



**УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“
ВО СКОПЈЕ**

ГРАДЕЖЕН ФАКУЛТЕТ

Катедра за геотехника



Наташа Атанас Неделковска

**СОВРЕМЕНИ МЕТОДИ ЗА ДЕТЕКЦИЈА И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА
НА НЕСТАБИЛНИ ПОЈАВИ НА ТЕРЕНОТ**

Докторски труд

Скопје, 2023

ГРАДЕЖЕН ФАКУЛТЕТ - СКОПЈЕ

Докторанд:

НАТАША АТАНАС НЕДЕЛКОВСКА

Тема:

СОВРЕМЕНИ МЕТОДИ ЗА ДЕТЕКЦИЈА И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА НА НЕСТАБИЛНИ
ПОЈАВИ НА ТЕРЕНОТ

Ментор:

Проф. д-р МИЛОРАД ЈОВАНОВСКИ

Градежен Факултет - Скопје

Комисија за одбрана:

Проф. д-р ИГОР ПЕШЕВСКИ (претседател)

Градежен Факултет – Скопје, катедра за геотехника

Проф. д-р ЃОРЃИ ЃОРЃИЕВ

Градежен Факултет – Скопје, катедра за геодезија

Проф. д-р НОРИКАЗУ ШИМИТЗУ

Јамагучи Универзитет, Јапонија

Проф.д-р БИЛЈАНА АБОЛМАСОВ

Рударско-геолошки факултет, Белград

Научна област:

Датум на одбрана:

Наташа Атанас Неделковска

СОВРЕМЕНИ МЕТОДИ ЗА ДЕТЕКЦИЈА И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА НА НЕСТАБИЛНИ ПОЈАВИ НА ТЕРЕНОТ

– А п с т р а к т –

Познавањето на дистрибуцијата на минатите свлечишта е основен предуслов за да се изгради веродостоен модел на подложност, hazard или ризик од свлекување. Овој предуслов е исполнет во областите богати со податоци, меѓутоа, во области со ограничени податоци, каде што истражувачите немаат на располагање претходно подготвен катастар, единствено решение е да се картираат нестабилностите од почеток. Оваа постапка може да одземе многу време ако се изведува преку стандардно геоморфолошко картирање или е подложна кон грешки ако се прави целосно автоматски, а сето ова е многу посложено кога се прави за големи географски региони.

Во недостиг на континуирано и систематизирано прибирање на податоци за свлечишта за Полошкиот регион, во докторската дисертација е прикажан пристап за собирање на податоци за свлечишта преку примена на современи техники за детекција и карактеризација на свлечишта и анализа на архивски податоци за свлечишта, со цел формирање на катастар на свлечишта. Во Полошкиот регион, кој зазема скоро 10% од територијата на Македонија, присуството на комплексен геолошки склоп, морфологија и посебни климатски услови, допринесуваат истиот да биде еден од најподложните региони кон свлекување.

Современите методи за детекција и карактеризација на нестабилни појави вклучуваат анализа на податоци добиени со примена на DInSAR (Differential Interferometry Synthetic Radar Aperture) технологија и LiDAR (Light Detection And Ranging) снимање. Во изминатите две децении, обработката на снимки добиени со вселенски радар со синтетички отвори преку диференцијални интерферометриски техники (DInSAR) стана многу популарна алатка за проучување на мерливите ефекти на природните или антропогените феномени (или опасности). Со DInSAR податоците се дефинираат поместувањата на површината на земјата со милиметарска точност за брзината и се добиваат информации за состојбата на активност на процесот на свлекување. LiDAR исто така е техника за далечинско снимање на теренот, и се смета за една од најнапредните алатки за собирање на податоци за свлечишта. Преку визуелна анализа на дигитален модел на теренот добиен со LiDAR снимање, се детектираат досега некартирани свлечишта. Активностите за собирање на архивски податоци за свлечишта, се состојеа: анализа на сопствени податоци за свлечишта; дигитализација на свлечишта од стари геолошки карти и од архивата на Геолошки завод на Македонија; анализа на свлечишта вдолж каналите на хидроенергетскиот систем „Маврово“; посети на повеќе геотехнички компании низ Македонија.

Со истражувањето се презентирани современи алатки за детекција и карактеризација на нестабилни појави на теренот, кои за прв пат во Македонија, директна практична примена имаат во предметните анализи за Полошкиот регион.

Со податоците за свлечишта добиени преку сите овие пристапи формирана е база на податоци (катастар на свлечишта). За свлечиштата систематизирани преку анализа на архивски податоци постојат повеќе податоци, во споредба со останатите детектирани свлечишта. Со оглед на тоа дека податоците генерално се некомплетни, односно за голем дел од свлечиштата нема точни информации за времето на активирање, предизвикувачот или механизмот на лизгање, се заклучува дека достапните податоци за свлечиштата се доволни само за моделирање на подложноста кон свлекување. Направена е проценка на подложноста кон свлекување со примена на квантитативен пристап – статистички метод, т.н. “фреквенционен однос”, кој се заснова на врска помеѓу дистрибуцијата на свлечиштата и 12 влијателни фактори (топографски, геолошки, хидролошки). Дополнително, методот на бесконечна косина е применет проценка на подложноста кон плитко свлекување.

Елаборираните и применети современи методи за детекција и карактеризација на нестабилни појави, кои за прв пат кај нас се применуваат во Полошкиот регион, може да се применат и во други региони во земјата. Со истражувањето се има намера да се потенцира достапноста на алатки кои овозможуваат да се подигне на повисоко ниво менаџирањето на ризикот од свлечишта во Македонија.

Клучни зборови: свлечишта, катастар, детекција, DInSAR, LiDAR, подложност

Natasha Atanas Nedelkovska

**CONTEMPORARY METHODS FOR DETECTION AND CHARACTERIZATION OF
UNSTABLE PHENOMENA OF THE TERRAIN**

– A b s t r a c t –

The evidence of the distribution of past landslides is a fundamental prerequisite to building a reliable landslide susceptibility, hazard, or risk model. This prerequisite is met in data-rich areas; however, in data-limited areas, where researchers do not have available landslide inventory, the only solution is to map the instabilities from scratch. This procedure can be time-consuming if performed through standard geomorphological field mapping or error-prone if done fully automatically, all of which is much more complex when done over large geographic regions.

In the absence of a timely and systematic collection of data on landslides for the Polog region, the doctoral dissertation presents an approach to the collection of data on landslides through the application of contemporary techniques for the detection and characterization of landslides and the analysis of archive data on landslides, to form a landslide inventory. In the Polog region, which occupies almost 10% of the territory of Macedonia, the combined presence of a complex geological setting, an articulate morphology, and particular climatic conditions contribute to it being one of the most landslide-susceptible regions.

The contemporary methods for detecting and characterizing unstable phenomena consist of applying DInSAR (Differential Interferometry Synthetic Radar Aperture) technology and LiDAR (Light Detection And Ranging) scanning. In the past two decades, processing spaceborne synthetic aperture radar images through differential interferometric techniques (DInSAR) has become a viral tool for studying the measurable effects of natural or anthropogenic phenomena (or hazards). As a specific remote sensing tool, DInSAR data defines ground displacements with millimeter accuracy for velocity and obtains information on the state of activity of the landslide process. LiDAR is also a remote sensing technique and is considered one of the most advanced tools for collecting landslide data. Unknown landslides are being mapped by visual analysis of the digital terrain model obtained with LiDAR scanning. The activities for the collection of archive landslide data consisted of analysis of own data on landslides; digitizing of landslides from old geological maps and the archive of the Geological Survey of Macedonia; analysis of landslides along the channels of the “Mavrovo” system for hydro energy production; visits to several geotechnical companies in Macedonia etc.

The research presents contemporary tools for detection and characterization of unstable phenomena on the terrain, which for the first time in Macedonia, they have a direct practical application in the relevant analyzes for the Polog region.

With the data on landslides obtained through all these approaches, a database (landslide inventory) was formed. There are more data for the landslides systematized through the analysis of archive data compared to the rest of the detected landslides. Considering that the data is generally incomplete, that is, for a large part of the landslides, there is no accurate information about the activation date, the trigger, or the sliding mechanism, it is concluded that the available data on the landslides are only sufficient for modeling the landslide susceptibility. Landslide susceptibility assessment was made using a quantitative approach - a statistical method, the so-called "frequency ratio"- based on the relationship between the distribution of landslides and 12 landslide predisposing factors (topographic, geological, hydrological). In addition, the infinite slope method is applied for shallow landslide susceptibility assessment.

The elaborated and applied contemporary methods for landslide detection and characterization, which for the first time in our country are applied in the Polog region, can also be applied to other regions. The research is also intended to emphasize the availability of tools and data that allow to raise the landslide risk management in Macedonia to a higher level.

Key words: landslide, inventory, detection, DInSAR, LiDAR, susceptibility

СОДРЖИНА

1.	ВОВЕД.....	1
1.1	Актуелност на проблемот	3
1.2	Содржина на докторската дисертација	6
2.	ПРЕГЛЕД НА ДОСЕГАШНИ ИСТРАЖУВАЊА	9
3.	ДЕФИНИРАНОСТ НА ПРОБЛЕМОТ, ЗАДАЧИ И ЦЕЛИ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО.....	12
3.1	Задачи и цели на истражувањето	15
4.	МЕТОДИ ЗА ДЕТЕКЦИЈА И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА НА НЕСТАБИЛНИ ПОЈАВИ	17
4.1	Конвенционални методи за детекција и карактеризација на нестабилни појави	17
4.1.1	Геоморфолошко картирање на терен	17
4.1.2	Визуелна интерпретација на аерофотографии	18
4.2	Современи методи за детекција и карактеризација на нестабилни појави	23
4.2.1	Анализа на површинска морфологија	23
4.2.2	Интерпретација и анализа на сателитски податоци	26
4.2.3	Примена на GPS/GNSS за детекција на поместувања на теренот.....	31
5.	ГЕНЕРАЛЕН ПРИКАЗ НА МЕТОДОЛОГИЈА НА РАБОТА	33
6.	ДЕТЕКЦИЈА И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА НА НЕСТАБИЛНИ ПОЈАВИ ВО ПОЛОШКИ РЕГИОН.....	37
6.1	Полошки регион	37
6.2	Катастар на нестабилни појави (свлечишта)	42
6.3	Формирање на катастар на свлечишта на Полошки регион преку собирање на архивски податоци.....	44
6.3.1	Анализа на податоците во базата на податоци	46
6.4	Примена на DInSAR техника за детекција на нестабилни зони	53
6.4.1	Дефинирање на најсоодветна процедура за избор, обработка и интерпретација на DInSAR податоци.....	53
6.4.2	Избор на соодветни SAR снимки и формирање на „a priori DInSAR карта на видливост“	55
6.4.3	Обработка на Sentinel-1 SAR снимките	59
6.4.4	Анализа на Sentinel LOS DInSAR брзина и споредба со катастарот на свлечишта за Полошкиот регион	62
6.4.5	Откривање на подрачја т.н „жаришта“ кои не се вклучени во катастарот на свлечишта	68
6.5	Резиме на досега направените анализи	72
6.6	Примена на ДТМ од LiDAR снимање на теренот за детекција на свлечишта	76
6.6.1	Детекција на свлечишта врз основа на ДТМ од LiDAR скенирање на теренот	76

7. МОДЕЛИ ЗА КАРАКТЕРИЗАЦИЈА НА ПОДЛОЖНОСТА (РЕЛАТИВНИОТ ХАЗАРД) КОН СВЛЕЧИШТА ВО ПОЛОШКИОТ РЕГИОН	86
7.1 Катастарска карта на нестабилни појави на анализираното подрачје	87
7.2 Избор на влијателни фактори за појава на свлечишта.....	88
7.2.1 Топографски фактори.....	89
7.2.2 Геолошки фактори.....	95
7.2.3 Хидролошки фактори.....	96
7.2.4 Фактори за користење/покриеност на земјиште	98
7.3 Проценка на подложност кон свлекување.....	100
7.4 Проценка на подложност кон плитки свлечишта	113
7.4.1 Анализирани сценарија и добиени резултати.....	117
7.5 Анализа на картите на подложност.....	120
8. ЗАКЛУЧОЦИ И ПРЕПОРАКИ	128
СПИСОК НА ЛИТЕРАТУРА.....	136

СПИСОК НА СЛИКИ

Слика 1 Човечки и економски загуби заради фатални свлечишта во Европа (Haque et al. 2016).	4
Слика 2 Примери за случени свлечишта во Македонија	5
Слика 3 Слики од свлечишта и зафатена инфраструктура (објекти) при последниот катастрофален настан во Полошкиот регион на 3ти август 2015 година: (a) Течиште во близина на мала електрична централа; (b) Патека на течиште низ село Шипковица; (c) Патен правец Шипковица – Бродец целосно затрупан со материјал од течиште; (d) Зафатена површина во село Голема Речица. (Peshevski et al. 2017)	6
Слика 4 Поделба на поместувањата на теренот според Varnes (1978) (преводот на македонски јазик е преземен од Јовановски и др. 2015).....	14
Слика 5 Дел од црно-бела аерофотографија направена во размер 1: 33000 која покажува сипар (континуирана црна линија) во област на италијанските Алпи. Шарата, текстурата и дистрибуцијата на сиви тонови овозможуваат детекција и картирање на материјал со различна (просечна) големина, одделени со црни испрекинати линии. (преземено од Guzzetti et al. 2012)	20
Слика 6 Карти на свлечишта подготвени преку интерпретација на аерофотографии со употреба на различни стереоскопи. Лева колона: карти прикажани во размерот на собирање на информации за свлечиштата. Десна колона: карти прикажани во размерот на објавување. Карта за Ново Мексико, САД, подготвена од Cardinali et al. (1990) со користење џебни стереоскопи Abrams Model CB-1. Карта за Марке, Италија, подготвена од Antonini et al. (1993) со користење на стереоскопи Galileo SFG 3/b. Карта за Умбрија, Италија, подготвена од Antonini et al. (2002) со користење на стереоскоп Galileo Siscam Falcon ZII. (преземено од Guzzetti et al. 2012)	22
Слика 7 Компоненти на LiDAR систем и основен концепт на LiDAR технологија	24
Слика 8 Видливи свлечишта по текот на Веичка Река.....	25
Слика 9 Растечки и опаѓачки орбити (https://site.tre-altamira.com/insar/).....	28
Слика 10 Некои карактеристики на најкористените SAR сензори (https://site.tre-altamira.com/insar/).....	29
Слика 11 Генерална рамка за зонирање на ризик од свлекување (според Cascini et al. 2005)	33
Слика 12 Примена на методологија на Инженерско-Геолошко Моделирање (ИГМ) за проценка на хазард и ризик од свлекување (преземено од Baynes & Parry 2022).....	34
Слика 13 Предложен тек на процесот за детекција и карактеризација на нестабилни појави и развој на модели	36
Слика 14 Карта на тектонска реонизација на Македонија (Арсовски 1997), со локација на Полошки регион (дигитализирана од Неделковска Н.).....	38
Слика 15 Атрибутна табела од ГИС базата на податоци за свлечишта	46
Слика 16 Анализа на свлечишта според извор на податоци.....	47
Слика 17 Анализа на свлечишта според предизвикувач.....	47
Слика 18 Анализа на свлечишта според предизвикани штети	48
Слика 19 Анализа на свлечишта според предизвикани штети	48

Слика 20 Насока на поместување на свлечиштата	49
Слика 21 Класификација на свлечишта според длабина на клизна рамнина	50
Слика 22 Класификација на свлечишта според состојба на активност.....	50
Слика 23 Катастарска карта на нестабилни појави за Полошкиот регион	52
Слика 24 Општа рамка за употреба на DInSAR податоците (Peduto et al. 2015)	54
Слика 25 Стандардна покриеност на Sentinel-1 за а) растечки и с) опаѓачки орбити за опсервирање со зголемување на соодветната рамка за аквизиција во Полошкиот регион; б) опаѓачка орбита (релативна орбита бр. 175) и d) растечка орбита (релативна орбита бр. 153)..	57
Слика 26 лево: Хомогенизирана карта на користење на земјиште (според Табела 7) десно: „a priori DInSAR картата на видливост“ за Полошкиот регион	59
Слика 27 График на опсервациите на Sentinel-1 во временско/просторна рамнина.....	60
Слика 28 Проценета средна брзина на деформациите одредена според SBAS, процесирани со: а) пониска резолуција и б) преку SAR томографска анализа со целосна достапна резолуција	61
Слика 29 Картирани свлечишта поделени според тип на свлекување: во цел регион според достапниот катастар и во подрачјата опфатени со „рафал-1“, „рафал-2“ и „рафал-3“	62
Слика 30 Картирани свлечишта поделени според состојба на активност во: цел регион според достапниот катастар и подрачјата опфатени со „рафал-1“, „рафал-2“ и „рафал-3“	63
Слика 31 Просторна дистрибуција на DInSAR податоци за брзината добиена со обработка при ниска резолуција (80m x 80m) на Sentinel снимки при растечка орбита.....	64
Слика 32 Просторна дистрибуција на DInSAR податоци за брзината добиена со обработка при целосна резолуција (10m x 10m) на Sentinel снимки при растечка орбита	65
Слика 33 Карта на DInSAR покриени свлечишта во подрачјето опфатено со „рафал-1“	66
Слика 34 Карта на DInSAR покриени свлечишта во подрачјето опфатено со „рафал-2“	67
Слика 35 Карта на индицирани зони преку Sentinel DInSAR податоци	69
Слика 36 Катастарска карта со приказ на индицирани зони преку Sentinel DInSAR податоци .	74
Слика 37 Приказ на свлечишта во близина на урбанизирани области	75
Слика 38 Детекција на свлечишта во пошумен терен - горе лево: исечок од LiDAR ДТМ; горе десно: исечок од орто-фото снимка; доле лево: оконтурени свлечишта на LiDAR ДТМ; доле десно: оконтурени свлечишта на орто-фото снимка.	77
Слика 39 Визуелно препознавање на свлечишта од LiDAR ДТМ: 1) свлечиште препознаено со висока доверливост; 2) свлечиште препознаено со ниска доверливост.....	78
Слика 40 Детектирани свлечишта преку визуелна анализа на LiDAR ДТМ.....	78
Слика 41 лево: ДТМ; десно: произведен мешан растер (розови пиксели – конкавни површини, сини пиксели – конвексни површини).....	82
Слика 42 Методологија за моделирање на зони на свлечишта со SICCM.....	83
Слика 43 Детектирани свлечишта во Полошкиот регион врз база на LiDAR ДТМ	84
Слика 44 Карта со свлечишта во подрачјето за анализа	88

Слика 45 Карта на наклон на терен	90
Слика 46 Карта на надморска височина	90
Слика 47 Карта на аспект на теренот.....	91
Слика 48 1) Закривеност во основа (конвексна “+”, конкавна “-” линеарна “0”) 2) Закривеност во профил (конвексна “-”, конкавна “+” линеарна “0”).....	92
Слика 49 Карта на закривеност во основа.....	92
Слика 50 Карта на закривеност во профил	93
Слика 51 Карта на индекс за нерамност на терен.....	94
Слика 52 Карта на фактор растојание до патишта	94
Слика 53 Карта на литолошки единици	95
Слика 54 Карта за растојание до раседи.....	96
Слика 55 Карта на врнежи.....	97
Слика 56 Карта за близина до река.....	97
Слика 57 Карта на користење/покриеност на земјиштето	98
Слика 58 Статистичка обработка на резултати за фактор “наклон на терен”	103
Слика 59 Статистичка обработка на резултати за фактор “надморска височина”	104
Слика 60 Статистичка обработка на резултати за фактор “ориентација”.....	104
Слика 61 Статистичка обработка на резултати за фактор “закривеност во основа”	105
Слика 62 Статистичка обработка на резултати за фактор “закривеност во профил”	105
Слика 63 Статистичка обработка на резултати за фактор “нерамност на терен”	106
Слика 64 Статистичка обработка на резултати за фактор “растојание до патишта”	106
Слика 65 Статистичка обработка на резултати за фактор “литологија”	107
Слика 66 Статистичка обработка на резултати за фактор “литологија”.....	107
Слика 67 Статистичка обработка на резултати за фактор “растојание до раседи”	108
Слика 68 Статистичка обработка на резултати за фактор “врнежи”	108
Слика 69 Статистичка обработка на резултати за фактор “растојание до реки”	109
Слика 70 Статистичка обработка на резултати за фактор “користење/покриеност на земјиште”	109
Слика 71 Статистичка обработка на резултати за фактор “користење/покриеност на земјиште”	110
Слика 72 Карта на подложност кон свлекување.....	111
Слика 73 Статистички преглед на резултати од карта на подложност кон свлекување.....	112
Слика 74 R-индекс за класи на подложност кон свлекување	113
Слика 75 Шематски приказ на метод на бесконечна косина (Skempton & DeLory 1957)	114
Слика 76 Модели на подложност кон плитки свлечишта за Сценарио 1 и Сценарио 2	117

Слика 77 Модели на подложност кон плитки свлечишта за Сценарио 3 и Сценарио 4	118
Слика 78 Зависност помеѓу фактор на сигурност и надморска височина	119
Слика 79 Зависност помеѓу фактор на сигурност и наклон на терен.....	119
Слика 80 Приказ на DInSAR индицираните зони на картата на подложност кон свлекување .	121
Слика 81 Приказ на DInSAR индицирана зона A10 на картата на подложност кон свлекување	122
Слика 82 Приказ на DInSAR индицирана зона A20 на картата на подложност кон свлекување	122
Слика 83 Приказ за споредба на карта со дефиниран коефициент на ерозија и подложност кон свлекување на теренот	123
Слика 84 Приказ за споредба на карти на подложност кон свлекување на теренот според две различни методологии (лево: искусствен пристап; десно: “фреквенционен однос” метод).....	124
Слика 85 Промена на фактор на сигурност во зависност од коефициент на хоризонтално сеизмичко забрзување kx (Пешевски, 2015)	125
Слика 86 Деформиран доведен цевковод за град Тетово заради активирано свлечиште	126
Слика 87 Hillshade подлога со локација на свлечиште и доведен цевковод	126
Слика 88 Google снимка на зоната на свлечиште означена со стрелка (видлива голема пошуменост на десен брег на Бозовска река, додека левиот е изложен на значајна ерозија но без свлечишта)	127
Слика 89 Корелација меѓу еродибилност и фактор на сигурност за анализирано подрачје	127

СПИСОК НА ТАБЕЛИ

Табела 1 Класификација на свлечишта според Cruden & Varnes (1996)	13
Табела 2 Класификација на свлечишта според брзина на движење/свлекување (Cruden & Varnes 1996)	13
Табела 3 Карактеристики на GPS/GNSS и DInSAR технологија (преземено од: 41 st ISRM Online Lecture – 23.03.23 - Prof. Norikazu Shimizu - https://isrm.net/page/show/1666).....	32
Табела 4 Структура на базата на податоци за свлечишта на Полошки регион	45
Табела 5 Класификација на свлечишта според големина на површината	49
Табела 6 Класификација на свлечишта според литолошки состав	51
Табела 7 Хомогенизирани класи за користење на земјиштето (Corine 2018) за Полошки регион	58
Табела 8 Вид и состојба на активност на DInSAR опфатени свлечишта и измерена брзина во подрачјето опфатено со “рафал 1”	66
Табела 9 Вид и состојба на активност на DInSAR опфатени свлечишта и измерена брзина во подрачјето опфатено со “рафал 2”	67
Табела 10 Анализа на Sentinel DInSAR податоци за детекција на свлечишта	70
Табела 11 Детектирани свлечишта со визуелна анализа на LiDAR ДТМ.....	79
Табела 12 Преглед на фактори за анализа на подложност кон свлекување	99
Табела 13 Анализа на врска помеѓу избрани влијателни фактори и случени свлечишта со примена на методот “фреквенционен однос”	101
Табела 14 Табеларен преглед на добиени резултати од карта на подложност кон свлекување	112
Табела 15 Влезни геотехнички параметри за литолошките единици	115
Табела 16 Усвоени вредности за коренска кохезија за типови на земјиште и вегетациски видови (прилагодено според Chok et al. 2015).....	115
Табела 17 Класи на стабилност за проценка на подложност кон плитски свлечишта	116
Табела 18 Преглед на зони на подложност кон свлекување за повратен период од 100 год. на максимално очекуван сеизмички интензитет	125

1. ВОВЕД

Низ целиот свет, луѓето се соочуваат со предизвикот да воспостават рамнотежа помеѓу ризикот од природните хазарди (геохазарди) и потребата за урбанизација на просторот. Во природата се познати голем број на геохазарди како што се земјотресите, вулканските ерупции, пирокластичните токови, нестабилности на теренот (поместувања на теренот), колапси, снежни лавини, шумски пожари, поплави итн., кои имаат негативен ефект врз човештвото, животната околина и градежната активност.

Како геохазард, различните видови на поместувања на теренот, или во стручната литература познати како “свлечишта”, се особено значаен и ограничувачки фактор при просторното планирање. Овој поим опфаќа повеќе типови на движење на материјал, односно лизгање, течење, превртување, одронување, но исто така е можна комбинација на две или повеќе видови движења.

По дефиниција “свлечиште” е секое поместување на маса од карпа, дробина или земјен материјал, по косина и под влијание на гравитација (Varnes 1978; WP/WLI 1990; Cruden 1991; Cruden & Varnes 1996).

Изненадувачки факт за многу луѓе е дека свлечиштата може да се појават буквално на било кое место во светот и во различни геолошки, геоморфолошки и климатско хидролошки и хидрогеолошки услови. Традиционалното гледиште дека свлечиштата се карактеристични за екстремно стрмни терени не ја одразува точно вистинската природа на проблемот. Имено, стрмните косини не се неопходен предуслов за да се активираат свлечишта, бидејќи познати се случаи каде се регистрирани свлекувања долж благи косини со наклони од 1 – 2 степени (Highland & Bobrowsky 2008). Свлечишта може да се случат и на површината на теренот, но и како подводни во езерата и морињата, во карпеста или почвена средина, на обработливи земјишта, неплодни падини и природни шуми, како и во екстремно суви но и во многу влажни области. Причината за ваквата широка распространетост на овие појави е поврзана со различните причинители “предизвикувачи”, односно фактори кои доведуваат до нивно активирање. Факторите можат да бидат природни (интензивни или долготрајни врнежи, топење на снег, земјотреси, вулканска активност) и антропогени (разни човечки активности како ископ во ножица на косина, дренарање, наводнување или одводнување, сечење на шуми, предизвикување на вештачки вибрации и сл.), но најчесто комбинацијата на некои од овие два типа на фактори може да предизвика поместување на теренот.

Во денешно време, и покрај значителниот напредок во стручното разбирање на механизмите на нестабилностите и достапноста на техники за намалување и избегнување на негативното влијание од истите, свлечиштата сè уште се причина за многу човечки жртви и огромни економски загуби низ целиот свет. Во извештај направен во соработка на Канцеларијата за намалување на ризикот од катастрофи на Обединетите нации и Центарот за истражување на епидемиологија на катастрофи, се наведува дека свлечиштата сочинуваат 5.4% од сите климатски-поврзани катастрофи што се случиле ширум светот во последните две децении, а од сите пријавени природни катастрофи од 1998 до 2017 година, свлечиштата погодиле околу пет милиони луѓе (Wallemaq & House 2018). Во студијата на Petley (2012) се наведува дека загубата на животи е поконцентрирана во помалку развиените земји (земји во развој), каде што се посветува релативно малку внимание и не се инвестира во разбирање на опасностите и ризиците поврзани со природните нестабилни појави на теренот, а што од друга страна

главно се должи на недостаток на соодветни ресурси. Бидејќи светското население продолжува да се зголемува, што значи проширување на населените места и брза урбанизација на просторот, луѓето се повеќе се изложени на hazard од поместувања на теренот. Лошата или непостоечка политика за користење на земјиштето дозволува преземање на градежни активности на локации несоодветни за урбанизација, односно изградба на објекти на стрми терени или во близина на значајни водени токови, ископ во ножица на падини и други слични активности. При вакви околности властите честопати не се подготвени да ги менаџираат успешно овие небезбедни градежни практики и немаат легитимни законски регулативи или експертиза за тоа. Оттука се наметнува потребата на носителите на одлуки да им се обезбедат соодветни подлоги кои содржат информации за зоните на теренот што можат да бидат погодени од различни нестабилни појави, за истите да бидат земени во предвид при идно планирање на просторот, или пак за оптимално спроведување на соодветни мерки за ублажување на ризикот од нив.

За да се подготват соодветните подлоги со зонирање на нестабилни појави на теренот, основен предуслов е веќе случените појави и процеси да бидат детектирани и окарактеризирани на задоволителен начин. Од суштинско значење е да се следи просторната распределба и локацијата на свлечиштата, односно истите да се евидентираат во една централизирана база на податоци (т.н. катастар на свлечишта). Податоците од катастрот на свлечишта заедно со податоци за морфолошки, геолошки, тектонски, климатски и останати карактеристики за теренот, овозможуваат да се направат бројни анализи за можноста од појава на идни свлечишта, односно да се изврши напред споменатото зонирање т.е. поделба на теренот во хомогени области или домени и нивно рангирање според степени на подложност, hazard или ризик од свлекување.

Познавањето на дистрибуцијата на минатите свлечишта како основен предуслов за да се изгради веродостоен модел на подложност, hazard или ризик од свлекување е однапред исполнет во областите богати со податоци. Меѓутоа, во области со ограничени податоци, каде што истражувачите немаат на располагање претходно подготвен катастар, единствено решение е да се картираат нестабилностите од почеток. Оваа постапка може да одземе многу време ако се изведува преку стандардно геоморфолошко картирање на теренот или е подложна кон грешки ако се прави целосно автоматски, а сето ова е многу посложено кога се прави за големи географски региони.

