	111
Слика 8.30 SPH 3 модел симулације кретања материјала и коначних дубина депоновања тецишта Лева река	113
Слика 8.31 SPH 2 модел прорачуна степена приноса материјала er у зони транспорта тецишта Лева река	114
Слика 8.32 модел прорачуна достигнутих максималних брзина течења тецишта Лева река.....	115
Слика 8.33 Упоредни приказ коначних дубина материјала на мјесту пресека у зони депозиције.....	117
Слика 8.34 Рекласификован модел разлика површина пре и после догађаја који указује на грешку у зони акумулације	118
Слика 9.1 Карта подложности на појаве нестабилности за подручје Општине Љубовија добијена АНР методом са положајем тецишта Селанаци иницијалне зоне која се активирала(из <i>Krušić, et al., 2017b</i>)	122

Списак табела:

Табела 2.1 Дио допуњене <i>Varnes</i> класификације према <i>Hungr et al (2014)</i>	6
Табела 2.2 Емпиријске зависности на основу мјерења на различитим примјерима тецишта у циљу утврђивања основних геометријских карактеристика (<i>Rickenmann (1999)</i>).....	9
Табела 2.3 Подјела нестабилности према брзини кретања по <i>Hungr et al (2014)</i>	12
Табела 4.1 Технички подаци снимања беспилотном летилицом на истражним подручјима Селанца и Лева реке.....	34
Табела 4.2 Маса одабраних узорка са терена и репрезентативног узорка Лева река ..	38
Табела 4.3 Одабрана количина узорка за добијање мјешане криве.....	40
Табела 6.1 Контролне тачке.....	54
Табела 6.2 Оријентационе тачке	54
Табела 6.3 Основне карактеристике геофизичких <i>ERT</i> истраживања по профилима...	57
Табела 6.4 Оријентационе тачке	63
Табела 6.5 Контролне тачке.....	64
Табела 7.1 Резултати мјерења у опиту одређивање специфичне тежине на узорку <i>St1</i>	67
Табела 7.2 Резултати опита конуса пенетрације рађени на узорку <i>S1</i>	69
Табела 7.3 Резултати опита конуса пенетрације рађени на узорку <i>S2</i>	69
Табела 7.4 Резултати опита конуса пенетрације рађени на узорку <i>S3</i>	69
Табела 7.5 Резултати опита конуса пенетрације рађени на узорку <i>S4</i>	69
Табела 7.6 Резултати опита конуса пенетрације рађени на узорку <i>S5</i>	69
Табела 7.7 Резултати опита конуса пенетрације рађени на узорку <i>S6</i>	70

Табела 7.8 Параметри конзистенције тла.....	70
Табела 7.9 Одређивање специфичне тежина на узорку финих честица коришћеном у опиту хидрометрсања на узорку тецишта Лева река	72
Табела 7.10 Резултати опита конуса пенетрације рађени на одабраном узорку тецишта Лева река	73
Табела 7.11 Параметри конзистенције тла на узорку тецишта Лева река	73
Табела 8.1 Најподеснији параметри у Моделу 2 са валидацијом	80
Табела 8.2 Улазни параметри за SPH I модел	83
Табела 8.3 Улазни параметри за SPH II модел.....	87
Табела 8.4 Улазни параметри за SPH III модел	91
Табела 8.5 Резултати калибрсања различитих параметара (Krušić, et al. (2017)).....	99
Табела 8.6 Најподеснији параметри у Моделу 2 са валидацијом (Krušić et. al., 2018)	100
Табела 8.7 Улазни параметри за Лева река SPH 1 модел	104
Табела 8.8 Улазни параметри за Лева река SPH 2 модел	108
Табела 8.9 Улазни параметри за Лева река SPH 3 модел.....	112
Табела 8.10 Поређење дубине депоновања, дубине ерозије и запремине материјала процијењене и измоделоване (Krušić et. al., 2018)).....	116

Симболи и ознаке

Q_p – проток материјала емпиријски утврђен

L – дужина транспорта материјала

V, M – запремина, магнитуда тежишта

H – висина покренутог материјала

τ – смичућа чврстоћа

τ_b – базни смичући напон

τ_y – критични напон у Бингамовом моделу

η, μ – вискозност

v – брзина кретања флуида

ρ – густина флуида

g – гравитационо убрзање

θ – нагиб терена у зони транспорта

σ_n – нормални напон

φ – угао унутрашњег трења

μ – фрикциони параметар

ξ – турбулентни параметар Воелмиев флуид

e_r – индекс приноса материјала

E_s – степен приноса материјала

K – емпиријска зависност код Егашире и Бланка

V_f – запремина депонованог материјала

V_o – запремина покренутог материјала

Скраћенице

ДМТ – дигитални модел терена

FEM – метод коначних елемената

FVM – метод коначних запремина

FDM – метод коначних разлика

RAMMS DBF – Rapid Mass Movement Software Debris flow

SPH – Smoothed Particle Hydrodynamics (метода моделовања флуидних дјелића)

1 УВОД

Тецишта су појаве нестабилности до сада мало истраживане у Србији. Процес течења тла се суштински разликује од процеса клижења у узроцима настанка, механизму кретања као и природним условима који детерминишу почетак процеса (настанак појаве). Услед великих брзина кретања и дужине транспорта покренутог материјала њихово активирање може довести до катастрофалних посљедица. Велики проблем у пракси код нас представља препознавање разлике између процеса течења од клижења, јер се геотехнички модел тецишта разликује суштински од клизишта, а самим тим и услови санације су знатно другачији.

Термин тецишта обухвата више подтипова, у зависности од врсте покренутог материјала. Како је праћење процеса ријетко могуће у моменту дешавања, механизам кретања, геометријске карактеристике и разорност појаве је нешто што се најчешће утврђује након смиривања процеса течења. У свијету се данас користи већи број нумеричких метода који се баве моделирањем-симулацијом процеса течења. Полазне основе за коришћење метода, а тиме и модела, јесу емпиријски утврђени параметри на изучаваним примјерима и емпиријске зависности добијене на основу анализа, у вези са основним геометријским карактеристикама, као што су: процјена максималне дужине транспорта материјала, максималне површине која може бити угрожена у подножју падине, брзина транспорта, висина наноса, количина материјала која доспије до подножја падине у зависности од процјењене запремине покренутог материјала и др. Највећи број нумеричких метода су базиране на механици континуума и примјени Методе коначних елемената (МКЕ) из којих су скорије развијени и модели базирани на кретању честица (SPH) погодни за процјену великих деформација у случају флуидног понашања материјала. Неки од софтвера су прилагођени за лаку употребу, али се и континуирано ради на развоју и побољшању нумеричких могућности у складу са потребама и комплексношћу реалних примјера. У случају великих деформација, појавама великих димензија и у циљу предвиђања хазарда, велику примјену су нашли тзв. модели пропагације (*runout*).

Тецишта нису била честа појава на нашим теренима, гдје су доминантно заступљени процеси клижења и одроњавања. Једна од већих појава које су се десиле у Србији је тециште Јовац, 1977., услед којег је приликом преграђивања корита Јовачке реке настало Јовачко језеро (Јевремовић и др., 2011). Након екстремних падавина које су се десиле у мају 2014. године, велики број тецишта се активирао са штетним посљедицама по материјална добра и становништво. Појава великог броја тецишта на ширем подручју (претежно у западном дијелу Србије гдје су падавине биле најинтензивније), иницирало је и потребу за детаљнијим истраживањем процеса течења и тецишта. Неке од појава тецишта су биле екстремних димензија и несвакидашње по количини покренутог материјала, као што су тециште Селанац и Лева река који су предмет изучавања у овој дисертацији.

1.1 ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Циљ истраживања у овој докторској дисертацији јесте моделовање пропагације тецишта примјеном различитих нумеричких метода. То подразумијева анализу различитих реолошких услова тј. претходно приказ теоријских основа реологије тла.

Оцјењивању погодног модела течења претходи детаљна анализа: дефинисање геометрије тецишта на терену са реконструкцијом догађаја, анализа природних услова и прикупљање геодетских подлога терена прије активирања тецишта, детаљно геодетско снимање терена након смиривања процеса, прикупљање података о узроцима активирања, прикупљање података о изазваним штетама од тецишта, примјена RAMMS софтвера базираног на Воелмиевом (Voellmy, 1955) реолошком моделу, примјена метода праћења флуидних честица Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) употребом различитих реолошких услова. Добар нумерички модел захтјева детаљна истраживања на терену. С обзиром на регистровање појава након догађаја који су се десили, циљ је да се повратном анализом уз коришћење одређених параметара у RAMMS И SPH, и поредећи их са теренским истраживањима, дође до најмјеродавнијих модела.

Регистровањем појава тецишта током теренских истраживања, евидентиран је велики број случајева са различитим карактеристикама, активиран у различитим стијенским масама. Тецишта Селанац, код Љубовије и Лева река код Краљева, су узета као погодни примјери за тестирање. Тециште Лева река, претходно је било предмет истраживања (Јевремовић и др, 2015), непосредно након поплава 2014., чијим активирањем је дошло до преграђивања ријеке и тиме нанијета штета на локалном путу. Тециште Селанац је несвакидашња појава по количини покренутог материјала (процијењено око 450.000 m³) и дужини транспорта материјала 1.1 km. Све то их чини комплексним примјерима за моделовање.

1.2 ПОЛАЗНЕ ХИПОТЕЗЕ

У складу са наведеним, полазне хипотезе у овој дисертацији се могу свести на:

- примјенљивост нумеричких метода моделовања на примјерима тецишта у Србији.
- поређење резултата различитих метода моделовања;
- постизање сличности моделованог процеса и реалног стања повратном анализом;
- предности и недостаци коришћених метода приликом одређивања отицаја;
- могућност примјене добијених резултата на сличним појавама у сличним подручјима;
- могућност коришћења добијених резултата за процјену хазарда од течења на неком ширем подручју;
- апроксимирање реалних материјала течења може се дефинисати једнофазним или двофазним конститутивним моделом.

1.3 САДРЖАЈ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Садржај докторске дисертације обухвата шест тематских цјелина. Након увода, у другој цјелини, дат је приказ основних теоријских поставки: дефинисања појма тецишта, како у нашем језику, тако имајући у виду и оно што овај појам подразумијева узимајући у обзир свјетске класификације појава нестабилности; карактеристике тецишта у погледу елемента и морфометријских карактеристика, врсте покренутог материјала, примјера из праксе који показују различите типове појава

Дат је посебан осврт на реолошке карактеристике материјала и везу са конститутивним моделом тецишта. Дефинисани су основни принципи моделовања

тецишта са прегледом нумеричких метода и софтверских програма које се користе у свијету до данас.

У трећем поглављу, описана су подручја истраживања тецишта Селанац и Лева река, са основним геоморфолошким и геолошким карактеристикама ширег подручја.

У четвртом поглављу описане су методе истраживања тецишта која обухватају: методе даљинске детекције, геофизичка истраживања, одабир узорака са терена и лабораторијска испитивања на узорцима.

У петом поглављу су детаљно објашњени принципи моделовања у програмима RAMMS и SPH GeoFlow.

У шестом поглављу су приказани резултати истраживања који су допринијели одређивању основних морфометријских карактеристика тецишта.

У седмом поглављу детаљно је дат приказ резултата истраживања на две студије случаја, прво за тециште Селанац а затим за тециште Лева река, док се подпоглавља односе на резултате појединачних примјених метода. Финални резултати приказују резултате симулација процеса течења по три параметра: 1) финалне дубине покренутог материјала, 2) количина еродованог материјала и 3) максималне брзине у фронталном дијелу тока. Финални резултати у RAMMS програму обухватају три модела за Селанац и два модела за Леву реку. Финални резултати у SPH обухватају по три модела за оба тецишта на основу примјене различитих параметара. Коначно, дат је приказ валидације модела са теренским истраживањима и анализом постојећих података.

У осмом поглављу дати су резултати реолошко механичких карактеристика узорака са терена одређени лабораторијским испитивањима.

У деветом поглављу дата је дискусија добијених резултата са предлогом даљих истраживања. Дат је посебан осврт на будућа истраживања моделовања пропагације тецишта у региону на основу добијених нестабилних подручја примјеном метода процјене угрожености подручја у регионалној размјери.

У десетом поглављу дат је закључак у односу на постављене хипотезе са оцјеном валидности добијених резултата.

У једанаестом поглављу приказан је преглед коришћене литературе.

2 ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

Тецишта¹ су дефинисана у досадашњим класификацијама појава нестабилности, почев од Varnes, 1978, Cruden and Varnes, 1996, до оних касније детаљно обрађених на основу врсте материјала и механизма кретања који подразумевају више подтипова (Hungr et al., 2014). Многи аутори су дали дефиницију појма тециште (у енг. *debris flow*) (Varnes, 1978; Hutchinson, 1988; Pierson, 2005; Pierson and Costa, 1987; Coussot and Meunier, 1996; Hungr et al., 2001, Hungr et al., 2014). Генерално, тецишта можемо дефинисати као *појаве екстремно брзог покретања несортираног материјала дробине/тла услед засићења водом, најчешће као последица велике количине падавина*. Најчешће садрже хетероген материјал, од ситнозрног (глина, прашина, пијесак), до крупнозрног (шљунак, дробина и већи одломци). Потребно је нагласити да се у механици тла у погледу гранулометријског састава код нас дробином назива крупнозрни материјал величине од 60-200 mm (енгл. *cobbles*). Крупније од тога су одломци (енгл. *boulders*). Појам *debris*, у класификацији тецишта, означава хетероген материјал покренут течењем гдје је удио честица већих од 2 mm преко 20%.

Код нас, једна од дефиниција тецишта се може наћи код Влаховића, 1978 код кога је течење:

„кретање знатно расквашених делова везаних и невезаних седимената у површинској зони падина“, док је тециште "део терена који је захваћен процесом кашастог течења, или део терена са сачуваним структурним и рељефним одликама створеним процесом течења“.

Према Сунарић, 2017 дата је дефиниција:

„Тецишта представљају специфичне покрете маса на падинама која се дешавају у условима потпуног водозасићења средине. Због тога представљају прелазне појаве између брзих клижења и бујичних токова“.

Досадашње дефиниције у нашој литератури се нису базирале на детаљнијој класификацији тецишта, на шта се ослањају новије свјетске класификације. Код Hutchinson, 1988 се наводи да су то:

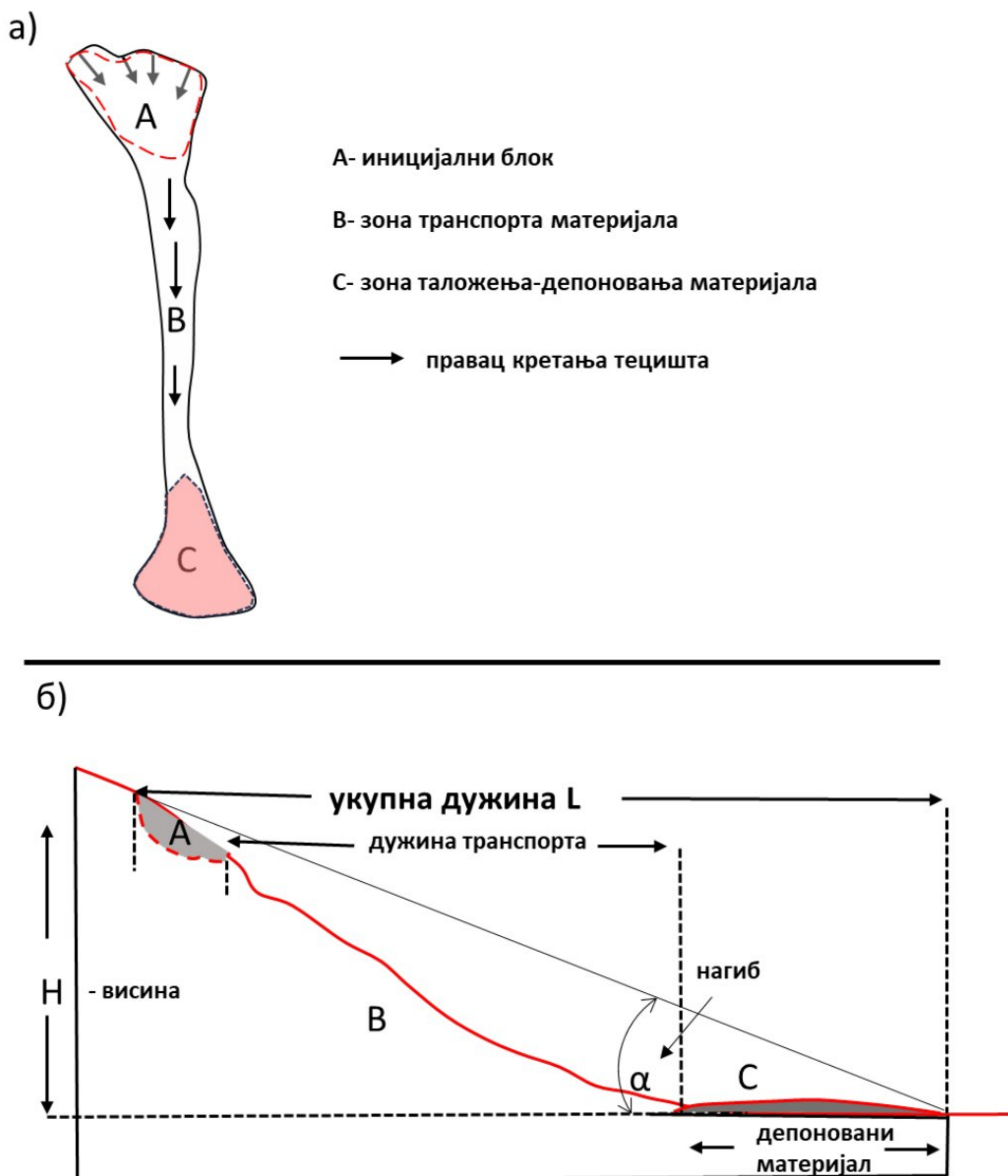
„...екстремно брзи токови влажне дробине. Ова потенцијално веома деструктивна појава нестабилности активира се у планинским подручјима, гдје услед изненадног прилива воде путем падавина или отапањем снијега може покренути површински материјал развијајући се у тецишта“.

Ове екстремно брзе појаве под утицајем гравитације су у стању да транспортују велику количину материјала и по неколико km, укључујући и дрвеће, различит органски материјал, уз појаву еродовања подлоге по којој долази до течења материјала. Одликују се знатно већом дужином транспорта у односу на ширину и дубину.

¹ Појам течења као механизма кретања у енглеском језику се назива *flow*, док материјал може бити *debris*, *earth* и *rock*, преведено на наш језик - течење дробине, течење тла или течење стијена.

2.1 ОСНОВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ТЕЦИШТА

Основни геометријски елементи тецишта су: дужина, ширина, висина, површина, запремина, као и просјечан нагиб површи по којој је дошло до течења материјала. Међутим, поред основних геометријских елемената тецишта потребно је дефинисати: 1) иницијалне зоне (једне или више њих), 2) зоне транспорта, и 3) зоне депозиције. Иницијална зона представља зону гдје је дошло до појаве нестабилности, односно иницијалног одвајања блока, гдје можемо регистровати ожиљак (попут чеоног ожиљка код клизишта). Није ретко да кретање почиње клижењем материјала које након одређеног времена почиње да тече и под утицајем гравитације он се транспорuje низ падину течењем. Зона депозиције је карактеристична по формирању препознатљивог лепезног облика. Материјал се зауставља на мањим нагибима терена, најчешће при дну падине. У литератури се могу наћи подаци да су то често углови $< 5^\circ$ нагиба. Активирање течења започиње у једној или више иницијалних зона. Материјал се надаље креће у виду тока дуж зоне транспорта све до зоне депоновања материјала – зона депозиције. Скица основних елемената и морфометрије тецишта приказана је на слици 2.1.



Слика 2.1 а) основни елементи тецишта у плану и б) морфометријске карактеристике у пресеку

Врста покренутог материјала

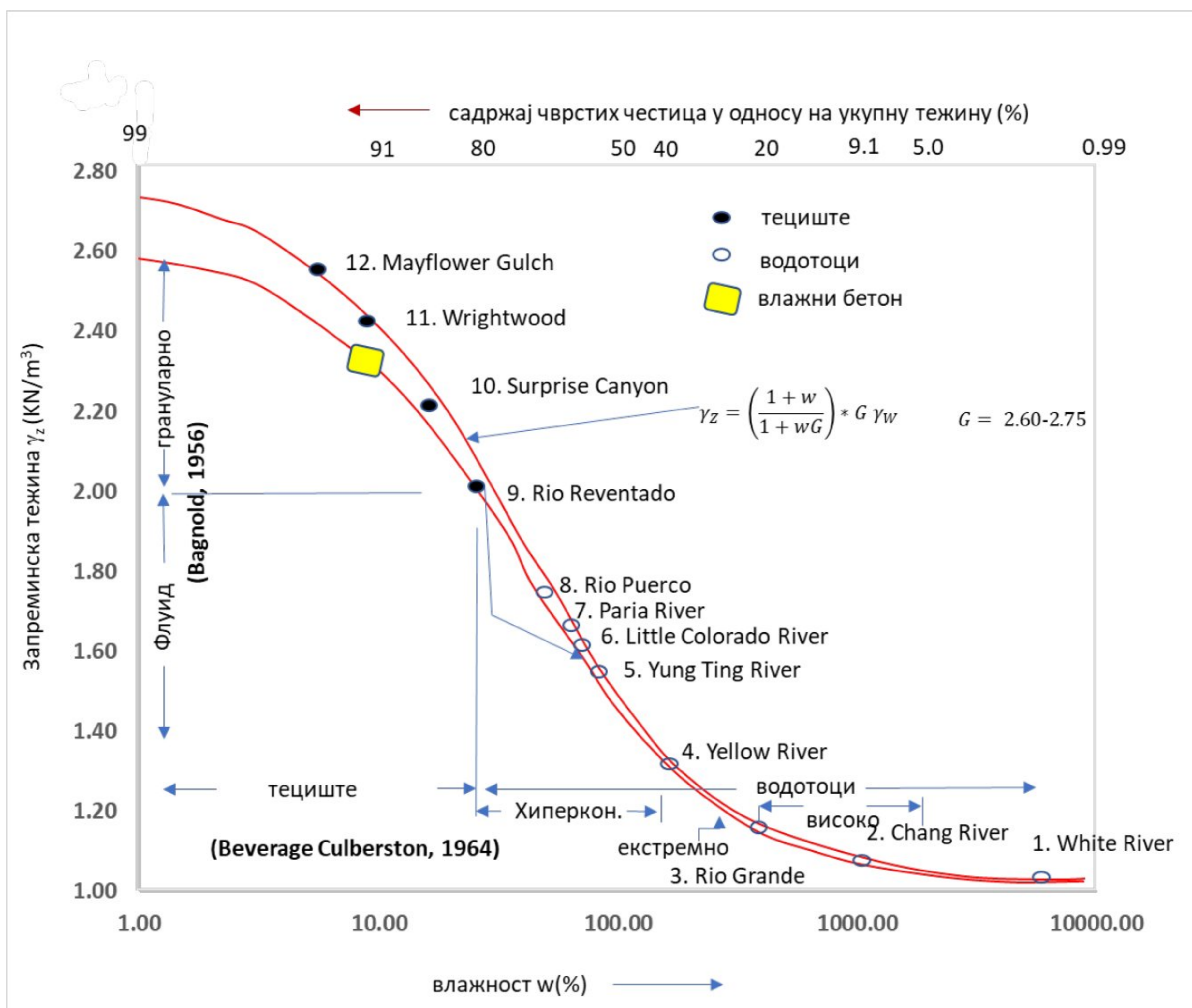
У циљу прецизнијег дефинисања типова појава нестабилности, најподеснија допуна за класификацији је увођење геотехничких термина покренутог материјала. У табели 2.1 приказан је дио допуњене Varnes, 1978 класификације од стране Hungr et. al., 2014, чиме се покренути материјал описује карактеристикама које се одређују на терену, класификацијом тла према USCS и одређивањем параметара конзистенције у лабораторији.

Табела 2.1 Дио допуњене Varnes класификације према Hungr et al (2014)

Врста материјала	Опис	Поједностављено објашњење препознавања материјала на терену	Одговарајуће класе тла према USCS	Лабораторијски параметри (уколико су доступни)
стијена	чврста	ломи се чекићем		UCS > 25 Мра
	слаба	може се загребати ножем		2 < UCS < 25 Мра
глина	крута	пластично	GC, SC, CL, MH, CH, OL, OH	$I_p > 0.05$
	мека			
	осјетљива			
прашина, пијесак, шљунак и одломци	суво	непластично (или веома ниска пластичност), сортиран. Прашина није видљива голим оком	ML	$I_p < 0.05$
	засићено		SW, SP, SM	
	дјелимично засићено		GW, GP, GM	
дробина	суво	Ниска пластичност, несортиран материјал	SW-GW	$I_p < 0.05$
	засићено		SM-GM	
	дјелимично засићено		CL, CH, CM	

Има више подјела тецишта које су прихваћене, једна од основних подјела тецишта би била према садржају материјала на *течење дробине* и *течење тла* (Varnes, 1978). Као гранични параметар у дефинисању течења материјала је проценат садржаја дробине од 20%; уколико је садржај крупних одломака већи од 20% од укупног садржаја материјала, у питању је течење дробине, а уколико је садржај мањи од 20%, ради се о течењу тла. Према Takahashi, 2007 дата је слична подјела на: *блоковске (stony)*, *блатне (muddy)* и *вискозне (viscous)* токове, комбинујући карактер тока и величине покренутог материјала.

Код Hutchinson, 1988 је по први пут дат преглед различитих појава водотока и тецишта у свијету са односом вриједности запреминске тежине, концентрације седимената и влажности. Поредиши стање материјала, налази сличност стања материјала који тече са стањем „влажног бетона“ (Слика 2.3).



Слика 2.2 Дијаграм зависности садржаја чврстих честица, влажности и запреминске тежине на различитим примјерима у свијету; од водотока до тецишта (Hutchinson, 1988)

Добар примјер класификације на трофазном дијаграму се може наћи код Абансо, С. (2013) према Phillips and Davies (1991), на основу прикупљених података више карактеристичних појава нестабилности. На трофазном дијаграму се приказује однос садржаја чврсте и течне фазе који резултирају одговарајућој појави нестабилности. На слици 2.4 је приказан модификован модел са дефинисањем фазности система о којима ће бити више ријечи у поглављу 4. Може се рећи према Hutchinson, 1988 и Phillips and Davies, 1991, да су тецишта „прелазне“ појаве нестабилности између хиперконцентрисаних токова и клизишта (Слика 2.4).



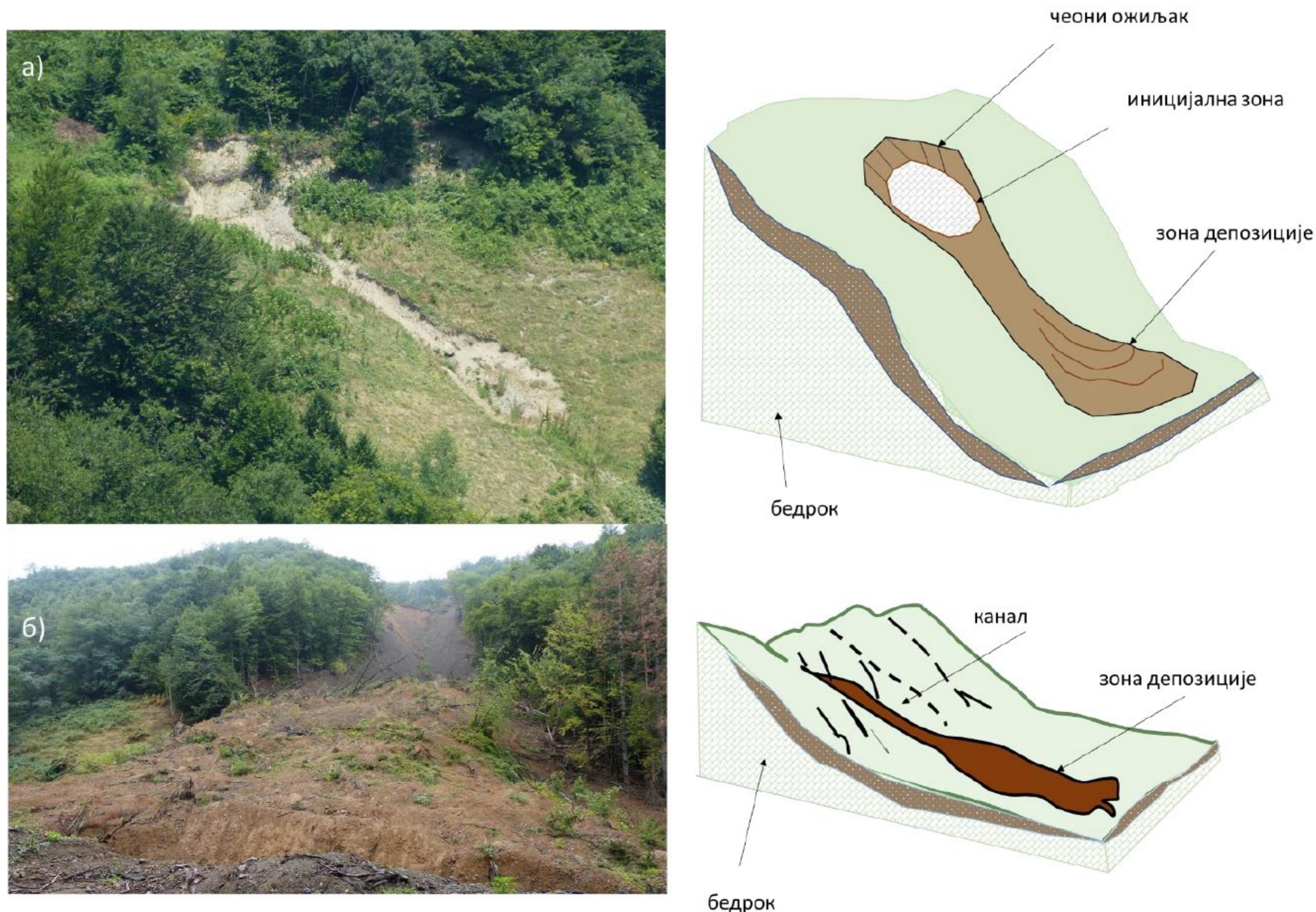
Слика 2.3 Трофазни дијаграм на основу садржаја честица према Phillips and Davies (1991), из Abanco, C. (2013), модификован

Разлика у тециштима се у основи прави у односу на процентуално учешће величине честица у флуиду. На трофазном дијаграму се види како се ток понаша у присуству када долази до појаве нестабилности: код финозрних честица (< 0.063 mm према ISO стандарду) у почетку као суспензија, а са већом концентрацијом долази до течења тла или комбинованог процеса. Са аспекта моделовања, ови процеси се могу дефинисати једнофазним моделима.

Са десне стране се види утицај дјеловања воде на крупнозрно тло: у почетним фазама материјал је ношен током, да би са већом концентрацијом крупнозрног материјала дошло до течења дробине или лавина. У овом случају, доминантно је оптерећење флуида на подлогу чиме долази до еродовања, чиме се дешава константан принос материјала, па можемо говорити о течењу дробине.

Механизам кретања

Према Varnes, 1978 два основна типа тецишта се могу издвојити на основу морфологије терена: 1) тецишта формирана на стрмим падинама без иницијалне депресије у терену, и 2) тецишта формирана у јаругама, уз могуће присуство повремених токова, какав је случај са тециштима која су предмет ове дисертације. Неки од примјера тецишта за ова два карактеристична типа код нас у Србији, који су регистровани на терену, приказани су на слици 2.2.



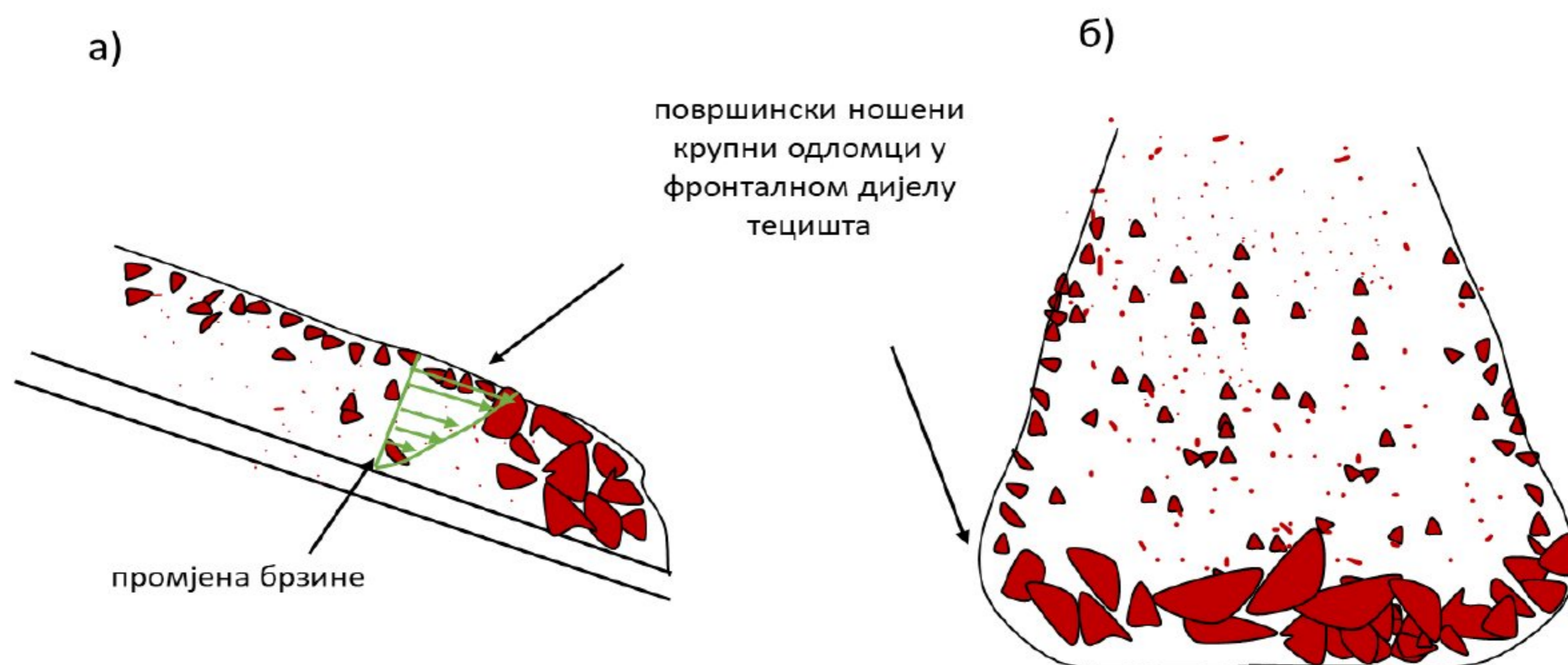
Слика 2.4 Примјери тецишта са скицама основних геометријских елемената: а) плитко тециште регистровано у Бајиној Башти на стрмој падини б) тециште Лева река код Краљева формирано у јарузи

На основу бројних досадашњих истраживања, података прикупљаних на терену, мјерења у лабораторији, урађен је велики број корелација везан за основне елементе тецишта. Почев од Iverson-а (1997) преко Rickenmann-а (1999) , који је дао корелацију са падавинама, дат је низ формула између неких основних геометријских параметара попут: запремине, дужине транспорта, протока, угроженог подручја итд. Неке од зависности могу се наћи код Rickenmann (1999) и приказани су у табели бр.2.2.

Табела 2.2 Емпиријске зависности на основу мјерења на различитим примјерима тецишта у циљу утврђивања основних геометријских карактеристика (Rickenmann (1999))

Параметри	Формула
Разлика у надморској висини	H
Запремина покренутог материјала	V
Дужина транспорта	L
Површина зоне депонованог материјала	C
Нагиб	$\tan \beta = H/L$
Проток	$Q_p = 0.1 \cdot V^{0.833}$
Дужина транспорта	$L = 1.03 \cdot V \cdot 0.105 \cdot H$
Минимални нагиб у зони транспорта	$\tan \beta_{min} = 0.20 C^{-0.26}$

Процес течења дробине може се дефинисати као екстремно брзо кретање изузетно хетерогеног материјала, дјелимично или потпуно засићеног водом. Уз кретање материјала карактеристично је и еродовање подлоге дуж зоне транспорта, чиме се количина материјала знатно повећава. У покренути материјал, поред дробине, принос чине и откинута стабла дрвећа, ношени одломци разрушених објеката што ове појаве чини много разорнијим од неких других. Карактеристике тецишта су и велика дужина транспорта у односу на ширину и дубину тецишта. Карактеришу се као плитке појаве, али постоје и примјери када се радило о много већим дубинама (преко 30 m дубине клижења у иницијалној зони, и до 12 m дубине еродовања у зони транспорта), какав је и случај тецишта која су се активирала у Србији 2014. године. Приказ транспорта крупних одломака материјала код течења дробине на површини и бочним странама дат је на Слици 2.5.



Слика 2.5 Приказ тецишта а) у пресјеку и б) у плану са карактеристичним таложењем материјала

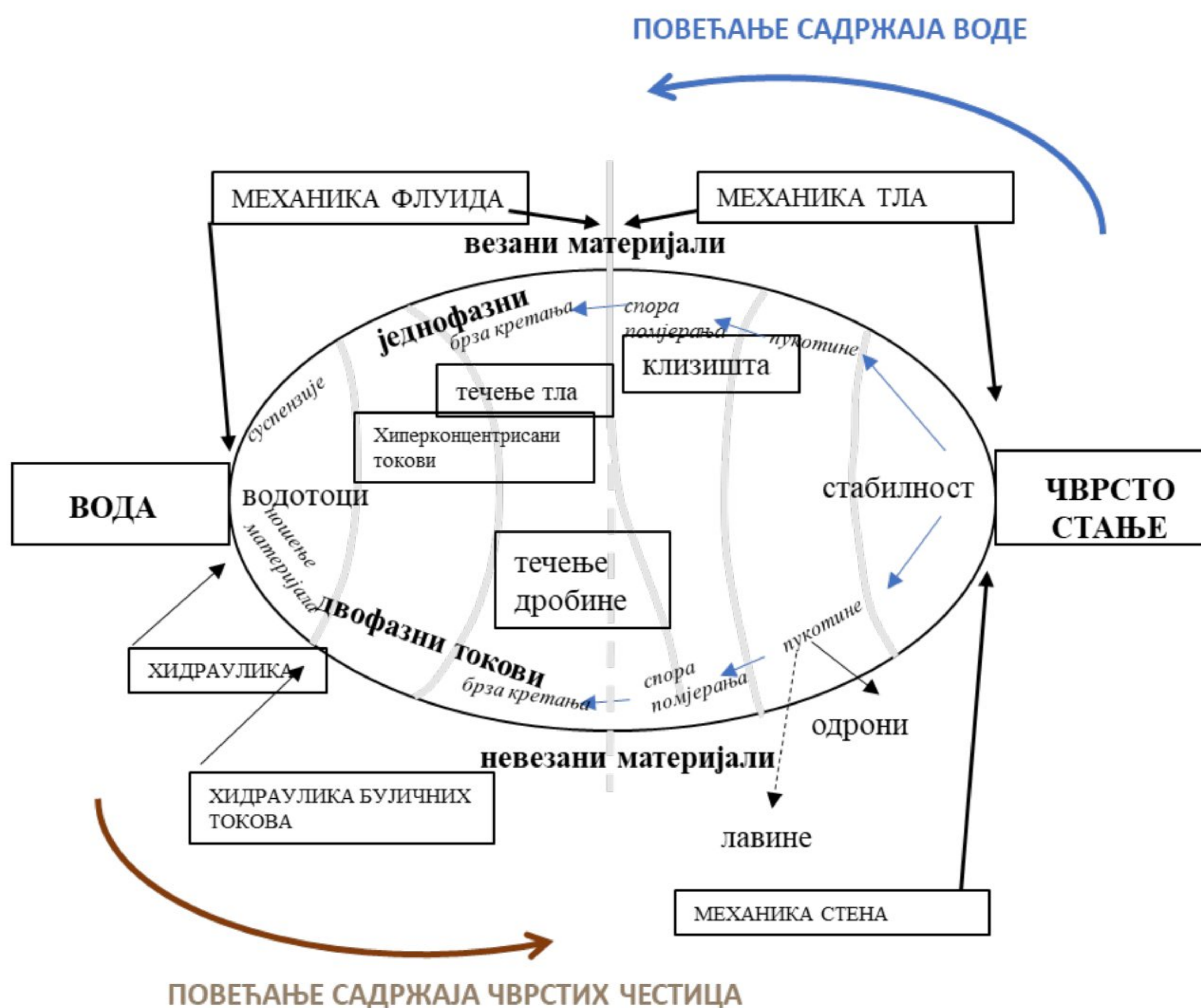
Велики блокови се транспортују флуидом са финозрним честицама (Hampton, 1979, Davies, 1986, Iverson, 2014). Када су позиционирани у фронталном дијелу ношени су флуидом, па дјелимично „плутају“ чиме се формира инверзна сегрегација материјала у зони депозиције – на површини су крупни одломци, док су ситне честице исталожене на дну (Слика 2.6).



Слика 2.6 Почетак зоне депозиције тецишта Селанац

Течење тла се односи на токове тла високе пластичности коју карактерише велика количина воде у односу на количину материјала. Одликује их спорије дренирање (већа концентрација глиновите компоненте), што најчешће резултира већим дужинама транспорта материјала и мањим нагибом у зони депоновања. Граница између ова два типа тецишта је најчешће постепена, одликује се бољом сортираношћу материјала у односу на течење дробине.

Изучавање тецишта, у циљу дефинисања геотехничког модела, подразумејева и изучавање области механике флуида. Веза између различитих појава нестабилности у зависности од врсте материјала и степена засићења, приказана је на Слици 2.7, према илустрацији Coussot i Meunier, 1996, са допуном према Locat and Lee (2005) чиме је и дефинисан домен бављења процесима у механици флуида и механици чврстог стања.



Слика 2.7 Приказ механизма настанка појава нестабилности према Coussot i Meunier, 1996, са подручјем истраживања различитих дисциплина према Locat and Lee (2005)

Тецишта се најчешће активирају као последица кумулативних или изненадних интензивних падавина, а понекад након отапања снијега на стрмим планинским падинама. Суштински се разликују од процеса клижења по томе што материјал не клизи по предефинисаној равни клижења, већ „тече“ усљед дјелимичне или потпуне засићености материјала (Coussot i Meunier, 1996).

Брзина кретања материјала

Штета изазавана тециштима је често јако велика, с обзиром да су у питању појаве веома великих до екстремних брзина, и мале могућност предвиђања активирања појаве. Један од примјера у свијету је трагедија која се десила 1999. године у Варгасу (Венецуела), која је за посљедицу имала 30.000 жртава, и разарање цијелог града (Pérez, 2001).

Према Hungr et. al., 2014 дата је подјела брзине кретања појава нестабилности приказана у табели 2.3.

Табела 2.3 Подјела нестабилности према брзини кретања по Hungr et al (2014)

Класа брзине	Опис	Брзина (mm/s)	Типична брзина
7	Екстремно брзо	5×10^3	5 m/s
6	Веома брзо	5×10^1	3 m/min
5	брзо	5×10^{-1}	1.8 m/h
4	средње	5×10^{-3}	13 m/мјесечно
3	споро	5×10^{-5}	1.6 m/годишње
2	Веома споро	5×10^{-7}	16 mm/годишње
1	Екстремно споро		

Код аутора је направљена разлика у дефинисању брзине код клижења и течења материјала (Pierson and Costa, 1987, Coussot i Meunier, 1996, Jakob, M., & Jordan, P., 2001). Према Coussot i Meunier, 1996, код тецишта се приликом процјене брзине кретања не узима у обзир брзина након заустављања што је случај са клизиштима. Са друге стране, за клизишта се узима у обзир дужи период кретања почев од активирања до процјене кретања у будућности. Код Takahashi, 2007, се могу наћи сумирани подаци да се просјечне брзине тецишта крећу од 0.5–20 m/s, слични подаци се могу наћи код Jakob, M., & Jordan, P. (2001) гдје је ранг вриједности средњих брзина од 2–20 m/s. Много веће измјерене брзине се односе на стјеновите лавине (*rock avalanches*) које могу достићи и до 3 пута веће средње брзине (Sosio et al, 2008).

2.2 ОСНОВНА РЕОЛОШКА СВОЈСТВА МАТЕРИЈАЛА

Како би се приступило дефинисању основних геомеханичких параметара тла склоног течењу, неопходно је кренути од реологије тла и основних стања из којих се изводе други конститутивни модели примјениви на различите врсте тецишта.

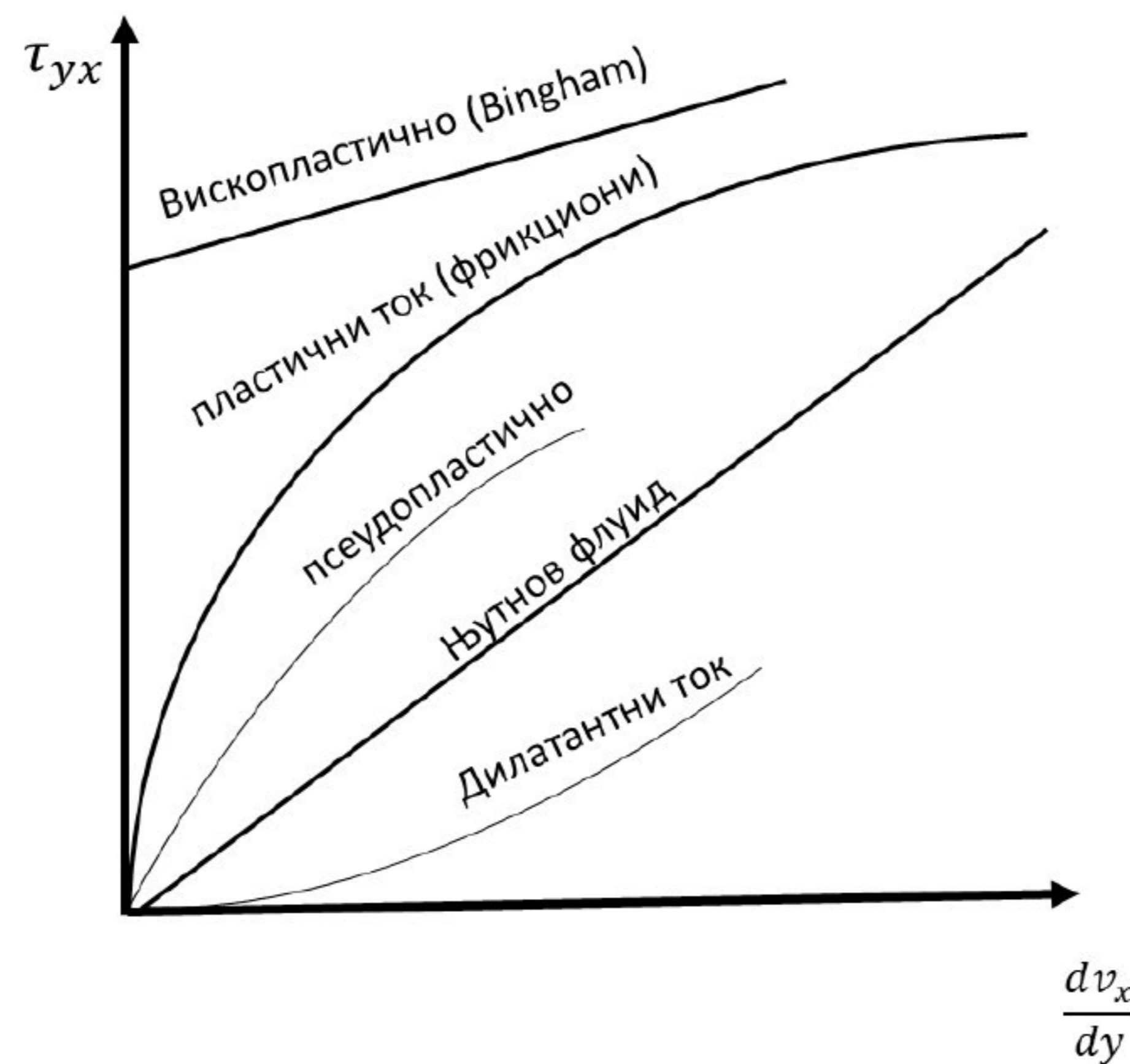
Реологија се дефинише као „теорија деформисања и течења материјала“, тј. бави се дефинисањем везе напона и деформација (течење материјала). Тако и у механици тла, посебну област заузима бављење реологијом тла, тј. дефинисање параметра који доводе до понашања тла као флуида. Код нас неке теоријске основе бављења реологијом кохерентног тла се могу наћи код Цветковић, (1977), гдје је дат осврт на испитивање реологије тла у лабораторијским условима.

Примјена реолошких знања, надаље и у моделовању геодинамичких процеса, има суштински значај. Посебан значај има код дефинисања процеса течења, од услова активирања до развоја процеса. Код нас је ово поље истраживања до сада прилично неистражено и захтјева да се крене од неких основних параметара дефинисања понашања тијела.

Главна реолошка својства се могу подијелити на фундаментална и комплексна (Цветковић 1977), па су фундаментална својства: еластичност, вискозност, пластичност и чврстоћа. Сходно томе основна идеална тијела су: идеално еластично (Хуково тијело), вискозан материјал (Њутново тијело), и савршено пластичан материјал (Saint-Venant-ово тијело).

Комплексна својства, су реални (реолошки) системи који настају у комбинацији наведених стања: 1) еластопластична 2) вископластична 3) хипопластична 4) генерално пластична. Код појава нестабилности говоримо о једном од реалних реолошких модела, на које се касније ослањају неки примијењени реолошки модели у области моделовања тецишта (слика 2.8).

Генерално се реолошки модели могу поделити на: њутновске и не-њутновске флуиде (*Newtonian and non-Newtonian*). За разлику од њутновских флуида, постоје у природи нењутновски флуиди који не прате линеарну везу између напона смицања и деформације описану Њутновим флуидним моделом. Умјесто тога, њихова вискозност опада како брзина смицања расте. На слици 2.8 дат је приказ различитих модела у односу на класични Њутнов флуид, који ће даље бити објашњени у тексту.



Слика 2.8 Упоредни напонско-деформацијски дијаграм њутновских и не-њутновских течности

Код псеудопластичних флуида, како брзина смицања расте, вискозност течности се смањује. Другим ријечима, течност постаје мање отпорна на проток како је при већој брзини смицања. Ово понашање често се повезује са разбијањем или поравнавањем унутрашњих структура унутар течности приликом смицања.

У дилатантном флуиду, како се брзина смицања (брзина којом слојеви течности клизе један преко другог) повећава, тако се повећава и вискозност течности. Тиме течност постаје гушћа и отпорнија на проток при већим брзинама смицања. Ово понашање често се повезује са отварањем структуре течности или повећаним раздвајањем честица унутар течности стога се користи израз „дилатантно“. Насупрот псеудопластичним флуидима, дилатантни флуиди постају гушћи под притиском. Типично понашање се односи на понашање бетона у првим фазама мијешања.

Такође према Jan и Shen (1997), подјела тецишта је направљена на основу режима течења на шест категорија: вискозне (њутовске), колизионе, фрикционе, фрикционо-колизионе, вископластичне и вископластично колизионе.

2.2.1 Њутнов флуид

Њутнов флуид, или једноставно вискозно тијело, је основни модел вискозног флуида, гдје имамо линеарно деформисање на бази унутрашњег трења, у овом случају вискозности. Њутнов флуид је једноставан примјер флуида гдје је смичућа чврстоћа директно пропорционална коефицијенту вискозности μ и промјени градијента брзине:

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial z} \tag{2.1}$$

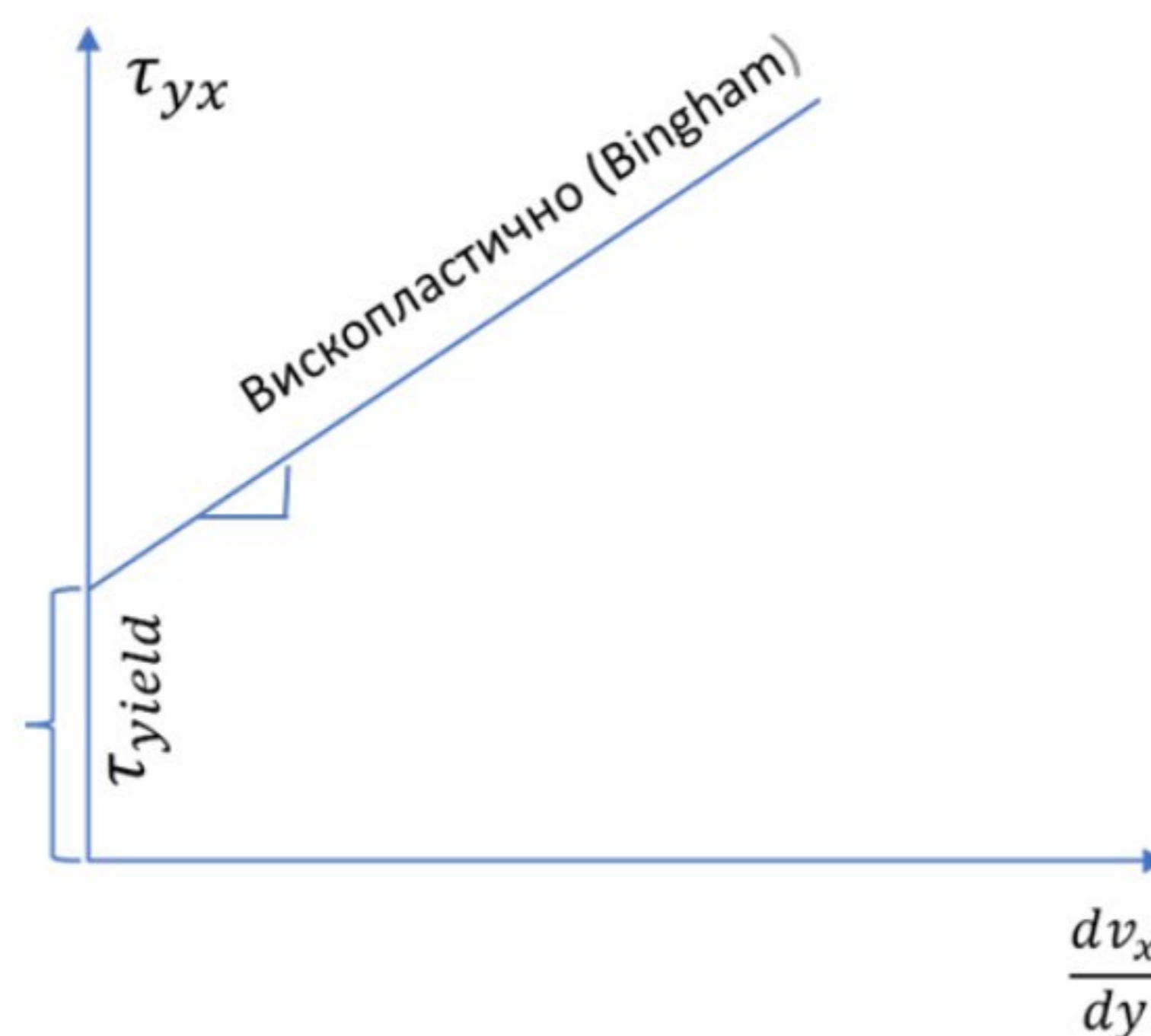
гдје је μ коефицијент вискозности у Pa*s, док се други параметар односи на градијент брзине $\frac{\partial v}{\partial z}$. Типичан примјер Њутновог флуида је кретање воде.

2.2.2 Бингамов модел (Bingham, 1922)

Као што је већ наглашено, многи флуиди се не могу дефинисати Њутновим тијелом. Остали флуиди (не-њутовски) се називају још и реалним системима. Међу њима је и Бингамов модел (Bingham, 1922) који спада у вископластичне моделе.

Реални или не-њутовски флуиди не подлијежу основним карактеристикама флуида, већ до покретања долази као резултат отпора на спољне силе. Као и код класичних вискозних тијела, узајамно се помјерају слојеви у паралелним површинама. У том случају, вискозност и температура нису константни параметри, већ су у функцији напрезања па се може говорити о ефективној вискозности η .

Код Бингамовог флуида, уводи се појам граничне вриједности, испод које нема појаве течења, тј. тијело мирује. Гранична вриједност је код нас преведена и као „граница течења“ (Цветковић, 1977), која нема везе са параметром класификације у механици тла, већ се односи на овај конкретан примјер. Најједноставније речено, тијело се понаша пластично до одређеног момента кад добија вискозан карактер (Слика 2.9).



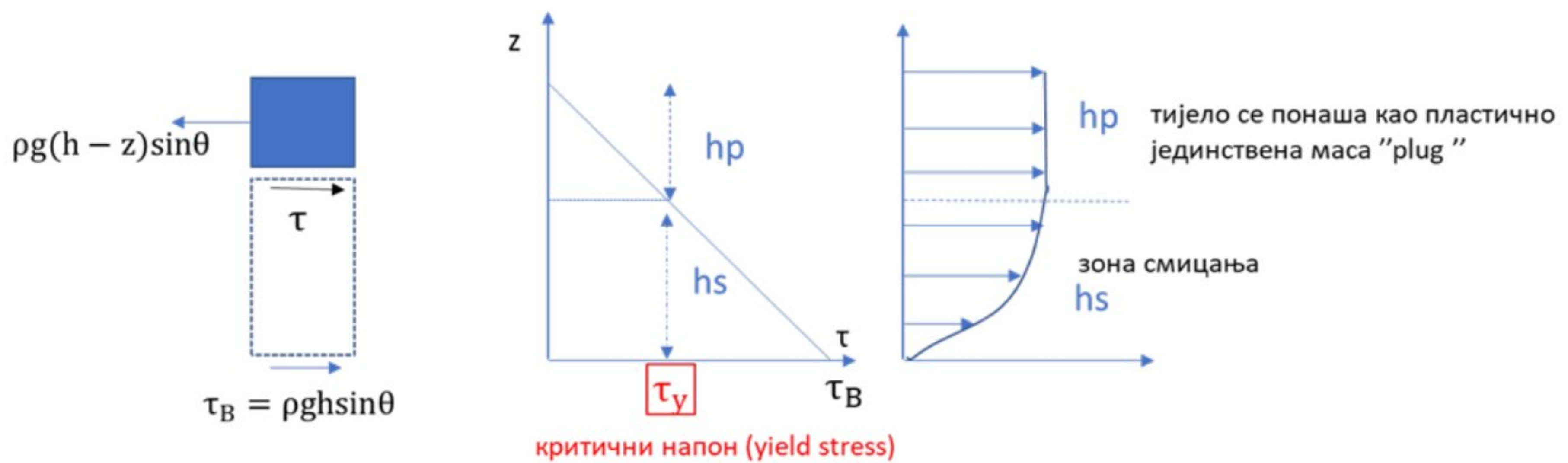
Слика 2.9 Бингамов (Bingham, 1922) критеријум течења

Критеријум течења је дефинисан као:

$$\tau = \tau_y + \eta \frac{dv_x}{dy} \tag{2.2}$$

гдје је τ_y -гранични напон течења (*yield stress*), η – ефективна вискозност.

Овај реолошки модел нашао је примјену код дефинисања понашања течења тла. Дефинисањем граничне вриједности, објашњавају се услови заустављања течења и појава. Код тецишта са овим реолошким моделом, карактеристична је појава понашања гдје се испод граничне вриједности тијело понаша као „чеп“ (*plug*), најчешће на површини тока, док се изнад те вриједности улази у зону смицања (Слика 2.10.).



Слика 2.10 Бингамов модел понашања приликом течења

У дефинисању материјала које третирамо као течење тла, овај реолошки модел се често употребљава. Доминантни садржај глиновите компоненте у неком реалном тецишту најчешће резултира понашањем које је описано Бингамовим моделом.

2.2.3 Фрикциони модел

Данас је развијена посебна област реолошких модела који спадају у фрикционе моделе, којима се дефинише фрикциони коефицијент. Постоји више различитих приступа, а међу првима се може наћи код Voellmy, 1955, затим Pouliquen and Forterre, 2002, који су први дефинисали аналитичко рјешење дефинисања покретања материјала на примјеру снијезних лавина, из којег је касније развијен реолошки модел подобан за грануларне токове.

Основни фрикциони реолошки закон генералног вископластичног модела је развијен од стране Chen and Ling, 1996. Модел није лако примјењив у нумеричком приступу моделовања тецишта, из њега је развијен поједностављен фрикциони модел према следећој формули:

$$\tau_B = \rho gh \cos \theta \tan \varphi \tag{2.3}$$

гдје је $\rho gh \cos \theta$ нормални напон на површини базе (некретаног дијела терена који се налази испод флуида).

2.2.4 Воелмиев модел (Voellmy, 1955)

Воелмиев (Voellmy, 1955) реолошки принцип је сродан фрикционом реолошком закону, са тим што се узима у обзир и турбулентни параметар. Први пут је употребљен за моделовање снежних лавина. Касније је овај приступ нашао примјену и у моделовању тецишта и лавина. Има исте компоненте као фрикциони модел, па једначина базне смичуће чврстоће се апроксимира као:

$$\tau_B = \rho g h \cos \theta \mu + \frac{\rho g v^2}{\xi} \quad (2.4)$$

гдје је ξ турбулентни параметар, изведен из основних хидрауличких релација и одређује турбулентни карактер тока, а изражава се у m/s^2 .

На примеру фрикционог и Воелмијевог модела, видимо први дио који се односи на једначину Кулоновог критеријума лома:

$$\tau_B = \sigma_n \tan \varphi = \rho g H \cos \theta \tan \varphi \quad (2.5)$$

гдје је $\tan \varphi$ фрикциони параметар μ .

2.3 ДЕФИНИСАЊЕ ПРИНОСА МАТЕРИЈАЛА (*ENTRAINMENT*)

Принос материјала (*bed entrainment*) која се дешава на контакту флуида и базе је процес којим долази до повећања запремине покренутог материјала, усљед еродовања материјала подлоге у зони транспорта. Дуж зоне транспорта одношење материјала је кључно у контроли динамике развоја процеса течења како је утврђено посматрањем разних појава течења, стога је неопходно узети у обзир ове ефекте.

Основни параметар који контролише прорачун је степен приноса (*erodibility index* e_R) који представља промјену дубине (z) у односу на вријеме трајања процеса (t) према формули:

$$e_R = - \frac{\partial z}{\partial t} \quad (2.6)$$

Степен приноса материјала e_R зависи од неколико варијабли: структуре тока, нагиба падине, величине и густине чврстих одломака, степена zasiћености и ефективних притисака на површини тока. Како би се на најбољи начин моделовала еродибилност, различите параметре (као што је брзина и висина тока, базни порни притисак и реолошке карактеристике тока уколико је покренута маса другачија од еродованог материјала) потребно је модификовати у сваком временском интервалу.

На основу ових назнака, одређује се степен пораста запремине (E_s) дефинисаног у литератури за различите типове течења. Овдје ће бити дефинисано неколико највише коришћених закона ерозије који су имплементирани у нумеричким моделима данас.

За разлику од клизишта, гдје се јасно одваја тијело клизишта од некретане подлоге, и у фази активног кретања не долази до увећања кретане масе, приликом течења материјала усљед еродовања подлоге може доћи до приноса материјала у односу на покренути материјал у иницијалној зони. Количина еродованог материјала знатно

утиче на развој процеса. Дефинисани ерозиони закони описују степен еродовања базе, па према томе могу лако бити имплементирани у моделе интеграљене по дубини.

2.3.1 Модел ерозије по Хунгру (Hungr et al. (2005))

Према Hungr et al. (2005) дефинисан је алгоритам којим укупна запремина флуида расте сходно одговарајућем степену приноса материјала e_R . Степен приноса материјала по Hungr et al. (2005) се дефинише формулом:

$$e_R = E_s h \bar{v} \quad (2.7)$$

што указује на директну пропорционалност између степена приноса еродованог материјала, са једне стране, и производа осредњене брзине по дубини (\bar{v}) и покренуте дубине (h) са друге. Степен повећања запремине материјала E_s може бити одређен директно из иницијалне запремине при уласку у ерозиону зону (запремина V_0), гдје је још позната и финална запремина укључујући постојећу зону ерозије (V_f) и дужина транспорта зоне еродовања (l):

$$E_s = \frac{\ln\left(\frac{V_f}{V_0}\right)}{l} \quad (2.8)$$

Овај модел прорачуна је коришћен за моделовање ерозије у SPH моделима тецишта у дисертацији.

2.3.2 Егаширин модел (Egashira, 1993)

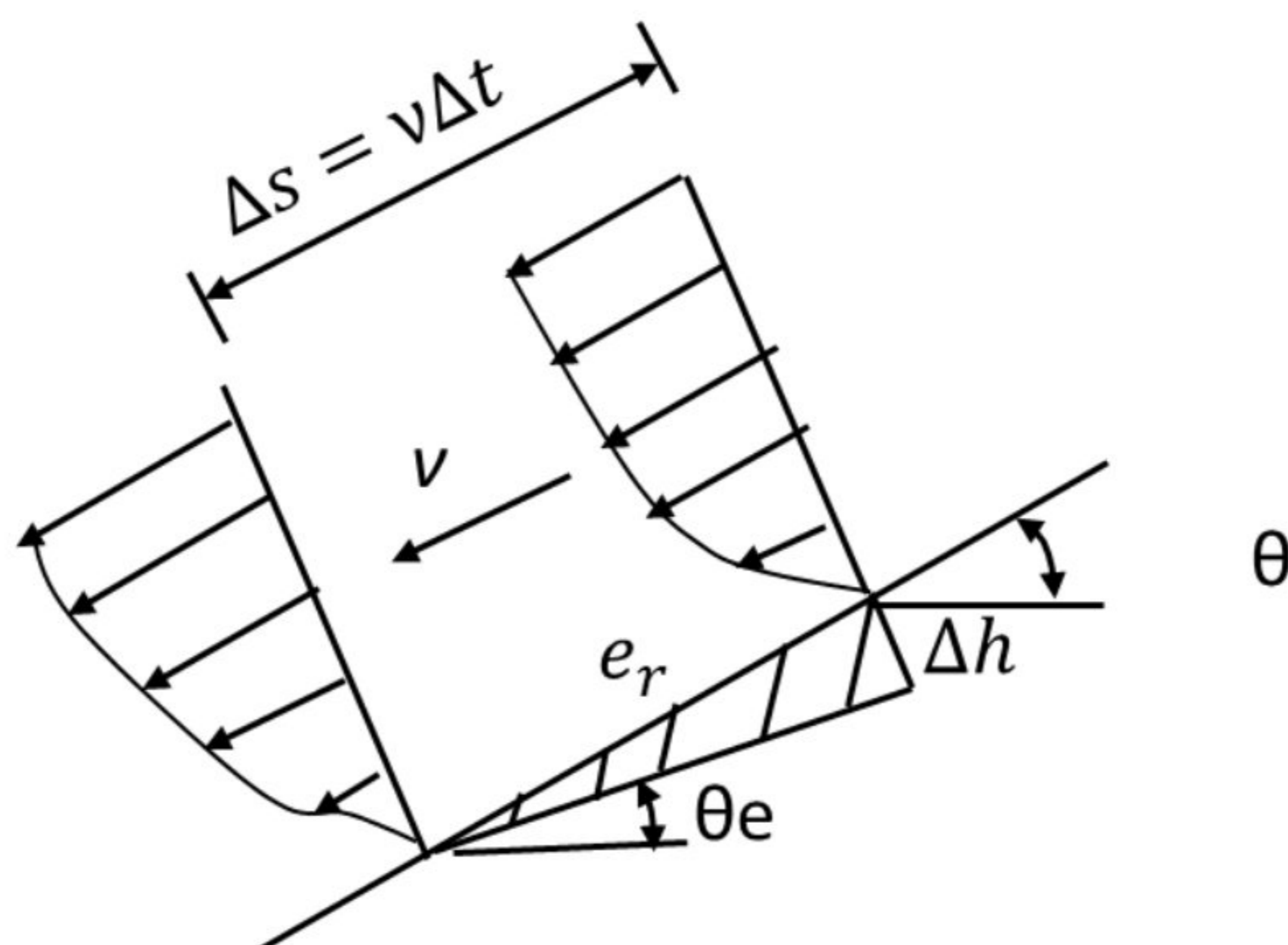
Модел (Egashira, 1993) је развијен на основу физичких тестирања у мањој размјери, симулацијом ерозије у цијеви (*flume test*), чиме се степен приноса материјала дефинише на основу једначине:

$$E_R = K C_* \bar{v} \tan(\theta - \theta_e) \quad (2.9)$$

гдје су: E_R степен приноса материјала (или депоновања), C_* је концентрација седимената у запремини при површини тецишта, \bar{v} осредњена брзина по дубини, θ нагиб површине, θ_e равнотежни нагиб површине који зависи од концентрације материјала који се може добити из релације:

$$\tan \theta_e = \frac{(\rho_s - \rho_w)c}{(\rho_s - \rho_w)c + \rho} \tan \varphi \quad (2.10)$$

гдје су: ρ_s густина чврстих честица, ρ_w густина воде, c концентрација седимената тецишта у запремини, и φ угао унутрашњег трења на површини апроксимиран базним углом трења φ_b , тј. угао унутрашњег трења на контакту кретаног флуида са подлогом (Слика 2.11).



Слика 2.11 Егасхира модел прорачуна приноса материјала на јединичном елементу

2.3.3 Бланков модел (Blanc, 2008)

Blanc (2008) је примјенио Егасхирин закон ерозије у формулама интеграљења по дубини како би узео у обзир ефекте еродибилности у моделовању тецишта. У његовом раду је приказано да Егасхира модел у поређењу са Хунгровим моделом, тачније предвиђа одређене карактеристике тецишта, као што су зона депозиције и брзина тока. Изучавајући претходно наведене моделе ерозије, Blanc (2008) је дефинисао ерозиони закон узимајући у обзир такође нагиб падине, уз примјену експонента нагиба 2.5 који је емпиријски утврђен према формули:

$$e_R = h\bar{v}K(\tan \theta)^{2.5} \quad (2.11)$$

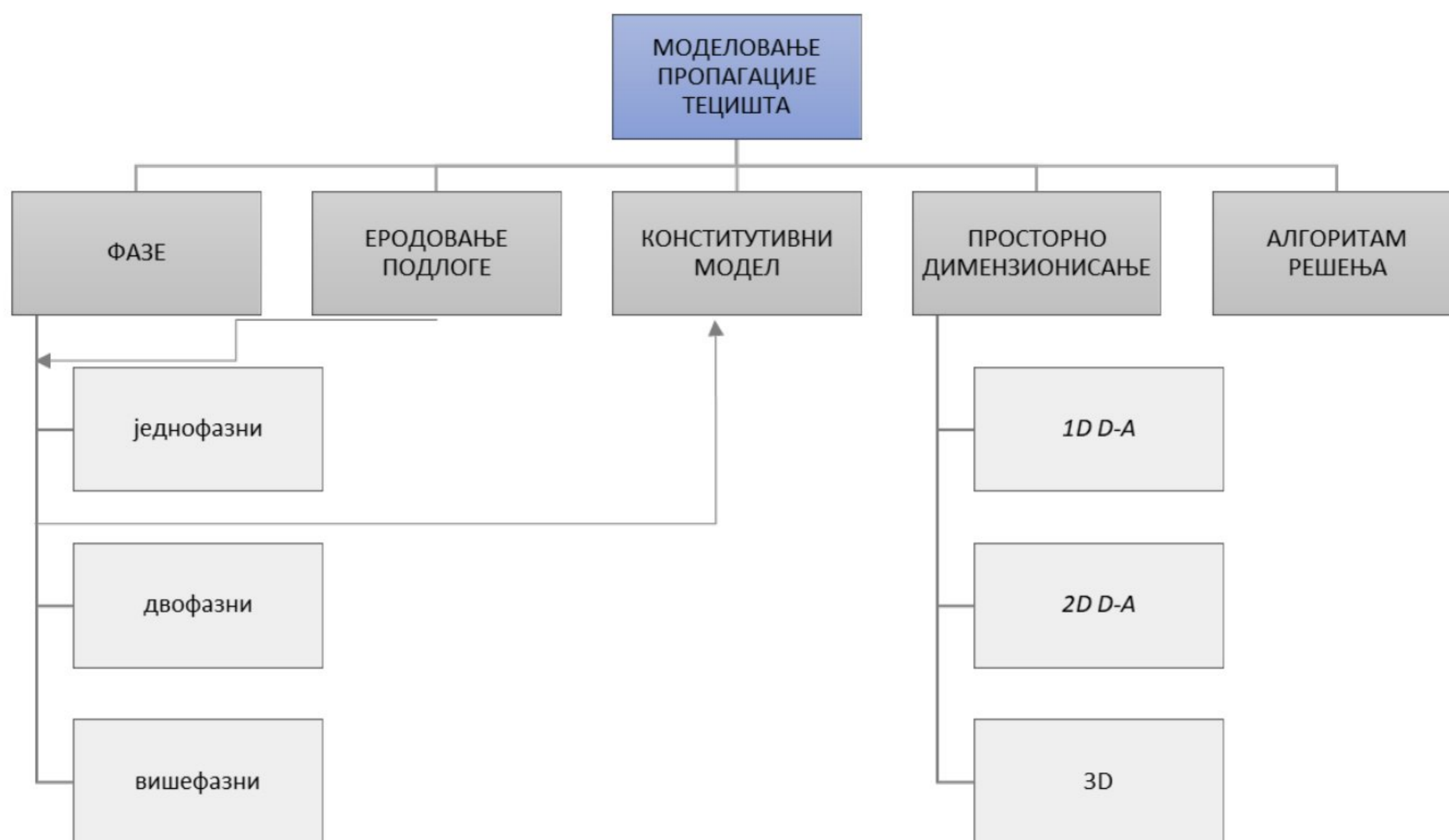
гдје су: h висина пропације флуида, \bar{v} осредњена брзина по дубини, θ нагиб падине, K емпиријски параметар који се калибрише, а експонент од 2.5 је емпиријски утврђен.