Во недостиг на континуирано и систематизирано прибирање на податоци за свлечишта во Македонија, во докторската дисертација е прикажан пристап за собирање на податоци за свлечишта преку примена на современи техники за детекција и карактеризација на свлечишта и анализа на архивски податоци за свлечишта, со цел формирање на катастар на свлечишта. Како подрачје за анализа е одреден Полошкиот регион. Причина за тоа е што за овој регион се прибрани, систематизирани и анализирани голем број на податоци во рамките на Проект спонзориран од УНДП, а кој се спроведе од страна на Градежниот факултет во Скопје, во соработка со Универзитетот во Салерно и Институтот за географија при Природно Математичкиот Факултет во Скопје. Како автор на дисертацијата, директно бев вклучена во изработката на проектот во сите фази на анализа, со што се создаде и базата за сопствени анализи и подготовка на голем број на модели, со кои се верифицира предложената методологија на работа.

Анализирани се податоци добиени со примена на DInSAR (Differential Interferometry Synthetic Radar Aperture) технологија и LiDAR (Light Detection And Ranging) снимање, кои се сметаат за најнапредни техники во оваа област на

инженерството. Во изминатите две децении, обработката на снимки добиени со вселенски радари со синтетички отвори преку диференцијални интерферометриски техники (DInSAR) стана многу популарна алатка за проучување на мерливите ефекти на природните или антропогените феномени (или опасности). Како специфична алатка за далечинско набљудување, со DInSAR податоците се дефинираат поместувањата на површината на земјата со милиметарска точност за брзината и се добиваат информации за состојбата на активност на процесот на свлекување. На територијата на Европа, податоците за поместувањата се добиваат воглавно од сателити со кои раководи Европската вселенска агенција (ЕСА) или национални агенции за сателити. Од друга страна, LiDAR исто така е техника за далечинско снимање на теренот, и се смета за една од најнапредните алатки за собирање на податоци за свлечишта. LiDAR снимањето може да се повтори повеќе пати на иста област за да се добијат претстави на топографската површина за повеќевременски анализи, вклучувајќи и квантитативни волуметриски проценки за свлечиштата. Податоците за свлечишта добиени со овие методи, заедно со архивски податоци за свлечишта, формираат база на податоци односно катастар на свлечишта.

Според нашите сознанија, DInSAR технологија за откривање на поместувања, како и визуелна детекција на нестабилности преку анализа на податоци од LiDAR скенирање на теренот, за **прв пат** во Македонија се применува во Полошкиот регион.

Паралелно со современите начини за прибирање на податоци за свлечишта и дефинирање на нивните карактеристики, методите за зонирање на подложноста кон свлекување на теренот исто така доживуваат сериозен развој во последната деценија. Се почеста е примената на квантитативни пристапи, како што се статистичките. Моделите на подложност на теренот кои се подготвени со примена на овие методи се базираат на математичка врска помеѓу свлечиштата и предизвикувачките фактори. Со овие методи теренот се класифицира според степенот на подложност кон свлекување, а начинот на кој касификаторот конкретно функционира е да го мери придонесот на секој предиспонирачки фактор кон појавата на свлечишта, врз основа на просторна корелација помеѓу случените свлечишта и овие фактори. Во денешно време, со големата достапност на високо квалитетни геоморфолошки податоци и примената на географски информативни системи (ГИС), овие методи добиваат на значење и се најчесто применувани пристапи за оваа намена. Со нив може да се анализираат големи површини (од регионални до национални размери, па и континентални) со релативно мала инвестиција во време и логистика. Примена на овој тип на методи се прави и во ова истражувања, со цел зонирање на предметното истражно подрачје од аспект на подложност кон свлекување.

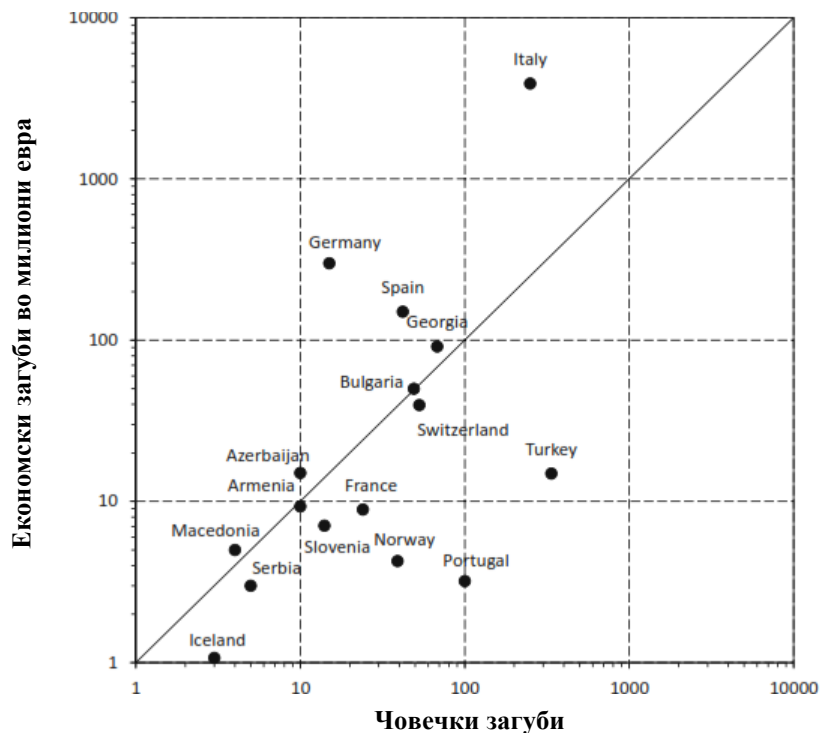
Во докторската дисертација, зборовите: “свлечиште”, “поместување”, “нестабилност” и “лом на косина” се користат како синоними. Други користени синоними се “катастар”, “катастар на свлечишта”, “катастар на нестабилни појави” и “катастарска карта”. Целиот материјал е проследен со табели, слики, граfiци, картографски прикази и прилози, со цел да се добие појасна претстава и полесно и комплетно разбирање на проблемот кој е предмет на оваа дисертација.

1.1 Актуелност на проблемот

Во последните децении на дваесеттиот век, проширувањето на населените места, брзата урбанизација и глобалните климатски промени предизвикаа значително зголемување на геохазардите (Schuster & Highland 2001). Свлечиштата (поместувањата на теренот) се меѓу најзначајните и најраспространетите геохазарди, кои создаваат

огромни социјални и економски загуби ширум светот (Herrera et al. 2018). Според еден извештај на Светска банка од 2005 година, $3,7 \times 10^6$ km² земјишна површина ширум светот е подложна кон свлекување, а скоро 300 милиони луѓе живеат во области со потенцијален ризик од свлекување (Dilley et al. 2005). Од 2004 до 2010 година, во светот се документирани 2620 свлечишта, кои предизвикале 32 322 жртви (Petley 2012). Свлечиштата исто така предизвикуваат милијарди евра материјална штета на инфраструктурата, како што се патишта, железници, објекти, насипи, згради и други загуби на имоти (SafeLand 2015).

На ниво на Европа, неодамнешна студија на Naque et al. (2016) покажува дека во 27 анализирани европски земји и Турција (дел од студијата е и Македонија), во текот на 20-годишниот период помеѓу 1995-2014 година, биле евидентирани 1370 смртни случаи и 784 повредени, при случени 476 свлечишта. Економските загуби како резултат на свлечиштата се исто така значителни во многу од анализираниите европски земји. За добивање на генерална претстава за човечките и економските загуби кои можат да ги предизвикаат свлечиштата, Слика 1 дава дијаграмски приказ за нивната големина во некои европски земји.



Слика 1 Човечки и економски загуби заради фатални свлечишта во Европа (Naque et al. 2016)

Во Македонија секоја година различните видови на нестабилни појави на теренот предизвикуваат значителни загуби, кои се мерат во милиони евра, а за жал, покрај материјалните штети има и загуба на човечки животи. На Слика 2 прикажани се неколку примери на настанати свлечишта. Примерите илустрираат прекинат или отежнат сообраќај, уништени јавни и приватни објекти и земјоделски површини, како и загрозување на човечки животи, заради нестабилности на теренот на територијата на Македонија. Фотографиите се преземени од личната архива на авторот и колеги од струката, а некои од домашни интернет портали.

Студијата на Peshevski et al. (2013) покажува дека 60% од случените свлечишта го имаат попречено или блокирано сообраќајот на автопатиштата, регионалните и

локалните патишта, 10% од свлечиштата загрозиле цели населби, додека 30% оштетиле индивидуални градби во рурални или урбани подрачја. Во однос на човечките жртви, во неколку настани во период од 1995 до 2014 година, 15 луѓе биле тешко повредени или ги загубиле нивните животи како последица на свлечишта (Naque et al. 2016).



Свлечиште на експресен пат Штип – Радовиш (јуни, 2020 год.)



Свлечиште на земјоделска површина во Црник-Пехчево



Одрони на патен правец АЗ Кочани – М.Каменица, делница Истибања – брана Калиманци (2021 год.)



Свлечиште на автопат Миладиновци – Штип (2020 год.)



Свлечиште на регионален пат Маврови анови – Дебар (2010 год.)



Уништена куќа од одрон во Тетово (2010 год.)

Слика 2 Примери за случени свлечишта во Македонија

На 3ти август 2015 година, после пролонгирани и интензивни врнежи во Полошкиот регион, 6 луѓе од село Порој го изгубиле својот живот како резултат на

активирани свлечишта во овој регион (Peshevski et al. 2017). Овој настан во Полошкиот регион уште еднаш потсети дека свлечиштата претставуваат сериозен природен hazard кај нас. Затоа, неопходноста за соодветно управување со ризикот во овој дел од земјата е ургентна, а детекцијата и карактеризацијата на нестабилните појави на теренот се главен предуслов за реална проценка на подложноста, hazardот и ризикот од свлекување.



Слика 3 Слики од свлечишта и зафатена инфраструктура (објекти) при последниот катастрофален настан во Полошкиот регион на 3ти август 2015 година: **(a)** Течиште во близина на мала електрична централа; **(b)** Патека на течиште низ село Шипковица; **(c)** Патен правец Шипковица – Бродец целосно затрупан со материјал од течиште; **(d)** Зафатена површина во село Голема Речица. (Peshevski et al. 2017)

Овие податоци укажуваат дека населението во Македонија во голем дел е изложено на константен ризик од свлекување. Имено, во селата Велебрдо, Требиште, Ростуше, Битуше, Скудриње, Могорче, Јеловјане, Боговиње, делови од градовите Велес, Прилеп и Струмица живее популација од преку 20 000 жители кои се директно или индиректно загорзени од свлечиштата. Ова недвосмислено укажува на значењето и потребата за реализација на истражувања какво што е направено во дисертацијата.

1.2 Содржина на докторската дисертација

При реализација на дисертацијата запазена е вообичаената научна методологија, која се состои од дефинирање на научниот проблем, соодветна научна разработка и најпосле анализа на добиените резултати. Генералната концепција на трудот се состои од подготвителна фаза каде се изврши проучување на досегашната литература во полето и се дава теоретски осврт кон современите пристапи за детекција, карактеризација и подготовка на карти на нестабилни појави. Потоа следи истражувачка фаза што опфаќа практична примена на современите методи, подготовка на карти според неколку

пристапи и анализа и споредба на добиените резултати. Дисертацијата е поделена во повеќе поглавија и ја има следната содржина:

1. Вовед – даден е воведен концепт за проблематиката која се обработува. Анализирана е актуелноста на проблемот, односно колку феноменот на нестабилни појави е присутен, какви се последиците од нив на светско, европско и национално ниво и зошто е неопходно да се проучува, со што потенцира значењето на изборот и обработката на темата.

2. Преглед на досегашни истражувања – направен е осврт кон досегашните истражувања на ова поле, и прегледана е релативно голема база на научна и стручна литература, почнувајќи од пионерските студии до најнови достапни сознанија за проблематиката.

3. Дефинираност на проблемот, задачи и цели – во ова поглавје дефиниран е проблемот за истражување, поставени се задачите на истражувањето и на крај целите односно очекуваните резултати и придонесот на тезата.

4. Методи за детекција и карактеризација на нестабилни појави на теренот – во овој дел даден е осврт кон традиционалните методи за откривање и карактеризирање на нестабилните појави на теренот. Потоа следи осврт кон современите методи. Прегледани се предностите и недостатоците на различните пристапи, како и типовите на податоци кои се добиваат при нивно имплементирање.

5. Генерален приказ на методологијата на работа – врз основа на анализа на постојната состојба со истражувањата во ова поле, како и теоретскиот осврт, во ова поглавје е прикажана усвоената методологија за работа. Методологијата е поставена врз основа на некои претходно познати концепти, но со сопствени модификации и прилагодувања, согласно на сфаќањето на проблематиката која е разработена во дисертацијата.

6. Детекција и карактеризација на нестабилни појави во Полошки регион – во ова поглавје даден е осврт кон формирањето на катастар на нестабилни појави за Полошкиот регион, опишани се преземените активности за прибирање на податоци, прикажана е структурата на базата на податоци, направена е обработка на прибраните податоци и даден е нивен приказ низ соодветни графици и табели. Даден е осврт на детекцијата на свлечишта од подлоги формирани со DInSAR и LiDAR техники применети врз регионот. Анализирани се DInSAR добиените податоци и издвоени се позиции кои покажуваат карактер на поместување (т.н. hotspots или „жаришта“). Притоа направена е контрола/ажурирање на границите и состојбата на активност на веќе картираните свлечишта од поранешни фази на картирање, а детектирани се и досега непознати свлечишта и дефинирани се нивните кинематички карактеристики до степен кој беше можен. Потоа, врз основа на визуелна анализа на дигиталниот модел на теренот добиен од LiDAR скенирање на теренот направена е детекција на други свлечишта во подрачјето за анализа. Дополнително применет е и пристап за полуавтоматско препознавање на свлечишта, а резултатите кои се добија послужија само за потврдување на нестабилностите детектирани со визуелна анализа на дигиталниот модел на теренот. Сите овие пристапи се применија со цел да приберат колку што е можно повеќе податоци за свлечишта, за да може понатаму ваквите податоци да се искористат за подготовка на модели на подложност кон свлекување за регионот.

8. Подготовка на модели за карактеризација на подложноста (релативниот хазард) од свлечишта во Полошкиот регион – во ова поглавје е даден генерален теоретски осврт кон пристапите за зонирање на подложноста кон свлекување на теренот. Опишани

се применетите методи за проценка на подложноста кон свлекување за Полошкиот регион и презентирани се добиените резултати.

9. Заклучоци и препораки за понатамошни истражувања – овде се дадени заклучоците од направеното истражување, проследени со препораки за понатамошно истражување на ова научно поле.

10. Користена литература – прикажана е референтната листа на користена стручна литература и сите материјали кои послужија при изработката на дисертацијата.

2. ПРЕГЛЕД НА ДОСЕГАШНИ ИСТРАЖУВАЊА

За целите на подготовка на докторската дисертација детално се прегледани досегашните достигнувања од областа на истражување. Конкретно, за проблематиката која ја третира оваа докторска дисертација достапна е релативно голема база на научна и стручна литература, што јасно укажува на актуелноста на проблемот. Така, проучени се голем број на трудови кои се однесуваат на класификацијата и дефинирањето на типовите на нестабилни појави, методи за одредување на стабилноста на теренот, методи за детекција на нестабилни појави и подготовка на катастри на нестабилни појави на теренот, методи за проценка на подложност, ризик и хазард од свлекување итн.

Голем број на истражувачи ја третираат класификацијата на свлечиштата па така денес постојат многу различни класификации. Како најзначајни во овој поглед се споменуваат публикациите на (Varnes 1954; Varnes 1978; Hansen 1984; IAEG 1990; Cruden 1991; Cruden & Varnes 1996; Hungr et al. 2001; Guthrie 2013; Hungr et al. 2014; Shanmugam 2015; Micu 2017; Li & Mo 2019).

Концептите за определување на стабилноста на косините исто така биле мотив за бројни истражувања. Особено важни да се споменат се пристапите за пресметка на стабилноста базирани на методот на гранична рамнотежа, а разработувани во различни периоди и од различни автори (Fellenius 1927; Bishop 1955; Morgensten & Price 1965; Spencer 1967; Janbu 1973). Методот на бесконечна косина го развиваат Skempton & Delory (1957), и до денес се познати голем број на трудови каде овој метод е основа за анализи на плитски свлечишта (Frattini et al. 2004; Rosso et al. 2006; Godt et al. 2008; D'Amato et al. 2009; Griffiths et al. 2011; Lee & Park 2015; Chinkulkijniwat et al. 2019).

Во однос на зонирањето на нестабилни појави, првите формални примени се засновани на квалитативни пристапи, и датираат од 1970-тите години (Brabb et al. 1972; Kienholz 1978), додека квантитативните методи се развиени во 80-тите години на минатиот век (Varnes & IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements, 1984; Brand 1988), а особено во 90-тите години на минатиот век за справување со ризици од индивидуални косини (Wong et al. 1997; Hardingham et al. 1998) или од голем број на косини (Wong & Ho 1998). Овој развој на пристапите е опишан од Ho et al. (2000) и Wong (2005). Постојат и доста трудови од поново време (Lee et al. 2018; Lin et al. 2019; Hearn & Hart 2019).

Подетален преглед на досегашните истражувања е направен за методите за детекција, карактеризација и подготовка на карти на нестабилни појави, кои претрпеле голема еволуција во тек на време. Во контекст на ова може да се каже дека постојат конвенционални (традиционални) и современи методи. Конвенционалните методи вклучуваат (1) геоморфолошко картирање на теренот (Brunsden 1985) и (2) визуелна интерпретација на стереоскопски аеро-фотографии (Rib & Liang 1978; Brunsden 1993; Turner & Schuster 1996). Истражувачите исто така користат современи и нови методи и технологии за откривање и картирање на свлечишта на големи области. Guzzetti et al. (2012) во својот труд новите пристапи ги групираат во три главни категории: (I) анализа на површинска морфологија, главно со користење на дигитални модели на теренот (ДЕМ) со многу висока резолуција, добиени од летала со различни техники на профилирање на теренот и LiDAR (Light Detection And Ranging) сензори (Schulz 2004; Chen et al. 2006; Ardizzone et al. 2007; Schulz 2007; Baldo et al. 2009; Corsini et al. 2009; Kasai et al. 2009; Prokop & Panholzer 2009; Derron & Jaboyedoff 2010; Razak et al. 2011; Gazibara et al. 2017); (II) интерпретација и анализа на сателитски слики што вклучува: (1) визуелна интерпретација на панхроматски, композитни слики збогатени со бои или

со исфилтрирани спектри/појаси на бои (со цел да се олесни интерпретацијата) (Marcelino et al. 2009; Fiorucci et al. 2011; Gazibara et al. 2017), (2) анализа на мултиспектрални снимки (Cheng et al. 2004; Metternicht et al. 2005; Rosin & Hervás 2005; Barlow et al. 2006; Lee & Lee 2006; Weirich & Blesius 2007; Martha et al. 2010; Tsai et al. 2010; Mondini et al. 2011; Parker et al. 2011), и (3) анализа на SAR снимки (Synthetic Aperture Radar – Радар со Синтетички Отвор) (Czuchlewski et al. 2003; Singhroy & Molch 2004; Farina et al. 2006; Lauknes et al. 2010; Calvello et al. 2016; Peduto et al. 2016, 2017, 2018); и (III) употреба на нови алатки за подобрување на картирањето на теренот, при што највредната технологија е сателитски-базиран ГПС, кој направи револуција во начинот на спроведување на геоморфолошките анализи, овозможувајќи брзо лоцирање на карактеристиките на топографската површина со релативно висока едноставност и со голема точност (Fiorucci et al. 2011; Shimizu et al. 2014).

Проценката на подложноста, hazardот и ризикот од свлекување е тема на многубројни трудови до денес (Varnes 1984; Fell 1994; Glade 2001; Chansón & Corominas 2003; Van Westen 2004; Fell et al. 2008; Jaedick et al. 2014; Althuwaynee et al. 2017; Ambrosi et al. 2018; Pourghasemi & Rahmati 2018; Segoni et al. 2020).

Првите трудови за употребата на дигитални просторни податоци за картирање на подложноста кон свлекување се напишани во седумдесеттите години на минатиот век од Brabb et al. (1972) во Калифорнија и Carrara et al. (1977) во Италија. Првиот сеопфатен преглед на примената на ГИС-технологијата за проценка на подложноста проследена со класификација на методите за анализа е направен од Van Westen (1993). Потоа, Guzzetti (2006), во својата дисертација дава бројни примери за анализа, проценка и зонирање на подложноста, hazardот и ризикот од свлекување во Италија. Преглед на видовите просторни податоци потребни за проценка на подложноста, hazardот и ризикот и методите за добивање на овие податоци е направен од Van Westen et al. (2008).

Класификација на пристапите и методите за проценка на подложноста кон свлекување дава Reichenbach et al. (2018), каде воедно се прави и критички преглед на статистичките методи за моделирање на подложноста. Во постојан пораст е примената на методите базирани на машинско учење за проценка на подложноста кон свлекување, а детален преглед на ова поле е направен од Ado et al. (2022).

За сите погоре споменати процеси на детекција, карактеризација, зонирање, проценка на подложност, hazard и ризик, подготовка на карти на нестабилни појави исл., ГИС наоѓаат огромна примена (Marjanovic et al. 2018; Titti et al. 2022). ГИС технологијата ја олеснува продукцијата, ажурирањето, визуелизацијата, анализата и објавувањето на картите на нестабилни појави, вклучувајќи: подобрени дигитални алатки за собирање и едитирање на податоци, 2D и 3D системи за визуелизација, подобрена интеграција со софтвер за обработка на слики и ефикасна интеграција со системи за управување со базата на податоци.

Во поглед на третирањето на проблемот со свлечиштата во нашата земја, во минатото, подготвени се неколку методологии, програми, студии и истражувања. Првата база со податоци за свлечишта била воспоставена во времето на поранешната Југословенска федерација во периодот 1960-1970 год. Во овој период била подготвувана Основната Геолошка Карта на Р.Македонија (ОГК) во размер 1:100000 и на истата биле нанесени сите забележани свлечишта, а за дел од нив напишани се и соодветни извештаи. Во периодот 1990-2012 биле подготвени неколку програми за собирање податоци за свлечишта, кои релативно успешно се реализирале. Во Македонија во ова поле позначајни се трудовите: Jovanovski et al. (2011) предлагаат методологија за анализа

на евалуациони фактори кај хазард од свлекување со примена на полиномна интерполација; Jovanovski et al. (2011) објавуваат труд под наслов “Свлечишта во Република Македонија предизвикани од екстремни настани во 2010 година”; Пешевски (2015) предлага пристап за моделирање на подложноста кон свлекување на теренот со примена на ГИС технологија, а подоцна и Peshevski et al. (2019). Milevski et al. (2019) применуваат комбинација на статистички и експертски метод за моделирање на подложноста кон свлекување во Македонија, како прв обид за зонирање на подложноста кон свлекување на национално ниво.

На светско и европско ниво редовно се организираат научни и стручни собири на оваа тема, а за истакнување е да се споменат: Светските форуми за свлечишта (WLF - World Landslide Forum 2008; 2011; 2014; 2017), Медитерански симпозиум за свлечишта (MLS - Mediteranean Landslide Symposium 2021), регионални симпозиуми (ReSyLAB - Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region 2013; 2015; 2017; 2019; 2022), каде имам објавено трудови (Nedelkovska 2015; Nedelkovska et al. 2017; Jovanovski et al. 2021; Nedelkovska et al. 2022). Вреди да го споменам учеството на XVI Подунавско-Европска конференција за геотехничко инженерство, која се одржа во 2018 година во Скопје, во организација на Друштвото за геотехника на Македонија, на тема: Геотехнички хазарди и ризици: искуство и пракса. На конференцијата учествував како коавтор на труд на тема: Пристап за дефинирање на прифатливо ниво на ризик кај косини во цврсти карпи (Peshevski et al. 2018). На теми поврзани со хазарди и ризици од свлекување редовно се организираат интернационални школи и собири за докторанди и млади доктори, како: LARAM (Landslide Risk Assessment and Mitigation) и IRRAL (International Research Association on Large Landslides). Во 2016 година, како докторанд земав учество на LARAM двонеделната школа која се одржа во Салерно, Италија.

Во досегашната научно истражувачка работа која и претходеше на пријавата на докторската дисертација, како автор или коавтор учествував во подготовка на научни трудови поврзани со нестабилности на теренот кои се објавени и во научни списанија (Peshevski et al. 2019; Nedelkovska et al. 2020; Jovanovski et al. 2021). Од големо значење е да се спомене придонесот за вклучување на катастарот на свлечишта (Peshevski I., Jovanovski M., & Nedelkovska N., 2018. Landslides in Republic of Macedonia. Unpublished raw data, Ss. Cyril and Methodius University in Skopje) во глобалната базата на свлечишта на NASA (NASA Landslide Viewer: <https://maps.nccs.nasa.gov/arcgis/apps/webappviewer/index.html?id=824ea5864ec8423fb985b33ee6bc05b7>). Сакам да истакнам дека интересот за проучување на појавите на нестабилност на теренот е континуитет и на темите за мојата дипломска работа (Неделковска 2013) и магистерска работа (Неделковска 2015).

3. ДЕФИНИРАНОСТ НА ПРОБЛЕМОТ, ЗАДАЧИ И ЦЕЛИ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО

Науката за свлечиштата која во целосна смисла вклучува повеќе аспекти, како, дефиниции и класификации за свлечишта, методи за нивна детекција и карактеризација, подготовка на катастри, проценка на подложност, хазард и ризик, зонирање на подложноста, хазардот и ризикот од свлекување, во последниве неколку децении е сериозно актуелна и доживува значителен развој. Меѓутоа, помеѓу земјите, па дури и во рамките на една земја ретко постои униформност во користење на соодветна терминологија и методологија (Fell et al. 2008; Corominas et al. 2014).

Термините кои се користат во рамките на докторската дисертација се дефинирани во целосна согласност со терминологијата која се предлага за меѓународна употреба, а е дадена како дел од упатствата за зонирање на подложноста, хазардот и ризикот од свлекување за целите за просторно планирање (Fell et al. во име на JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes). Дефинициите за основните термини во полето на истражување, кои често ќе се среќаваат понатаму, се следните:

- *Свлечиште*. Движење на маса од карпа, распаднат карпест материјал (дробина) или земја (почва) долж косина.
- *Активно свлечиште*. Свлечиште кое моментално се движи; може да биде движење за прв пат или реактивирање.
- *Реактивирано свлечиште*. Свлечиште кое е повторно активно после одреден период на неактивност.
- *Катастар на свлечишта*. Катастар на локација, класификација, големина, активност, датум на појава и други карактеристики на свлечиштата во дадена област.
- *Подложност на свлекување*. Квантитативна или квалитативна проценка на класификацијата, големината (или површината) и просторната дистрибуција на свлечишта кои постојат или потенцијално може да се појават во некоја област. Подложноста исто така може да вклучува опис на брзината и интензитет на постојните или потенцијални свлечишта. Иако се очекува дека свлекувањето ќе се случува почесто во најподложни подрачја, во анализите на подложност, временската рамка експлицитно не се зема во предвид.
- *Хазард*. Состојба со потенцијал да предизвика несакана последица. Описот на хазардот од свлечишта треба да содржи локација, големина (или површина), класификација и брзина на потенцијалните свлечишта и на каков било резултатен одвоен материјал, и веројатноста за нивна појава во даден временски период.
- *Елементи изложени на ризик*. Населението, објектите и инженерските работи, економски активности, јавни комунални услуги, други инфраструктурни еколошки вредности во областа потенцијално зафатена со хазард од свлечишта.
- *Повредливост*. Степен на можна загуба на даден елемент или збир на елементи во областа зафатена со свлекување. Се изразува на скала од 0 (без загуба) до 1 (целосна загуба). За имотот, загубата ќе биде вредноста на штетата во однос на вредноста на имотот; за луѓето, веројатноста дека одреден живот (елементот изложен на ризик) ќе биде изгубен, ако лицето/луѓето е/се погодено/и од свлекување.
- *Ризик* - мерка за веројатноста и големината на несакан ефект по здравјето, имотот/добрата или животната средина. Ризикот често се проценува како производ од веројатноста на феноменот со одредена големина и последиците. Сепак, поопшто толкување на ризикот вклучува споредба на веројатноста и последиците во

непродуктивна форма. За квантитативна проценка на ризикот, се препорачува да се вклучи интензитетот на свлечишта. Во контекст на ова, ризикот дополнително се дефинира како: (а) *за загуба на живот*, годишна веројатност дека лицата изложени на ризик ќе го загубат својот живот земајќи го во предвид хазардот од свлекување и временско-просторната веројатност и повредливоста на лицето; (б) *за загуба на имот*, годишна веројатност за даден степен на загуба или годишна загуба земајќи ги во предвид елементите изложени на ризик, нивната временско-просторна веројатност и повредливоста.

- *Зонирање* - Поделба на земјиштето во хомогени области или домени и нивно рангирање според степени на реална или потенцијална подложност, хазард или ризик или примена на одредени прописи поврзани со хазардот.

Во споменатото упатство на ЈСТ-1, исто така се нагласува дека е многу значајно да се користи и соодветна терминологија за класификација и опис на свлечиштата. Се препорачува да се користат класификациите на Cruden & Varnes (1996), Hutchinson (1988) или Varnes (1978), и терминологијата опишана во IAEG (1990).

Во контекст на ова, во дисертацијата, усвоена за примена е класификацијата на Cruden & Varnes (1996), и опис на истата е даден во продолжение. Основата за класификацијата на Cruden & Varnes (1996) потекнува од класификацијата на Varnes (1978), која оттогаш претрпела неколку модификации. Критериумот за поделба на свлечиштата во оваа класификација е механизмот на поместување и видот на материјал кој се поместува. Оваа поделба е дадена во Табела 1 и Слика 4.


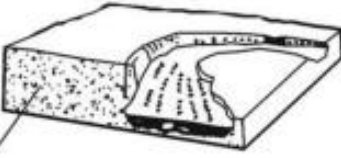








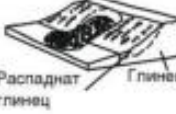


Табела 1 Класификација на свлечишта според Cruden & Varnes (1996)

ТИП НА ПОМЕСТУВАЊЕ		ТИП НА МАТЕРИЈАЛ		
		КАРПА	ИНЖЕНЕРСКА ПОЧВА	
ОДРОНУВАЊЕ		Карпест одрон	Дробински одрон	Почвен одрон
ПРЕВРТУВАЊЕ		Превртување на карпа	Превртување на дробина	Превртување на почва
СВЛЕКУВАЊЕ	РОТАЦИОНО	Свлекување на карпа	Свлекување на дробина	Свлекување на почва
	ТРАНСЛАТОРНО			
ПЛАНАРНО ШИРЕЊЕ		Карпести наноси	Дробински наноси	Почвени наноси
ТЕЧЕЊЕ (ЛАВИНА)		Карпеста лавина (длабоко ползење)	Дробинска лавина/течиште (ползење)	Почвена лавина/течиште (ползење)
КОМПЛЕКСНО Комбинација од две или повеќе основни типови на поместување				

Дел од класификацијата на Cruden & Varnes (1996) третира и поделба на свлечиштата според брзината на свлекување, Табела 2.

Табела 2 Класификација на свлечишта според брзина на движење/свлекување (Cruden & Varnes 1996)

КЛАСА	ОПИС	ТИПИЧНА БРЗИНА	БРЗИНА (m/sec)
7	Екстремно брзо	5 m/секунда	5
6	Многу брзо	3 m/минута	5×10^{-2}
5	Брзо	1.8 m/час	5×10^{-4}
4	Средно брзо	13 m/месец	5×10^{-6}
3	Бавно	1.6 m/година	5×10^{-8}
2	Многу бавно	15 mm/ година	5×10^{-10}
1	Екстремно бавно	<15 mm/ година	5×10^{-10}

	Основна карпа	Распадина (парчиња од карпа, здробена карпа, распадна зона, органски почви)			
ОДРОНИ	<p>А) Одрон од карпа -отварање на лункатини под дејство на мраз или хидостатички притисок од вода</p> <p>ЕКСТРЕМНО ГОЛЕМА БРЗИНА НА ДВИЖЕЊЕ</p> 	<p>Б) Одрон во почва</p> <p>ДОСТА ГОЛЕМА БРЗИНА НА ДВИЖЕЊЕ (подолување на падина со река)</p>  <p>Различни седименти</p>			
СВЛЕКУВАЊЕ	<p>В) Ротационо обрушување</p> <p>ЕКСТРЕМНО БАВНО ДО СРЕДНО ДВИЖЕЊЕ</p> <p>Зона на сполкнување</p> 	<p>Г) Планарно-блоковско пизгање</p> <p>Лом во опж расед</p> <p>СРЕДНА БРЗИНА</p> 			
	<p>Д) Свлекување на карпа Чело на косина контролирано од лункатини</p> <p>МНОГУ БАВНО ДО ЕКСТРЕМНО БРЗО</p> 	<p>Г) Свлекувања I (Ротационо) II (Планарно)</p> <p>Обрушување Течење</p> <p>Лес</p> <p>Гладцијална глина</p> <p>БАВНО</p> <p>III (Странично поместување)</p> <p>IV (Дробинско свлекување)</p> <p>МНОГУ БАВНО ДО БРЗО</p> 			
Неконсолидирани материјали					
	Главни големи карпести парчиња	Сортирани песокливи и прашиности седименти	Мешавина од почва и карпа	Главни пластични средини	
ТЕЧЕЊЕ НА МАТЕРИЈАЛ	<p>Е) Течење на карпести фрагменти</p> <p>ЕКСТРЕМНО БРЗО</p> 	<p>Ж) Течење на песок</p> <p>БРЗО ДО ЕКСТРЕМНО БРЗО</p> 	<p>З) Течење на лес</p> <p>БРЗО ДО ЕКСТРЕМНО БРЗО</p> 	<p>С) Дробинска павина</p> <p>Распадина</p> <p>Основна карпа</p> <p>МНОГУ БРЗО ДО ЕКСТРЕМНО БРЗО</p> 	<p>И) Бавно течење на земјан материјал</p> <p>Распадна глина</p> 
	<p>Л) Брзо движење на земјан материјал</p> <p>М) Течење на песок или прашина</p> <p>БРЗО ДО ЕКСТРЕМНО БРЗО</p> 	<p>Н) Дробинско течење</p> <p>МНОГУ БРЗО</p> 	<p>СКАЛА ЗА БРЗИНИ ЗА ДВИЖЕЊЕ</p> <p>> 3m/сек (Екстремно брзо)</p> <p>0,3 м/мин (Многу брзо)</p> <p>1,5 м/ден (Брзо)</p> <p>1,5 м/месец (Средно бавно)</p> <p>1,5 м/год (Бавно)</p> <p>0,3 м/5 год (Екстремно бавно)</p>		

Слика 4 Поделба на поместувањата на теренот според Varnes (1978) (преводот на македонски јазик е преземен од Јовановски и др. 2015)

За правилна детекција и карактеризација на свлечиштата, избор на соодветен метод за проценка на подложноста, hazardот и ризикот од свлекување, а потоа и правилно менаџирање со ризикот, особено е значајно познавањето на типичните карактеристики на одделните видови на свлекување. Детален опис за видовите на свлекување, потоа појавувањето и релативната големина, брзина на придвижување, причини за појавување и ефектите од одделните видови на свлекувања може да се најде во “The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides” (Highland M.L., USGS & Bobrowsky P. 2008).

3.1 Задачи и цели на истражувањето

Фокусот во ова истражување е ставен на примена на современи методи за детекција и карактеризација на нестабилни појави на теренот, со цел формирање на катастар на свлечишта и изработка на зонални карти на нестабилни појави за Полошкиот регион.

Примената на современи методи во регионот се прави со цел да се детектираат досега непознати свлечишта, да се исконтролираат/ажурираат границите и состојбата на активност на веќе картираните свлечишта, и да се дефинираат нивните кинематички и волуметриски карактеристики. Катастарот на свлечишта на Полошкиот регион подготвен со собирање на архивски податоци за свлечишта е составен од различни извори на податоци, секој со различен квалитет и точност. На пример, свлечиштата од геолошките карти во размер 1:25 000 се картирани во периодот 1960-1970 година, но нивното точно време на појавување може да било многу порано. За некои свлечишта границите се дефинирани по сеќавање на инженерите кои работеле на тие терени во минатото. Дури и за некои од најново регистрираните свлечишта нема податоци за штети и слично. Видот на механизмот на лизгање (според Varnes & Cruden 1996) е непознат за околу половина од свлечиштата. Наведените недостатоци се сметаат како ограничувачки фактор од повеќе аспекти, особено во однос на изборот на соодветен метод за процена на подложност (или хазард) кон (од) свлекување и калибрација на подготвените модели.

Во контекст на ова, добиените резултати од примената на современи методи за детекција и карактеризација на нестабилни појави (систематизирани во катастар на свлечишта) во комбинација со соодветни методи за процена на подложност кон одредени типови на поместување (свлечишта, плитки свлечишта, течишта исл.), се подготвуваат карти на кои врши прецизна карактеризација на терените кои се сметаат како подложни кон свлечишта. Ваквите карти и анализи на нестабилни појави претставуваат релативна индикација за хазардот од свлекување во одредена област и се сметаат за основен чекор во секој процес на справување со ризиците. Имено, картата на свлечишта и придружните податоци за свлечиштата во форма на ГИС-база на податоци се од суштинско значење за разбирање и анализа на појавите на свлекување.

Ако се има предвид, дека, често современите геолошки процеси се надоврзуваат и преминуваат од еден на друг, во дисертацијата се прикажани и одредени модели и споредби поврзани и со ерозивните процеси, кои се многу значајни за одредени делови од Полошкиот регион.

Изборот на Полошкиот регион за анализа е направен врз основа на фактот дека присуството на комплексен геолошки склоп, морфологија и посебни климатски услови кои ја карактеризираат Македонија, допринесуваат да овој регион биде еден од најподложните региони кон свлекување (Peshevski et al. 2019). За предметното подрачје извршени се одредени прелиминарни студии за дефинирање на подложноста кон свлекување од страна на Пешевски (2015), и неодамна со некои нови подобрувања на истиот пристап од Peshevski et al. (2019), и во истите е констатирано дека еден од главните проблеми за подобро справување со свлечиштата е како да се подобрат условите за собирање, анализа и обработка на податоците во регионот, т.е. вршењето на нивна детекција и целосна карактеризација.

Покрај основната задача, со дисертацијата да се прикажат сопствени методи за анализа на современите процеси, една од главните задачи е, презентираниот методологија да даде придонес кон понатамошен развој на други понови пристапи за карактеризацијата на свлечиштата како геохазард. Со методологијата која се

разработува во трудот се врши карактеризација на теренот, земајќи во предвид поголем број на иновативни пристапи кои ќе овозможат уште покомплетна слика за подложноста на предметниот терен кон свлекување. Преку споредба на резултатите од различните пристапи, се врши еден вид преклопување на сите добиени модели на хазарди поврзани со нестабилностите на теренот, што резултира со поконкретно издвојување на зоните за кои треба да се посвети поголемо внимание во процесите на управувањето со ризикот. Начинот на комбинирање на овие карти може да биде предмет на анализа на бројни идни студии, кои би вклучиле и теренска карактеризација на свлечиштата од повисоко ниво (преку вршење на геотехнички истражувања), што е надвор од доменот на ова истражување.

Една од целите при изработката на оваа дисертација е да покрај научниот придонес, сите прикажани резултати да се користат и за практични намени. Генерално, квалитетен катастар на нестабилни појави овозможува да се создадат модели на подложност (и хазард) со висок квалитет, но и да се изврши нивна верификација. Потоа, картите на нестабилни појави за истражното подрачје треба да се користат за целите на просторното планирање, што значи дека со нивната примена се регулираат условите за градба на објектите и нивна санација, а како крајна мерка може да се предложи/наложи избегнување на проектирање т.е. градба на терени каде постои висок хазард од свлекување. Елаборираните и применети современи методи за детекција и карактеризација на нестабилни појави, покрај за предметниот регион, може да се применат и за други региони во земјата, по потреба со одредени модификации во зависност од бројни фактори на средината. Со истражувањето воедно се има намера да се потенцира достапноста на алатки и податоци кои овозможуваат да се подигне на повисоко ниво менаџирањето на ризикот од свлечишта во Македонија.

4. МЕТОДИ ЗА ДЕТЕКЦИЈА И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА НА НЕСТАБИЛНИ ПОЈАВИ

Генерално во полето на истражување, како и во дисертацијата, процесите на детекција, карактеризација, картирање, анализа на податоци и подготовка на катастри и карти на нестабилни појави на теренот, се базираат на неколку основни хипотези (Guzzetti et al. 2012), кои се образложени во продолжение:

- Свлечиштата оставаат видливи знаци на површината, од кои повеќето може да се препознаат, класифицираат и картираат на терен, потоа преку интерпретација на (стереоскопски) аеро-фотографии, сателитски снимки или дигитални прикази на топографската површина. Повеќето од знаците кои ги оставаат свлечиштата се морфолошки, т.е. се однесуваат на промени во формата, обликот, положбата или изгледот на топографската површина. Другите знаци предизвикани од свлечиштата може да рефлектираат литолошки, геолошки, употребливост на земјиште или други видови на промени на површината или подлабоко.
- Морфолошкиот отисок на свлечиштето зависи од видот на свлекување и брзината на движење на масата (Cruden and Varnes 1996). Општо земено, ист тип на движење на масата ќе резултира со сличен отисок на свлечиштето. Искусни геоморфолози можат да го толкуваат морфолошкиот отисок оставен од некое свлечиште за да се утврди степенот на лом на косината и да се одреди видот на движењето. Од визуелниот изглед на свлечиштето, може да се утврдат квалитативни информации за степенот на активност, староста и длабочината на свлекување. Бидејќи е можна морфолошка сличност, што резултира во исти или слични морфолошки форми од различни процеси, мора да се внимава при анализа на свлечишта од аеро-фотографии, сателитски снимки или дигитални претстави на топографската површина.
- Свлечиштата не се случуваат случајно (Guzzetti et al. 2002). Свлекувањата се резултат на меѓусебна поврзаност на физички процеси и механичките закони кои ја контролираат стабилноста на косината. Механичките закони, кои ја контролираат големината, обликот и просторната и временската еволуција на свлечиштата, може да се одредат на емпириски, статистички или детерминистички начин. Знаењето за свлечиштата може да се генерализира, а информациите за свлечиштата во некоја област може да се искористат за детекција и картирање на нестабилности во други области.
- За свлечиштата, усвоен е принципот дека „минатото и сегашноста се клуч за иднината“ (Varnes, D.J. and the IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements 1984). Принципот подразбира дека нестабилноста веројатно ќе се случи под исти или слични услови кои довеле до нестабилност во минатото.

4.1 Конвенционални методи за детекција и карактеризација на нестабилни појави

4.1.1 Геоморфолошко картирање на терен

Картирањето на свлечишта на терен како дел од стандардното геоморфолошко картирање (Brunsden 1985), може да биде отежнато заради разните потешкотии при детектирање на свлечишта директно на терен, особено на стари свлечишта. Причини за ова може да бидат (Guzzetti et al. 2012): (1) големината на свлечиштето, која честопати е

премногу голема за да може да се види свлечиштето во целост на терен; (2) позицијата на набљудување точка на истражувачот честопати е несоодветна за да се видат еднакво детално сите делови на свлечиштето (на пример, пукнатини, странични граници, акумулиран материјал, ножица, круна); (3) фактот дека старите свлечишта честопати се делумно или целосно покриени со шума, или делумно биле зафатени од други процеси на свлекување, процеси на ерозија и човечки активности, вклучително и земјоделски и шумарски активности.

Во поглед на прецизноста, првичната помисла би била дека картирањето на свлечишта на терен е поточно од далечинското картирање. Но користењето на аеро-фотографии, сателитски слики и дигитални модели на теренот со многу висока резолуција можат да дадат многу појасна слика за поедините делови од едно свлечиште. На терен, не е едноставно да се идентификува границата на свлечиштето, особено долж страните на настанатиот лом, каде што топографијата е ритчеста и каде што вегетацијата е висока или густа. Можноста точно да се следи границата на свлечиштето е ограничена од намалената видливост на ломот на косината, последица на локалната перспектива, големината на свлечиштето и фактот дека границата на свлечиштето е често нејасна. Согласно на ова, перспективата понудена од далечен поглед на свлечиштето е пожелна и може да резултира во попрецизно и поцелосно картирање.

Прегледот на литература покажува дека, со неколку исклучоци, при картирање на свлечишта на големи и многу големи области, теренска работа се спроведува за: (1) идентификување и картирање на единечни свлечишта или мали групи свлечишта предизвикани од специфичен настан или во одреден период; (2) да се добијат општи и специфични информации за видот на свлечиштата и нивните визуелни карактеристики, кои може да се искористат за подобро визуелно толкување на аерофотографии или сателитските снимки (критериуми за толкување на снимки) (Guzzetti and Cardinali 1990) и (3) проверка (валидација) на катастарските карти подготвени со употреба на други техники, главно преку интерпретација на аерофотографии (Guzzetti et al. 2000). Валидацијата на картите обично се изведува на ограничен дел од областа опфатена со катастарот, вообичанео на помалку од 15% (Galli et al. 2008), или за да се потврдат специфични проблематични области и да се решат потенцијални погрешни класификации предизвикани од морфолошката конвергенција.

4.1.2 Визуелна интерпретација на аерофотографии

И покрај достапноста на иновативни техники за детекција на поместувања на теренот, во многу случаи, толкувањето на аерофотографии е често применуван метод за препознавање на свлечишта. Стереоскопските аеро-фотографии претставуваат репер во однос на кој се споредуваат поновите технологии за детекција и картирање на свлечишта. Овој пристап е општо прифатен од неколку причини:

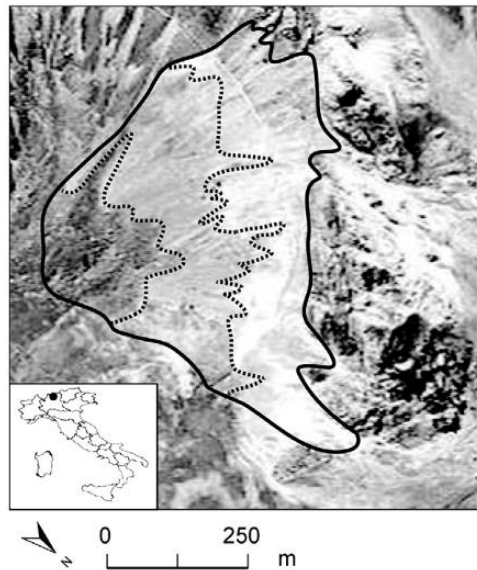
- 1) Искусен геоморфолог може лесно да ги препознае и карта свлечиштата на аерофотографиите, врз база на стереоскопска интерпретација.
- 2) За искусен геоморфолог, толкувањето на стереоскопски аеро-фотографии е интуитивен процес кој не бара софистицирани технолошки вештини. Технологијата и алатките кои се потребни за толкување на аерофотографии се едноставни (на пример, стереоскоп) и евтини, ако се споредат со други методи за детекција на свлечишта. Неодамнешните напредоци во стереоскопската визија со помош на компјутери, ја прошириле употребата на аеро-фотографиите (и сателитски снимки со споредлив квалитет) за картирање на свлечишта (Nichol et

al. 2006). Информациите кои се добиваат од аерофотографии можат лесно да се пренесат на карта или да се зачуваат во компјутерска датабаза.

- 3) Големината (обично 21 cm × 21 cm) и размерот (од 1: 5000 до 1: 70 000) на аерофотографии, овозможува покривање на големи површини со разумен број фотографии. Типична големина на свлечиште (од неколку десетици до неколку стотици метри во должина или ширина, Malamud et al. 2004b) добро се вклопува во рамките на еден пар стереоскопски аеро-фотографии, што му овозможува на толкувачот да работи погодно. Страничните преклопувања типични за стереоскопските аеро-фотографии овозможуваат да се најде (во најголем дел од случаите) соодветна комбинација на фотографии за најдобро да се идентификуваат и картираат свлечиштата.
- 4) Национални и локални владини агенции, истражувачки организации и приватни компании веќе долго време добиваат стереоскопски аеро-фотографии за различни намени. Во многу области (на пример, Европа, Северна Америка, Јапонија, Тајван), овие аеро-фотографии се достапни од 1950-тите години (а на места дури и пред тоа), и може да се користат за подготовка на карти на свлечишта. Достапноста на аеро-фотографии снимени во различни временски периоди за иста област, овозможува да се истражи временската и просторната еволуција на нестабилните појави (Fiorucci et al. 2011), што претставува важна информација за проучување и на други процеси како што се ерозија или еволуција на пејзажи.

Препознавањето на свлечишта преку визуелна анализа на стереоскопски аеро-фотографии е емпириска и несигурна техника која бара искуство, подготовка/обука, систематска методологија и добро дефинирани критериуми за толкување (Rib & Liang 1978; Antonini et al. 2002). Стандарди не постојат, а толкувачот открива и ги класифицира морфолошките форми на свлечиштето врз основа на искуство и анализа на повеќе карактеристики („белези“) кои може да се идентификуваат на сликите. Овие карактеристики вклучуваат облик, големина, фотографска боја, тон на боја, шара, текстура, дистрибуција, топографија на теренот и склоп (Guzzetti et al. 2012).

Обликот се однесува на формата на топографската површина и е една најкорисна карактеристика за класификација на свлечишта од аерофотографии. *Големината* ја опишува површината на протегање. Познавањето на физичките димензии на некоја структура е ретко доволен податок за класификација, но може да биде корисно да се идентификуваат карактеристики како што се површината и длабината. *Бојата, тонот, шарата и текстурата* зависат од светлината што ја рефлектира површината, и може да се искористат за да се утврди карпа, почва и видови на вегетација. Шарата и текстурата ја одразуваат рапавоста на теренот и може да се користат за да се идентификуваат површинските видливи делови на свлечиштата и големината на свлечена маса (Слика 5).



Слика 5 Дел од црно-бела аерофотографија направена во размер 1: 33000 која покажува сипар (континуирана црна линија) во област на италијанските Алпи. Шарата, текстурата и дистрибуцијата на сиви тонови овозможуваат детекција и картирање на материјал со различна (просечна) големина, одделени со црни испрекинати линии. (преземено од Guzzetti et al. 2012)

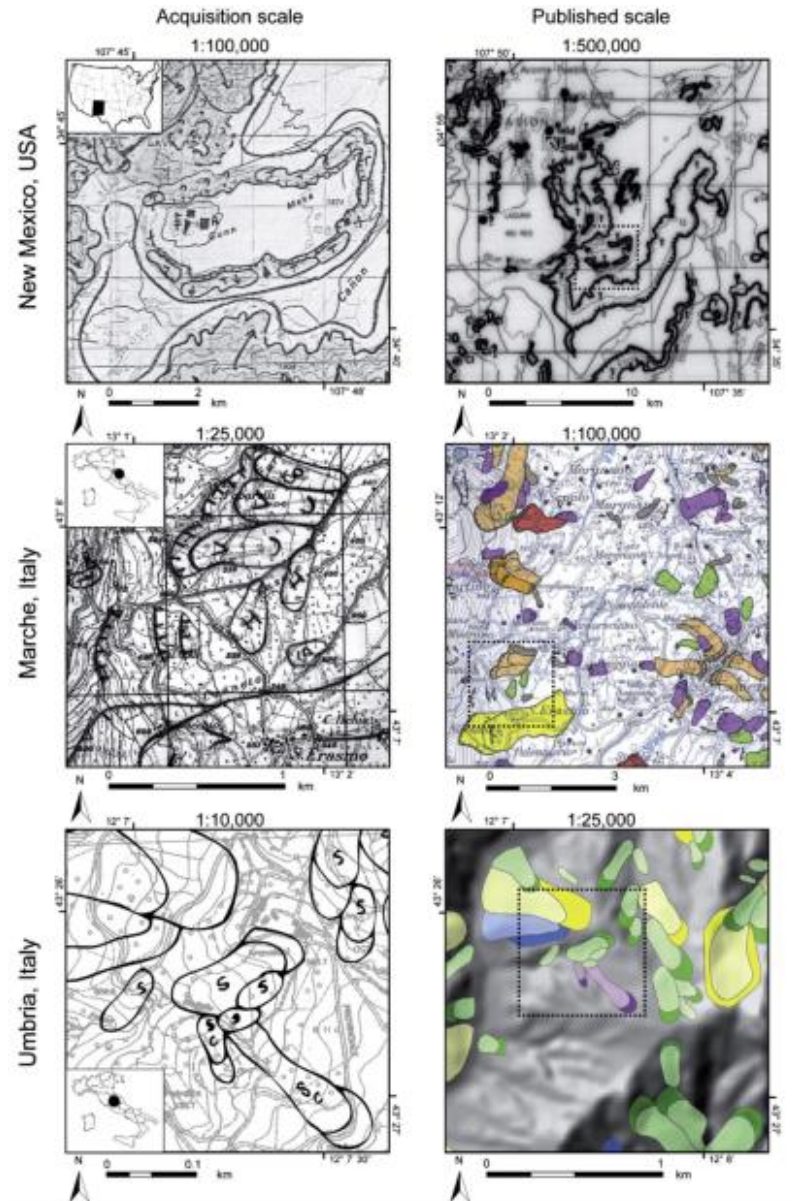
Дистрибуцијата односно просторно распоредување на структурите во повторувачки или карактеристичен редослед или форма, се користи за да се дефинира типот на карпа, отпорност на ерозија и присуство на пукнатини, раседи, услоеност и други тектонски или структурни карактеристики. Топографската локација е позиција на место во однос на неговата околина. Тоа ги рефлектира морфометриските карактеристики како што се висинска разлика, стрмност и ориентација на косината, како и присуство на вдлабнати и испакнати делови. Топографската локација е важна за идентификување на свлечишта кои се карактеризираат со локални топографски аномалии. Склопот ги изразува регионалните и локалните карактеристики (литолошки, геолошки, морфолошки, климатски, покриеност на земјиште, итн.) во однос на околината. Топографската локација и склоп се особено погодни за утврдување на карпест тип и структура, падови и присуство на раседи и други тектонски или структурни карактеристики, кои се важни за детекција на свлечишта и за решавање на проблеми со погрешна класификација предизвикани од морфолошка конвергенција /сличност (Antonini et al. 2002).

Користејќи позната или утврдена врска помеѓу формата и некоја морфолошка или геолошка карактеристика, геоморфолозите користат корелација за да класифицираат структури врз основа на анализа на визуелна слика. Вдлабнатина во горен дел и испакнатост во долен дел на падина обично укажува на присуство на свлечиште. Комбинацијата на геометрија во форма на конус (во основа) и нагорно испакнат профил на косина е дијагностицирање на алувијална лепеза, течиште, или зона на таложее на течиште. Блага падина во подножјето на стрмна карпа обично се толкува како нанос од сипар. Треба да се внимава многу кога се донесуваат заклучоци за карактеристиките и својствата на геоморфолошките одлики од далечинските слики, бидејќи е можна морфолошка конвергенција. На пример, свлечиштата и ледничките наноси во глацијалните терени може да изгледаат слични, а во стрмен терен длабока гравитациона деформација може да се одреди како свлечиште а всушност тоа да биде тектонска структура.

Видот, висината и густината на вегетацијата, сезонските и долгорочните промени во вегетационската покривка влијаат на можноста за откривање и картирање на свлечишта, како на терен така и преку анализа на воздушни и сателитски снимки (Rib & Liang 1978). Онаму каде вегетацијата е ретка, на пример, во аридни и семиаридни региони, морфолошкиот изглед на свлечиштата не може да биде сокриен со вегетација. На местата каде вегетацијата расте брзо, на пример во тропските и екваторијалните области, отисокот од свлечиштата на земјината покривка, а особено од малите и плитките свлечишта, може да се прикрие за неколку месеци или сезони. Во области каде се вршат земјоделски активности, особено орање, лесно може да се елиминира отисок на свлечиштата. Пошумен терен во различни географски и климатски услови го отежнува картирањето на свлечишта, особено на плитките свлечишта и течишта.

Поради големата варијабилност на формата на свлечиштата (Cruden & Varnes 1996), не сите свлечишта се јасно и лесно препознатливи на терен, од аеро-фотографии или од сателитски снимки. Веднаш по настанување на свлекување, индивидуалните свлечишта се „свежи“ и обично јасно препознатливи. Границите помеѓу зоните на лом (т.е. зоните на поместување, транспорт и таложење) и незафатениот терен обично се различни, што го прави релативно едноставно идентификувањето и картирањето на свлечиштата за геоморфологот. Ова е особено точно за мали, плитките свлечишта, како што се почвени свлекувања или течишта. За големи, комплексни поместувања, границата помеѓу стабилниот терен и свлечената маса е честопати преодна. За длабоки свлечишта, идентификувањето на точната граница на свлекување може да биде тешко дури и за свежи поместувања, особено во урбани или шумски области. Границите на свлечиштата стануваат сè понејасни со староста на свлечиштето. Ова е резултат на различни причини, вклучувајќи локално прилагодување на свлечиштето кон новиот морфолошки склоп, нови свлечишта, ерозија и промени на земјината покривка (Malamud et al. 2004a).

При користење на аеро-фотографии, точноста на катастарот зависи и од видот, квалитетот и карактеристиките на стереоскопите што се користат. Истражувачите на свлечишта ретко го разгледуваат ова прашање. Општо земено, подобрите стереоскопи резултираат во катастри со подобар квалитет, а неколку примери се дадени на Слика 6 (Guzzetti et al. 2012). Имено, квалитетот на трите катастарски карти се зголемува (меѓу другите фактори) и со квалитетот на стереоскопите што се користат за визуелна анализа на аерофотографиите.



Слика 6 Карти на свлечишта подготвени преку интерпретација на аерофотографии со употреба на различни стереоскопи. Лева колона: карти прикажани во размерот на собирање на информации за свлечиштата. Десна колона: карти прикажани во размерот на објавување. Карта за Ново Мексико, САД, подготвена од Cardinali et al. (1990) со користење џебни стереоскопи Abrams Model CB-1. Карта за Марке, Италија, подготвена од Antonini et al. (1993) со користење на стереоскопи Galileo SFG 3/b. Карта за Умбрија, Италија, подготвена од Antonini et al. (2002) со користење на стереоскоп Galileo Siscam Falcon ZII. (преземено од Guzzetti et al. 2012)

Со конвенционалните методи за препознавање на свлечишта кои генерално се базираат на стандардно геоморфолошко картирање на терен или анализа на аерофотографии и контурни карти, се обезбедуваат доста информации за свлечиштата, меѓутоа потребно е многу време и логистика кога станува збор за анализи од регионален размер. Толкувањето на аеро-фотографии и карти може да се изведе побрзо од теренското картирање и е попогодно за регионални анализи, но тешко се изведува во пошумени терени. Со современите методи споменатите ограничувања се надминуваат, и истите овозможуваат да се идентификуваат свлечишта на големи области, како и да се добијат детални податоци за многу значајни карактеристики за свлечиштата.