2.4 ОСНОВНИ ПРИНЦИПИ НУМЕРИЧКОГ МОДЕЛОВАЊА ПРОПАГАЦИЈЕ ТЕЦИШТА

Више аутора се током посљедње двије деценије бавило прикупљањем података са терена и корелисањем зависности међу основним карактеристикама тецишта – дужина, проток, запремина покренутог материјала, површина угроженог подручја (Iverson, 1997, Rickenmann, 1999) што је предуслов за стварање различитих симулацијских модела. Са аспекта нумеричког моделовања, може се говорити о моделовању активатора (*triggering*) и пропацијским моделима (*propagation models*). Код првих је кључно повезивање активатора са механизмом процеса, а значајан допринос томе дао је Iverson, 1997, повезујући интензитет падавина са покретањем материјала тиме комбинујући метеоролошке, хидролошке и геотехничке податке. Са друге стране, модели пропације се све више развијају (Hungr, 1995, Chen and Lee, 2000, Wang and Sassa, 2002, Pitman and Le, 2005, McDougall, 2006, Pastor et al. 2009, Christen et al. 2010a, Pudasaini,

2012, Horton et al. 2013, Pudasaini and Fischer 2020 и др.) чиме се предвиђа динамика развоја појаве.

Поступак моделовања пропагације тецишта подразумијева одређивање четири битна фактора: 1) дефинисање фазности, 2) прорачун ерозије, 3) одабир конститутивног модела, 4) просторно димензионисање што за резултат има коначан модел (Truillo et. al.2022). Приказ поступка моделовања пропагације тецишта је дат на слици 2.14.



Слика 2.12 Главни аспекти класификовања модела тецишта (према Truillo et. al.2022)

Фазност у моделовању се односи на агрегатна стања која су дио реланог модела покренутог материјала. Једнофазни модели су најпростији, узимајући у обзир једнородан материјал, представљен чврстом фазом (у случају течења тла, снијежних лавина, или претпостављајући да је маса истовјетна). У RAMMS програму, који је коришћен у дисертацији, покренути материјал је дефинисан једном фазом. Двофазни и трофазни модели подразумијевају узимање у обзир интеракције чврсте и течне фазе, односно све три фазе, чврсте течне и гасовите, која има велики значај у динамици развоја процеса какво је течење дробине. SPH моделовање нуди могућност дефинисања двофазних и трофазних модела. На коду који је коришћен у дисертацији, Geoflow SPH, ради се на развоју трофазног модела, тј. имплементирању интеракцијских услова у случају дјелимично засићеног тла. Типичан модел течења дробине је двофазни модел, гдје се чврста и течна фаза могу посматрати одвојено. У случају течења муља, користе се једнофазни модели гдје се претпоставља течење вископластичног материјала.

Прва примјена прорачуна ерозије код тецишта је дефинисана емпиријским формулацијама на основу мјерења на терену (Egashira, 1993, Hungr et al., 1995, Cannon and Savage, 1988, McDougall and Hungr, 2005, Chen et al., 2006, Blanc (2008)), о којима је већ било ријечи у претходном поглављу. Најбитнији дио моделовања јесте прорачун масе која се еродује. Касније су ови модели имплементирани у нумеричке методе. RAMMS програм има имплементиран прорачун ерозије на основу мониторинга тецишта на терену, док је у Geoflow SPH програму постоји могућност коришћења горенаведених ерозијских закона.

Конститутивни модел је базиран на реолошким моделима који дефинишу кретање флуида у моделу пропагације. Бингамов модел најчешће коришћен у случају појаве течења тла, док је код појава течења дробине, гдје трење има велики утицај, најчешће се користи Фрикциони или Воелмиев модел.

Са аспекта просторног дефинисања модела можемо говорити о једнодимензионалним, дводимензионалним или тродимензионалним моделима. Једнодимензионални и дводимензионални модели укључују удружен приступ са интегралњем параметара по дубини да би могли бити примјениви за просторну анализу (Perla et al., 1980, Salm, 1993, Horton et al. 2013.). До сада, тродимензионални (3D) модели и даље представљају изазов и захтјевају јако пуно времена за моделовање, али су направљени значајни помаци у њиховој примјени (Leonardi et al. (2015), Peng et al. (2016) Li and Zhao (2018), Peng et al. (2021). Најзаступљенији и највише развијени су 2D модели интегрални по дубини (енгл. *deep integrated, depth-averaged*) (Pitman and Le (2005), Pastor et al. (2009), Christen et al. (2010a), Pudasaini (2012), Pudasaini and Fischer, 2020 и др.) којима се превазилази проблем прорачуна параметара по дубини. Представљају најбољи избор односа времена моделовања и поузданости добијених резултата.

Нумерички модели се ослањају на неке основне аналитичке приступе (алгоритме рјешења) (Voellmy (1955), Savage and Hutter (1989), Salm (1993), Pudasaini (2012), Pudasaini and Krautblatter (2021) и др.) просторно дискретизоване, који се генерално могу подијелити на мрежне (*mesh based*) и безмрежне (*meshless*) моделе. Најчешће коришћени до сада, како у моделовању активатора процеса, тако и за моделе пропагације, су модели базирани на Методи коначних елемената (енгл. *FEM*). У докторату је рађено са програмима који су базирани на Методу коначних запремина (FVM) и Методу коначних разлика (FDM) (RAMMS софтвер). Паралелно су све више у употреби безмрежне методе какве су Метод моделовања флуидних дјелића (*Smoothed Particle Hydrodynamics–SPH*) и Метод дискретних елемената (*Discrete Element Method–DEM*). *DEM* метода је базирана на механици дисконтинуума и захтјева много више времена да би била употребљена у моделовању великих деформација какав је случај код појаве тецишта. Као што је већ наведено, када говоримо о 2D моделима, најчешће се примјењује удружен приступ двије методе. У дисертацији је коришћен прорачун преко *SPH* кода уз употребу *FDM* по дубини (Pastor, et al, 2009). *Material Point Method (MPM)* се све више развија, иако се најчешће сврстава у *meshless* методе, узима у обзир информацију граничних услова који важе за мреже, па тако се може сврстати у комплексну методу. Добар упоредни приказ метода континуума (Truilllo et. al.(2022)) приказан је на слици 2.15. Први модел одговара моделу који користи RAMMS програм, док је трећи приказ односи на *SPH* модел. Све методе детаљније су објашњени у Поглављу 5.

Ојлеров приступ прорачуну односи се на референтну мрежу која је фиксна у простору и не мијења се током цијелог процеса симулације, те се и све физичке карактеристике материјала (попут растојања, дубине, брзине и сл.) рачунају у односу на ову фиксну мрежу. Корисна је за симулацију сценарија у којима мрежа не мора да се помјера заједно с материјалом који се симулира.

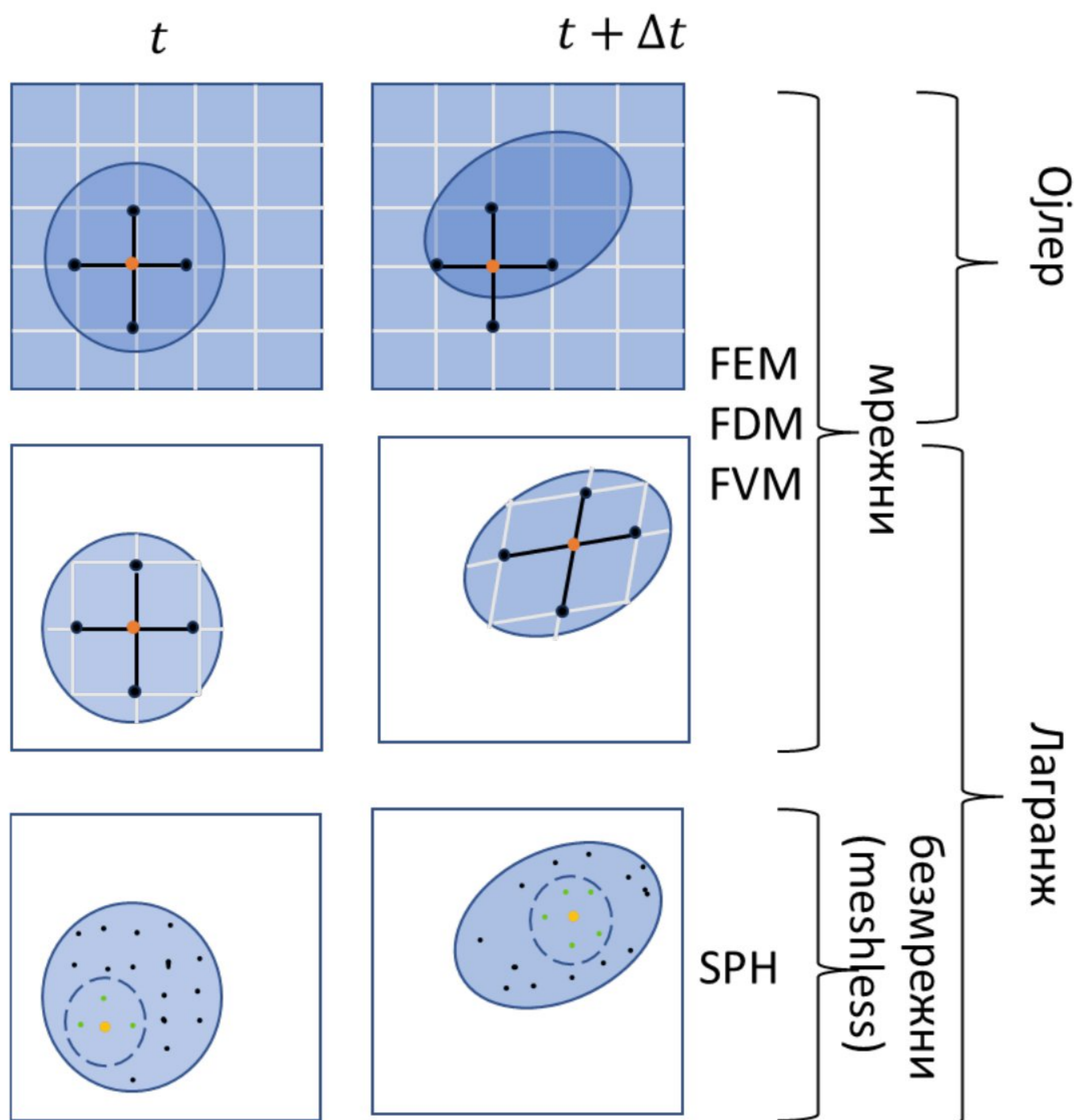
Код Лагранжовог приступа, мрежа је везана за материјал који се симулира и креће се заједно с тим материјалом. Особине материјала и мрежа се заједно мијењају, чиме кретање материјала значајно утиче на мрежу, тј. са деформисањем мреже долази и до промјена физичких својстава који се симулирају.

Код *SPH* методе мрежа не постоји али се мјери релативно помјерање у односу на околинду, па се ради о Лагранжовом приступу. Код неких аутора (Pastor, et. al 2009) због

одсуства стварне мреже, овај математички приступ се назива и квази-Лагранжов приступ.

Предност коришћења безмрежних метода је у математичком приступу гдје није потребно дефинисати граничне услове сваког од елемената какав је случај у мрежним системима. Принцип је да се тијело креће слободно гдје свака тачка добија информацију од сусједних тачака и на основу тога мијења понашање, што је дефинисано алгоритмом. Са друге стране, комплексност ових метода је у моделовању фаза (чврста, течна и гасовита) одвојено и прорачуну интеракције међу фазама које утичу на развој тока.

За све комплекснија нумеричка истраживања ради се на спрегнутим моделима двије, па и три методе. Такве комплексне анализе дају резултате али за сада захтјевају превише времена и новца да би биле прихватљиве за употребу. Исто тако, као посебан вид моделовања, ради се на спрегнутим моделима активатора-пропагације (*triggering-propagation*) (Malet et al. 2005, Stancanelli et. al, 2017Hong et al., 2019,).



Слика 2.13 Приказ различитих приступа моделовања континуума који су коришћени у раду према Truillo et. al.(2022)

3 ПОДРУЧЈА ИСТРАЖИВАЊА

У мају 2014. године, као посљедица дјеловања циклона *Тамара*, поплаве су захватиле већи дио територије Србије када се активирао и велики број нестабилности. Мањи број активираних појава нестабилности су били реактивирани процеси, док се највећи број појавио по први пут у мјестима гдје то није било очекивано. У појединим дијеловима Србије, регистрован је велики број тецишта и комбинованих процеса клижења–течења (Cruden, Varnes, 1996). На подручју западне Србије, регистрована су 72 тецишта, док је у централној Србији регистровано 6 појава међу којима и тециште Лева река (Abolmasov et. al. 2020). Западна Србија је био најтеже погођен регион са скоро 200 тецишта регистрованих од стране инжењера на терену (Abolmasov et. al. 2017). Овај догађај изазвао је велике штете, угрожени су били многи инфраструктурни објекти, пољопривредна добра као и стамбени објекти. На Слици бр 3.1 се може видјети порушени објекат у Крупњу као посљедица бујичног тока ријеке Ликодре (фото Аболмасов, 2015). Истраживање је било дио пројекта BEWARE (<https://geoliss.mre.gov.rs/beware/>), у коме је учествовао тим са Рударско-геолошког факултета и Геолошког завода Србије.



Слика 3.1 Порушени објекти на подручју Крупња као посљедица масовних појава нестабилности (фото Аболмасов, 2015)

Након детаљног картирања појава на подручју 27 угрожених општина одабрана су тецишта за моделовање пропагације течења. Истражна подручја су се активирала у два различита региона, формирана у различитим геолошким условима. Тециште Селанац, које се налази у западној Србији, издвојило се разорним дјеловањем и

количином покренутог материјала. Тециште Лева река, регистровано на подручју општине Краљево, угрозило је локални пут, који је био једина веза између оближњег села и града Краљева, карактеристично је по великој дубини у иницијалној зони и малој дужини транспорта материјала у поређењу са типичним понашањем тецишта.

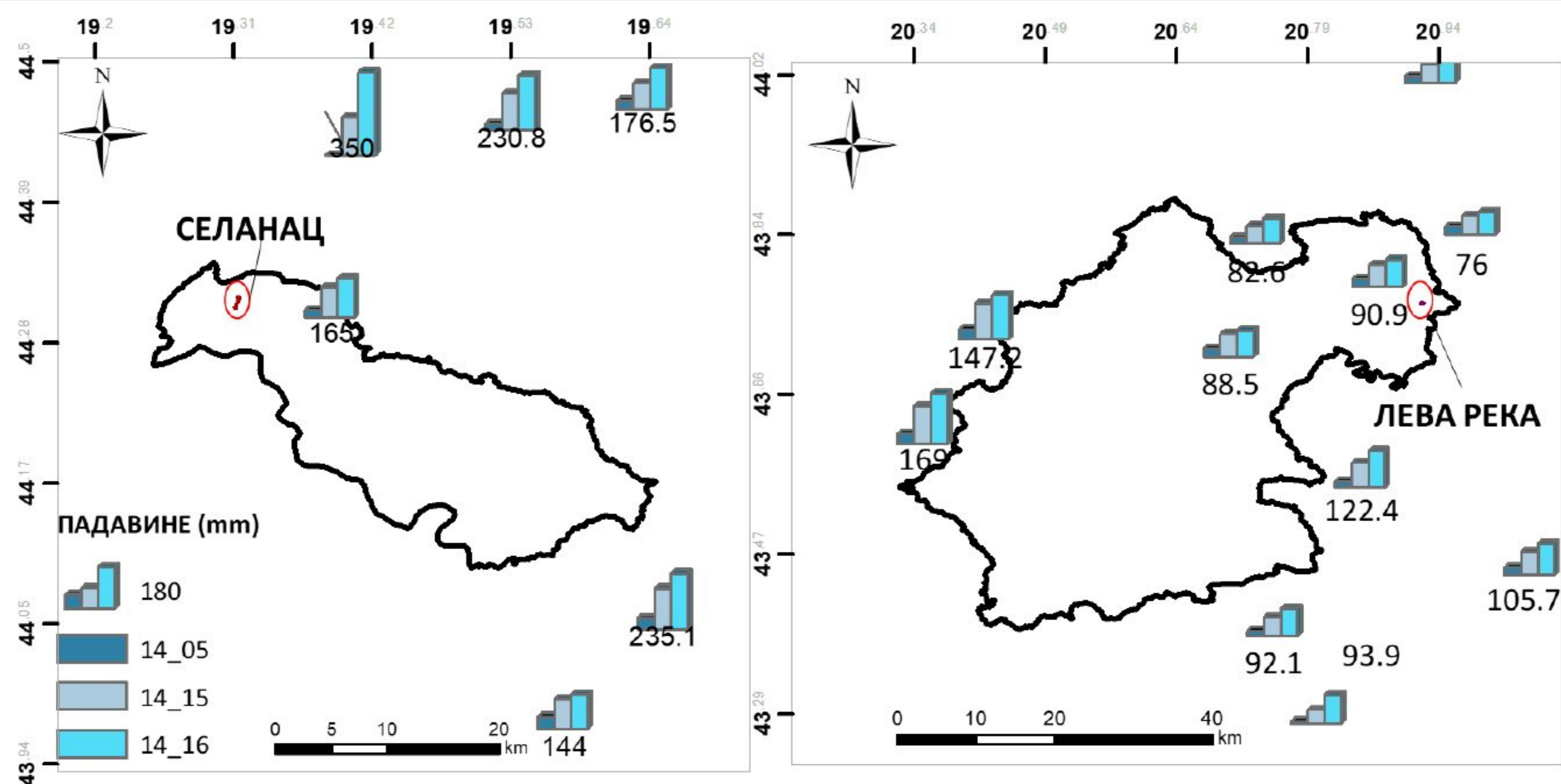


Слика 3.2 Неки од примјера тецишта регистрованих на терену са оштећењима која су регистрована (фото Аболмасов, 2015)

У западној Србији, у појединим мјестима регистроване су кумулативне тродневне падавине од преко 300 mm, што је био и максимум регистрован на територији Србије (<https://www.hidmet.gov.rs/>). На слици 3.3 се може видјети приказ падавина мјерних станица подручја општине Љубовија и Краљево и околине.

Према Abolmasov et al. 2020, на подручју западне Србије регистровано је 108 комбинованих процеса клижење – течење, 3 појаве течења одрона и 72 тецишта, што су укупно 183 појаве течења. Од тога је 58 процеса активирано по први пут, 49 процеса су умирена, 4 санирана, 10 реактивирано.

На подручју централне Србије регистровано је 27 комбинованих процеса клижење – течење, 2 појаве течења одрона и 6 тецишта, што су укупно 35 појаве течења. Од тога је 7 процеса активирано по први пут, 19 умирених процеса, 1 саниран и 7 реактивираних процеса и 1 привремено умирен.



Слика 3.3 Тродневне падавине регистроване у падавинским станицама (RHMZ) на подручју Љубовије и Краљева и њиховој околини са положајем предметних подручја (Abolmasov et. al. 2020)

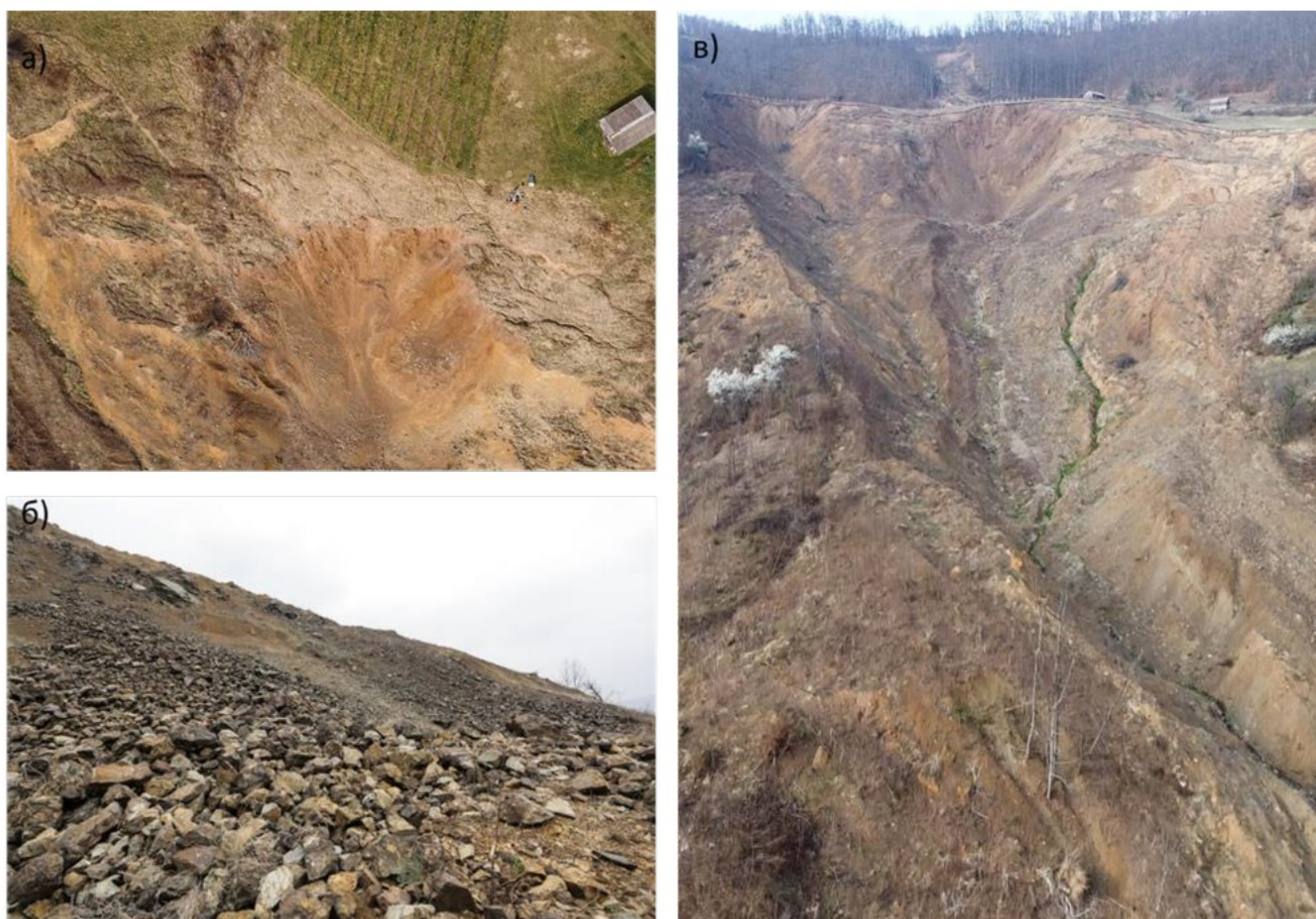
3.1 ТЕЦИШТЕ СЕЛАНАЦ

Тециште Селанац, смјештено у сјеверном дјелу општине Љубовија, активирало се у ноћи између 14. и 15. маја 2014. године. Оно се издвојило понашањем и великом количином покренутог материјала у иницијалној зони (процијењено око 45000 m³ покренутог материјала) (Слика 3.4, Слика 3.5). Укупна дужина транспорта материјала је износила око 1,1 km, док је ширина у најширем дијелу у зони иницијалног блока око 350 m.



Слика 3.4 Иницијална зона активирања тецишта (фото Аболмасов, 2015)

Велики блок материјала почео је да клиза у горњем дијелу падине развијајући се у процес течења дробине дуж двије постојеће јаруге. У почетку је активирана једна мања појава у вишим дијеловима падине, као одвојен процес од великог тецишта, те није био предмет моделовања у дисертацији. Материјал је транспортован у подножје падине на око 300 m нижој надморској висини, депонојући доста материјала изузетно хетерогеног састава (од финих честица до одломака и до 2 m у пречнику). Материјал је направио вјештачку брану на Селаначкој реци, да би након одређеног времена ријека која је попримила бујични карактер, разорила брану и транспортовала материјал даље дуж долине ријеке изазивајући нове појаве нестабилности. Резултати у дисертацији ће се фокусирати на прву зону депоновања материјала тецишта, док прорачун даље однешеног материјала није узет у обзир. Материјал је транспортован 1 km даље радом Селаначке реке дуж њеног корита. Границе докле је материјал транспортован се најбоље виде на сателитском снимку (Слика 3.6) из периода непосредно након што се тециште активирало (јун 2014. године).



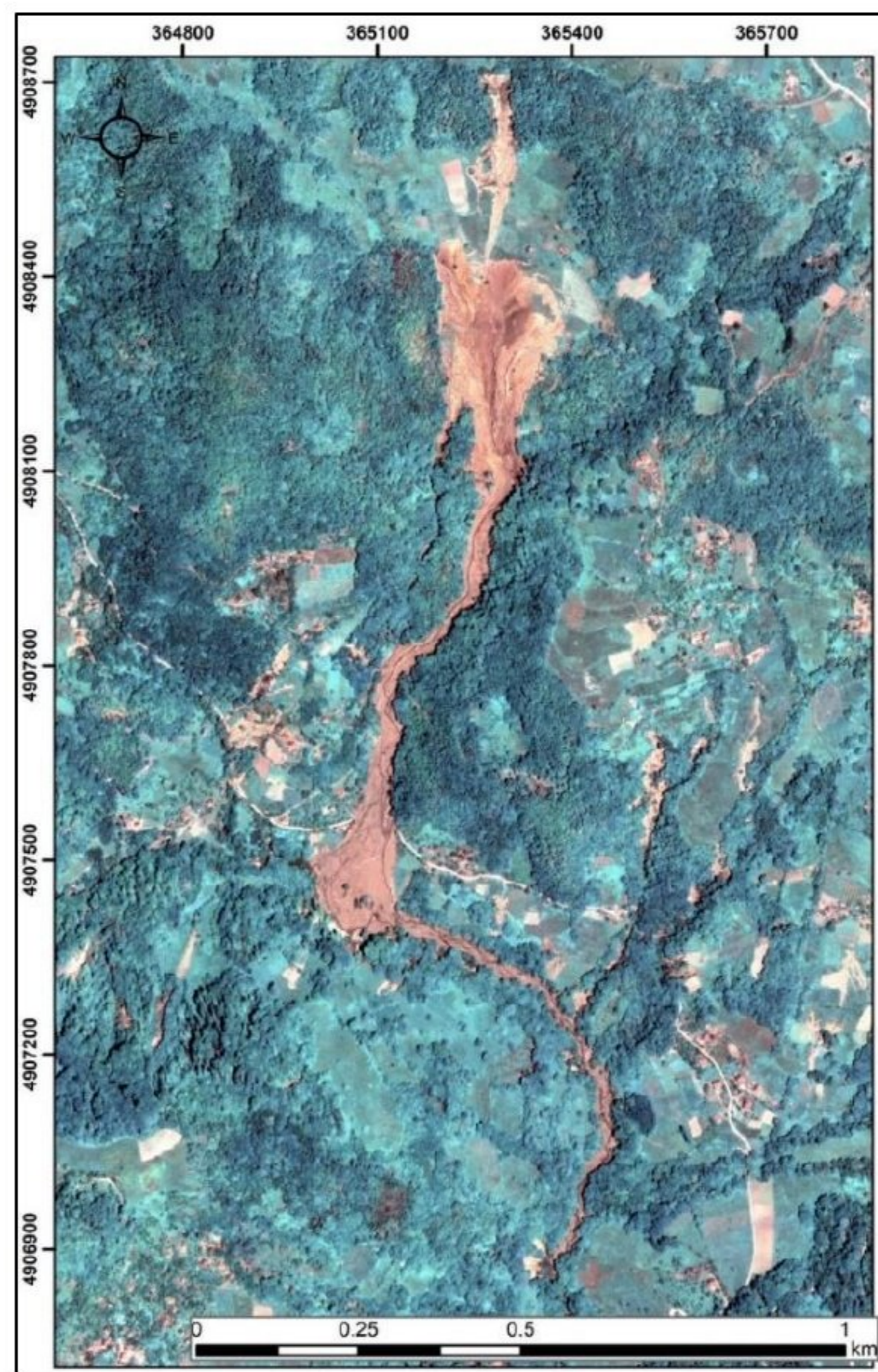
Слика 3.5 Фотографије тецишта у марту 2017 а) чеони ожиљак б) покренута дробина у зони чеоног ожиљка в) зона транспорта

3.1.1 Геоморфолошке карактеристике подручја

Истражно подручје се налази на територији општине Љубовија, у мјесту Селанац. Шире подручје се одликује умјерено континенталном до континенталном климом. Подручје Љубовије је у десној долинској страни ријеке Дрине и карактеришу га стрме падине, подложне појавама нестабилности, појавама јаружања, клизања и течења, као и

поплава. У ширем подручју, поред ријеке Дрине, један од већих водотока је и ријека Љубовића, која има изражен бујични карактер.

Надморска висина ширег истражног подручја се креће од 158 m у нижим дијеловима у долини ријеке Дрине, до 1268 m у планинским предјелима. Терен је генерално планински до брдско планински. У зони активирања тецишта, иницијална зона је активирана на око 720 m.n.v., док је зона депоновања материјала на висини од око 520 m.n.v надморске висине, све до Селаначке реке.



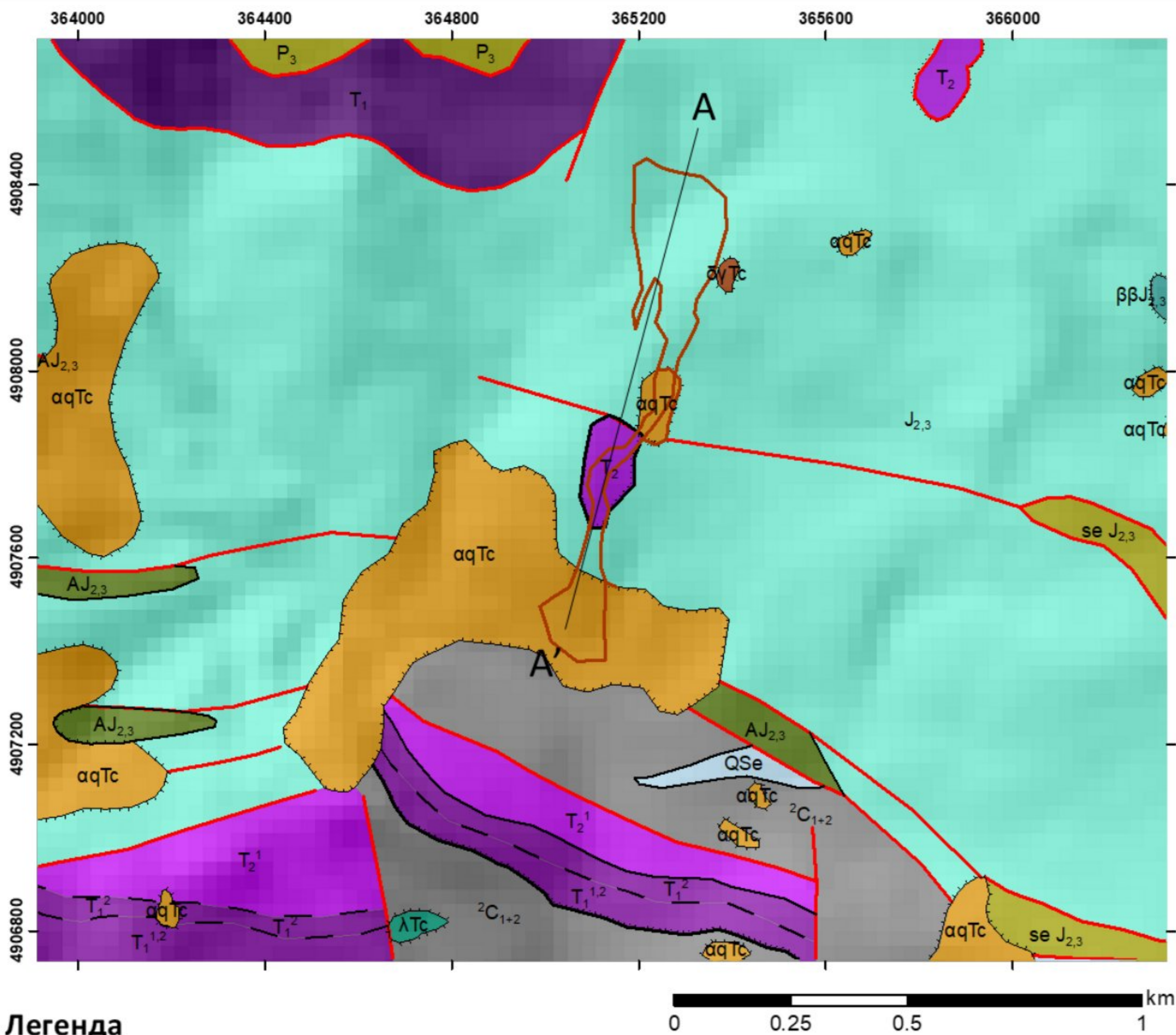
Слика 3.6 Сателитски снимак тецишта, јун 2014. године

3.1.2 Геолошка грађа терена

Доминантна формација у широј зони подручја Љубовије је „Јадарска“ формација ($^2C_{1,2}$). Изграђена је првенствено од комплекс метаморфисаних пјешчара, у мањој мјери аргилофилита, серицитних и глиновитих шкриљаца. У ширем истражном подручју тецишта, ови седименти су заступљени у десној долинској страни Селаначке реке.

Ова формација лежи трансгресивно преко пермских седимената, који већински заступљени у виду блока битуминозног кречњака (P_3) црне боје, откривеног у дугачкој зони, динарског пружања. Подређено, у вишим дијеловима горњег перма, могу се наћи услојени доломитични кречњаци. Кречњаци леже конкордантно преко пјешчара и шкриљаца средњег перма (P_2). У зони тецишта, ове стијене су откривене у сјеверозападном дијелу због чега се налази на око 300 m сјеверно од чеоног ожилка.

Доломити и доломитични кречњаци са пјешчарима и алевролитима (T_1) доњотријаски седименти леже дискордантно преко палеозојских наслага. У нижим дијеловима представљени су доломитичним и пјесковитим кречњацима и доломитима.



Легенда

Геолошке јединице

- λTc.лампрофири
- QSe.серицитски кварцити
- δγTc.гранодиорити
- αqTc.дацити
- se J_{2,3}.серпентинити
- ββJ_{2,3}.дијабази и спилити
- AJ_{2,3}.амфиболити
- J_{2,3}.пјешчари, глинци, рожнаци, конгломерати, брече и дијабази
- T₂¹.услојени сиви и сиворумени кречњаци и доломити
- T₂.банковити кречњаци и масивни бриозолско-коралски кречњаци
- T₁².тамносиви лапоровити кречњаци са нотицелама и миофоријама
- T₁^{1,2}.разнобојни кварцни пјешчари, конгломерати, брече и прослојци глинаца
- T₁.доломити и доломитични кречњаци са пешчарима и алевролитима
- P₃.битуминозни кречњаци
- ²C₁₊₂.метаморфисани пјешчари

остале ознаке

- трансгресивна граница
- нормална граница
- покривена граница
- граница изливног вулканита
- граница магматског тијела
- тектонска клипа
- расједи
- границе тецишта
- положај пресјека

Слика 3.7 Дигитализована геолошка карта терена детаљ на 1:10.000 са ОГК 1:100 000, лист Љубовија (Кубат и др., 1977)

У вишим дијеловима јављају се прослојци и сочива пјешчара и алевролита, који се иначе масовно јављају кроз цијели доњи тријас овога дијела терена. У истражном подручју непосредно изнад чеоног дијела заступљени су седименти ове серије.

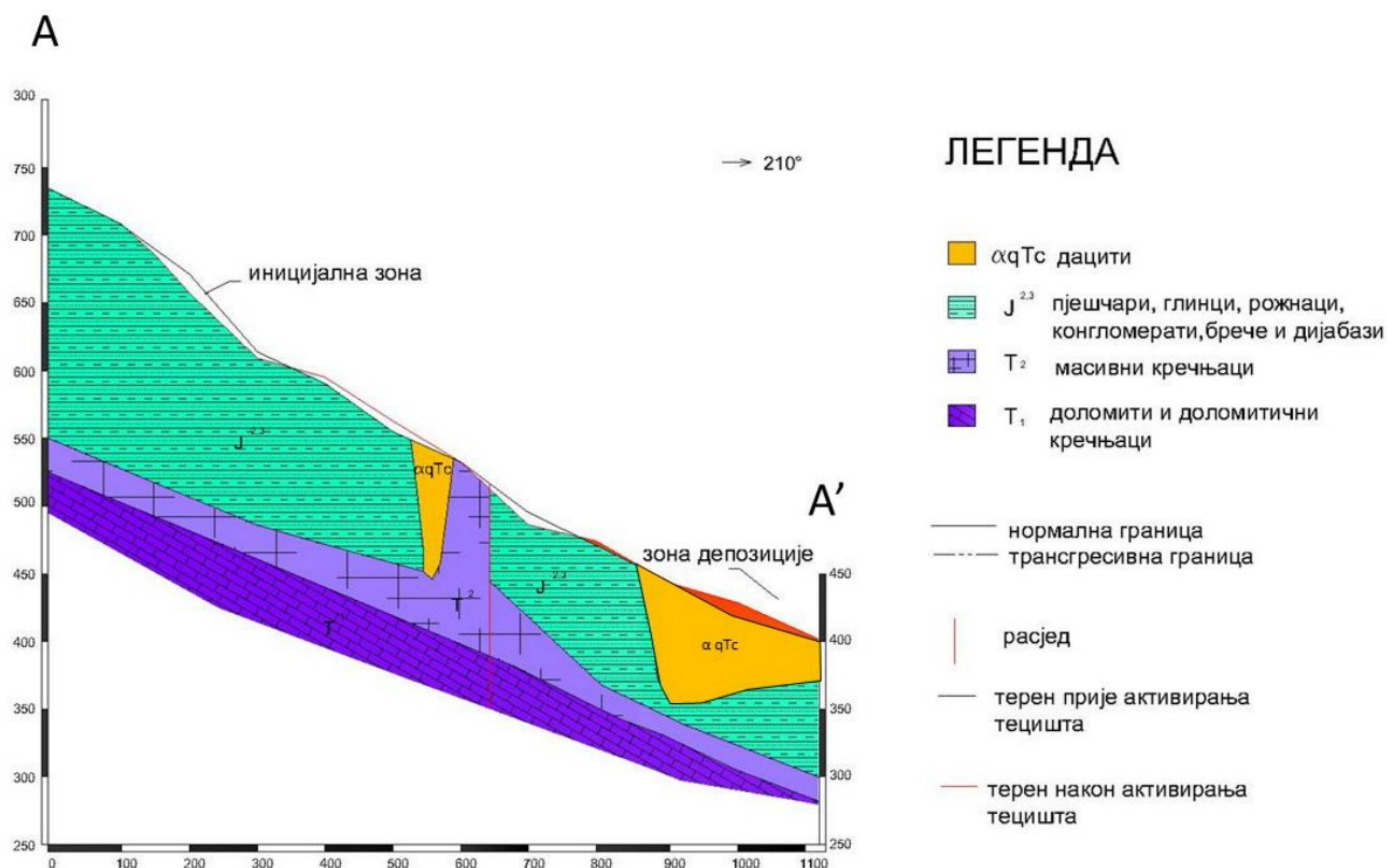
Пјешчари ($T_1^{1,2}$) леже дискордантно преко карбонских наслага. У састав серије улазе највише разнобојни пјешчари, мање конгломерати, глинци и кречњаци. Пјешчари су сиве, мркожуте до црвенкасте боје.

Кречњаци (T_1^2) се јављају у виду издужених зона које нису континуално развијене због бочних фацијалних прелаза у кластичну серију. Ове серије се смјењују у десној долинској страни Селаначке реке.

Масивни и услојени кречњаци (T_2) са доломитима у мањој мјери заступљеним. Ове насlage почињу најчешће са лијепо услојеним доломитичним кречњацима. Боје су руменкастосиве и прослојавају се са доломитима. Изнад њих леже сиви бречасте кречњаци. У самом врху налазе се сивосмеђи, рјеђе услојени до масивни кречњаци. У средишњем дијелу тецишта, у зони транспорта, заступљена је ова серија.

Услојени сиви и сиворумени кречњаци (T_2^1) леже конкордантно преко седимената доњег тријаса. Представљен је свијетлосивим кречњацима и рјеђе органогено-детритичним који садрже фауну. Услојени су у слојеве дебљине 10—70 cm. Мјестимично су откривене доломитске брече, тектонског поријекла и чисти доломити.

Пјешчари, глинци, рожнаци, конгломерати, брече, дијабази, кречњаци ($J_{2,3}$) – творевине средње и горње јуре леже конкордантно преко кречњака доње и средње јуре. Подређено су заступљени серпентинити, спилити, базалти и габрови. Карактеристични су за овај развој снажни субмарински изливи дијабаза, зеленосиве до тамномрке боје.



Слика 3.8 Геолошки пресјек дуж правца кретања материјала са уцртаним елементима тецишта

Према тумачу за лист Љубовија (Кубат и др., 1977), серпентинити се јављају у виду издужених сочива, дуж тектонских зона (Селанац, Вукова и Грачаничка ријека). Ово је

доминантна формација у зони гдје је активирано тециште. Покренути материјал у офиолитској зони. Крупни блокови дијабаза транспортовани су и картирани у зони депозиције пречника и до 2 m. Поред дијабаза, одломци кречњака, рожнаца, серпентинита су искартирани међу покренутим материјалом.

Дацити (αq) у истражном подручју су доминантно заступљени у долини Селаначке реке и средишњем делу тецишта. Поред тога од магматских стена мање појаве *гранодиорита* (δy) су заступљене са десне бочне стране у близини иницијалне зоне тецишта. Приказ геологије терена на ширем истражном подручју дат је на Слици 3.7 и геолошком пресеку у правцу кретања на Слици 3.8.

3.2 ТЕЦИШТЕ ЛЕВА РЕКА

Тециште Лева река је регистровано током теренских истраживања у мају 2015. године, а активирало се такође у истом периоду када и тециште Селанац као последица утицаја *циклона Тамара*. Налази се у околини Краљева, у близини Лаве реке. Тециште је слично са механизмом понашања тецишта Селанац. У подножју падине је Лева река која је преграђена покренутим материјалом. У случају Лаве реке, нанешена је много већа штета локалном путу који је повезан са Краљевом, што је створило озбиљне проблеме локалном становништву. После неког времена ријека је пробила природну брану, односећи материјал, плавећи локални пут и уништавајући неколико мањих мостова. Првенствено је склоњена огромна количина материјала која је угрозила пут, док је највећи дио материјала остао на мјесту депозиције гдје је и створено језеро преграђивањем ријеке (Слика 3.9). У питању је велика количина материјала (око 68663 m³) и дубока иницијална зона покретања од 14 m у најдубљем дијелу. Тециште је широко 100 m у дијелу депозиције, има дужину од 400 m. Претпоставља се да је кретање трајало укупно око 24 ч, али са периодима убрзања и успорења. Не може се поуздано одредити за које време је покренут највећи дио масе тецишта. Језеро је димензија од око 50 m дужине, 20 m ширине и 5 m дубине.



Слика 3.9 Фотографије тецишта у априлу 2017

3.2.1 Геоморфолошке карактеристике подручја

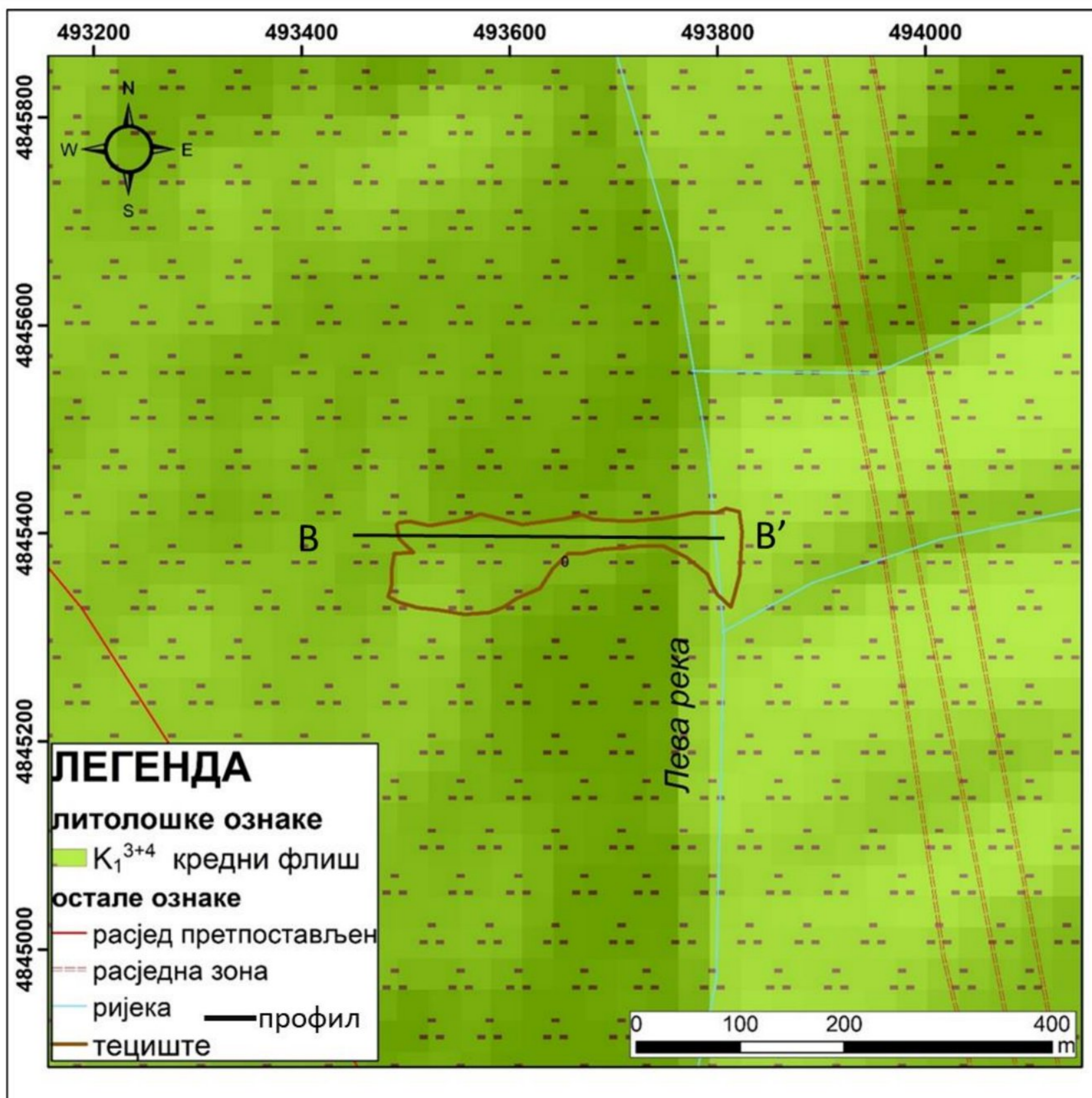
У ширем подручју територија општине Краљево налази се у централном дијелу Србије. У јужним дијеловима обухвата обронке Гоча и Столова, док на сјеверу обухвата огранке Рудника, источно Гледићке планине гдје се налази у близини тециште које се активирало у Левој реци.

Хидрографска мрежа је изузетно развијена. Тециште се активирало у десној долиној страни Лаве реке, која припада сливу Велике реке, притоке Западне Мораве. Шире подручје се одликује умјерено континенталном климом. Водени токови се претежно дренирају сливом Западне Мораве директно, мањи дио њих припада сливу Велике Мораве.

Надморска висина ширег истражног подручја се креће од 167 m у нижим дијеловима у долини ријеке Западне Мораве, до 1736 m у планинским предјелима. Подручје гдје је активирано тециште је мјесто Лева река у близини Гледићких планина. Терен је генерално планински до брдско планински. У зони активирања тецишта, иницијална зона је активирана на око 560 m.n.v., док је зона депоновања материјала почиње на висини од око 460 m.n.v надморске висине, све до Лаве реке.

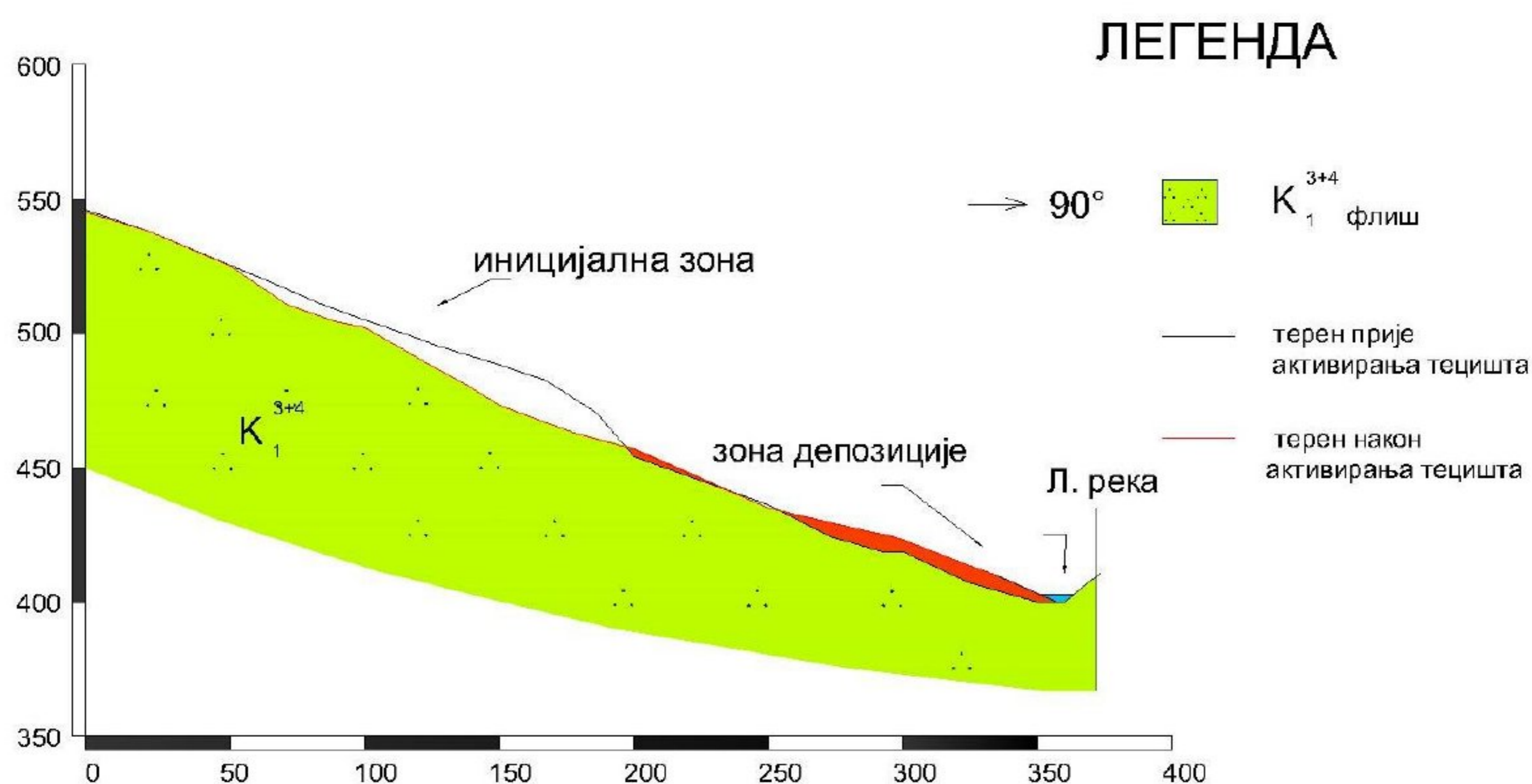
3.2.2 Геолошка грађа терена

Основну стијенску масу чини кредни флиш K_1^{3+4} (Слика 3.10). Сачињавају га литолошки чланови лискуновитих пјешчара, глиновитих шкриљаца, глинаца и лапораца. Подређено, у виду прослојака, у комплексу се јављају и конгломерати, а у виду прослојака и већих маса још и лапоровито-пјесковити кречњаци (Јевремовић и др. (2015)).



Слика 3.10 Дигитализована геолошка карта терена детаљ на 1:5.000 са ОГК 1:100 000 , лист Краљево

До активирања тецишта је дошло у приповршинским дјеловима терена гдје је доминантан утицај површинског распадања. Уочава се доминантна фамилија пукотина која је уједно и површ слојевитости. Изложеност флиших седимената површинском распадању довела је након засићена водом усљед великих количина падавина, до брзог покретања велике количине материјала. Приказ геолошких карактеристика на детаљу 1:5000. са ОГК листа Краљево, 1:100 000 се може видјети на Слици 3.10, а пресјек у смјеру кретања на Слици 3.11.



Слика 3.11 Геолошки пресјек дуж правца кретања материјала са уцртаним елементима тецишта

4 МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА ТЕЦИШТА

Први теренски обилазак је направљен у мају 2015 године, у циљу регистровања појава насталих након дјеловања циклона Тамара, 2014. године у склопу пројекта *BEWARE*. Тада су дефинисане основне геометријске карактеристике тецишта, као што је дужина, потенцијална дубина, зона транспорта материјала са претпостављеном дубином у зони транспорта, картирање стијена и карактеризација покренутих блокова. Усљед неприступачности терена, велике дубине тецишта, није била могућа примјена класичних геотехничких метода у циљу дефинисања дебљине покренутог и транспортованог материјала. У новембру 2015., изведена су геофизичка истраживања методом Електрометријске томографије (*Electrical Resistivity Tomography–ERT*) у циљу прецизне карактеризације геометрије тецишта и поређења са нумеричким анализама касније. Након тога, у марту 2017., је изведено фотограметријско снимање како би се извршило поређење снимака прије и после активирања тецишта и анализирали добијени Дигитални модел терена (ДМТ) терена и ортофото снимци терена високе резолуције (до 10 cm прецизности). ДМТ терена прије активирања тецишта је добијен реституцијом авиоснимака високе резолуције и коришћен је као улазни податак у софтверима моделовања тецишта.

4.1 МЕТОДЕ ДАЉИНСКЕ ДЕТЕКЦИЈЕ

Методe даљинске детекције су током истраживања коришћене ради бржег сагледавања последица циклона Тамара у склопу пројекта. Од сателитских снимака, анализиран је *Pleiades* снимак за Селанац из периода јуна мјесеца 2014. године, непосредно након активирања тецишта у мају 2014. године. Сателитски снимак је коришћен за потребе визуализације и утврђивања локације и обухвата ширег истражног подручја (Ђурић et. al, 2017).

Након тога, накнадно су примењене и друге методе даљинске детекције које су омогућиле првенствено прикупљање прецизнијих података, као што су Дигитални модел терена (ДТМ) у великој резолуцији. Код моделовања тецишта можемо усвојити двије епохе које су најважније за анализу расподјеле маса покренутог матаеријала услед појаве нестабилности:

епоха I: стабилан терен прије активирања тецишта,
епоха II- терен након активирања тецишта.

Поређење ДМТ-ова ових епоха у случају оба тецишта је коришћено као један вид валидације коначних нумеричких модела. Коришћене податке у оквиру истраживања који се односе на ДМТ терена, а добијени методама даљинске детекције, дакле можемо сврстати у две групе. Једну групу чине постојећи подаци ДМТ-а, подаци I епохе, а у другу групу спадају подаци фотограметријског снимања која су извршена за потребе овог истраживања, подаци II епохе. Сходно различитој резолуцији ДМТ података I епохе, први модели симулације тецишта рађени су на основу ДМТ ширег подручја резолуције 30x30 m. Док су у другом поступку, коришћени су ДМТ резолуције до 5x5 m. Исти поступак је урађен за оба тецишта. Разматрано је шире подручје (око 3.35 km² околина Селанца, 0.38 km² Лева река). Модели су урађени до резолуције 5x5 m, што је оптимална вриједност за добијање добрих модела тецишта у програмима који су коришћени.

4.1.1 Фотограметријско снимање терена беспилотном летилицом

У периоду март-април 2017. године урађено је фотограметријско снимање терена беспилотном летилицом (енгл. *Unmanned Aerial Vehicles* – UAV) у циљу добијања ортофото снимака и ДМТ високе резолуције, II епохе, након активирања тецишта. Коришћена је беспилотна летилица типа DJI Phantom 4 pro (фотографија модела летилице преузета са веб странице се може видјети на Слици 4.1). Тиме су у случају оба истражна подручја, тецишта Селанац и Лева река, добијени ортофото снимци просторне резолуције до 3x3 за Леву реку и 5x5 cm за Селанац и Дигитални модели терена високе резолуције до 10x10 cm за оба подручја истраживања.



Слика 4.1 Модел беспилотне летилице DJI Phantom 4 pro коју је коришћен за снимање тецишта (преузето са https://www.dji.com/phantom-4-pro-v2?site=brandsite&from=eol_phantom-4-pro)

Поступак снимања и креирања ДМТ-а и ортофото снимака је рађен сљедећим редослиједом:

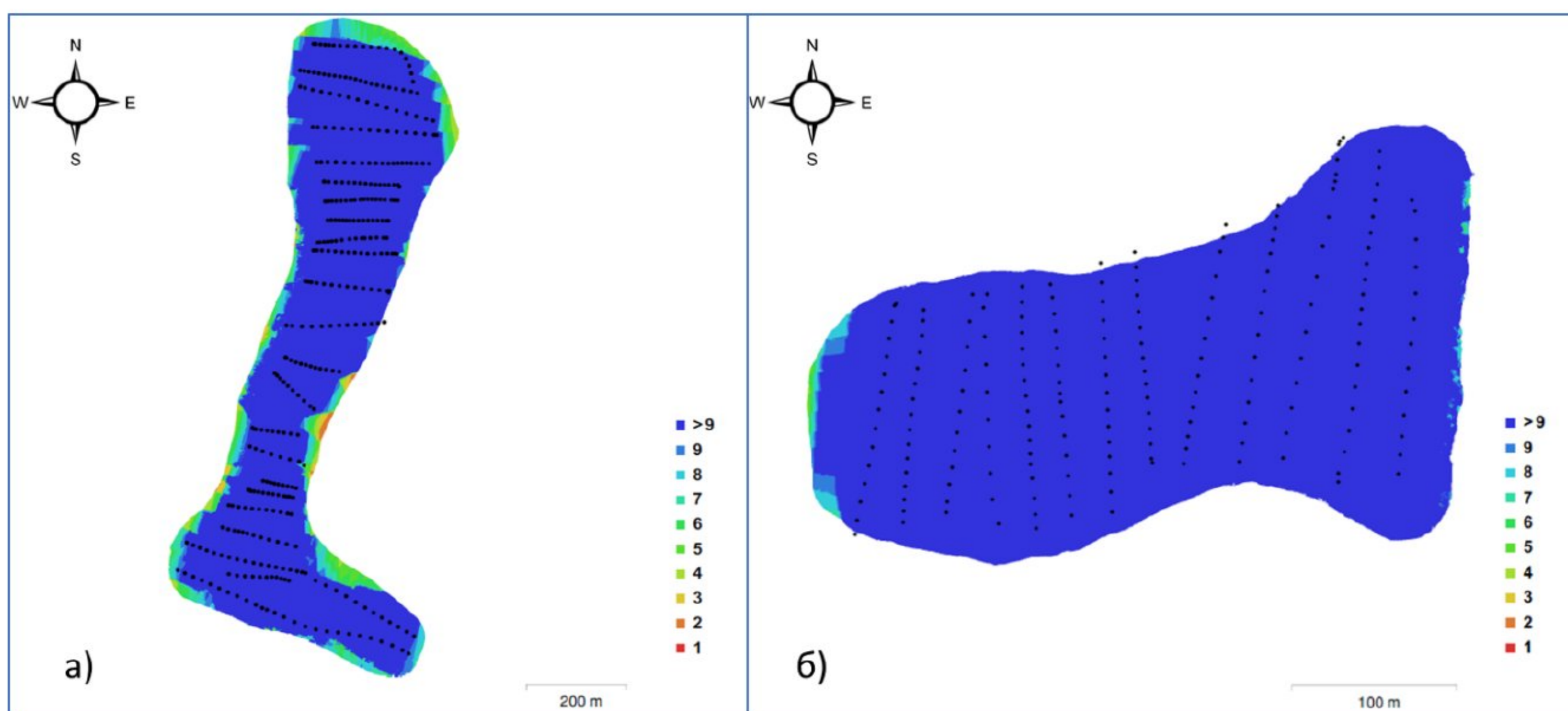
- дефинисана су истражна подручја и жељена резолуција пиксела ортофото снимака;
- прорачунати су параметри лета (надморска висина, путања, стајне тачке);
- дефинисан је % неопходног подужног и бочног преклопа снимака;
- дефинисане су, обиљежене и геодетски опажане оријентационе тачке на површини терена;
- дефинисане су, обиљежене и геодетски опажане контролне тачке на површини терена;
- извршена су снимања беспилотном летелицом;
- фотограметријски су процесирани прикупљени снимци;
- класификовани су облаци тачака и добијене су површине терена;
- израђени су Дигитални модели терена и ортофото снимци тецишта Селанац и Лева река.

Технички подаци о изведеним сесијама летења за потребе фотограметријског снимања беспилотном летелицом тецишта и процесирања коришћених снимака приказани су у Табели 4.1. Висина лета је прилагођавана условима терена.

Табела 4.1 Технички подаци снимања беспилотном летелицом на истражним подручјима Селанац и Лева река

Технички подаци	Селанац	Лева река
период снимања	март 2017	април 2017
број снимака	356	196
просјечна висина лета током снимања	134 m	120 m
површина терена обухваћена снимањем	0.327 km ²	0.0699 km ²

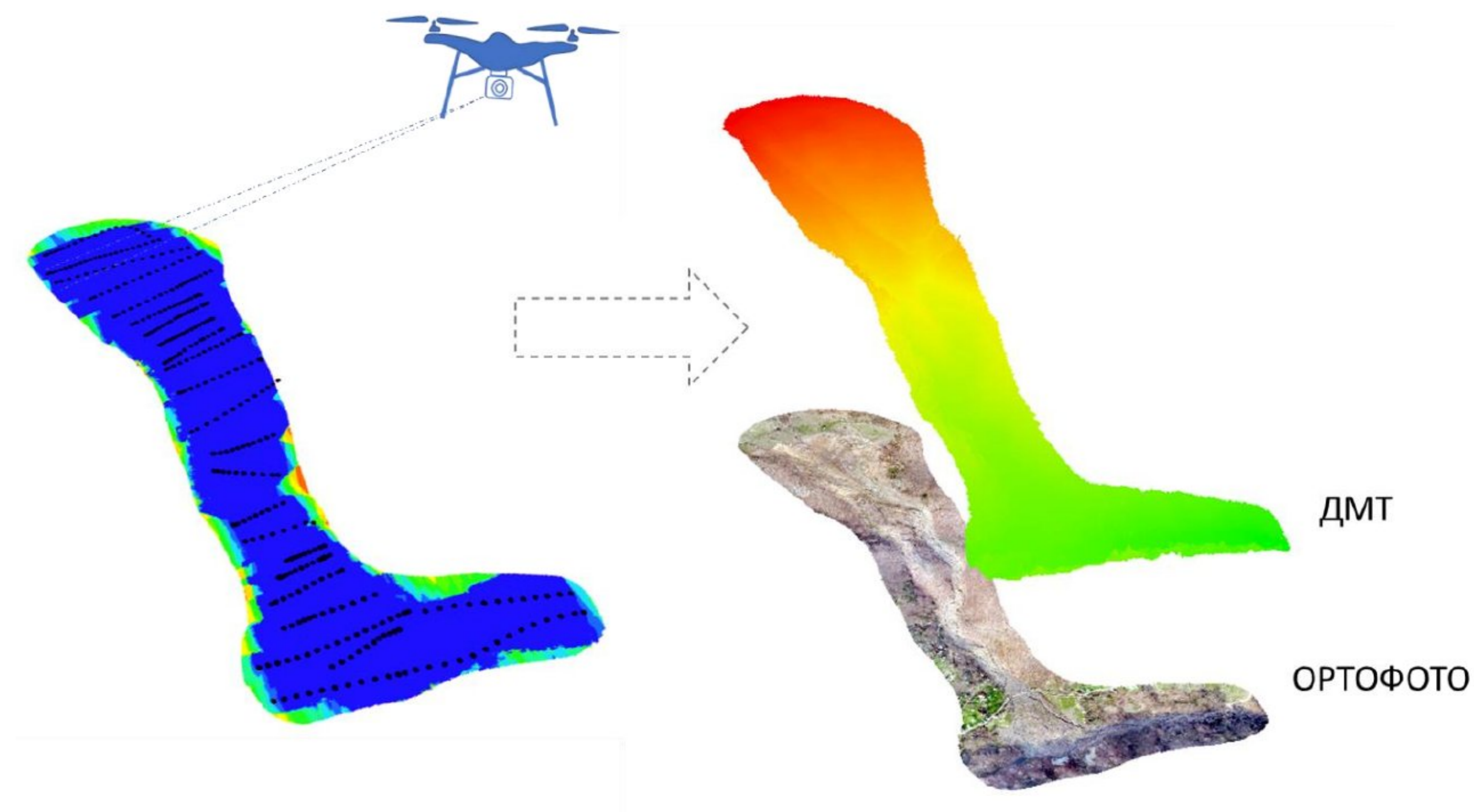
На слици 4.2 приказана је позиција снимања камером са приказом броја слика са одређене позиције.



Слика 4.2 Позиција камере и преклапања снимака а) тециште Селанац б) тециште Лева река

Као крајњи резултат добијени су ДМТ и ортофото снимци. Са сваке позиције је направљено више од 9 снимака који су коришћени за преклапање (Слика 4.2). Над

снимцима је извршено процесирање, након чега је извршена класификација облака тачака како би се добиле тачке површине терена, на основу којих су креирани ДМТ и ортофото снимци (Слика 4.3).

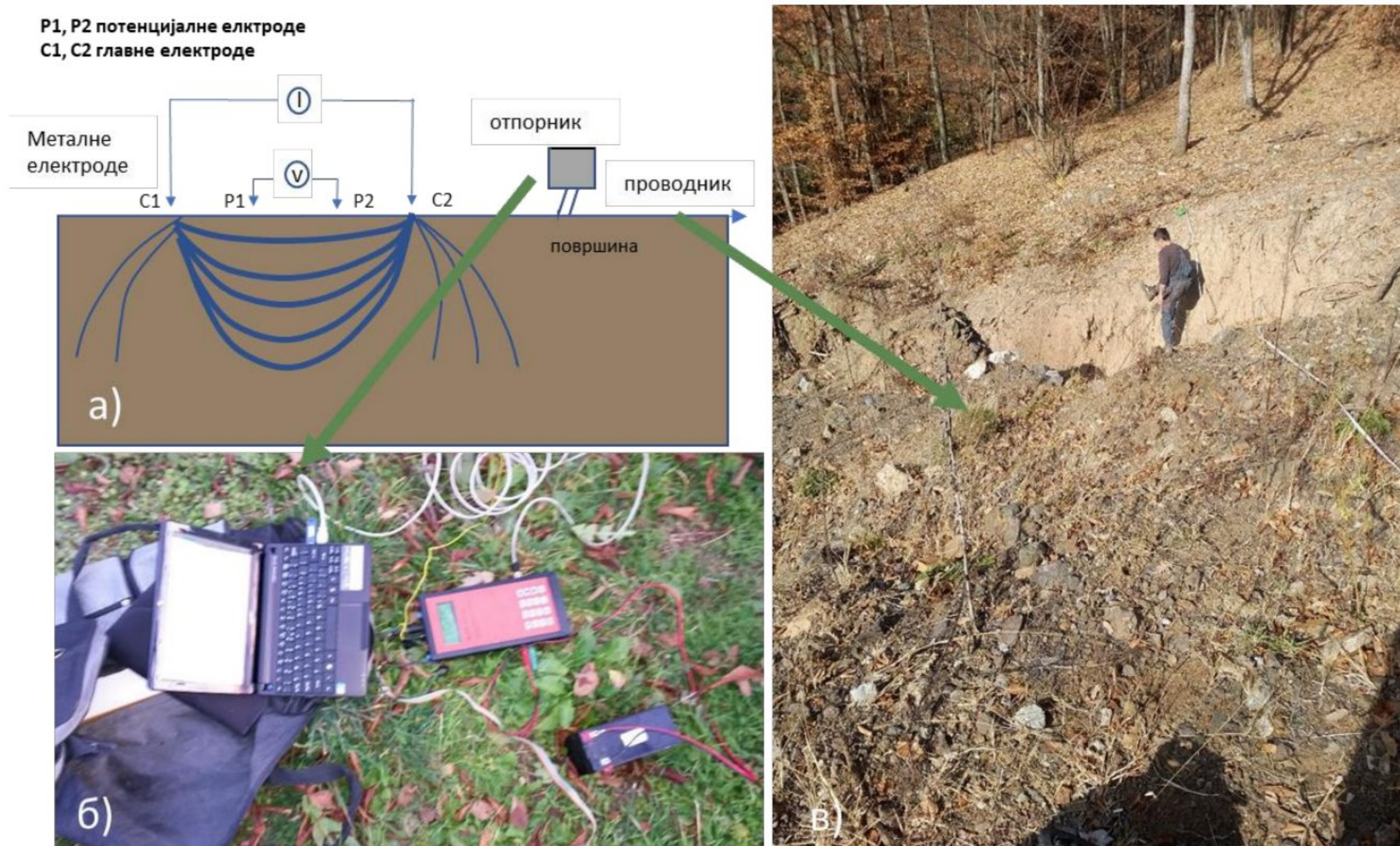


Слика 4.3 Поступак снимања беспилотном летилицом

4.2 ГЕОФИЗИЧКА ИСТРАЖИВАЊА

Електрометријска томографија (енгл. *Electrical Resistivity Tomography – 2D ERT*) је широко примјењена метода у области геофизике која се базира на пропуштању струје помоћу електрода које се постављају по дефинисаним профилима чиме се на основу мјерене отпорности корелишу са геолошким карактеристикама терена. Прије свега у литологији, дефинисању структурног склопа, влажности, присуства воде и др.

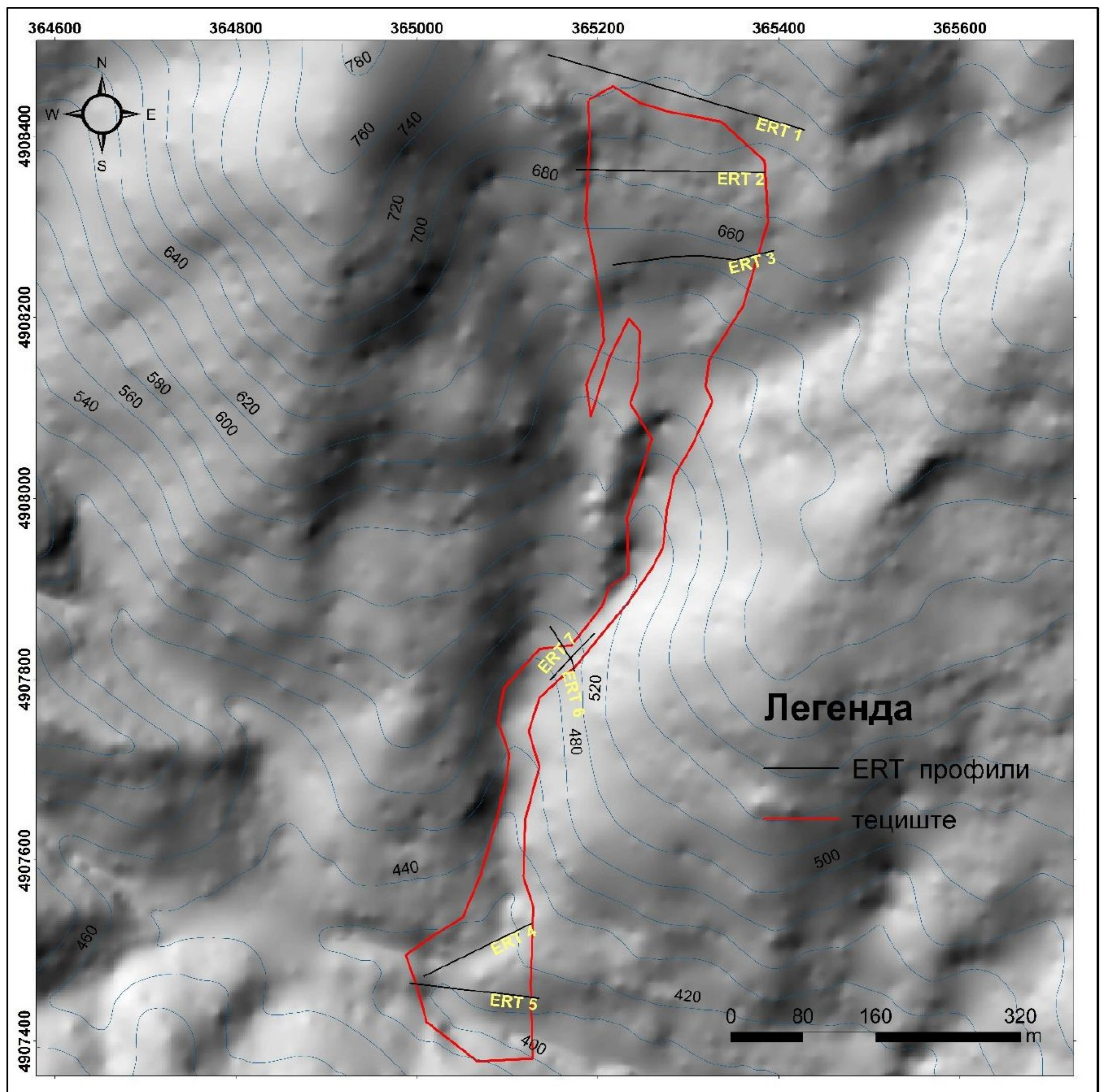
Ова метода је примјењена на тецишту Селанац, ради утврђивања његових геометријских карактеристика, дубине иницијалног блока, еродованог и нанијетог материјала, и исталоженог материјала. Како због димензија појаве, хетерогености материјала и неприступачности терена, класичне геотехничке истражне методе нису биле могуће, а ова метода се показала као најприхватљивија. Основни принципи ERT мјерења се могу видјети на Слици 4.4, са приказом слика мјерења на терену. Истраживање је обављено у новембру мјесецу, 2015. године од стране стручног тима Рударско-геолошког факултета, департмана за Геофизику.