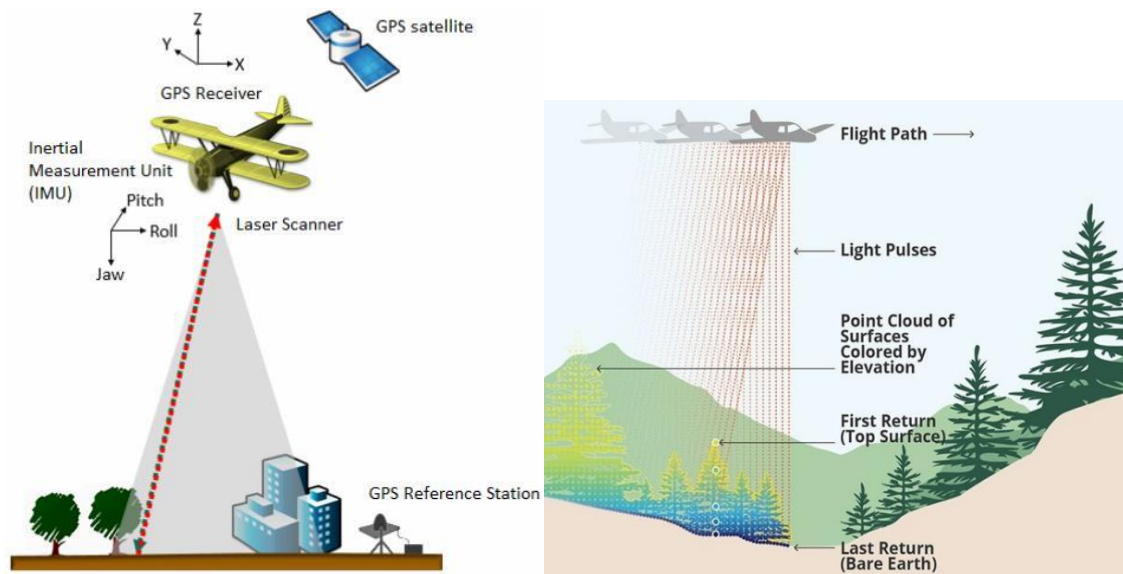
4.2 Современи методи за детекција и карактеризација на нестабилни појави

Истражувачите користат современи методи и технологии кои помагаат во откривање и картирање на свлечишта на големи области, и истите може да бидат групирани во три главни категории: (1) анализа на површинска морфологија, главно анализа на дигитални елевациони модели (ДЕМ) со многу висока резолуција; (2) интерпретација и анализа на сателитски слики, вклучително и панхроматски, мултиспектрални и слики од радар со синтетички отвор (SAR); и (3) употреба GPS/GNSS податоци.

4.2.1 *Анализа на површинска морфологија*

Кога ќе се појави свлечиште, тоа ја менува топографијата на површината на теренот оставајќи својствена/специфична лузна. Големината на промените зависи од видот и големината на свлечиштето, и од степенот и интензитетот на движењето. Затоа истражувачите користат дигитални прикази на топографската површина за да ги препознаат и картираат свлечиштата. Неодамнешната достапност на дигитални елевациони модели (ДЕМ) со многу висока резолуција добиени од воздушни ласерски профилиери и LiDAR (Light Detection And Ranging) сензори даваат можности за откривање и картирање на свлечишта и поврзани површински процеси.

LiDAR снимање од летало е консолидирана техника за далечинско снимање која се користи за добивање на дигитални прикази за топографската површина за области кои имаат големина од неколку хектари до илјадници квадратни километри. Концептот на оваа технологија се заснова на ласерски сензор монтиран на авион или хеликоптер, кој врши прецизно мерење на времето за кое ласерскиот зрак се емитува од соодветниот модул на LiDAR системот до земјината површина, се рефлектира од земјата или предмет на земјата (вегетација, зграда, мост, далекувод итн.) и се враќа во сензорот лоциран во LiDAR системот. Кога зракот се враќа, со себе носи информации за предметот со кој што контактирал, вклучувајќи далечина и оптички карактеристики како рефлексивност. Еден емитиран ласерски зрак може да се врати во сензорот како еден или повеќе повратни импулси. Секој емитиран ласерски импулс што наидува на повеќе рефлексивни површини додека патува кон земјата, се дели на исто толку повратни импулси колку што има рефлексивни површини. Првиот вратен ласерски импулс го претставува највисокиот објект на земјината површина како на пример дрво или кров на зграда. Првиот вратен импулс може да биде и од самата земјина површина и во тој случај во LiDAR системот ќе биде детектиран само еден вратен импулс од соодветниот ласерски зрак. Повеќекратните импулси овозможуваат да се детектираат повеќе објекти на различно висинско ниво во рамките на еден ласерски пулс. Импулсите вратени помеѓу првиот и последниот, генерално, се користат за анализа на вегетацијата, а последниот вратен импулс се користи за моделирање на теренот. Географската позиција на инструментот се реконструира прецизно со помош на GPS и информации за навигација на движењето. Во области со густа вегетација, визуелно и прецизно е речиси невозможно да се идентификуваат одредени карактеристики во конфигурацијата на теренот како што се свлечишта, но со LiDAR технологијата имајќи ја предвид можноста за продор на ласерските зраци помеѓу вегетацијата, овој проблем се надминува. Оваа способност се покажува особено важна за откривање и картирање на свлечишта во шумени области, со конкурентска предност во однос на другите методи засновани на визуелна интерпретација и анализа на аерофотографии или сателитски слики кои не продираат низ вегетација.



Слика 7 Компоненти на LiDAR систем и основен концепт на LiDAR технологија

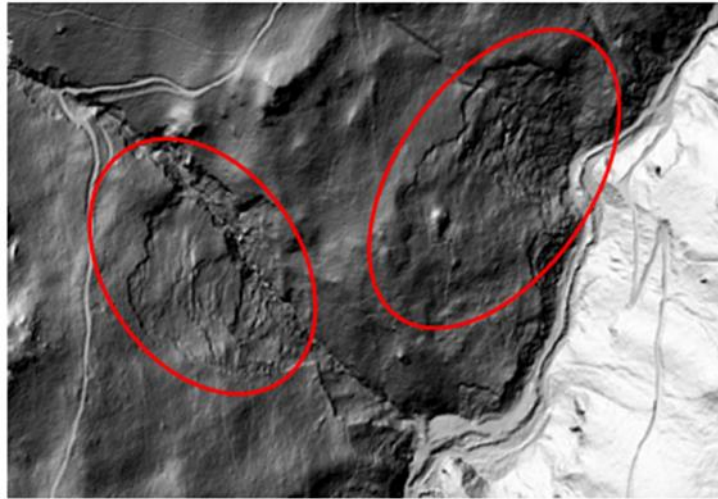
Генерално, предностите на LiDAR технологијата кои придонесуваат за добивање на дигитален теренски модел (ДТМ) погоден за анализа и идентификација на свлечишта се:

- голема брзина на аквизиција на просторни податоци (500000 точки во секунда),
- висока точност на податоците (+/- 10 cm),
- голема густина на точките (од 5 до 100 точки на m²),
- присуството на вегетација не претставува пречка во контекст на дефинирањето на морфолошката структура на теренот.

Дигитални теренски модели со многу висока резолуција добиени од LiDAR снимања се користат за детекција, картирање и мониторинг на свлечишта. Снимањата со LiDAR може да се повторат на иста област за да се добијат прикази за топографска површина од повеќе временски периоди, вклучително и квантитативни волуметриски проценки на свлечишта. Прегледот на литературата укажува на тоа дека за истражување на свлечишта, дигитални теренски модели со многу висока резолуција добиени од снимања со LiDAR и деривативни производи (на пр. контурни карти, карти на наклон, закривеност), се користат првенствено за: (1) визуелна анализа на топографската површина и (2) автоматско или полуавтоматско препознавање на морфометриски карактеристики на свлечишта.

4.2.1.1 Визуелна анализа на топографска површина

Визуелна анализа и толкување на топографската површина е најчеста и најперспективна примена на дигитални теренски модели со многу висока резолуција добиени од LiDAR сензори за детекција и картирање на свлечишта на големи области. Методот е директно споредлив со визуелното толкување на црно-бели стереоскопски аеро-фотографии. Кога се користат LiDAR дигитални теренски модели, тродимензионалниот ефект типичен за стереоскопската визија што овозможува препознавање на свлечиштето е заменето со засенчена релјефна слика за областа (Слика 8), често потпомогната од други слики што ги опишуваат другите пропратни елементи на теренот вклучувајќи на пр., наклон, закривувања, топографска нерамност.



Слика 8 Видливи свлечишта по текот на Веичка Река

Неколку истражувачи ги споредувале добиените карти на свлечишта преку визуелна анализа на дигитални модели добиени од LiDAR и преку теренско картирање или интерпретација на аеро-фотографии. Ardizzone et al. (2007) објавиле дека нивниот катастар од 47 свлечишта предизвикани од врнежи, добиен преку визуелна интерпретација на LiDAR дигитални теренски модели со резолуција $2\text{ m} \times 2\text{ m}$, резултирал во подобрена статистика за големината (површината) на свлечиштата, во споредба со катастар од теренско распознавање на свлечишта.

Преку визуелна анализа на LiDAR дигитални теренски модели со многу висока резолуција можат да се идентификуваат и картираат различни видови на пометувања вклучувајќи: големи, длабоки ротациони свлекувања и комплексни ломови, плитки и длабоки лизгања и течишта. Ваквиот начин на детекција се докажал ефекасен и кај свлечишта во обработливо земјиште и во пошумени терени, како и да се идентификуваат стари и неодамнешни свлечишта. (Guzzetti et al. 2012 и референци таму)

Достапноста на LiDAR снимки кои покриваат големи региони, па дури и цели држави, отвора големи можности за картирање на свлечишта, со потенцијал за зонирање на подложноста и hazardот, како и за моделирање на еволуцијата на пејсажот. Ваквата постапка за детекција на свлечишта е применета и во рамки на докторската дисертација.

4.2.1.2 Автоматско и полуавтоматско препознавање на свлечишта

Истражувачите користат LiDAR дигитални теренски модели со многу висока резолуција за автоматско или полуавтоматско препознавање на карактеристиките на свлечиштето. Ваквиот пристап ја олеснува изработката на катастри на свлечишта главно после одреден настан што предизвикал свлечишта.

Топографските податоци кои се добиваат со LiDAR ја унапредиле корисноста и прецизноста на катастрите, овозможувајќи да се добијат детални карти на кои се прикажани многу поважни топографски карактеристики во споредба со оние кои можат да се добијат со користење на конвенционални техники. Сепак, трошоците и субјективноста на мануелно направени катастарски карти од LiDAR податоци биле мотивација за нови истражувања за автоматизација на процесите за картирање на свлечишта со користење на компјутерски алгоритми.

Mckean & Roering (2003) веројатно се првите кои се обиделе да ги добијат автоматски карактеристиките на свлечиште од LiDAR дигитален теренски модел со многу висока резолуција од $1\text{ m} \times 1\text{ m}$. Работејќи на 0.5 km^2 комплекс на свлечишта во

Нов Зеланд, тие добиле мерки за рапавоста на површината на теренот со употреба на различни морфометриски алгоритми. Sato et al. (2007), работеле на 3.8 km² област со свлечишта во планините Шираками, Јапонија, добиле топографски информации од воздушно LiDAR снимање, вклучително и градиент на терен, топографска текстура и локална конвексност, и ги искористиле информациите за класификација на теренот во 17 домени. Резултатите биле споредени со геоморфолошка карта добиена преку визуелно толкување на контурна карта во размер 1: 2500 и аерофотографии во размер 1: 8000. Автоматската класификација се покажала како веродостојна и понатаму била искористена за ревизија на теренското картирање.

Leshchinsky et al. (2015) воведуваат нов алгоритам за автоматско препознавање на свлечишта. Предложениот метод е именуван како Метод за контурно поврзување (Contour Connection Method - CCM) и првенствено се заснова на прочистени податоци од LiDAR и минимален влез на податоци од страна на корисникот, како што се линии кои ги дефинираат лузните на свлечиштата и параметри кои го карактеризираат телото на свлечиштето. Алгоритмот функционира со примена на изохипси и точки и со користење на вектори кои ги поврзуваат точките со цел да се одреди наклонот и придружните карактеристики на свлечиштето.

Предложени се и бројни полуавтоматски пристапи за картирање на свлечишта, секој со свои предности и ограничувања. Основните ограничувања на постоечките методи се: (1) употребата на интуитивен влез за картирање често се занемарува; (2) недостаток на транспарентност во техниките за картирање базирани на машинско учење; и (3) излезот вообичаено не е валидиран или тестиран во големи размери или во различни геолошки единици.

Со цел надминување на наведените ограничувања, Bunn et al. (2019) воведуваат нов полуавтоматски пристап, наречен Метод на Идентификација на Лузни и Контурно Поврзување (Scarp Identification and Contour Connection Method - SICCM), кој се прилагодува на различни геолошки склопови, автоматски или полуавтоматски, и во кој се применуваат интервенции и интерпретација на картирањето од страна на експерт. SICCM е адаптација на претходно опишаниот CCM алгоритам на Leshchinsky et al. (2015) за подобрување на неговите ограничувања преку: (1) воведување на нова постапка за идентификација на лузни земајќи ја предвид и закривеноста покрај наклонот; (2) дефинира чекори каде што може да се користат мануелни прилагодувања за да се подобрат резултатите; и (3) се прави оконтурнување само во локализираните региони во близина на лузните за да се подобри пресметковната ефикасност. За разлика од посложените пристапи, кои бараат сложени процедури или специјализирани влезни податоци, SICCM се состои од едноставни процеси засновани на вообичаените деривати од дигиталните теренски модели.

При детекција на свлечишта со т.н. полуавтоматски методи, компјутерите ги извршуваат повеќето задачи, но потребни се некои одлуки од експерт во одредени фази од картирањето. Овие полуавтоматски методи можат да се разликуваат во влезните податоци што ги користат и во нивната сложеност, но сите служат да го забрзаат процесот на детекција и карактеризација на свлечишта.

4.2.2 Интерпретација и анализа на сателитски податоци

Кога ќе се појават свлечишта, тие ја менуваат морфологијата на теренот. Сателитските сензори можат да ги измерат промените на топографската површина, а податоците снимени со сателитските сензори може да се користат за детекција и картирање на свлечишта.

Користењето на сателитска технологија за препознавање и картирање на свлечишта датира од 1970-тите, кога оптичките слики снимени со сателитски сензори станале достапни. Првите истражувачи користеле Landsat и SPOT слики за детекција на свлечишта, но генерално, свлечиштата не биле картирани директно од сликите. Всушност, теренските услови индикативни за присуство на свлекување (на пример, литолошки тип, разлики во вегетацијата или влажност на почвата) биле идентификувани и користени за да се утврди присуство или отсуство на свлечишта.

Во последната деценија, користењето на сателитски податоци и технологија за истражување на свлечишта се зголемени значително, главно како резултат на зголемената достапност на сензори со висока резолуција и многу висока резолуција, како и големите напредоци во компјутерскиот хардвер и софтвер за обработка, визуелизација и анализа на сателитски слики. Сателитските сензори можат да бидат пасивни (оптички) и активни (радарски). Активните сензори користат сопствен извор на енергија за осветлување. Сензорот емитува зрак кон целната област, кој се рефлектира од површината и повторно се враќа кон сензорот. Со овој тип на сензори се добиваат мерења во секое време, без временски ограничувања и без оглед на временските услови. Пасивните сензори ги мерат одбиените сончеви зраци, и со нив се добиваат мерења само во тек на ден. Оптичките сензори го покриваат опсегот на електромагнетски спектар од 400 nm до 1040 μm, во видливите и инфрацрвените домени. Радарските сензори работат во микробранов домен, од 1.67 cm до 130 cm. Прегледот на литература открива дека сликите направени од оптички сензори, и панхроматски и мулти-спектрални слики, се претпочитаат за детекција и картирање на свлечишта со употреба на визуелни или аналитички методи. Сликите добиени од радарски сензори (пр. Радар со Синтетички Отвор - Synthetic Aperture Radar (SAR)) се користат главно за откривање и следење на деформациите на топографската површина од бавни свлечишта. Сепак, постојат примери за употреба на SAR податоци за детекција и картирање на единечни, големи, брзи свлечишта (Guzzetti et al. 2012 и референци таму).

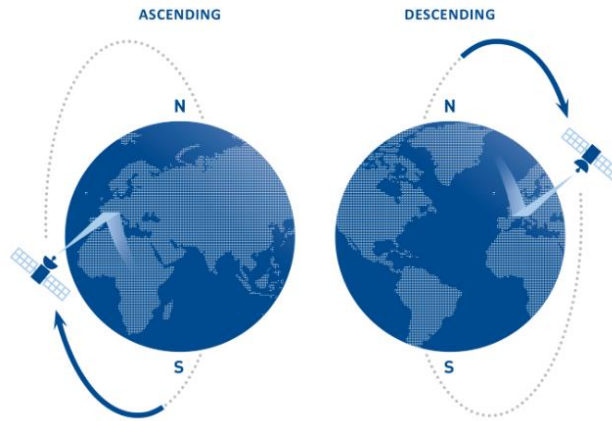
Толкувањето на оптички слики и деривативните производи цели кон замена на аерофотографии (црно бели, обоени, инфрацрвени) за идентификација и картирање на свлечишта. Алтернативно, сателитските слики со многу висока резолуција може да се комбинираат со дигитални теренски модели за да се добие 3Д претстава на теренот, која може визуелно да се толкува за да се детектираат и картираат свлечишта. Google Earth® кој е достапен од 2005 година, обезбедува светска покриеност со оптички сателитски слики со висока и многу висока резолуција (на места дури и мулти-временски) и можност за гледање на сликите во 3Д, им нуди на истражувачите нови можности за користење на сателитските слики за детекција и картирање на свлечишта. Веб-базираните алатки за картирање што ги користат Google Earth®, Microsoft Bing Maps и други слични платформи, може да се користат за собирање информации за свлечишта предизвикани од специфични настани во реално време.

Во рамки на докторската дисертација, од посебен интерес се податоците добиени од активни сензори. Во овој контекст, во продолжение се дава осврт кон употреба на SAR податоци.

4.2.2.1 Употреба на SAR податоци

Радар со синтетички отвор (Synthetic Aperture Radar - SAR) е радарски уред со висока резолуција поставен на вештачки сателит, кој работи ефикасно и во текот на ноќта и во текот на денот, како и во сите временски услови. Принципот на работа на SAR е повторено набљудување на дадена цел, преку трансмисија на микробран до површината на Земјата и примање на неговата рефлексивност. Според сателитската платформа која е

домаќин на сензорот SAR, сите сателити опремени со SAR сензори орбитираат околу Земјата на блиску поларна орбита на надморска височина која се движи од 500 до 800 km над површината на Земјата. Кога сателитот патува од југ кон север, се вели дека е во растечка орбита. Спротивно на тоа, кога сателитот патува од север кон југ, се вели дека е во опаѓачка орбита. SAR трансмитира микробранови кон исток од растечката орбита и кон запад од опаѓачката орбита до иста целна област (Слика 9).

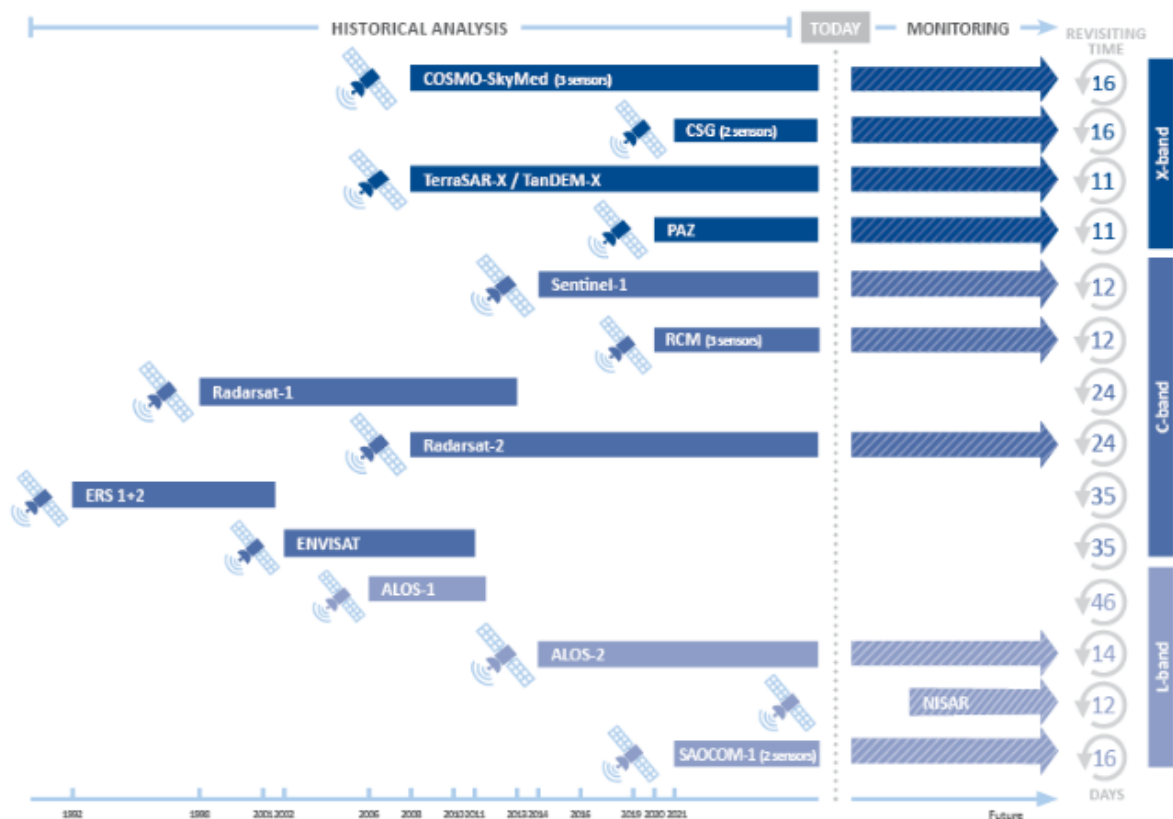


Слика 9 Растечки и опаѓачки орбити (<https://site.tre-altamira.com/insar/>)

На овој начин, иста област повторувачки се снима по двете орбити, при што се собираат слики од растечки и опаѓачки снимки. Временскиот интервал за кој сателитот повторно опсервира иста област се нарекува „време на повторна опсервација“. Овој временски интервал се менува во зависност од типот на сателитот. Во денешно време, сателитските SAR системи може да се разликуваат главно според опсегот, максималното мерливо поместување, времето на повторна опсервација, периодот на аквизиција и резолуцијата (Слика 10). Микробрановиот опсег кој сензорите можат да го користат е даден подолу:

- X опсег – 9.6 GHz од Германско-Италијанските X-SAR мисии, кој одговара на бранови должини од околу 3.1 cm;
- C опсег – 5.3 GHz од ESA’s ERS, ENVISAT, Canadian Radarsat и US мисии, кој одговара на бранови должини од околу 5.6 cm;
- L опсег – 1.2 GHz од Јапонските J-ERS и ALOS, кој одговара на бранови должини од околу 18 cm.

SAR сензорите со X и C опсег имаат подобра резолуција од L опсег и тие можат да следат поместувања од мали размери на мали објекти, особено во изградена средина.



Слика 10 Некои карактеристики на најкористените SAR сензори (<https://site.tre-altamira.com/insar/>)

Праецот на микробранот од сателитот до површината на земјата се нарекува “линијата на простирање на сигналот – Line of Sight (LOS). SAR обсервира амплитуда и фаза (две фундаментални својства) на секој рефлектиран бран од иста целна област за да направи интерферограм - слика на фазна разлика помеѓу два податоци.

Интерферометриски радар со синтетички отвор (Interferometric Synthetic Aperture Radar - InSAR), или SAR Интерферометрија, е метод за мерење на промената на фазата на сигналот од две снимки со SAR податоци, добиени за иста област во различно време. Кога точката на земјата се поместува, растојанието помеѓу сензорот и точката се менува и така влијае и на фазната вредност снимена од сензорот. Диференцијалната интерферометрија или DInSAR е техника за мерење на поместувањата на површината на Земјата врз база на истиот процес како InSAR (Ferretti 2014).

Во изминатите две децении, процесирањето преку диференцијални интерферометарски техники на слики снимени од висина со примена на сателитска радарска интерферометрија (DInSAR) стана многу популарна алатка за одредување на мерливите ефекти од природни или антропогени феномени (или опасности) во различни области на геонауките - вклучително геологија, геофизика и глациологија (Crosetto et al. 2003), како и во градежништвото, геотехника и животна средина. Во основа ова се должи на неколку предности што ги нудат DInSAR техниките, како што се: (1) можноста за мерење на поместувањата на површината на земјата со под-сантиметарска точност; (2) достапноста на големи бази на SAR снимки направени во период поголем од 25 години и (3) прифатливи трошоци за анализа и следење на големи површини. Како резултат на тоа, научната заедница анализираа голем број студии на случаи кои успешно го испитуваат потенцијалот и ограничувањата на DInSAR техниките во различни области - меѓу кои и земјотреси (Reale et al. 2011), вулканологија (Catalano et al. 2014), бавни

свлечишта (Calvello et al. 2016; Peduto et al. 2018), мониторинг на (инфра)структури и свлечишта (Nicodemo et al. 2017; Nappo et al. 2019; Parwata et al. 2020; Yamaguchi et al. 2021; Grujić et al. 2022) и за решавање на проблеми со голем број на ризици (Pazzi et al. 2016).

Како пресвртница во опсервирањето на урбаните средини погодени од природни непогоди во крупен размер ($> 1: 5000$) е постигната со последната генерација на X-Band SAR сензори со многу висока резолуција (Brefort 2011), TerraSAR-X/TanDEM-X (TSX/TDX) на Германскиот Вселенски Центар (DLR) и COSMO-SkyMed (CSK) на Италијанската Вселенска Агенција (ASI). Ваквите сензори се карактеризираат со пократко време на повторна опсервација во однос на сензорите на Европската Вселенска Агенција (ESA) (35 дена), посебно во случај на CSK, употребата на констелациите на сателити овозможува намалување на времето за преглед на 4 дена (во просек), со што се обезбедува исклучителна можност за собирање на пакети податоци погодни за интерферометриска анализа (околу 30 SAR снимки) во пократок временски интервал, односно неколку месеци наместо неколку години. Покрај тоа, неодамнешната мисија Sentinel лансирана во април 2014 година од ESA денес обезбедува континуитет на ERS-1/2 и ENVISAT архивите со податоци со намалено време за повторно опсервирање и поголем опсег на покриеност. Достапните техники за анализа на фазните сигнали во интерферометриските групи може да се поделат во две главни класи:

- Техника на Постојани Расејувачи (Persistent Scatterers InSAR (PSInSAR)) што овозможува да се работи со целосна резолуција (Costantini et al. 2008)
- Техника на Кратки Базни Линии (Small Baseline Subset (SBAS)) корисна за мерење на поместувања на терен на големи површини (Fornaro et al. 2009a).

Техниките на постојани расејувачи функционираат со целосна просторна резолуција и идентификуваат сигурен расејувач на сигналот со мерење на нивната повеќевременска кохерентност поврзана со фазната стабилност, мониторираните расејувачи (т.е. постојаните расејувачи) се вештачки конструкции (згради, патишта, мостови) или изданоци на карпи чија големина е помала во споредба со системската резолуција. Спротивно на тоа, техниките на кратки базни линии (SBAS) се направени за да се откријат расејувачи кои се карактеризираат со бавни временски промени на својствата на расејување и со тоа да се одредуваат деформации на земјата при опсервација на големи површини (Peduto et al. 2015). Во овие техники, интерферограмите се генерираат според малите временски и просторни ограничувања на разликите, со цел дополнително да се намалат ефектите на декорелацијата поврзани со можни загуби на кохерентност, обично присутни во анализата на руралните области.

Во поново време развиени се алгоритми за примена на истата техника и на традиционалните целни точки, т.е. цели зафатени со еден пиксел кои содржат еден доминантен расејувач, како и проширени цели, т.е. цели кои се шират преку група на пиксели, каде секој содржи повеќе недоминантни расејувачи, вообичаено наречени дистрибуирани расејувачи (Distributed Scatterers (DS)). Примери за дистрибуирани расејувачи се хомогени области во пустините и во необработените земјишта (Fornaro et al. 2015).

Брзината добиена од постојаните расејувачи се постигнува долж радарската линија на простирање на сигналот (Line of sight (LOS)) во однос на фиксна точка на земјата (референтна точка) и со прецизност од под еден милиметар и точноста од под еден сантиметар на единечната мерка за поместување. Експериментален доказ за можноста да се постигне точност од редот на 1 мм на единечно мерење на поместување е обезбеден од Fornaro et al. (2013). Секој постојан расејувач е поврзан со кохерентна вредност, која

се движи од 0 до 1, што покажува како мерењето одговара на моделот кој го предвидува поместувањето.

Во науката за свлечишта, DInSAR се применува со цел откривање, карактеризација и следење на свлечиштата (како и други површински процеси) и од неодамна, за анализа на последици на изложените елементи (на пр. згради и инфраструктура).

Како конкретна алатка за далечинска детекција, DInSAR податоците обезбедуваат информации за поместувања на површината на земјата со милиметарска точност на брзината – даваат можност за истражување на траги кои посочуваат на свлечишта кои настанале во минатото, со што им овозможува на научниците да ги откријат свлечиштата кои настанале во минатото и да креираат карти на свлечишта за одреден временски период.

Во случај на следење на одредена локација со DInSAR техниката, се добиваат информации за состојбата на активност на процесот на свлекување и како такви се користат во процесите на управување со свлечиштата (поставување приоритети на кои свлечишта е потребно да се реализираат детални испитувања, кои се оние што треба поинтензивно да се следат, каде да се воспостави систем за рано предупредување, итн.).

Доверливоста на DInSAR податоците е докажана во голем број на меѓународни (TerraFirma 2013), национални и регионални (Risknat Project 2012) проекти низ целиот свет во последните години, при што на крајните корисници во моментот им се дадени на располагање обемни сетови на податоци. Пример во Италија е “Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale – PST Project” (MATTM 2010) кој нуди национално покривање со SAR сензори со висока резолуција за периодот од 1992 до 2010 година.

4.2.3 Примена на GPS/GNSS за детекција на поместувања на теренот

GPS/GNSS¹ е систем за навигација и прецизно снимање кој користи вештачки сателити. GPS има потенцијал за следење на три-димензионални поместувања на големи површини со висока точност. Методологијата за неговата примена за оваа намена претставува т.н. “предложен метод” кој е дел од “Портокалова Книга” на Меѓународното Друштво за Механика на Карпи (ISRM “Orange Book”) (Shimizu et al. 2014).