Слика 4.4 а) Графички приказ ERT методе б) мјерни инструменти на терену в) позиционирање профила на тецишту Селанац

2D ERT техника може дати одговарајуће резултате у погледу геометријских карактеристика различитих типова клизишта, као и у погледу геолошких услова, потенцијално нестабилних зона, на основу садржаја воде или влажности (Perrone et al., 2014). У овом истраживању, седам ERT профила је урађено за истраживање тецишта. Шест профила нормално на правац кретања, док је један у зони транспорта уздужни профил. Сви паралелни профили обухватају и зону стабилног терена како би се детектовала границе покренутог материјала (Слика 4.5) (Guerriero et al. 2017; Rezaei et al., 2019). Мјерења у свим профилима су изведена коришћењем инструмента „4-point light HP resistivity meter“ (LGM Lippmann-GERMANY), коришћењем 20–60 електрода. Овај систем смањује вријеме мјерења. Све оперативне електроде по профилу су повезане са мјерачем отпорности преко вишејезгарних каблова. За свако појединачно мјерење, мјерач отпорности бира четири електроде и мјери привидну отпорност (Rezaei et al., 2019).

Овај процес је поновљен неколико пута за различите парове електрода за сваки профил. Прелиминарне анализе мјерених података приказују добар квалитет података. С обзиром да истражно подручје има комплексну топографију, топографски подаци су прикупљени коришћењем ДМТ 30 cm резолуције. Растојање између електрода (4–5 m) и топографски подаци (изведени из ДМТ-а) профила су коришћени у софтверу RES2Dinv за прорачун електричне отпорности (Loke et al., 2013). Софтвер је базиран на методу најмањих квадрата који користи метод коначних елеманата (Silvester and Ferrari 1990) и метод коначних разлика (Dey and Morrison 1979). Главна информација изведена примјеном 2D ERT технике је била процјена дубине покренутог материјала и лоцирањем површи базе и бочних граница тецишта (Lapenna et al., 2005; Perrone et al., 2014).



Слика 4.5 Положај ERT профила на дигиталном моделу терена

4.3 ОДАБИР УЗОРАКА

Након картирања терена, приступљено је узимању узорака за лабораторијска испитивања. Узорци су одабрани из зоне иницијације и зоне транспорта. Код тецишта материјал је јако хетероген и транспортован на велике удаљености, све до зоне депозиције гдје је акумулиран највећи дио крупног материјала. Пошто се ради о „поремећеним“ узорцима, узимају се узорци тла који ће бити репрезентативни за лабораторијска испитивања.



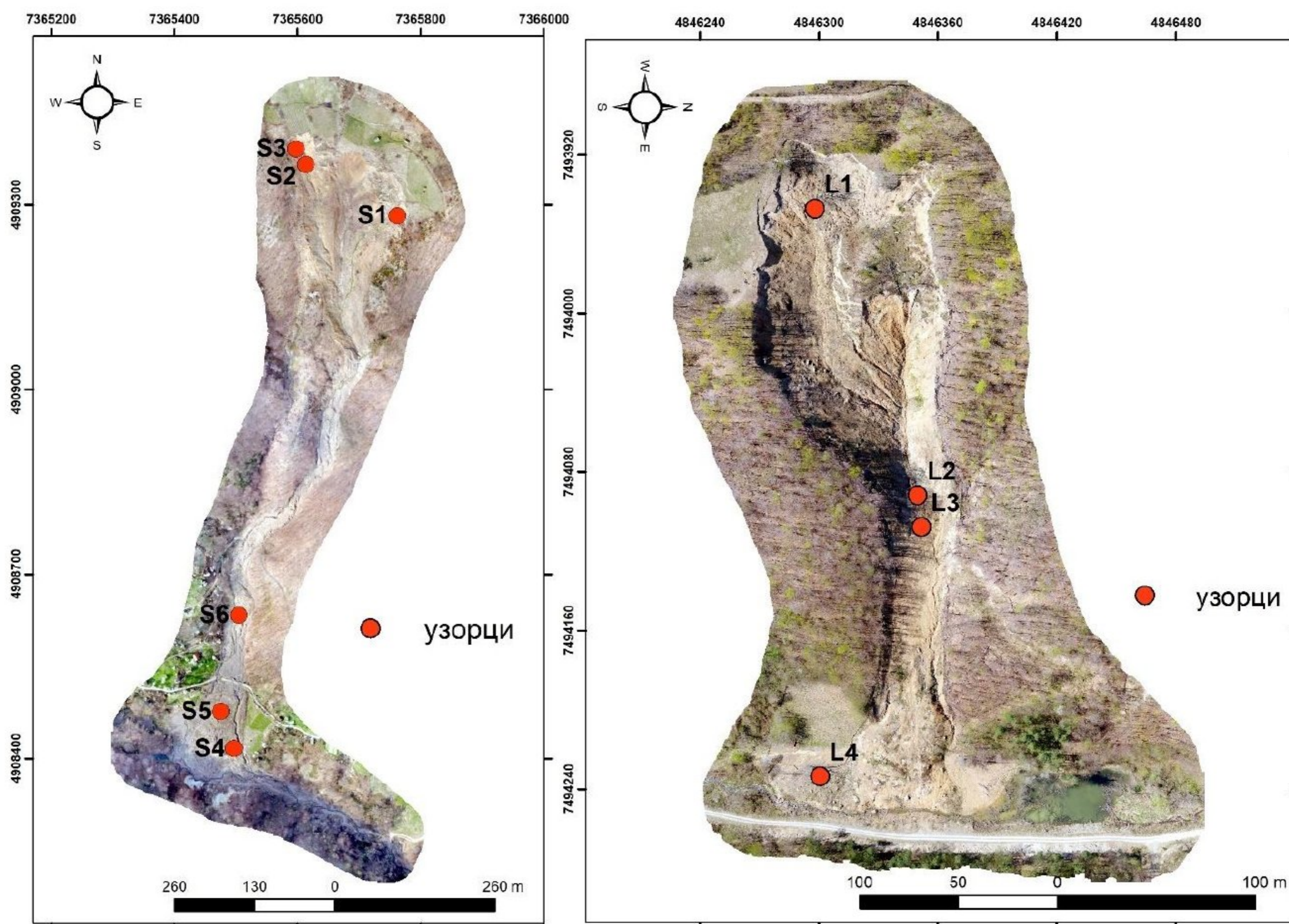
Слика 4.6 Узимање узорака са терена а) мјесто узетог узорка S2 у иницијалној зони б) узимање узорка са тецишта Лева река (фото Миловановић, 2017)

Приликом одабира узорака, вођено је рачуна да буду одабрани из сваког елемента тецишта. У случају тецишта Селанац, одабрано је 6 узорака: 3 у иницијалној зони, 2 у зони депозиције и 1 у зони транспорта. У случају Лева реке, од одабраних 4 узорка, један је из иницијалне зоне, два из зоне транспорта и један из зоне депозиције. У случају Селанца, одабрани узорци су и са одломцима већим од 60 mm, док је код Лева реке издвојен узорак до максималних 40 mm. Приказ масе добијених узорака дат је у Табели 4.2. Узорци за Леву реку су у распону од 3-4 kg. Од одабраних узорака, обрађен је један који је коришћен за лабораторијска испитивања.

Табела 4.2 Маса одабраних узорака са терена и репрезентативног узорка Лева река

Селанац	
Ознака	Маса узетог узорка (g)
S1	5716.6
S2	7055
S3	7361.8
S4	6412.29
S5	6190.7
S6	7894
Лева река	
L	3180.4

Узорци су узети утискивањем цијеве пречника $\varnothing 10$ mm у површински дио покренуте масе (Слика 4.6 б)). Позиције одабраних узорака дате су на слици 4.7.



Слика 4.7 Мјеста узетих узорака на тециштима

4.4 ЛАБОРАТОРИЈСКА ИПИТИВАЊА

Лабораторијска испитивања су изведена у циљу дефинисања основних идентификационо–класификационих карактеристика покренутог материјала. Одабрани материјал је узет са више локација тецишта, осим зоне депозиције гдје је депонован најкрупнији материјал. Највећи значај за дефинисање кретања тецишта, има ситнозрни материјал, стога се приликом одабира узорака водило рачуна о присуству ситнозрних честица који су саставни дио флуида.

Лабораторијска испитивања су обухватила: сијање материјала, издвајање fine фракције на којој је рађен опит хидрометрисања, одабир дијела fine фракције за опит одређивања специфичне тежине и опит пластичности и опит падајућег конуса.

У циљу класификовања тецишта на основу граулометријског састава рађене су лабораторијска испитивања одређивања сијања и хидрометрисања.

Метода сијања је рађена на материјалу крупнијих димензија према стандарду SRPS EN ISO 17892-4. Коришћена су сита стандардних димензија (200, 140, 120, 90, 80, 60, 50, 40, 30, 20, 12,5; 8, 4, 2, 0,8, 0,63, 0,425, 0,2, 0,075 mm) (Слика 4.8 а)). За тециште Селанац урађен је опит сијања на крупнозрном материјалу на свих 6 узорака. За тециште Лева река урађен опит на једном репрезентативном узорку одабраном методом „четвртања“. Пошто је материјал истовјетног састава у свим дијеловима тецишта, одабран је узорак у распону до 40 mm.

Метода хидрометрисања је урађена на ситнозрном тлу (пречник зрна <math><0.06\text{ mm}</math>) гдје се на основу брзине тоњења честице у посуди одређује величина честица према Штоксовом закону (фотографија апаратуре на слици 4.8 б)). Опит је рађен према стандарду SRPS EN ISO 17892-4. Опит хидрометрисања је рађен у комбинацији са сијањем на издвојеном узорку масе у циљу добијања мијешане криве. Према стандарду, комбиновани опит се ради у случају да је 50% одабраног узорка ситнозрни материјал. Опит је рађен због специфичности истраживања и чињенице да ситнозрни материјал има значајан утицај у процесу течења и сматра се саставним дијелом флуида. Стога је одабран по један узорак за оба тецишта и на њима урађен комбиновани опит. У Табели бр. 4.3 дата је маса издвојених узорака за добијање ијешане криве за оба тецишта.

Табела 4.3 Одабрана количина узорка за добијање мјешане криве

Тециште	Селанац	Лева река
маса крупнозрног материјала 0,063–40 mm (g)	2017,4	3097,9
маса ситнозрног материјал <math><0,063\text{ mm}</math> (g)	558,3	512,1
укупно (g)	2575,7	3610

Одређивање специфичне тежине узорка је изведена према стандарду SRPS EN ISO 17892-3:2016 у циљу добијања подака о густини чврстих честица. На одабраном узорку од 50 g уз додатак воде мјери се маса пикнометра и узорка. Након загријавања пикнометра до испарења воде, мјери се бруто маса узорка у пикнометру. На основу мјерења бруто масе у влажном и сувом стању добијена је коначна вриједност специфичне тежине. Добијена вриједност је коришћена за податак у SPH моделима.



Слика 4.8 а) сита коришћена за одређивање гранулометријског састава б) апаратура коришћена за опит хидрометрисања

Опит падајућег конуса је изведен у циљу одређивања граница течења према стандарду SRPS EN ISO 17892-12. У опиту је коришћен падајући конус приказан на слици 4.9. Овај опит се ради на апарату који има конус од нерђајућег челика за закривљеношћу врха под углом од 30°, дужине 35 mm, причвршћен за основу челичног штапа. Тежина овог монтираног дијела је 80 g. Притикском на дугме, конус продире у узорак који се поставља на подлогу. У посуду пречника 55 mm припрема се узорак претходно припремљен додавањем воде. Свако следеће мјерење се врши на истом узорку са додавањем. На скали се читавају вриједности продирања конуса. На основу прочитаних вриједности продора конуса, добијена је вриједност границе течења. Рађена су по три мјерења на сваком од узорака.

Опит пластичности је изведен на одабраним узорцима прављењем ваљкастих цилиндричних облика на непрпусној тврдој подлози, уз постепено додавање воде. Касагранде је установио за границу пластичности влажност у моменту када тло пуца пажљивим прављењем ваљка до пречника од 3 mm. Уколико се пукотине појаве када је пречник ваљка мањи од 3 mm, тло је јако влажно, уколико дође до пуцања при већем пречнику, узорак има мању влажност од границе пластичности. Узорак се опет преобликује и ваља, по потреби се додаје вода и понавља се поступак. Када се постигне одговарајућа дужина и дебљина ваљака, мјери се влажност по утврђеном поступку SRPS EN ISO 17892-12 .



Слика 4.9 Падајући конус

Индекс пластичности и Индекс течења је израчунат на основу релација:

$$I_p(\%) = w_L(\%) - w_P(\%) \quad (4.1)$$

$$I_L = \frac{w(\%) - w_P(\%)}{I_P(\%)} \quad (4.2)$$

$$I_C = \frac{w_L(\%) - w(\%)}{I_P(\%)} \quad (4.3)$$

На основу свих добијених вриједности урађена је класификација тла према USCS класификационом систему обједињујући гранулометријски састав и пластичност тла. Класификација се ради на честицама мањим од 75 mm. Резултати за оба тецишта су финално приказани дијаграмима пластичности.

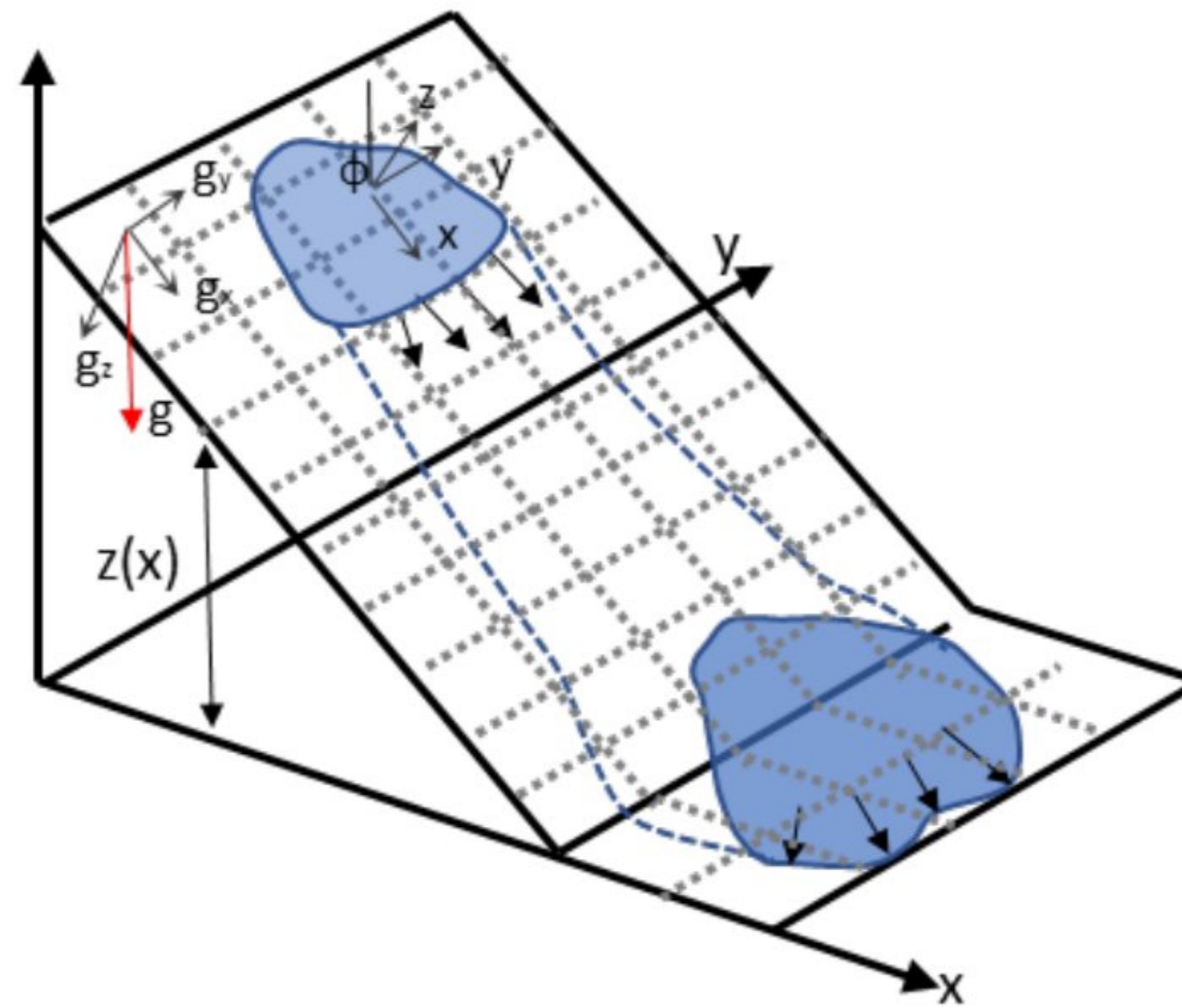
5 МЕТОДЕ МОДЕЛОВАЊА

За израду модела пропагације тецишта у дисертацији су коришћена два различита приступа: један базиран на FVM и други базиран на безмрежном методу SPH. Први приступ је реализован применом RAMMS DBF софтвера, док је други реализован примјеном кода развијеног од стране истраживачке групе у Мадриду (Pastor et al., 2009).

5.1 RAMMS (RAPID MASS MOVEMENT SOFTWARE)

RAMMS (*Rapid Mass Movement Software*) је развијен 2005. године од стране тима експерата у Швајцарској (Avalanche Research SLF и WSL Institute for Snow). Главни дometи су постигнути истраживањем случаја Илграбен тецишта у Швајцарској (Christen, 2010 a, Christen, 2010 b, Frank et al., 2015, Frank et al., 2017). У питању је једнофазни модел базиран на Методу коначних запремина (FVM) рачунајући помјерања са промјеном запремине и притисака, дубине са временом – F (V, P, h, t).

Као главни улазни податак, користи се подлога терена, Дигитални модел терена (ДМТ). Детаљност овог улазног податка утиче на крањи резултат. Новије верзије програма нуде и могућност изузимања материјала који је покренут из иницијалне зоне и дефинисања новог модела површине терена („деформисаног“) за наредне анализе. Предложена резолуција од стране истраживача који су радили на развоју програма је да улазни модел има резолуцију од 5 m до 25 m. У овим моделима коришћена је и боља и лошија резолуција и вршено поређење резултата на основу те неједнакости у тачности ДМТ-а. Прорачун је базиран на декартовом координатном систему (Слика 5.1).



Слика 5.1 Топографија у декартовом координатном систему $Z(X,Y)$ гдје је површина дефинисана x,y,z локалнит координатнит системом

Дефинишући у простору нестабилну иницијалну зону, брзина кретања материјала се одређује према:

$$\mathbf{v}(x, y, t) := (v_x(x, y, t), v_y(x, y, t))^T \quad (5.1)$$

гдје се брзина одређује као тензор брзина у два правца у зависности од времена.

Формула за баланс масе укључује конкретне податке дубине тока $h(x, y, t)$ и брзине тока $v(x, y, t)$ изразом:

$$Q(x, y, t) \cdot = \partial t h + \partial x (h v_x) + \partial y (h v_y) \quad (5.2)$$

гдје је $Q(x, y, t)$ продукција покренуте масе, v_x и v_y су осредњене брзине по дубини у хоризонталним правцима x и y (Christen et al., 2010a, Frank et al., 2017). Једначине равнотеже момента пондерисане по дубини се узимају у обзир за одржање момента у два правца x и y према:

$$Sg_x - Sfx = \partial t (h v_x) + \partial x (c_x h v_x x^2 + g_z k_{a/p} \frac{h^2}{2}) + \partial y (h v_x v_y) \quad (5.3)$$

$$Sg_y - Sfy = \partial t (h v_y) + \partial x (h v_x v_y) + \partial y (c_y h v_y^2 + g_z k_{a/p} \frac{h^2}{2}) \quad (5.4)$$

гдје се притисак тла $k_{a/p}$ обично оставља да буде 1 за случај примјене Voellmy реолошког закона, c_x и c_y су топографски коефицијенти детерминисани из дигиталног модела терена, Sg је ефективно гравитационо убрзање, и Sf је фрикционо успорење у правцима x и y (Christen et al., 2010b).

Фрикционо успорење Sf тока је детерминисано коришћењем Voellmy фрикционих релација и дефинише је Кулонов фрикциони коефицијент μ , који је

директно зависан од нормалног напона, као и турбулентни параметар трења (коэффициент ξ), који зависи од брзине тока v (Christen et al., 2010a, Christen et al. 2012; Bartelt et al., 2013):

$$S_f = \mu \rho g h \cos q + (\rho g v^2) / \xi \quad (5.5)$$

гдје је ρ густина, g је гравитационо убрзање, q је нагиб падине, и $\rho h g \cos \varphi$ је компонента нормалног напона на површини тока. Тангенс угла ефективног унутрашњег трења се може дефинисати као отпорност чврсте фазе (израз μ) који у великој мјери контролише успоравајуће понашање код спорих кретања токова. Отпорност вискозне или турбулентне течне фазе (израз ξ) одређује кретање много бржих токова (Bartelt et al., 2013). Формула 3.7 представља Воелмијев реолошки закон претходно објашњен у Поглављу 2.

5.1.1 Моделовање приноса материјала

Алгоритам ерозије у RAMMS моделу је дефинисан коришћењем максималног потенцијала дубине ерозије e_m и специфичног степена еродибилности. Алгоритам ерозије предвиђа максималну потенцијалну дубину ерозије e_m као функцију прорачунатог базног смичућег притиска у сваком пикселу. Алгоритам ерозије развијен је на примјеру посматрања тецишта Илграбен на основу чега су утврђене одређене законитости (Frank F. et al., 2015).

$$e_m = 0 \text{ за } \tau < \tau_c \quad (5.6)$$

$$e_m = dz/dt (\tau - \tau_c) \text{ за } \tau \geq \tau_c$$

Када је критични смичући напон τ_c достигнут, материјал може бити еродован из канала. Ерозија престаје када стварна дубина ерозије e_t достигне максималну потенцијалну дубину e_m (једначина 4.9).

Смичући напон τ је апроксимиран коришћењем :

$$\tau = \rho g h \tan \theta \quad (5.7)$$

гдје је ρ густина материјала, g гравитационо убрзање, h висина тока, а $\tan \theta$ је нагиб падине.

Потенцијална дубина ерозије (у kPa) dz/dt контролише степен вертикалне ерозије (у правцу z) као линеарну функцију смичућег напона.

5.2 МЕТОД МОДЕЛОВАЊА ФЛУИДНИХ ДЈЕЛИЋА SPH – (SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS)

GeoFlow - SPH симулацијски модел је развијен у Мадриду од стране експертског истраживачког тима Pastor et al., 2009 током десет година. Првенствено је тестиран на теоријском, а потом експерименталном, па и реалним случајевима појава течења.

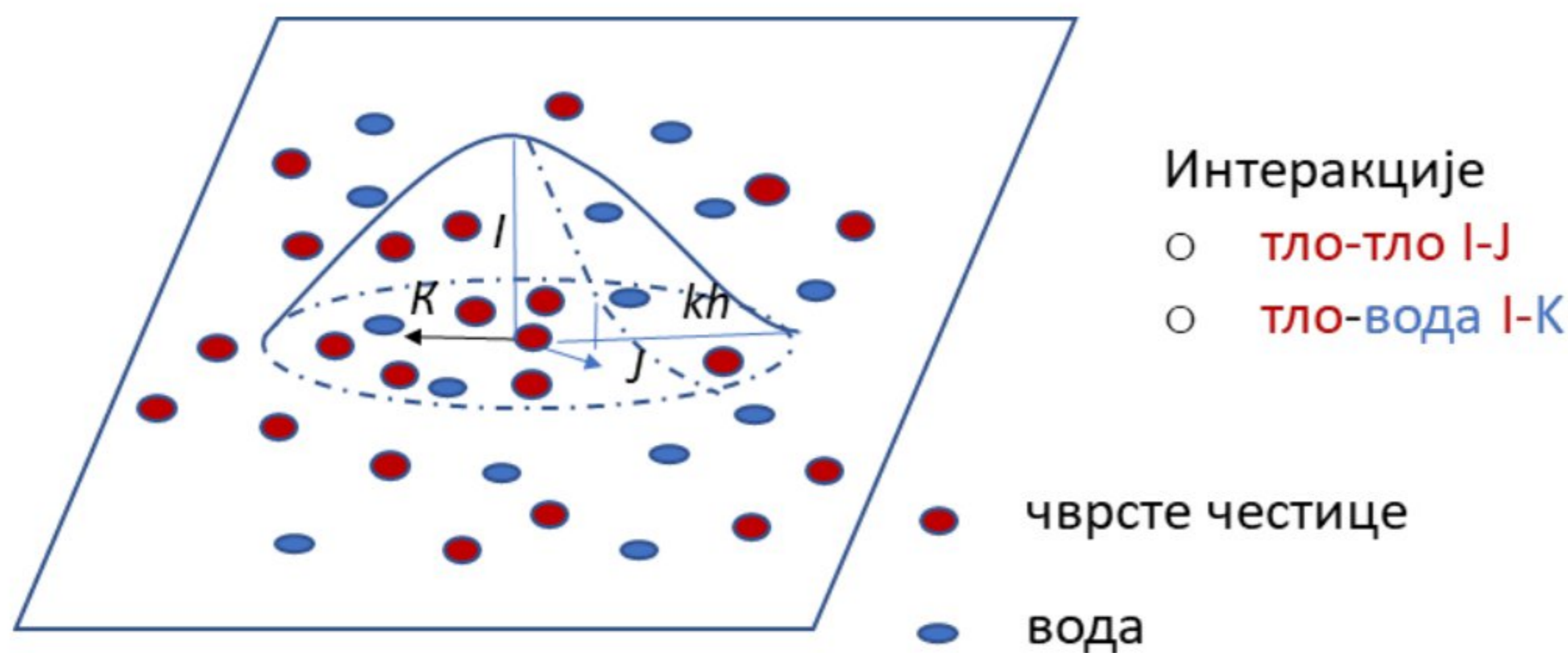
SPH метода је првенствено настала од стране Lucy (1977) и Gingold и Monaghan (1977) за моделовање астрофизичких проблема. Ова техника је примјењена у разним

подручјима с обзиром да је могуће моделовати компликоване случајеве који обухватају деформације великих помјерања, као што је моделовање брзих клизишта у Механици тла (McDougall et al., 2004; McDougall, 2006; Rodriguez-Paz et al., 2005). Први резултати примјене ове методе у моделовању клизишта, могу се наћи у радовима Liu and Liu (2004).

У овом моделу, 3D проблеми се трансформишу у 2D проблеме примјеном интегралења по дубини (*depth-integrated model*). Као резултат, модел интеграљен по дубини даје одличан спој тачности и времена трајања прорачуна. Ова техника је успјешно примјењена од стране Pastor et al. 2014 и Cascini et al. 2014, Cascini et al., 2016 али и на примјерима лавина дробине од стране Cuomo et al. 2014.

Двофазни SPH модел интеграљен по дубини, који је коришћен у дисертацији је базиран на математичком моделу развијеном од стране Zienkiewicz and Shiomi 1984 који је сличан моделу Pitman and Le, 2005.

Како би се дискретизовала пропагацијска маса у SPH методу, први корак је да се та маса сведе на систем тачака, као што је приказано на Слици 5.2, од којих свака тачка има индивидуално материјално својство.



Слика 5.2 SPH двофазни модел материјалних тачака и интеграције у односу на тачку I (Pastor et. al, 2009)

Затим, процесом интерполације прорачунавају се релевантне карактеристике сваке тачке непознатих својстава преко сусједних тачака познатих својстава коришћењем упрошћене кернел функције ($W_{ij} = W(x_i - x_j, h)$), без потребе за дефинисањем ниједног елемента. Израз може бити написан на сљедећи начин:

$$f(x_i) = \int f(x_j) W(x_i - x_j, h) dx_j \tag{5.8}$$

гдје је функција $f(x)$ апроксимирана позицијом вектора x у простор, а кернел функција, $W(x_i - x_j, h)$ зависи од 1) интерполације растојања између честица x и x' и 2) дужине h која одређује зону утицаја функције W . Постоји више услова које функција треба да задовољи да би могла да се користи у програму, више о томе се може прочитати код Pastor et. al, 2009 и Тауеџи, 2019.

Сљедећи корак подразумева да се наведене математичке формуле употпуне коришћењем одговарајућег конститутивног модела (релошког закона) и емпиријских закона. Ови модели су добијени коришћени фрикционим Воелмиевим реолошким законом који је базиран на истим карактеристикама као фрикциони реолошки модел, са узимањем у обзир турбулентног параметра. GeoFlow-SPH код (базиран на програмском језику Fortran) садржи различите емпиријске законе који покривају

степен повећања тецишта (E_r), као што је Хунгров ерозиони закон (Hungr, 1995), Егаширин и Бланков, претходно објашњени у Поглављу 2.

5.2.1 Пропагацијски модел

Пропагацијски модели се могу подијелити генерално на једнофазне и двофазне моделе. Четири врсте математичких модела се могу користити у програму (Тауеби, 2022): 1) једнофазни модел пропагације 2) једнофазни пропагационо-консолидацијски моделе 3) двофазни пропагацијски модел 4) двофазни пропагацијско-консолидацијски модел.

Двофазни пропагацијски модели узимају у обзир двије фазе-чврсту и флуидну фазу. Ефекти разлике брзина међу фазама се узимају у обзир. За разлику од пропагацијско-консолидацијског модела, порни притисци се занемарују узимајућу у обзир високу водопрпусност. Ови модели су најпогоднији у случају течења дробине, док код пропогацијско-консолидацијског модела порни притисак повећава мобилност кретања и има утицај на процес, па је прикладнији за течење тла. У дисертацији је на примјеру оба тецишта коришћен SPH двофазни пропагацијски модел.

5.2.2 Конститутивне једначине двофазних пропагацијских модела

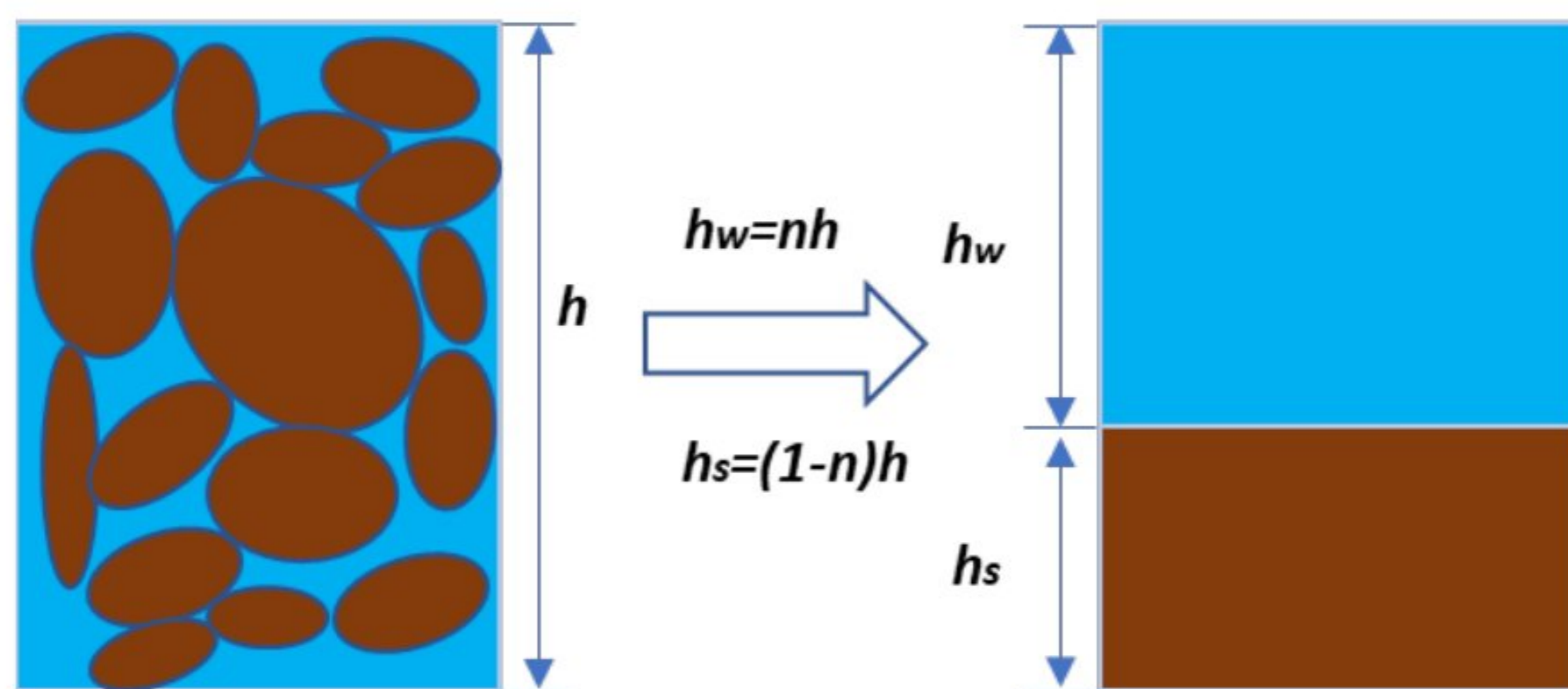
Као што је већ наведено, неопходно је примјенити одговарајуће конститутивне једначине. Основне једначине подразумијевају три корака: 1) одабир реолошког закона 2) дефинисање сила интеракције међу фазама 3) прорачун приноса материјала.

Код модела базираних на континууму, за разлику од дискретних модела, неопходно је узети у обзир међусобној интеракцију фаза. Стога је неопходно дефинисати једначине сила које представљају интеракцију међу фазама. Неки од првих објашњења у моделовању вишефазних система се могу наћи код Anderson and Jackson, 1967. Узимање у обзир силе интеракције има значајну улогу јер има утицај на динамику течења приликом моделовања. Генерална формула интеракције се може представити (Тауеби et al, 2022):

$$\bar{R} = (1 - n)\bar{R}_s = -\bar{R}^{(w)} = -n\bar{R}_w \quad (5.9)$$

гдје \bar{R}_s означава унутрашњу отпорност чврсте фазе у односу на релативну брзину флуидне фазе, а \bar{R}_w је отпорност флуидне фазе под утицајем чврстих честица.

Основни закон који се користи је Дарсијев закон интеракције, на које се ослањају и други закони (Тауеби et al, 2022): 1) Anderson–Jackson (Anderson and Jackson, 1967) који се примјењује у случају за велике релативне брзине међу фазама и 2) Kozeny-Carman (Kozeny 1927, Carman, 1956). На Слици 5.3 се може видјети графички приказ потпуно засићеног порозног материјала. Потешкоћа приликом моделовања појава нестабилности уопште јесте у прорачуну помјерања по дубини и немогућности да се дефинишу честице по дубини у 2D моделима. Како би се превазишао тај проблем, покренута маса се може представити коначним бројем колона (Слика 5.3), од којих свака од њих представља честицу. Укупна висина покренутог материјала је подијељена на одговарајућу висину чврсте фазе и висину флуидне фазе. Интеракција међу овим фазама се прорачунава по већ дефинисаним законима интеракције који зависе од порозности и водопрпусности материјала.



Слика 5.3 Графички приказ фаза који је корелисан са висином чврсте и флуидне фазе

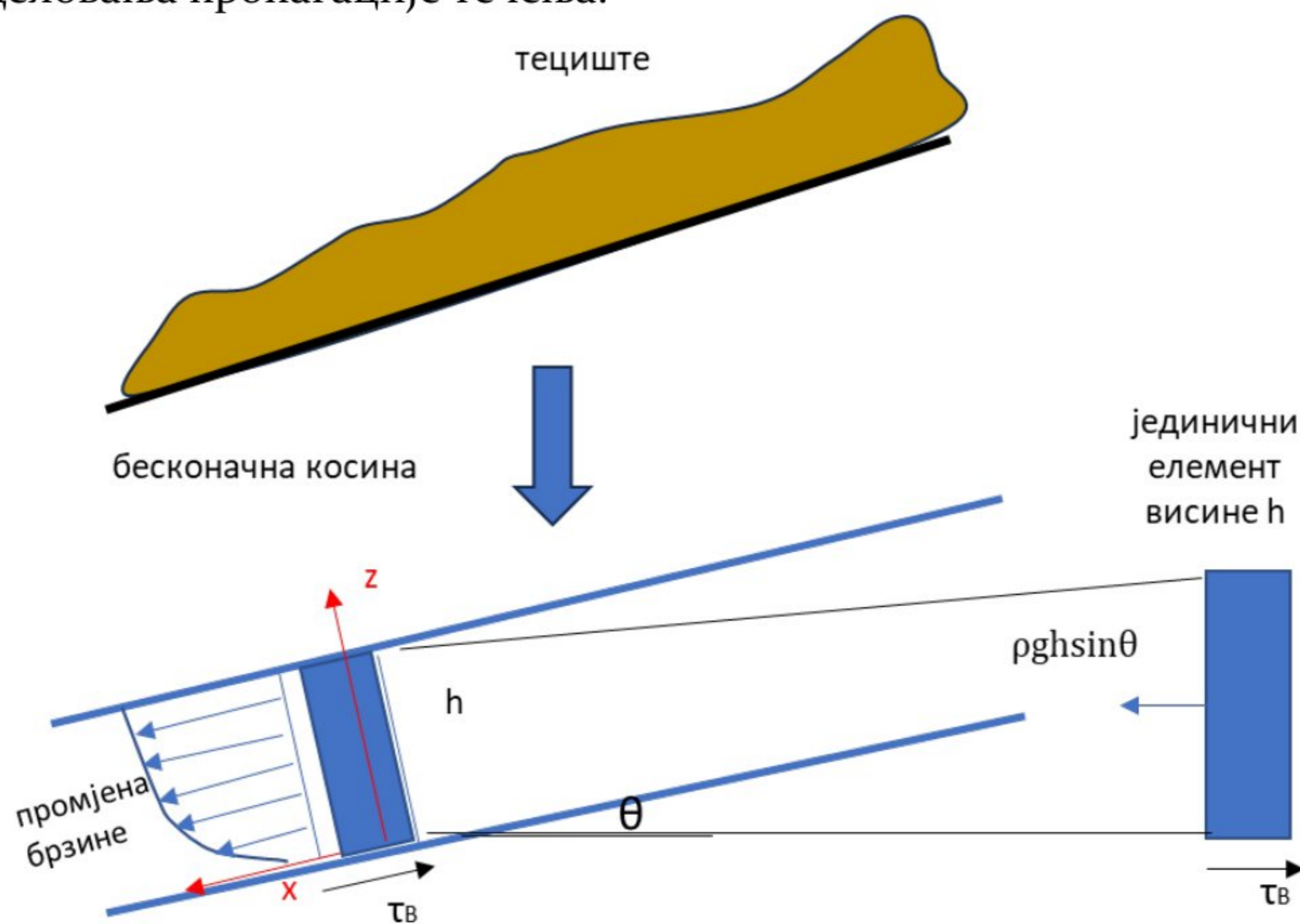
На основу познатих формула из механике тла за порозност, познате висине покренутог материјала, и густине контролише се динамика течења.

$$n = \frac{h_w}{h_s + h_w}; n = \frac{\rho_s - \rho_m}{\rho_s - \rho_w} \tag{5.10}$$

гдје је n порозност, h_w висина флуида, h_s висина чврсте фазе, ρ_s густина чврстих честица, ρ_m густина материјала, ρ_w густина воде.

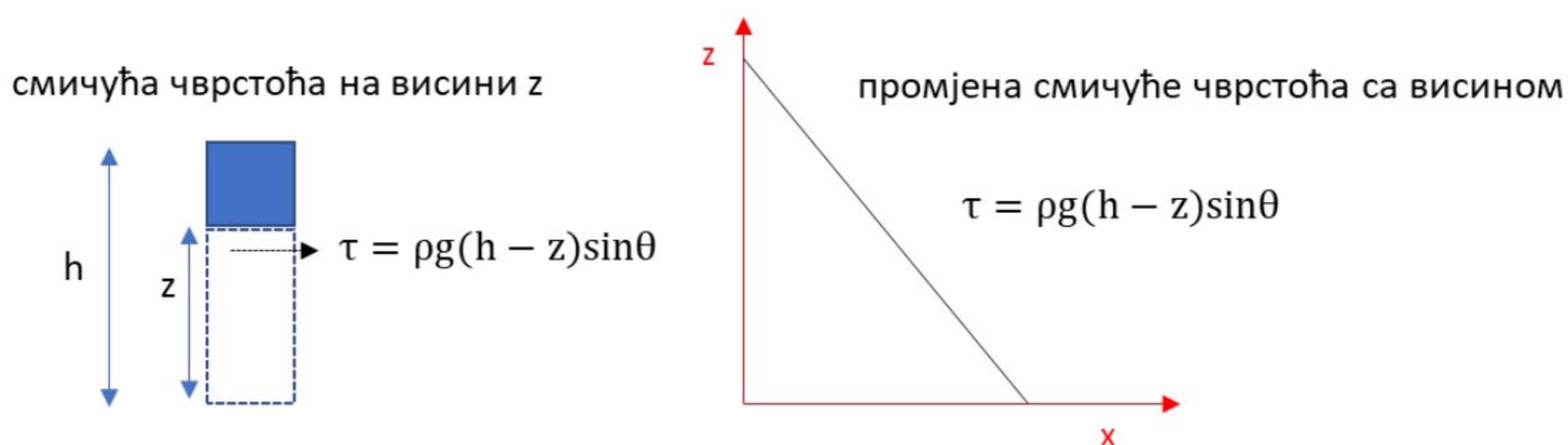
5.2.3 Примјер бесконачне косине

Најједноставнији приказ који се најчешће користи за дефинисање основног реолошког модела тецишта, у случају великих деформација на које се примјењује моделовање параметара по дубини, је примјер бесконачне косине, како би се дефинисали основни параметри материјала који тече (Слика 5.4). Узимајући у обзир велику дужину тецишта у поређењу са дубином, примјер бесконачне косине уз дефинисање параметара на јединичном елементу је најадекватнији за поједностављен приказ моделовања пропације течења.



Слика 5.4 Примјер прорачуна напона на моделу бесконачне косине

За разлику од клизишта, узима се у обзир висина h покренуте масе која тече и у односу на подлогу има смичући карактер. Појам смицања, код тецишта, нема исти смисао као код клизишта, имајући у виду да се код тецишта ствара постепено одламање материјала дуж контакта флуида са компактним тлом у бази (некретаном дијелу терена у подини флуида), као и да се дијелови (слојеви) унутар покренутог флуида крећу различито, за разлику од клизишта код којих се чврста фаза равномерно транслаторно креће. На слици 5.5 дат је примјер јединичног елемента бесконачне косине са основним параметрима који се њиме дефинишу, што је поједностављен приказ нумеричког прорачуна у моделима пропагације.



Слика 5.5 Поједностављен приказ нумеричког прорачуна на примјеру јединичног елемента бесконачне косине

На примјеру на слици 5.5 на јединичном елементу дефинише се смичуће напрезање у бази према:

$$\tau_B = \rho g h \sin \theta \quad (5.11)$$

гдје су: ρ - густина флуида, g - гравитационо убрзање, θ нагиб и τ_B базни смичући напон.

На исти начин према овој формули, за јединични дио који тече од површине на одређеној дубини $(h-z)$, можемо дефинисати смичућу чврстоћу у односу на дубину :

$$\tau = \rho g (h - z) \sin \theta = \tau_B \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad (5.12)$$

Чврстоћа на смицање варира линеарно од нула на површини покренутог флуида, до контакта са површи течења када је највећа, што има и утицај на еродовање подлоге.

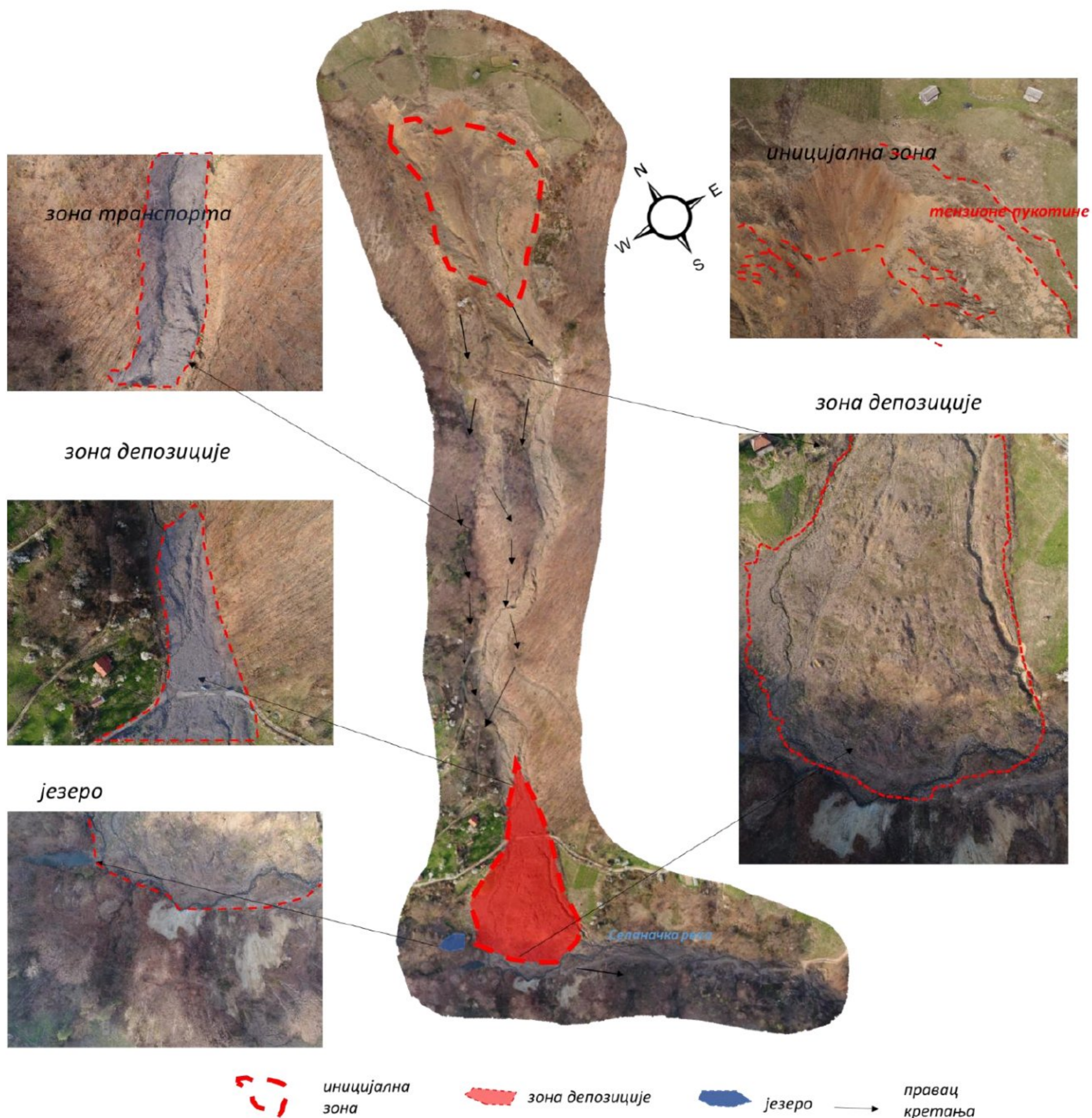
6 ОДРЕЂИВАЊЕ ОСНОВНИХ МОРФОМЕТРИЈСКИХ КАРАКТЕРИСТИКА

6.1 ТЕЦИШТЕ СЕЛАНАЦ

Као што је већ наведено у Поглављу 2., основни геометријски елементи тецишта подразумијевају дефинисање иницијалне зоне, зоне транспорта материјала и зоне депозиције. На ортофото снимку добијеном фотограметријским снимањем приказани су основни елементи тецишта. Првенствено је картирано шире подручје истраживања. У зони изнад великог тецишта, регистровано је мање тециште које се активирало

одвојено од великог. Позиција мањег тецишта у односу на велико тециште се види на *Pleiades* снимку (Слика 3.6).

На сљедећем прилогу приказан је ортофото снимак високе резолуције у зони великог тецишта на коме је изведено детаљно теренско истраживање и моделовање. Поред дефинисаних елемената, приказане су слике у карактеристичним дијеловима терена (Слика 6.3).



Слика 6.1 Ортофото снимак тецишта Селанац добијен UAV фотограметријским снимањем са карактеризацијом основних геометријских елемената

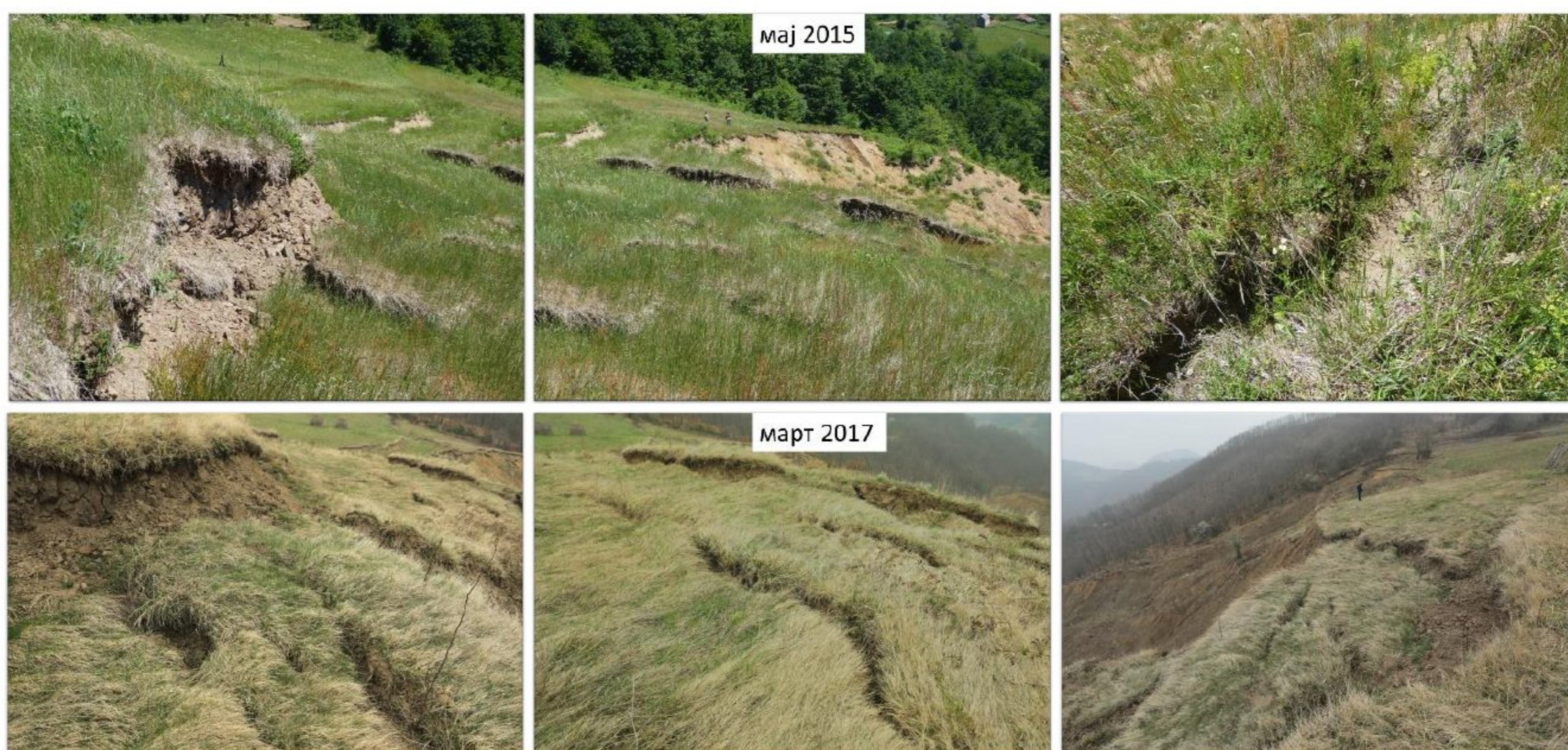
Мање тециште није имало утицаја на активирање већег тецишта, већ је дјеловало као одвојена појава. Стога није било предмет разматрања у дисертацији, али је активирано у исто вријеме када и велико тециште. Материјал се зауставио на платоу изнад чеоног ожиљка великог тецишта, гдје је терен блажег нагиба, те није имало значаја за активирање великог тецишта (Слика 6.2).



Слика 6.2 Мало тециште

Дубина у иницијалној зони је око 30 m у најдубљем дијелу. Укупна дужина транспорта материјала до зоне депозиције је износила око 1.1 km, док је ширина у најширем дијелу у зони иницијалног блока око 350 m.

У иницијалној зони регистроване су пукотине које се прате дуж цијеле ширине (Слика 6.1). Пукотине су великих дубина и до пола метра, а у неким дијеловима потенцијално и до неколико метара. Фотографије пукотина су приказане на Слици 6.3.



Слика 6.3 Пукотине у иницијалној зони на фотографијама из периода мај 2015 – март 2017

У зони транспорта, процјењена је дубина канала и до 12 m. Материјал је финозрн до крупних одломака ношених флуидом дециметарских димензија. У периоду другог обиласка терена видљиви су трагови кретања повремених токова дуж двије предиспониране јаруге (Слика 6.4).



Слика 6.4 Повремени водоток у зони активирања у марту 2015. године

У зони депозиције, материјал је метарских димензија у пречнику. Дјеловањем тецишта порушен је један објекат, који није био у употреби, а позициониран је у зони депозиције материјала. Материјал је преграђивањем Селаначке реке формирао мању акумулацију димензија око 20 m ширине, 10 m дужине (Слика 6.5).

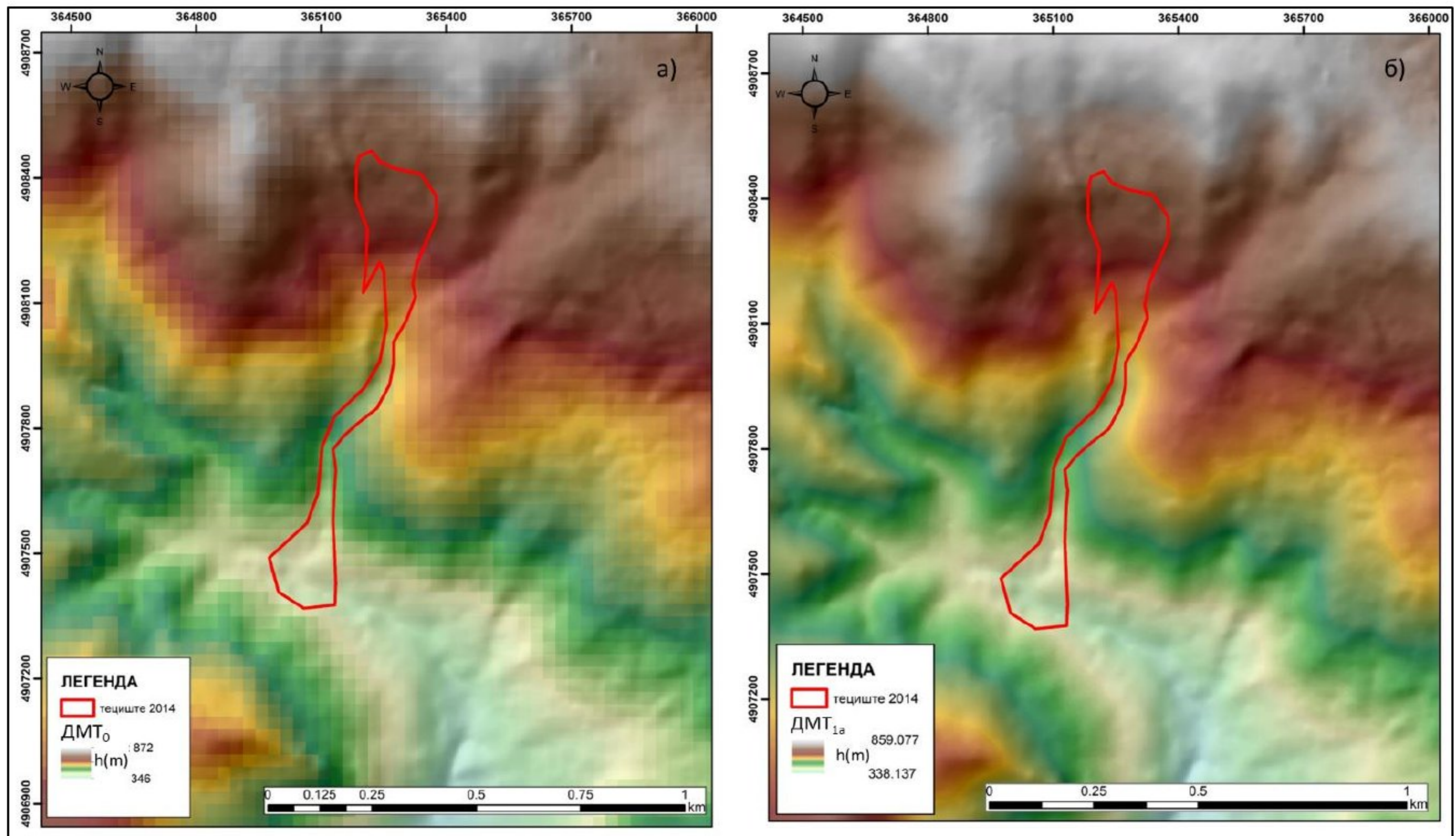


Слика 6.5 Зона депозиције са положајем акумулације

6.1.1 ДМТ ЕПОХЕ I

Најпре је било потребно израдити дигитални модел терена ширег подручја прије активирања процеса (ДМТо), који је приказан на Слици 6.6 са границама накнадно активiranог тецишта. Подаци о топографији терена користе се за израду нумеричких модела, као улазни параметар у .ascii формату. На првим моделима рађеним у RAMMS софтверу, вршене су анализе на ДМТо ниже резолуције (30x30 m) издвојеном из доступног ДМТ-а за подручја Општина Љубовија и Краљево. ДМТо општина је добијен

од стране Републичког геодетског завода приликом обраде података пројекта *Beware* (<https://geoliss.mre.gov.rs/beware/>). У даљем поступку, анализиран је модел ДМТ_{1а} више резолуције 5x5 m добијен у оквиру пројекта “Израда дигиталног ортофотоа у Републици Србији” реализованог у периоду од 2005. – 2010. године (Слика 6.6). Модел ове резолуције се сматра оптималном резолуцијом за моделовање великих деформација и прихватљивом за временско трајање симулације у коришћеним програмима (Krušić et al., 2019).



Слика 6.6 Дигитални модели терена са уцртаним положајем накнадно активираниог тецишта Селанац а) ДМТ_{1а} резолуције 30x30m б) ДМТ_{1а} резолуције 5x5 m

6.1.2 ДМТ ЕПОХЕ II

У циљу добијања прецизног Дигиталног модела терена (ДМТ_{1б}) високе резолуције (до 10x10 cm), и ортофото снимка високе резолуције (5x5 cm), у марту мјесецу 2017. године, урађено је фотограметријско снимање истражног подручја (тецишта Селанац) беспилотном летилицом. Ортофото снимак са положајем оријентационих и контролних геодетских тачака приказан је на Слици 6.7.



Слика 6.7 Положај оријентационих и контролних тачака

Снимање је урађено у зони тецишта, и једног дијела Селаначке ријеке. Урађен је дигитални модел терена у резолуцији од 10×10 и 30×30 cm (Слика 4.10), и ортофото снимци резолуције 5×5 cm (Слика 6.7). За потребе геореференцирања цијелог блока и релативног уклапања снимака коришћено је укупно седам оријентационих тачака. Поред поменутих оријентационих тачака, коришћена је и једна контролна тачка, која се користила за независну контролу квалитета ДМТ. Координате оријентационих и контролних тачака одређене су методом релативног кинематичког позиционирања у реалном времену (РТК) глобалним навигационим сателитским системом (ГНСС) примјеном Активне Геодетске Референтне Основе Србије (АГРОС). У табелама 6.1 и 6.2 дати су основи подаци везани за одступања положајних координата (ΔX и ΔY) и висина (ΔH) оријентационих и контролних тачака. Односно разлике, положајних координата и висина тачака добијених поменутиим ГНСС мерењем (које се у овом случају подразумијевају као условно тачне - X, Y, H) и добијених из ортофото симака и ДМТ (које се у овом случају подразумијевају као мерене - X', Y', H').

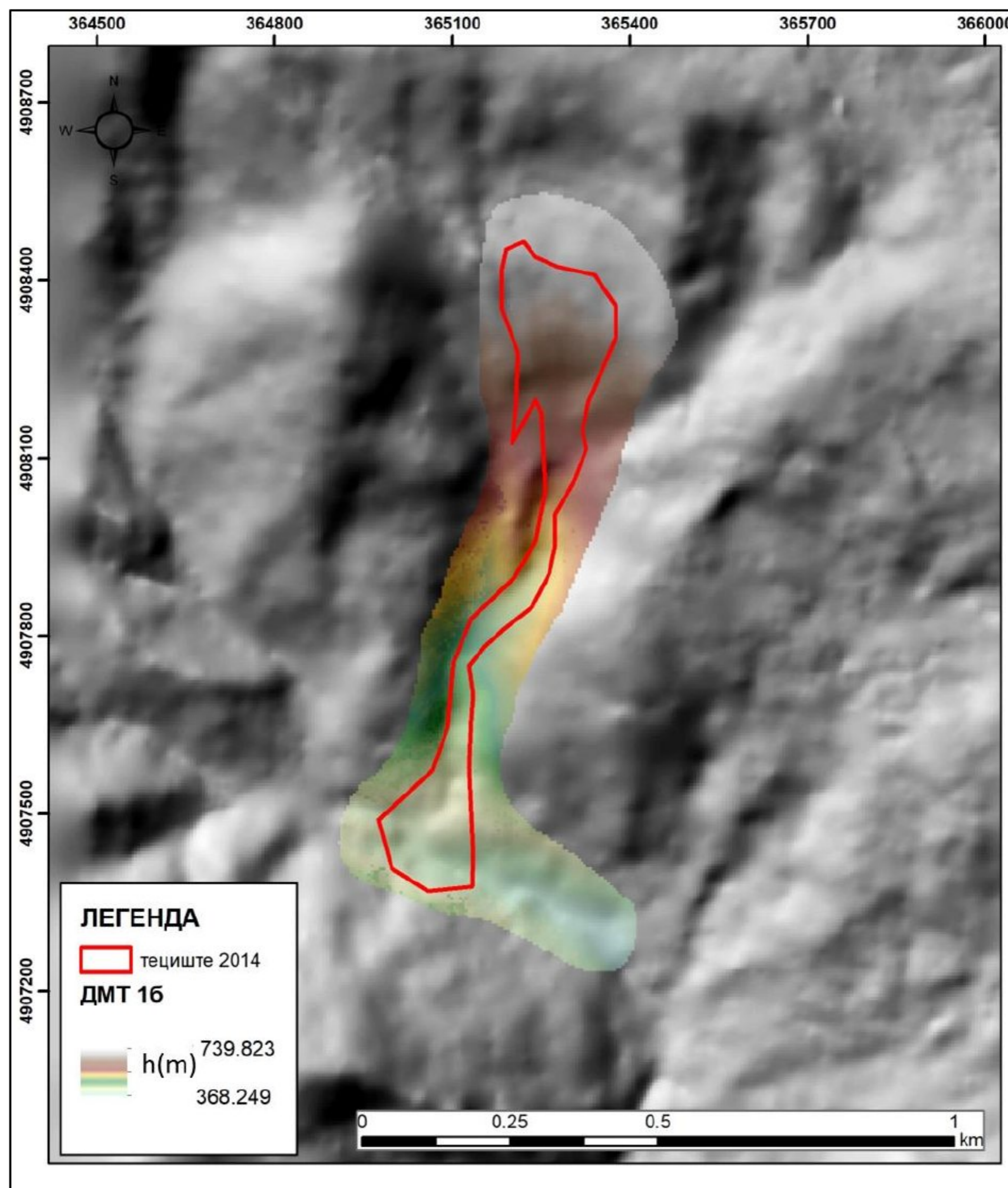
Табела 6.1 Контролне тачке

Ознака	$\Delta X=X-X'$ (cm)	$\Delta Y=Y-Y'$ (cm)	$\Delta H=H-H'$ (cm)	Укупно просторно одступање (cm)
1	-1.1	-1.8	8.3	8.6
6	-0.9	0.0	0.6	1.0
5	0.9	1.4	0.4	1.7
2	0.8	2.0	-5.7	6.1
3	-0.8	0.4	4.7	4.7
4	-0.4	-3.3	-1.1	3.6
8	1.4	1.2	-7.2	7.4
Средња квадратна грешка (RMSE)	0.9	1.7	5.0	5.4

Табела 6.2 Оријентационе тачке

Ознака	$\Delta X=X-X'$ (cm)	$\Delta Y=Y-Y'$ (cm)	$\Delta H=H-H'$ (cm)	Укупно просторно одступање (cm)
7	-0.7	0.2	-8.1	8.2

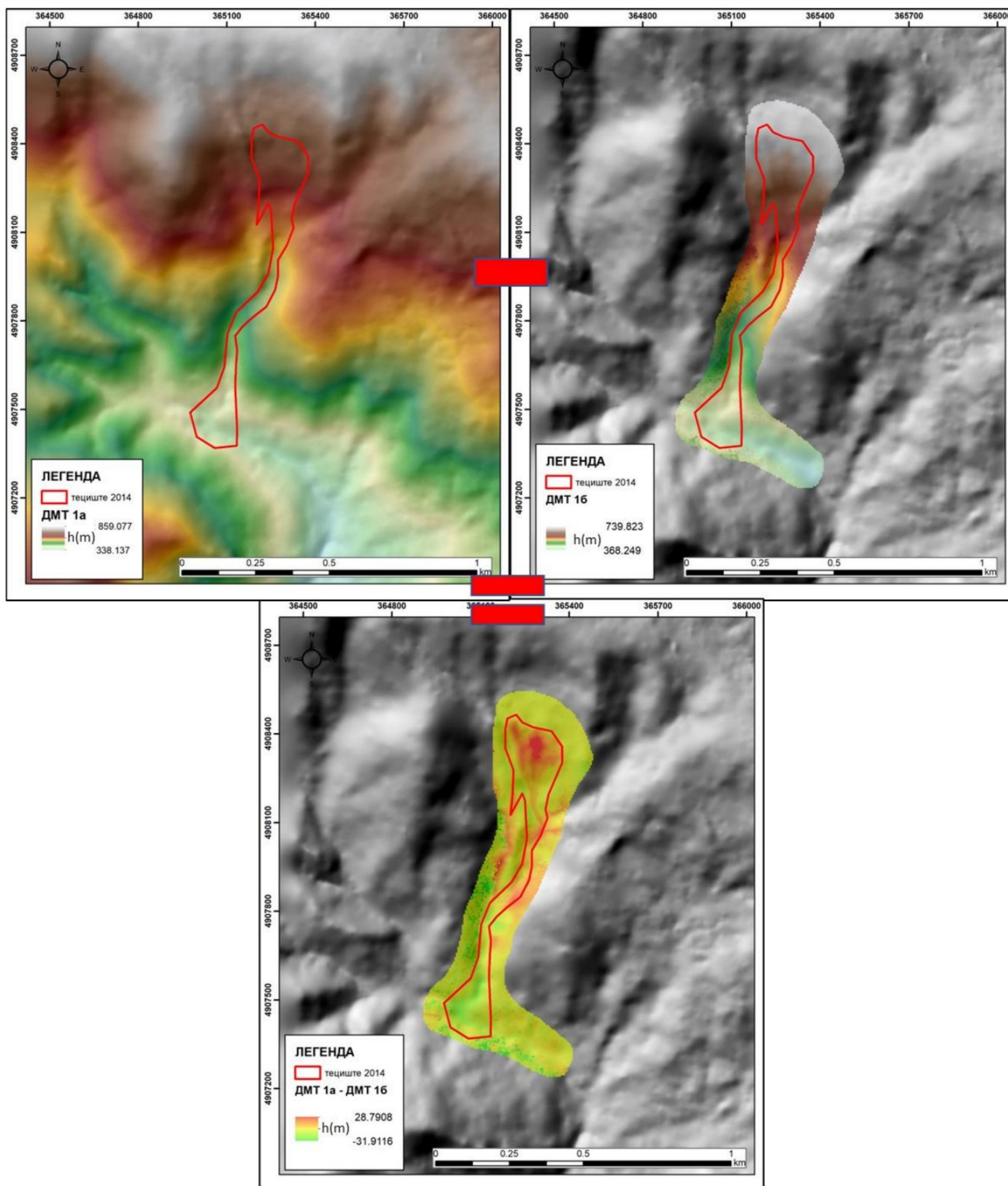
На основу Табеле 6.1 може се закључити да су положајна одступања на појединачним оријентационим тачкама у домену апсолутних вриједности од 0.0 до 3.3 cm, док се за одступања висина овај домен разликује и износи од 0.4 до 8.3 cm (што је и очекивано за примијењену методу мерења – UAV). Вриједности средње квадратне грешке положајних координата су 0.9 cm, по X координати и 1.7 cm по Y координати и мање су од резолуције ортофото снимака, те се може закључити да је положајна тачност задовољавајућа. Вриједност средње квадратне грешке висина износи 5.0 cm, и задовољава потребе квалитетног моделовања тецишта. На основу независне контроле извршене на основи контролне тачке 7 (Табела 6.2.), такође се може закључити да су добијени подаци ортофото снимака и ДМТ-а за подричје тецишта Селанац, након активирања, задовољавајуће тачности за даље моделовање.



Слика 6.8 Дигитални модел терена 5x5m (изведен из модела 10x10 ст) са уцртаним положајем активираниог тецишта Селанац

6.1.3 Анализа ДМТ–а из двије епохе

Како би се урадило поређење дигиталних модела терена двије епохе, у првом поступку је урађено свођење овог модела резолуције 30x30 cm на исту резолуцију од 5 m која је коришћена у финалном моделовању (Слика 6.8). У циљу поређења и добијања прецизнијег податка о разликама маса прије и после активирања тецишта, урађено је преклапање снимака 2 епохе. Преклапањем су добијене разлике у висини терена у зони тецишта (Слика 6.9).



Слика б.9 Карта разлика добијена преклапањем двије епохе ДТМ-а

На слици се јасно може видјети да у подручју иницијалне зоне имамо максималну дубину до скоро 29 m, док је у зони наноса, регистровано и до максималних 31 m разлике. Такође у зони транспорта је видљива зона изражене ерозије дуж десне јаруге (црвена зона), али и депоновања материјала у зони лијеве јаруге (зелена зона). Треба узети у обзир да због природе процеса, наведене разлике се могу узети као најмјеродавније у иницијалној зони, како је у њој био доминантан само процес одношења материјала. У зони депозиције, наведене вриједности показују прецизну разлику (најдубље вриједности се односе на корито Селаначке реке), али с обзиром да је и у зони било и одношења материјала, а и депоновања, прецизна дубина депонованог

материјала који је транспортован се не може са сигурношћу утврдити на основу ових податка. Посебно се то односи на зону транспорта, у којој су доминантна оба процеса–изразито одношење и константан принос материјала.

6.1.4 Анализа модела добијених електрометријском томографијом

У овом истраживању, 7 ERT профила је урађено за истраживање тецишта. Шест профила нормално на правац кретања и један уздужни профил у зони транспорта (Слика 4.12). Сви паралелни профили обухватају и зону стабилног терена како би се детектовале бочне површи по којима је дошло до покретања материјала. Позиција свих ERT профила, са дужином од 80 m до 300 m (Табела 6.3) су приказани на слици 4.12. Другачији и уједначен положај профила није био могућ с обзиром на топографске услове.

Овај процес је поновљен неколико пута за различите парове електрода за сваки профил. Прелиминарне анализе мјерених података приказују добар квалитет података. С обзиром да истражно подручје има комплексну топографију, топографски подаци су прикупљени коришћењем ДТМ 30 cm резолуције.

Табела 6.3 Основне карактеристике геофизичких ERT истраживања по профилима

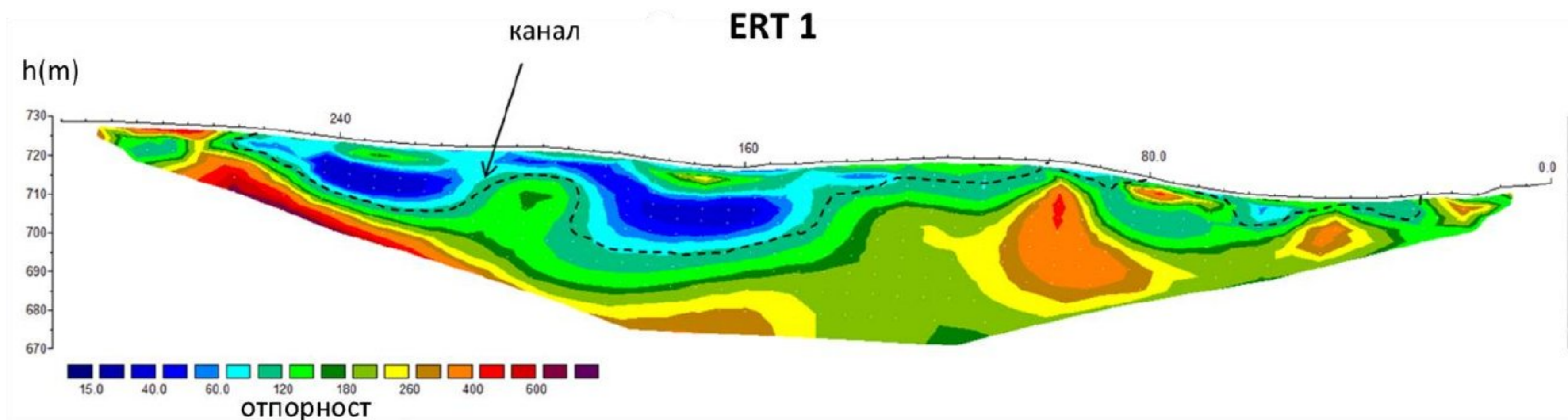
Назив профила	ERT ₁	ERT ₂	ERT ₃	ERT ₄	ERT ₅	ERT ₆	ERT ₇
Дужина(m)	300	230	200	150	150	80	80
Растојање између електрода (m)	5	5	5	5	5	4	4
RMS грешка (%)	2.5	5.2	3.8	3	2.1	4.8	2.3

ERT₁ (Слика 6.10) је позициониран ван покренуте масе тецишта тј., изнад иницијалне зоне (Слика 4.5) на коти од око 730 m.n.v., и показује вертикалне и хоризонталне варијације у отпорности. Нестабилна зона, која се карактерише слојем мале отпорности (<60 Ωm) је процјењена на до 25 m дубине у средишњем дијелу профила а у сјеверозападном дијелу је процијењено 15 - 20 m. Ова зона одговара зони са видљивим пукотинама (Ђурић et al., 2021). Карактерише се великом влажношћу и некомпактним материјалном. Профил показује веома велику вриједност отпорности (> 1000 Ωm) у зони тријаских кречњака и магматских стијена, као и палеозојских метаморфних стијена. Профили ERT₂ и ERT₃ (Слика 6.11) су позиционирани у горњем дијелу тецишта одакле је већина материјала транспортована. Иако је већина материјала дуж канала из овог дијела, на овим профилима као и током теренских истраживања, утврђено је да се резидуална дробина, може покренути и одвојити од основне стијенске масе.

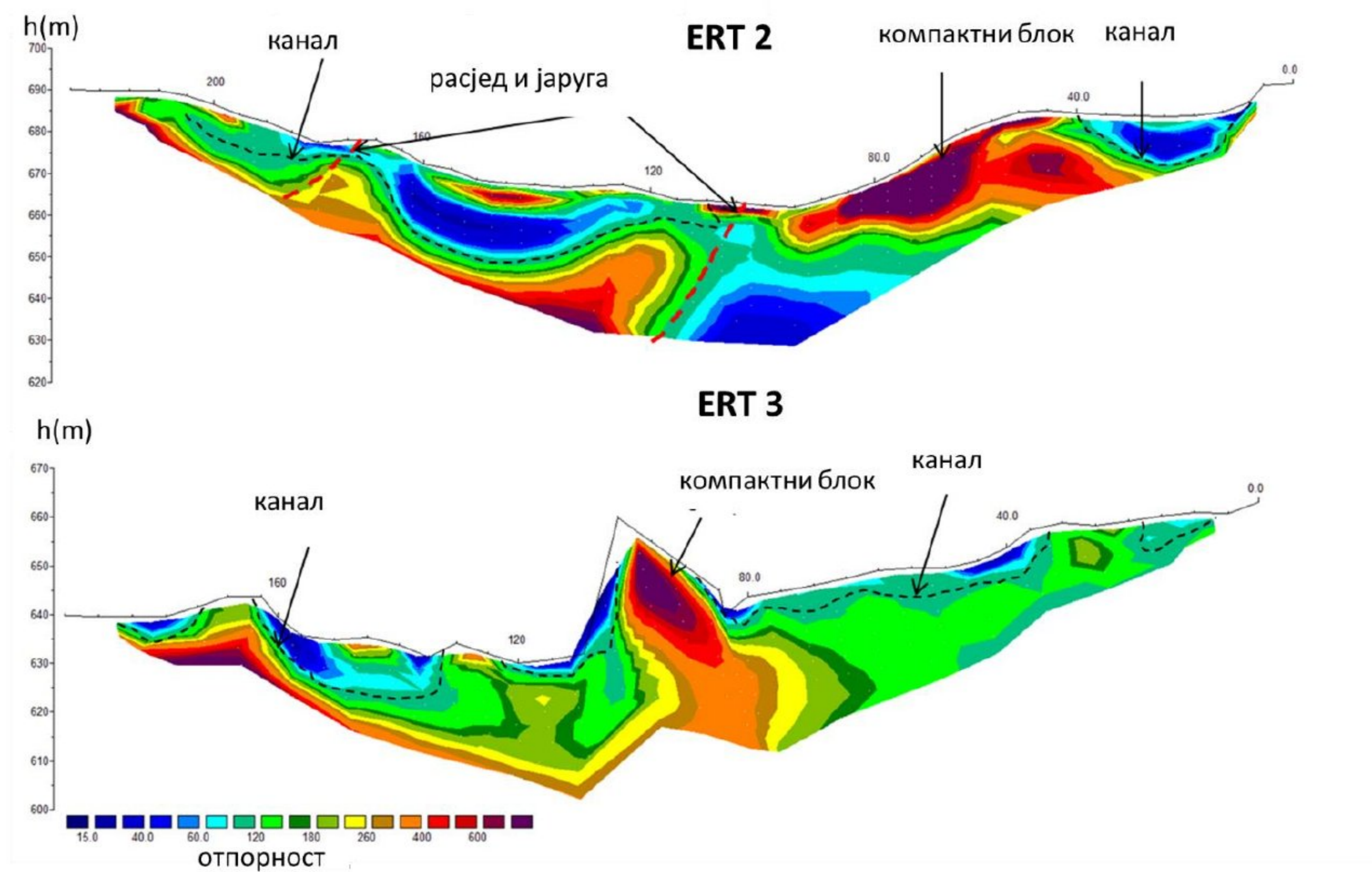
ERT₂, мале вриједности отпорности одговарају нестабилном, покренутом материјалу и у рангу су вриједности од испод 70 Ωm. Западни дио профила се карактерише овим вриједностима и дубина до бедрака је процјењена на 18 m. У источном дијелу профила, постоји такође нестабилан дио терена, са ниским вриједностима отпорности до дубине од око 12.5 m. Малe вриједности отпорности у средишњем дијелу профила, одговарају позицији некадашње јаруге, која је предиспонирана расједом у правцу сјевер–југ (Слика 6.11).

ERT₃ је одређен екстремном топографијом што је специфичност овог централног профила. Овај профил, са високим вредностима отпорности, одбија веома велике блокове (преко 2 m) магматских и метаморфних стена (такође утврђених теренским

посматрањем). Материјал источно и западно од овог блока високе отпорности је изузетно распаднут и влажан и као такав се одликује ниским вриједностима отпорности, достижући дубину од 10 м. Ова граница се условно узима као дубина на којој је канал (слика 6.11).



Слика 6.10 Резултати ERT_1 профила

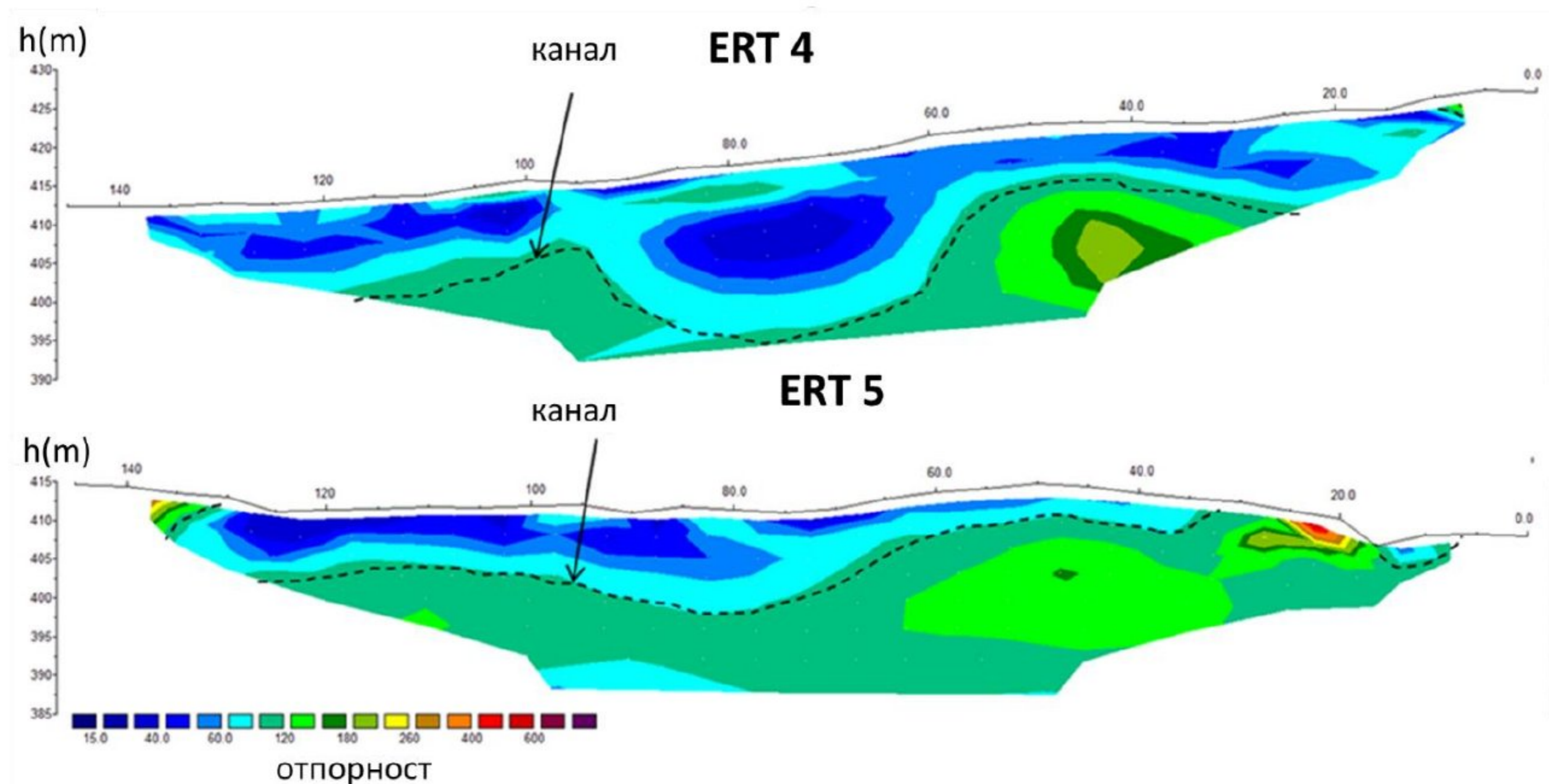


Слика 6.11 Резултати ERT_2 и ERT_3 профила

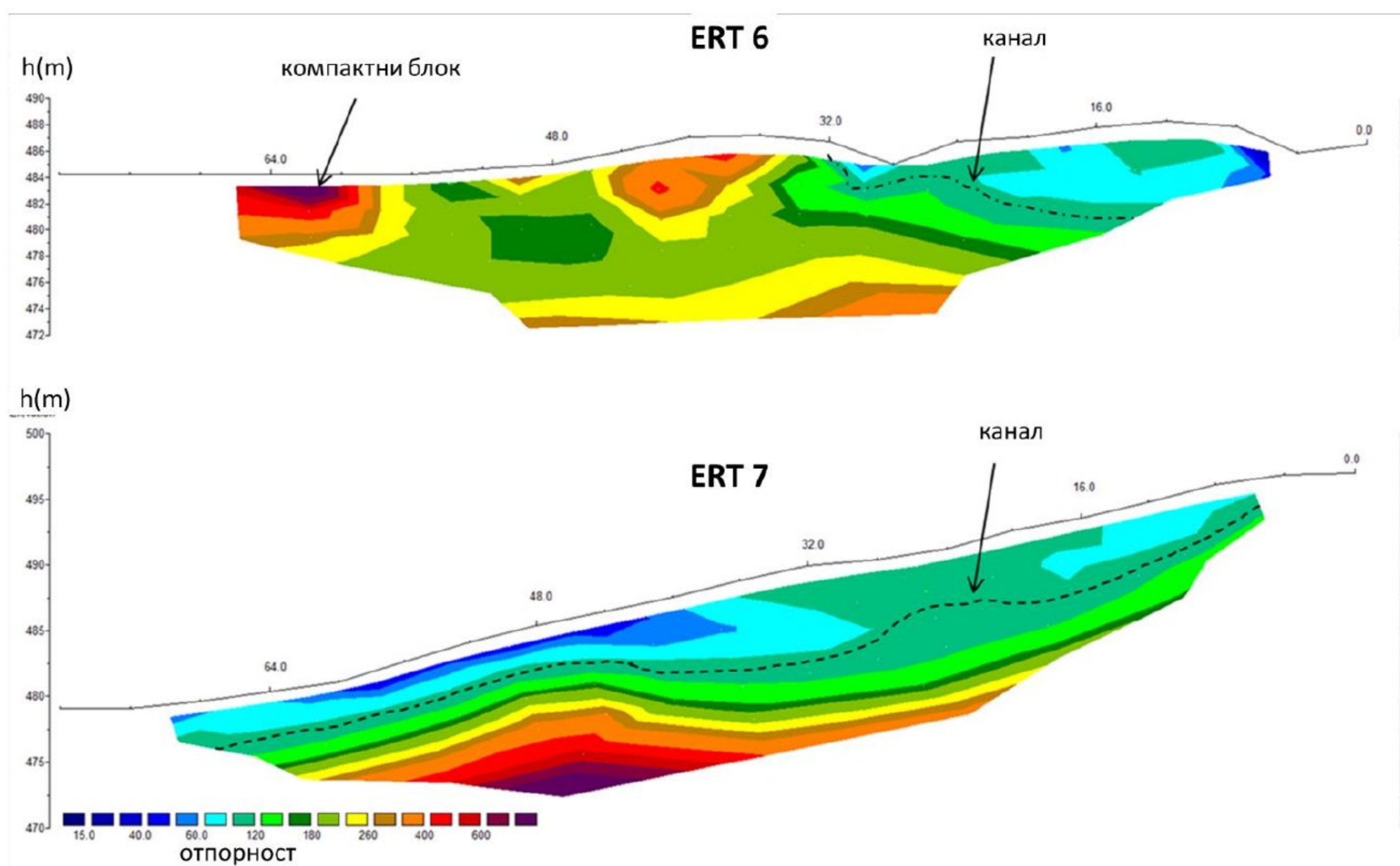
Профили ERT₄ и ERT₅ (Слика 6.12) постављени су у зони депоновања транспортованог материјала. Ова два профила су у потпуности унутар зоне депозиције (Слика 4.5). Није било могуће одредити бочне границе, али је процијењена дебљина нагомиланог материјала. За ERT₄ максимална дебљина је процењена на 25–30 m, док је за ERT₅ ова дебљина процијењена на 15–20 m.

Профили ERT₆ и ERT₇ (Слика 6.13) били су позиционирани унутар канала тецишта при чему је ERT₆ био лоциран управно на канал и правац тока, док је ERT₇ био паралелан са њим (Слика 4.5), на средини канала. ERT₆ је највећим дијелом профила био ван канала (преко цијелог западног дијела са високим вриједностима отпорности), а око 35 m ширином унутар канала. Овај дио позициониран унутар канала карактерише ниска вриједност отпорности до дубине од око 8 m. Ова дубина процијењене површи смицања за ERT₆ такође одговара дубини на мјесту укрштања са ERT₇. Високе вриједности на ERT₆ у западном дијелу профила одговарају потпуно стабилном дијелу терена, састављеном од јурског офиолитског меланжа.

ERT₇ показује количину материјала транспортованог дуж канала. На овом профилу је видљива стрма површина и одвојене су ниске од средње вредности отпорности. Дубина до канала варира од 5 до 15 m.



Слика 6.12 Резултати ERT₄ и ERT₅ профила



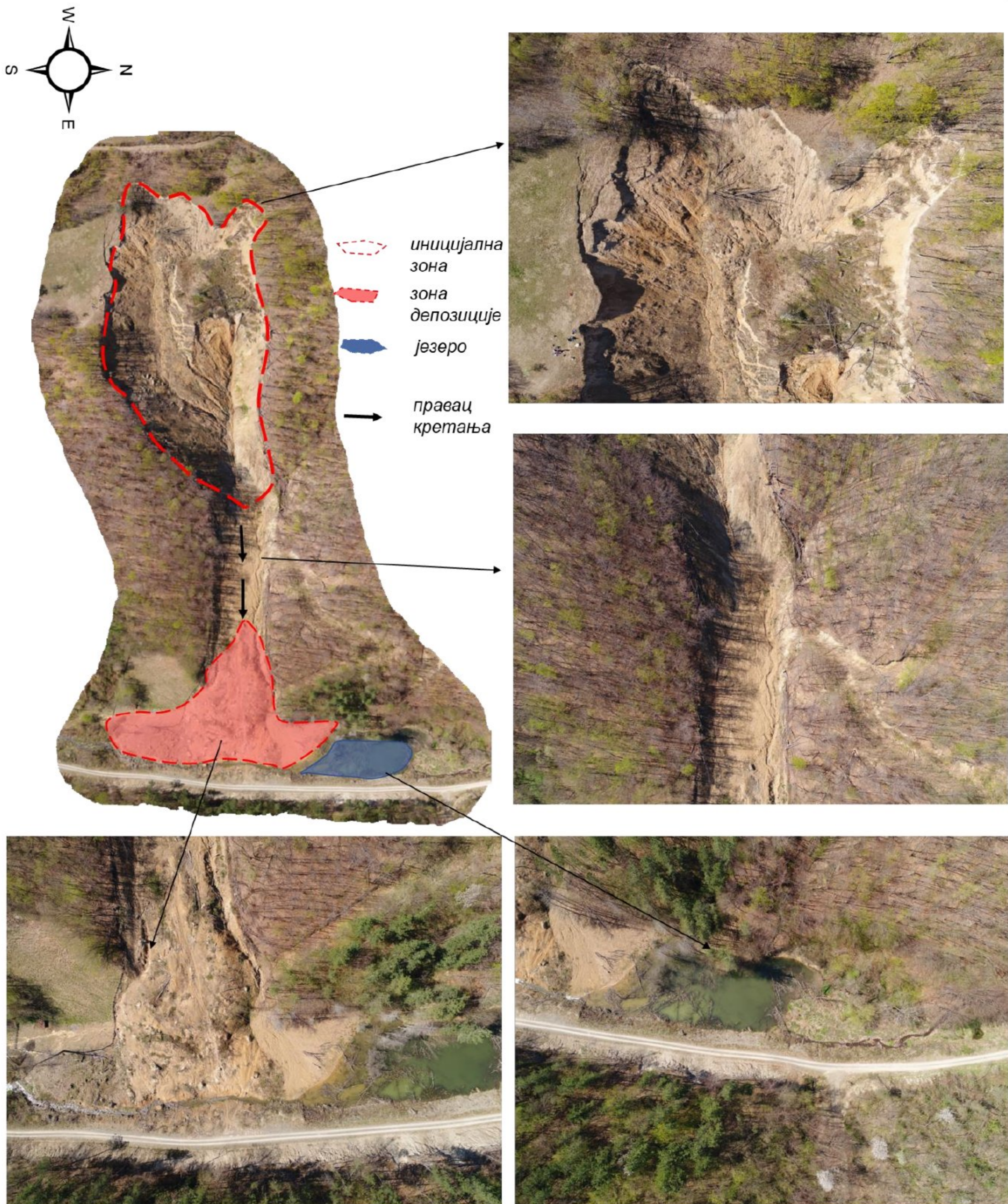
Слика 6.13 Резултати ERT₆ и ERT₇ профила

6.2 ТЕЦИШТЕ ЛЕВА РЕКА

Прва рекогносцирања подручја тецишта Лева река извршена су непосредно после активирања од стране Јевремовић и др. (2015). Теренски обилазак у склопу пројекта BEWARE је обављен у јуну мјесецу 2015. године. Обиласком терена, детаљно је искартирано тециште са дефинисањем инжењерскогеолошких карактеристика терена и реконструисањем кретања тецишта у моменту активирања.

Дефинисан је иницијални блок који је много већих димензија у површини у односу на зону транспорта и зону депозиције, што ово тециште чини нетипичним. Развоју таквог процеса је допринијела и морфологија терена гдје је нагиб терена у зони активирања знатно већи па се формирало тециште велике дубине у зони депозиције. Са благим нагибом у зони транспорта дужине око 50 m. Као и у случају тецишта Селанац, за зону транспорта узима се дио до зоне депозиције, док је укупан транспорт материјала касније радом Лева реке транспортован даље. На Слици 6.14 приказан је ортофото снимак високе резолуције у зони тецишта Лева река на коме је рађено детаљно теренско истраживање и моделовање. Поред дефинисане геометрије, приказане су слике у карактеристичним дјеловима терена.

Велика количина материјала је преградила Леву реку чиме је направљена акумулација, која је на појединим местима достигала дубину и до 3 m (Слика 6.15).



Слика 6.14 Ортофото снимак тецишта Лева река добијен фотограметријским снимањем са карактеризацијом основних геометријских елемената

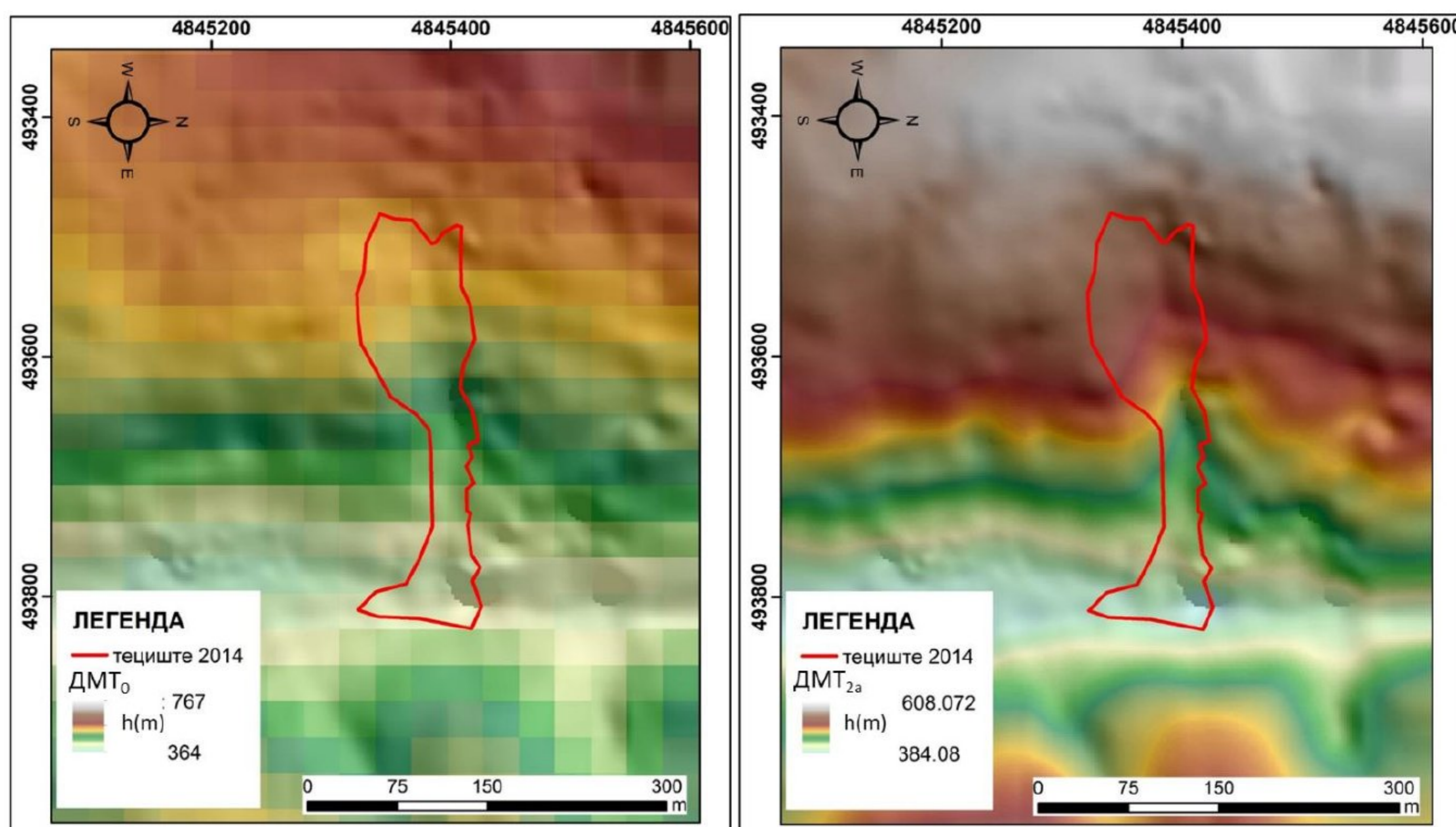
Иницијални блок има максималну дубину до 14 m што је видљиво на моделу добијеном преклапањем на Слици 6.19. Укупна дужина тецишта је око 400 m, ширина у најширем дијелу у зони депозиције 100 m. Карактеристично за ову појаву је да дужина транспорта није велика, у поређењу са иницијалном зоном која има дужину око 200 m у плану.



Слика 6.15 Акумулација која се створила преграђивањем ријеке (фотографија 11.9.2015)

6.2.1 ДМТ ЕПОХЕ I

Као и у случају тецишта Селанац, урађена је анализа дигиталног модела терена ширег подручја прије активирања процеса. Дигитални модел терена (ДМТ₀) резолуције 30x30 m је приказан на слици 6.16 а) са границама накнадно активираниог тецишта. Подлога је коришћена за израду прелиминарног нумеричких модела у RAMMS софтверу, као улазни параметар у .ascii формату. У даљем поступку, анализиран је ДМТ_{2a} ширег подручја више резолуције 5x5 m (Слика 6.16 б)). Ова резолуција је прихваћена као најоптималнија за моделовање у оба софтвера (Крушић et. al., 2019).

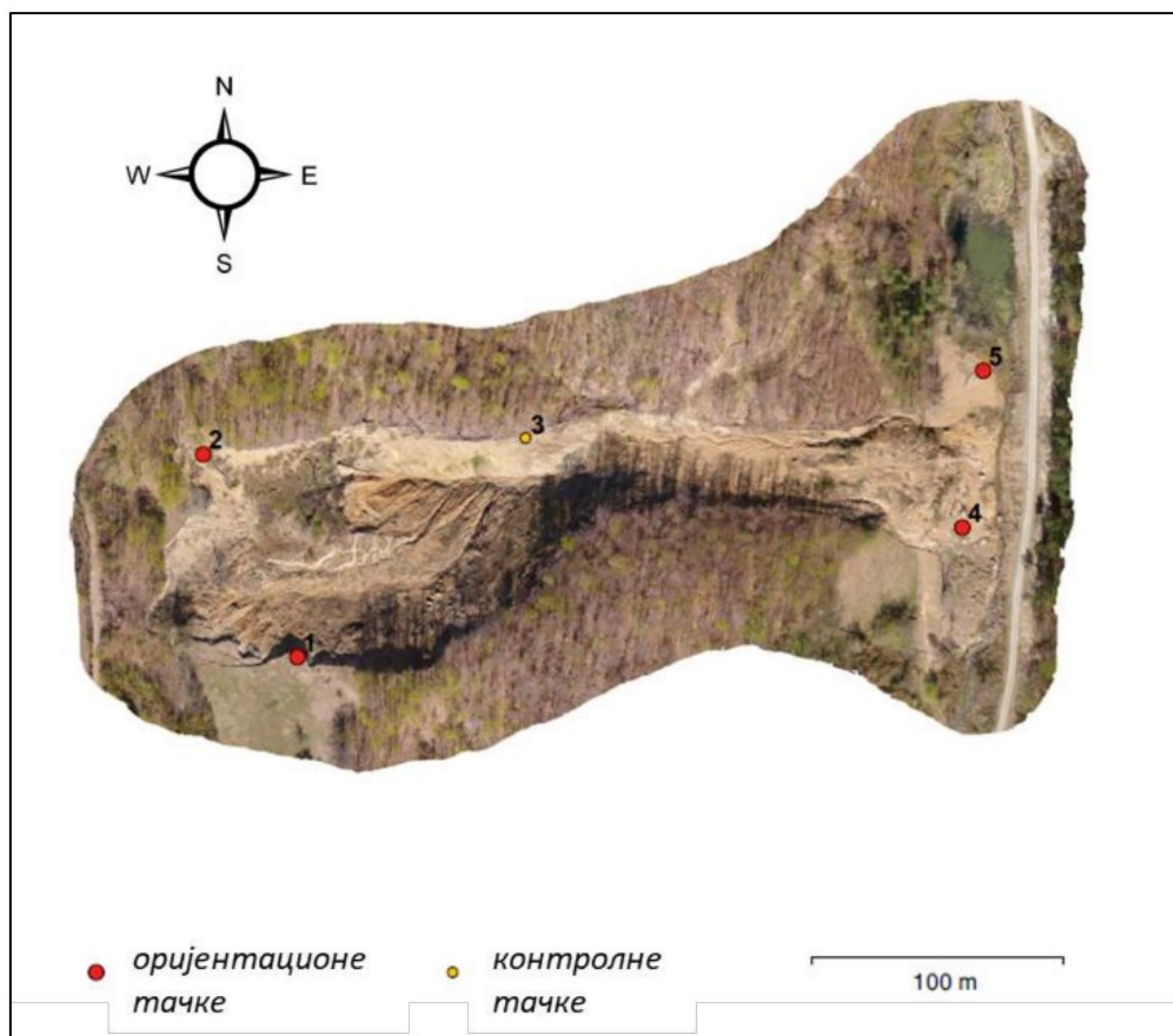


Слика 6.16 Дигитални модел терена 30x30m са уцртаним положајем накнадно активираниог тецишта

6.2.2 ДМТ ЕПОХЕ II

У циљу добијања прецизног Дигиталног модела терена високе прецизности (до 10 cm резолуције), и ортофото снимка високе резолуције, у априлу мјесецу 2017. године, урађено је детаљно картирање подручја тецишта Лева река са фотограметријским снимањем беспилотном летилицом.

Положај оријентационих тачака снимања дат је на слици 6.17. Укупно је дефинисано 5 оријентационих тачака, од којих је једна била контролна.



Слика 6.17 Положај оријентационих и контролних тачака

Снимање терена је првенствено обухватило зону тецишта, али се на снимку јасно види и акумулација која је формирана преграђивањем Лева реке.. Урађен је модел терена са прецизношћу на 10 и 30 cm (Слика 6.18), и ортофото снимци резолуције до 3x3 cm (Слика 6.17). У табелама 6.4 и 6.5 дати су основи подаци осматрања оријентационих и контролне тачке, са мјереним грешкама и вриједношћу коначног пиксела.

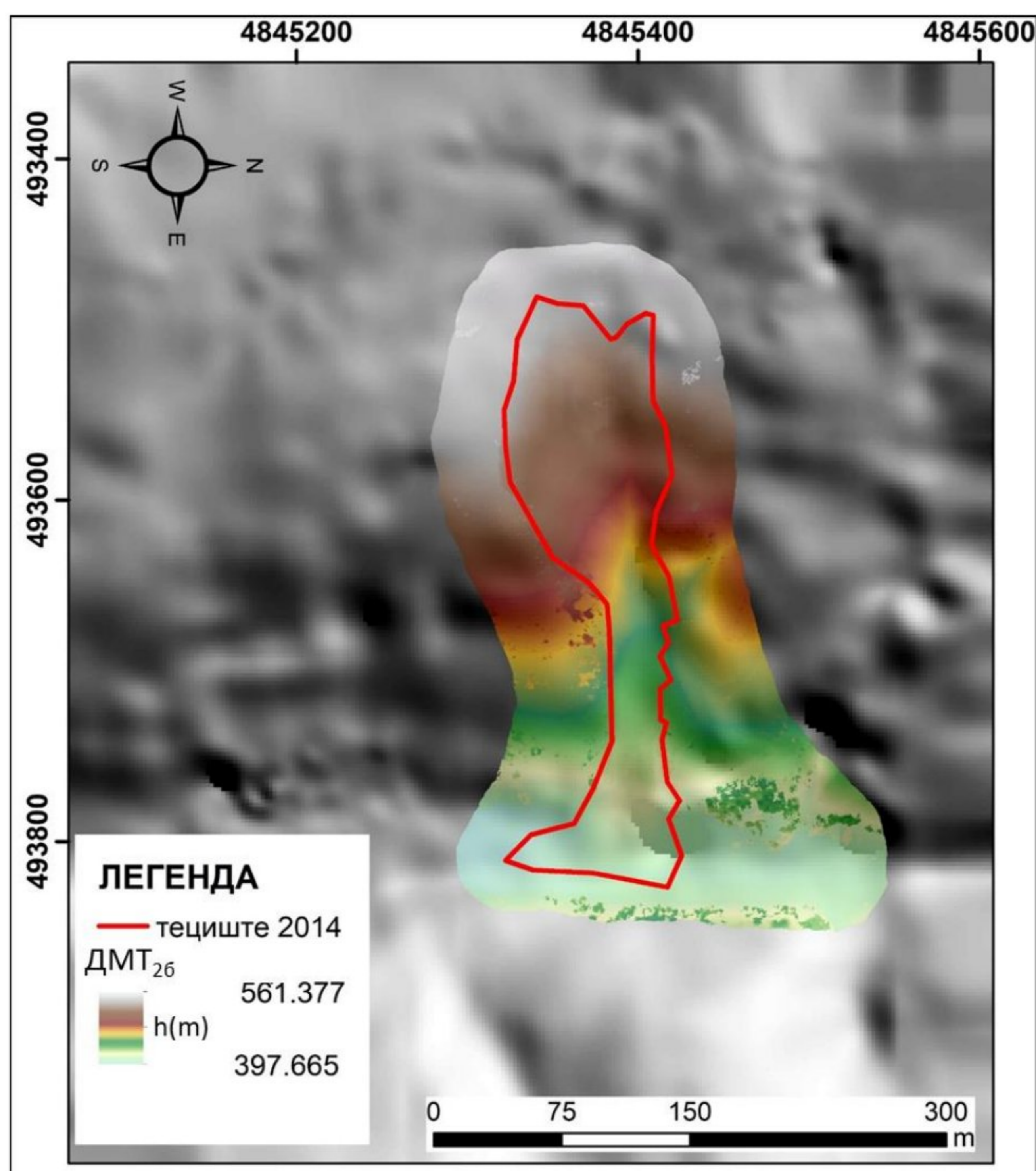
Табела 6.4 Оријентационе тачке

Ознака	$\Delta X=X-X'$ (cm)	$\Delta Y=Y-Y'$ (cm)	$\Delta H=H-H'$ (cm)	Укупно просторно одступање (cm)
1	-3.4	4.0	1.7	5.6
2	2.9	-4.3	-1.2	5.3
5	-0.01	3.9	1.5	4.2
4	0.5	-3.7	-2	4.2
укупно	2.3	3.9	1.6	4.9

Табела 6.5 Контролне тачке

Ознака	$\Delta X=X-X'$ (cm)	$\Delta Y=Y-Y'$ (cm)	$\Delta H=H-H'$ (cm)	Укупно просторно одступање (cm)
3	-9.7	-5.6	-0.8	11.3

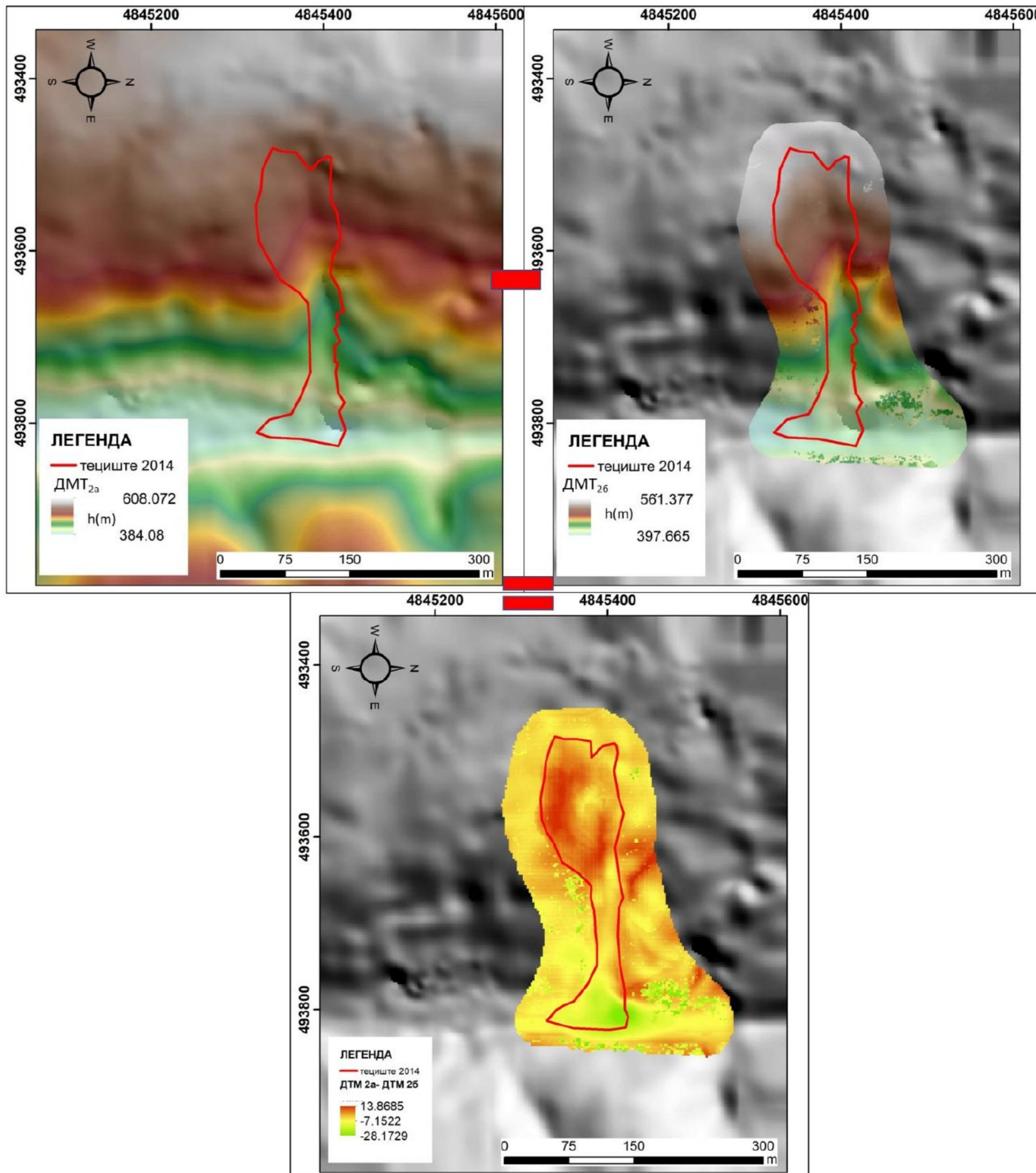
На основу Табеле 6.4 може се закључити да су положајна одступања на појединачним оријентационим тачкама у домену апсолутних вриједности од 0.0 до 4.3 cm, док се за одступања висина овај домен разликује и износи од 1.2 до 1.7 cm. Вриједности средње квадратне грешке положајних координата су 2.3 cm, по X координати и 3.9 cm по Y координати те се може закључити да је положајна тачност задовољавајућа. Вриједност средње квадратне грешке висина износи 1.6 cm, и задовољава потребе квалитетног моделовања тецишта. На основу независне контроле извршене на основи контролне тачке 7 (Табела 6.5.), такође се може закључити да су добијени подаци ортофото снимака и ДМТ-а за подричје тецишта Лева река, након активирања, задовољавајуће тачности за даље моделовање (Слика 6.18).



Слика 6.18 Дигитални модел терена ДМТ₂₆ 10x10 ст са уцртаним положајем активираниог тецишта Лева река

6.2.3 Анализа ДМТ– а из двије епохе

Како би се урадило поређење Дигиталних модела терена двије епохе, у првом поступку је урађено свођење овог модела резолуције 10x10 cm на исту резолуцију од 5x5 m која је коришћена у финалном моделовању. Преклапањем су добијене разлике у висинама терена у зони тецишта (Слика 6.19).



Слика 6.19 Карта разлика добијена преклапањем двије епохе ДМТ-а

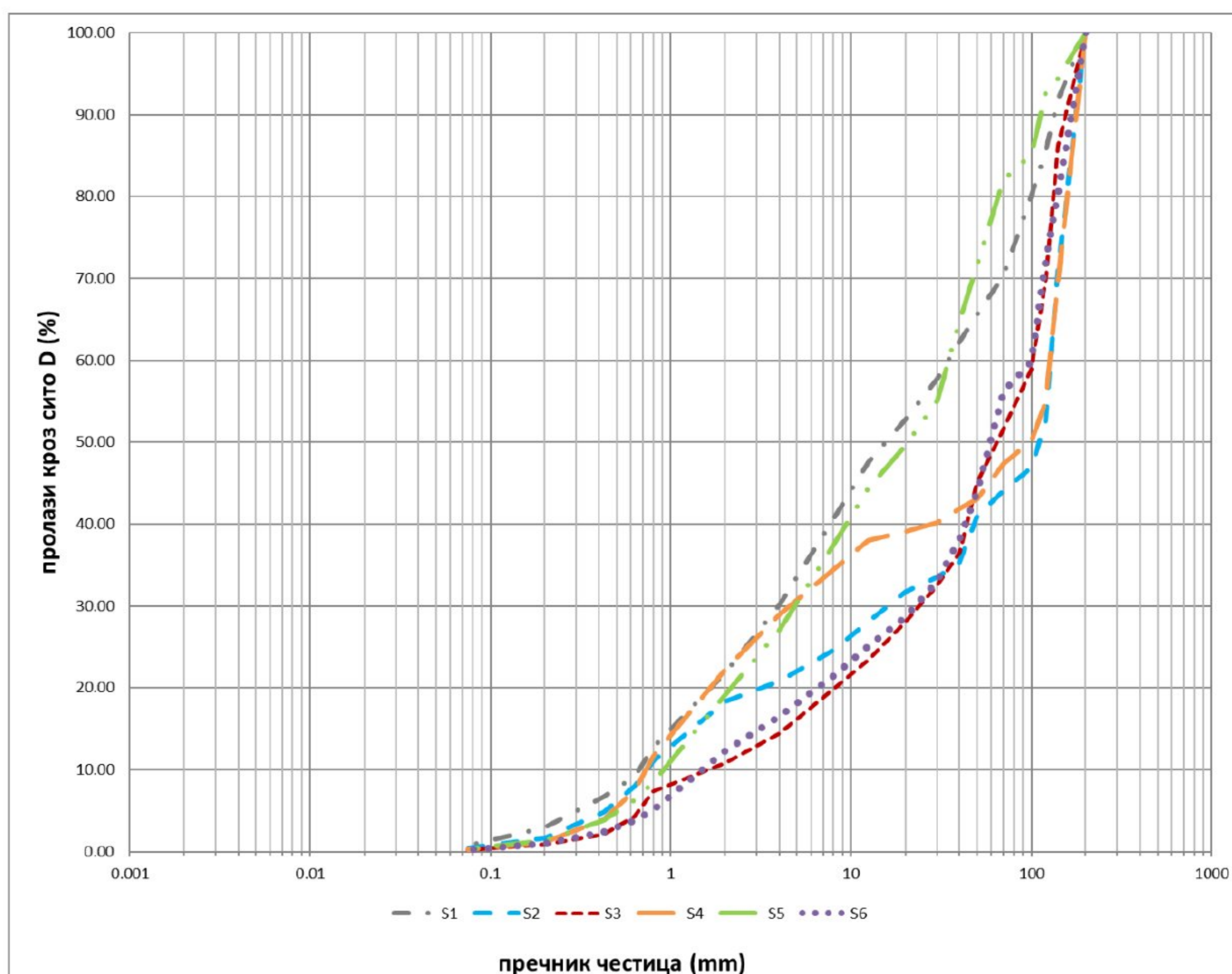
На слици се јасно може видјети да у подручју иницијалне зоне имамо максималну дубину до скоро 14 m, док је у зони наноса, регистровано и до максималних 28 m разлике. У зони транспорта максимална дубинска разлика је око 4.8 m. Као што је већ наведено, наведене разлике се могу узети као најмјеродавније у иницијалној зони, како

је у њој био доминантан само процес одношења материјала. Податак о дубини у иницијалној зони је коришћен за улазни параметар у оба софтвера, док је податак о наносу материјала коришћен за коначну валидацију модела у зони депозиције. У зони депозиције, добијене вриједности нанешеног материјала (28 m) су превелике, посебно у зони у којој је дошло до зајезеравања, што се може сматрати грешком и поменута вриједност је регистрована само у једном малом дијелу снимка.

7 ИНЖЕЊЕРСКО-ГЕОЛОШКА СВОЈСТВА ПОКРЕНУТОГ МАТЕРИЈАЛА

7.1 ТЕЦИШТЕ СЕЛАНАЦ

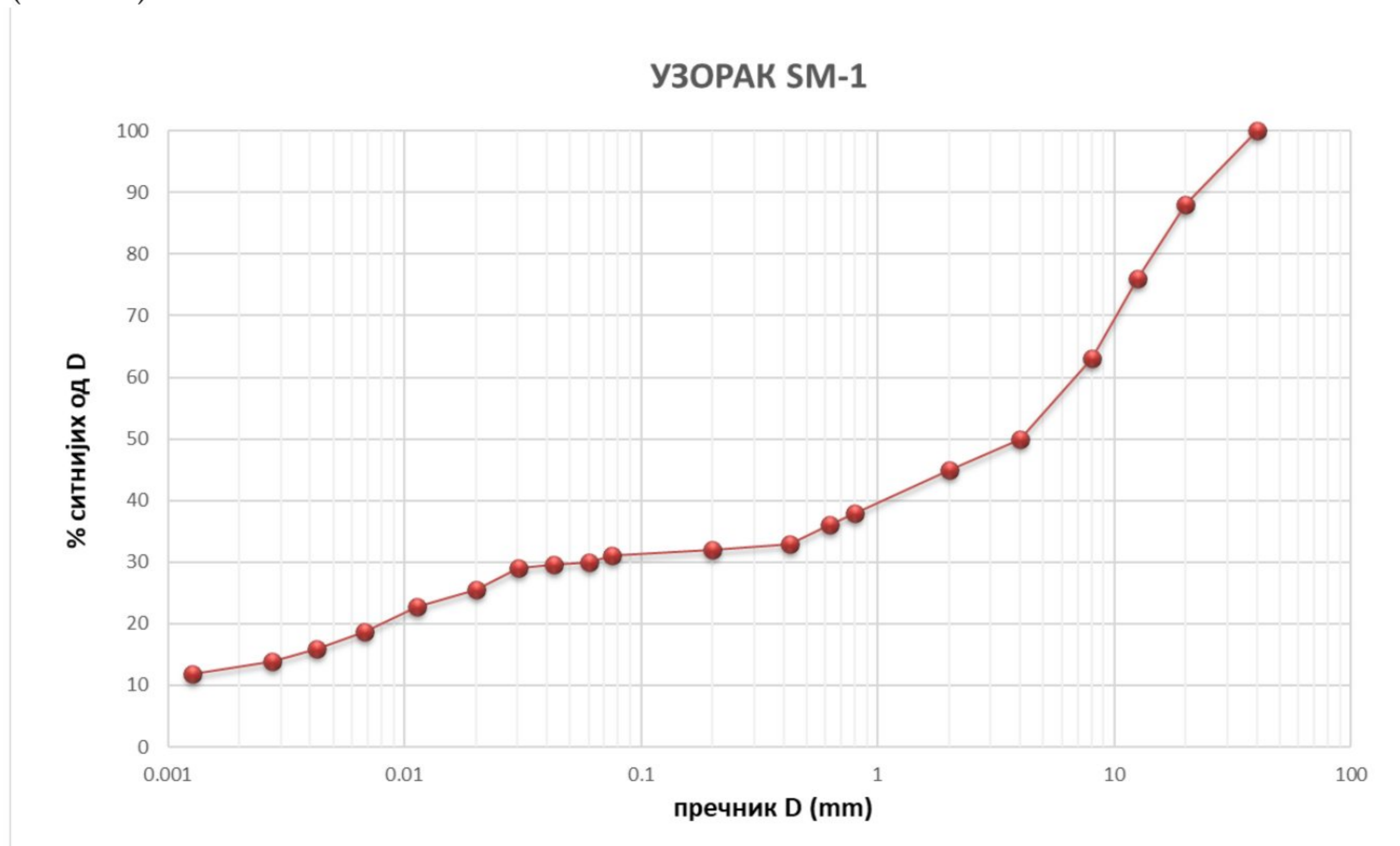
Гранулометријски тестови на шест узорка (S1-S6) тецишта Селанац су изведени на узорцима који садрже одломке у распону од >60 mm у пречнику, до веома финих честица < 0.075 mm. Коришћен је класичан тест сијања на крупнозрном материјалу од 0.06–200 mm. На слици 7.1 приказане гранулометријске криве на шест карактеристичних узорака тецишта Селанац.



Слика 7.1 Приказ гранулометријског састава на 6 узорака покренутог материјала тецишта Селанац

Ради карактеризације ситнозрног материјала, одрађен је тест мјешане криве, чиме је на издвојеном узорку масе 2575.7 g урађен комбинован тест гранулометрије са

хидрометрисањем. Одабрани узорак се сматра репрезентативним у погледу материјала који утиче на флуид. Резултати хидрометријског теста на одабраном узорку приказани су на слици 7.2. На издвојеном узорку око 50 % материјала је прашинасто до пјесковито (> 2 mm).



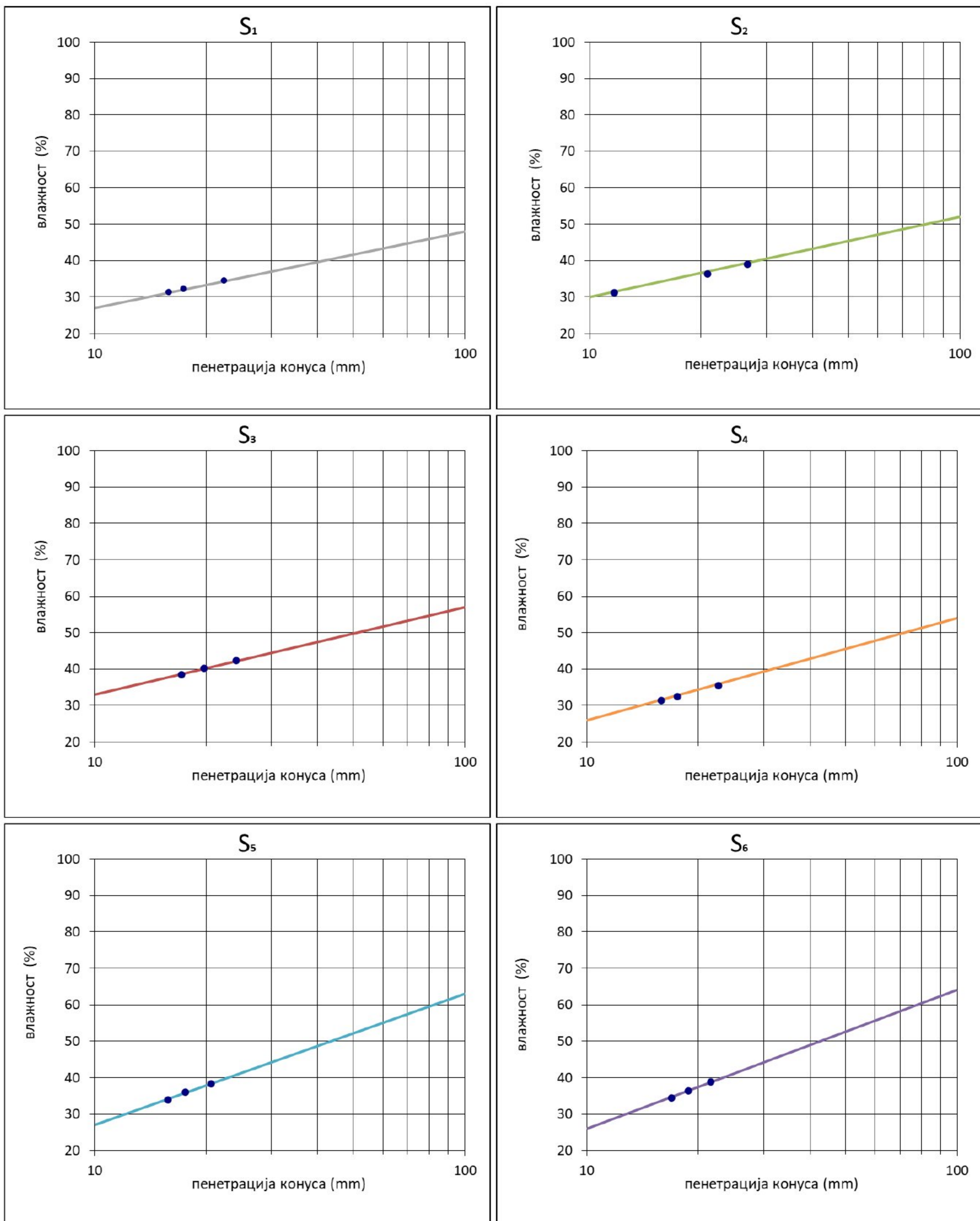
Слика 7.2 Резултати опита добијања мијешане криве ситањем и хидрометрисањем на узорку SM-1

Према утврђеном опиту, на узорку масе 49,73 g утврђена је специфична тежина узорка. На основу ове вриједности, густина чврстих честица је коришћена као један од улазних података у моделовању SPH Geoflow програму. Резултати су приказани у табели 7.1.

Табела 7.1 Резултати мјерења у опиту одређивање специфичне тежине на узорку St1

Одређивање специфичне тежине на узорку St1	
ms (g)	49.738
mpvm (g)	362.144
mpv (g)	331.554
Gs	2.60

Граница течења је утврђена уз помоћ опита конусом пенетрације. Резултати опита на одабраних шест узорака приказани су на дијаграмима на Слици 7.3, док су резултати мјерења приказани у табелама 7.2–7.7.



Слика 7.3 Резултати одређивања границе течења на узорку помоћу конуса пенетрације

Поред тога, у Табелама 7.2–7.7 су приказани резултати мјерења пластичности на одабраним узорцима.

Табела 7.2 Резултати опита конуса пенетрације рађени на узорку S1

S1	Граница течења (%)			Граница пластичности (%)		
Продор конуса (mm)	15.85	17.42	22.40			
Ознака таре	148	163	120	54	18	78
Бруто влажно (g)	38.62	39.43	36.92	2.89	2.99	2.99
Бруто суво (g)	36.04	36.61	34.83	2.73	2.80	2.80
Тара(g)	27.77	27.84	28.77	2.01	1.94	1.98
Влажност w (%)	31.28	32.15	34.42	22.85	22.49	23.35

Табела 7.3 Резултати опита конуса пенетрације рађени на узорку S2

S2	Граница течења (%)			Граница пластичности (%)		
Продор конуса (mm)	11.68	20.86	26.63			
Ознака таре	140	144	145	20	66	54
Бруто влажно (g)	47.75	44.01	47.27	4.06	4.57	4.04
Бруто суво (g)	43.04	39.70	41.84	3.68	4.12	3.70
Тара(g)	27.92	27.85	27.92	1.89	2.03	2.00
Влажност w (%)	31.15	36.38	39.00	21.50	21.56	20.26

Табела 7.4 Резултати опита конуса пенетрације рађени на узорку S3

S3	Граница течења (%)			Граница пластичности (%)		
Продор конуса (mm)	17.14	19.70	24.10			
Ознака таре	89	48	133	3	13	14
Бруто влажно (g)	23.79	20.42	43.36	3.33	3.28	3.65
Бруто суво (g)	20.84	18.05	38.96	3.08	3.05	3.35
Тара(g)	13.18	12.16	28.60	1.97	2.01	2.04
Влажност w (%)	38.55	40.24	42.42	22.07	22.39	23.05

Табела 7.5 Резултати опита конуса пенетрације рађени на узорку S4

S4	Граница течења (%)			Граница пластичности (%)		
Продор конуса (mm)	15.85	22.67	17.54			
Ознака таре	144	145	11	63	99	11
Бруто влажно (g)	37.69	35.61	33.68	3.07	3.40	3.34
Бруто суво (g)	35.33	33.60	30.70	2.86	3.15	3.11
Тара(g)	27.83	27.91	21.48	2.06	1.98	2.00
Влажност w (%)	31.47	35.45	32.38	26.32	20.56	21.45

Табела 7.6 Резултати опита конуса пенетрације рађени на узорку S5

S5	Граница течења (%)			Граница пластичности (%)		
Продор конуса (mm)	15.77	17.61	20.60			
Ознака таре	A	84	80	71	58	21
Бруто влажно (g)	32.70	35.58	32.05	2.80	3.10	2.77
Бруто суво (g)	29.95	31.69	28.68	2.66	2.90	2.63
Тара(g)	21.87	20.93	19.89	2.06	1.98	2.00
Влажност w (%)	33.93	36.10	38.37	22.95	21.67	22.06

Табела 7.7 Резултати опита конуса пенетрације рађени на узорку S6

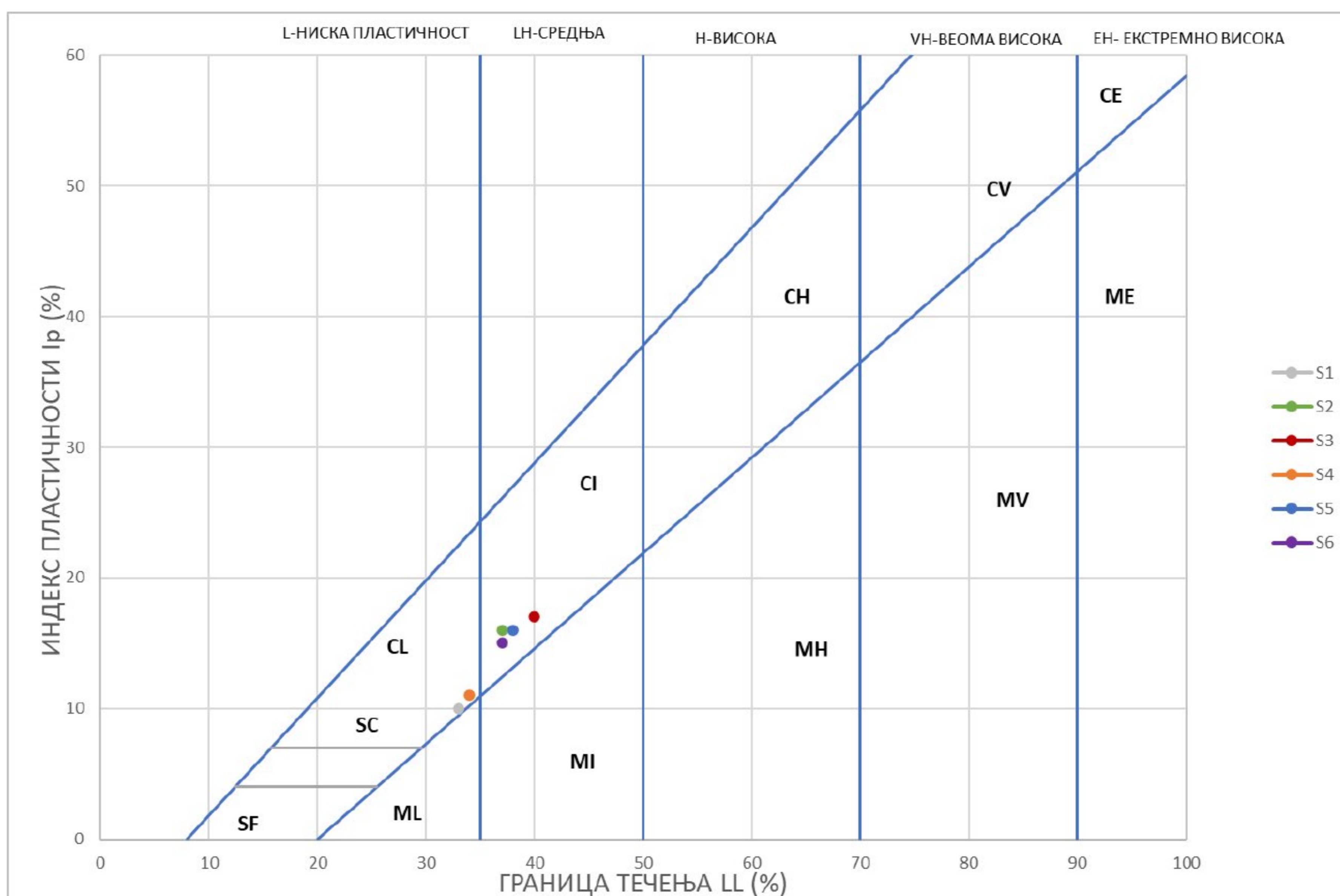
S6	Граница течења (%)			Граница пластичности (%)		
	16.95	18.79	21.63			
Продор конуса (mm)	16.95	18.79	21.63			
Ознака таре	11	160	145	1	20	23
Бруто влажно (g)	47.75	44.01	41.97	3.21	3.08	3.50
Бруто суво (g)	42.67	39.70	38.04	2.98	2.86	3.25
Тара(g)	27.92	27.85	27.92	1.90	1.90	2.08
Влажност w (%)	34.45	36.38	38.82	21.07	22.33	21.32

Индекс конзистенције (I_c) указује на конзистенцију (тврдоћа) тла. Као што се види у табели 7.8 израчуната вриједност су од $-0,7$ до 0 . Негативна вриједност индекса указује да је тло у течном стању. Природна влажност код свих узорака је усвојена да буде 40% , како није било могуће мјерење на терену, а материјал се понашао као флуид. Добијени резултати конзистенције тла–утврђивање Атербергових граница конзистенције су приказани у табели 7.8.

Табела 7.8 Параметри конзистенције тла

Узорци	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Влажност w (%)	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
Граница течења LL (%)	33	37	40	34	38	37
Граница пластичности PL (%)	23	21	23	23	22	22
Индекс пластичности I_p (%)	10	16	17	11	16	15
Индекс конзистенције I_c (-)	-0.700	-0.188	0.000	-0.545	-0.125	-0.200

Ради класификације покренутог материјала добијени узорци су приказани на USCS дијаграму (Слика 7.4). Резултати показују да је матрикс ниске до средње пластичности. Два узорка, S1 узет из иницијалне зоне и S4 из зоне депозиције су у зони ниске пластичности CL а на граници са средње пластичним стањем CL, док се остали узорци карактеришу као заглињен материјал средње пластичности CI. Резултати су у приближним границама и с обзиром да је материјал разнородан и тециште великих димензија, приказују веома добро поклапање поредећи покренути материјал у различитим елементима тецишта.

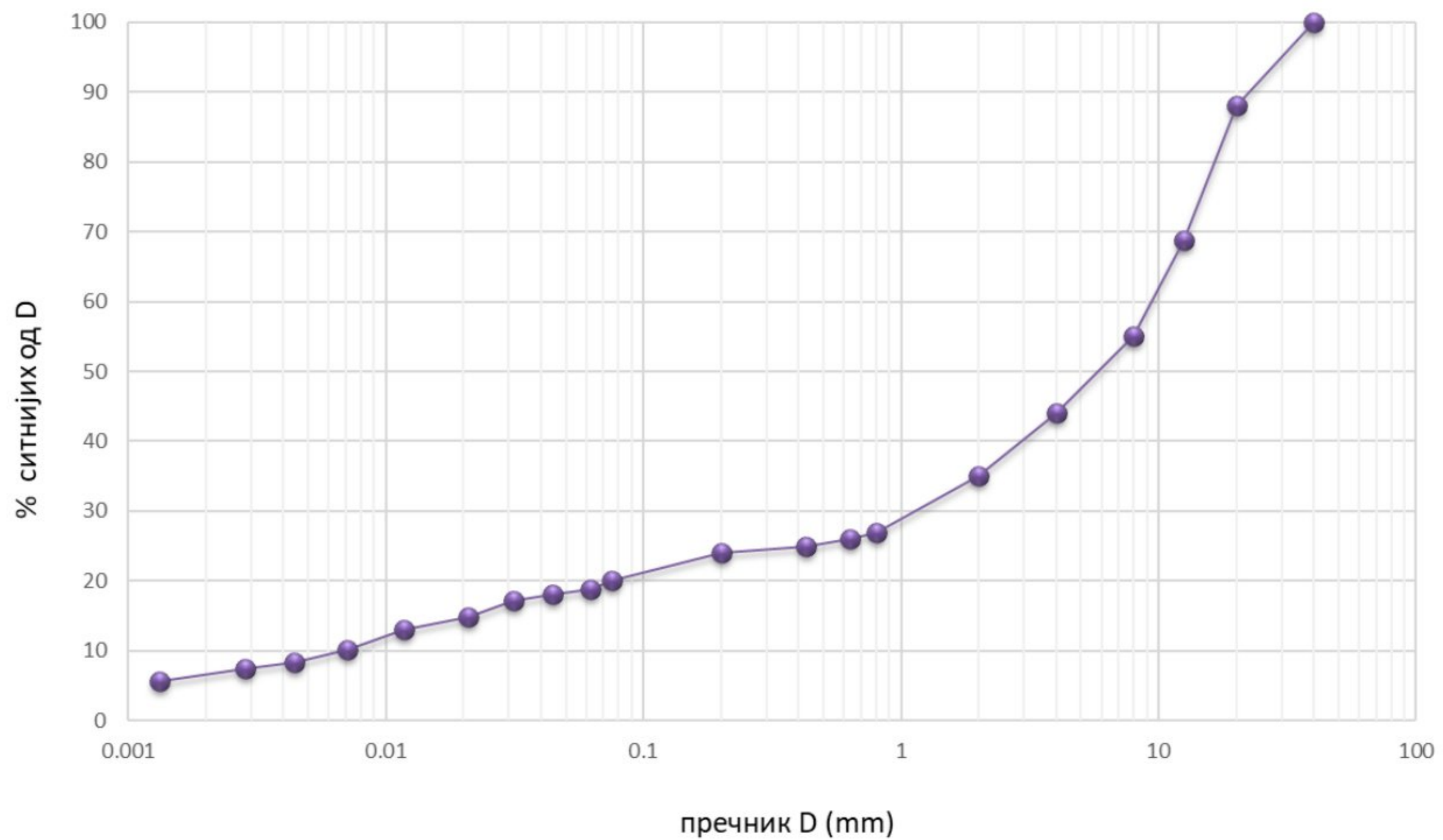


Слика 7.4 USCS дијаграм на основу параметара конзистенције

7.2 ТЕЦИШТЕ ЛЕВА РЕКА

Приликом одабира узорка за одређивање гранулометријског састава процијењено је да је у питању истовјетан материјал, те се бира најмјеродавнији дио поступком „четвртања“. Тиме је издвојен материјал величине честица до 40 mm и изведен комбиновани опит за добијање „мијешане криве“. На издвојеном узорку LM–1 масе 3610 g урађен комбинован тест гранулометрије са хидрометрисањем. Одабрани узорак се сматра репрезентативним у погледу материјала који утиче на флуид. Резултати хидрометријског теста на одабраном узорку приказани су на Слици 7.5. На издвојеном узорку око 65 % материјала је прашинасто до пјесковито (> 2 mm). Резултати показују уједначену сортираност ситних честица.

УЗОРАК LM -1



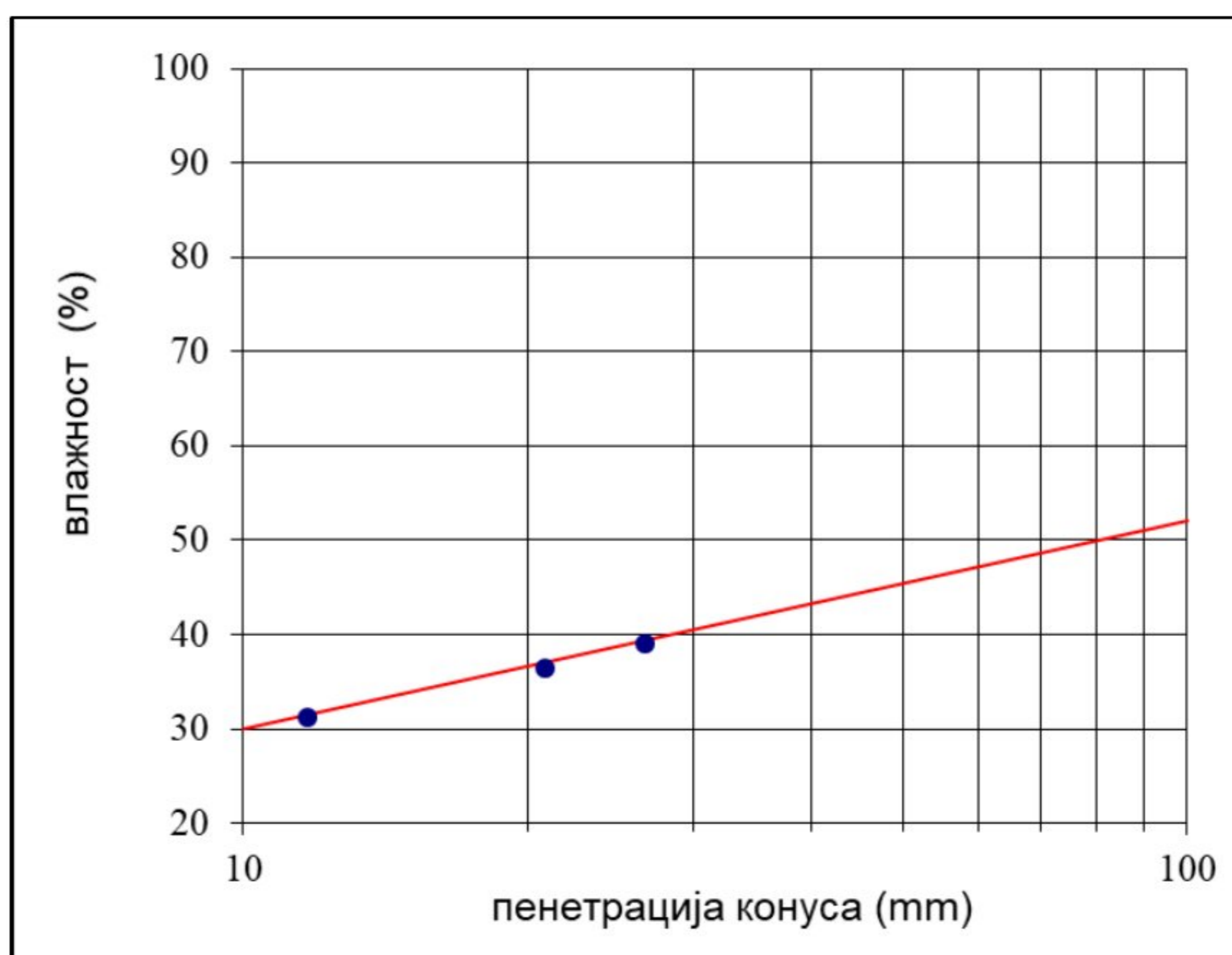
Слика 7.5 Резултати опита добијања мијешане криве сијањем и хидрометрисањем на узорку LM-1

Према утврђеном поступку, мјерена је специфична тежина узорка. Резултати мјерене специфичне тежине узорка приказани у Табели 7.9, добијена виједност се мало разликује од добијене вриједности за тециште Селанац.

Табела 7.9 Одређивање специфичне тежине на узорку финих честица коришћеном у опиту хидрометрисања на узорку тецишта Лева река

Одређивање специфичне тежине на узорку	
ms (g)	49.885
mpvm (g)	360.543
mpv (g)	330.03
Gs	2.58

Резултати мјерења конусом пенетрације приказан је на графику на Слици 7.6. Према већ дефинисаном поступку, на три мјерења на узорку мјерен је продор конуса.



Слика 7.6 Резултати одређивања границе течења на узорку тецишта Лева река помоћу конуса пенетрације

Поступак је рађен на истом принципу као и за тециште Селанац, мјерен је узорак у влажном и сувом стању. Граница течења је корелисана са пенетрацијом од слободног пада калибрисаног конуса у влажну масу тла. Резултати мјерења и опита одређивања граница пластичности су приказани у Табели 7.10.