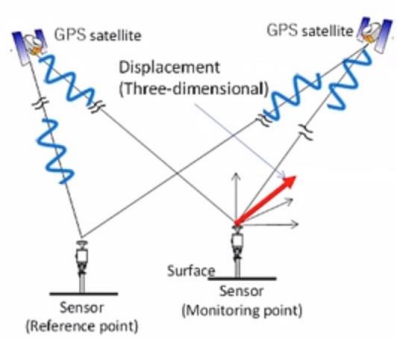
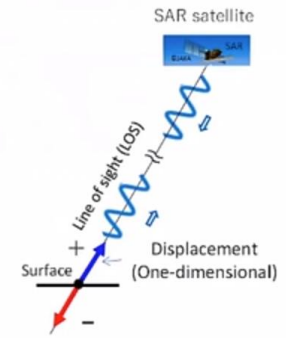
Со GPS методот се добиваат тридимензионални релативни координати помеѓу две точки со милиметарска до сантиметарска точност. Со континуирано набљудување на координатите на мерните точки, поместувањата се добиваат како промени на координатите. Стандардното отстапување на мерењето може да биде неколку милиметри, кога растојанието е <1 km, а инсталацијата и корекцијата на податоците се вршат внимателно. GPS е составен од три сегменти, имено, (1) сателити, (2) контрола и (3) корисник. Сателитите континуирано ги пренесуваат сигналите за позиционирање. Контролниот сегмент се состои од светска мрежа на копнени објекти (референтни точки). Контролата опфаќа следење на сателитите во орбитата, синхронизирање на сателитите, прикачување на податочните пораки од сателитите итн. Корисничкиот сегмент се состои од опрема за приемници и поврзан систем. Кога корисниците спроведуваат релативно позиционирање за следење на поместувањата на карпите, една антена со нејзиниот приемник се поставува на референтната точка, а другата антена се поставува на точката која се мери. Ако се постават антени на повеќе мерни точки,

¹ GNSS: GPS (САД), GLONASS (Русија), Galileo (Европа), BEIDO (Кина) и QZSS (Јапонија)

поместувањата се добиваат истовремено за секоја точка. Повеќе детали околу овој пристап за мерење на деформации на теренот може да се најдат во Shimizu et al. (2014).

Заради фактот дека методите кои се користат за детекција и следење на поместувања на теренот имаат предности и недостатоци споредени едни со други, често во пракса се применува нивна комбинација (Grujić et al. 2022). Во табела 5 е даден преглед на основните карактеристики на DInSAR и GPS/GNSS технологија.

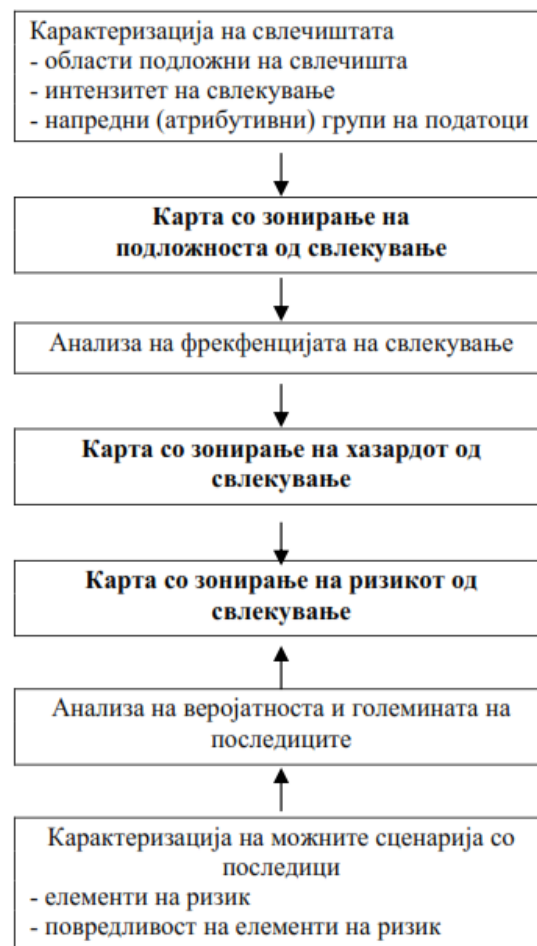
Табела 3 Карактеристики на GPS/GNSS и DInSAR технологија (преземено од: 41st ISRM Online Lecture – 23.03.23 - Prof. Norikazu Shimizu - <https://isrm.net/page/show/1666>)

	GPS/GNSS	DInSAR
Уреди	Сензори (најмалку два)	Не се потребни (без сензори)
Поместувања	3-димензионални Во точки	1-димензионални Дистрибуирани на големи површини
Мониторинг интервал	На еден час или пократки периоди	Неделен или поголем
Прецизност	mm	cm
Сина боја: предности		

5. ГЕНЕРАЛЕН ПРИКАЗ НА МЕТОДОЛОГИЈА НА РАБОТА

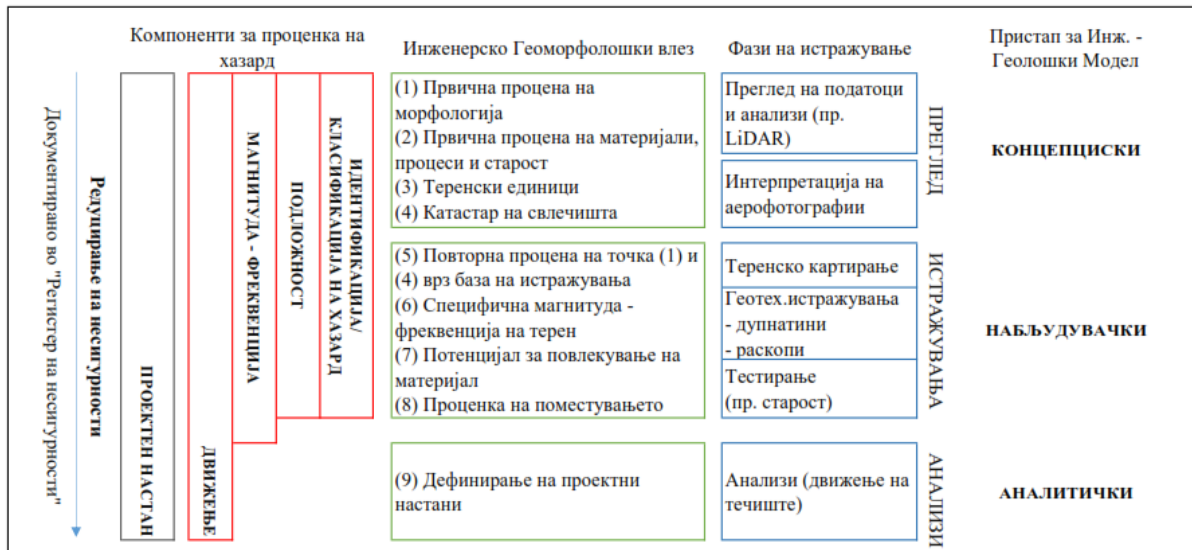
Врз основа на анализа на постојната состојба со истражувањата во ова поле, како и теоретскиот осврт, пред да се започне со процесот на моделирање на теренот, во рамките на ова поглавје се прикажани основните елементи на усвоената методологија за работа. Методологијата е поставена, врз основа на некои познати пристапи, но со одредени сопствени модификации и прилагодувања, согласно на темата која е разработена во дисертацијата, како и врз база на достапните подлоги за селектираното подрачје за анализа.

При тоа, во предвид беа земени неколку општо прифатени методологии, кои се сметаат за еден вид стандард во во светската практика. На Слика 11 е претставена генерална рамка за зонирање на ризикот од свлекување, која денес е општо прифатена помеѓу истражувачите а е предложена од страна на Cascini et al. (2005). Може да се забележи дека, детекцијата и карактеризацијата на свлечишта се иницијалниот чекор во сите понатамошни фази на анализа (зонирање на подложност, хазард и ризик од свлекување).



Слика 11 Генерална рамка за зонирање на ризик од свлекување (според Cascini et al. 2005)

На Слика 12 е прикажана една методологија поврзана со методите на подготовка на Инженерскогеолошки Модели на Теренот (ИГМ) за проблеми кај свлечиштата (Baynes & Parry 2022). Притоа, јасно се прикажани постапките на детекција на нестабилностите, кои се опишани во концептуалниот дел на дисертацијата во поглавје 4.



Слика 12 Примена на методологија на Инженерско-Геолошко Моделирање (ИГМ) за проценка на hazard и ризик од свлекување (преземено од Baynes & Parry 2022)

Согласно на ова, во дисертацијата, се прифаќа ставот дека детекцијата е повеќефазен процес, којшто за исто анализирано подрачје, зависно од фазата на истражување, проектирање, изведба, експлоатација или мониторинг, постојано е подложен на проверка и надградба.

Во овој контекст, методологијата на работа (во вид на дијаграм со тек на процесот и неговите основни фази) која е применета за детекција и карактеризација на нестабилни појави и изработка на моделите на подложност, е прикажана на Слика 13.

Целиот процес се состои од три основни фази, односно:

Фаза 1: подготовка на податоци (собирање на податоци за свлечишта, анализа на влијателни фактори)

Фаза 2: создавање на модели на подложност кон свлекување

Фаза 3: валидација на моделите.

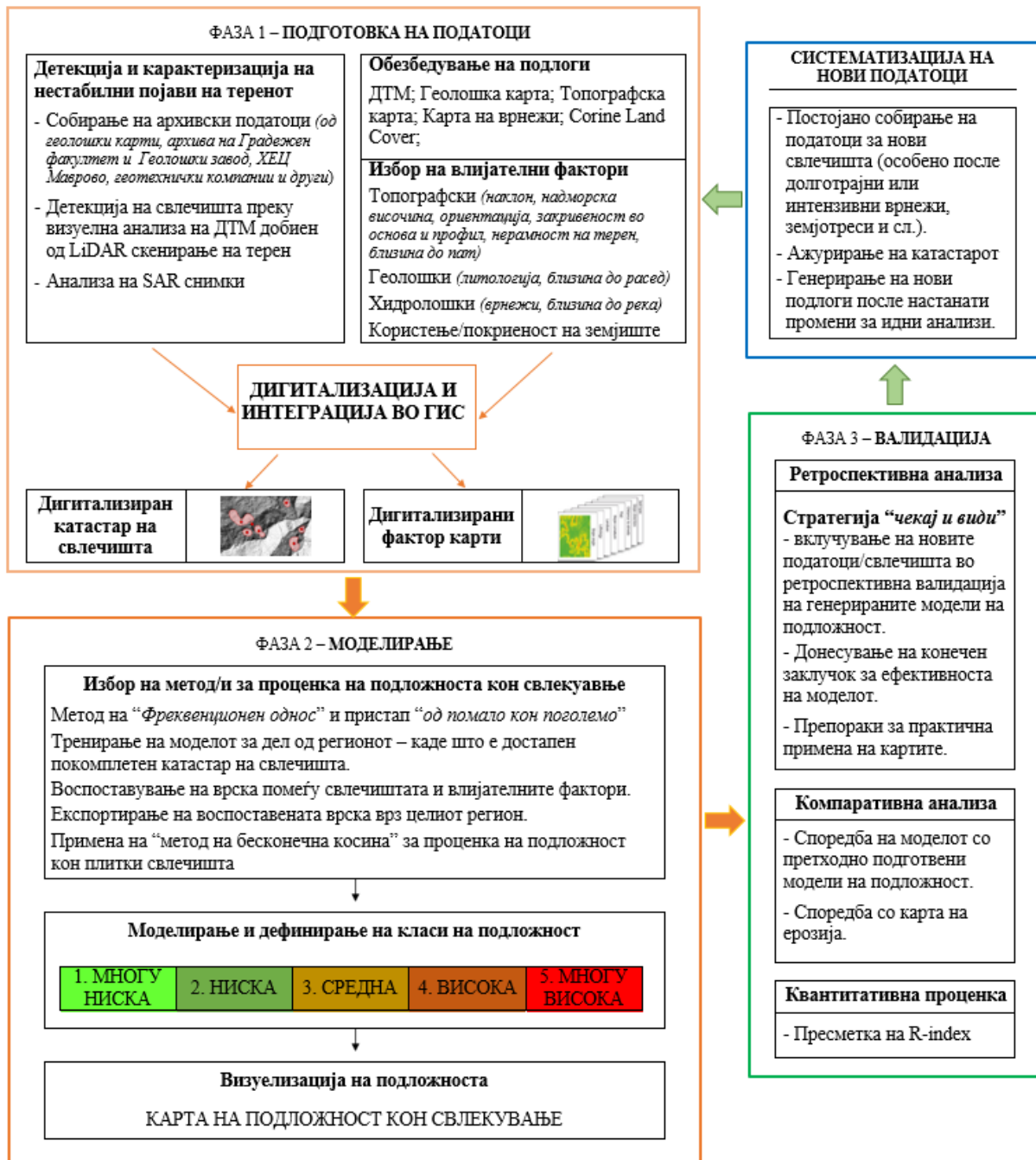
Фаза 1: обезбедување на податоци за свлечишта подразбира детекција и карактеризација на нестабилни појави на теренот, со цел формирање на база на податоци. Детекцијата и карактеризацијата на нестабилни појави значи процес на собирање на податоци, кој може да се спроведе на неколку начини, а за конкретниот случај тоа е преку прибирање на архивски податоци, анализа на дигитален модел на теренот добиен со LiDAR скенирање и анализа на SAR снимки. Обезбедените податоци за свлечишта се дигитализираат и интегрираат во ГИС, со што се добива дигитализиран катастар на свлечишта. Се прави анализа на комплетноста на катастарот и се разгледува можноста за анализи кои може да се направат. За предметниот случај донесен е заклучок дека обезбедениот фонд на податоци е доволен да се направи само моделирање на подложноста кон свлекување. За таа цел се подготвуваат податоци за избор на фактори кои придонесуваат кон појава на свлечишта. Факторите кои придонесуваат кон појава на свлечишта се многу важен елемент во целиот процес. Не постои универзален стандард или пропишани упатства за тоа кои фактори треба да се изберат. Избор на влијателни фактори зависи од карактеристиките на теренот, типот на присутни свлечишта, размерот на анализата, и секако достапноста на самите податоците. Потоа следи процесот на дигитализација и интеграција во ГИС, при што се добиваат дигитализирани карти за секој од факторите.

Фаза 2: моделирањето на подложноста вклучува избор на метод за моделирање, како и пристап за спроведување на анализата. Во предметниов случај методот кој се применува е т.н. “Фреквенционен однос”. Овој метод се применува во комбинација со пристап “од помало кон поголемо”. Тоа значи дека направен е избор на дел од целото истражно подрачје каде дистрибуцијата на познати свлечишта е покомплетна во споредба со целиот простор. За да се процени подложноста, односно за да се идентификуваат и предвидат терените подложни на свлечишта, неопходно е да се најде просторна врска помеѓу факторите кои влијаат на појавата на свлечишта и настанатите свлечишта. Оваа врска во случајов најпрво се воспоставува за избраниот помал дел, а потоа се експортира за целиот регион. На овој начин се добива подложноста кон свлекување. Се дефинираат класи на подложност врз основа на кои се врши визуелизација на резултатите во вид на карта на подложност кон свлекување.

Фаза 3: валидацијата на подготвените модели е последната фаза од целиот процес. Валидацијата на картите на подложност кон свлечишта придонесува да се зголеми доверливоста, транспарентноста и – последно но не и најмалку важно – прифатливоста на овие карти. Стандардниот но и најчест пристап за валидација, особено на моделите подготвени со примена на квантитативни методи, е квантитативниот, преку cutoff независни методи. Одредени автори сметаат дека квантитативната валидација на картите за подложност може во одредени случаи да ја прикрие предиктивната точност на моделот, па препорачуваат ретроспективна проценка на предвидливите перформанси на картите за подложност. Друг индиректен начин на валидација на подготвените модели е преку компаративна анализа. Во конкретниот случај валидацијата се прави со пресметка на т.н R-индекс и преку споредбена анализа, односно споредба со карта на ерозија и со претходно подготвени модели.

Со оглед на тоа дека оваа проблематика претставува “жива материја”, односно дека постојано се случуваат некакви промени на теренот заради различни климатски, антропогени и други влијанија, кои може да доведат до појава на нови нестабилности со тек на време, неопходно е постојано ажурирање на влезните податоци во моделите, особено на катастарот на свлечишта. Прибирањето на нови податоци ќе овозможи да се направи погоре споменатата ретроспективна анализа на картите на подложност. Ретроспективната валидација всушност е најлесниот и најсигурен пристап за валидација, базиран на стратегијата „почекај и види“. Меѓутоа ваквиот пристап во многу случаи може да биде неизводлив, бидејќи валидацијата се бара после подготовката на моделите/картите. Но, ако се анализираат претходно подготвени карти на подложност, после некој настан при кој се активираат нови свлечишта, стратегијата „почекај и види“ е навистина можна, бидејќи делот „почекај“ е веќе случен. За да продолжи валидацијата со делот „види“, единствениот услов е да се земат во предвид свлечиштата што се случиле по изработката на картата и да се види дали овие зони се моделирани како навистина подложни кон свлекување на изработената карта.

Со еден ваков процес на генерирање на модели на подложност, ќе може да се донесе реален заклучок за нивната веродостојност и да се даде препорака за нивна практична примена, или во спротивно да се прават обиди за подобрување на моделите.



Слика 13 Предложен тек на процесот за детекција и карактеризација на нестабилни појави и развој на модели

6. ДЕТЕКЦИЈА И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА НА НЕСТАБИЛНИ ПОЈАВИ ВО ПОЛОШКИ РЕГИОН

6.1 Полошки регион

Полошкиот регион се наоѓа во северозападниот дел на Македонија и покрива површина од 2416 km². Регионот го сочинуваат Полошката котлина, Шар Планина, Жеден, Сува Гора, Мавровската висорамнина, планинскиот масив Бистра и долината на реката Радика. Во државни рамки, Полошкиот регион е еден од осумте региони, кој го сочинуваат следните девет општини: Тетово, Гостивар, Маврово и Ростуше, Желино, Теарце, Боговиње, Врапчиште, Јегуновце и Брвеница.

Во однос на патната и железничката инфраструктура, регионот располага со еден автопатен правец (Скопје-Тетово-Гостивар), една железничка пруга (Скопје-Тетово-Гостивар-Кичево), повеќе регионални патишта и голем број локални правци. Регионот располага со неколку жичници и ски-лифтови во ски-центрите Попова Шапка и Маврово.

Од енергетската инфраструктура, во регионот се наоѓа Мавровскиот хидроенергетски систем со трите електрани: ХЕЦ Вруток, ХЕЦ Равен, ХЕЦ Врбен. Со вкупна акумулација од 275.000.000 m³ вода е еден од најголемите и најсложените во македонскиот електроенергетски систем. Овој систем произведува околу 430 GWh годишно електрична енергија. Водите кои се влеваат во Мавровското езеро се собираат од над 500 km² површина од планинските масиви на Кораб и Шар Планина. Водата се пренесува со канали и цевководи, систем наречен „Шарски води“ долг над 130 km. Со изградбата на доводните структури се изградени и пристапни патишта во должина од преку 170 km.

Климата во Полошкиот регион е топла-континентална на 600-900 m надморска височина, Шар Планина има ладна-континентална клима на 900-1100 m надморска височина, на 1100-2250 има планинска клима, а остнатиот дел од регионот – над 2250 m надморска височина, има алпска клима. Летото е топло и делумно влажно, зимата е студена и снежна, додека пролетта и есента се карактеризираат со постојани дождови. Во поглед на врнежите, истражното подрачје се карактеризира со највисок просек на годишни врнежи во земјата (Илијовски 2013), односно од 600 mm/годишно до повеќе од 1250 mm/годишно.

Релјефот на предметното подрачје е сложен и разновиден. Истиот претставува резултат на хетерогениот геолошки состав и сложените тектонски движења што се извршиле во геолошкото минато. Под дејство на тектонските движења се создадени покрупни морфотектонски форми: планини, котлини, планински врвови, високопланински превои, тектонски отсеци и сл. Во овој контекст, Полошката котлина е тектонска депресија, сместена помеѓу планинските гребени Шар Планина и Кораб од северозападната страна и Сува Гора, Жеден и Буковиќ од југоисточната страна. Поточно од западната и делумно северната страна Полошката котлина се граничи (контактира) со Шар Планина, од источната страна со планините Сува Гора и Жеден, а на југ се граничи со падините на Бистра (Влаиница), Буковиќ и Челоица. Шарпланинскиот масив се карактеризира со стрмни страни, остри грабени и врвови од кои некои наликуваат на Алпските. Шар Планина е распространета покрај Македонско-Косовската граница во должина околу 80 km и ширина околу 20 km, со околу десетина врвови со надморска висина над 2000 m (највисок врв Титов Врв, 2748 m). Кон југ и југозапад од овој масив се распространети Кораб (врвот Голем Кораб 2673 m, највисок во Македонија) и планинските венци Дешат и Крчин. Овие планински венци меѓусебно не се јасно издвоени туку претставуваат една низа, долж Македонско-косовската и Македонско-

албанската граница. Покрај високите врвови горенаведените планински масиви се карактеризираат и со повеќе глацијални езера (резултат на плеистоценската глацијација, најмногу на Шар Планина – околу 20) и длабоко засечени долини со бројни водопади (некои високи и над 100m, на планината Кораб). На јужната и југоисточната страна планинските венци Бистра, Буковиќ, Сува Гора и Жеден имаат поинаков карактер и се одликуват со изразито карстен релјеф. На овој потег се јавуваат многубројни карстни полиња, вртачи, пештери и пропасти. Досегашните истражувања на овие простори укажуваат дека Полошката котлина претставува структура на тонење каде паралелно со тонењето се вршела акумулација на териген материјал еродиран од околните планински масиви. Дебелината на квартерните наслаги се проценува на 70–80 m, а на неогените седименти на преку 300m (Arsovski and Petkovski 1975). Полошката котлина, припаѓа на сливното подрачје на реката Вардар. Најзначајни реки во Полошкиот регион се: Вардар, Пена, Маздрача, Бистрица, Ростушка Река, Радика, Лакавичка, Боговињска, Карабунар-Камењане, Палчиштска, Речица, Поројска, Вејачка, Непроштенска, Слатинска, Доброштска, Одранска Река, Беловишка и Љуботенска.

- Тектонска реонизација

Врз основа на јасно наведени тектонски принципи кои се темелат на теоријата за глобална тектоника или тектоника на плочи, територијата на Македонија се дели на различни тектонски единици, односно Вардарска зона, Пелагониски хорст – антиклинорум, Западно-Македонска зона, Цукали-Краста зона, Српско-македонски масив и Краиштинска зона. Полошкиот регион во тектонска смисла, во најголем дел припаѓа на Западно-Македонската зона, а еден многу мал дел зафаќа и од Цукали-Краста зоната (слика 14).



Слика 14 Карта на тектонска реонизација на Македонија (Арсовски 1997), со локација на Полошки регион (дигитализирана од Неделковска Н.)

Западно-Македонската зона генерално, како и Полошкиот регион, може да се подели на две субзони: источна, каде доминира кисел гранитоиден магматизам и западна, каде доминираат базити и ултрабазити.

- Литоформациски карактеристики на Полошкиот регион.

Во Полошкиот регион, кој генерално ја зафаќа горната половина на Западно-Македонската зона се издвојуваат следните литоформациски единици:

- Литоформациски единици на каледонскиот комплекс кој е претставен со мал дел по источниот дел на Шар Планина. Најчесто се застапени кварц-серицитски и кварцни шкрилци, со партии и леќи од графитични и биотитски шкрилци.
- Долно-каледонските формации на источните падини на Бушева планина па се до Добра Вода (кота 2062 m) се претставени во долниот дел со формација на кварц-серицитски шкрилци, а погоре со формација на зелени шкрилци.
- Аналогна формација на зелени шкрилци е издвоена и на подрачјето на река Пена (Шар Планина), во која во долниот дел доминираат зелени, хлоритско-серицитски шкрилци кои се сменуваат во погорните делови со карбонатни шкрилци. Последните наизменично се сменуваат со филити и серицитско-кварцни шкрилци, кои во погорните делови се сменуваат со слоевити и банковити мермери. Како преодни слоеви се застапени калкшисти.
- Формациите што се застапени во горниот дел на каледонскиот комплекс се застапени на терените на Шар Планина, југозападно од долината на р. Пена. Доминираат теригени, псамитско-пелитски наслаги и теригено-карбонатни наслаги.
- Во најдлабоко еродираниот подрачје на Тајмиште и Брждани-Јудово широко се застапени метапесочници, кварцни шкрилци, метакварцити и кварцити. Овде доминира и псамитски и алевролитски материјал, додека пелитскиот е многу помалку застапен.
- Шамозитско-сидеритските и шамозитските шкрилци се тесно поврзани со горните делови на филитоидите, во кои освен типични филити се присутни темносиви аргилошисти и металампрофири а се присутни во регионот на Тајмиште.
- Гостиварското подрачје, северните делови на Бистра и југозападниот дел на Шар Планина е изградена од филити, аргилофилити, кварц-серицитски шкрилци, кварц-серицит-графитични шкрилци, метаалевролити и метапесочници, кои меѓу себе се сменуваат и латерално и вертикално.
- Карбонатната формација е застапена на Сува Гора, Жеден, делумно на Шар Планина и Кораб. Јужно од Гостивар оваа формација е застапена со силно катаклазирани доломитски и калцитски мермери. Кај Кораб е претставена со плочести и банковити мермери. Во подрачјето на Сува Гора присутни се доломити и доломитски варовници, мермеризирани доломити. Кај Жеденскиот масив се застапени калцитски мермери и поретко мермеризирани варовници
- Гранитоидната формација е застапена на Шар Планина и на некои други помали локалитети. Претставена е со неправилни интрузивни тела (батолити) или помали тела и дајкови зафатени со површинско распаѓање.
- Флишоидната формација на раноалпскиот комплекс е застапена во горниот тек на р. Радика. Изградена е од глинци, рожнаци, песочници, лапоровити наслаги, калкарени и песочливи варовници.
- Горниот дел од раноалпскиот комплекс е застапен во басенот на р. Радика и нејзините притоки во зоната Цукали Краста. Овде се издвоени флишоидна и карбонатна формација. Флишоидната формација која е најмногу застапена, претставена е со леќи

од конгломерати, песокливи глини и варовници кои се застапени во пакети. Карбонатната формација е застапена во ограничени простори во подрачјето на Бањиште и е претставена со сиви и темносиви банковити и масивни варовници.

- Во басенот на долниот тек на р. Радика е застапен средноалпскиот комплекс со наслаги од горен еоцен претставени со теригено-моласна формација. Составена е од конгломерати, грубосортирани блокови од постарите формации, преталожени глинци и песочници и лапоровити варовници. Овој дел е дел од тектонската единица Цукали-Краста зона.
- Во Полошката депресија наслаги од плиоценската лимничка формација се констатирани само како реликти по нејзините периферни делови. Во најголем дел депресијата е покриен со современи (квартерни) алувијално-пролувијални наслаги. Споменатите појави од плиоценската формација се изградени од песокливи глини, песоци, чакали, суглини. Погорните делови се ситнозрнести и во нив доминираат глини и лапоровити глини.

- Структурни форми во Полошкиот регион

Од структурно-тектонски аспект може да се констатира дека овој регион припаѓа на масивите на планините на Шар Планина, Кораб, Бистра, Сува Гора и Жеден како и Полошката депресија која тоне вдолж млади раседи кои се сеуште тектонски активни.

Во формирање на теренот главна улога одиграла како херцинската така и алпската орогенеза. За време на херцинската орогенеза палеозојските метаморфити кои се претставени со дебел комплекс на разноразни шкрилци, мермери и магматски карпи биле регионално метаморфозирани до степен на фацијата на зелени шкрилци и набрани во благи синклинални и антиклинални структурни форми. Структурите формирани во херцинската орогена фаза во најголем дел биле преработени и пореметени со алпската орогенеза која условила силен динамометаморфизам. Во покасните фази на алпската орогенеза кон крајот на среден или почетокот на горен плиоцен овој регион бил зафатен со интензивна дисјунктивна тектоника како резултат на што се формирани Полошката и Мавровската депресија (ровови). Новоформираните структури формирани со алпската орогенеза се карактеризираат со брахиструктури синклинални, антиклинални и моноклинални форми, попречни и напречни раседи а многу е изразено и секундарното набирање со кое се зафатени како палеозојските така и тријаските и јурските седименти.

Шар Планинскиот блок (Арсовски, 1975) има форма на хорст издолжен на над 60 km во североисточен правец, при што северната половина е на територијата на Косово. Според положбата на рбетниот (највисокиот) дел на овој планински масив, кој претставува реликт на највисок релјеф, за неотектонската етапа овој хорст е издигнат на повеќе од 2400 m. Оваа морфоструктурна единица од југоисточната страна т.е контактот со Полошката котлина е манифестиран со стрмни падини каде изолинии со подеднакво издигање на некои места може да се следат и до 1000m. Односот на Шар Планинскиот блок според досегашните сознанија кон Полошката депресија, е тектонски условен со зона на ешалонирани раседи по кои се одвивале главните поместувања - издигања. Ова предусловува и многу стрмни релјефни форми на периферниот дел на Шар Планинскиот Блок кон Полошката котлина со манифестација на многубројни современи геолошки процеси како денудација, јаружење, појава на свлечишта и сл.

Како покарактеристични структурно-тектонски форми кои се поврзани за Шар Планинскиот блок може да се издвојат пликативните структури кои се застапени во повеќе делови на Шар Планина, претежно ориентирани во правец запад-исток во јужниот дел, а северно од р. Маздрача тие имаат северозападно протегање. Овде оските на антиклиналите се поврзани со длабоко дисецираните речни долини (притоки на

Вардар) додека синклиналите ги заземаат просторите помеѓу антиклиналите. Оските на последните, кои се поврзани со речните долини, повиваат конвексно кон север исто како и речните текови. Од антиклиналите се издвоени: Вруточка, Јеловљанска, Маздрачка, Новоселска, Пена, Лешочка, Бистричка и Љуботенска. Од синклиналите се издвоени: Јамбо, Врапчински басен, Матенска синклинала, басен Орлов камен, синклинала Селце, Теаречка синклинала.