Табела 7.10 Резултати опита конуса пенетрације рађени на одабраном узорку тецишта Лева река

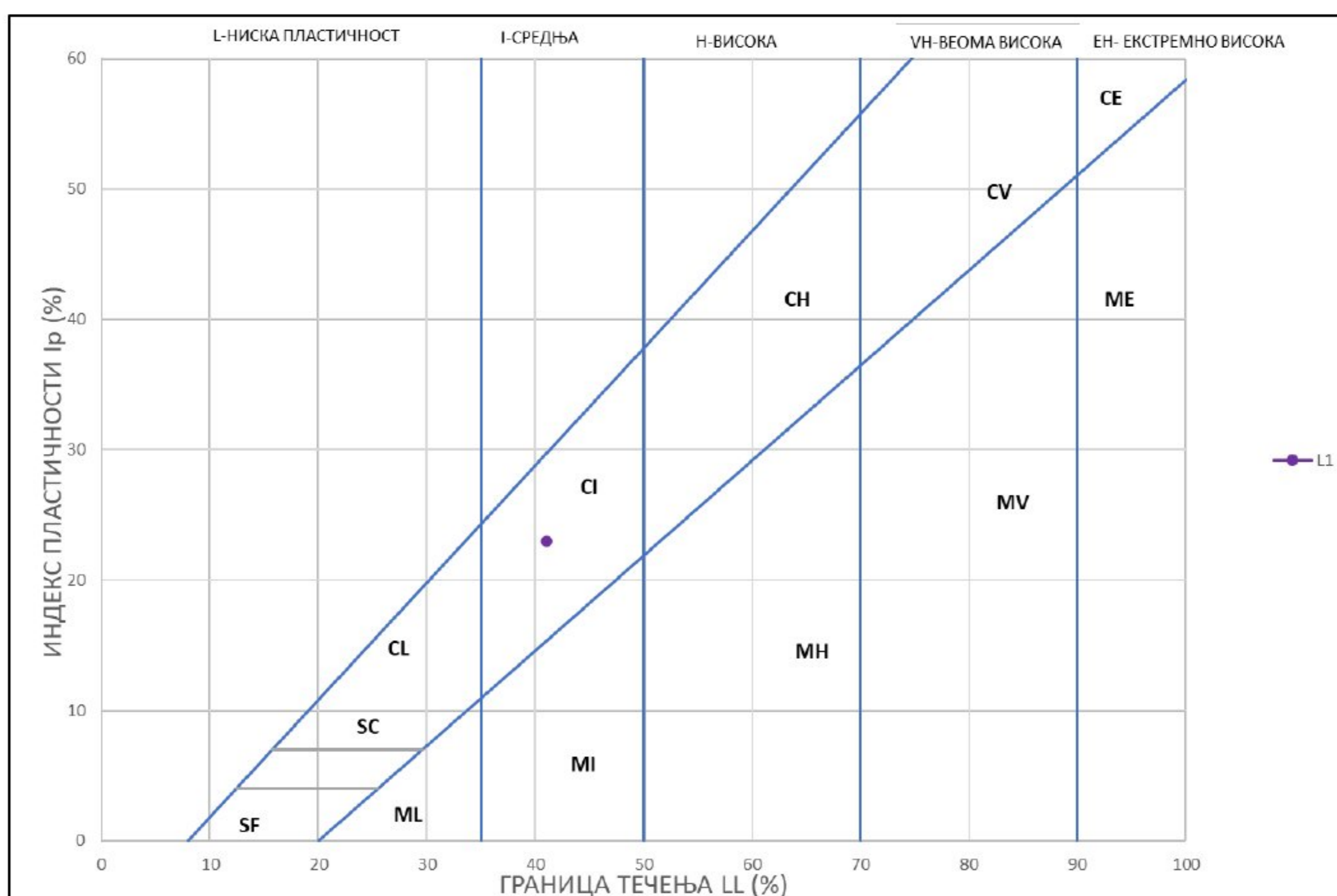
Продор конуса (mm)	Граница течења			Граница пластичности		
	11.68	20.86	26.63			
Ознака таре	140	144	145	20	66	54
Бруто влажно (g)	47.75	44.01	47.27	4.06	4.57	4.04
Бруто суво (g)	43.04	39.70	41.84	3.68	4.12	3.70
Тара (g)	27.92	27.85	27.92	1.89	2.03	2.00
Влажност w (%)	31.15	36.38	39.00	21.50	21.56	20.26

Добијени резултати утврђених Атербергових граница су приказани у Табели 7.11. Усвојена природна влажност је 45%, што за резултат има негативан индекс конзистенције.

Табела 7.11 Параметри конзистенције тла на узорку тецишта Лева река

Влажност w (%)	45.0
Граница течења LL (%)	41
Граница пластичности PL (%)	18
Индекс пластичности I _p (%)	23
Индекс конзистенције I _c (-)	-0.174

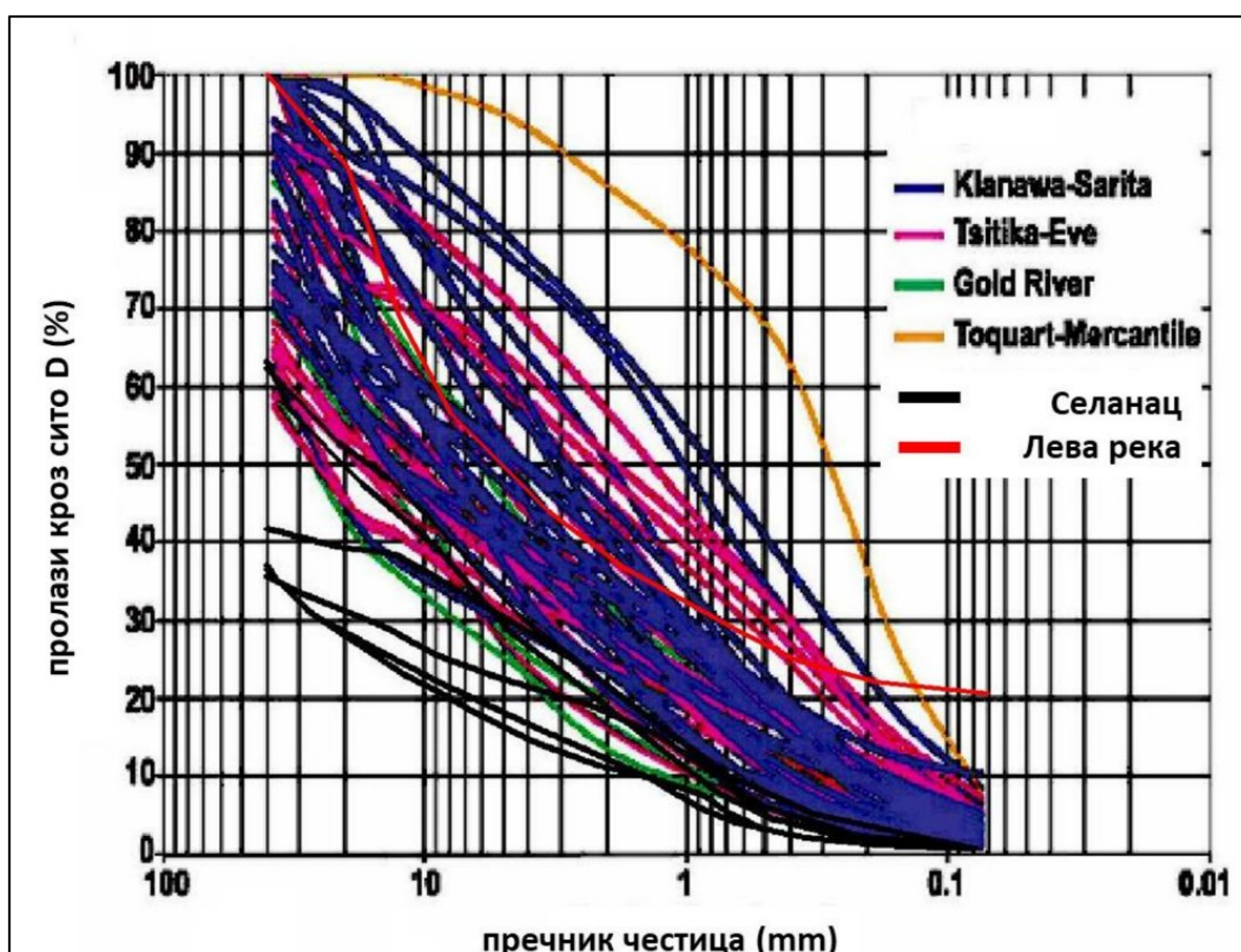
У циљу прецизнијег дефинисања карактеристика тла дат је приказ на USCS дијаграму (Слика 7.7). Према резултатима, испитивани узорак се одликује глиновити материјал средње пластичности CI.



Слика 7.7 USCS дијаграм на основу параметара конзистенције на узорку тецишта Лева река

7.3 ПОРЕЂЕЊЕ ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА СА ДОСАДАШЊИМ ИСТРАЖИВАЊИМА

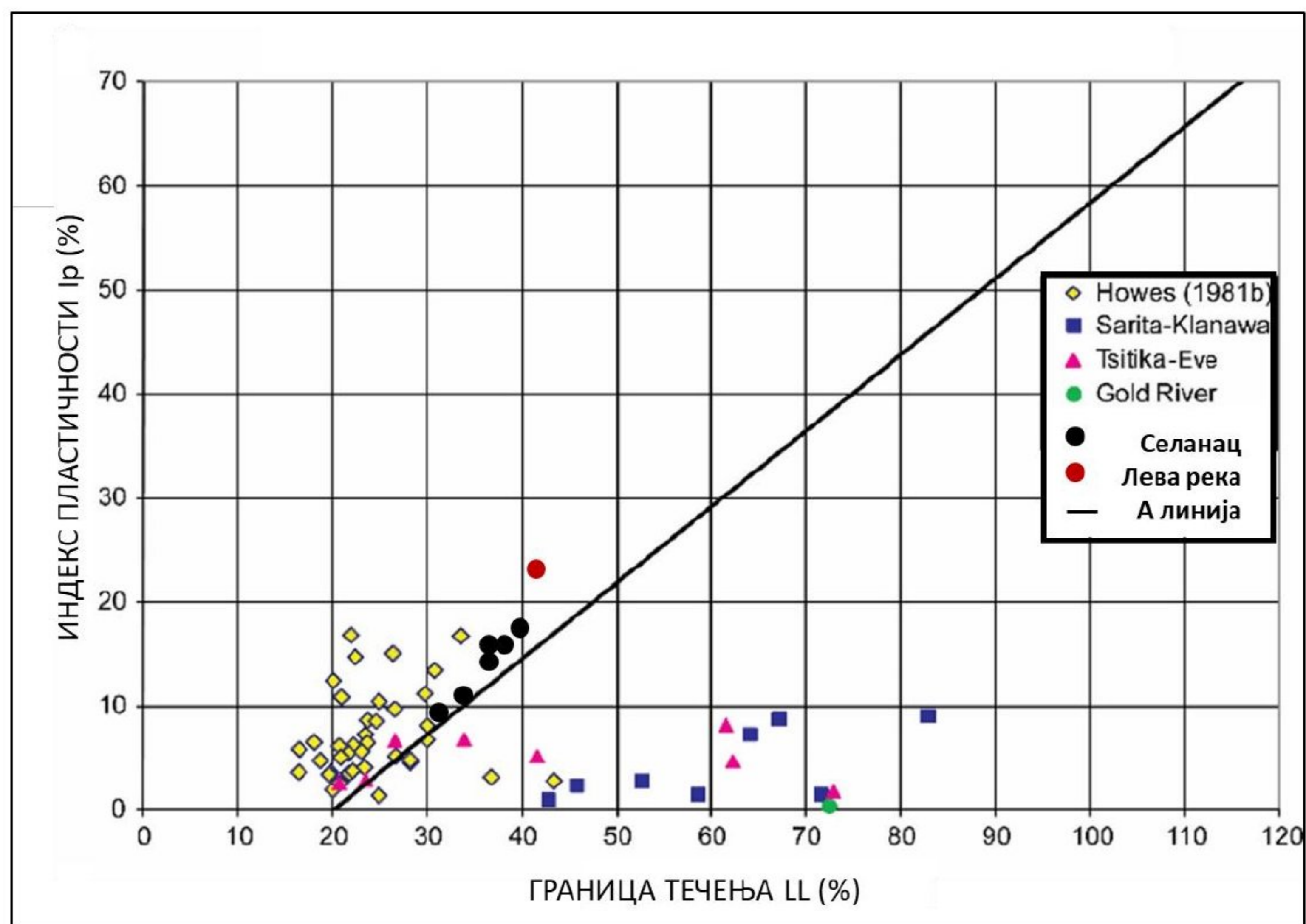
Добијени резултати одређивања гранулометријског састава и опита пластичности на узорцима су поређени са истраживањима Howes, 1981 и Brideau et al., 2019. У резултатима истраживања 44 тецишта различитих димензија и врсте покренутог материјала, урађено је поређење са добијеним гранулометријским кривима за тецишта Селанац и Лева река. Поред тога, поређене су и вриједности добијене опитом конуса пенетрације.



Слика 7.8 Поређење резултата гранулометријског састава са резултатима Brideau et.al, 2019

Поменуто истраживање обухватило је 51 узорак из 44 тецишта из 4 различита слива у области Ванкувера (Sarita-Klanawa, Tsitika-Eve, Mercantile-Toquart и Gold River). Узорци су у опсегу од 2–5 kg што је упоредиво са узорцима Селанца и Лева реке. Тецишта су формирана у другачијим геолошким условима. Тециште Селанац показује већи садржај крупнозрног материјала и гранулометријске криве се махом налазе испод осталих, док тециште Лева река показује добро поклапање у гранулометријском саставу као тецишта из слива Sarita-Klanawa. Криве за тециште Селанац се односе на узорке до максималних 200 mm, те стога приказују и мањи садржај ситнозрне компоненте (Слика 7.8).

Резултати опита пластичности су упоређени са тециштима из три слива Sarita-Klanawa, Tsitika-Eve и Gold River и претходним истраживањима Howes, 1981. Добијене вриједности индекса пластичности су најприближније резултатима у том истраживању према Howes, 1981, сви узорци су позиционирани изнад А линије. Узорак Лева река показује одступање у односу на индекс пластичности, што указује да је присуство глиновите компоненте доминантније (Слика 7.9).



Слика 7.9 Поређење резултата опита конуса пенетрације са резултатима Brideau et.al, 2019

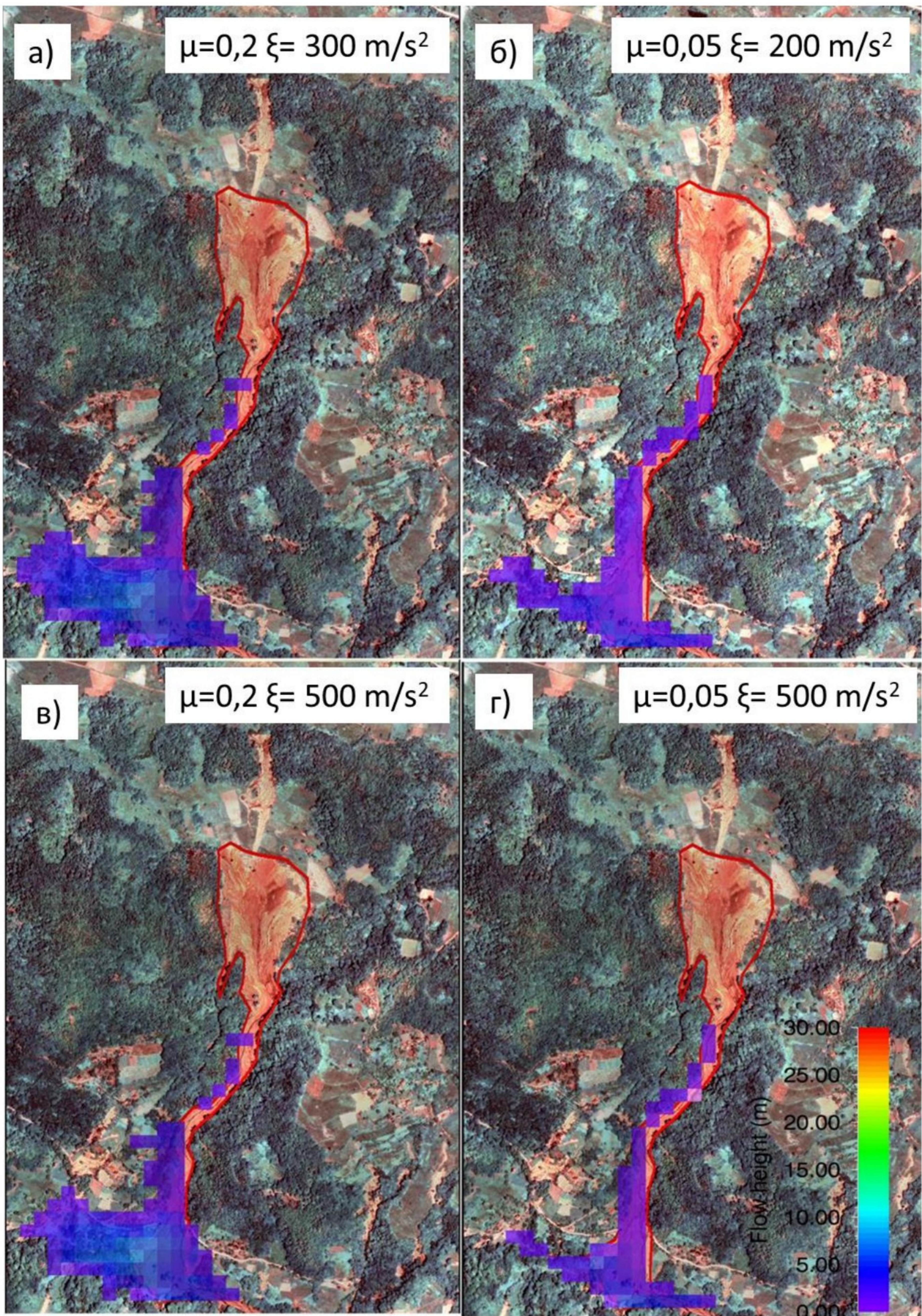
8 МОДЕЛОВАЊЕ ПРОПАГАЦИЈЕ ТЕЦИШТА

8.1 МОДЕЛОВАЊЕ ТЕЦИШТА СЕЛАНАЦ

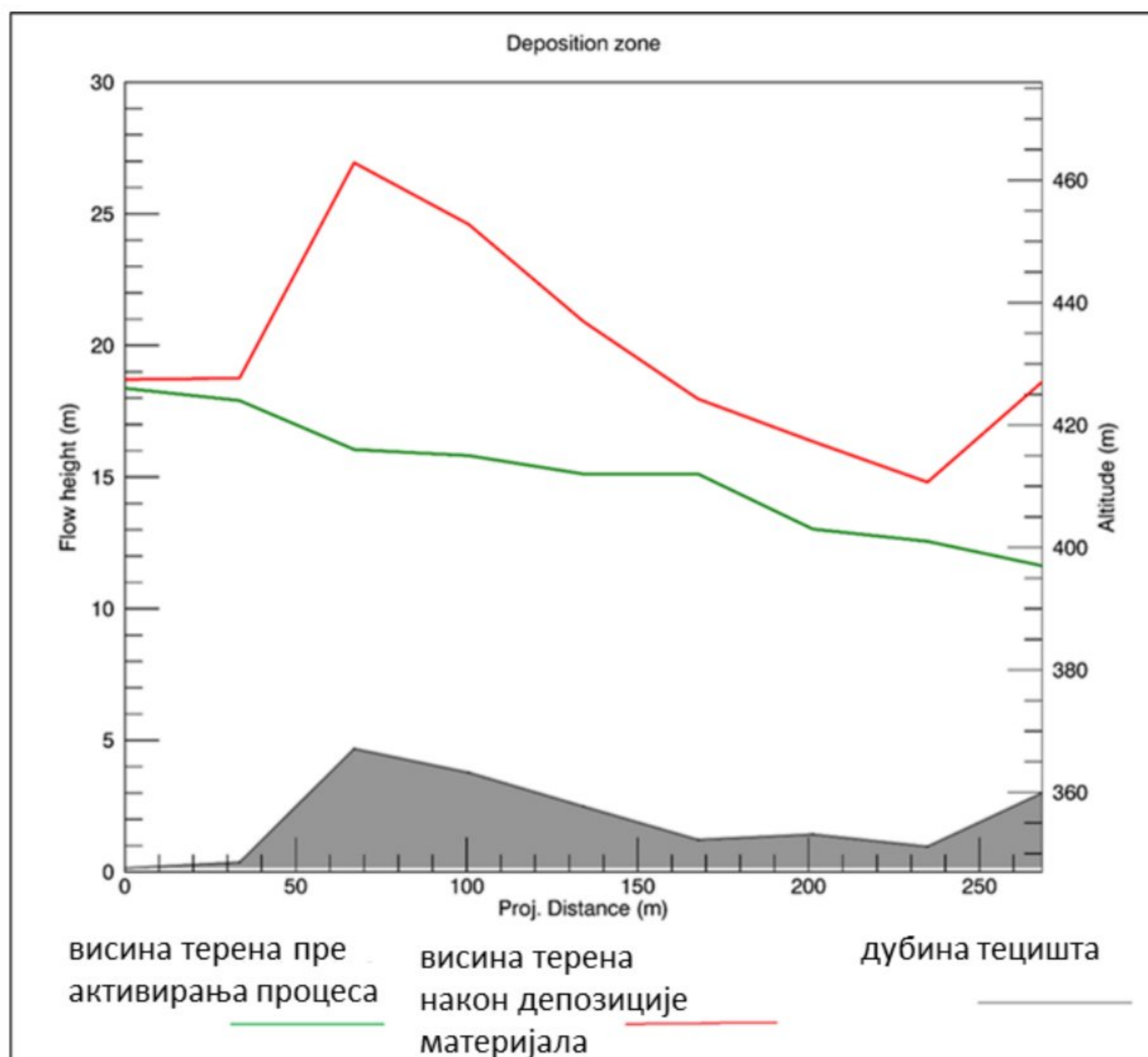
Модел I

Први резултати рађени су на моделима терена резолуције 30x30 m, а каснијим детаљнијим дефинисањем иницијалне зоне уз помоћ фотограметријског снимања, односно, поређењем снимака двије епохе, прецизније је дефинисан иницијални блок, као и боља резолуција модела терена након активирања тецишта. Такође, доступношћу старијих снимака прије догађаја, добијен је прецизнији модел терена са прецизношћу од 5 m. Као што је већ детаљно описано у поглављу 3, у RAMMS DBF програму првенствено се дефинишу нестабилне иницијалне зоне тецишта. У програму се претпоставља један или више блокова иницијалне зоне просјечне дубине. У случају Селанца, дефинисана је једна иницијална зона, максималне дубине до 30 m. Први резултати добијени су на ДМТ 30x30 m резолуције. Дефинисан је иницијални блока са максималном дубином до 30 m процијењеном картирањем (Krušić, et al. (2017)). Нестабилни блок је дефинисан као надслој висине 30 m која је еквивалент дубини иницијалне зоне. Тако је процијењен блок површине 25 000 m² и запремине од приближно 750 000 m³.

На слици 8.1 д) приказан је резултат калибрације различитих параметра, од којих је најпрецизнији модел са усвојеним μ 0.05, и ξ 500 m/s². Остали прелиминарни модели приказани на слици су предвиђали много већу зону депозиције и количину материјала, док је одабрани модел добро предвидео зону депозиције, али и велику количину материјала који је отекао даље (overflow), и мале вриједности коначних дубина депоновања материјала, максимум 5 m (Слика 8.1). Приказ коначних дубина по попречном пресеку у зони депозиције је приказан на слици 8.2.



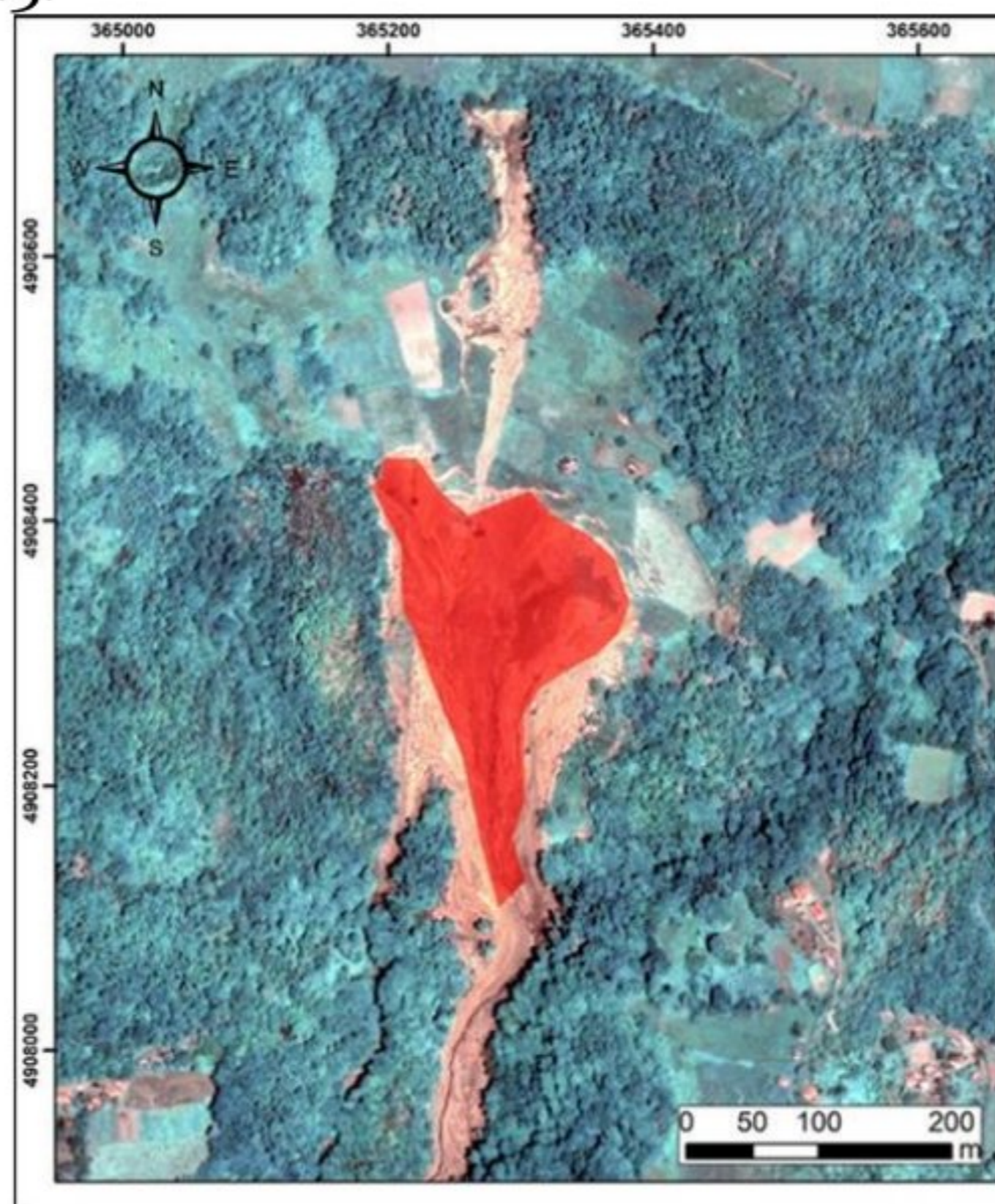
Слика 8.1 Прелиминарни модел на ДМТ 30x30 m са различитим улазним параметрима (Krušić, et al. (2017))



Слика 8.2 Попречни пресек у зони депозиције на најпрецизнијем моделу 2.19. д) (Krušić, et al. (2017))

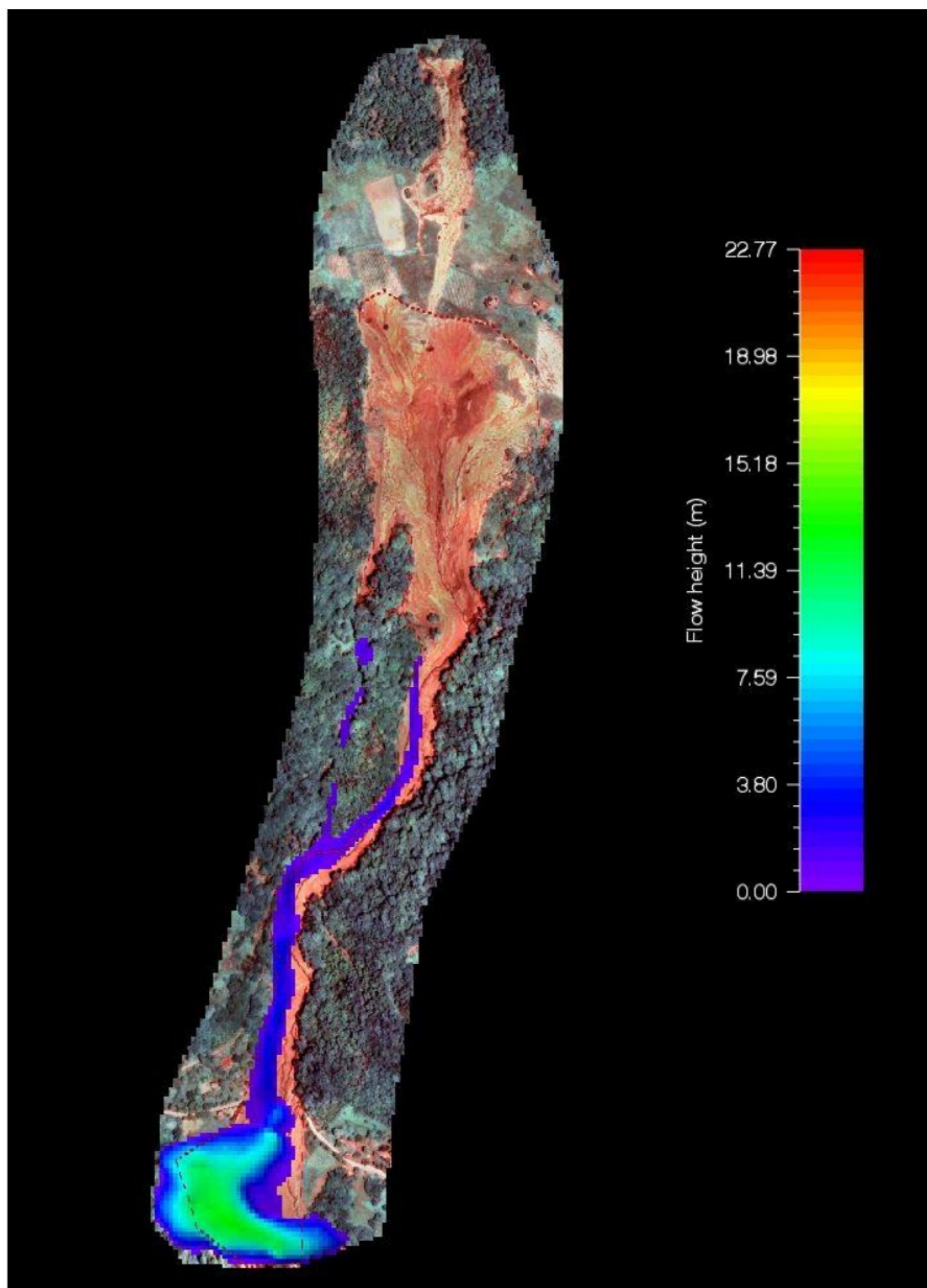
Модел II

За улазни модел терена коришћен је Дигитални модел терена ДМТ1а 5x5 m резолуције, прије појаве догађаја. Почетни блок има просјечну дубину од 15 m, што је процијењено анализом ДМТ-а прије и после догађаја. Ова метода је такође била корисна у дефинисању других параметара као што су дубина ерозије (процијењена у неким дијеловима максимално 20 m), дубина депоновања и границе тецишта. Издвојена иницијална зона приказана је на Pleiades снимку непосредно након активирања тецишта (јун 2014.) на слици 8.3.



Слика 8.3 Иницијална зона тецишта

RAMMS је базиран на Voellmy реологији, тако да су повратном анализом израчунати параметри трења μ и турбулентног параметра ξ . Након великог броја итерација, коначни најбоље прилагођени параметри су 0,11 за коефицијент трења μ , 500 m/s^2 за турбулентни параметар ξ (Krušič et. al., 2019) (Слика 8.4).



Слика 8.4 Модел финалних дубина тецишта Селанац на прецизнијем моделу терена са прорачуном приноса материјала (Krušič et. al., 2019)

Поредећи *модел I* и *модел II* може се рећи да примјеном прецизнијег модела терена резолуције од $5 \times 5 \text{ m}$, приближно иста количина материјала је измоделована у зони депозиције, али са много већом процијењеном дужином таложења материјала што више одговара реалним подацима. У оба случаја, прогнозира се доста материјала који је отекао даље (outflow) дуж Селаначке реке. Ово је нешто што представља изазов за напредније моделовање гдје би се укључили и параметри утицаја бујичне ријеке, потенцијал разорности, могућа процјена одговарајућих санационих мјера и сл. За сада, рађено је поређење само са изведеним теренским истраживањима у зони тецишта.

Према процијењеној дубини у зони таложења 2D ERT истраживањима је претпостављено 20 m у најдубљем дијелу, док је поређењем ДМТ-а двије епохе предвиђена разлика у том дијелу око 15 m. Нумерички модел са коришћеним ДМТ-ом боље резолуције је дао боље резултате у погледу коначних дубина. Међутим, уколико поредимо понашање материјала и просторно кретање и депозицију, први модел је дао прилично прихватљиве резултате. Такође, резултати запремине моделованог депонованог материјала у оба случаја су приближно исти $\approx 125.000 \text{ m}^3$, док је процијењена запремина на основу теренских истраживања била око 121.000 m^3 . Ипак ову предикцију не можемо узети скроз као тачну, како се углавном цијела критична маса покренутог материјала (најкрупнији блокови, органски материјал, стабла итд.) зауставила у зони депозиције, док је дренирана вода са махом ситим честицама и дробиним, транспортовала материјал даље бујичним током Селаначке реке, што је изазвало секундарне појаве нестабилности.

Модел III

Новији модели су рађени узимањем у обзир ерозије материјала. У случају Селанца коришћен је процијењена максимална дубина ерозије од 12 m. Поређењем двије епохе ДМТ-а је искоришћено за дефинисање разлика у зони депозиције и иницијалном блоку, као и зони ерозије (Слика 4.23). За разлику од процене количине материјала у иницијалном блоку, која се једнозначно добија на основу разлика у епохама ДМТ-а, количину еродованог материјала није могуће директно добити на основу разлика ДМТ-ова. Разлог је у томе што део материјала након догађаја остаје у еродованом каналу, па утиче на процјену геометрије тока. Зато је потребно да се уз разлике у ДМТ-овима при процени количине еродованог материјала у обзир узму и геофизички подаци и теренске опсервације.

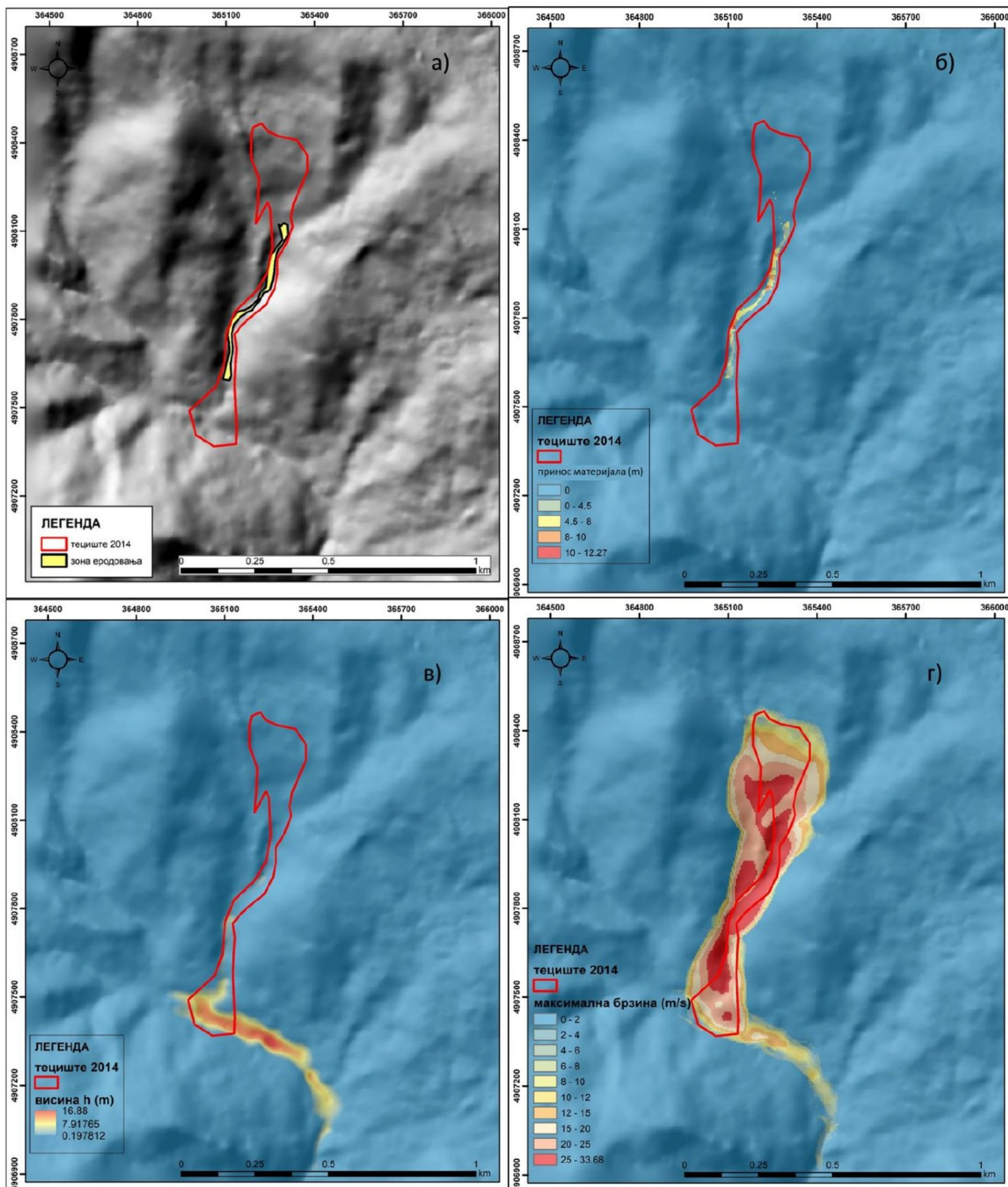
Критични напон је у моделу подешен на препоручену вриједност од 1 kPa , док је фактор пропорционалности $dz/dt = 0.1 \text{ m/kPa}$. Веће вриједности овог фактора прецењују количину еродованог материјала. Резултати запремине и транспортованог материјала са и без коришћења фактора ерозије су поређени. Узевши у обзир утицај ерозије, коначне дубине се мало разкликују, али је укупна запремина знатно већа (Табела 8.1) (Krušić, et. al, 2021).

Табела 8.1 Најподеснији параметри у Моделу 2 са валидацијом

Тециште	Реологија (Voellmy) $\mu, \xi (\text{ms}^{-2})$	Запремина иницијалног блока (m^3)	Еродована количина материјала (m^3)
Селанац	0,11 ; 500	453061,15	41023,35

Модел III показује да су коначне дубине у зони депозиције скоро 17 m (Слика 8.5 в)). Као улазни параметар, поред иницијалне зоне, дефинисана је и зона еродовања и приноса материјала, и у претходном моделу (Слика 8.5 а)). Као најмјеродавнији пресјек за валидацију модела коришћен је пресјек ERT₅ у зони депозиције. Остали модели показују дубине еродованог материјала у зони транспорта (Слика 8.5 б)) и максималну брзину у фронталном дијелу (Слика 8.5 г)). Максимална измоделована брзина у фронталном дијелу је 33 m/s што је такође предвиђено и у зони Селаначке реке. Узимајући у обзир рад ријеке, која је у том моменту имала бујични карактер и да уопште

нису рађена мјерења током процеса, овај податак у тој зони не можемо узети као репрезентативан, како су брзине сасвим сигурно биле много веће.

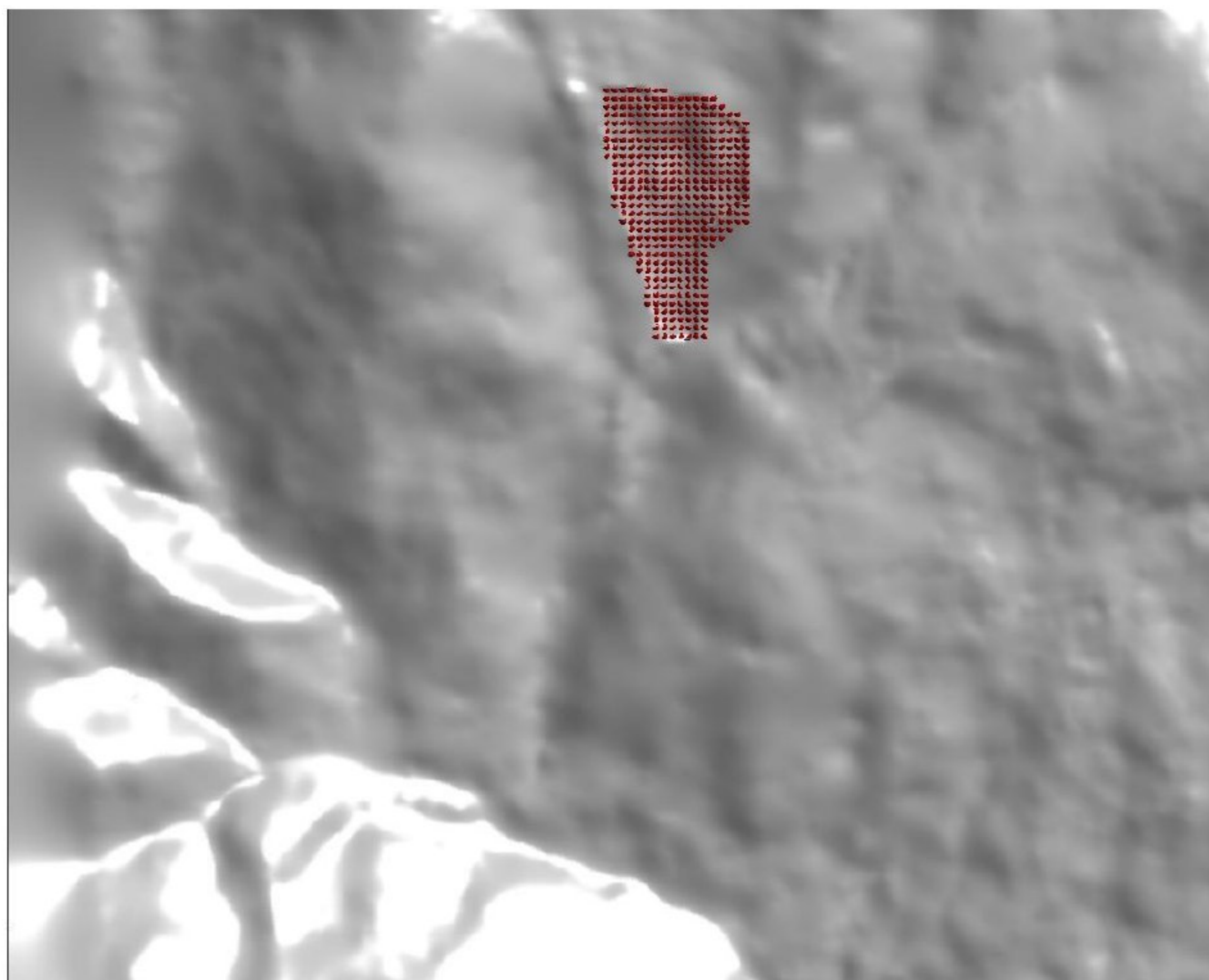


Слика 8.5 а) издвојена зона одношења материјала у зони транспорта б) модел дубине приноса материјала у зони транспорта в) коначни модел депозиције г) модел максималних брзина течења тецишта Селанац

8.1.1.1 Моделовање у SPH Geoflow програму

ДМТ 1а 5x5 m резолуције је коришћен као улазни топографски фајл са 133452 тачке. Иницијални блок је добијен као и код RAMMS софтвера из поређења двије епохе високо прецизног ДМТ-а, с тим што, као што је претходно наведено у Поглављу 2, овај

код тражи одговарајуће формате, у овом случају облак тачака у **.pts** екстензији (Krušić et al. 2019). Претходно је 5 m растер ДМТ преведен из **.asc** формата у тачке са x , y , i z координатом (Слика 4.29), а затим у **.pts** документ који одговара коду. На примјеру Селанца, први пут је овим софтвером тестирана екстракција покренутог материјала из ДМТ-а након симулације, како би се нови модел терена могао користити за наредне симулације у циљу процјене потенцијалних кретања у будућности из исте иницијалне зоне. Тиме је уведен улазни документ **eros.pts**. Претходно је подразумевјевано кретање надслоја у виду тачака, у односу на које је рађен прорачун по дубини.



Слика 8.6 Дефинисање иницијалне нестабилне зоне помоћу у SPH коду

Одабрани реолошки закон је Воелмијев закон. Како је раније наведено, у случају течења дробине најподеснији су закони трења. Како је RAMMS софтвер базиран искључиво на Воелмијевој реологији, тако је и овдје урађен модел базиран на истом реолошком закону и калибрисана су оба параметра–коэффициент трења μ и турбулентни параметар ξ , као и остали параметри које захтјева код. Најподеснији параметри отпорности су $\tan\varphi=0,35$ (φ је угао трења), и турбулентни коэффициент $\xi=1000 \text{ m/s}^2$.

Што се тиче ерозије, коришћен је Хунгров модел гдје је коэффициент ерозије подешен на 0.0001. У овој калкулацији није рачунат утицај порног притиска. Такви прорачуни су од посебног значаја у интергрануларним типовима порозности, гдје доминира пјесковита и шљунковита фракција, што овдје није случај (на основу гранулометријске анализе fine фракције).

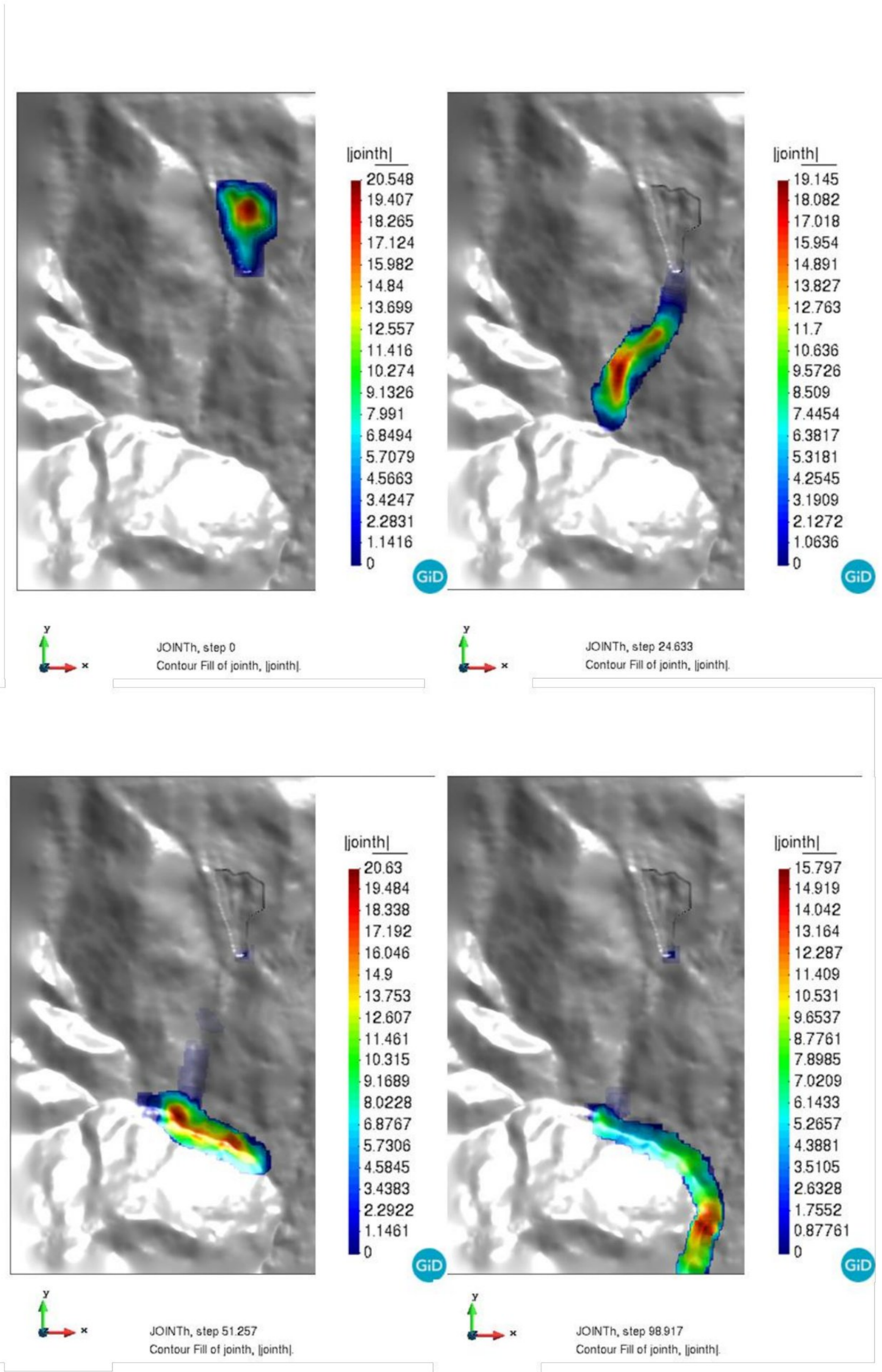
Модел Селанац SPH 1

У моделу 1 дефинисан је **file.topo** на основу поређења ДМТ двије епохе, претходно коришћен и у RAMMS софтверу. Овдје је коришћен *ascii* фајл свих тачака претходно припремљених у ArcGis окружењу. За разлику од моделовања у RAMMS –у, прецизност овог улазног податка је већа јер предвиђа тачну дубину свих 133452 тачака, док се у RAMMS програму претпоставља осредњена дубина. Коришћени улазни параметри за Модел SPH 1 дати су у табели 8.7.

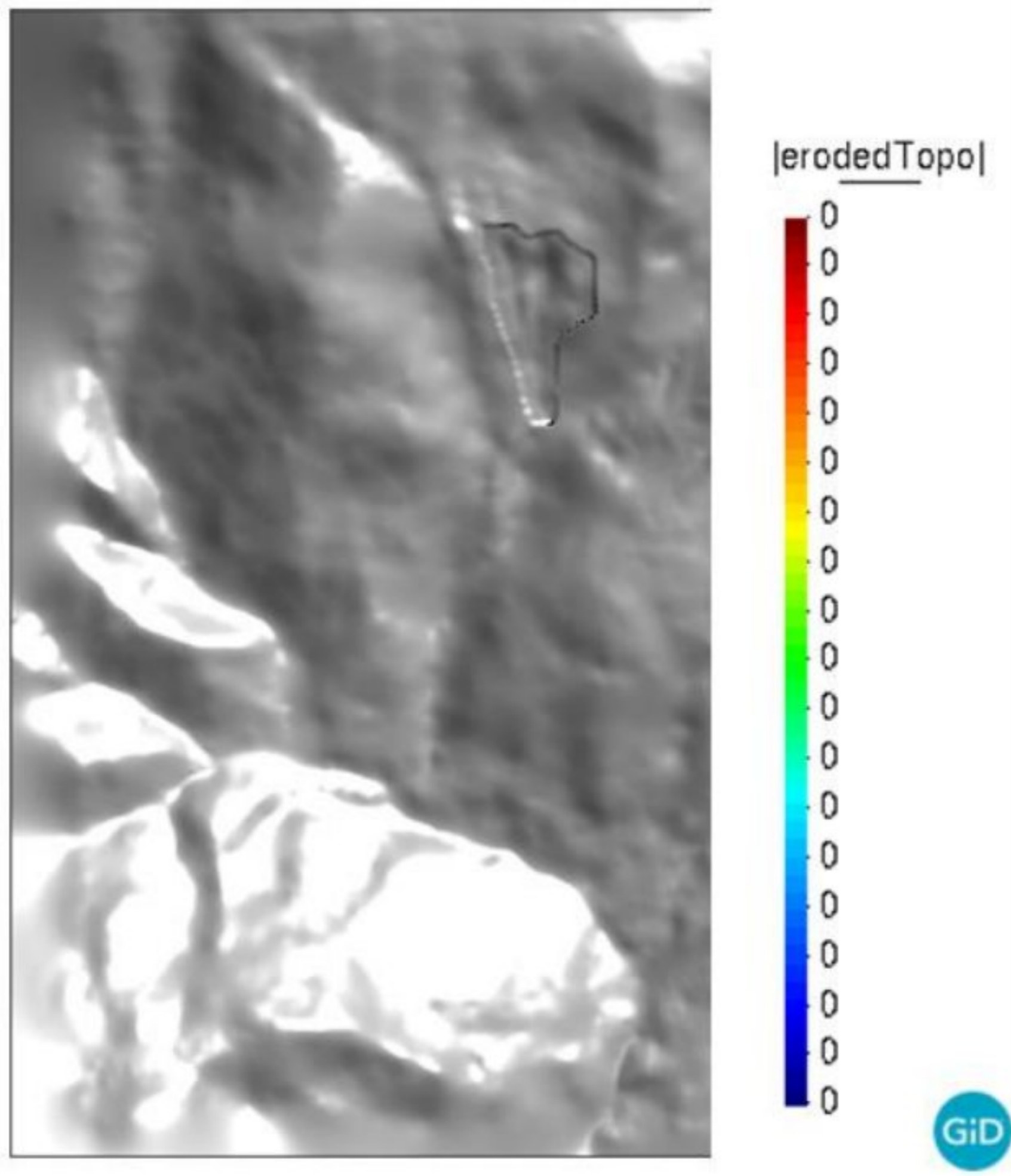
Табела 8.2 Улазни параметри за SPH I модел

Број константе	Ознака	Параматер	Усвојене вриједности
c ₁	<i>cgra</i>	гравитационо убрзање	9.8 m/s ²
c ₂	<i>dens</i>	густина флуида	2000 kg/m ³
c ₅	<i>nfriect</i>	реолошки закон	7
c ₉	<i>tanfi8</i>	фрикциони параметар	0.05
c ₁₀	<i>hfriecto</i>	минимална дубина која може бити захваћена флуидом	0.001
c ₁₂	<i>voellmy2phase</i>	турбулентни параметар ξ	500
c ₁₄	<i>hsat</i>	однос дебљине слоја који је потпуно засићен у односу на укупну дубину	1
c ₁₇	<i>denss</i>	густина чврстих честица	2400 kg/m ³
c ₁₈	<i>densw</i>	густина воде	1000 kg/m ³
c ₁₉	<i>Sr**</i>	степен засићености	1
c ₂₀	<i>ifctdens</i>	корективни фактор за потпуно засићено тло (двофазни модел)	2
c ₂₁	<i>eroslaw</i>	закон ерозије	1 (Hungr)
c ₂₂	<i>Keros</i>	параметар ерозије	0.0001
c ₂₆	<i>Permlaw</i>	закон филтрације	2 (Anderson)

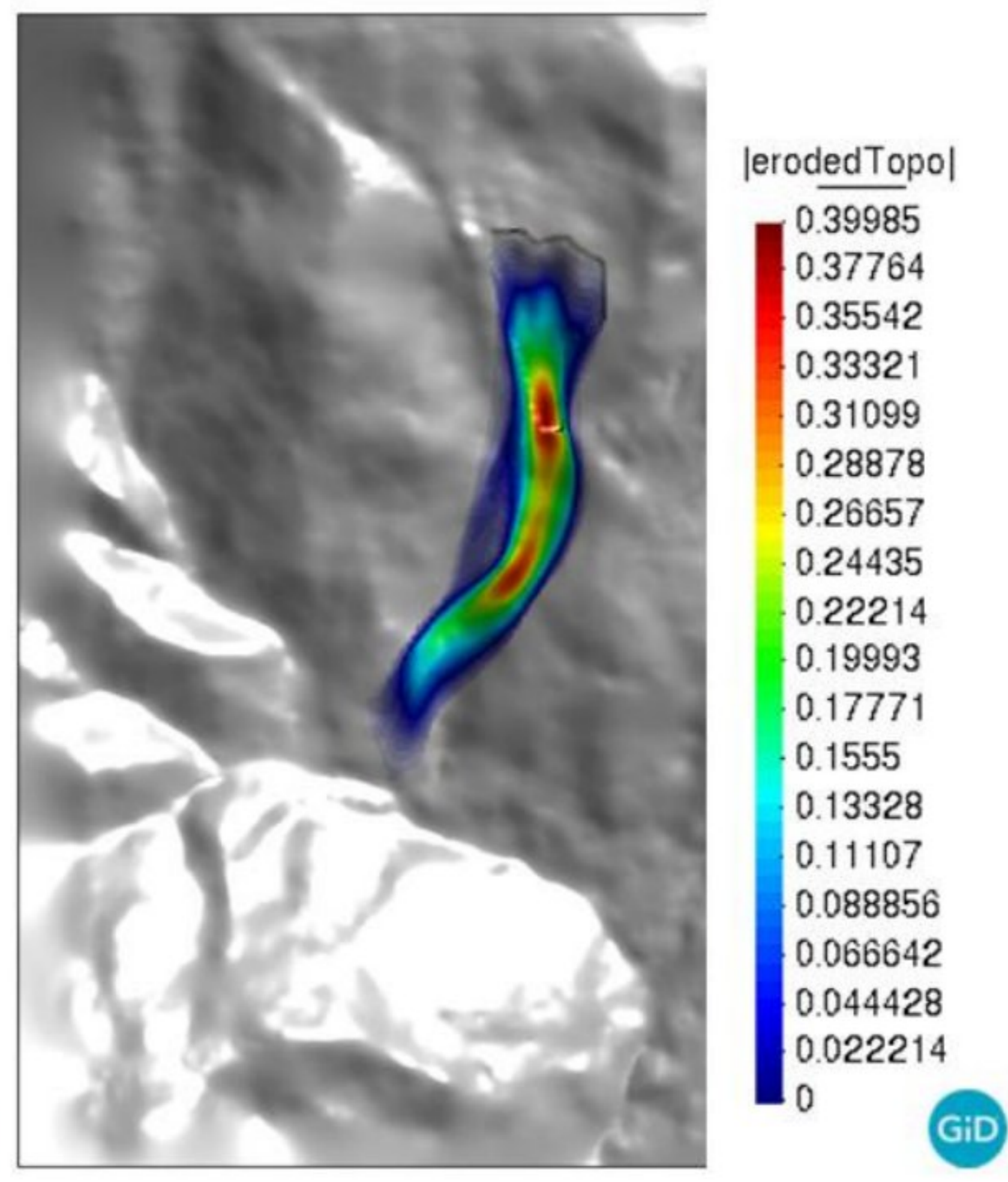
За улазне параметре за Модел SPH 1, резултати симулације висина, степена приноса материјала и маскималних брзина у фронталном дијелу тецишта су дати редом на сликама 8.7, 8.8., 8.9.



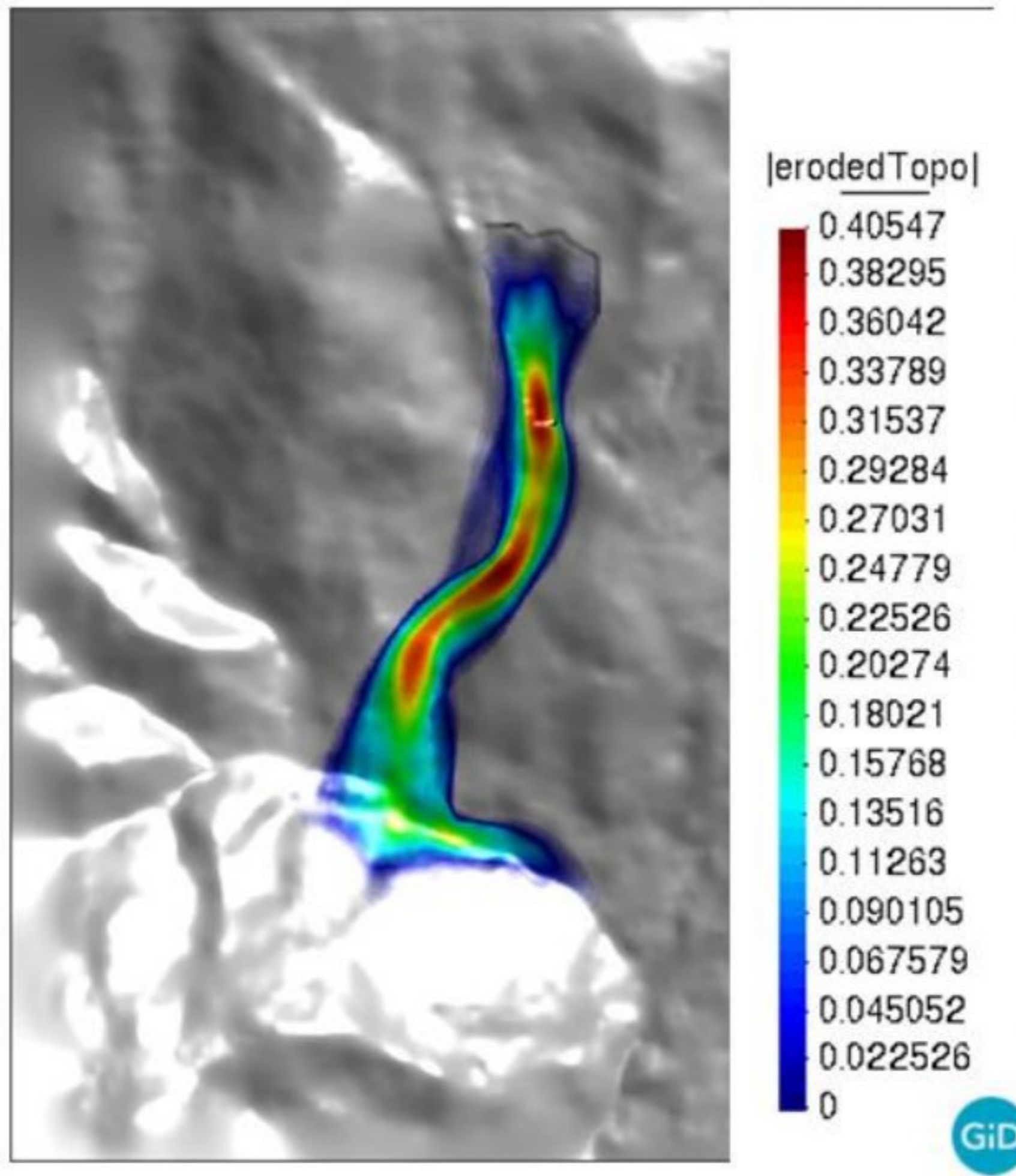
Слика 8.7 SPH1 модел симулације кретања материјала и коначних дубина депоновања



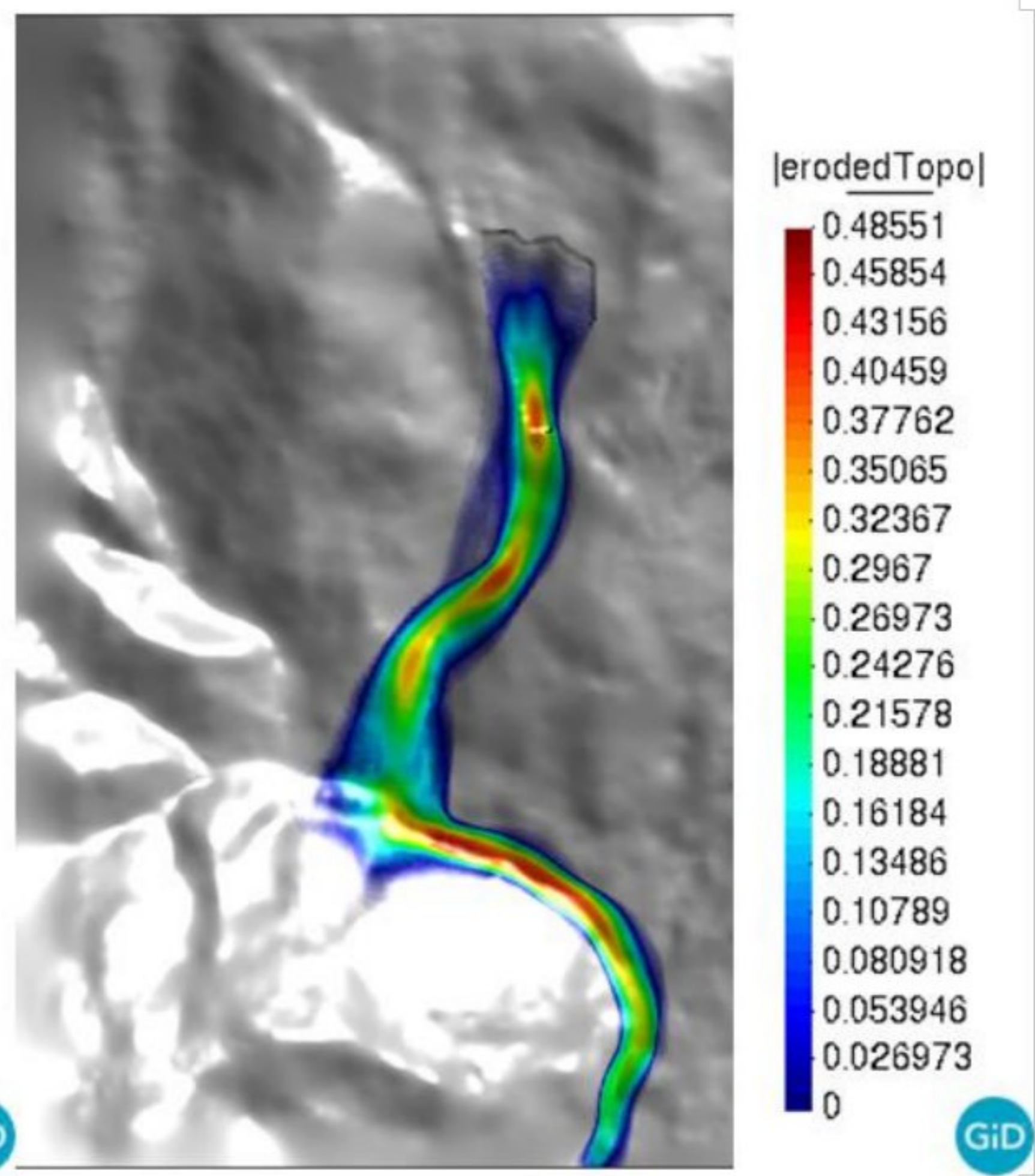
erodedTopo-, step 0
Contour Fill of erodedTopo, [erodedTopo].



-erodedTopo-, step 24.633
Contour Fill of erodedTopo, [erodedTopo].

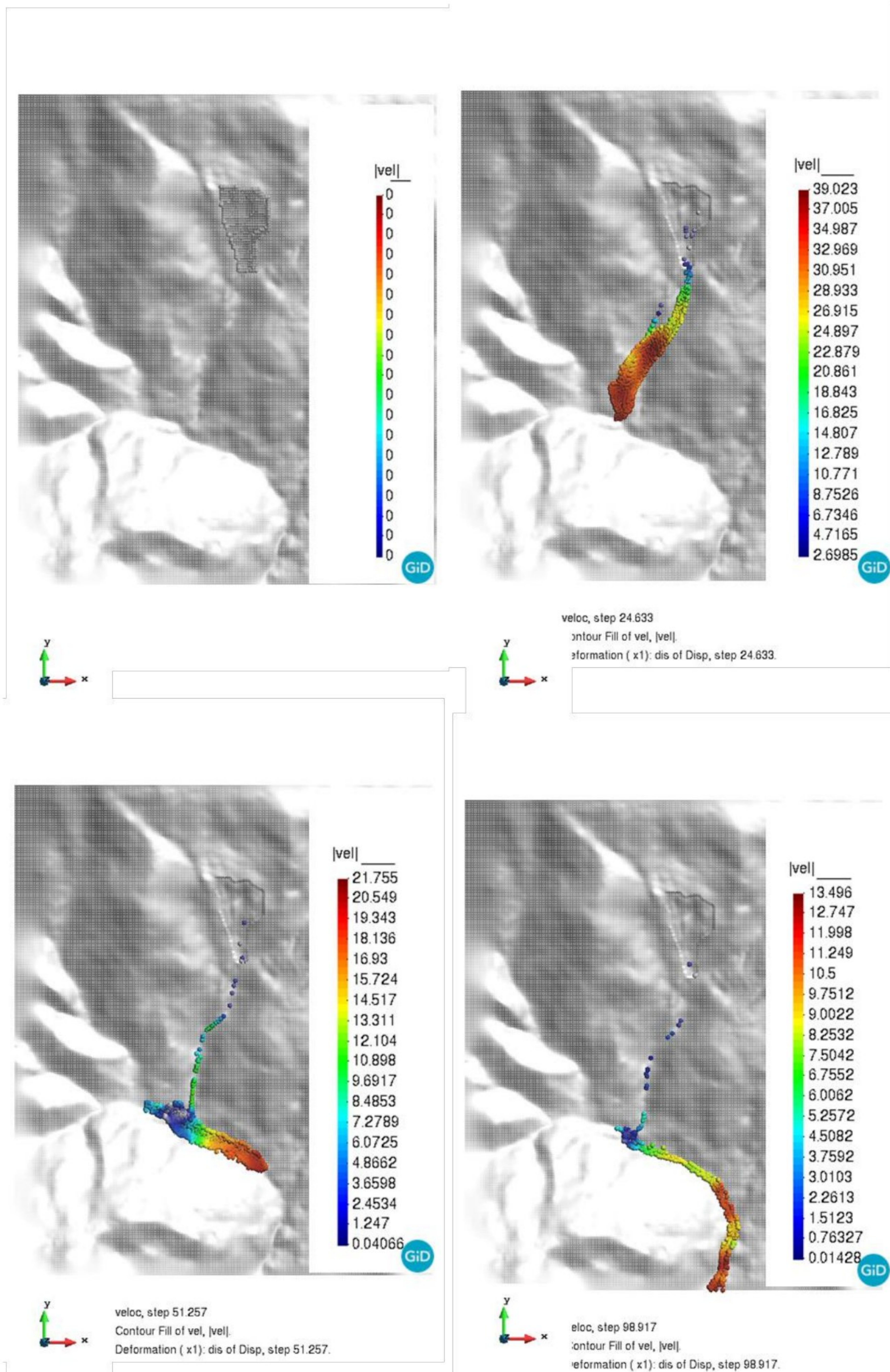


erodedTopo-, step 51.257
Contour Fill of erodedTopo, [erodedTopo].



erodedTopo-, step 98.917
Contour Fill of erodedTopo, [erodedTopo].

Слика 8.8 SPH1 модел прорачуна степена приноса материјала ег у зони транспорта



Слика 8.9 SPH1 модел прорачуна достигнутих максималних брзина течења

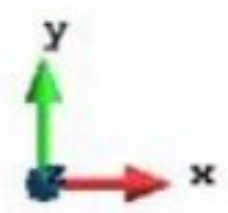
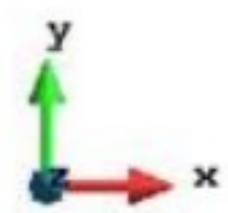
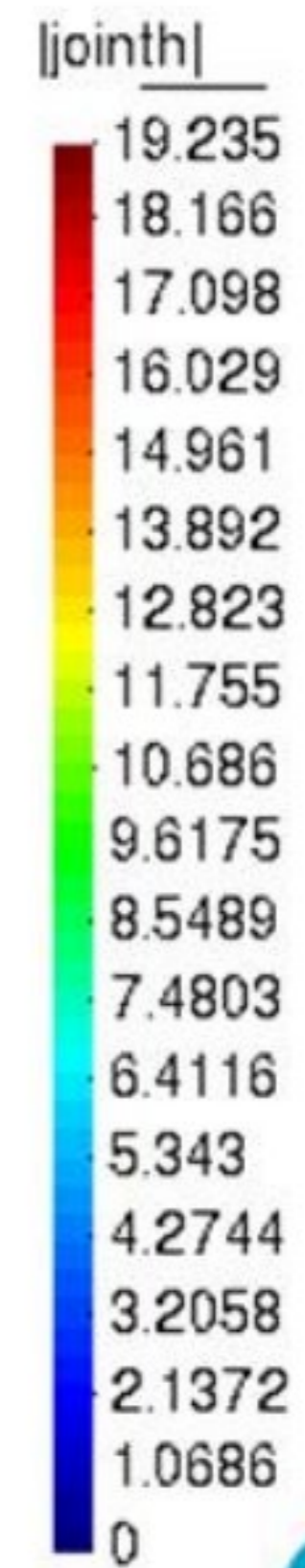
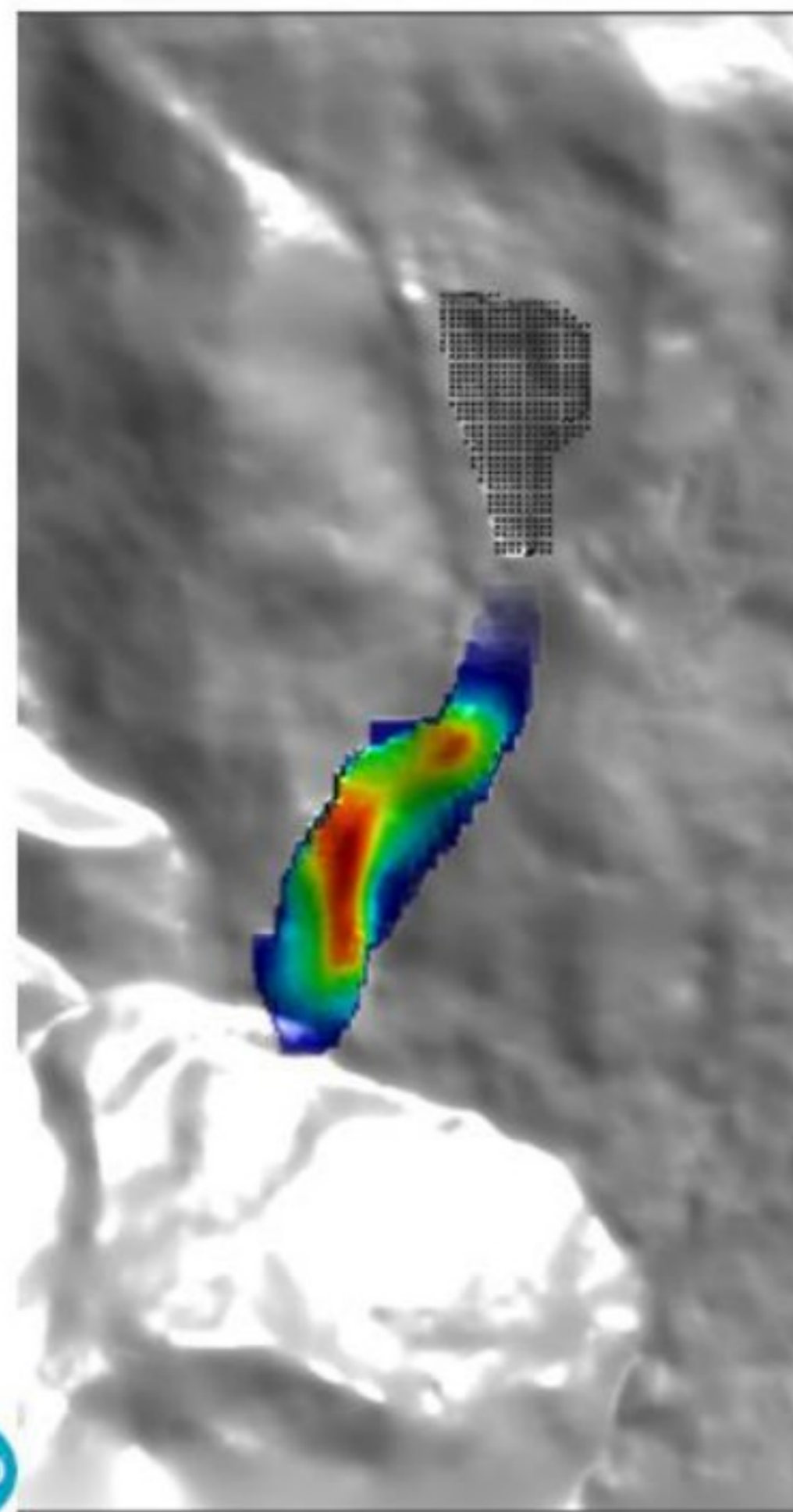
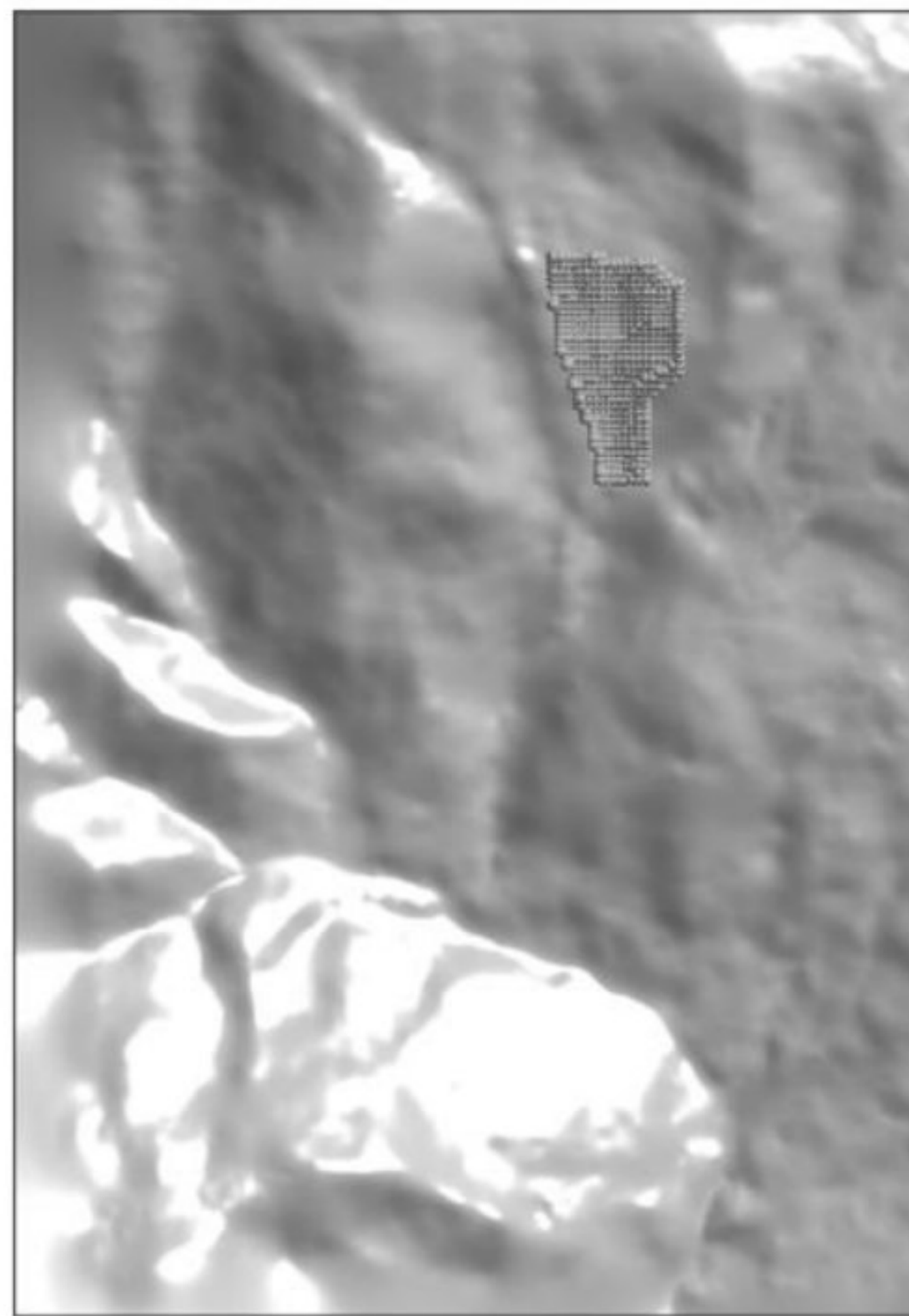
Модел Селанац SPH 2

Калибрација овог модела је рађена у односу на основе реолошке параметре. Одабрани реолошки закон је Воелмијев, сви параметри су исти осим μ и ξ . Коришћени улазни параметри дати су у табели 8.3.

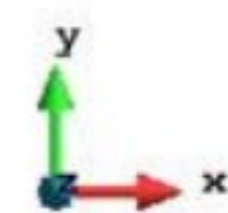
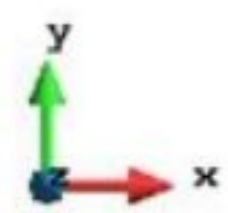
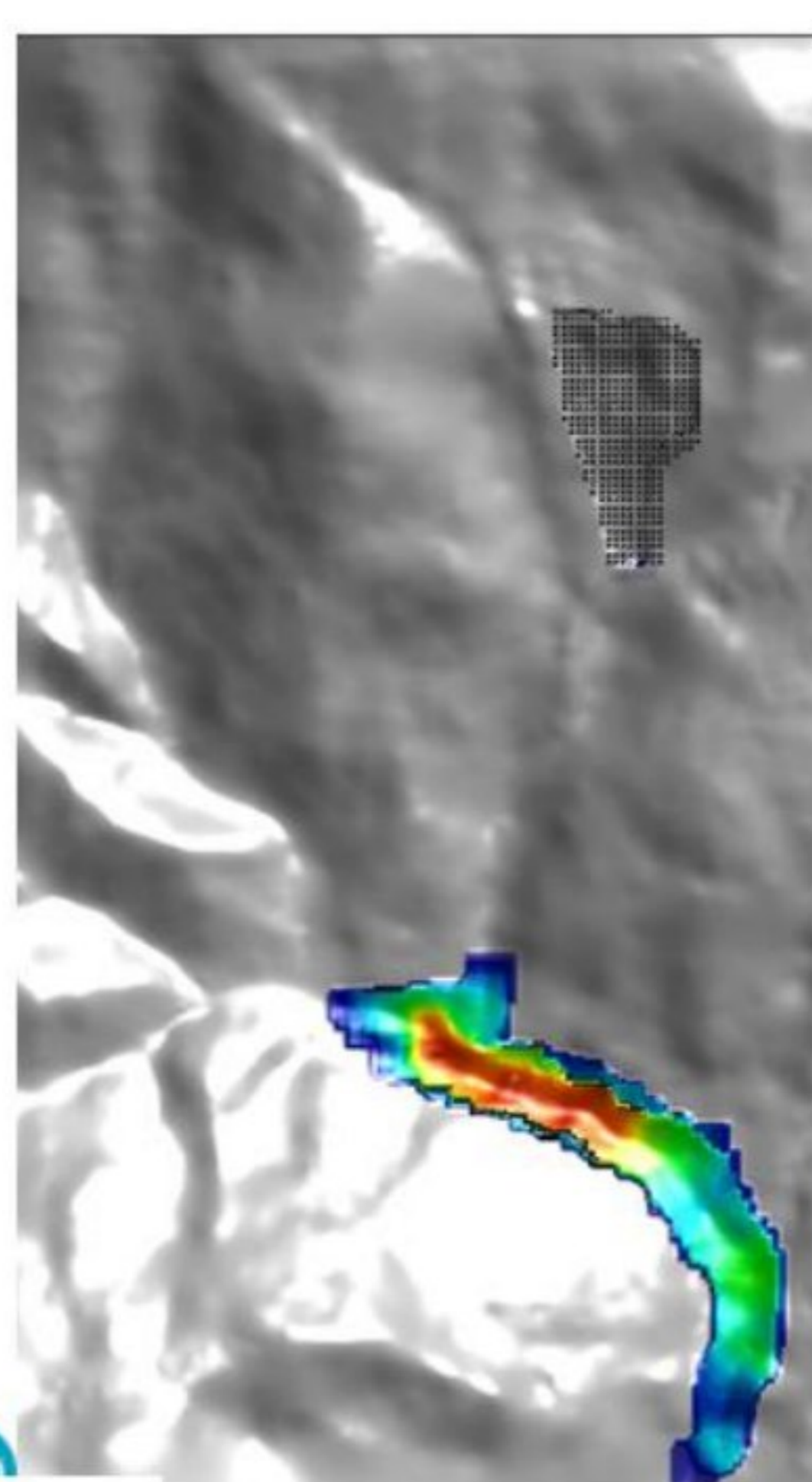
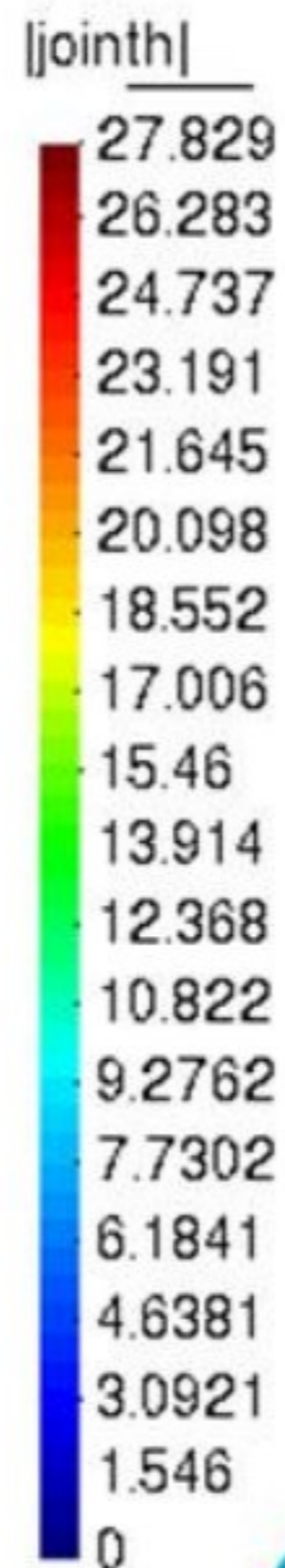
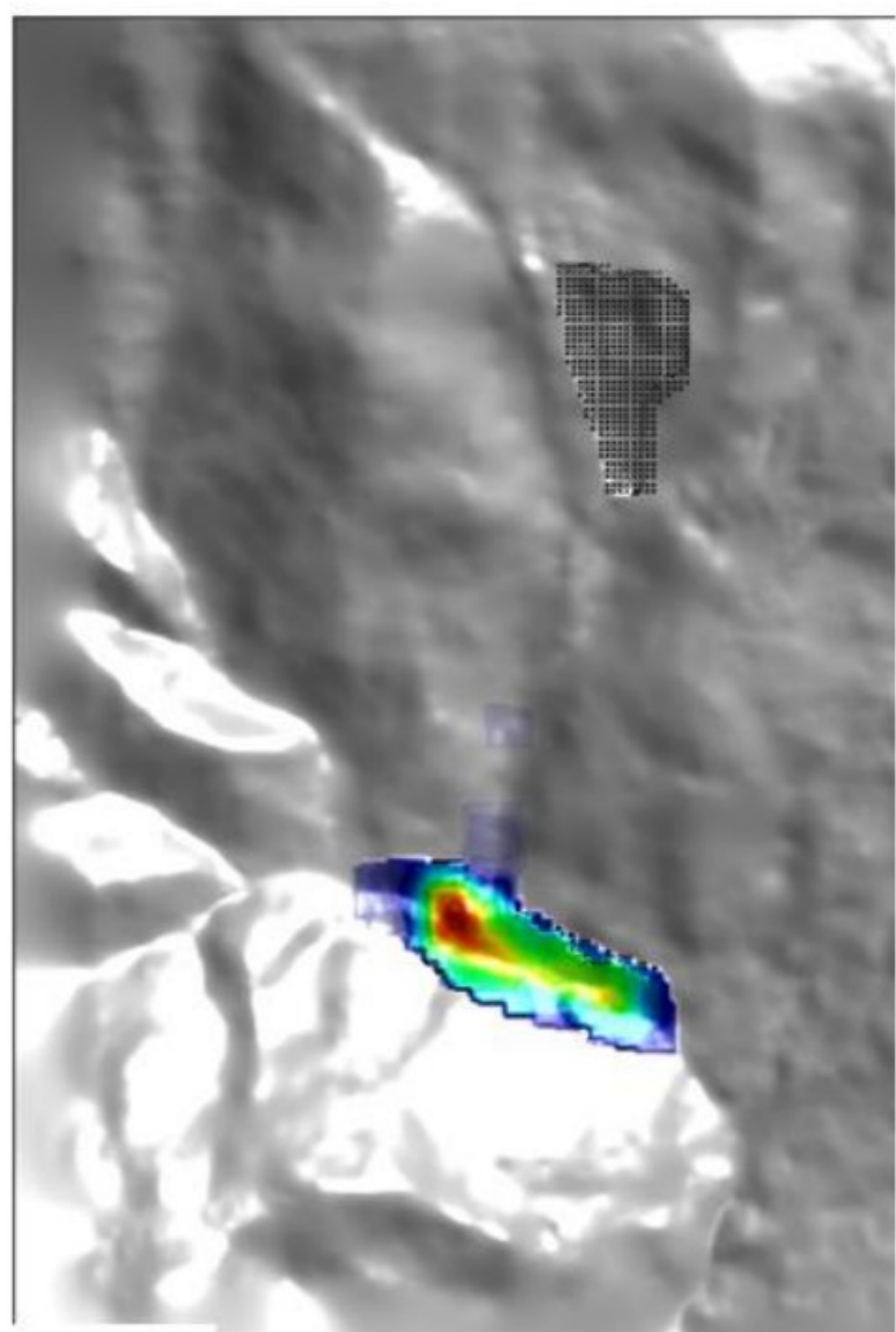
Табела 8.3 Улазни параметри за SPH II модел

Број константе	Ознака	Параметер	Усвојене вриједности
c_1	<i>cgra</i>	гравитационо убрзање	9.8 m/s ²
c_2	<i>dens</i>	густина флуида	2000 kg/m ³
c_5	<i>nfriect</i>	реолошки закон	7
c_9	<i>tanfi8</i>	фрикциони параметар	0.2
c_{10}	<i>hfriecto</i>	минимална дубина која може бити захваћена флуидом	0.001
c_{12}	<i>voellmy2phase</i>	турбулентни параметар ξ	1000
c_{14}	<i>hsat</i>	однос дебљине слоја који је потпуно засићен у односу на укупну дубину	1
c_{17}	<i>denss</i>	густина чврстих честица	2400 kg/m ³
c_{18}	<i>densw</i>	густина воде	1000 kg/m ³
c_{19}	<i>Sr**</i>	степен засићености	1
c_{20}	<i>ifctdens</i>	корективни фактор за потпуно засићено тло (двофазни модел)	2
c_{21}	<i>eroslaw</i>	закон ерозије	1 (Hungr)
c_{22}	<i>Keros</i>	параметар ерозије	0.0001
c_{26}	<i>Permlaw</i>	закон филтрације	2 (Anderson)

За улазне параметре за Модел SPH 2, резултати симулације висина, степена приноса материјала и маскималних брзина у фронталном дијелу тецишта су дати редом на сликама 8.10, 8.11., 8.12.



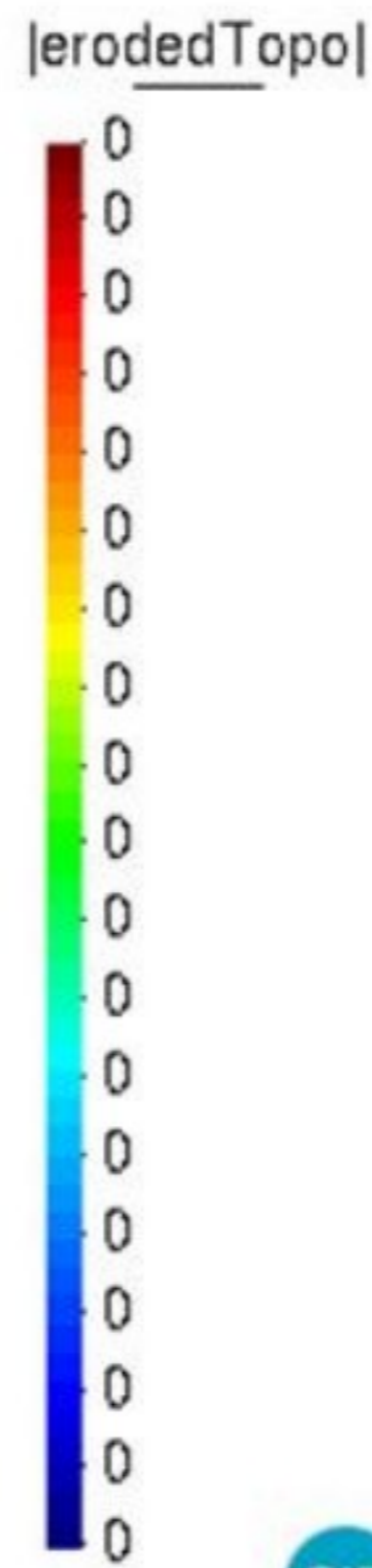
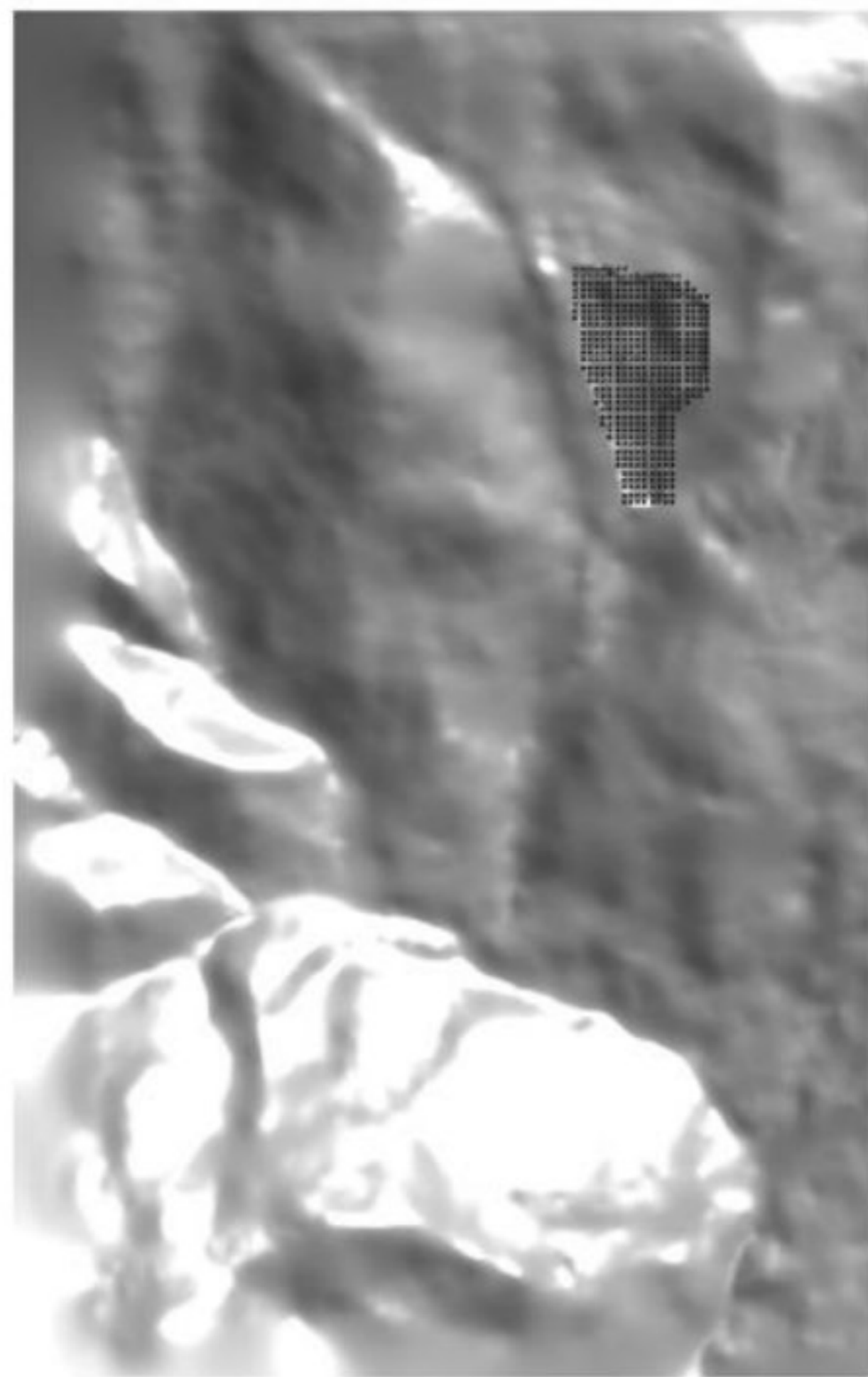
JOINTh, step 24.434
 Contour Fill of jointh, |jointh|.
 Deformation (x1): jointh of JOINTh, step 24.434.



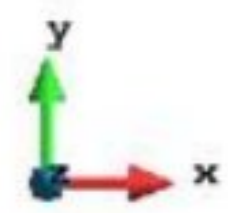
JOINTh, step 50.291
 Contour Fill of jointh, |jointh|.
 Deformation (x1): jointh of JOINTh, step 50.291.

JOINTh, step 98.748
 Contour Fill of jointh, |jointh|.
 Deformation (x1): jointh of JOINTh, step 98.748.

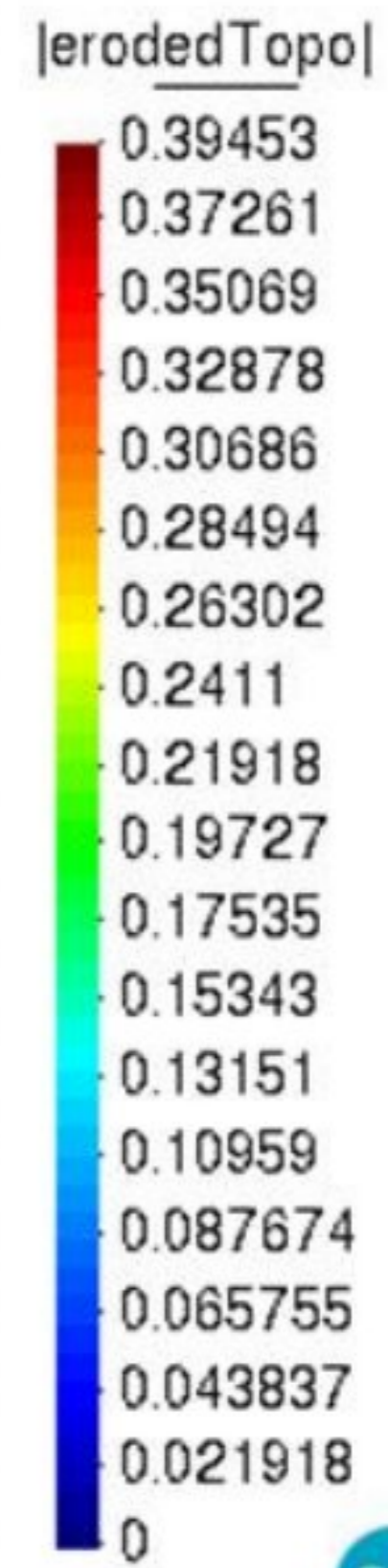
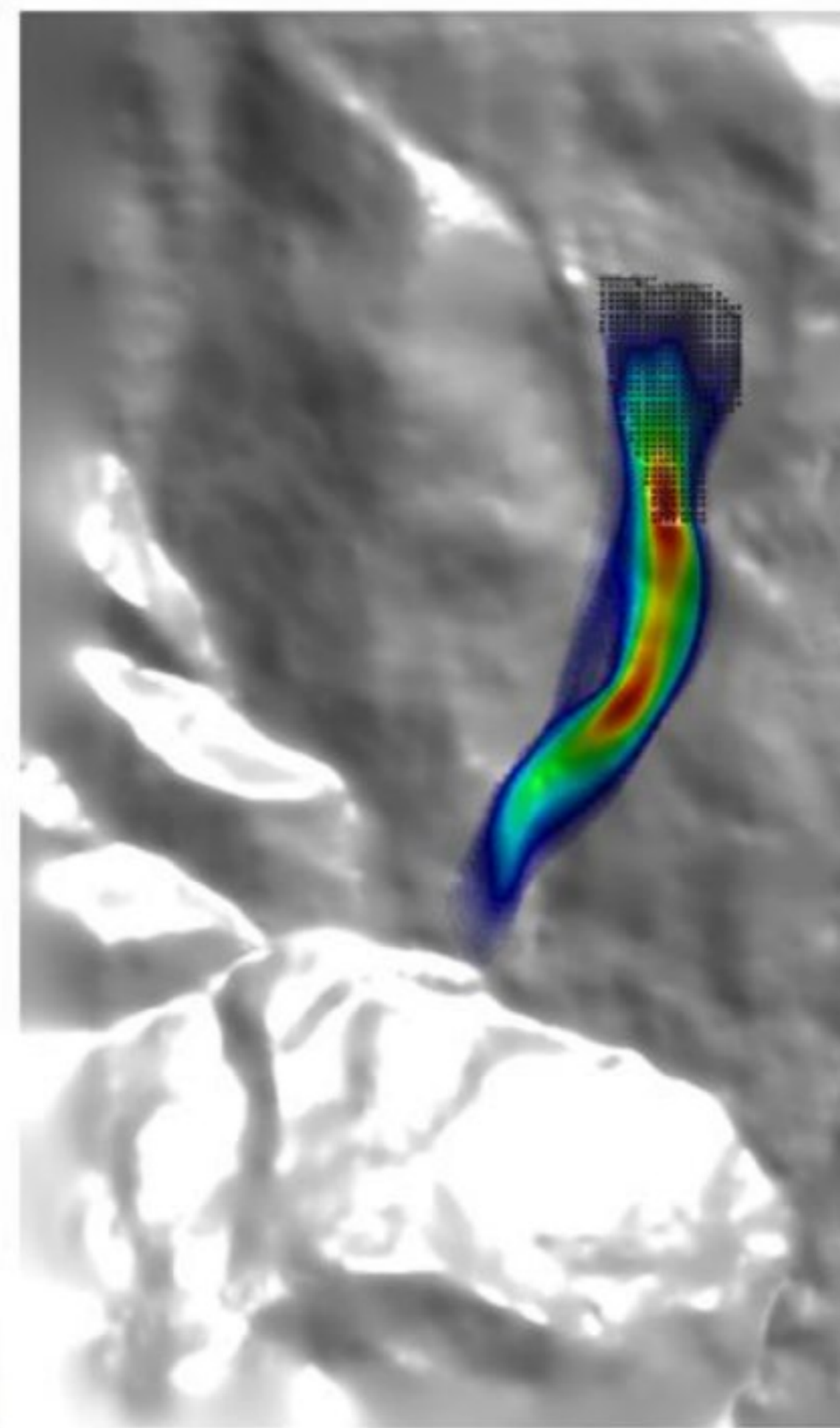
Слика 8.10 SPH2 модел симулације кретања материјала и коначних дубина депоновања



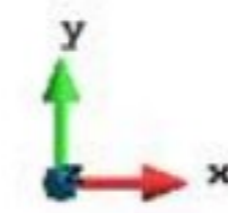
GiD



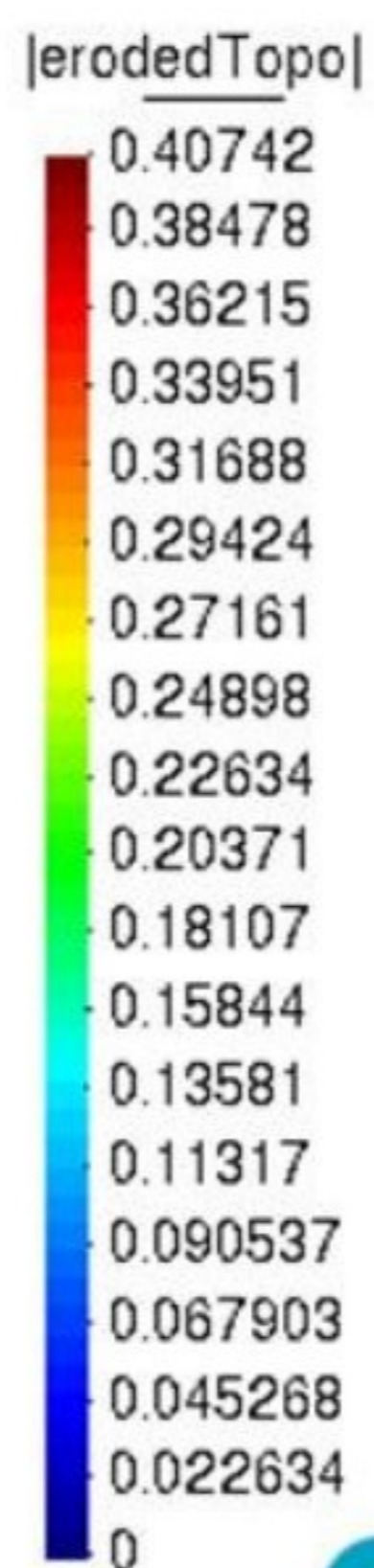
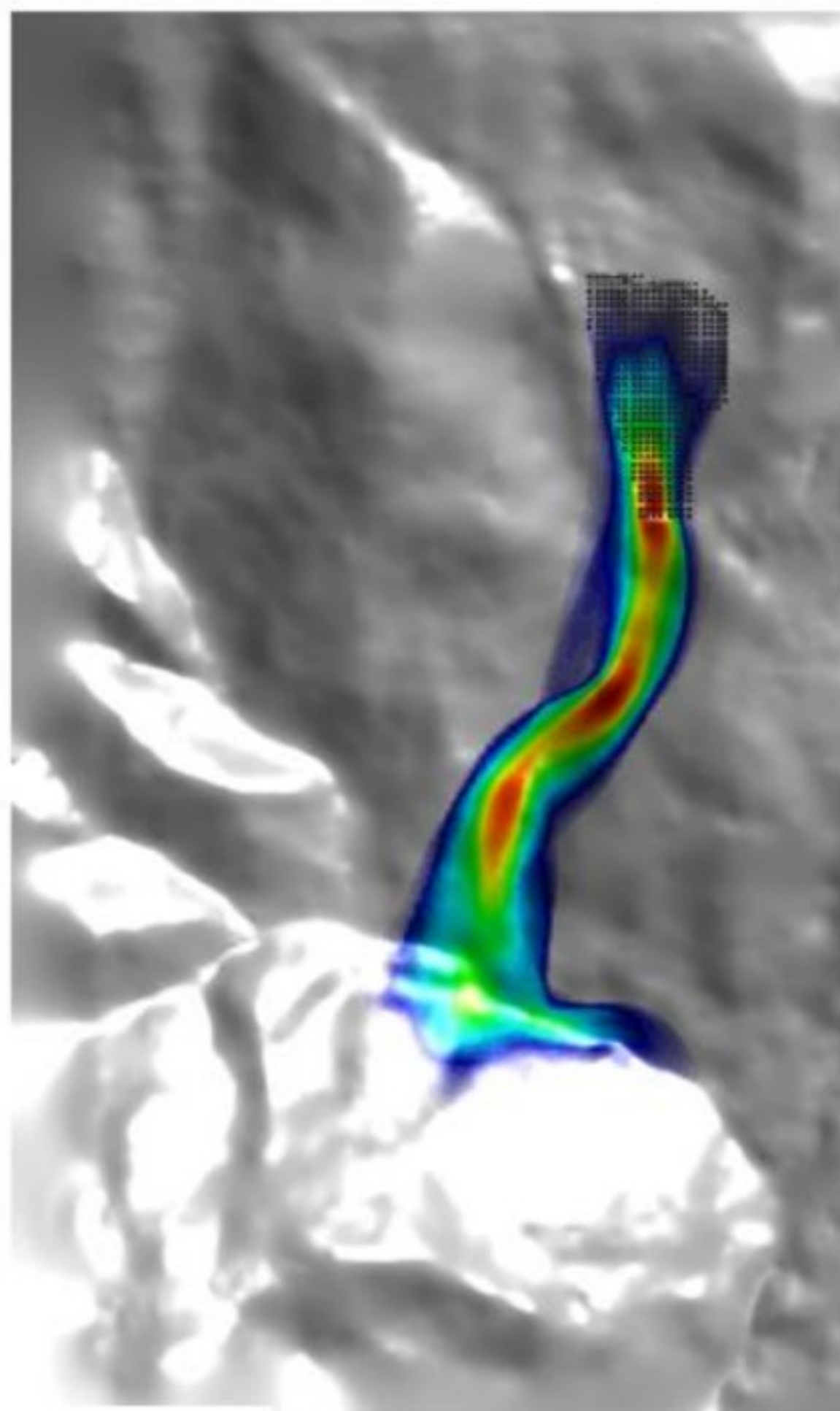
-erodedTopo-, step 0
Contour Fill of erodedTopo, |erodedTopo|.



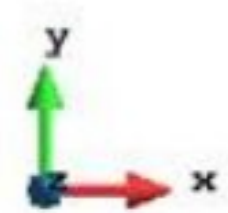
GiD



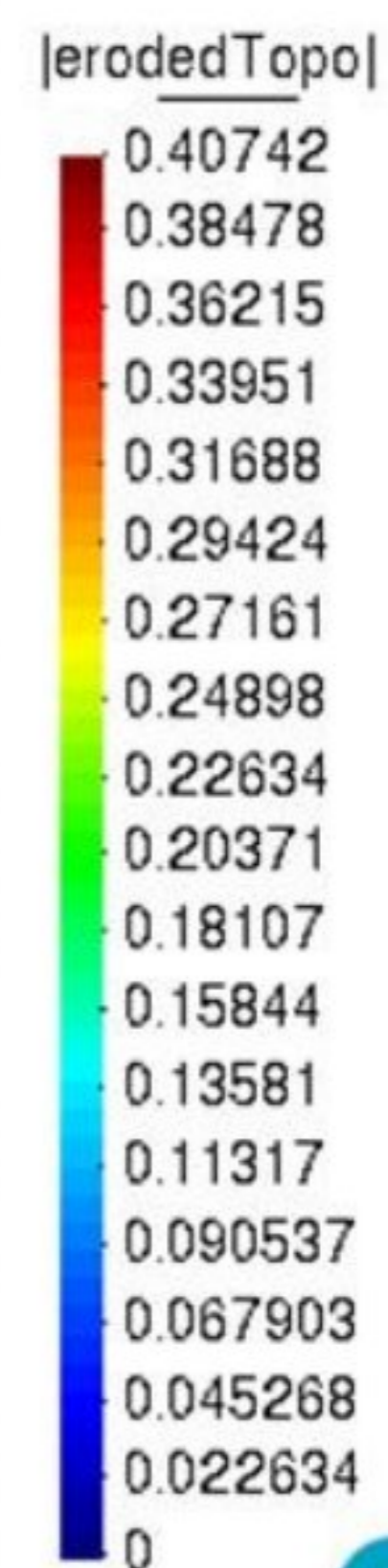
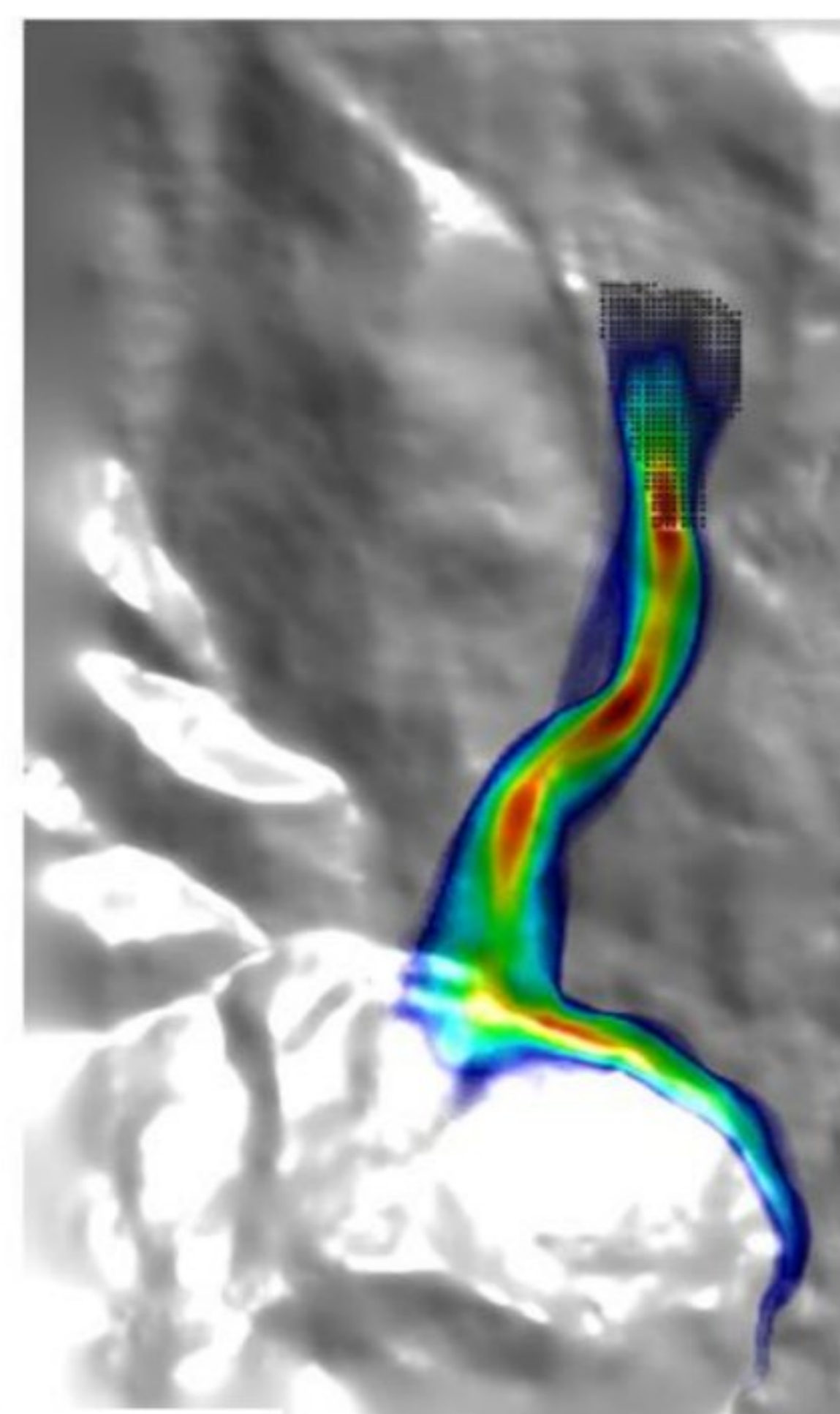
-erodedTopo-, step 24.434
Contour Fill of erodedTopo, |erodedTopo|.



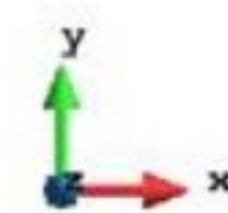
GiD



-erodedTopo-, step 50.291
Contour Fill of erodedTopo, |erodedTopo|.

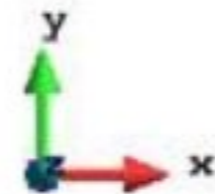
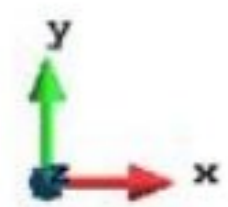
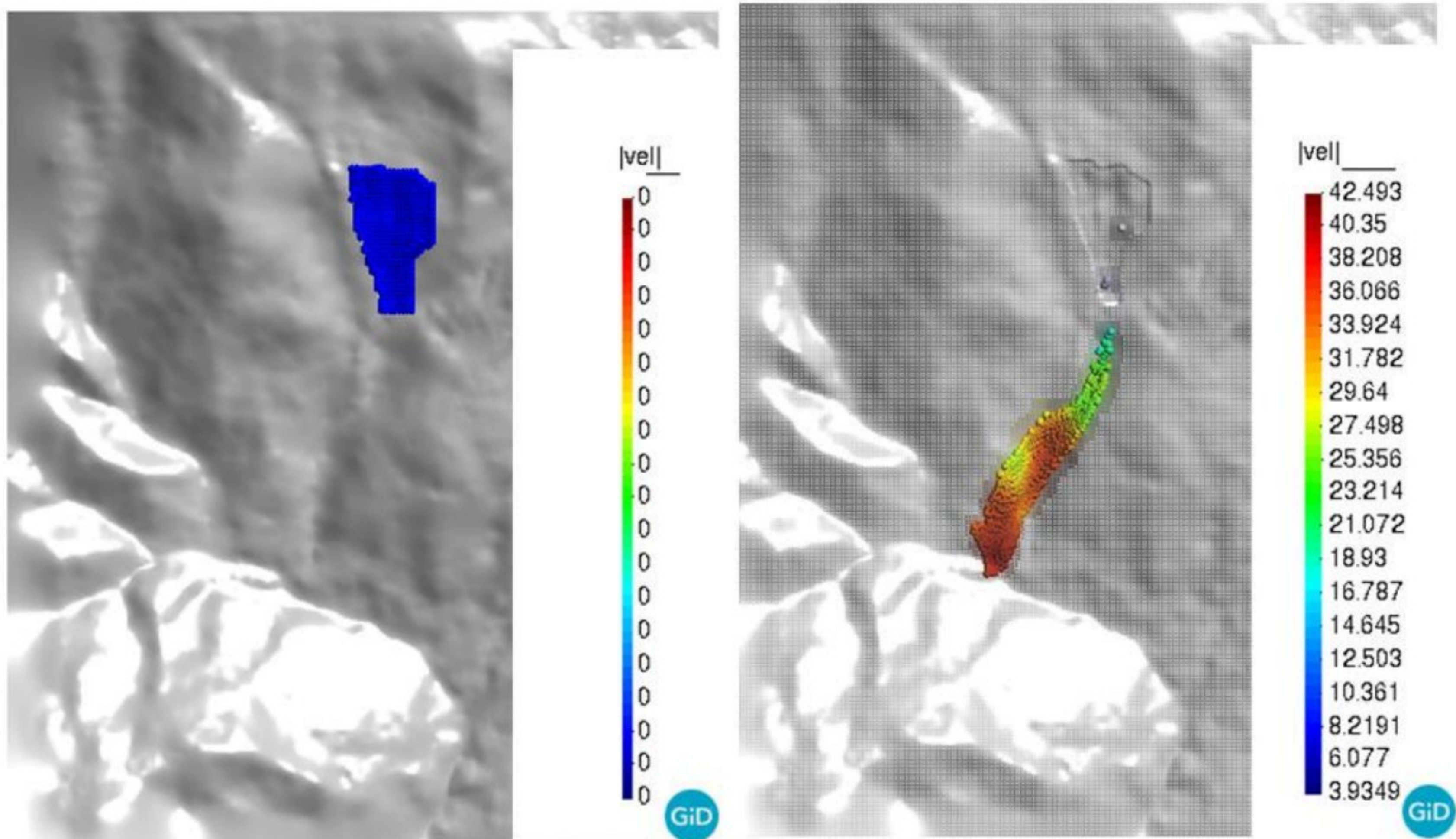


GiD

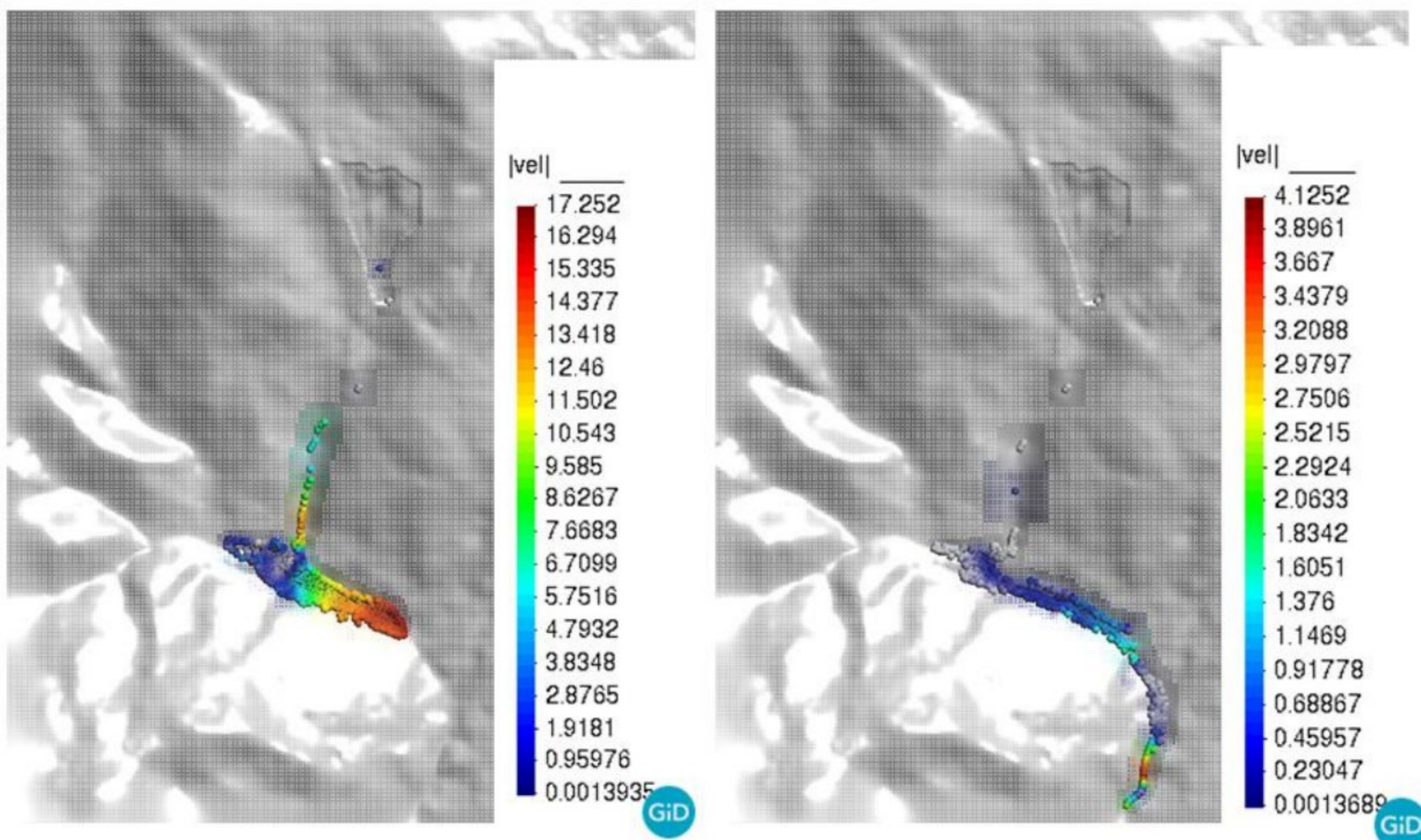


-erodedTopo-, step 98.748
Contour Fill of erodedTopo, |erodedTopo|.

Слика 8.11 SPH₂ модел прорачуна степена приноса материјала er у зони транспорта



veloc, step 24.434
 Contour Fill of vel, |vel|. |vel|
 Deformation (x1): dis of Disp, step 24.434.



veloc, step 50.291
 Contour Fill of vel, |vel|. |vel|
 Deformation (x1): dis of Disp, step 50.291.

veloc, step 98.748
 Contour Fill of vel, |vel|. |vel|
 Deformation (x1): dis of Disp, step 98.748.

Слика 8.12 SPH2 модел прорачуна достигнутих максималних брзина течења

Модел Селанац SPH 3

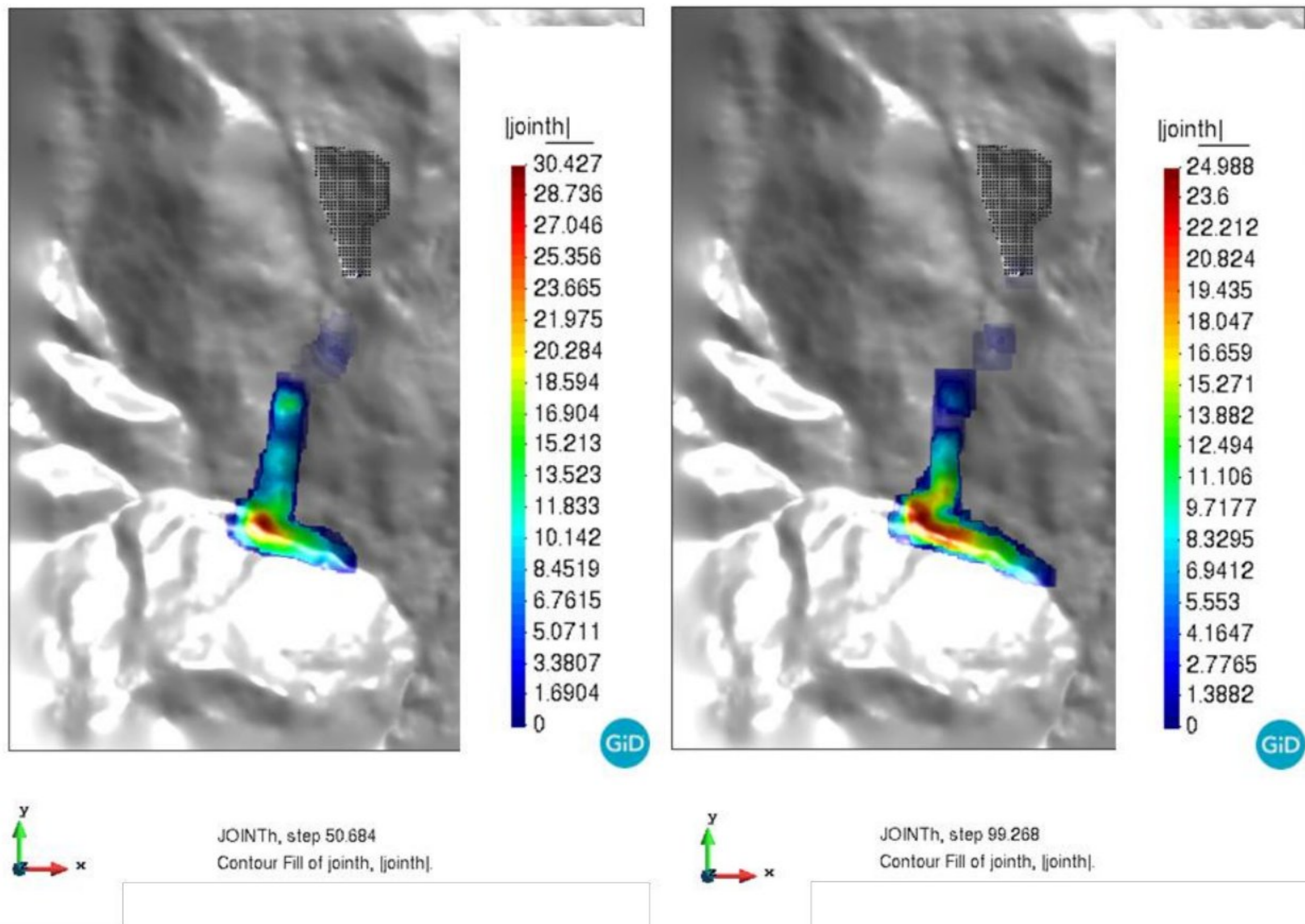
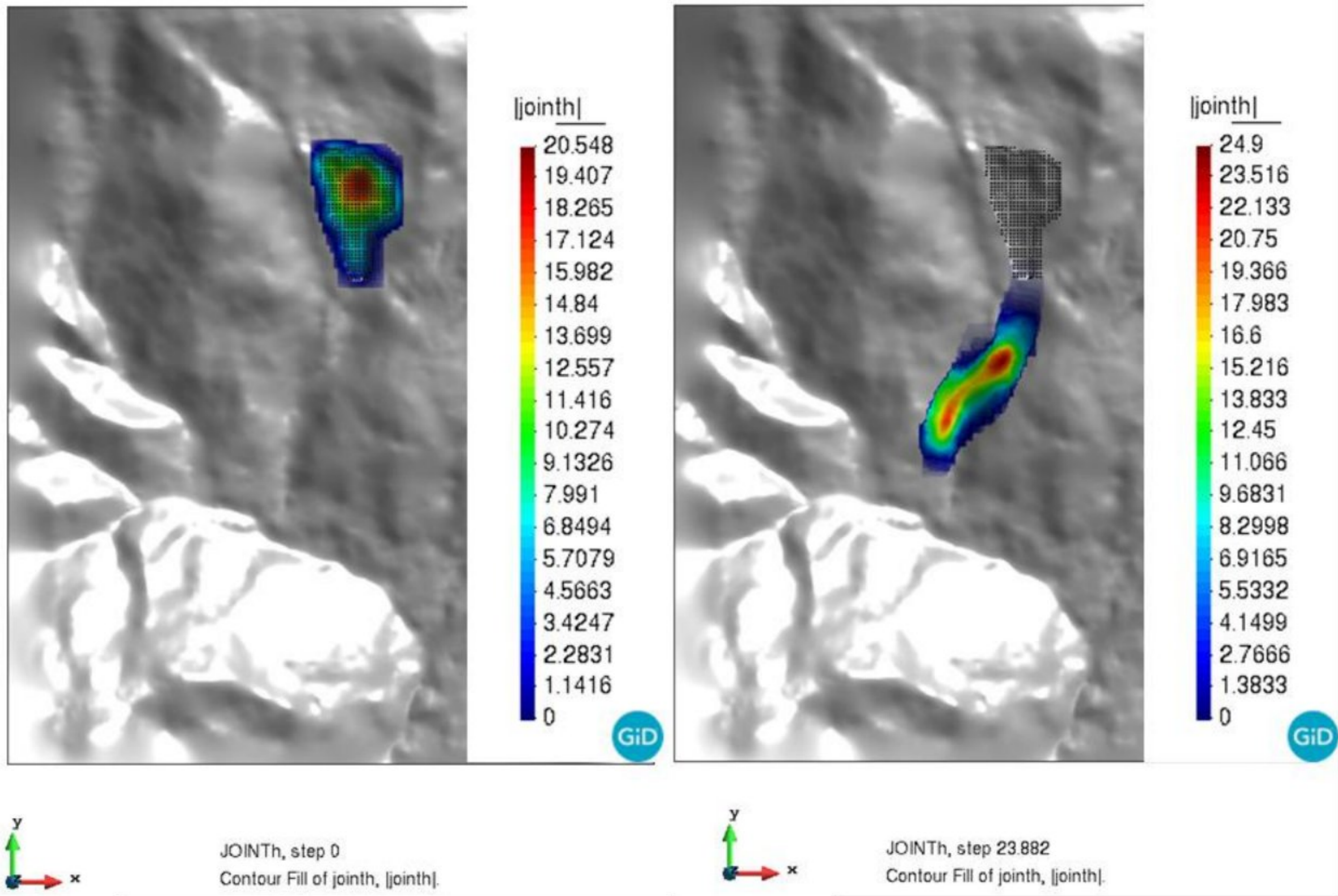
Свеукупно кретање материјала је регистровано као и у RAMMS програму. Поређена је дубина на исти начин у зони депозиције материјала на позицији ERT₅ профила. Коначна запремина материјала предвиђена овим моделом је 492.300 m³ док је иницијални блок имао запремину 447.400 m³, што говори да је количина материјала који је одношен дјеловањем флуида 44.900 m³.

Коришћени улазни параметри дати су у табели 8.4.

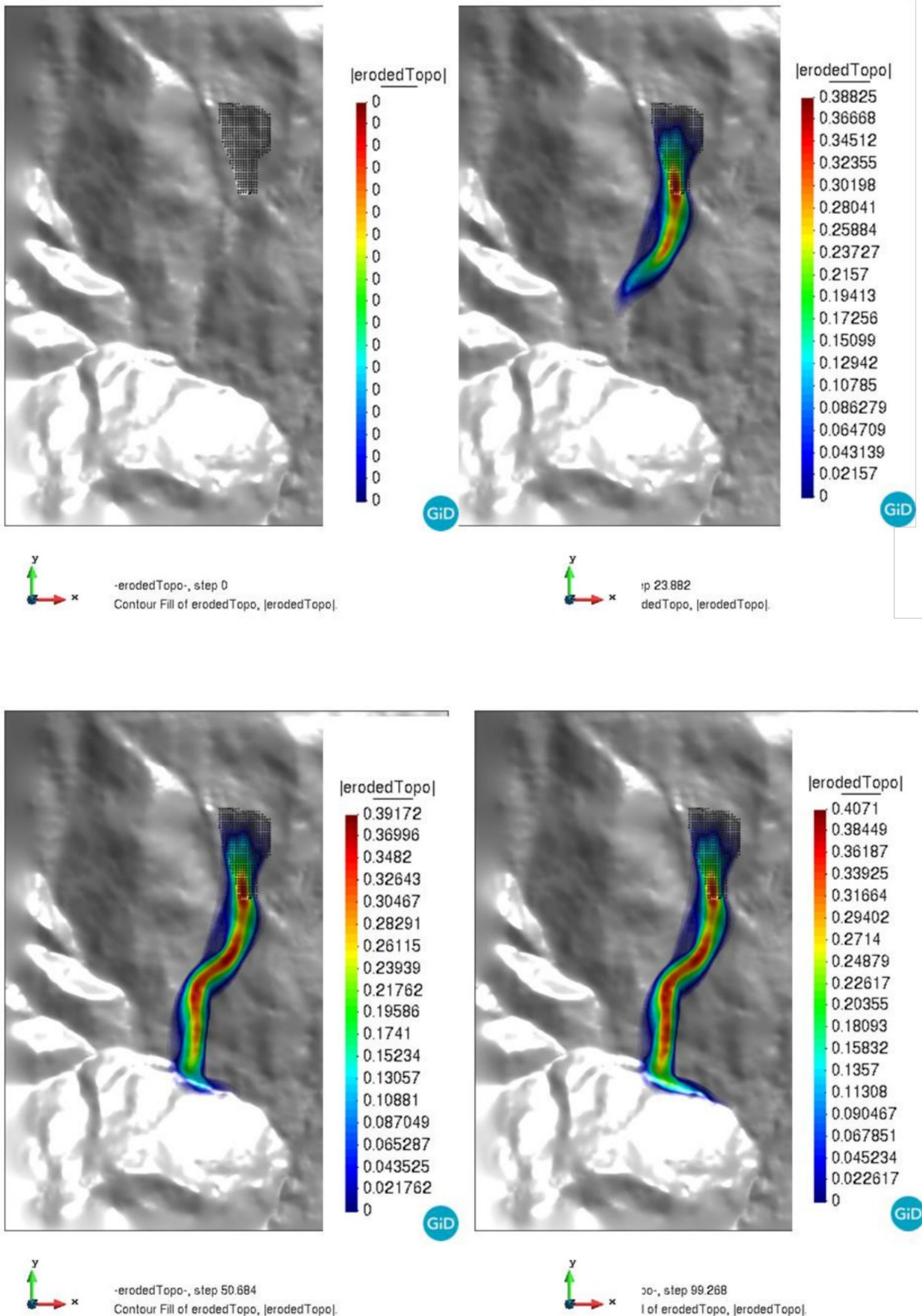
Табела 8.4 Улазни параметри за SPH модел

Број константе	Ознака	Параметер	Усвојене вриједности
c ₁	<i>Cgra</i>	гравитационо убрзање	9.8 m/s ²
c ₂	<i>dens</i>	густина флуида	2000 kg/m ³
c ₅	<i>nfrict</i>	реолошки закон	7
c ₉	<i>tanfi8</i>	фрикциони параметар	0.35
c ₁₀	<i>hfricto</i>	минимална дубина која може бити захваћена флуидом	0.001
c ₁₂	<i>voellmy2phase</i>	турбулентни параметар ξ	500
c ₁₄	<i>hsat</i>	однос дебљине слоја који је потпуно засићен у односу на укупну дубину	1
c ₁₇	<i>denss</i>	густина чврстих честица	2400 kg/m ³
c ₁₈	<i>densw</i>	густина воде	1000 kg/m ³
c ₁₉	<i>Sr**</i>	степен засићености	1
c ₂₀	<i>ifctdens</i>	корективни фактор за потпуно засићено тло (двофазни модел)	2
c ₂₁	<i>eroslaw</i>	закон ерозије	1 (Hungr)
c ₂₂	<i>Keros</i>	параметар ерозије	0.0001
c ₂₆	<i>Permlaw</i>	закон филтрације	2 (Anderson)

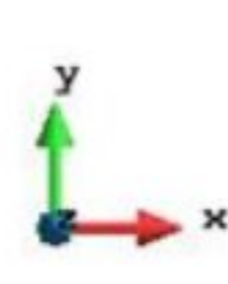
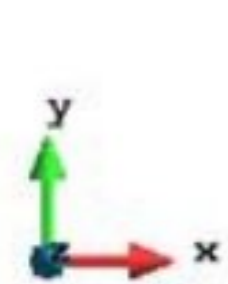
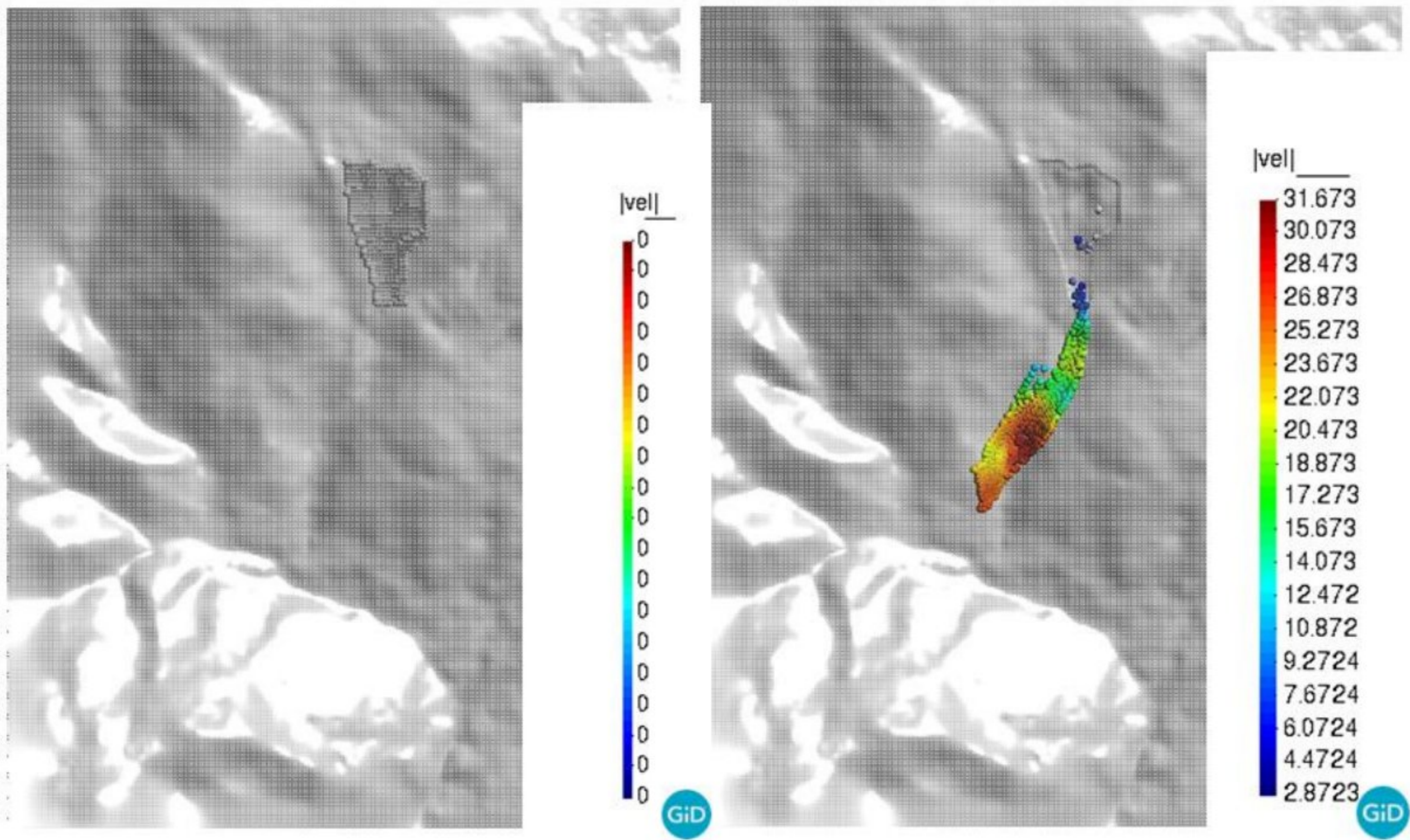
За улазне параметре за Модел SPH 3, резултати симулације висина, степена приноса материјала и максималних брзина у фронталном дијелу тецишта су дати редом на сликама 8.13, 8.14., 8.15.



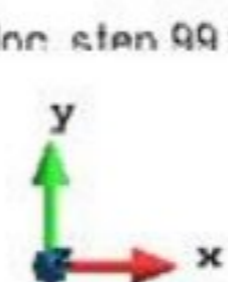
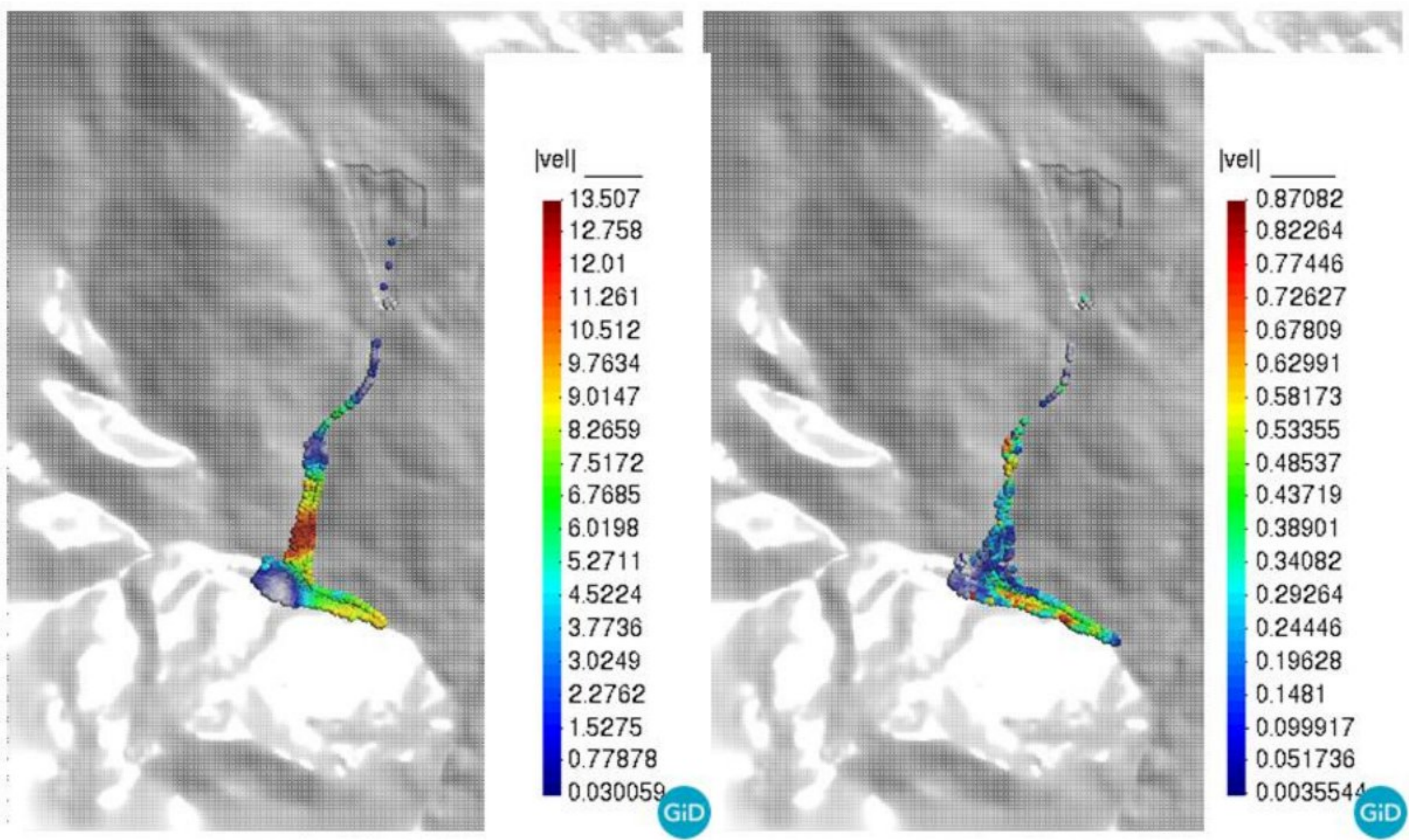
Слика 8.13 SPH3 модел симулације кретања материјала и коначних дубина депоновања



Слика 8.14 SPH3 модел прорачуна степена приноса материјала er у зони транспорта



veloc, step 23882
 Contour Fill of vel, |vel|.
 Deformation (x1): dis of Disp, step 23882.

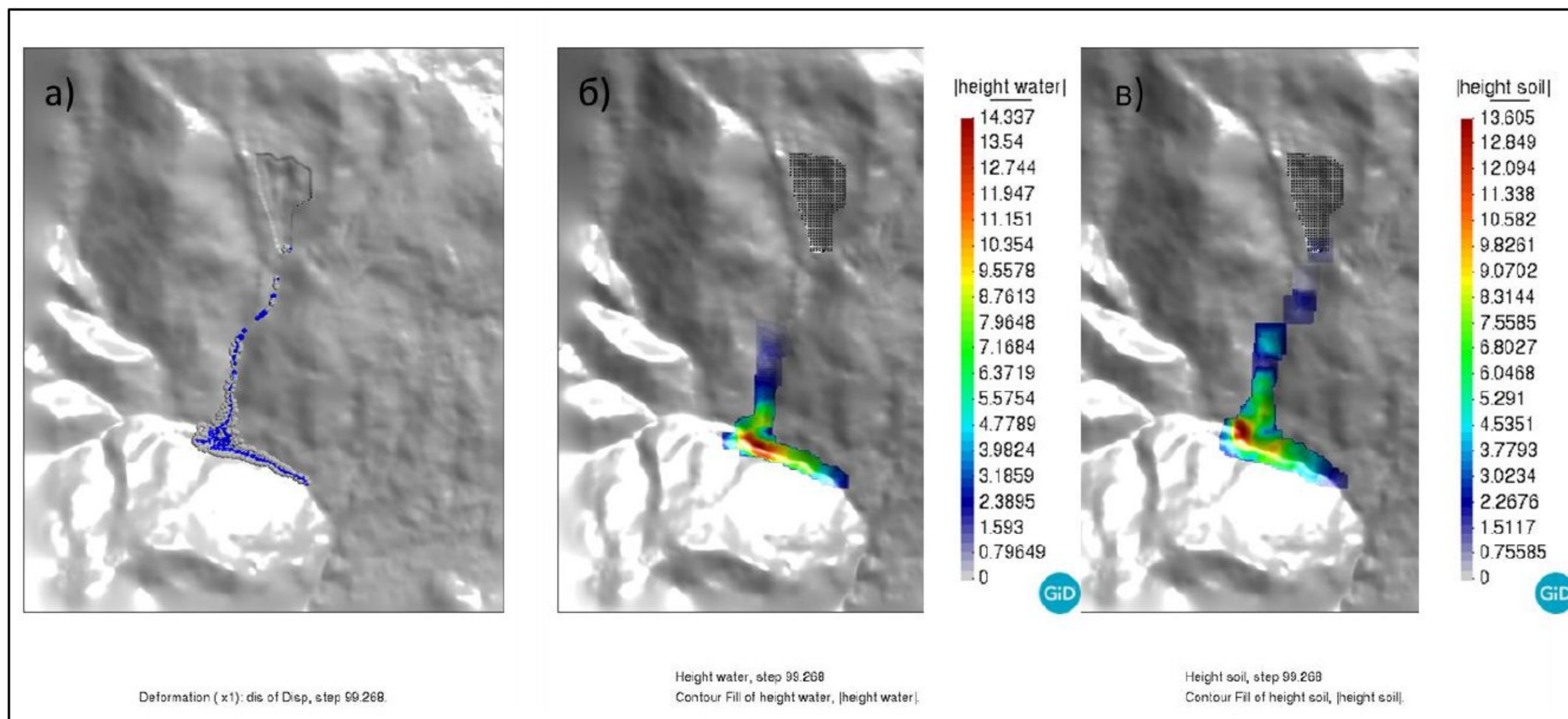


veloc, step 50684
 Contour Fill of vel, |vel|.
 Deformation (x1): dis of Disp, step 50684.

veloc, step 99268
 Contour Fill of vel, |vel|.
 Deformation (x1): dis of Disp, step 99268.