Корабскиот блок ги завзема пограничните делови со Албанија, и кон југ без некои изразени граници поминува кон планинските масиви Дешат и Крчин. Овој масив како морфоструктурна целина претставува хорст зафатен со неотектонската етапа со интензивно издигање и одвоен од соседните терени со раседи. Како и Шар Планинскиот и овој блок се карактеризира со издигање од над 2400 m поврзано со неотектонската етапа. Од западната страна Корабскиот блок е ограничен со депресијата Пешкопија (Албанија) која тоне формирана вдоль дримските раседни структури со меридијален правец, додека од источната страна со раседот по реката Радика, кои се активни и денес а повремено и сеизмогени. Во басенот на р. Радика, во зоната Цукали-Краста се издвоени две поизразени пликативни структури – Дешатската синклинала и Радичката антиклинала. Оската на првата е ориентирана по билото на планината Дешат. Радичката антиклинала се протега по должина на р. Радика. Во целина оваа структура со многу бројни раседи е разбиена на помали блокови. Кон север, во басенот на р. Радика, покрај границата со Албанија, помеѓу Галичката навлака и Цукали-Краста, се издвоени две пликативни структури, една синклинала и една антиклинала кои во овој дел на Кораб се ориентирани запад-исток. Истите се разбиени со различно ориентирани локални раседи на помали делови и во целина се навлечени кон југ-југозапад на Цукали-Краста сегментот.

Бистранскиот блок е поврзан со планината Бистра и нејзините периферни делови. Како морфоструктурна единица се разликува од претходно опишаните бидејќи во периодот на неотектонската етапа е релативно помалку издигнат и издигањето е релативно рамномерно. Највисоките делови од овој блок се манифестираат со денудацијска зарамнина која е настаната во првата неотектонска фаза, кога тектонските процеси биле многу слаби. Од источната страна блокот на Бистра со ешалонирани раседи е одвоен од Кичевската депресија и масивот Буковиќ кои се релативно спуштени а од јужната страна по долината на р. Треска и Тресонечка река преоѓа расед кој го издвојува овој блок од соседните. На блокот Бистра на кој се надоврзува Мавровскиот ров и масивот Буковиќ се издвоени повеќе структурно-тектонски форми. На Бистра е издвоена една брахисинклинална форма која се граничи со еден регионален расед, издвоен како Мавровски кој се протега покрај југозападниот дел на Мавровско езеро во североисточен и југозападен правец во чија должина доаѓа до лево поместување (смолкнување).

Сувогорскиот блок се наоѓа во меѓуречието на р. Треска и Вардар. Од западната страна се граничи со Полошката депресија, од север со Жеденскиот масив и Скопската депресија, а од јужната страна со блокот Караџица. Сувогорскиот блок во неотектонската етапа е зафатен со рамномерно издигање и во внатрешната структура не се констатирани некои деформации кои би ја усложниле оваа морфоструктурна целина. Сувогорскиот блок од северната страна од соседните морфоструктури е одвоен со регионален расед кој е многу контрастно изразен особено кон Скопската и Полошката депресија. Северно од Сувогорскиот блок ккао посебна морфоструктура е издвоен Жеденскиот блок. Овој блок од источната страна е ограничен со Скопската депресија и Радушкиот масив а од западната страна со Полошката депресија.

За Полошката депресија може да се генерализира дека таа претставува рамничарски дел сместена помеѓу опишаните морфоструктурни блокови спуштена

вдолж систем на раседни дислокации чија неотектонска активност е доста висока. Многу контрастно се изразени Сувогорскиот и Шар Планинскиот расед. Сепак како најмаркантен расед во овој регион е Шар Планинскиот расед кој претставува една широка раседна зона со систем на раседи кои се протегаат во должина од над 45 km. Вдолж оваа раседна зона се констатираат и минерални извори а појавата на мермерни оникси укажува и на термални извори, во минатото.

6.2 Катастар на нестабилни појави (свлечишта)

Секој сериозен обид за проценка на подложноста, утврдување на hazardот или за проценка на ризикот од свлекување мора да започне со собирање на информации за тоа каде се наоѓаат свлечиштата. Оваа постапка е и основна во предложената методологија од слика 13.

За таа цел се врши картирање на свлечишта, а наједноставна форма за презентирање на резултатите претставува катастарот на свлечишта/нестабилни појави. Што претставува катастар на нестабилни појави на теренот и какви податоци треба да содржи истиот, Hervás (2013) дава комплетна дефиниција: *“Катастарот на свлечишта е детален регистар за дистрибуцијата и карактеристиките на минати свлечишта. За секое свлечиште кое е дел од катастарот, основните информации вообичаено вклучуваат: единствен број за идентификација (идентификационен број), име на местото на свлечиштето (за поголеми свлечишта), локација (географски координати, општина, регион или држава), тип на свлекување, датум на појава доколку е познат или последно реактивирање, состојба на активност и волумен (или обем на површината). Како дополнителни информации може да се вклучат: геометрија на свлечиштето (димензии на површина, длабина на клизна рамнина), геологија (литологија, структурни и материјални карактеристики), хидрогеологија, покриеност или намена на земјиштето, геометрија на косина, предизвикувач, настанати штети (на пример жртви, штета изразена во економска вредност или на описен начин), преземени санациони мерки, методи за истражување и датум, како и името и библиографските референци за истражувачот. Дополнителни податоци, како што се илустрации (земјени или аеро-фотографии, цртежи) и мониторинг податоци (вид на инструментација, стапка на поместување) исто така понекогаш може да се најдат во катастарот.”*

Катастрите на нестабилни појави/свлечишта може да се подготват со примена на различни техники, а изборот на соодветна техника зависи од целта на катастарот, размерот, големината на подрачјето, размерите на основните карти, резолуцијата и карактеристиките на достапни далечински снимки (аеро-фотографии, сателитски снимки, LiDAR елевациони податоци и сл.), вештините и искуството на истражувачите и ресурсите на располагање за завршување на работата (Guzzetti et al. 2000). Имено, најчесто се подготвуваат за неколку цели:

- да се документаира простирањето на свлечиштето;
- да се истражи дистрибуцијата, видот и патеката на свлечишта во однос на морфолошките и геолошките карактеристики на теренот;
- да се разберат факторите кои доведуваат до појава на свлечишта;
- да се проучи еволуцијата на пејзажите каде доминираат процеси на загуба на земјиште;
- како прелиминарен чекор за проценка на подложноста, hazardот и ризикот од свлекување.

Катастрите/катастарски карти, може да се класифицираат според нивниот *размер и начин на картирање*. Катастри на свлечишта во *мал размер* ($< 1: 200\ 000$) се подготвуваат претежно од податоци добиени од литература, преку анкети до јавни организации и приватни консултанти, со пребарување низ списанија, технички и научни извештаи или со интервјуирање на експерти за свлечишта, но постојат примери од катастри во мал размер подготвени преку визуелна анализа на голем број аеро-фотографии. Катастри на свлечишта во *среден размер* ($1: 25\ 000$ до $1: 200\ 000$) се подготвуваат преку систематско толкување на аеро-фотографии во размери кои се движат од $1: 60\ 000$ до $1: 10\ 000$, и со примена на локални теренски проверки на историските информации. Катастри на свлечишта во *голем размер* ($> 1: 25\ 000$), обично се прават за ограничени области, преку толкување на аеро-фотографии во размери поголеми од $1: 20\ 000$, сателитски слики со многу висока резолуција или дигитални модели на терени, и обемни теренски истражувања.

Врз основа на начинот на картирање, катастрите на свлечишта може да се класифицираат како *архивски* или *геоморфолошки* катастри. Архивскиот катастар дава информации за свлечишта добиени од литература или други архивски извори. Геоморфолошките катастри може да се класифицираат како *историски*, *направени според одреден настан*, *сезонски* или *повеќевременски* катастри. Геоморфолошки историски катастар прикажува кумулативни ефекти од многу настани на свлечишта во период од десетици, стотици или илјадници години. Во историските катастри, староста на свлечиштата не е диференцирана, или е дадена во релативна смисла, т.е. неодамнешни, стари или многу стари свлечишта. Катастрите направени според настан прикажуваат свлечишта од настан со еден предизвикувач, како земјотрес, врнежи, топење на снег и сл. Кај овие катастри, датумот на свлекување одговара на датумот (или периодот) на предизвикувачот-настанот. Со користење на повеќе сетови на воздушни или сателитски слики од различни датуми, може да се подготват повеќевременски и сезонски катастри. Сезонски катастар содржи свлечишта предизвикани од еден или повеќе настани во текот на една сезона или неколку сезони (Fiorucci et al. 2011), додека повеќевременските катастри содржат свлечишта предизвикани од повеќе настани во подолги периоди (на пример, години до децении) (Galli et al. 2008). Во сезонските и повеќевременските катастри датумот (или период) на свлечиштето се пропишува врз основа на датумот (или периодот) на предизвикувачот, и датумот на слики или теренски истражувања извршени за пополнување на катастрите.

Квалитетот на катастарот на свлечишта зависи од неговата точност и од видот и веродостојноста на информациите прикажани во катастарот. Во однос на утврдување на точноста на катастарот на свлечишта, стандарди не постојат (Galli et al. 2008). Точноста зависи од неговата комплетност, и од географската и тематската точност на прикажаните информации. Комплетноста се однесува на процентот на свлечишта прикажан во катастарот во споредба со реалниот (и повеќето пати непознат) број на свлечишта во предметната област. Комплетноста е поврзана со големината на најмалото свлечиште што е прикажано во катастарот, информација што ретко се обезбедува со карта на свлечишта. Географската точност ја мери кореспонденцијата помеѓу графичкиот приказ на свлечиштето на карта и позицијата, големината и формата на истото свлечиште на терен. Тематската точност се однесува на исправноста на придружните информации поврзани со секое свлечиште во катастарот, вклучувајќи на пример вид на поместување, проценета старост и длабочина на клизна рамнина, степен и вид на активност.

При преглед на достапната литература, се забележува дека катастрите се карактеризираат со хетерогена комплетност и точност. Катастрите на свлечишта направени на глобално, континентално и национално ниво, се разликуваат од оние кои

се однесуваат на помали области, и честопати немаат подетални податоци за внесените феномени, како што се нивна територијална дистрибуција или вид, големина, активност и причинителни фактори (Calvello & Pecoraro 2018).

Формирањето на катастар на свлечишта за Полошкиот регион, се прави со примена на три пристапи:

1. Собирање и анализа на архивски податоци за свлечишта.
2. Детекција на свлечишта преку анализа на сателитски снимки добиени од сензорите на радар со синтетичка антена (SAR) и обработени користејќи ја техниката Differential Interferometry (DInSAR).
3. Детекција на свлечишта, врз основа на анализа на дигитален теренски модел (ДТМ) добиен од податоци од LiDAR скенирање на теренот.

Детален опис на овие пристапи е даден во продолжение.

6.3 Формирање на катастар на свлечишта на Полошки регион преку собирање на архивски податоци

Активностите за собирање на архивски податоци за свлечишта, со цел формирање на катастар на свлечишта за Полошкиот регион, се вршеа во период од четири месеци, помеѓу Ноември 2019 и Јуни 2020, и се состојат од:

- Анализа на сопствени податоци за свлечишта;
- Посети на локации забележани во анкетите пополнети од општините во рамки на проект на УНДП;
- Дигитализација на свлечишта од стари геолошки карти во размер 1: 25000;
- Анализа и дигитализација на свлечишта од архивата на Геолошки завод на Македонија;
- Интервјуа со вработени и колеги во пензија од геотехнички компании;
- Анализа на свлечишта вдоль каналите на хидроенергетскиот систем „Маврово“;
- Посета на Државниот Универзитет во Тетово и заедничка посета на терен;
- Посети на повеќе геотехнички компании низ Македонија.

Анализата на сопствените податоци се состои од пребарување во архивата на Градежниот факултет и дигитализација на свлечиштата во ГИС. Бидејќи дел од оваа документација е нецелосна или без карти, дефинирањето на полигоните за одреден број свлечиштата беше неуспешно. Ова претставува ограничување и за други свлечишта од други извори на податоци. За неколку свлечишта, полигоните се дефинирани со помош на постари пензионирани колеги. Посетени се повеќето општини кои одговорија на анкетата за свлечишта (Прилог 1), а посетени се и свлечиштата со помош на нивниот технички персонал. Сепак собирањето и архивирањето на податоци за свлечишта е еден од главните проблеми во општините. Нема официјални или неофицијални бази на податоци. Поради новата административна организација на земјата од 2004 година, формирани се неколку нови општини, па можно е некои порано расположливи информации да се изгубени. Општините имаат само некои привремени податоци за неодамнешни настани, но дури и овие податоци се ретки и нецелосни. Свлечиштата од геолошките карти во размер 1: 25000 и оние од архивата на Геолошкиот завод на Македонија се дигитализирани во ГИС и извлечени се основните параметри на свлечиштата. Свлечиштата по каналите на хидроенергетскиот систем „Маврово“ се дигитализирани со колеги од компанијата. Забележано е дека, во однос на општините, персоналот на „Маврово“ поседува организирани податоци за појава на свлечишта (иако не многу професионално). Свлечиштата од оваа база на податоци се многу важни бидејќи

се појавуваат на повисока надморска височина над населените места во Полог и претставуваат опасност за населението и имотот во нивната непосредна или посредна близина. Некои свлечишта за кои постојат само пишани извештаи се картирани со помош на стручни претставници од Државниот Универзитет во Тетово. Истиот процес е спроведен и за други свлечишта со помош на колеги кои работат во геотехнички компании.

Базата на податоци за свлечишта е составена од различни извори на податоци, секој со различен квалитет и точност. Имено, свлечиштата од геолошките карти во размер 1:25 000 се картирани во периодот 1960-1970 година, но нивното точно време на појавување може да било многу порано. Полигонот на некои свлечишта е дефиниран по сеќавање на инженерите кои работеле на тие терени во минатото. Дури и за некои од најново регистрираните свлечишта нема податоци за штети и слично. Поради овие ограничувања подготвката на понапреден катастар беше отежната. Усвоени се само полињата во Табела 4. Ова е во согласност со светската литература, што сугерира дека, за да се создаде база за модели на hazard со висок квалитет за регионите, треба да се внесат само сигурни податоци во базите на податоци. За неколку случаи во базата на податоци, не се пополнети дури некои од полињата презентирани во Табела 4.

Табела 4 Структура на базата на податоци за свлечишта на Полошки регион

ИДЕНТИФИКАЦИОНЕН БРОЈ	
ЛОКАЦИЈА	Географска позиција (x)_Ширина (WGS84 ¹)
	Географска позиција (y)_Должина (WGS84 ¹)
	Надморска висина (m)
	Име на локалитет
ГЕОЛОГИЈА	Основна геолошка градба на теренот
СОСТОЈБА НА АКТИВНОСТ	Датум на појава
	Последна промена во активноста
	Генерална состојба на активноста
КАРАКТЕРИСТИКИ НА СВЛЕЧИШТЕ	Тип на поместување
	Површина во (m ²)
	Насока на поместување
	Предизвикувач /предуслов за појава на свлечиште
	Длабина на свлечиште (<3 и >3m)
ЧИНЕЊЕ	Штети (само провизорни податоци)
	Санациони мерки
	Мониторинг
ИЗВОР НА ПОДАТОЦИ	Институција која поседува документација
	Други важни забелешки за појавата

¹World Geodetic System 1984 (Светску Геодеетску Систем 1984)

За секоја од посетените локации, постои албум со фотографии. Просторното позиционирање е направено со GPS уред. Контурите се забележани во теренски дневник со скици на свлечиштата. Контурите на свлечиштата подоцна се нацртани во канцеларија во ГИС програма и сите податоци се внесени во соодветната атрибутна табела во EXCEL и ГИС (базата на податоци). Извадок од атрибутната табела на базата на податоци е даден на Слика 15.

ID	X	Y	Geology	Azimuth	place name	landslide	aprox elev	last chang	date ocur	Activity	Area m2	Trigger	Depth	Damages
1002	4670095	7510947	albifizira	270	Pat do planinarski dom Ljuboten	translational sliding, earth	1224	2015	1990	inactive	7565	cutting	shallow	traffic damage
1003	4669968	7511041	albifizira	290	Pat do planinarski dom Ljuboten	rockfall	1312	2018	2010	active	1164	cutting	shallow	traffic damage
1004	4669103	7510722	albifizira	282	Pat do planinarski dom Ljuboten	translational sliding, earth	1177	2012	2010	inactive	3793	cutting	shallow	traffic damage
1021	4645788	7505520	Raznovidi	270	Pat asfalten od selo kon planinata	rock slide	530	2019	2008	active	2884	cutting	shallow	zagrozen soob
1024	4656915	7485906	sericitiski	0			0	0	0		13155			
25	4646109	7491665		180			0	0	0		33719			
1025	4650180	7495662		130			0	0	0		122571			
1030	4626839	7471053		0			0	0	0		93264			
40	4626991	7470677	Skrilci+de	200	Recki kanal	translational sliding, earth	1565	0	1982	active	307894	morpholog	deep	endangered pr
1033	4628387	7483050	granit+del	45	Unsettled	unknown	0	0	0	unknown	10386	unknown	unknown	no infrastruc
1034	4637169	7482241	Grafititoni	300	Vo silv na mazdraca		1256	1980	1980	unknown	16820	surrface w	deep	zagrozen objek
1035	4640293	7485386	Grafititoni	180	Lomnica	rotational debris slide	1334	1980	1980	unknown	96803		deep	zagrozen objek
1036	4640446	7485589	Grafititoni	180	Lomnica	rotational debris slide	1312	1980	1980	unknown	99372		deep	zagrozen objek
1037	4640306	7485976	Granodiori	180	Lomnica	rotational debris slide	1339	1980	1980	unknown	7402		shallow	zagrozen objek
1038	4639804	7486883	Granodiori	180	Lomnica	rotational debris slide	1328	1980	1980	unknown	10649		shallow	zagrozen objek
1039	4637687	7484907	Skrilci (F	60	Vrapiste	rotational	1345	2010	2008	unknown	24401		deep	zagrozen objek
1040	4637206	7482984	Crni grafi	350	Obesena voda	rotational	1359	1980	1980	unknown	15304		deep	zagrozen objek
1041	4628851	7484029	Grafititoni	190	8+050	rotational	1274	2008	2008	unknown	2994		deep	zagrozen objek
1042	4644334	7487969	Serija na	90	49+415	translational sliding	1314	2008	2008	unknown	91319		deep	zagrozen objek
1043	4644907	7489735	Serija na	180	54+300	translational sliding	1349	2008	2008	unknown	32861		deep	zagrozen objek
1044	4644851	7487722	Serija na	180	50+300	intensive erosion	0	0	0		37561			
1045	4631609	7470020	Filitoidi+	90		translational sliding	1496	2008	2008	unknown	9692		deep	zagrozen objek
1048	4637327	7490542	deluvium (	180	Negotino-Polosko	translational sliding	580	2020	2020	active	117	excavation	shallow	zagrozen pat d
1049	4638291	7488675	filitoidi	190	Negotino-Lomnica pat	translational sliding	720	2020	1960	active	13270	groundwat	deep	zagrozen pat d
1050	4637871	7489223	filitoidi	170	Negotino-Lomnica pat	translational sliding	640	2018	2018	active	844	erozija	shallow	osteten pat, ot
1051	4637833	7489317	filitoidi	180	Negotino-Lomnica pat	translational sliding	638	2020	2015	active	285	erozija	shallow	obrusuvanje na
1052	4637815	7489545	filitoidi	170	Negotino-Lomnica pat	translational sliding	632	2019	2006	active	965	erozija	deep	povremeno svli
1053	4637336	7490085	deluvium (	60	Snegotino-Kaliste	translational sliding	590	2020	2008	active	125	excavation	shallow	zagrozen lokal
1054	4639009	7491294	deluvium (	90	Senokos	translational sliding	622	2020	1015	active	4859	surface an	shallow	zagrozena povr
1026	4644893	7494244	deluvium (	95	Kamenanje	rotational earth slide	520	2019	2018	active	55	rain	shallow	urnat potporen
1027	4642612	7493234	deluvium (	185	prostor na pat pomegu sela Bogovi	translational sliding	0	2019	2005	active	18114	vrmezi	shallow	zagrozen vo ov
1028	4640248	7492641	prolujal	90	Pirok	translational sliding	550	2018	1980	active	7638	unknown	shallow	osteten pat, iz
1029	4640750	7492847	na sam ko	95		unknown	530	2006	2006	inactive	284	unknown	nema po	osteten potpor
1032	4622884	7483050	Skrilci (F	200	Duf 13 zatvoracnica	complex slide	1215	1999	1989	inactive	19911		deep	zagrozen objek
15	4656782	7497601	Skrilci+de	90	Germo	complex slide	0	0	0	inactive	392140	rain, under	deep	zagrozena nas
1031	4625553	7484606	karbonatni	50	Vodostan Vrutok	translational sliding	1150	2019	2010	active	19040	surface er	shallow	srusen objekt c
81	4601808	7468010	Osnovna k	90	Skudrinje	complex slide	982	2009	2006	sanation u	21417	tectonics	shallow	endangered se

Слика 15 Атрибутна табела од ГИС базата на податоци за свлечишта

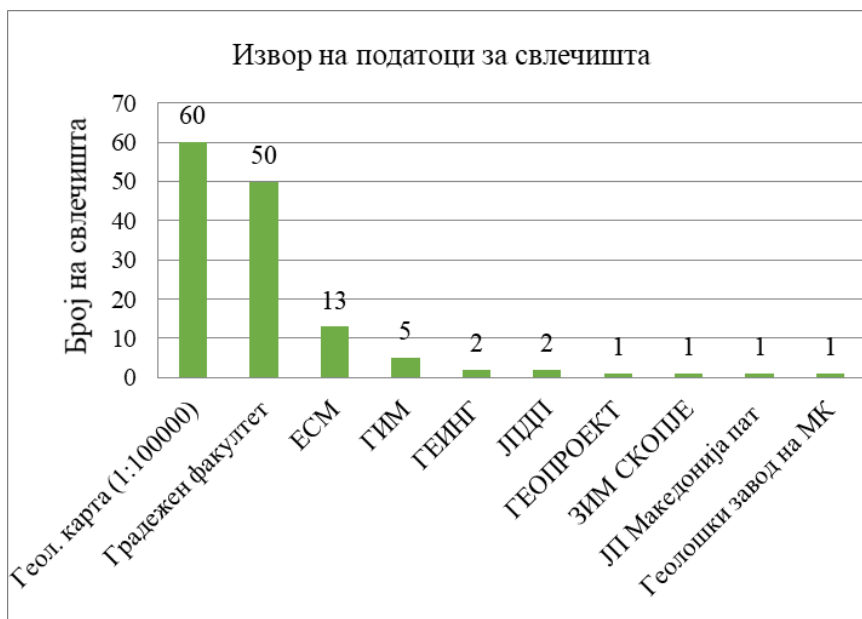
На крајот, сите информации се пренесени во KMZ датотека што овозможува вчитување во “Google earth” програмата, со цел јасна визуелна презентација за обични корисници, а не само за експерти. Преку ваквиот пристап, формирана е база на податоци за свлечишта која се состои од 136 појави. Се смета дека бројот на свлечишта во регионот е далеку поголем, но тие не се регистрирани соодветно во минатото. Неопходно е базата на податоци да биде навремено и соодветно дополнувана при појава на нови нестабилни појави на теренот.

6.3.1 Анализа на податоците во базата на податоци

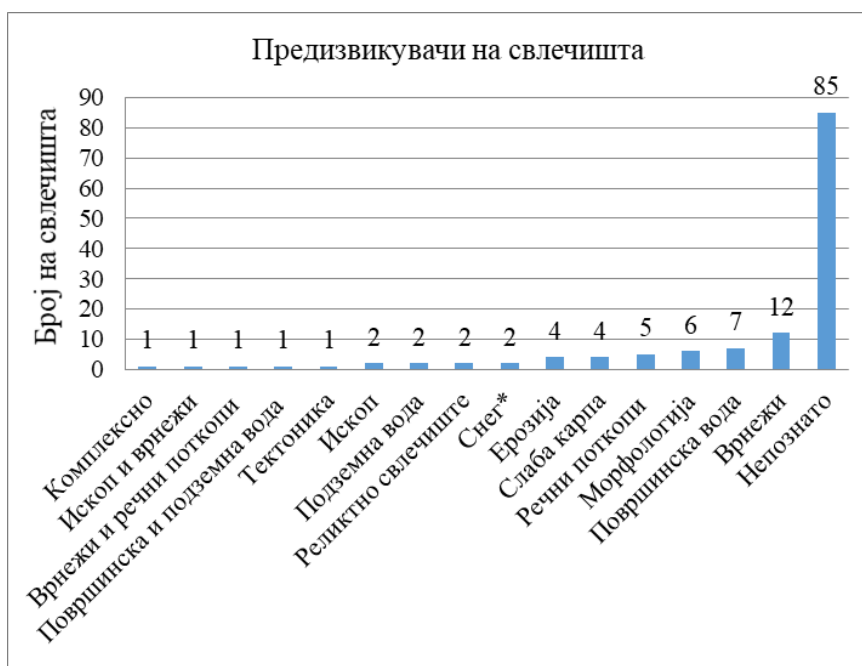
Со цел да се откријат некои можни шеми на појавување на свлечиштата од различни перспективи, статистички е обработен целиот фонд на податоци во базата, текстуално, табеларно и низ дијаграми.

Повеќето од податоците за свлечиштата се извлечени од основните геолошки карти во размер 1:100000 и соодветни работни верзии во размер 1:25000. За овие свлечишта единствени податоци кои се познати се геолошката градба, површината и насоката на поместување. За сите други параметри нема достапни податоци, освен за свлечишта кои сеуште се активни или се карактеризираат со делумно реактивирани поместувања. Некои од свлечиштата кои се сметаат за „помлади“ всушност се дел од постари поголеми свлечишта (на пр. случај во општина Боговиње). Значителен број податоци потекнуваат од извештаите архивирани на Градежниот факултет во Скопје, односно 50 појави. Класификацијата во однос на извор на податоци е дадена на Слика 16.

Во врска со предизвикувачот на свлечиштата, откриено е дека за повеќето случаи причината е непозната (за скоро две третини). Од појавите со познати предизвикувачи, најголем дел од свлечиштата се предизвикани од врнежи од дожд, некои како резултат на површинските води во карпестите маси и делувиумот, морфолошки predispozicii и релативно мал број заради ископи и други предизвикувачи. Нема информации за свлечишта што се предизвикани од земјотреси. Класификацијата во однос на предизвикувачот на свлечиштата е дадена на Слика 17.

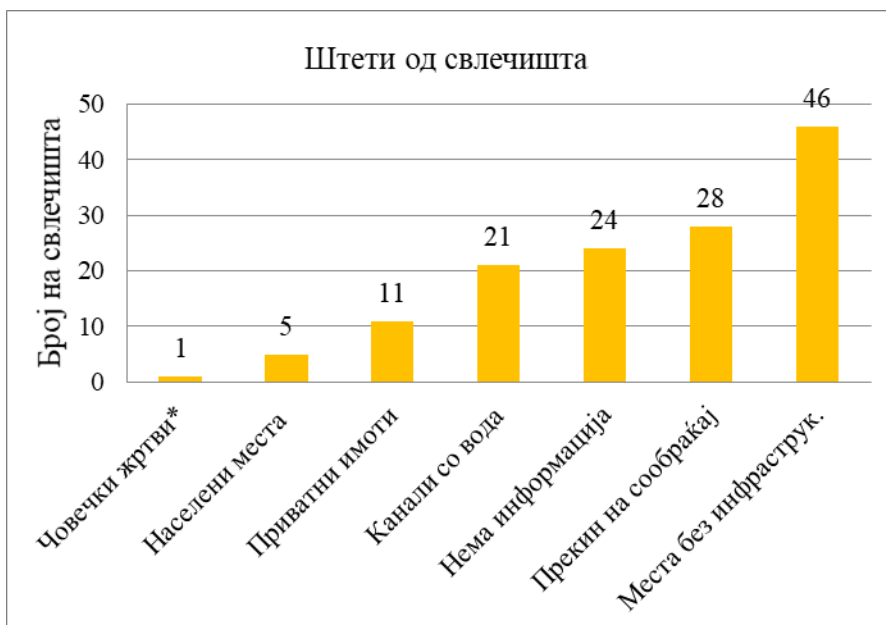


Слика 16 Анализа на свлечишта според извор на податоци



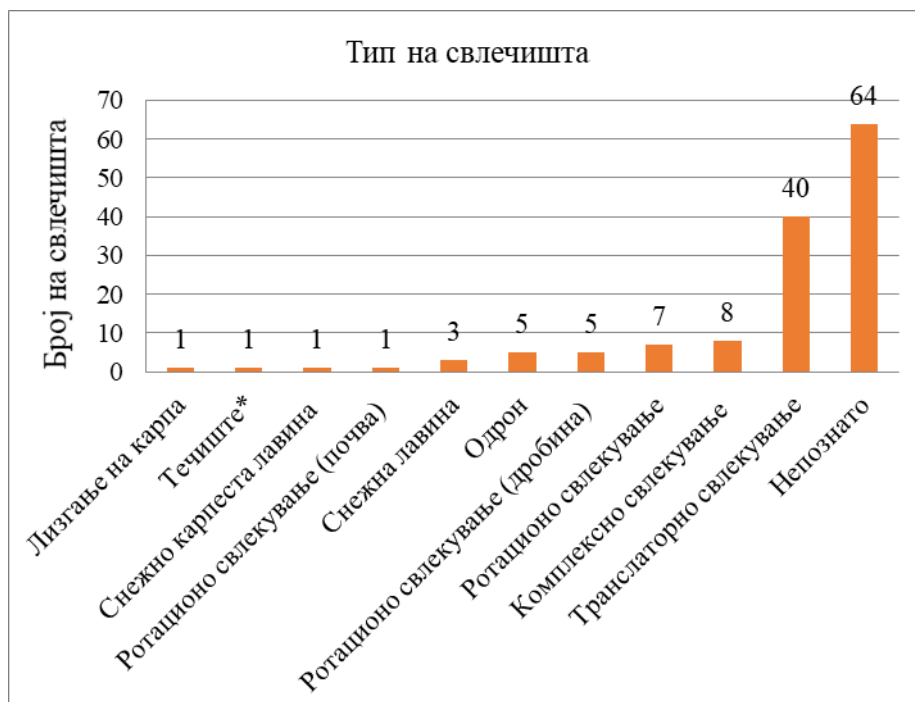
Слика 17 Анализа на свлечишта според предизвикувач

Речиси половина од познатите свлечишта ги погодуваат населението и инфраструктурата во Полошкиот регион, предизвикале прекин на сообраќајот и ги оштетиле каналите за вода на хидроенергетскиот систем „Маврово“. За 24 случаи регистрирани се штети, но информациите не се достапни од документацијата. Индивидуални куќи и населби биле изложени на hazard при 16 настани. Во случајот на свлечиштето Јеловјане, цел дел од населбата била пренаселена во друг дел од селото (13 куќи). Класификацијата за штетите предизвикани од свлечиштата е дадена на Слика 18.



Слика 18 Анализа на свлечишта според предизвикани штети

Видот на механизмот на лизгање (според Varnes & Cruden 1996) е непознат скоро за половина од свлечиштата. Од познатите случаи, 40 свлечишта се класифицираат како транслаторни поместувања, 8 комплексни поместувања, 12 ротациони поместувања, 5 одрони, 3 снежни лавини и една снежно-карпеста лавина, Слика 19. Едно свлечиште од типот на течништа е регистрирано во историските архиви, или може биле третирано како поплави, отколку поместувања во вид на течење. Единствените регистрирани феномени од овој вид се оние од настаните во 2015 година. Сепак, ова треба да се смета како ограничувачки фактор од повеќе аспекти, особено во однос на изборот на соодветен метод за подложност (или хазард) и калибрација на ваквиот модел.



Слика 19 Анализа на свлечишта според предизвикани штети

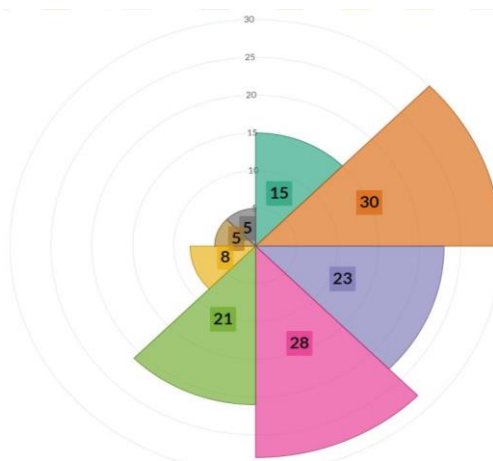
За 33 свлечишта има информации за преземање на одредени санациони мерки, иако помалите интервенции веројатно не се регистрирани во никаква документација. Применетите мерки за санација обично се состојат од изградба на потпорни ѕидови, дренарање на површински и подземни води и делумно отстранување на свлечените маси.

Во Табела 5 е претставена класификација на свлечиштата според големината на нивната површина. Повеќето свлечишта (55) спаѓаат во категоријата на големи, 30 се класифицирани како многу големи и 27 со средна големина. Само 4 свлечишта спаѓаат во категоријата помали од 100 m², а 7 поместувања се со површина 100-1000 m². Сепак, се смета дека бројот на овие свлечишта е далеку поголем, но тие не се регистрирани соодветно во минатото. За 13 појави, не може да се најдат податоци за големината на нивната површина во извештаите.

Табела 5 Класификација на свлечишта според големина на површината

ГОЛЕМИНА НА СВЛЕЧИШТЕ	ПОВРШИНА ВО m ²	БРОЈ НА СВЛЕЧИШТА
Многу мало	<100	4
Мало	100 - 1000	7
Средно	1000 – 10000	27
Големо	10000 – 100000	55
Многу големо	> 100000	30
Непозната големина	/	13

Во поглед на параметарот правец на поместување на свлечиштето, се констатира дека повеќето свлечишта се движат во правец од исток-северо-исток до југ-југо-запад. Направен е поларен дијаграм (Слика 20) за подобра претстава за дистрибуцијата на свлечиштата во однос на насоката на поместување. Бидејќи многу свлечишта се поместуваат кон исток или југо-исток, очекување е резултатите од анализата на SAR податоците да дадат поголем увид за свлечиштата во регионот (поради сателитските орбити што ги користи ESA, анализата DInSAR е најдоверлива за свлечишта што се движат во правец кон исток).



Слика 20 Насока на поместување на свлечиштата

Свлечиштата се класифицирани и според длабината на рамнината/зоната на свлекување, Слика 21. Вредноста од 2.0 m е земена како критериум за поделба на длабоки

и плитки свлечишта. Од достапните податоци констатирано е дека за половина од појавите длабината на свлекување е непозната, 39 се длабоки, а 29 се плитки поместувања. За некои од длабоките свлечишта, рамнината на лизгање се протега на длабочини од 20 m, па дури и ~40 m.



Слика 21 Класификација на свлечишта според длабина на клизна рамнина

Направена е класификација и во однос на активноста на свлечиштата, Слика 22. Вкупно 37 свлечишта се сметаат за активни. Се движат од типот на плитко (скоро) површински лизгања до стари длабоки лизгања. Некои активни појави се поврзани со области со карпести одрони. Датумот на првото активирање на лизгањето и тековната состојба на активност се достапни за одреден број на свлечишта, иако некои дати се само индикативни, т.е. од вербална комуникација со претставници на општините. Постари податоци за активноста на свлечиштата е многу тешко да се добијат, бидејќи претставниците на општините не беа во можност да најдат документи постари од 5 до максимум 10 години.



Слика 22 Класификација на свлечишта според состојба на активност

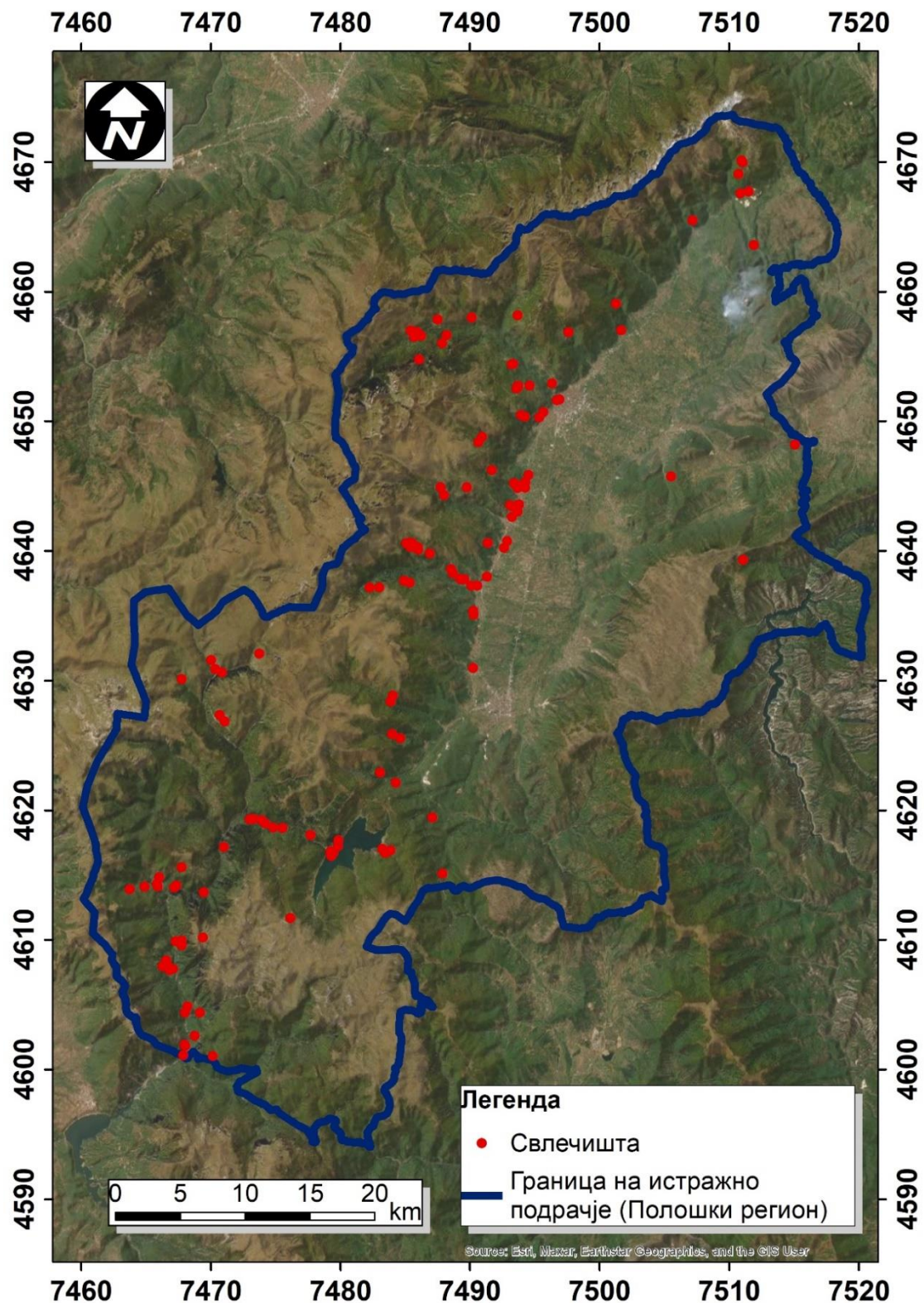
Најважниот параметар што ја контролира распределбата на свлечиштата е литолошкиот состав на теренот. Направен е напор да се презентира детално разновидноста на литолошките единици во кои се јавуваат свлечиштата (Табела 6).

Табела 6 Класификација на свлечишта според литолошки состав

ЛИТОЛОШКИ СОСТАВ	БРОЈ НА СВЛЕЧИШТА
Шкрилци покриени со дробина, пролувијални или вештачки наноси	51
Варијатети од шкрилци	10
Варовник и варовник покриен со дробина	14
Филитоиди	13
Дробина	9
Гранити покриени со дробина	8
Креден флиш	5
Пролувијален материјал	4
Флувиоглацијални седименти	4
Глинци, песочници и алеврити	3
Гранодиорити покриени со делувијални/пролувијални наноси	3
Вештачка исполна	3
Мермери и мермери покриени со дробина	2
Снежно-карпеста лавина	2
Лавина	2
Дијабази покриени со дробина	1
Риолити покриени со дробина	1
Плиоценски седименти	1
Вкупно	136

Од табелата се гледа дека повеќето свлечишта се јавуваат долж контактот дробина и шкрилец (како основна карпа). Регионот во голема мера се карактеризира со присуство на стар Прекамбриски метаморфен комплекс, така што теренот има природен предуслов за развој на процеси на поместувања. Некои свлечишта се карактеризираат со присуство на неколку различни литолошки единици.

На Слика 23 е дадена катастарската карта на нестабилни појави за Полошкиот регион, подготвена врз основа на собирање на архивски податоци за свлечишта. На сликата регионот е прикажан според административната единица - Полошки плански регион. Може да се забележи дека контактот на Шар Планинскиот масив со Полошката котлина е еден вид граница на дистрибуцијата на познатите свлечишта, односно свлечиштата се јавуваат во планинскиот дел во анализираното подрачје, а најголема концентрација се забележува во северозападниот дел.



Слика 23 Катастарска карта на нестабилни појави за Полошкиот регион

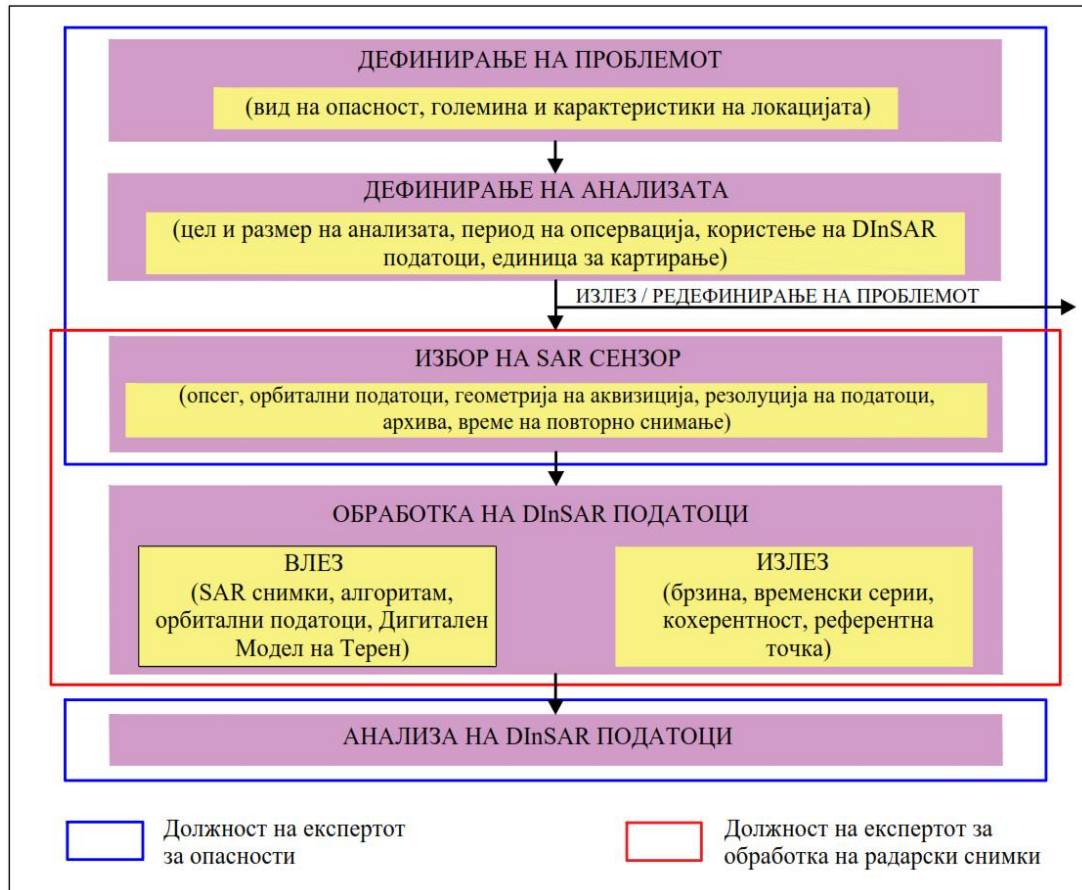
6.4 Примена на DInSAR техника за детекција на нестабилни зони

Во следната фаза се врши употреба на современи технологии за далечинска детекција за откривање, карактеризирање и следење на свлечишта во Полошкиот регион. Ова се прави преку анализа на снимки добиени од сензорите на радар со синтетичка антена (SAR) и обработени користејќи ја техниката Differential Interferometry (DInSAR). Генерално, секоја DInSAR техника овозможува да се изврши анализа на промените на одреден феномен во изминатиот период бидејќи вклучува обработка на податоци снимени во тој период во минатото.

6.4.1 Дефинирање на најсоодветна процедура за избор, обработка и интерпретација на DInSAR податоци

Дефиницијата на методолошки пристап во проблемите каде што влезните податоци произлегуваат од иновативни технологии претставуваат неопходна активност со цел да се добијат соодветни резултати. Како што е опишано во Crosetto et al. (2005) и Peduto et al. (2015), поради комплексноста на DInSAR податоците, најдобрите резултати во студиите што вклучуваат употреба на ваков тип на информации обично се постигнуваат преку тесна соработка помеѓу експерти од областа на DInSAR и лица кои можат да користат DInSAR податоци, со цел да се анализира одредена опасност. Во овој контекст, DInSAR експертите играат фундаментална улога во обезбедување помош на крајните корисници, да бидат целосно свесни за ограничувањата и можностите на расположливата техника. Овие концепти ја создале општата рамка (Слика 24) предложена од Peduto et al. (2015), која ја покажува низата на потребни активности. Овие активности вклучуваат експерти од двете области, експерти за обработка на радарска слика (специфичните активности се врамени со црвена боја) и експерти за опасности (специфичните активности се врамени во сина боја). Конкретно, првата фаза од анализата вклучува дефинирање на проблемот: видот на опасноста (на пр. свлечишта) која треба да се анализира, обемот на подрачјето кое треба да се анализира и описот на специфичните карактеристики кои најдиректно влијаат на употребата на податоците добиени од сателитите (т.е. вегетационата покривка, присуство на урбани средини, топографски информации и информации за било какви промени што се случиле во подрачјето за време на периодот на опсервација и сл.). Еднаш штом проблемот е дефиниран, потребно е да се организираат и да се извршат анализите преку идентификување на целта и обемот на анализата, периодот на опсервација, локациите за мапирање за кои треба да се изврши анализата во ГИС-околина. После ова, постои опција за повторно редефинирање на проблемот (exit/problem redefinition) бидејќи во некои случаи DInSAR техниките не можат да одговорат (или можат само делумно) на поставениот проблем од крајниот корисник (на пр. ако очекуваната стапка на поместување е превисока, на пример, некои dm/год). Така, треба да се донесе одлука дали ќе се користи DInSAR или подобро е да се имплементираат други техники (пр. оптички слики, терестички мерења, итн.). Во случај да може да се продолжи со DInSAR анализата, во соработка на двајцата експерти, се избира податочен сет од снимки според карактеристиките на достапните сензори, како што се: опсег, орбитални податоци, геометријата на аквизицијата, резолуцијата на податоците, групите на расположливи снимки од локацијата која е предмет на обработка, времето на повторно снимање и опсегот. Врз одредувањето на максималното поместување, кое може да биде одредено, влијание имаат применетите бранови должини и времето на повторна опсервација. Исто така, искористениот опсег влијае на изборот на сензорот, бидејќи опсезите со пониска фреквенција (L band, т.е. сензори со подолга бранова должина) се посоодветни за следење на појави со побрза динамика, додека повисоките фреквенции (X band) обезбедуваат повисок сензибилитет на сензорите, соодветен за детекција на појави со помали поместувања. Дobar компромис е обезбеден

од C опсегот (C band). Откако ќе се изберат SAR -снимки, тие се подложени на фаза на обработка преку специфични алгоритми за чиј избор се задолжени двата експерти, и се во зависност од достапните влезни податоци и очекуваните излезни резултати што ќе се користат во анализата (на пр. брзина, временски серии, кохерентност, референтна точка). Последниот чекор се однесува на анализата на DInSAR податоците, анализа што може да се изврши во различни размери со цел постигнување на различни цели.



Слика 24 Општа рамка за употреба на DInSAR податоците (Peduto et al. 2015)

Изборот на соодветна збирка на SAR-снимки со цел да се проучува свлекувањето на теренот во дадено подрачје треба да ја земе предвид видливоста на појавите на теренот. Интерферометриската фаза во однос на областите погодени од значително геометриско поместување може да биде генерално бескорисна. Всушност, видливоста на одреден дел од падината зависи од повеќе фактори, како што се ориентацијата на теренот и наклонот, вегетационата покривка и присуството на згради и инфраструктури. Затоа, DInSAR предвидувањето со кохерентната дистрибуција на пиксели може да биде исклучително корисно за правилно идентификување и избор на делови од областа на обсервација каде што SAR-снимките може да бидат препуштени на DInSAR процесирање.

Корисен начин априори да се дознае дали областа предмет на обработка има добра покриеност со DInSAR податоци, е да се изработи "априори DInSAR карта на видливост" (Cascini et al. 2009).

Почнувајќи од дискусија воведена од Colesanti & Wasowski (2006) за улогата што ја играат аголот на ориентацијата и наклонот на теренот врз влијанието и можноста за следење на деформациите со DInSAR, како и за чувствителноста долж орбитата на

сензорот, Cascini (2009) има развиена постапка со која може да се провери дали областа на свлечиштата е видлива и дали се достапни податоци за опаѓачка или растечка орбита со оглед на влезните податоци: наклонот и ориентацијата на областа предмет на опсервација, аголот на инциденцата на радарскиот сензор, ограничувањата на видливоста на SAR сензорот и нивната чувствителност долж радарската линија на простирање, информациите обезбедени од податоците за земјината покривка, претходно групирани во хомогени класи.

Основната цел на овој картографски приказ е обезбедување на DInSAR корисниците на податоци со алатка што може да ги разликува DInSAR видливите локации, со што би се направил избор на соодветен сет на снимки. Во врска со ова, треба да се нагласи дека, во зависност од опфатот на дадениот феномен и размерот на користената основна карта, видливоста може да варира во различни делови од истото свлечиште.

Откако SAR – снимките ќе бидат правилно одбрани врз основа на таканаречената „априори DInSAR карта на видливост“ и фазата на обработка е завршена (т.е. достапни се информации за просечната брзина на поместување на секој постојан расејувач по должината на линијата на простирање на сигналот (V_{LOS}), временските серии, кохерентноста), DInSAR податоците можат да се користат за толкување на механизмот на свлечиштата.

За оваа цел со намера целосно да се искористи 1D LOS DInSAR - добиената брзина на свлекување (V_{LOS}) која е почувствителна на вертикални поместувања (кои главно се јавуваат во круната на ротационите појави), најчесто користениот метод се однесува на проекција на LOS поместувањето во правец на најстрмниот наклон, во случаи на главно транслациски движења (Cascini et al. 2010). Постапка за проекцијата на 1D LOS DInSAR векторот на брзината е врз основа на двата модела, геоморфолошки и дигитален елевациски модел (ДЕМ). Конкретно, според поместувањето на постојани расејувачи (со вредности на брзината кои го надминуваат прагот на движење од 1,5 мм/година, востановена како вредност на точноста на просечната стапка на деформација според Colesanti et al. (2003) и Manzo et al. (2006)), пресекот на DInSAR кохерентна карта со пиксели со картата на наклони и картата на ориентација е овозможено да се додадат овие агли на видливите кохерентни пиксели. Потоа, со примена на катастарската карта на свлечишта, овозможено е да се дефинира типологијата на феноменот на свлекување на кој секој DInSAR пиксел е лоциран, како и релативната позиција во телото на свлечиштето. Соодветно на тоа, со користење на геоморфолошките шеми на свлечиштата (на пример, онаа предложена од Cruden & Varnes 1996), може да се одреди насоката на движење на секој DInSAR кохерентен пиксел со мала резолуција (види Cascini et al. 2010).

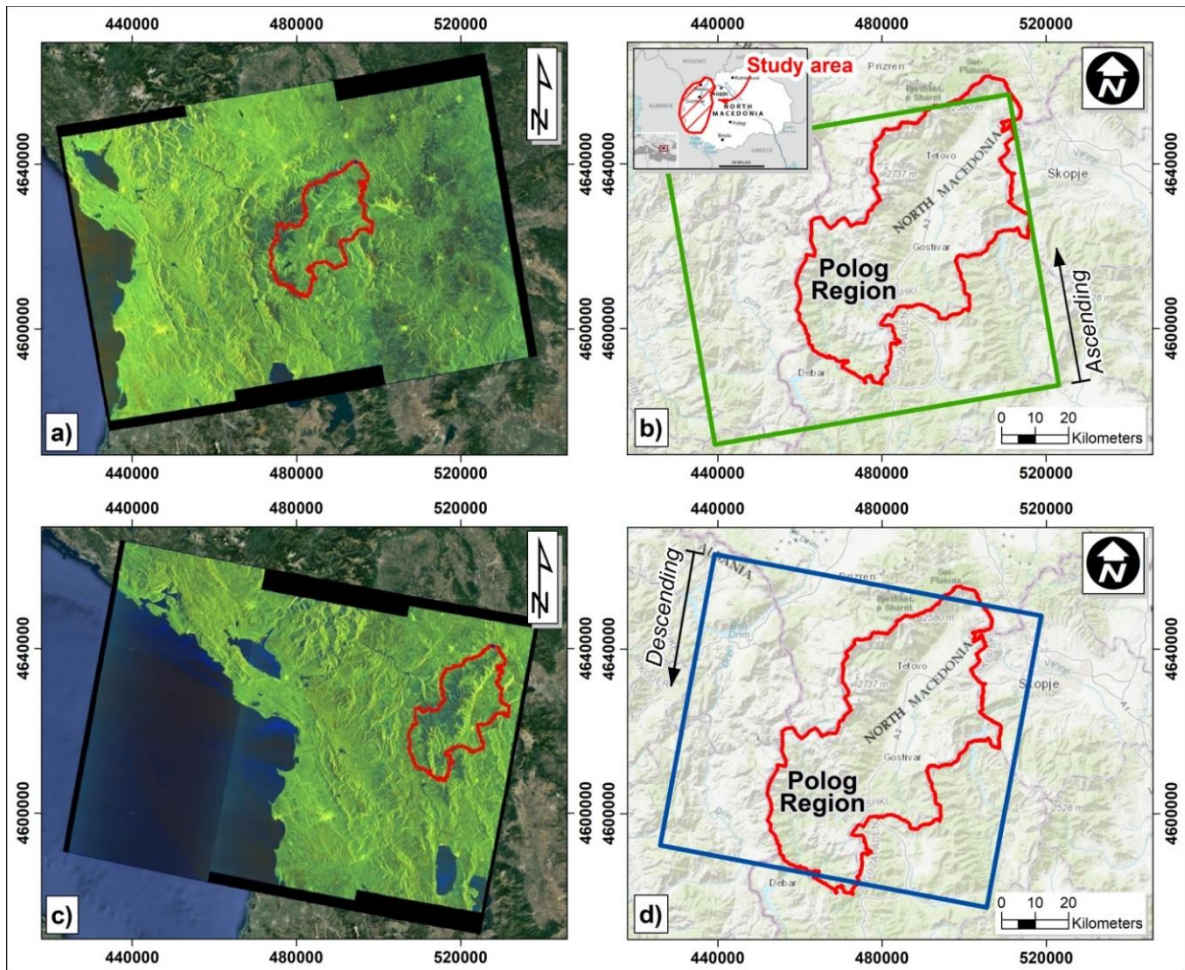
6.4.2 Избор на соодветни SAR снимки и формирање на „a priori DInSAR карта на видливост“

Деформациите на земјата кои се детектираат се поврзани со варијацијата на растојанието долж радарската линија на простирање на сигналот (Line Of Sign - LOS), односно директната патека од сателитот до локацијата на земјата. Бидејќи тековните сателитски SAR мисии летаат по блиску-поларните орбити, во зависност од правецот на летот на сателитите или се искачуваат (југ-север) или се спуштаат (север-југ), линиите на простирање на сигналот (LOS) ќе бидат наклонети во однос на вертикалната насока кон исток или запад (соодветно за поминувања при искачување и опаѓање) под агол што се движи од околу 25° до 50°, во зависност од мисијата и режимот на аквизиција. Обработката на избраните SAR снимки во подрачјето на истражување се врши со

употреба на напредна техника заснована на употреба на SAR томографија што овозможува следење на деформациите на снименото подрачје со највисоката достапна резолуција на податоците, преку редок GRID на мерни точки што обично се поврзани со структури создадени од човекот, за кои електромагнетното повратно расејување е конзистентно во текот на целиот период на опсервација. Затоа, првично е извршено истражување за достапноста на податоците погодни за интерферометриска обработка на подрачјето кое се истражува. Ваквото прелиминарно истражување има за цел да ја провери достапноста на доволен број на снимки направени за истото подрачје во временски интервал од најмалку една година, со прилично редовни и рамномерно временски распоредени опсервации, со цел да се избегне временски дисконтинуитет со што би се нарушил квалитетот на обработката.

За Полошкиот регион недостасува достапност на SAR снимки опсервирани со радарски сензори со висока резолуција кои работат во X-опсегот. Затоа, збирките на податоци што ќе се користат се од мисиите на Sentinel радарите со средна резолуција кои работат во C-опсегот и се испорачани од Европската Вселенска Агенција (ESA). Конкретно, програмата Коперникус на Европската Вселенска Агенција (ESA) дозволува пристап до архивата на податоците стекнати преку мисијата Sentinel-1 со констелација составена од два поларни орбитирачки сателити, лансирани во 2014 и 2015 година, како бесплатни сервиси. Констелацијата е на скоро поларна орбита ($98,18^\circ$). Орбитата има 12-дневен циклус на повторување: комбинацијата на двата сателити овозможува намалување на времето за опсервација на истото подрачје на само 6 дена. Sentinel-1 спроведува четири режими на работа: најкарактеристичен и најиновативен е режимот интерферометриски широк опсег (Interferometric Wide Swath (IW)), што овозможува аквизиција на податоци со просторна резолуција од 5 на 20 метри и опсег од 250 километри. IW е главниот режим на работа над копното. Треба да се напомене дека секој производ од IW е всушност составен од низа „рафали“ кои го претставуваат основниот SLC производ и имаат опфат од околу 20 на 90 километри.

Од 2015 година, значителен број снимки се достапни за Полошкиот регион. Конкретно, две можни бази на податоци (Слика 25) беа избрани, кои беа групирани врз основа на релативната орбита (поврзани со сателитска патеката и орбитирање, односно опаѓачка или растечка, насока). Главните карактеристики на двете избрани бази на податоци накратко се дадени во продолжение. Базата на податоци стекната преку растечки орбити (релативна орбита бр. 175), чиешто стандардно подрачје на покриеност е дадено на Слика 25а со што површината од подрачјето речиси целосно е опфатено во рамките на вториот подопфат IW2 (Слика 25b), вклучува вкупен број од 235 снимки во период на опсервација од јануари 2015 до октомври 2019 година. Базата на податоци стекната преку опаѓачките орбити (релативна орбита бр. 153), чиешто стандардно подрачје на покриеност е дадена на Слика 25c, брои вкупно 222 снимки во периодот меѓу јануари 2015 и октомври 2019 година речиси целосно опсервирани во рамките на првиот подопфат IW1 (Слика 25d).