Слика 8.15 SPH3 модел прорачуна достигнутих максималних брзина течења

Поред финалних модела дубине депозиције, SPH моделује сваку од фаза тиме дајући као крајњи резултат помјерање флуидних и чврстих честица и висину чврсте и течне фазе. Финални модел помјерања и висина дат је на Слици 8.16.

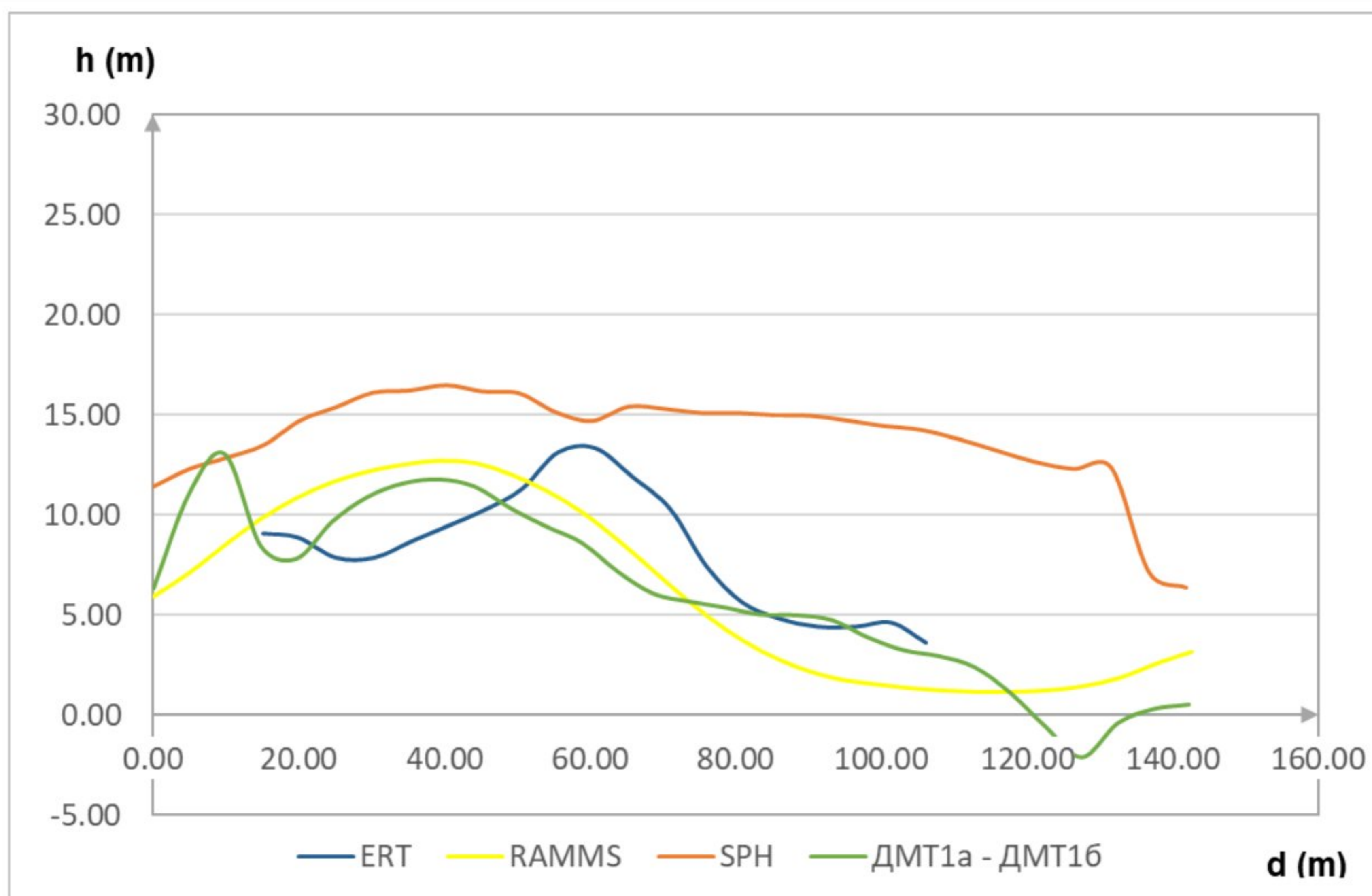


Слика 8.16 Модел SPH3 а) према параметру помјерања фаза б) висина флуидне фазе в) висина чврсте фазе

За разлику од једнофазног модела добијеног у RAMMS програму, финални модел добијен SPH моделовањем даје бољу прогнозу заустављања материјала у зони депозиције. Моделоване вриједности висина су веће од процијењених теренским истраживањима, што се односи на велику количину воде која је процијењена у зони депозиције овим моделом.

8.1.2 Поређење теренских и нумеричких истраживања

На приложеним моделима, види се да је доминантан утицај трења на понашање течења материјала, док је турбулентни параметар имао мање утицаја. На примјеру овог тецишта урађено је више симулација, калибрисањем вриједности μ од 0.05 до 0.45, и ξ од 100 до 1000 m/s^2 . Модел III RAMMS и Модел SPH 3 су узети као најрепрезентативнији за валидацију. Валидација је урађена у поређењу по једном пресјеку, који одговара положају ERT₅ профила у зони депозиције, као и разлика у ДМТ висинама. Коначно поређење по позицији профила ERT₅, приказан је на слици 8.17.



Слика 8.17 Упоредни приказ коначних дубина материјала на мјесту пресека ERT₅

На пресеку се види различите дебљине по позицији пресека ERT₅. За пресјек ERT₅ дебљина је приказана у односу на доњу површ, тј. дубину канала предиктовану геофизичким истраживањима (Слика 6.12). За моделе добијене RAMMS и SPH дебљина је дефинисана на основу улазне површи ДМТ-а (Слика 6.6). Сви модели предвиђају већи нанос материјала у десном боку депозиције тецишта, у односу на пресјек ERT₅, док SPH модел предиктује веће дебљине у цијелој зони, али је модел репрезентативнији у смислу да је највећи дио материјала депонован у зони депозиције, док RAMMS модел предиктује велику количину материјала који је отекао (*overflow material*), што се види на финалном моделу (Слика 8.5 в)), гдје је количина материјала који је отекао знатно већа од депонованог материјала.

8.2 МОДЕЛОВАЊЕ ТЕЦИШТА ЛЕВА РЕКА

Као што је већ наведено претходно, моделовање је рађено помоћу два различита нумеричка приступа у програмима RAMMS DBF и SPH Geoflow. Модели у RAMMS DBF су рађени у више етапа истраживања, у зависности од доступности геодетских подлога терена, са различитим улазним параметрима. Приказани су резултати два модела терена, од којих су за последњи приказани и резултати промјене максималних брзина течења. За SPH Geoflow коришћен је ДМТ 2б 5x5 m, дат је приказ 3 модела како би се видјела разлика коришћењем различитих калибрисаних параметара.

8.2.1 Моделовање у RAMMS DBF програму

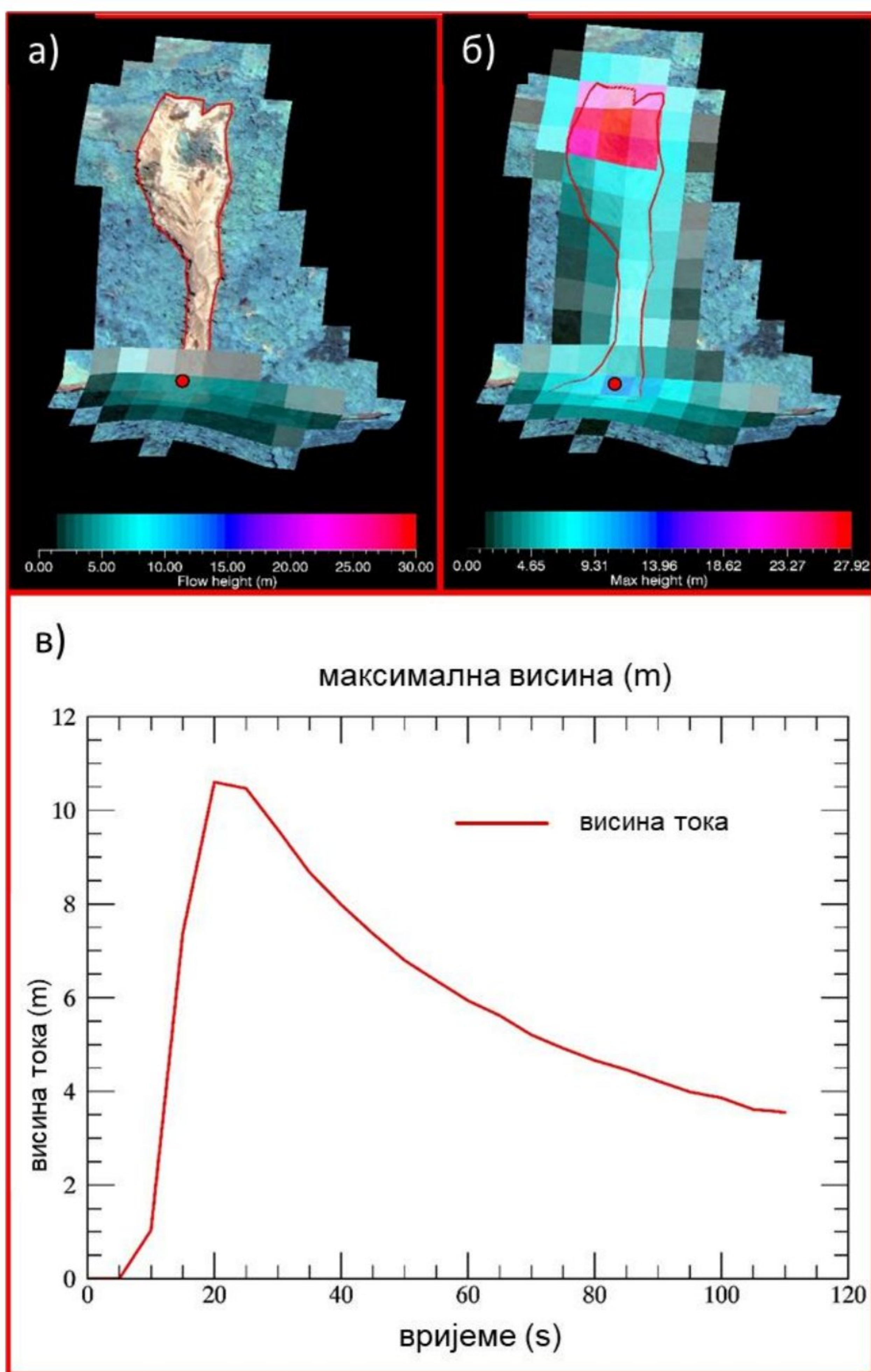
Модел I

Као и у случају тецишта Селанац, прелиминарни резултати рађени су на моделима терена резолуције 30x30 m, а каснијим детаљнијим дефинисањем иницијалне зоне уз помоћ фотограметријског снимања, односно, поређењем снимака двије епохе, прецизније је дефинисан иницијални блок, као и боља резолуција модела терена након покретања.

Као што је већ детаљно описано у Поглављу 5, у RAMMS DBF програму првенствено се дефинишу нестабилне иницијалне зоне тецишта. У случају Леке реке, активиран је један иницијални блок тј. дефинисана је једна иницијална зона, максималне дубине до 14 m. Први резултати добијени су на ДМТ 30 m резолуције.

Калибрација параметара отпорности је рађена повратном анализом, мијењањем једног од параметара док су остали параметри остајали непромијењени. Тестирана је и дубина иницијалне зоне 2 до 3 пута, на 10, 15, 20 m. Ранг вриједности за основне параметре је мијењан на основу неких литературних вриједности за течење дробине (Sosio, 2008, Christen. et al, 2010). Тестиране су и вриједности преко 0.2 за μ и преко 500 m/s² за турбулентни параметар ξ . Добијене најпрецизније вриједности за коефицијент трења је 0.35, док је за турбулентни параметар бољу предикцију дале веће вриједности. Висина иницијалног блока је постављена на 30 m, као најдубљи дио тецишта Мање вриједности турбулентног параметра не дају толико прецизне податке о дубини у зони депозиције. Претпоставља се да је након активације висина природне бране била и преко 10 m, да би након неког времена доста материјала било и однешено.

Тачност овог првог модела је тестирана на основу површинског отицаја, дубине у зони депозиције, запремине у зони тложења посматране на терену, и поређењем ДМТ двије епохе. Сви калибрисани модели су дали веће зоне тложења, такође у дијелу гдје се десило зајезеравање. Доста материјала је однешено даље ријеком, али је моделовање дефинисано у границама течења. Разлог оваквих великих разлика је слаба резолуција ДМТ-а. Модел је приказан на слици 8.20. гдје се виде финалне дубине у зони депозиције на слици 8.18 а), максимална висина тока слици 8.18 б) са приказом графика у једној тачки и промјене висине тока са временом слици 8.18 в).



Слика 8.18 Прелиминарни модел са приказом а) финалних дубина б) максималних висина тока в) промјене висине тока у тачки (Крушић, et al. (2017))

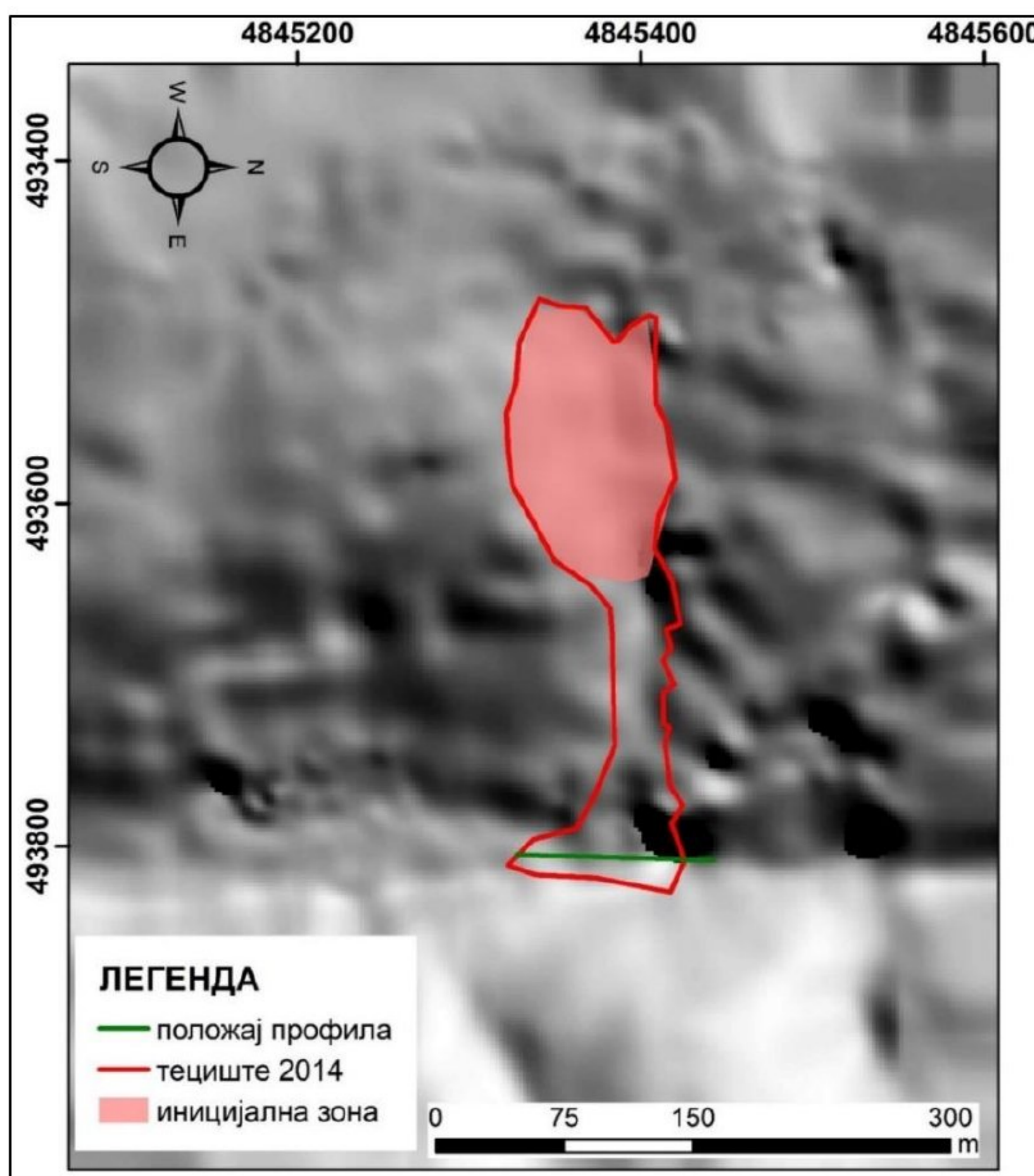
Запремина иницијалног блока је прилично велика, много већа од реалне што се види у моделима који су касније рађени на прецизнијим подлогама. Као што се види на слици, процијењена дубина иницијалног блока је била 30 m, што је много већа вриједност од реалне добијене поређењем снимака (Слика 6.19). Због тога су и коначне запремине добијене овом симулацијом нерелане, али је коначна висина тока прилично тачна у поређењу са реланом ситуацијом. Грешка која се јавља приликом коришћења велике резолуције улазних података терена, овдје није била велика као у случају тецишта Селанац када је процијењена дубина била јако мала. Модел је дао добре предикције у просторној дистрибуцији и понашању материјала, али је непоуздан у запреминским вриједностима. Резултати тестираних симулација приказани су у Табели 8.5.

Табела 8.5 Резултати калибрисања различитих параметара (Krušić, et al. (2017))

Улазни параметри				Резултати			
симулација	μ	ξ (m/s)	Запремина иницијалног блока (m ³)	Максимална висина тока (m)	Максимална брзина (m/s)	Максимална висина таложења (m)	Запремина депонованог материјала (m ³)
1	0.35	200	256470	27.9	16.64	7.14	61513.9
2	0.35	500		27.9	19.63	9.24	71254.8
3	0.35	1000		27.9	22.40	10.67	74371.7

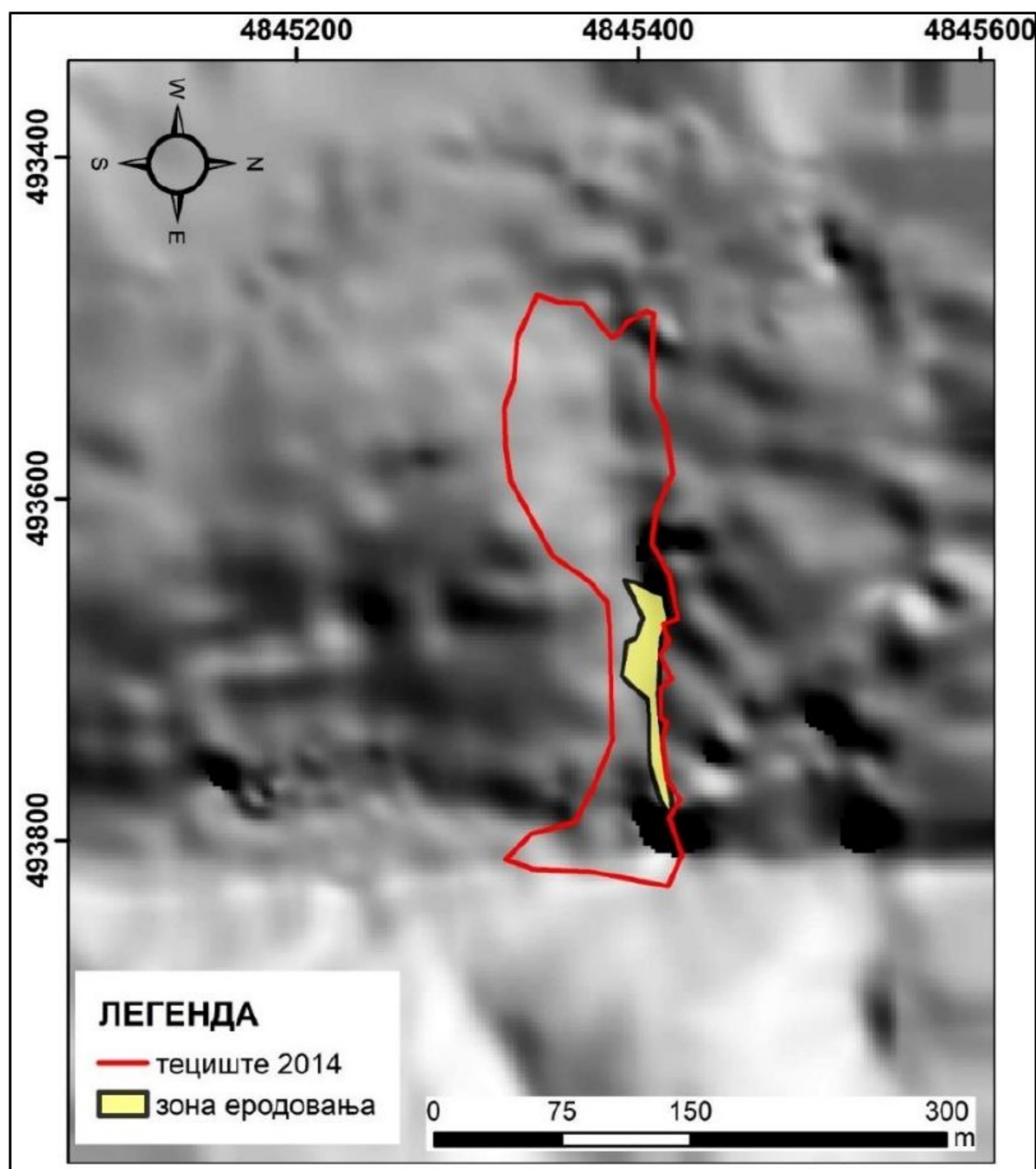
Модел II

За тециште Лева река урађен је нови модел са бољом улазном подлогом – ДМТ5x5 m. Такође узет је у обзир утицај ерозије која у прелиминарном моделу није прорачуната. Процјењена максимална дубина ерозије је 6 m. Финални модел је показао много веће вриједности дубине у зони таложења матријала, него модел који није укључивао утицај ерозије. Такође тестиране су и неке друге опције потенцијала еродибилности (0,2 m/kPa) које су резултирале прецјењивањем дубине таложења (скоро 20 m), што је много више од реалне ситуације. Границе улазног иницијалног блока са положајем попречног пресека који је касније коришћен за валидацију, приказане су на Слици 8.19.



Слика 8.19 Иницијална зона тецишта за позицијом попречног профила коришћеног за валидацију података

Следећи корак је дефинисање зоне која је еродована. Ова зона је издвојена на основу осматрања на терену и поређења разлике у ДМТ прије и после догађаја (Слика 6.19). На слици 8.20 види се издвојена критична зона у зони транспорта.

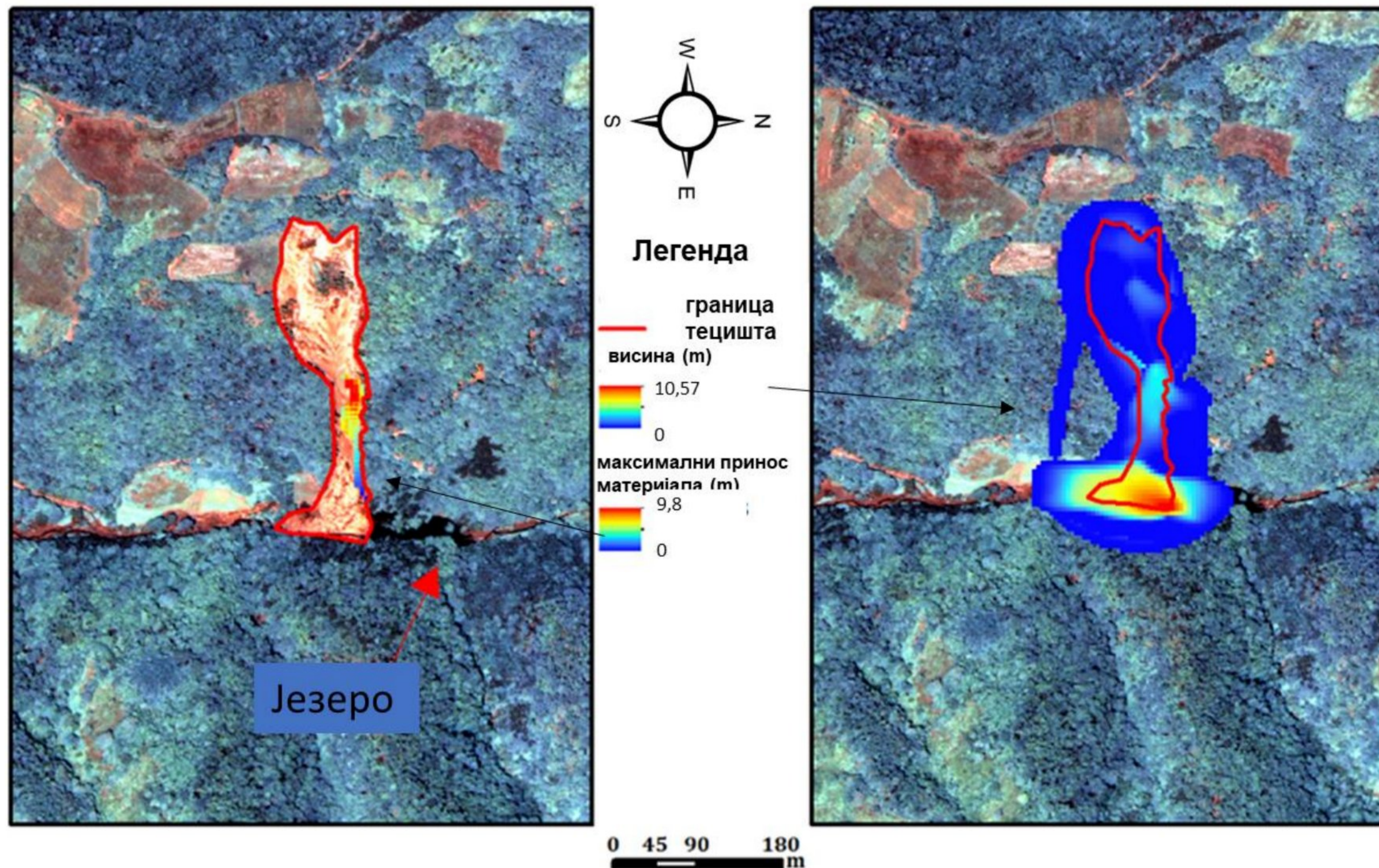


Слика 8.20 Издвојена зона одношења материјала у зони транспорта

У Табели 8.6 приказани су резултати који су усвојени, као и прорачунати резултати запремине еродованог материјала, док се на слици 8.21 може видјети финални модел ерозије и коначних дубина у зони депозиције.

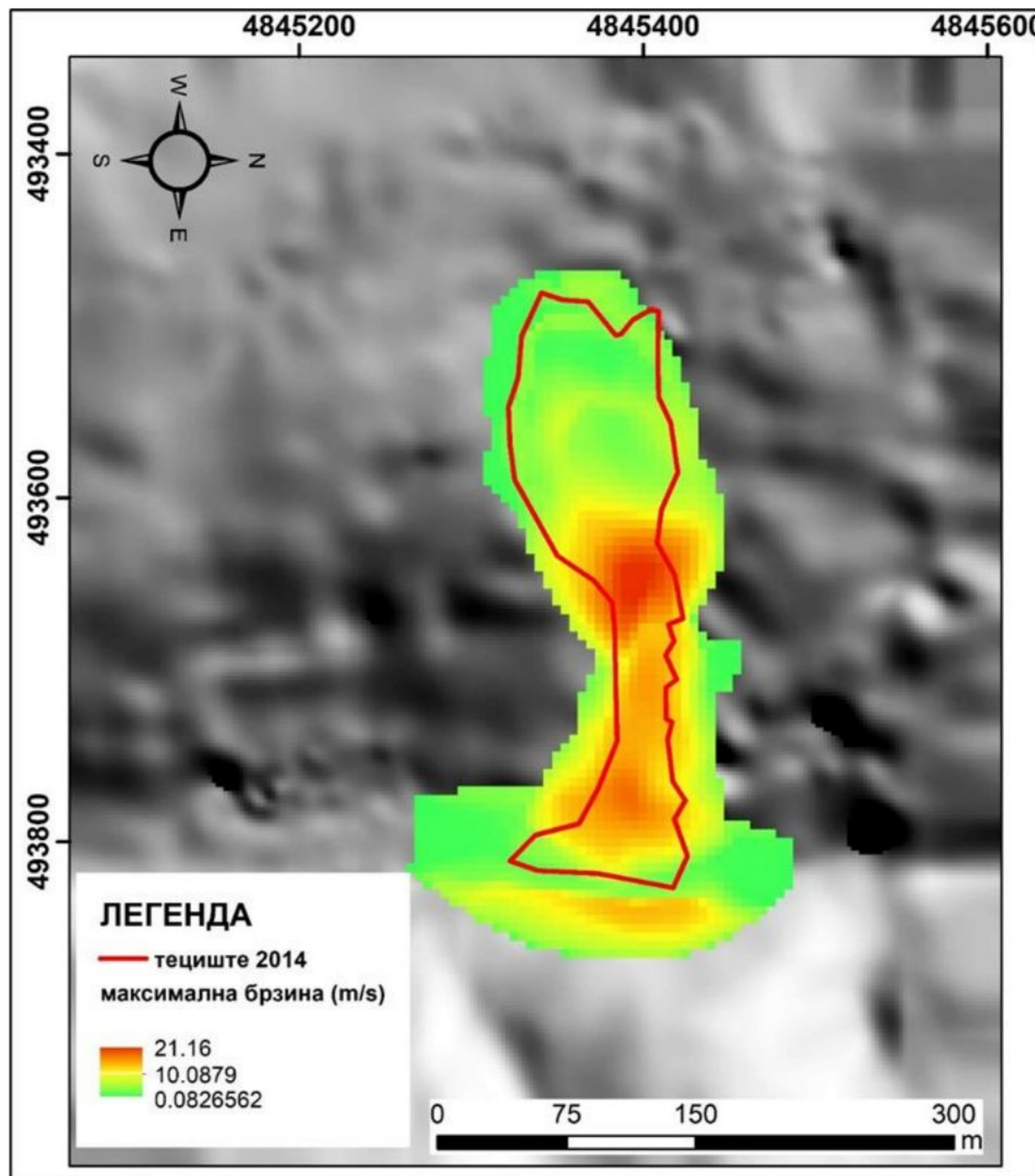
Табела 8.6 Најподеснији параметри у Моделу 2 са валидацијом (Krušič et. al., 2018)

Тециште	Реологија (Voellmy) $\mu, \xi(\text{ms}^{-2})$	Запремина иницијалног блока (m^3)	Еродована количина материјала (m^3)
Лева река	0.35, 1000	68663.15	6584.44



Слика 8.21 Модел финалних дубина тецишта Лева река на прецизнијем моделу терена са прорачуном приноса материјала (Крушић et. al., 2018)

Поред тога, прорачуната је максимална брзина у фронталном дијелу тецишта. Симулацијом се добијају вриједности до ~ 21 m/s (Слика 8.22).

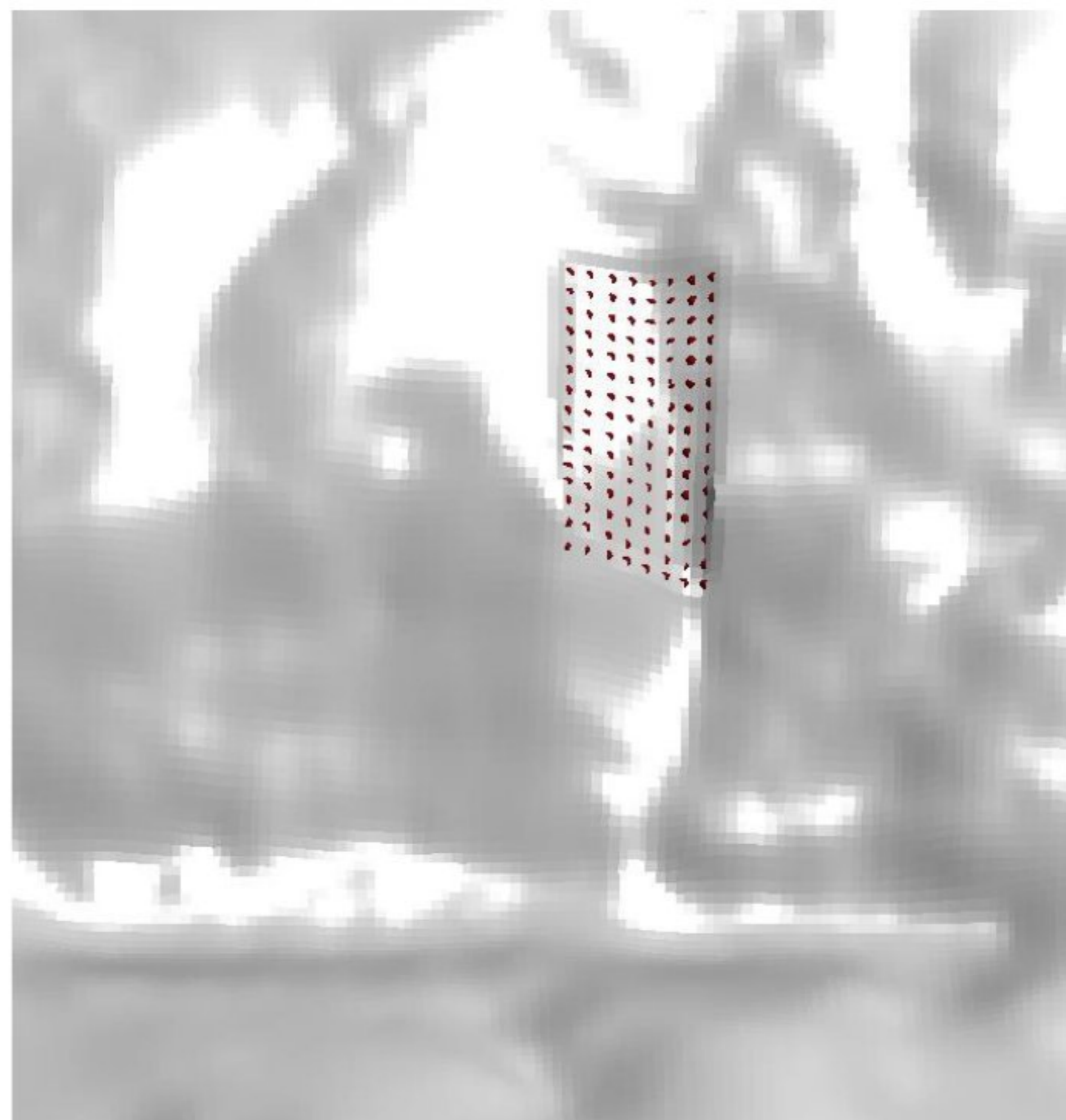


Слика 8.22 Модел максималних брзина течења тецишта Лева река

8.2.2 Моделовање у SPH Geoflow програму

ДМТ 5x5 m резолуције је коришћен као улазни топографски фајл са 15544 тачке. Иницијални блок је добијен као и код RAMMS софтвера из поређења двије епохе високо прецизног ДМТ-а. Претходно је 5x5 m растер ДМТ преведен у тачке (Слика 8.23), затим у .pts документ који одговара коду. Запремина покренутог материјала је износила 63553,01 m³.

На примјеру наредна три модела дати су резултати калибрације различитих параметара. Број тестираних симулација је био знатно већи у распону од 0.1–0.4 за фрикциони параметар и од 100 до 1000 m/s² за турбулентни параметар.



Слика 8.23 Дефинисање иницијалне нестабилне зоне у SPH коду

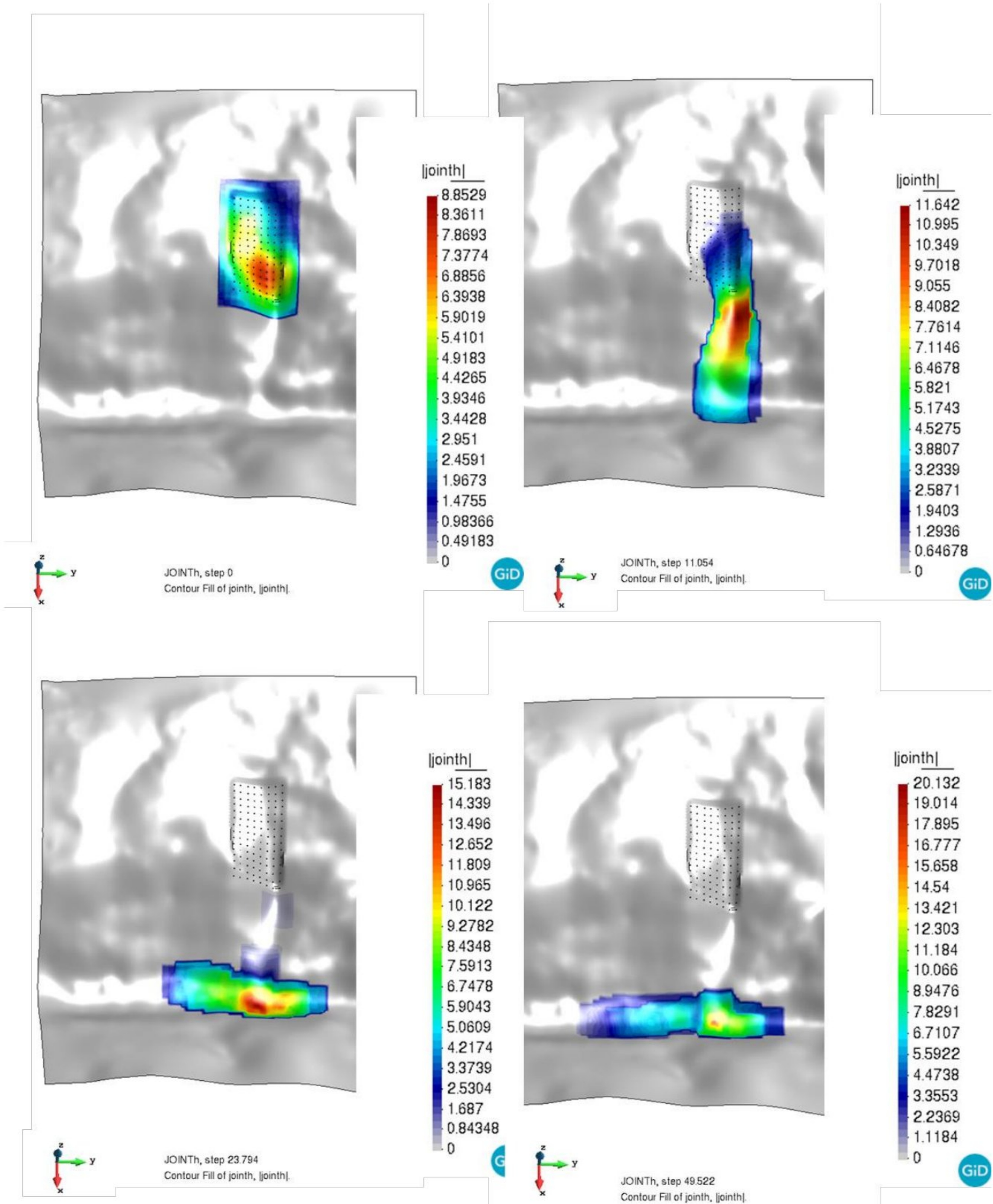
Модел Лева река SPH 1

За улазне параметре за Модел Лева река SPH1 резултати симулације висина, степена приноса материјала и максималних брзина у фронталном дијелу тецишта су дати редом на сликама 8.24, 8.25., 8.26.

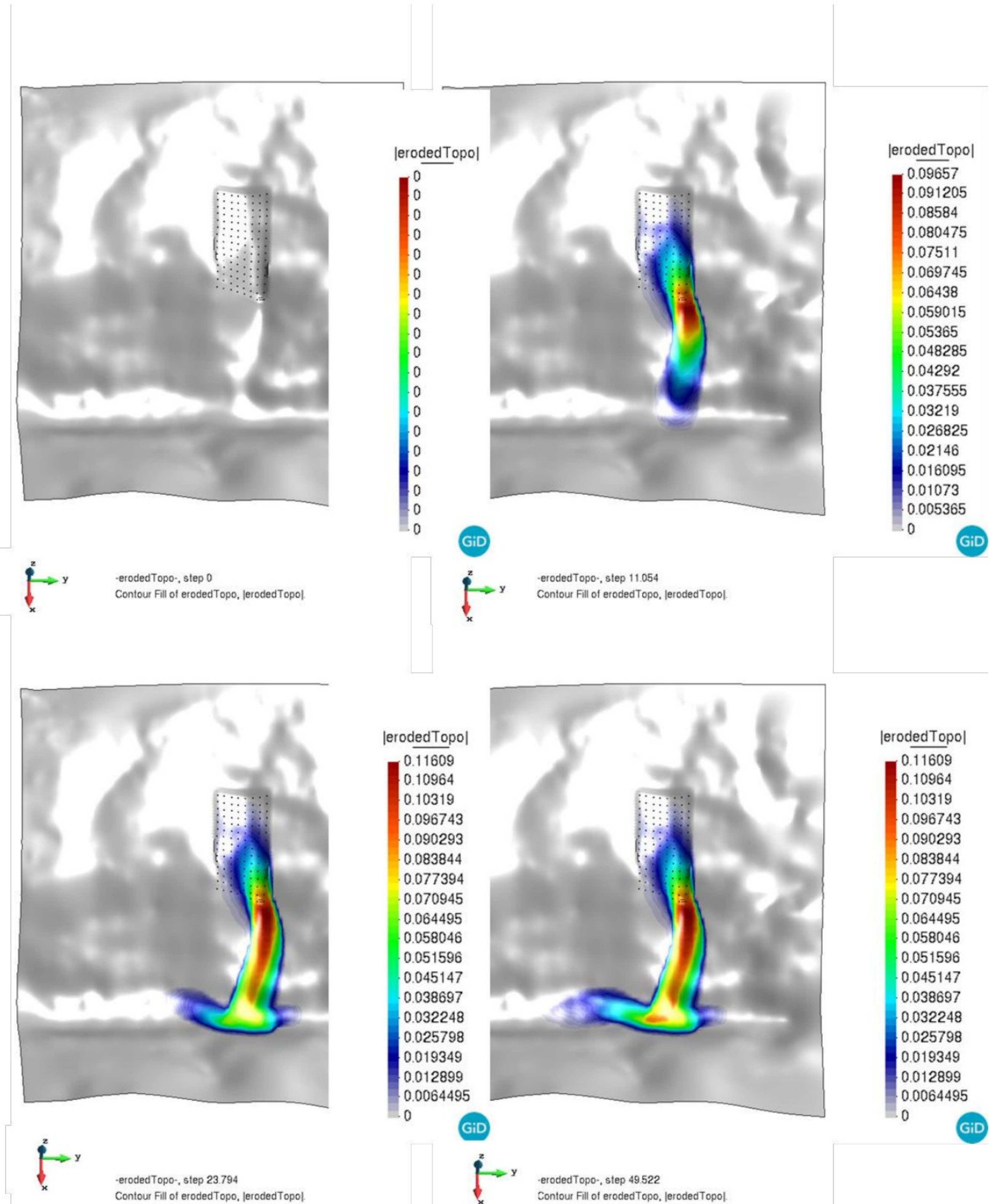
Усвојени су почетни параметри за густину, степен засићености, ерозијски закон који је коришћен је *Hungr* модел. Како би поређење међу моделима било могуће, као и у случају RAMMS софтвера коришћен је *Voellmy* реолошки закон, те су калибрисани параметри фрикције и трубуленције. У првој и другој колони у Табели 8.7 дат је број константе и ознака у улазним фајловима са објашњењем шта означава сваки од параметара.

Табела 8.7 Улазни параметри за Лева река SPH1 модел

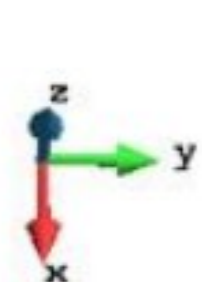
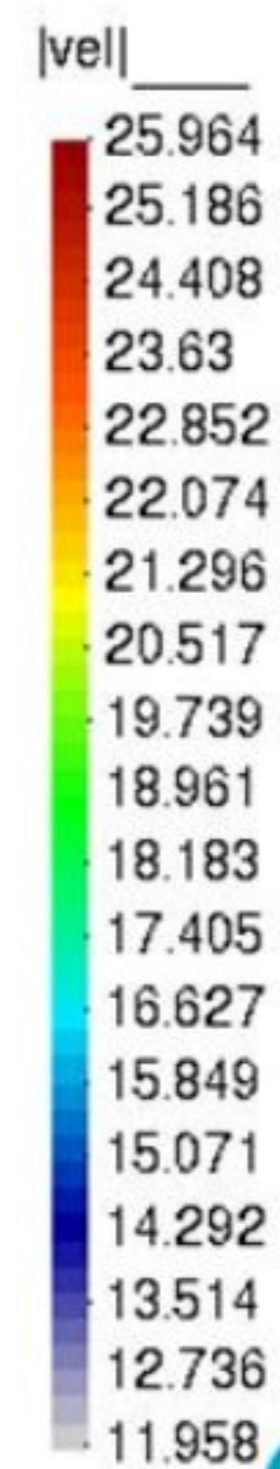
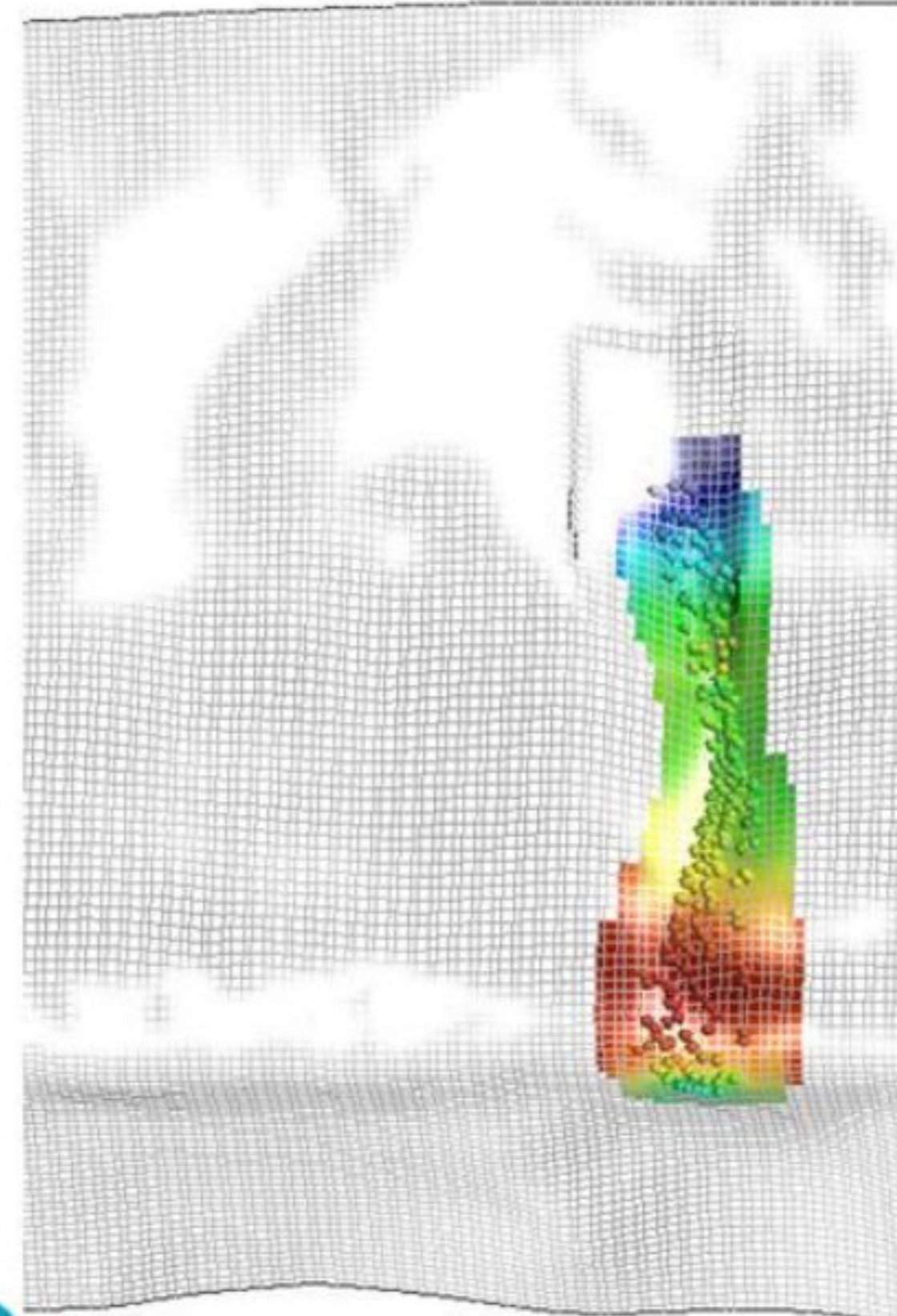
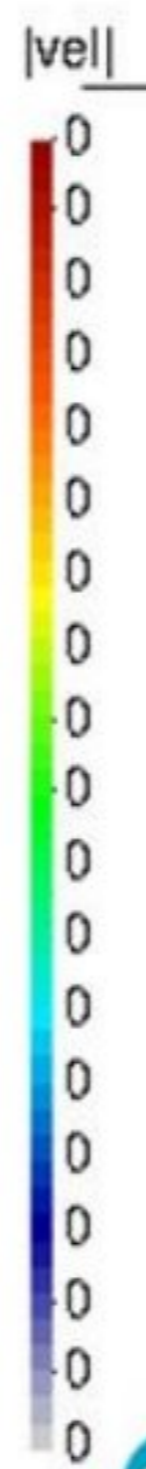
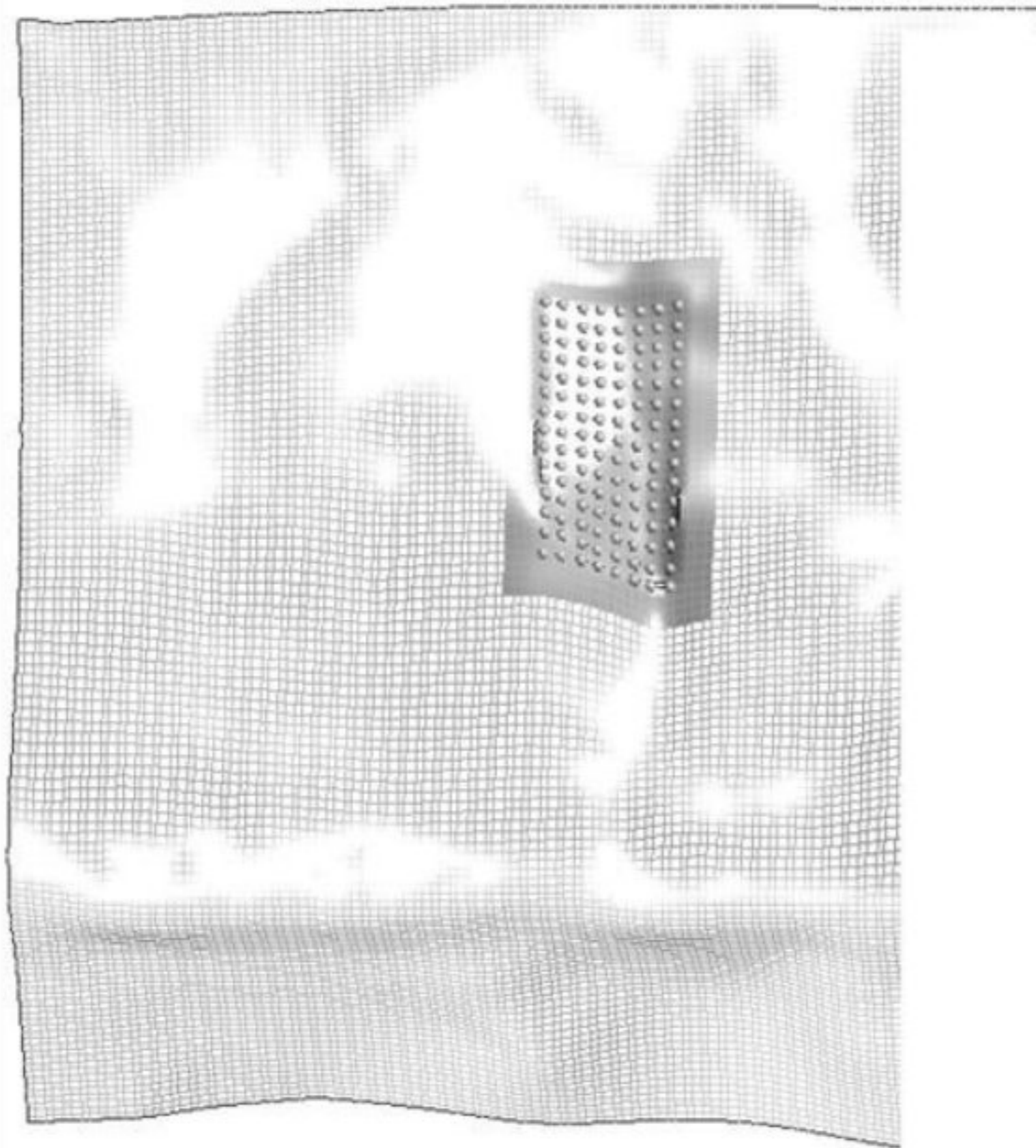
Број константе	Ознака	Параметер	Усвојене вриједности
c_1	<i>cgra</i>	гравитационо убрзање	9.8 m/s ²
c_2	<i>dens</i>	густина флуида	2000 kg/m ³
c_5	<i>nfriact</i>	реолошки закон	7
c_9	<i>tanfi8</i>	фрикциони параметар	0.25
c_{10}	<i>hfriact</i>	минимална дубина која може бити захваћена флуидом	0.001
c_{12}	<i>voellmy2phase</i>	турбулентни параметар ξ	500
c_{14}	<i>hsat</i>	однос дебљине слоја који је потпуно засићен у односу на укупну дубину	1
c_{17}	<i>denss</i>	густина чврстих честица	2580 kg/m ³
c_{18}	<i>densw</i>	густина воде	1000 kg/m ³
c_{19}	<i>Sr**</i>	степен засићености	1
c_{20}	<i>ifctdens</i>	корективни фактор за потпуно засићено тло (двофазни модел)	2
c_{21}	<i>eroslaw</i>	закон ерозије	1 (Hungr)
c_{22}	<i>Keros</i>	параметар ерозије	0.0001
c_{26}	<i>Permlaw</i>	закон филтрације	2 (Anderson)



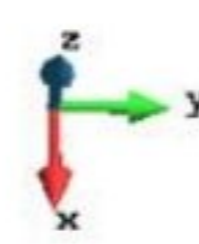
Слика 8.24 SPH 1 модел симулације кретања материјала и коначних дубина депоновања тецишта Лева река



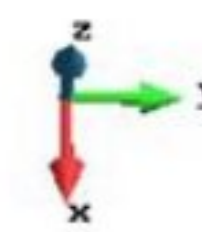
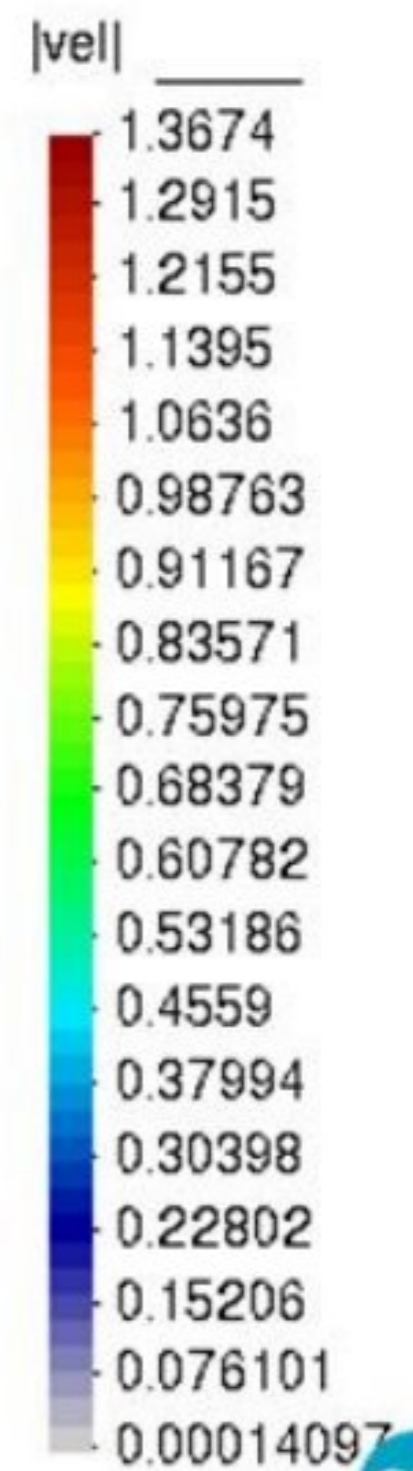
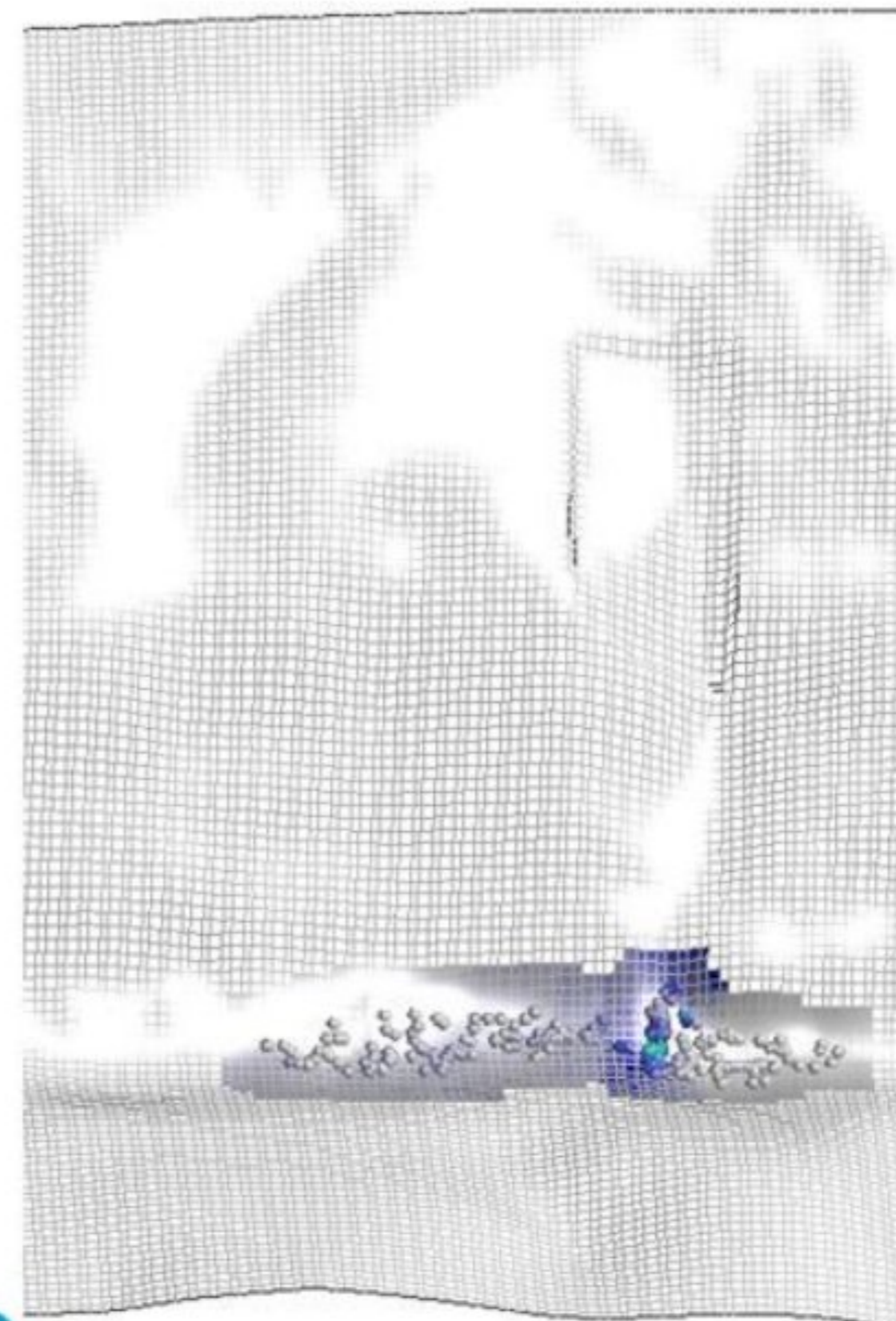
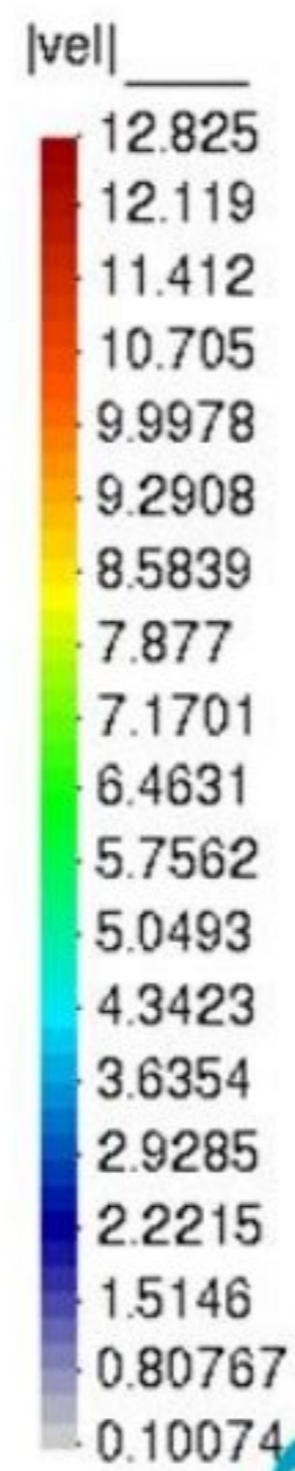
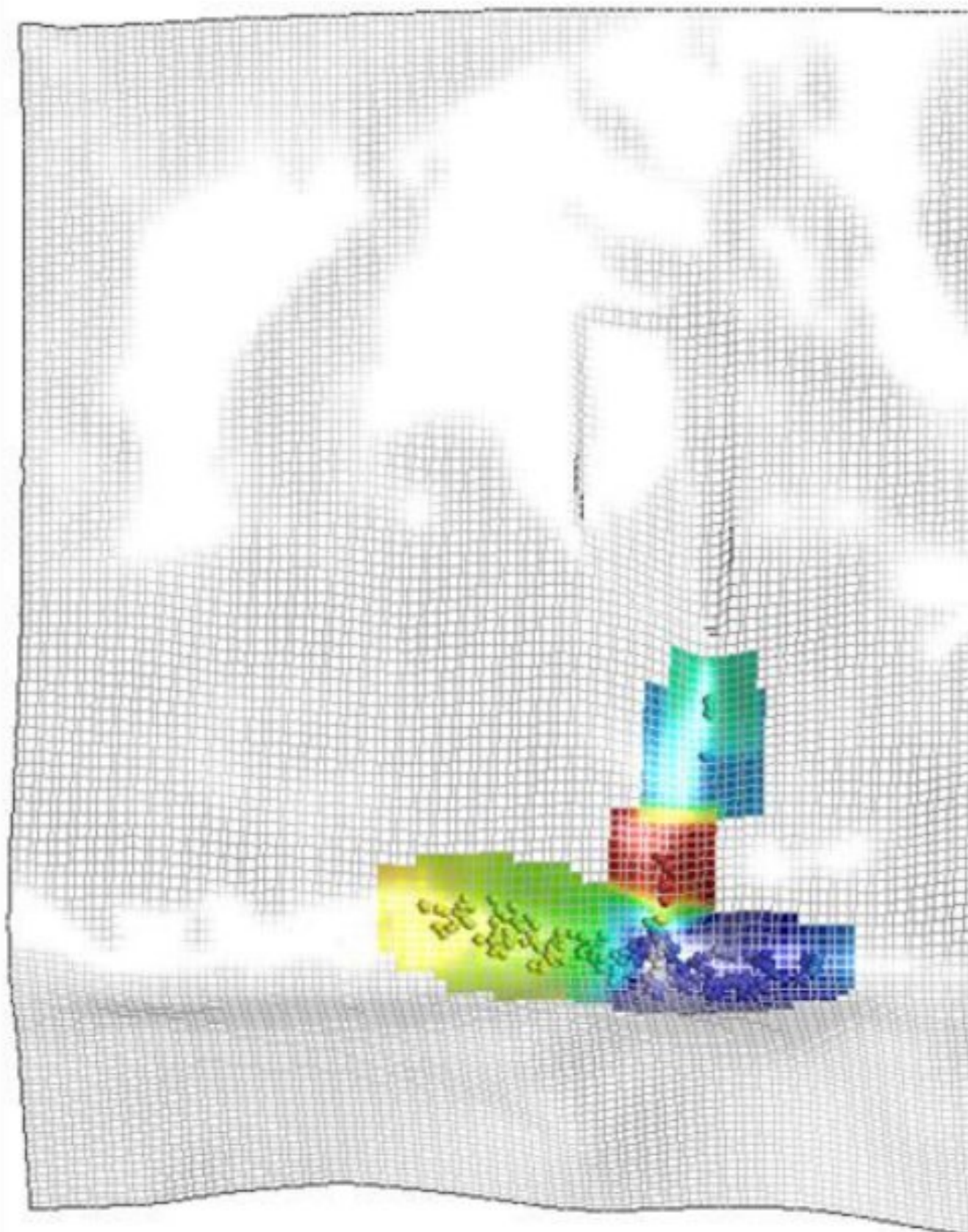
Слика 8.25 SPH 1 модел прорачуна степена приноса материјала ег у зони транспорта тежишта Лева река



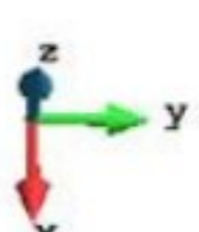
veloc, step 0
Contour Fill of vel, |vel|.
Deformation (x): of , step 0.



veloc, step 11.054
Contour Fill of vel, |vel|.
Deformation (x1): dis of Disp, step 11.054



veloc, step 23.794
Contour Fill of vel, |vel|.
Deformation (x1): dis of Disp, step 23.794.



veloc, step 49.522
Contour Fill of vel, |vel|.
Deformation (x1): dis of Disp, step 49.522.

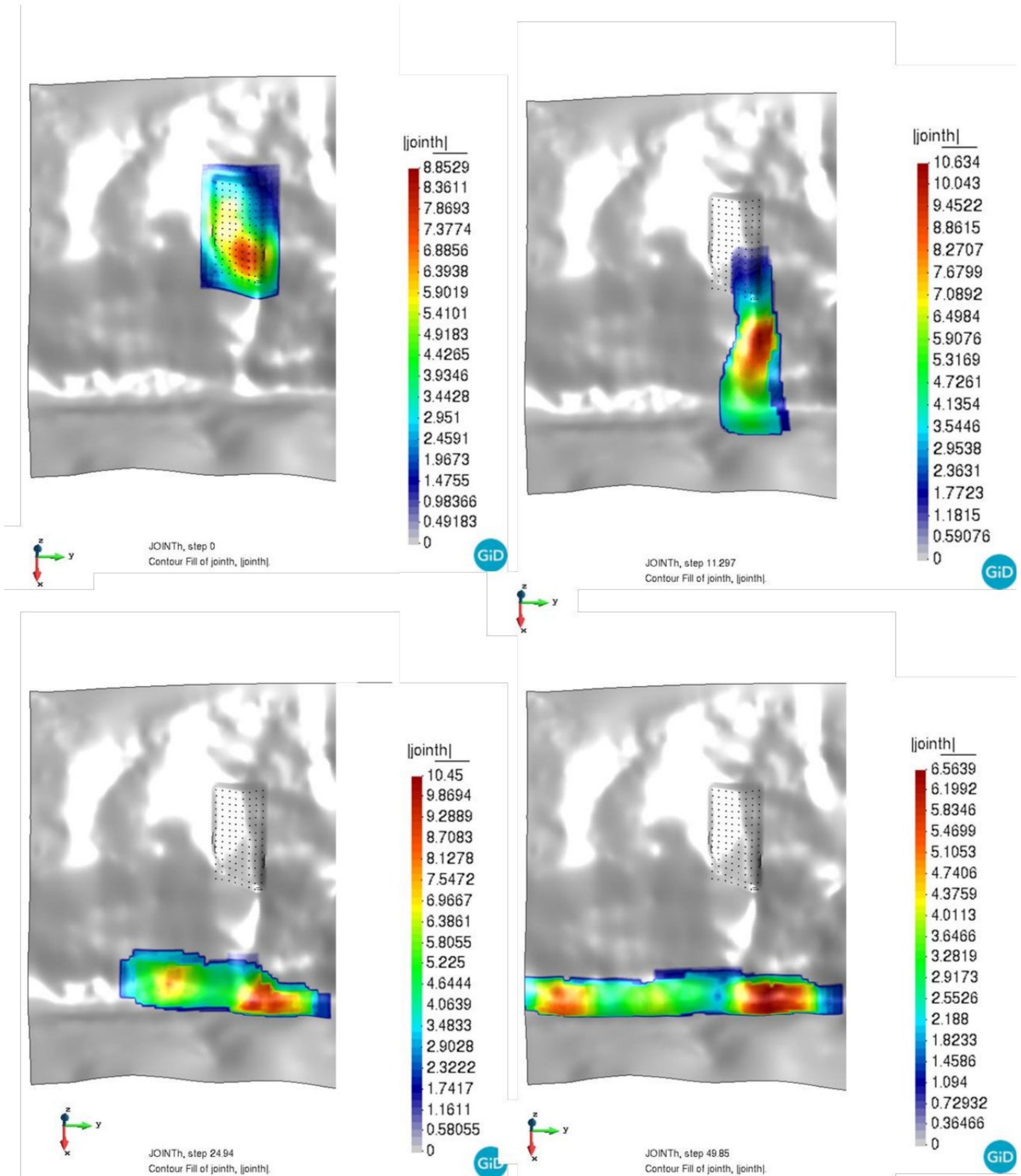
Слика 8.26 SPH 1 модел прорачуна достигнутих максималних брзина течења тежишта Лева река

Модел Лева река SPH 2

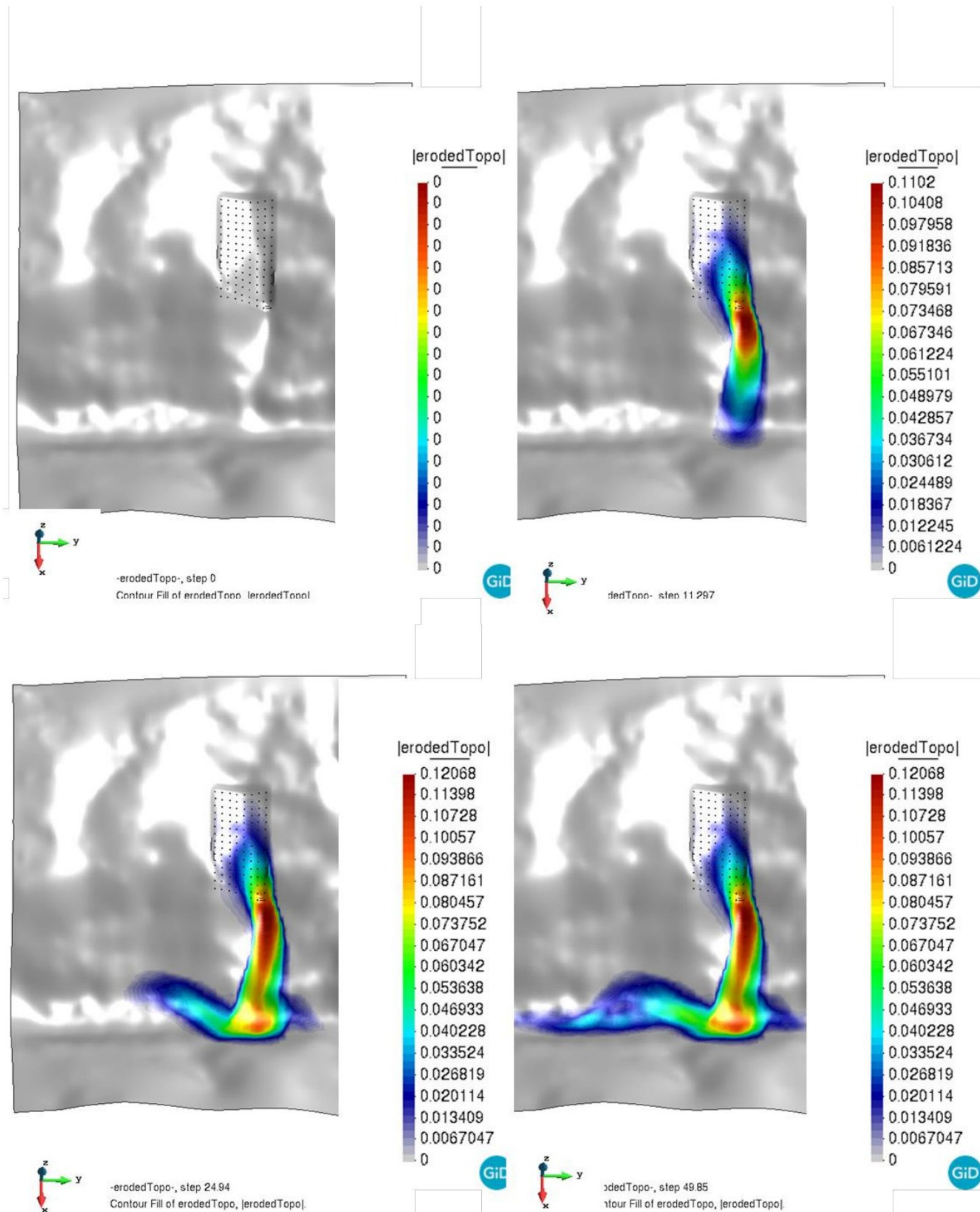
За улазне параметре за Модел Лева река SPH₂, резултати симулације висина, степена приноса материјала, и максималних брзина у фронталном дијелу тецишта су дати редом на сликама 8.27, 8.28, 8.29. У Табели 8.8 дат је приказ коришћених улазних података.

Табела 8.8 Улазни параметри за Лева река SPH 2 модел

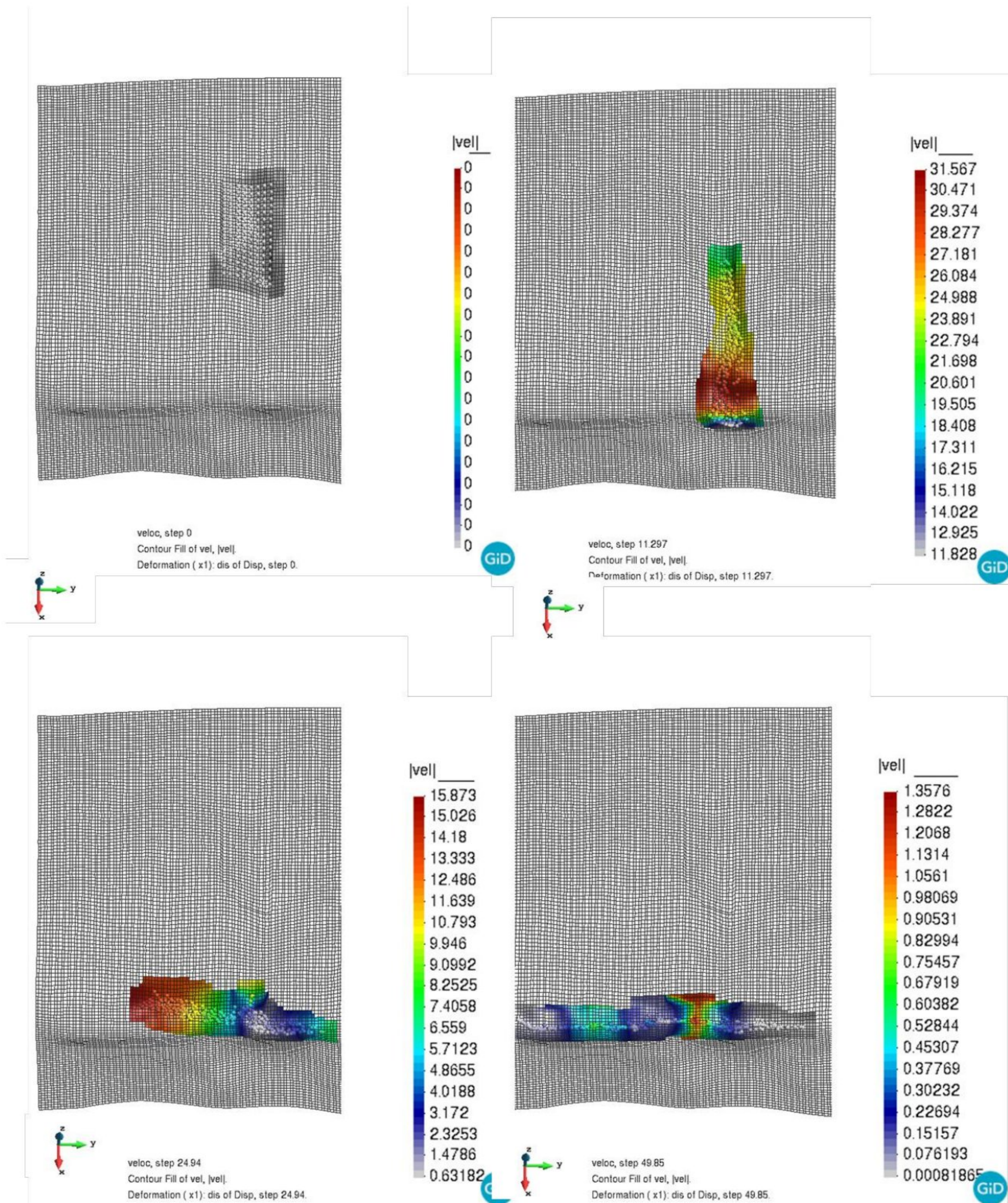
Број константе	Ознака	Параметер	Усвојене вриједности
c ₁	<i>cgra</i>	гравитационо убрзање	9.8 m/s ²
c ₂	<i>dens</i>	густина флуида	2000 kg/m ³
c ₅	<i>nfriact</i>	реолошки закон	7
c ₉	<i>tanfi8</i>	фрикциони параметар	0.15
c ₁₀	<i>hfriact</i>	минимална дубина која може бити захваћена флуидом	0.001
c ₁₂	<i>voellmy2phase</i>	турбулентни параметар ξ	1000
c ₁₄	<i>hsat</i>	однос дебљине слоја који је потпуно засићен у односу на укупну дубину	1
c ₁₇	<i>denss</i>	густина чврстих честица	2580 kg/m ³
c ₁₈	<i>densw</i>	густина воде	1000 kg/m ³
c ₁₉	<i>Sr**</i>	степен засићености	1
c ₂₀	<i>ifctdens</i>	корективни фактор за потпуно засићено тло (двофазни модел)	2
c ₂₁	<i>eroslaw</i>	закон ерозије	1 (Hungr)
c ₂₂	<i>Keros</i>	параметар ерозије	0.0001
c ₂₆	<i>Permlaw</i>	закон филтрације	2 (Anderson)



Слика 8.27 SPH 2 модел симулације кретања материјала и коначних дубина депоновања тежишта Лева река



Слика 8.28 SPH 2 модел прорачуна степена приноса материјала ер у зони транспорта тежишта Лева река



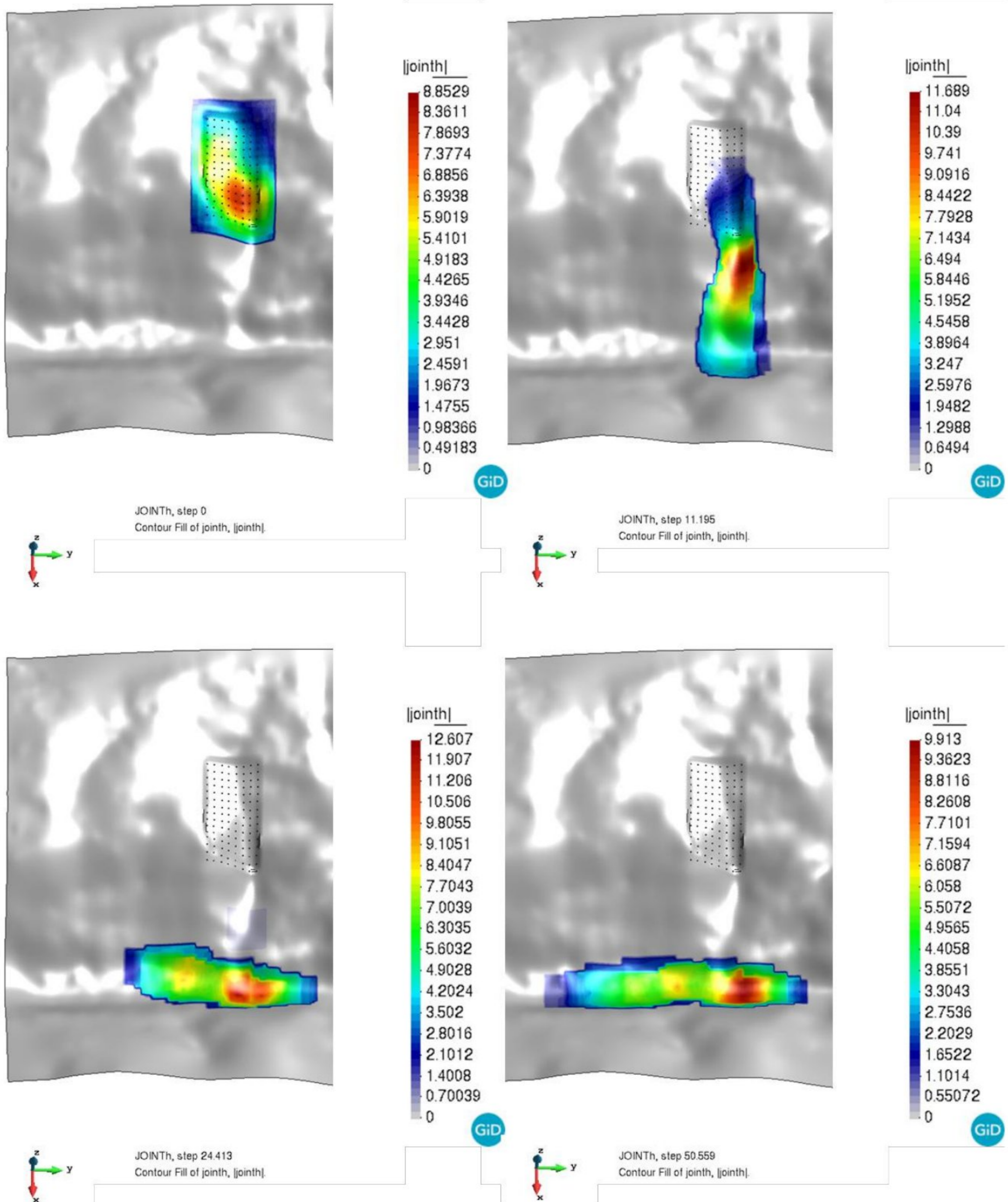
Слика 8.29 SPH 2 модел прорачуна достигнутих максималних брзина течења тецишта Лева река

Модел Лева река SPH 3

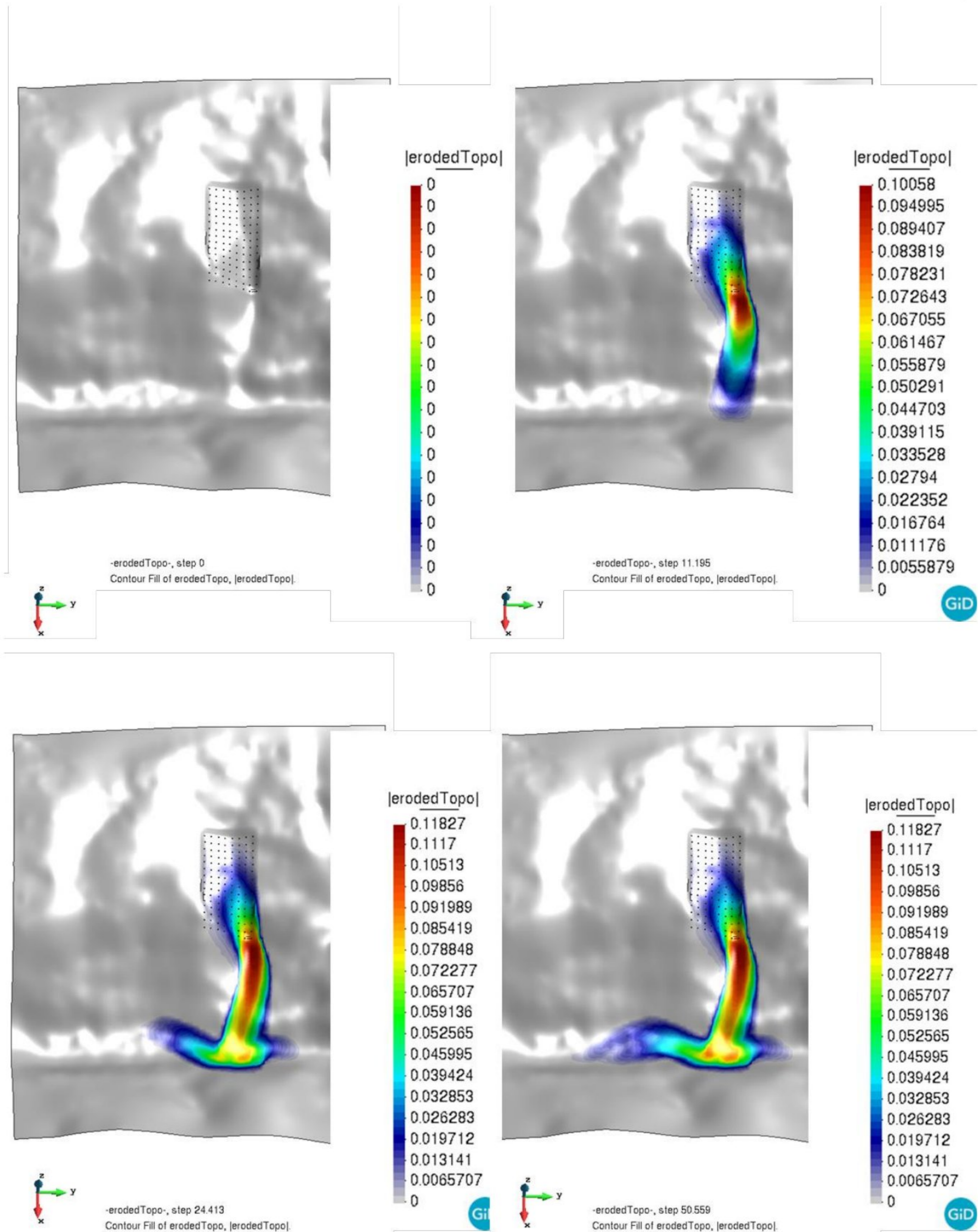
За улазне параметре за Модел Лева река SPH3, резултати симулације висина, степена приноса материјала, и максималних брзина у фронталном дијелу тецишта су дати редом на сликама 8.30, 8.31., 8.32. У Табели 8.9 дат је приказ улазних података који су коришћени.

Табела 8.9 Улазни параметри за Лева река SPH 3 модел

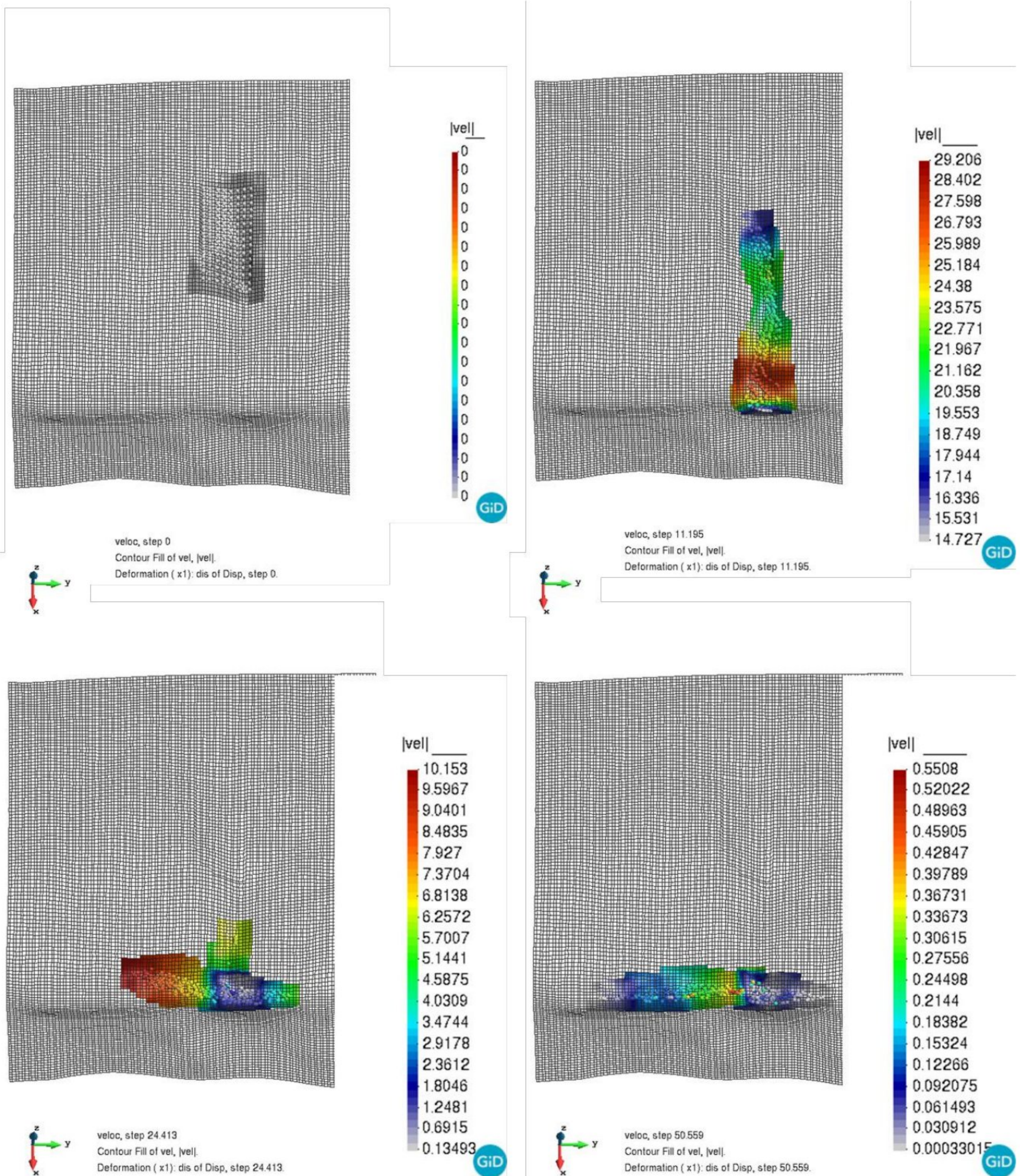
Број константе	Ознака	Параметер	Усвојене вриједности
c_1	<i>cgra</i>	гравитационо убрзање	9.8 m/s ²
c_2	<i>dens</i>	густина флуида	2000 kg/m ³
c_5	<i>nfriect</i>	реолошки закон	7
c_9	<i>tanfi8</i>	фрикциони параметар	0.25
c_{10}	<i>hfriecto</i>	минимална дубина која може бити захваћена флуидом	0.001
c_{12}	<i>voellmy2phase</i>	турбулентни параметар ξ	1000
c_{14}	<i>hsat</i>	однос дебљине слоја који је потпуно засићен у односу на укупну дубину	1
c_{17}	<i>denss</i>	густина чврстих честица	2580 kg/m ³
c_{18}	<i>densw</i>	густина воде	1000 kg/m ³
c_{19}	<i>Sr**</i>	степен засићености	1
c_{20}	<i>ifctdens</i>	корективни фактор за потпуно засићено тло (двофазни модел)	2
c_{21}	<i>eroslaw</i>	закон ерозије	1 (Hungr)
c_{22}	<i>Keros</i>	параметар ерозије	0.0001
c_{26}	<i>Permlaw</i>	закон филтрације	2 (Anderson)



Слика 8.30 SPH 3 модел симулације кретања материјала и коначних дубина депоновања тежишта Лева река



Слика 8.31 SPH 3 модел прорачуна степена приноса материјала ег у зони транспорта тежишта Лева река



Слика 8.32 SPH 3 модел прорачуна достигнутих максималних брзина течења тежишта Лева река

8.3 ПОРЕЂЕЊЕ ТЕРЕНСКИХ И НУМЕРИЧКИХ ИСТРАЖИВАЊА

Модел II RAMMS

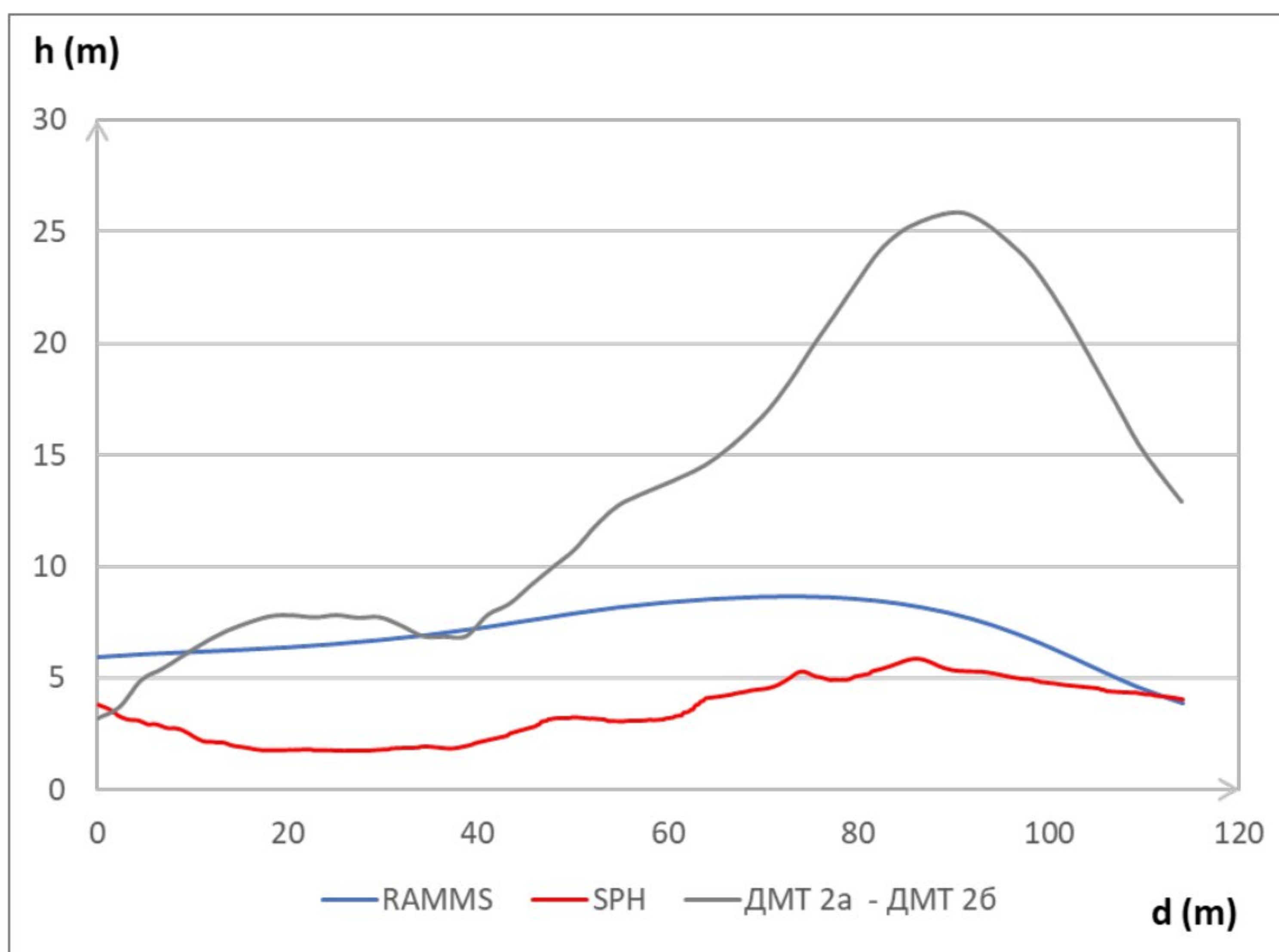
Финалне вриједности запремина у односу на процијењене дубине дате су у табели 8.10. Процијена је урађена на основу прорачуна угрожене површине са процијењеном висином наноса на терену. Симулација предвиђа много већу дубину еродовања материјала (чак до 9,8 m) што је много велика вриједност у поређењу са дубином иницијалног блока. Према снимку та вриједност је до максималних 4,8 m у зони транспорта (Слика 6.19).

Табела 8.10 Поређење дубине депоновања, дубине ерозије и запремине материјала процијењене и измоделоване (Krušić et. al., 2018))

Тециште	Масимална висина таложеног материјала (m)		Запремина таложеног материјала у границама зоне депоновања (m ³)		Максимална дубина ерозије (m)	
	процјењено	прорачунато	процјењено	прорачунато	процјењено	прорачунато
Лева река	12	10.57	≈28.000	≈23.000	6	9.8

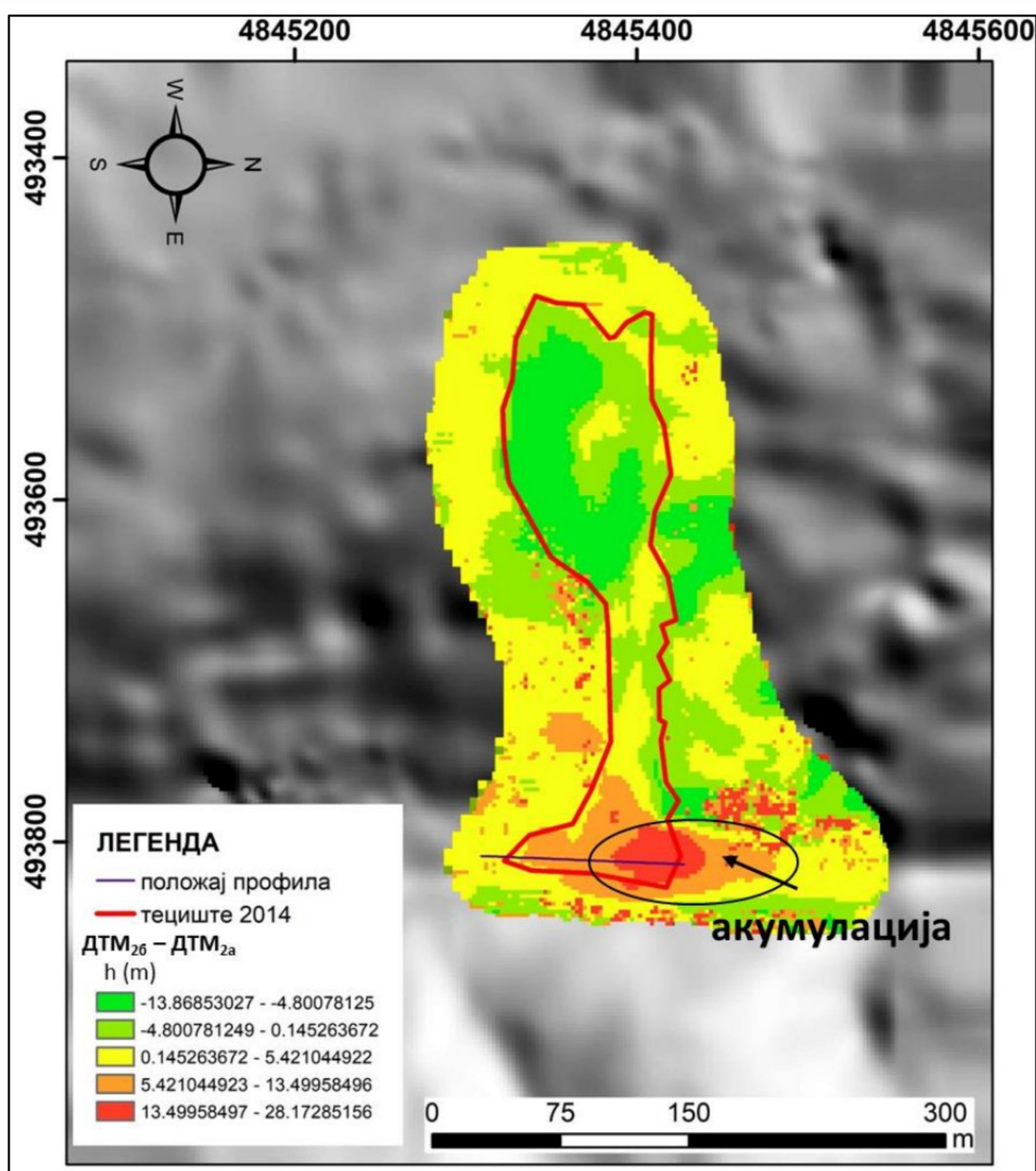
Као што је претходно наведено, у Табели 8.10 иницијални блок у RAMMS програму је процијењен на запремину 68663,15 m³. Прорачун коначне запремине у RAMMS програму је базиран на процијени материјала у зони која је дефинисана као зона прорачуна. Модел предвиђа да је на мјесту депоновања материјала запремина око 28000 m³, док се остали материјал отекао даље. За разлику од тога, SPH предиктује укупну количину материјала која је отекла. RAMMS модел предвиђа да је количина еродованог материјала износила 6584,44 m³, тако да је укупна запремина материјала 75247,59 m³.

Након калибрисања модела, у циљу добијања најпрецизније дубине депоновања материјала, поређење је рађено према профили у зони депозиције чији је положај приказан на слици 8.32. Поређени су RAMMS Модел II, Модел 3 SPH и модел разлика ДМТ2а-ДМТ2б Резултати поређења су приказани на слици 8.33.



Слика 8.33 Упоредни приказ коначних дубина материјала на мјесту пресека у зони депозиције

На графику се види да је разлика површи депонованог материјала на основу преклапања ДМТ двије епохе прилично велика у једном дијелу и достиже висину до 28 m, што није случај који је регистрован на терену. Анализом снимака утврђено је да је грешка у зони акумулације. Како би било јасније, модел разлика је рекласификован, па се јасно види да у зони акумулације имамо дубине од 13–28 m. Може се усвојити да модел разлика предвиђа максималну разлику тј. дебљину нанешеног материјала од 13,5 m што одговара зони депозиције која је видљива наранџастом бојом на рекласификованом моделу (Слика 8.33) и гдје се види дебљина нанешеног материјала, која се креће од 5,4–13,5 m.



Слика 8.34 Рекласификован модел разлика површина пре и после догађаја који указује на грешку у зони акумулације

Поредећи финалне моделе добијене у програмима, RAMMS Модел II и SPH модел 3 максималне висине материјала су приближно исте; 10,57 m у RAMMS програму и 9,54m у SPH. Максималне измјерене брзине у случају SPH модела су 29 m/s док је код RAMMS модела 21 m/s. Брзине које су приказане на симулацијама се односе на максималне постигнуте брзине. У SPH програму 65560 m³ је коначна запремина материјала у свим моделима, односно, предвиђена количина еродованог материјала је око 2007 m³.

9 ДИСКУСИЈА И ПРЕДЛОГ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА

Тецишта су појаве екстремно брзог покретања хетерогеног материјала услед засићења водом, која се активирају најчешће као последица велике количине падавина. Суштински се разликују од процеса клижења у томе што материјал не клиза по предефинисаној равни клижења, већ „тече“ услед засићености материјала по непокретној подлози. Основни елементи тецишта се разликују од клизишта по три основна параметра: зони иницијације, зони транспорта и зони депозиције гдје се материјал зауставља и најчешће формира карактеристичан лепезни облик. Код појаве течења дробине, покренути материјал је изузетно хетерогеног састава, од финих честица које чине флуид, до великих блокова, који могу бити и до неколико метара у пречнику.

Поступак истраживања тецишта у дисертацији је обухватао: инжењерско–геолошко картирање терена 2015. године; анализу постојећих дигиталних подлога и снимака ширег истражног подручја; теренска истраживања која су обухватила геофизичка истраживања за тециште Селанац 2015. године и фотограметријско снимање тецишта беспилотном летилицом у периоду март-април 2017. године; лабораторијска испитивања узорака и моделовање пропагације тецишта у RAMMS и SPH програму.

Први корак у дефинисању карактеристика тецишта је детаљно инжењерско–геолошко картирање терена, затим извођење теренских истраживања. Теренска истраживања на тециштима који су предмет дисертације су показала да: примјена геофизичких истраживања је значајна у случају великих тецишта, због неприступачности терена, великих димензија тецишта и величине одломака покренутог материјала. Због свега наведеног није било могуће извести класичне геотехничких истражне радове–истражне бушотине или истражне јаме. На основу мјерења електричне отпорности дата је дубина до нестабилне зоне. За валидацију модела пропагације коришћен је финални модел у зони депозиције EPT_4 . Према профилу EPT_4 добијена је добра процјена потенцијалне дубине, ако се узме у обзир да у овој зони имамо растресити материјал који је депонован на стабилном терену, те разлика отпорности би требало да покаже прецизну разлику у материјалима.

Остали модели геофизике прогнозирају потенцијално нестабилну зону одламања у дубљим дјеловима терена гдје до покретања није дошло. Тако на профилу EPT_1 и EPT_2 се издваја потенцијал откидања материјала испод зоне иницијалног блока. Ови резултати се условно усвајају, јер на терену није уочено да би до одношења на мјесту ових попречних пресека могло доћи. Пресеци у зони транспорта дају генералну дебљину нанешеног материјала, али услед константног одношења и наношења материјала, не могу са сигурношћу дати податак о дубини. Геофизичка геоелектричка истраживања су дала добар резултат у зони депозиције, узимајући у обзир финалне дубине, али се доња површ у односу на површ ДМТ-а разликује.

Дефинисање иницијалне зоне и количине покренутог материјала користећи резултате метода даљинске детекције се показало као прецизан начин добијања овог податка. Поступак је обухватао анализу постојећих ДМТ-а прије активирања тецишта (до 5×5 m резолуције пиксела) и анализе снимака терена након активирања тецишта добијених снимањем терена беспилотном летилицом (до 5×5 cm резолуције)

Како би се приступило дефинисању основних геомеханичких параметара тла склоног течењу, неопходно је кренути од реолошких карактеристика тла и основних

стања из којих се изводе други конститутивни модели примјениви на различите врсте тецишта. Одабрани су узорци у којима је највећи проценат крупнозрног материјала. На узорцима су урађене идентификационо-класификационе анализе и границе конзистенције на ситнозрном материјалу. Добијени резултати у поређењу са истраживањима масовних појава течења из литературе показују добру корелацију параметара.

У дисертацији су објашњени неки од реолошких закона који се примјењују у реологији тла: Бингамов, Фрикциони и Воелмиев модел. На примјеру тецишта Селанац и Лева река коришћен је Воелмиев реолошки закон који је карактеристичан за модел течења дробине, гдје главни утицај на кретање материјала има треће. Чест случај код тецишта је и појава еродибилности тј. одношења материјала у зони транспорта што захтјева моделовање приноса однешеног материјала, чије је имплементирање у моделе пропагације додатано отежавајућа околност. У дисертацији су објашњена четири приступа Хунгр, Егасхира и Бланк и модел ерозије имплементиран у RAMMS програму. У RAMMS програму поступак је изведен дефинисањем зоне еродовања материјала уз дефинисање потенцијално највеће дубине у зони транспорта. Добијени модел ерозије даје потенцијалне дубине еродовања у издвојеној зони. Зона је претходно утврђена упоређивањем ДМТ-а двије епохе и детаљним картирањем терена. У SPH програму, специфично дефинисање зоне еродовања није неопходно, већ програм сам препознаје потенцијалне критичне дијелове и даје генерални потенцијал приноса материјала употребом одабраног Хунгровог модела. Овај модел се показао као једноставан модел прорачуна дајући добре резултате на основу дефинисане иницијалне зоне и потенцијалности прорачуна фактора еродибилности по дубини.

У погледу просторног дефинисања модела у употреби су једнодимензионални, дводимензионални и тродимензионални модели који се све више развијају. Коришћени модели у дисертацији су базирани на 2D просторној дискретизацији, са примјеном интегралне параметара по дубини, што је неопходно у случају просторних анализа великих деформација. У докторату је рађено на 2D моделима са примјеном интегралне вриједности по дубини који су најприхватљивији узимајући у обзир исплативост, вријеме обраде и тачност добијених резултата.

Одабрани модели су базирани на различитим нумеричким решењима: RAMMS софтвер је базиран на Методу коначних запремина (FVM) и Методу коначних разлика (FDM) и SPH који је један од безмрежних видова нумеричког моделовања кретања.

Предмет дисертације је било тестирање два вида модела на примјеру два тецишта у Србији: Селанац и Лева река. Оваква врста анализа код нас је рађена први пут на овим примјерима, али и на тециштима као појави нестабилности уопште.

Предност употребе RAMMS софтвера је у једноставности коришћења: иницијална зона се дефинише блоком просјечне дубине, издваја се полигон подложен еродовању подлоге, базиран је на једном реолошком моделу који се користи као конститутивни модел и даје резултате симулације врло брзо. Конципиран је као једнофазни модел у погледу фазности и не узима у обзир међутицај фаза који је присутан у реалним појавама течења дробине. SPH програм даје више могућности у примјени параметара и различитих реолошких модела, прецизније дефинисање иницијалне зоне великим бројем тачака узимајући у обзир међутицај чврсте и флуидне фазе тецишта.

9.1 Предлог даљих истраживања

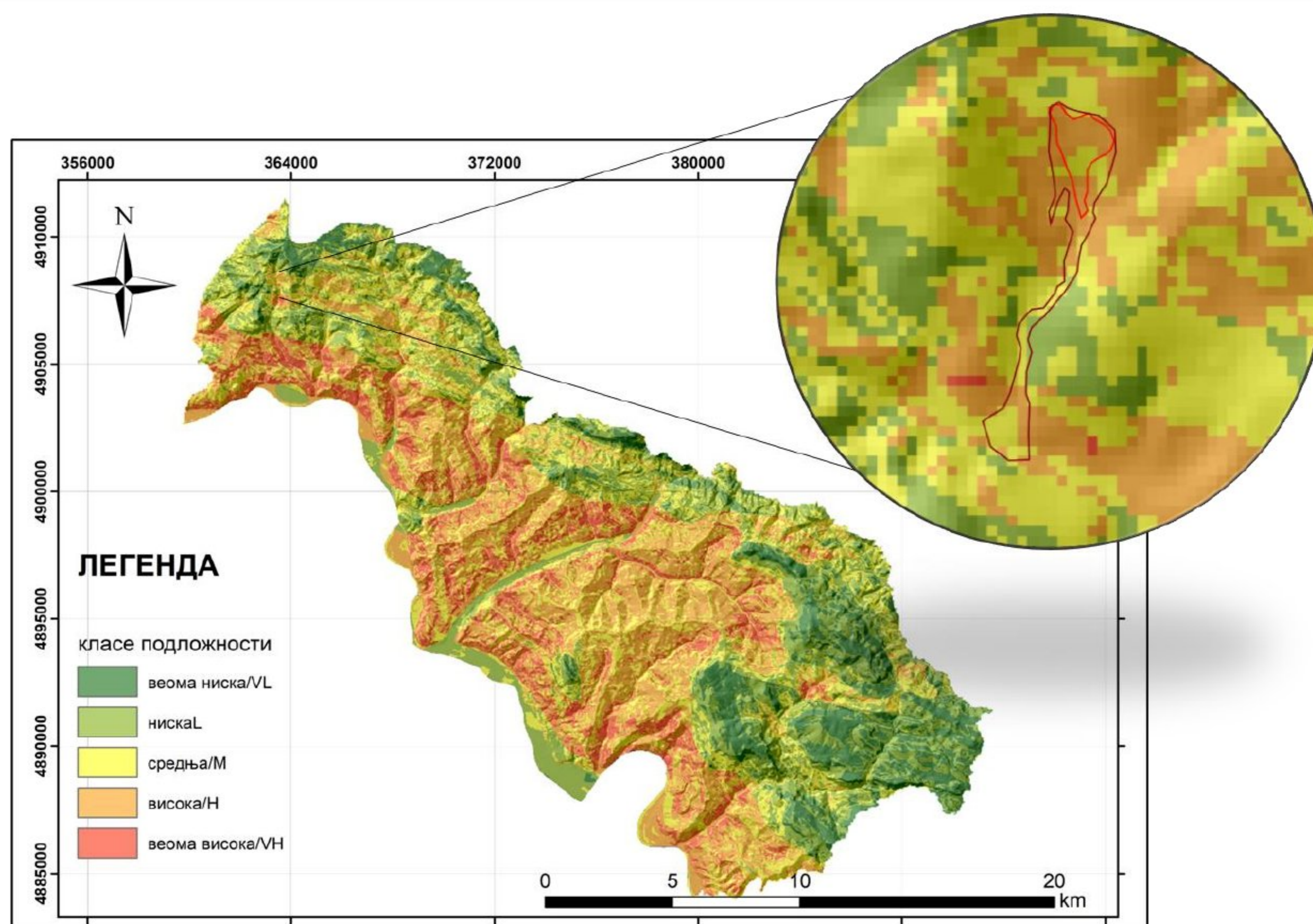
Тецишта која су се активирала 2014. године су била масовна појава у региону западне Србије. Предвиђање потенцијалних будућих појава у подручјима угроженим појавама течења је од великог значаја за превенцију дјеловања у кризним ситуацијама, каква је била приликом ове масовне појаве. У дисертацији је акценат био на моделовању пропагације постојећих појава. Како би се предвидјело могуће развијање процеса, неопходно је претпоставити подручја која су потенцијално угрожена. Методе које се користе за то су процјене подложности ка течењу на ширем истражном подручју.

Предмет дисертације је била повратна анализа на постојећим примјерима који су се десили, како би се добио пропагациони модел који одговара реалној ситуацији на терену. У наредним истраживањима, планира се да се у сличним морфолошким и геолошким условима осцијени могућа подложности терена на течење.

Посљедњих двије деценије доста радова је написано на ту тему, највише након 2013. године (Kumar et al., 2022, Esper et al., 2020). Принцип одређивања подложности као и код појава нестабилности генерално (клизање, одроњавање, течење) заснива се на неколико различитих метода. Карте подложности на течење раздвајају зоне подложне течењу на различита подручја подложности рангирајући их према вјероватноћи појаве.

Квантитативне методе укључују статистичке, пробабилистичке и дистрибутивне приступе. Такође, посљедњих година, примијењене су технике машинског учења, као што су вјештачке неуронске мреже, Random Forest, Decision Trees и Naive Bayes алгоритам. Програми као што су *EDDA* и *Flo 2D* се користе за предиктовање еродовања. Физички модели (*Lisa*, *Smorph*, *Scetran*, *Sinmap*, *Shalstab* и *Trigrs* и сл.) користе се за прогнозирање развоја процеса течења активираних плитким клижењем, (Kumar et al., 2022). Поред наведених приступа, комерцијални софтвери који су прилагођени одређивању пропагације у регионалној размјери, какав је *Flow-r*, даје могућност процјене услова активирања као и пропагација у потенцијалним зонама.

У претходном истраживању (Krušić, et al., 2017b) примјењене су различите методе за процјену подложности на појаву нестабилност на подручју општине Љубовија. Коришћене су три различите методе: полуквантитативна АНР, детерминистичка Si index у *SINMAP* програму и метод вјештачке интелигенције–Random forest. Тиме су добијене карте подложности на појаве нестабилности и поређена тачност примјењених метода. Карта за подручје Љубовије добијена коришћењем АНР методе, са издвојеном зоном у подручју Селанца приказана је на слици 9.1.



Слика 9.1 Карта подложности на појаве нестабилности за подручје Општине Љубовиђа добијена АНР методом са положајем тецишта Селанац и иницијалне зоне која се активирала (из Крушић, et al., 2017b)

Тецишта Селанац и Лева река су активирани у предјелима масовне појаве тецишта након екстремних падавина 2014. године. Потенцијал развоја тецишта на ширем подручју на основу дефинисаних потенцијалних иницијалних зона, користећи се неком од метода процјене подложности ка течењу, и примјеном реолошких параметара који су утврђени на тециштима Селанац и Лева река, дају могућност процјене пропације у другим потенцијалним подручјима чиме би се предупредило негативно дјеловање у будућности.

Поред моделовања пропације у потенцијално нестабилним теренима, у плану је унапређење нумеричких модела пропације. Примјеном резултата лабораторијских опита на узорцима у циљу добијања параметара који се могу користити у *SPH* програму очекује се да би се добили детаљнији модели корелисани са геотехничким параметрима. Тиме би модели били упоређени са реалним мјерним параметрима и моделима добијеним повратном анализом. Поред ова два софтвера, примјена програма попут *LS-RAPID* (Sassa et. al., 2010) који користи податке геотехничких лабораторијских испитивања у недренирним условима, и *r.avaflow* који је базиран на Воелмијевом реолошком моделу коришћењем мултифазног модела (Pudasaini and Mergili, 2019) би допунили истраживања и упоредиви су са софтверима коришћеним за моделовање у дисертацији.

10 ЗАКЉУЧАК

Финални модели обухватају приказ три тест модела у RAMMS, и три тест модела у SPH Geoflow програму за тециште Селанац. За тециште Лева река приказана су два тест модела у RAMMS програму и три тест модела у SPH Geoflow програму. Први модели у RAMMS програму су добијени уз помоћ ДМТ–а ниске резолуције 30х30 m, што је за резултат имало грешку приликом процјене запремине покренутог материјала, али су прилично добро предиктовали просторну дистрибуцију материјала. Ови резултати су прелиминарни, те је било неопходно приступити моделовању са моделом терена боље резолуције.

Сљедећи модели за тециште Селанац су добијени коришћењем ДМТ–а 5х5 m, која се сматра оптималном за моделовање појава нестабилности тј. великих деформација. Други модел је добијен повратном анализом, иницијални блок је прецизније одређен на основу поређења ДМТ–а двије епохе, па је процијењена просјечна дубина иницијалне зоне знатно мања од оне која је првенствено процијењена. Коначни резултат даје реалније резултате у односу на први модел. Трећи модел је урађен са прорачуном ерозије. Најдубља зона еродовања је процијењена и до 12 m. Коначне запремине су прецизније и предвиђају да је количина еродованог материјала 41023,35 m³.

Моделовање у SPH програму је приказано на примјеру три симулације за оба тецишта. Коришћен је Воелмијев реолошки закон како би компарација међу резултатима била најмјеродавнија. Најподеснији параметри за Селанац су 0,35 и 500 m/s², који дају најреалнији приказ пропагације материјала. Веће вриједности турбулентног параметра показују даљи Модел SPH₃ који је узет за најрепрезентативнији и који је искоришћен за валидацију. Валидација је урађена у поређењу са једним пресеком, као и у случају RAMMS модела, поредећи га са ERT4 профилем и моделом разлика у елевацији.

Други модел за тециште Лева река је добијен је коришћењем ДМТ–а боље резолуције, калибрисањем параметара у истом распону 0,05–0,4 и 100–1000 m/s² за турбулентни параметар. Иницијална зона је прецизније одређене на основу поређења ДМТ–а. Осим тога, узет је у обзир и прорачун ерозије у зони транспорта материјала. Коначни модел има параметре 0,25 и 1000 m/s².

На моделовање оба тецишта много већи утицај је имала прогноза фрикционог параметра у односу на турбулентни параметар. Коначне вриједности дубине депонованог материјала су прецијењене у SPH програму у односу на мјерења урађена ERT истраживањима. Са друге стране, RAMMS модел показује велику количину материјала који је отекао Селаначком реком (чак 2/3 укупног материјала).

За валидацију тецишта Лева река коришћено је поређење модела терена двије епохе. Модел поређења показује грешку у зони акумулације, гдје је висинска разлика 25 m, што није регистровано на терену. Анализом снимака је утврђено да је грешка у висини у дијелу акумулације, па се усваја да је разлика модела максимално око 13 m, што је уједно и дубина депоновоног материјала.

Разлике у процјени дубине депоновања материјала и калибрисаним параметрима се везују за различит алгоритам рјешења на коме су базирана ова два програма. Калибрација турбулентног параметра је иста за оба тецишта док су разлике у калибрисању параметра трења за оба тецишта. На примјеру Селанца се уочава битност моделовања двије фазе код тецишта, чиме је коришћењем двофазног модела SPH

депоновани материјал заустављен у зони депозиције, за разлику од RAMMS модела гдје није било могуће измоделовати не отицање материјала много изван зоне депозиције.

Допринос дисертације је у поређењу модела различитих карактеристика, на примјеру два тецишта. По први пут у Србији је рађено теренско, лабораторијско и нумеричко истраживање тецишта. Дат је преглед различитих типова појава у складу са савременим класификацијама. Дат је преглед реологије тла који се примјењује на конкретне појаве тецишта. Поређени су нумерички резултати са геофизичким методама истраживања на примјеру тецишта Селанац.

Поступак истраживања тецишта подразумијева примјену различитих метода истраживања од теренских, преко лабораторијских до нумеричких метода и израде различитих модела-сценарија. Модели еродибилности су битан дио моделовања тецишта и у оба случаја су имали велики утицај и велике дубине еродовања у зони транспорта. Први модели у RAMMS програму имају недостатак ниске резолуције улазног податка и не узимања у обзир утицаја ерозије. Без обзира на то, карактеристичност ових тецишта је да је иницијална зона много већа, а удио еродоване масе је јако мали у поређењу са укупном масом према прорачуну у RAMMS програму (око 10%). Добијени модели су добра основа за моделовање сличних појава на ширем подручју у циљу утврђивања потенцијално нових појава нестабилности.

Будућа истраживања ових тецишта обухватиће примјену других нумеричких метода базираних на геотехничким опитима. Велики изазов представља и моделовање ових примјера тецишта у мањој размјери помоћу физичких модела, чиме се може тестирати динамика течења. Такви опити су прилично скупи и до сада није било прилике да се ради на тој врсти истраживања. Тестирање потенцијалних преградних мјеста брана на примјеру оба тецишта помоћу нумеричких метода може дати допринос у практичном рјешавању мјера санације код активних процеса течења. Поред тога, планирано је тестирање потенцијално нестабилних подручја формираних у сличним условима као и студије случаја моделоване у овој дисертацији.

II ЛИТЕРАТУРА

- Abanco C (2013) Monitoring and geomorphologic characterization of debris flows at catchment scale. PhD thesis, *Department of Geotechnical Engineering and Geosciences, Technical University of Catalonia, Spain*, 165P
- Abolmasov, B., Marjanović, M., Đurić, U., Krušić, J., & Andrejev, K. (2017). Massive Landsliding in Serbia following Cyclone Tamara in May 2014 (IPL-210). *Advancing Culture of Living with Landslides*, 473–484. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59469-9_41
- Abolmasov, B., Petrović, M. S., Stanković, R., Marjanović, M., Krušić, J., & Đurić, U. (2020). Extreme rainfall event and its aftermath analysis—IPL 210 project progress report. *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk*, 267–273. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60196-6_19
- Akpan, A. E., Ilori, A. O., & Essien, N. U. (2015). Geophysical investigation of Obot Ekpo landslide site, Cross River State, Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, 109, 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.05.015>
- Anderson, T. B., & Jackson, R. (1967). Fluid mechanical description of fluidized beds. equations of motion. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 6(4), 527–539. <https://doi.org/10.1021/i160024a007>
- Bartelt P, Buehler Y, Christen M, Deubelbeiss Y, Graf C, McArdell B W (2013) RAMMS—rapid mass movement simulation, A modeling system for debris flows in research and practice, user manual v1.5, debris flow, *Institute for Snow and Avalanche Research SLF*, pp126.
- Bingham, P. M. (1922). Irish families: Bingham. *Notes and Queries*, s12-XI(227), 149–149. <https://doi.org/10.1093/nq/s12-xi.227.149g>
- Blanc, T. (2008) Numerical simulation of debris flows with the 2D-SPHdepth integrated model. Na
- Brideau, M.-A., Stead, D., Millard, T. H., & Ward, B. C. (2019). Field characterisation and numerical modelling of debris avalanche runout on Vancouver Island, British Columbia, Canada. *Landslides*, 16(5), 875–891. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01141-7>
- Cannon, S. H., & Savage, W. Z. (1988). A mass-change model for the estimation of debris-flow runout. *The Journal of Geology*, 96(2), 221–227. <https://doi.org/10.1086/629211>
- Carman, P.C. (1956) *Flow of Gases through Porous Media*; Butterworths: London, UK,
- Cascini, L., Cuomo, S., Pastor, M., & Rendina, I. (2016). SPH-FDM propagation and pore water pressure modelling for debris flows in Flume tests. *Engineering Geology*, 213, 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.08.007>
- Cascini, L., Cuomo, S., Pastor, M., Sorbino, G., & Piciullo, L. (2014). SPH run-out modelling of channelised landslides of the flow type. *Geomorphology*, 214, 502–513. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.031>
- Chen, C., & Ling, C.-H. (1996). Granular-flow rheology: Role of shear-rate number in transition regime. *Journal of Engineering Mechanics*, 122(5), 469–480. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1996\)122:5\(469\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1996)122:5(469))

- Chen, H., & Lee, C. F. (2000). Numerical simulation of debris flows. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(1), 146–160. <https://doi.org/10.1139/t99-089>
- Chen, H., Crosta, G. B., & Lee, C. F. (2006). Erosional effects on runout of fast landslides, debris flows and avalanches: A numerical investigation. *Géotechnique*, 56(5), 305–322. <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.5.305>
- Christen, M., Bartelt, P., & Kowalski, J. (2010b). Back calculation of the *in den arelen* avalanche with RAMMS: Interpretation of model results. *Annals of Glaciology*, 51(54), 161–168. <https://doi.org/10.3189/172756410791386553>
- Christen, M., Bühler, Y., Bartelt, P., Leine, R., Glover, J., Schweizer, A., Graf, C., McArdell, B. W., Gerber, W., Deubelbeiss, Y., Feistl, T., & Volkwein, A. (2012). Integral hazard management using a unified software environment: numerical simulation tool “RAMMS” for gravitational natural hazards, 12th Congress INTERPRAEVENT, 23–26 April 2012 Grenoble, France. In *Proceedings* (Vol. 1, pp. 77–86). Klagenfurt
- Christen, M., Kowalski, J., & Bartelt, P. (2010a). RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 63(1–2), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.04.005>
- Coussot, P., Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40(3–4), 209–227. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(95\)00065-8](https://doi.org/10.1016/0012-8252(95)00065-8)
- Cruden, D.M. and Varnes, D.J. (1996) Landslides: Investigation and Mitigation. Chapter 3 *Landslide Types and Processes*. Transportation Research Board Special Report, 247.
- Cuomo, S., Pastor, M., Capobianco, V., & Cascini, L. (2016). Modelling the space–time evolution of bed entrainment for flow-like landslides. *Engineering Geology*, 212, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.07.011>
- Cuomo, S., Pastor, M., Cascini, L., & Castorino, G. C. (2014). Interplay of rheology and entrainment in debris avalanches: A numerical study. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(11), 1318–1330. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0387>
- Cvetković, M. (1977) . Reološka svojstva koherentnog tla sa posebnim osvrtom na viskozne i taksotropne osobine. Beograd: Rudarsko Geološki Fakultet
- Davies, T.R.H., 1986. Large debris flows: a macro-viscous phenomenon. *Acta Mech.* 63, 161–178. <https://doi.org/10.1007/BF01182546>
- Devi, A., Israil, M., Anbalagan, R., & Gupta, P. K. (2017). Subsurface Soil Characterization Using GEOELECTRICAL and geotechnical investigations at a bridge site in Uttarakhand Himalayan region. *Journal of Applied Geophysics*, 144, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.07.005>
- Dey, A., & Morrison, H. F. (1979). Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures*. *Geophysical Prospecting*, 27(1), 106–136. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1979.tb00961.x>
- Đurić, D., Krušić, J., & Abolmasov, B. (2021). Application of ERT in the study of debris-flow source area: Case study selanac debris flow. *11th Congress of the Balkan Geophysical Society*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202149bgs15>
- Đurić, D., Mladenović, A., Pešić-Georgiadis, M., Marjanović, M., & Abolmasov, B. (2017). Using multiresolution and multitemporal satellite data for post-disaster landslide inventory in the Republic of Serbia. *Landslides*, 14(4), 1467–1482. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0847-2>

- Egashira, Shinji. (1993). Mechanism of sediment deposition from debris flow (part 1). *J. Japan Soc. Erosion Control Engng.* 46. 45-49.
- Esper Angillieri, M. Y. (2020). Debris flow susceptibility mapping using frequency ratio and seed cells, in a portion of a mountain international route, Dry Central Andes of Argentina. *CATENA*, 189, 104504. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104504>
- Frank, F., McArdell, B. W., Huggel, C., & Vieli, A. (2015). The importance of entrainment and bulking on debris flow runout modeling: Examples from the Swiss alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(11), 2569–2583. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2569-2015>
- Frank, F., McArdell, B. W., Oggier, N., Baer, P., Christen, M., & Vieli, A. (2017). Debris-flow modeling at Meretschibach and Bondasca catchments, Switzerland: Sensitivity testing of field-data-based entrainment model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(5), 801–815. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-801-2017>
- Gingold, R. A., & Monaghan, J. J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics - Theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181, 375–389. doi: 10.1093/mnras/181.3.375
- Guerriero, L., Bertello, L., Cardozo, N., Berti, M., Grelle, G., & Revellino, P. (2017). Unsteady sediment discharge in Earth Flows: A case study from the mount pizzuto earth flow, southern Italy. *Geomorphology*, 295, 260–284. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.011>
- Hampton, M.A., 1979. Buoyancy in debris flows. *J. Sediment. Res.* 49, 753–758. <https://doi.org/10.1306/212F7838-2B24-11D7-8648000102C1865D>.
- Hong, M., Jeong, S., & Kim, J. (2019). A combined method for modeling the triggering and propagation of debris flows. *Landslides*, 17(4), 805–824. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01294-5>
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B., & Zimmermann, M. (2013). Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(4), 869–885. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-869-2013>
- Howes DE (1981) Terrain inventory and geological hazards: Northern Vancouver Island, British Columbia Ministry of Environment, APD Bulletin 5, 104 p
- Hungr, O. (1995). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(4), 610–623. <https://doi.org/10.1139/t95-063>
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., & Hutchinson, J. N. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7(3), 221–238. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.7.3.221>
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Hungr, O., McDougall, S., & Bovis, M. (2005). Entrainment of material by debris flows. *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*, 135–158. https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_7
- Hutchinson, J. N. (1988). General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26(2), 88. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(89\)90310-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)90310-0)
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245–296. <https://doi.org/10.1029/97rg00426>

- Iverson, R.M., 2014. Debris flows: behaviour and hazard assessment. *Geol. Today* 30, 15–20. <https://doi.org/10.1111/gto.12037>
- Jakob, M., & Jordan, P. (2001). Design flood estimates in mountain streams – the need for a geomorphic approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(3), 425–439. <https://doi.org/10.1139/l01-010>
- Jan, C.-D., & Shen, H. W. (1997). Review dynamic modeling of debris flows. *Recent Developments on Debris Flows*, 93–116. <https://doi.org/10.1007/bfb0117764>
- Jevremović, D, Kostić, S, Andrejev, K (2015): Kliženje i pregrađivanje korita Leve reke kod Kraljeva izazvano ciklonom „Tamara” maja 2014. godine”, *Tehnika* 70 (4): 609-615
- Jevremović, D., Sunarić, D., Kostić, S. (2011) Zagaćivanje reka u Srbiji kliženjem i odronjavanjem *Tehnika* 62 (5): 731-736.
- Kozeny, J. (1927) Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden. *Sitzungsber Akad. Wiss. Wien*, 136, 271–306.
- Krušić, J. Andrejev, K, Abolmasov, B, Marjanović, M. (2017a) “Preliminary results of the Selanac debris flow modelling in RAMS - a case study” *Proceeding of the 3rd Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region*, Ljubljana 2017, 11 - 13 October 2017 Ljubljana, Slovenia
- Krušić, J., Abolmasov, B., & Samardžić-Petrović, M. (2019). Influence of DEM resolution on numerical modelling of debris flows in RAMMS - SELANAC case study. *Proceedings of the 4th Regional Symposium on Landslides in the Adriatic - Balkan Region*. https://doi.org/10.35123/resylab_2019_27
- Krušić, J., Marjanović, M., Samardžić-Petrović, M., Abolmasov, B., Andrejev, K., & Miladinović, A. (2017b). Comparison of expert, deterministic and machine learning approach for landslide susceptibility assessment in Ljubovija Municipality, Serbia. *Geofizika*, 34(2), 251–273. <https://doi.org/10.15233/gfz.2017.34.15>
- Krušić, J., Samardžić-Petrović, M., Marjanović, M., Abolmasov, B., & Miljković, S. (2018). Preliminary results of numerical modelling of debris flow - case study Leva Reka, Serbia. *Ce/Papers*, 2(2–3), 707–712. <https://doi.org/10.1002/cepa.753>
- Кубат, И. (1977) ОГК 1:100 000 Тумач листа Љубовија. Београд: Савезни геолошки завод, Л 34-135
- Kumar, A., & Sarkar, R. (2022). Debris flow susceptibility evaluation—a review. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47(3), 1277–1292. <https://doi.org/10.1007/s40996-022-01000-x>
- Lapenna, V., Lorenzo, P., Perrone, A., Piscitelli, S., Rizzo, E., & Sdao, F. (2005). 2D electrical resistivity imaging of some complex landslides in Lucanian Apennine chain, southern Italy. *GEOPHYSICS*, 70(3). <https://doi.org/10.1190/1.1926571>
- Leonardi, A., Wittel, F. K., Mendoza, M., Vetter, R., & Herrmann, H. J. (2015). Particle-fluid-structure interaction for debris flow impact on flexible barriers. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31(5), 323–333. <https://doi.org/10.1111/mice.12165>
- Li, S., & Liu, W. K. (2004). *Meshfree particle methods*. Springer.
- Li, X., & Zhao, J. (2018). A unified CFD-dem approach for modeling of debris flow impacts on flexible barriers. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 42(14), 1643–1670. <https://doi.org/10.1002/nag.2806>

- Liu, G. R., & Liu, M. B. (2003). *Smoothed particle hydrodynamics: A meshfree particle method*. World Scientific.
- Locat, J., & Lee, H. J. (2005). Subaqueous debris flows. *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*, 203–245. https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_9
- Loke, M. H., Chambers, J. E., Rucker, D. F., Kuras, O., & Wilkinson, P. B. (2013). Recent developments in the direct-current GEOELECTRICAL Imaging Method. *Journal of Applied Geophysics*, 95, 135–156. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.017>
- Lucy, L. B. (1977). A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *The Astronomical Journal*, 82, 1013. <https://doi.org/10.1086/112164>
- Malet, J.-P., Laigle, D., Rемаître, A., & Maquaire, O. (2005). Triggering conditions and mobility of debris flows associated to complex earthflows. *Geomorphology*, 66(1–4), 215–235. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.014>
- McDougall, S. (2006). *A new continuum dynamic model for the analysis of extremely rapid landslide motion across complex 3D terrain* (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- McDougall, S. (2017). 2014 Canadian geotechnical colloquium: Landslide runout analysis — current practice and challenges. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(5), 605–620. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0104>
- McDougall, S., & Hungr, O. (2004). A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(6), 1084–1097. <https://doi.org/10.1139/t04-052>
- McDougall, S., & Hungr, O. (2004a). A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(6), 1084–1097. <https://doi.org/10.1139/t04-052>
- McDougall, S., & Hungr, O. (2005). Dynamic modelling of entrainment in rapid landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(5), 1437–1448. <https://doi.org/10.1139/t05-064>
- Moussavi Tayyebi, Saeid. (2019). A two-phase SPH depth integrated model for debris flow propagation considering pore- water pressure evolution. 10.20868/UPM.thesis.57431.
- Pastor, M., Blanc, T., Haddad, B., Petrone, S., Sanchez Morles, M., Dremptic, V., Issler, D., Crosta, G. B., Cascini, L., Sorbino, G., & Cuomo, S. (2014). Application of a SPH depth-integrated model to landslide run-out analysis. *Landslides*, 11(5), 793–812. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0484-y>
- Pastor, M., Haddad, B., Sorbino, G., Cuomo, S., & Dremptic, V. (2009). A depth-integrated, coupled SPH model for flow-like landslides and related phenomena. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33(2), 143–172. <https://doi.org/10.1002/nag.705>
- Pastor, M., Yague, A., Stickle, M. M., Manzanal, D., & Mira, P. (2017). A two-phase SPH model for debris flow propagation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 42(3), 418–448. <https://doi.org/10.1002/nag.2748>
- Peng, C., Guo, X., Wu, W., & Wang, Y. (2016). Unified modelling of granular media with smoothed particle hydrodynamics. *Acta Geotechnica*, 11(6), 1231–1247. <https://doi.org/10.1007/s11440-016-0496-y>
- Peng, C., Zhan, L., Wu, W., & Zhang, B. (2021). A fully resolved SPH-dem method for heterogeneous suspensions with arbitrary particle shape. *Powder Technology*, 387, 509–526. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.044>

- Pérez, F. L. (2001). Matrix granulometry of catastrophic debris flows (December 1999) in Central Coastal Venezuela. *CATENA*, 45(3), 163–183. [https://doi.org/10.1016/s0341-8162\(01\)00149-7](https://doi.org/10.1016/s0341-8162(01)00149-7)
- Perla, R., Cheng, T., & McClung, D. (1980). A Two-Parameter Model of Snow-Avalanche Motion. *Journal of Glaciology*, 26(94), 197-207. doi:10.3189/S002214300001073X
- Perrone, A., Lapenna, V., & Piscitelli, S. (2014). Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A Review. *Earth-Science Reviews*, 135, 65–82. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.04.002>
- Phillips, C. J., & Davies, T. R. H. (1991). Determining rheological parameters of debris flow material. *Geomorphology*, 4(2), 101–110. [https://doi.org/10.1016/0169-555x\(91\)90022-3](https://doi.org/10.1016/0169-555x(91)90022-3)
- Pierson, T. C. (2005). Distinguishing between debris flows and floods from field evidence in small watersheds. *Fact Sheet*. <https://doi.org/10.3133/fs20043142>
- Pierson, T. C., & Costa, J. E. (1987). A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. *Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation*, 1–12. <https://doi.org/10.1130/reg7-p1>
- Pitman, E. B., & Le, L. (2005). A two-fluid model for avalanche and debris flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 363(1832), 1573–1601. <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1596>
- Pouliquen, O., & Forterre, Y. (2002). Friction law for dense granular flows: Application to the motion of a mass down a rough inclined plane. *Journal of Fluid Mechanics*, 453, 133-151. doi:10.1017/S0022112001006796
- Pudasaini, S. P. (2012). A general two-phase debris flow model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3). <https://doi.org/10.1029/2011jf002186>
- Pudasaini, S. P., & Fischer, J. T. (2016). A mechanical model for phase-separation in debris flow. arXiv preprint arXiv:1610.03649.
- Pudasaini, S. P., & Fischer, J.-T. (2020). A mechanical model for phase separation in debris flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 129, 103292. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103292>
- Pudasaini, S. P., & Krautblatter, M. (2021). The mechanics of landslide mobility with erosion. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26959-5>
- Pudasaini, S. P., & Mergili, M. (2019). A multi-phase mass flow model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(12), 2920–2942. <https://doi.org/10.1029/2019jf005204>
- Qarqori, Kh., Rouai, M., Moreau, F., Saracco, G., Dauteuil, O., Hermitte, D., Boualoul, M., & Le Carlier de Veslud, C. (2012). Geoelectrical tomography investigating and modeling of fractures network around bittit spring (middle atlas, Morocco). *International Journal of Geophysics*, 2012, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2012/489634>
- Rezaei, S., Shooshpasha, I., & Rezaei, H. (2018). Reconstruction of landslide model from ERT, geotechnical, and field data, Nargeschal landslide, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(5), 3223–3237. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1352-0>
- Rickenmann, D. (1999). *Natural Hazards*, 19(1), 47–77. <https://doi.org/10.1023/a:1008064220727>
- Rodriguez-Paz, M., & Bonet, J. (2005). A corrected smooth particle hydrodynamics formulation of the shallow-water equations. *Computers & Structures*, 83(17–18), 1396–1410. doi:10.1016/j.compstruc.2004.11.025

- Salm, B. (1993). Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches. *Annals of Glaciology*, 18, 221-226. doi:10.3189/S0260305500011551
- Sassa, K., Nagai, O., Solidum, R., Yamazaki, Y., & Ohta, H. (2010). An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide. *Landslides*, 7(3), 219–236. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0230-z>
- Savage, S. B., & Hutter, K. (1989). The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *Journal of Fluid Mechanics*, 199, 177–215. <https://doi.org/10.1017/s0022112089000340>
- Silvester, P. P., & Ferrari, R. L. (2003). *Finite elements for electrical engineers*. Cambridge Univ. Press.
- Sosio, R., Crosta, G. B., & Hungr, O. (2008). Complete dynamic modeling calibration for the Thurwieser Rock Avalanche (Italian central alps). *Engineering Geology*, 100(1–2), 11–26. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.02.012>
- Stancanelli, L. M., Peres, D. J., Cancelliere, A., & Foti, E. (2017). A combined triggering-propagation modeling approach for the assessment of rainfall induced debris flow susceptibility. *Journal of Hydrology*, 550, 130–143. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.038>
- Сунарић, Душко (2017). Инжењерска Геодинамика, теорија и пракса, *Институт за водoprивреду „Јарослав Черни“*, Београд, ИСБН 978-86-82565-49-9
- Takahashi, T. (2007). *Debris flow: Mechanics, prediction and countermeasures* (1st ed.). Taylor & Francis.
- Тауеби, S. M., Pastor, M., Stickle, M. M., Yagüe, Á., Manzanal, D., Molinos, M., & Navas, P. (2022). SPH numerical modelling of landslide movements as coupled two-phase flows with a new solution for the interaction term. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 96, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2022.06.002>
- Trujillo-Vela, M. G., Ramos-Cañón, A. M., Escobar-Vargas, J. A., & Galindo-Torres, S. A. (2022). An overview of debris-flow mathematical modelling. *Earth-Science Reviews*, 232, 104135. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104135>
- Varnes, D.J. (1978) Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., *Landslides, Analysis and Control*, Transportation Research Board, Special Report No. 176, National Academy of Sciences, 11-33.
- Voellmy, A., & Roch, A. (1955). Über Die Zerstörungskraft von Lawinen. Schweizer. Bauzeitung.
- Wang, F., & Sassa, K. (2018). A modified geotechnical simulation model for landslide motion. *Landslides*, 709–714. <https://doi.org/10.1201/9780203749197-103>
- Wang, G., & Sassa, K. (2002). Post-failure mobility of saturated sands in undrained load-controlled ring shear tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(4), 821–837. <https://doi.org/10.1139/t02-032>
- Влаховић, М. (1987) Инжењерска геологија, *Научна књига, Београд, Грађевински факултет*, Београд
- Wu, W. (2015). Recent advances in modeling landslides and debris flows. *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11053-0>
- Zienkiewicz, O. C., & Shiomi, T. (1984). Dynamic behaviour of saturated porous media; the generalized BIOT formulation and its numerical solution. *International Journal for Numerical*

and Analytical Methods in Geomechanics, 8(1), 71–96.
<https://doi.org/10.1002/nag.1610080106>

БИОГРАФИЈА

Јелка Крушић је рођена 22.11.1990. године у Никшићу, гдје је завршила основно и средње образовање. Основне студије на Рударско–геолошком факултету Универзитета у Београду, на смјеру за Геотехнику, завршила је 2013. године, са просјечном оцјеном током студија 9.23, одбранивши дипломски рад : "Геотехнички услови изградње школе у насељу Степа Степновић у Београду", са оцјеном 10. На истом смјеру, 2014. године завршила је мастер студије и стекла звање маг. инж. геологије, са просјечном оцјеном на мастер студијама 9.5, одбранивши мастер рад на тему: "Геотехнички услови изградње хидроенергетског система Зета–Крупац–Слано", са оцјеном 10.

Након завршених мастер студија, 2014. године уписује докторске академске студије на смјеру за Геотехнику. Закључно са школском 2016/2017. године положила је све испите предвиђене студијским планом и програмом са општом просјечном оцјеном 9.81.

У периоду љетњег семстра школске 2018/2019 године, била је дио програма размјене ERASMUS на Политехничком Универзитету у Мадриду, Грађевински факултет (Universidad Politécnica de Madrid, ETS de Ingenieros de Caminos - Departamento de Matemáticas e Informática Aplicadas a las ingenierías civil y naval). Презентовала је резултате својих истраживања на бројним домаћим и међународним конгресима и симпозијумима.

У децембру 2014. запослена је на Рударско—геолошком факултету као истраживач на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја под називом: "Примена GNSS и LIDAR технологије у мониторингу стабилности инфраструктурних објеката и терена " (ТР36009). Од октобра 2018. године изабрана је у звање асистента на смјеру за Геотехнику, Рударско–геолошког факултета са задужењем на предметима: Принципи инжењерске геологије, Геолошки грађевински материјали, Инжењерска геодинамика, и Инжењерска геологија.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Јелка Крушић

Број индекса Г804/14

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

„Примена нумеричких метода у моделовању тецишта са освртом на различите
реолошке услове“

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, _____

Потпис аутора

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Јелка Крушић

Број индекса Г804/14

Студијски програм Геотехника

Наслов рада „Примена нумеричких метода у моделовању тецишта са освртом на различите реолошке услове“

Ментор проф. др Биљана Аболмасов

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„Примена нумеричких метода у моделовању тецишта са освртом на различите реолошке услове“

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, _____

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.