Слика 25 Стандардна покриеност на Sentinel-1 за а) растечки и с) опаѓачки орбити за опсервирање со зголемување на соодветната рамка за аквизиција во Полошкиот регион; б) опаѓачка орбита (релативна орбита бр. 175) и д) растечка орбита (релативна орбита бр. 153).

SAR сателитите кои моментално функционираат, функционираат по квази-поларни орбити и притоа снимаат површина на земјата во растечка (приближно југ-север) и опаѓачка (приближно север-југ) насока на орбитата (азимут), со странично снимање на исток и на запад (Ferretti et al. 2007). Оваа карактеристика ги ограничува мерењата на векторот на поместување на приближно ортогонална рамнина во правец југ-север, затоа мерната сензитивност е дадена за вертикалната и хоризонталната (запад-исток) компонента на поместувањето, со релативни тежини во зависност од аголот на сензорот.

Аквизицијата со страничен поглед, исто така генерира, посебно во подрачјата со висок релјеф, нарушувања во снимените материјали предизвикана од топографските варијации на реалната површина на земјата, како што се распоредување, засилување и засенчување. Од овие причини, изборот на соодветна SAR-група на податоци за проучување на поместувања во одредена област треба да ја земе предвид очекуваната видливост (од сензорот) на феномените на падините. За таа цел, следејќи ја постапката предложена од Cascini et al. (2009), како прв чекор на анализата, генерирана е „a priori DInSAR картата на видливост“ за целото подрачје на истражување“. Оваа картографска презентација овозможува зонирање на областите во Полошкиот регион каде што употребата на DInSAR податоците е изводлива и се очекува да бидат пронајдени постојани расејувачи по интерферометриска обработка на сликата.

Влезните податоци земени во предвид за генерирање на картата се состојат од: карта на ориентација и карта на наклон на теренот, добиени од дигиталниот висински модел (DEM) со големина на ќелија од 5x5 m, и карта за користење на земјиштето обезбедена од податоците за покривка на земјината површина (Corine 2018).

Категориите за користење на земјиштето Corine (2018) прво се хомогенизирани во три главни класи (Табела 7) според очекуваната опаѓачка веројатност да содржат кохерентни DInSAR пиксели, и подредени од I до III, според очекуваната опаѓачка веројатност да содржат кохерентни DInSAR пиксели (Слика 26-лево). Имено, класа I главно се состои од урбанизирани области и градилишта, кои се со поголема веројатност да ја задржат кохерентноста низ времето. Во класа II, се разгледуваат земјоделски површини и голи почвени површини, додека класа III вклучува области обраснати со вегетација и водени површини. Оваа последна класа се очекува да биде најлошата во однос на кохерентноста на DInSAR пикселите.

Табела 7 Хомогенизирани класи за користење на земјиштето (Corine 2018) за Полошки регион

КЛАСА	ЗЕМЈИШНА ПОКРИВКА CORINE 2018 (КОД)	ТИПОЛОГИЈА
I КЛАСА	112	Постојана урбана структура
	121	Индустрија или комерцијални единици
	122	Патна и железничка мрежа и придружно земјиште
	131	Наоѓалишта на минерали
	132	Депонии
	133	Градилишта
	141	Зелени урбани подрачја
II КЛАСА	211	Обработливо земјиште кое не се наводнува
	231	Пасишта
	242	Модели на комплексна обработка
	243	Главно земјоделско земјиште со значителни површини на природна вегетација
	331	Плажи, дини, песоци
	332	Голи карпи
	333	Области со ретка вегетација
III КЛАСА	334	Опожарени места
	222	Овошни дрвја и плантажи со капини
	223	Маслинови градини
	244	Земјоделско-шумарски области
	311	Широколисна шума
	312	Четинарска шума
	313	Мешана шума
	321	Природни пасишта
	322	Мочуришта и пустари
	323	Склерофилна вегетација
	324	Транзитивно шумско земјиште со жбунови
511	Водни патишта	
512	Водни тела	

Забелешка: КЛАСА I = Урбани средини и градилишта; КЛАСА II = Земјоделски и голи површини; КЛАСА III = области со вегетација.

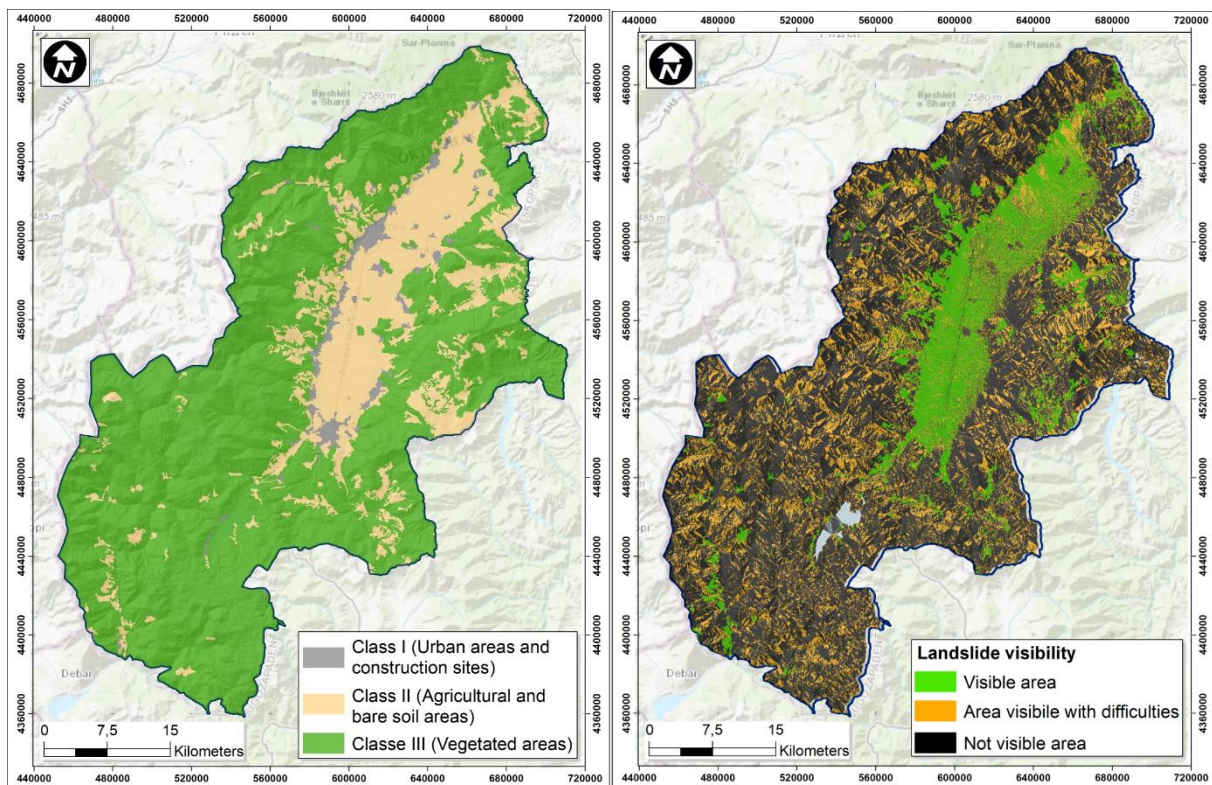
Потоа, имајќи предвид дека првиот обработен податочен сет од Sentinel е снимен со растечки орбити и со вкрстување на картата на ориентација и картата на наклон на теренот, се претпоставува дека:

- областите свртени кон исток, северо-исток и југо-исток и со наклон на теренот помал од 48.8° (со оглед на просечниот агол на инциденца во центарот на сцената

на аквизицијата на SAR при искачување на орбитата, приближно еднаков на 41.2°) се сметаат за видливи;

- областите свртени кон север и југ се претпоставуваат како видливи со тешкотии со оглед на квантитативната интерпретација на измереното поместување, имајќи ја предвид квази-поларната орбита на SAR системите со слабата чувствителност во правецот север-југ;
- областите свртени кон запад, северо-запад и југо-запад се сметаат за невидливи.

Последниот чекор вклучува употреба на картата за користење на земјиштето, соодветно хомогенизирана како што претходно беше објаснето. Областите обраснати со вегетација (класа III) беа отстранети од оние делови што претходно беа класифицирани како видливи според геометриските разгледувања, со цел да се генерира таканаречената „a priori DInSAR картата на видливост за Полошкиот регион (Слика 26-десно). Генерално, може да се заклучи дека подрачјето опфатено со „рафал“-1 е видно на околу 17% од површината, додека 20% и 63% се видливи со потешкотии и невидливи соодветно од растечката орбита на Sentinel 1.



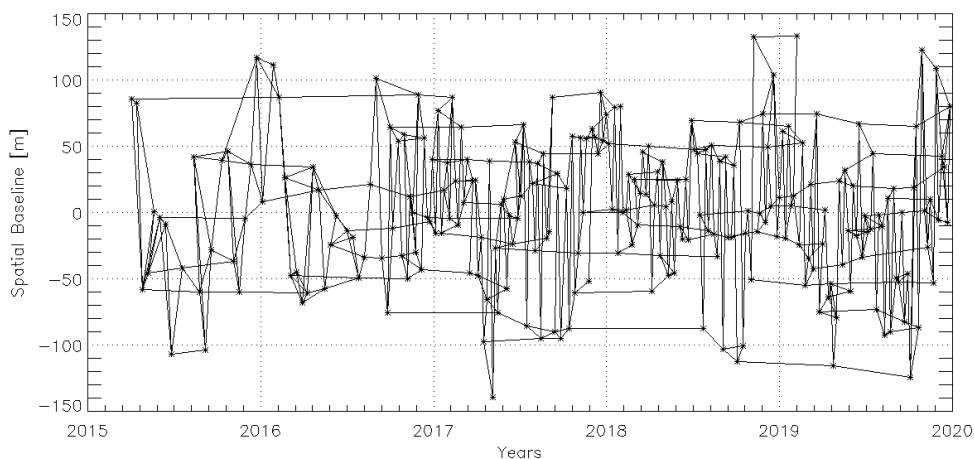
Слика 26 лево: Хомогенизирана карта на користење на земјиште (според Табела 7)
десно: „a priori DInSAR картата на видливост“ за Полошкиот регион

6.4.3 Обработка на Sentinel-1 SAR снимките

Обработката на Sentinel-1 SAR снимките е направена од страна на *експертите за обработка на радарска слика* (согласно општата рамка дадена на слика 24), со цел да се добие конечната карта на DInSAR деформација.

Податочниот сет најпрво е ко-регистраан на заедничка геометрија дефинирана со референтната (мастер) снимка. Ко-регистрааната база на податоци е обработена според алгоритмот предложен од Fornaro et al. (2009b), кој го проширува оригиналниот пристап Small Baseline Subset (SBAS) (Berardino et al. 2002) со искористување на модел зафазната разлика помеѓу соседните пиксели. Според SBAS пристапот,

интерферограмите, грубо кажано, фазните разлики на аквизицијата поврзани со просторните варијации на измереното растојание од сензорот до земјата, се оценети во однос на направени парови на снимки што ги карактеризираат намалени временски и просторни разлики (оценети како орбитални поместувања). Ова овозможува намалување на штетното влијание на ефектите на временска и просторна декорелација и се поддршка на т.н. одмотување на фазата (unwrapping phase). Конкретно, временската декорелација, поврзана со временските варијации на рефлексивноста е главен извор што придонесува за намалување на степенот на кохерентноста на интерферометрското снимање, а со тоа и на перформансите за мониторинг на DInSAR техниките. Во урбаните области, значителна кохерентност може да се забележи низ годините, но ретката вегетација лесно може да го оневозможи искористувањето на фазниот сигнал после само неколку недели: ова се должи на варијации (раст/промена) во вегетацијата. Декорелацијата може да биде делумно ублажена со користење на локални просторни осреднувања (multilooking) врз интерферометрските податоци, но ова доведува до неизбежни загуби на просторна резолуција. Ако информацијата формирана врз основа на висока резолуција не е примарна задача, локалното просторно осреднување може успешно да се користи за зголемување на фазните перформанси за одмотување на фазата, а со тоа и густината на излезните мерни точки на поголемо подрачје, и покрај пониската резолуција на секоја единечна мерна точка. Започнувајќи од оригиналните 237 опсервации, генерирани се вкупно 566 интерферограми. Графикот од опсервациите и генерирани интерферограми даден е на слика 27. Опсервациите се прикажани како ѕвезди, додека линиите ги претставуваат генерираните интерферограми.



Слика 27 График на опсервациите на Sentinel-1 во временско/просторна рамнина.

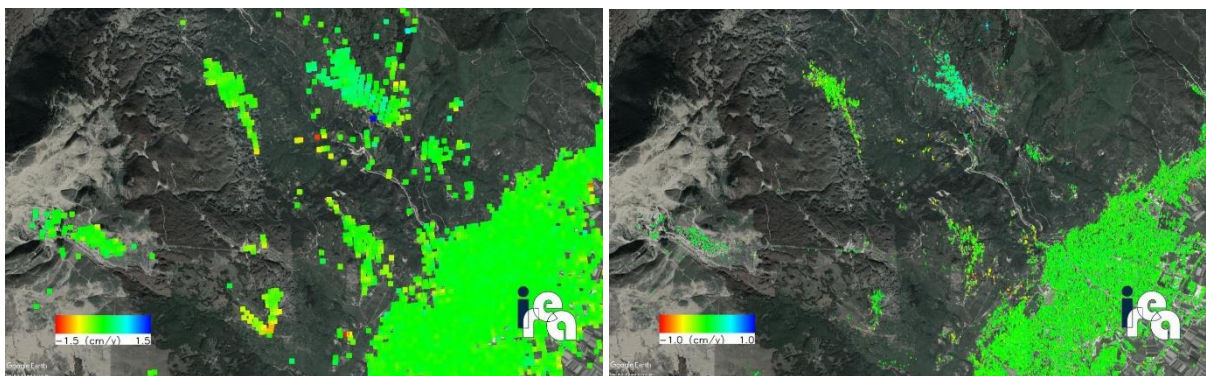
Извршено е локално просторно осреднување (multilooking) од 5 пиксели во правец на азимутот (паралелно со насоката на летот) и 20 пиксели во ширина (насока нормална на трасата, усогласена со линијата на простирање на сигналот (LOS)) кои се применети во формирањето на интерферограмите (ова води до креирање на излезни точки од мерењето релевантни за површина од околу $80 \times 80 \text{ m}^2$). Последниот чекор, кој се однесува на геокодирање, е извршен со цел да се експортираат DInSAR пикселите од оригиналната геометрија на радарските снимки (азимут/опсег) во конвенционален географски референтен систем, вообичаено WGS84.

Обработката на Sentinel-1 SAR податочниот сет со целосна просторна резолуција за целиот Полошки регион е извршена преку употреба на техниката SAR томографија (Fornaro et al. 2014). Слично на техниката на интерферометрија напостојаните расејувачи (PSI), SAR томографијата работи со податоци со целосна просторна резолуција.

Обезбедува снимка од синтетички радар по должината на траекторијата, што овозможува постигнување голема резолуција долж траекторијата на движење на платформата, исто така и во насока ортогонална на траекторијата, врз основа на опсервации од набљудувања реализирани од повеќе различни орбити. Од таа причина, сигналите рефлектирани од објектите можат да бидат фокусирани со висока резолуција и во третата димензија (висина), па оттука и името 3D-слика. Вклучувајќи ја временската различност во обработката на SAR опсервациите од повеќе поминувања на сателитите, модел на простор/брзина (4D слика) е произведен со проширување на концептот за 3D слика со временскиот домен за да ги одреди параметрите за деформација на кој било временски кохерентен постојан расејувач во фокусиран 3D простор. Доменот на снимките може да биде дополнително проширен со цел да се мониторираат малите поместувања предизвикани од термичката дилатација на опсервираните структури (Fornaro et al. 2014). Како кај постојани расејувачи, SAR томографијата бара строга фазна калибрација со намера да се компензираат фазните грешки, главно поврзани со доцнењето на електромагнетното зрачење во атмосферата, што предизвикува фазно несовпаѓање со очекуваните линеарни модели поврзани со деформациите и висините. Оваа операција обично се извршува преку анализата со ниска резолуција, дискутирана погоре.

Откривањето на сигурен постојан расејувач во обработката на SAR томографијата во литературата се посочува со користење на Generalized Likelihood Ratio Test (GLRT) во рамките на теорија за радарско детектирање, која се базира на споредба на нормализирана корелација помеѓу векторот на мерење и очекуваниот фазен модел, со поставен праг според веројатноста за лажен аларм. Докажано е дека ваквата обработка обезбедува подобри перформанси во откривањето на единечен постојан расејувач и проценка на параметрите од интерес во однос на класичниот PSI детектор.

Споредба на резултатите помеѓу томографската анализа со ниска резолуција и целосна резолуција, е прикажана на слика 28. Поради малата големина на мерните точки со примена на целосна резолуција (10x10m), се прикажува мала област околу градот Тетово. Јасно е видно како анализата со висока резолуција овозможува откривање на многу повеќе детали од снимената област и, пред сè, снимање на можни ризични ситуации со многу попрецизна просторна локализација.



Слика 28 Проценета средна брзина на деформациите одредена според SBAS, процесирани со: а) пониска резолуција и б) преку SAR томографска анализа со целосна достапна резолуција

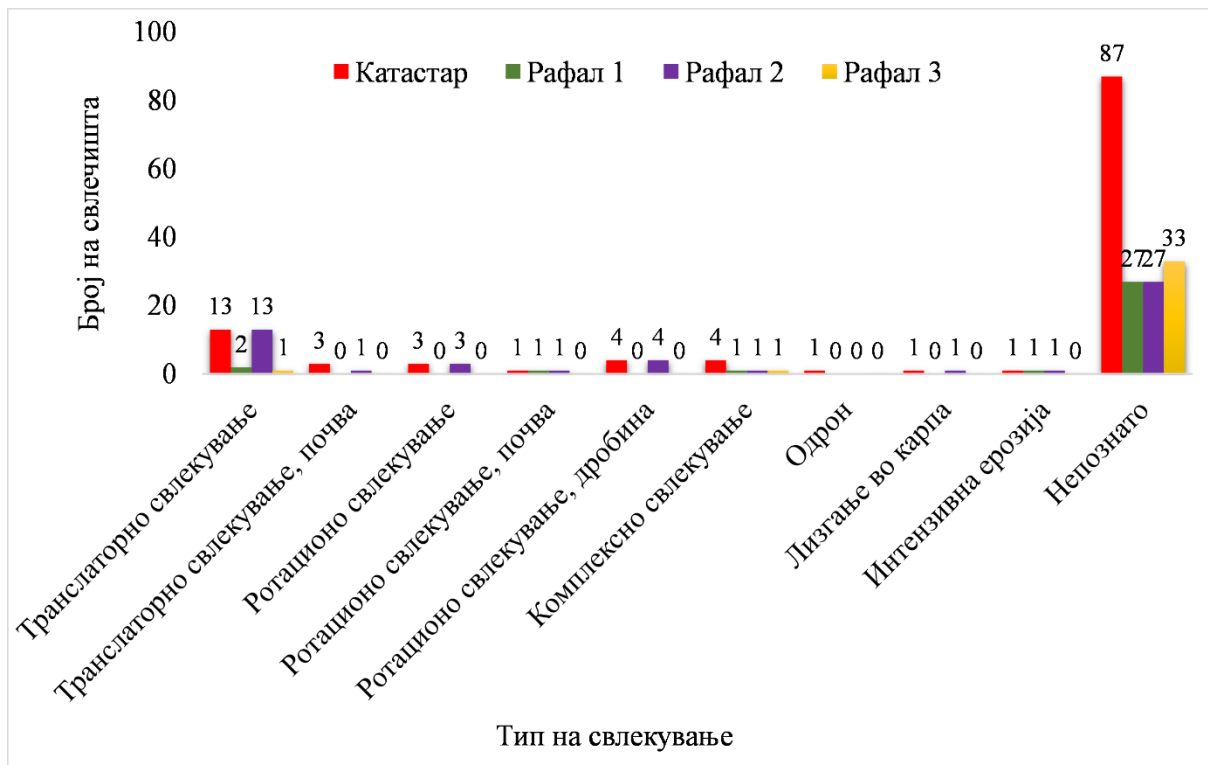
Како што се очекуваше, мерните точки се генерално концентрирани кај урбаните средини и генерално во кореспонденција на изградените средини, додека густината малку се намалува над природните текстури поради ефектите на декорелација. Овие ефекти се поизразени во областа осветлена со „рафалот-3“ бидејќи оваа област главно

покрива густы планински површини со поголеми ефекти на декорелација во споредба со областите опфатени со „рафалот-1,“ и „рафалот-2“.

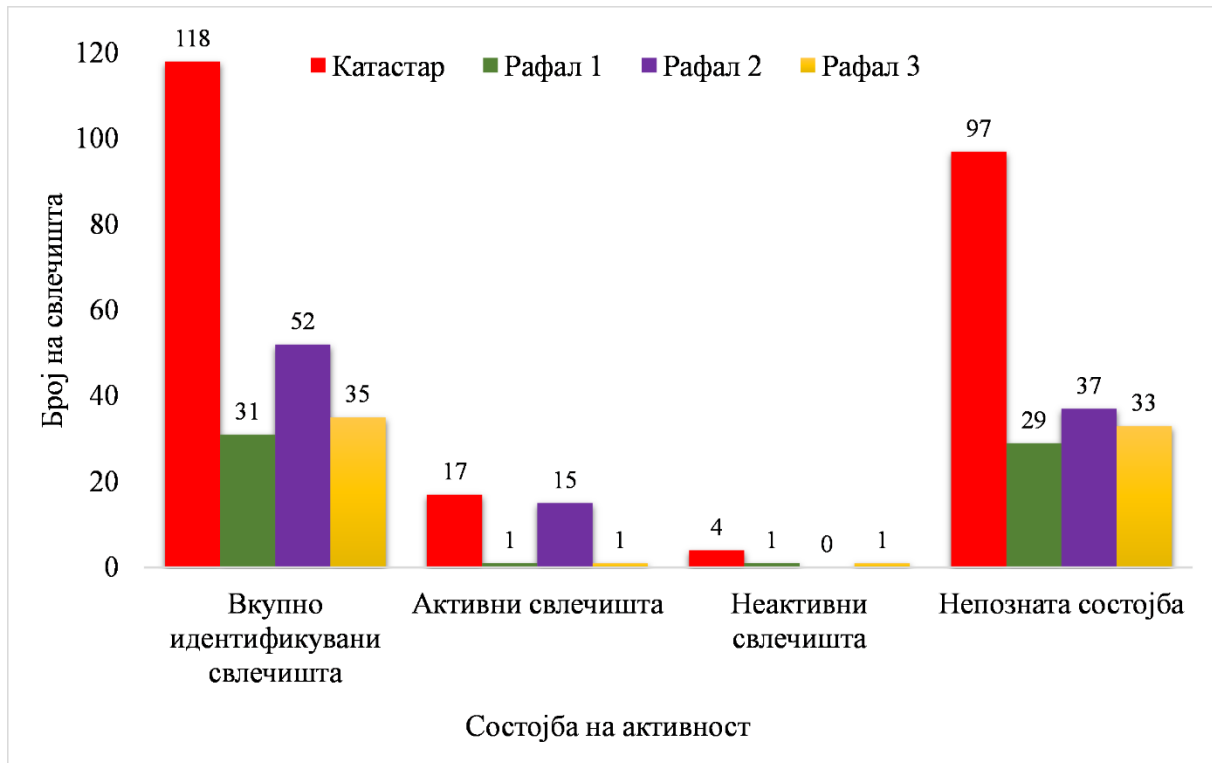
6.4.4 Анализа на Sentinel LOS DInSAR брзина и споредба со катастарот на свлечишта за Полошкиот регион

Катастарот на свлечишта за Полошкиот регион е составен од 136 феномени. За 118 од вкупниот број картирана е границата на свлечиштето, додека останатите 18 свлечишта се идентификувани само како точки. Sentinel снимките за Полошкиот регион кои се обезбедени од Европската вселенска агенција и обработени од IREA-CNR за периодот од 03.04.2015 до 29.07.2019 се анализирани, и во продолжение се презентирани во однос на катастарот на свлечишта.

Целата област на истражување е опфатена со “рафал-1“, “рафал-2“ и “рафал-3“. Фокусирајќи се на 118-те свлечишта-полигони, дваесет и шест проценти (26% од вкупниот број) на свлечишта спаѓаат во подрачјето опфатено со „рафал-1“, четириесет и четири проценти (44% од вкупниот број) на свлечишта спаѓаат во подрачјето опфатено со „рафал-2“ и триесет проценти (30% од вкупниот број) свлечишта спаѓаат во подрачјето опфатено со „рафал-3“. Направена е анализа на свлечиштата од катастарот кои се идентификувани во подрачјата опфатени со „рафал-1“, „рафал-2“ и „рафал-3“ со растечка орбита според нивниот тип и состојбата на активност. Преглед е даден на хистограмите на Слика 29 и Слика 30.

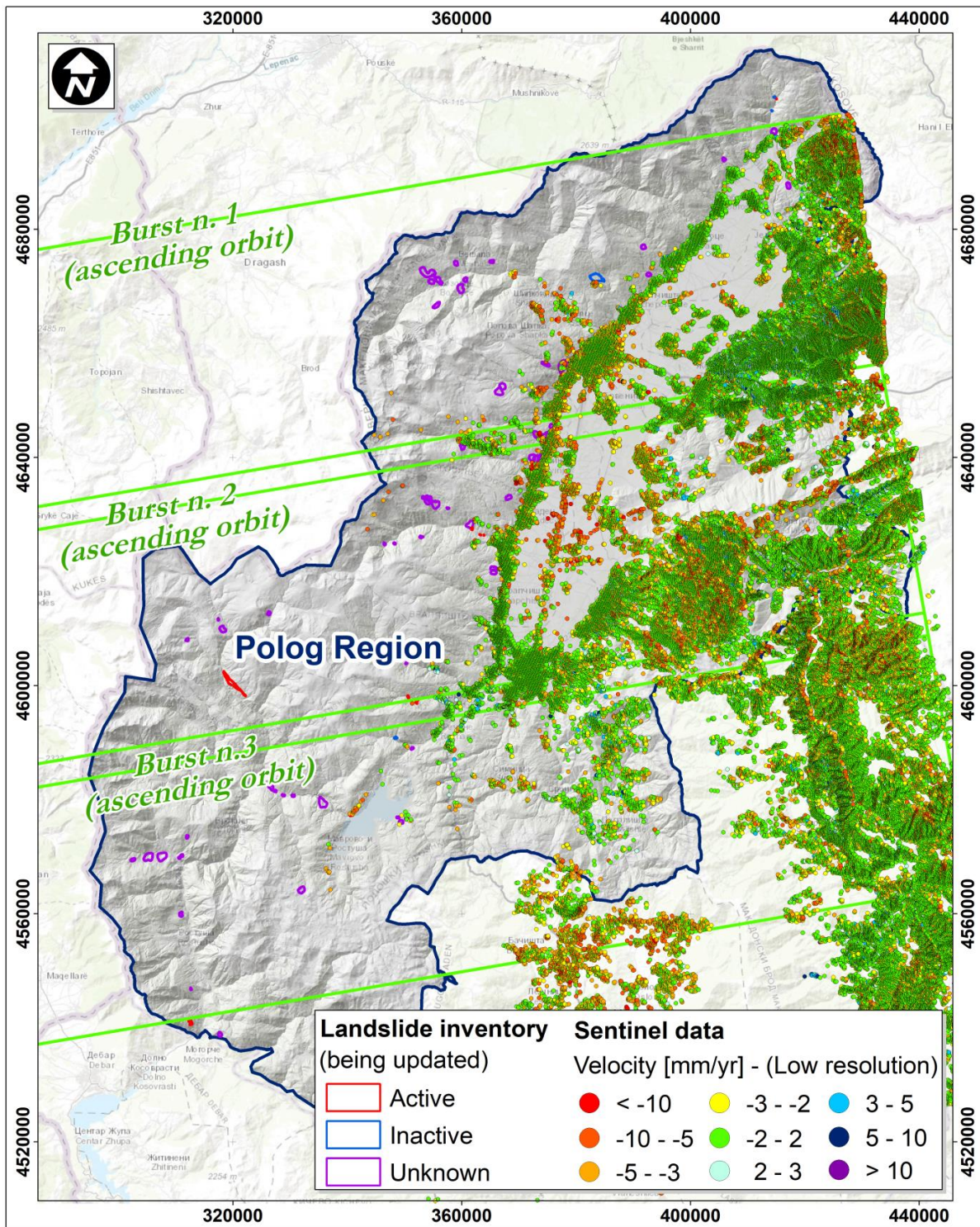


Слика 29 Картирани свлечишта поделени според тип на свлекување: во цел регион според достапниот катастар и во подрачјата опфатени со „рафал-1“, „рафал-2“ и „рафал-3“



Слика 30 Картирани свлечишта поделени според состојба на активност во: цел регион според достапниот катастар и подрачјата опфатени со „рафал-1“, „рафал-2“ и „рафал-3“

Со цел да се изврши целосна анализа и толкување на DInSAR податоците, достапниот Sentinel-1 SAR податочен сет за целиот Полошкиот регион, е процесирани и конечните резултати се прикажани на DInSAR картата на брзина (Слика 31) обезбедена со обработка при ниска резолуција (80m x 80m) на снимките добиени при растечка орбита над подрачјето на истражување. Картата ја прикажува просторната распределба на кохерентни цели со нивната просечна брзина по должината на линијата на простирање на сигналот (Line of Sight - LOS) според периодот на набљудување. Како што е очекувано, повеќето кохерентни цели се концентрираат во урбанизираните области лоцирани во рамнините. Некои цели се откриени и на ридови кои претставуваат фокус на оваа анализа.

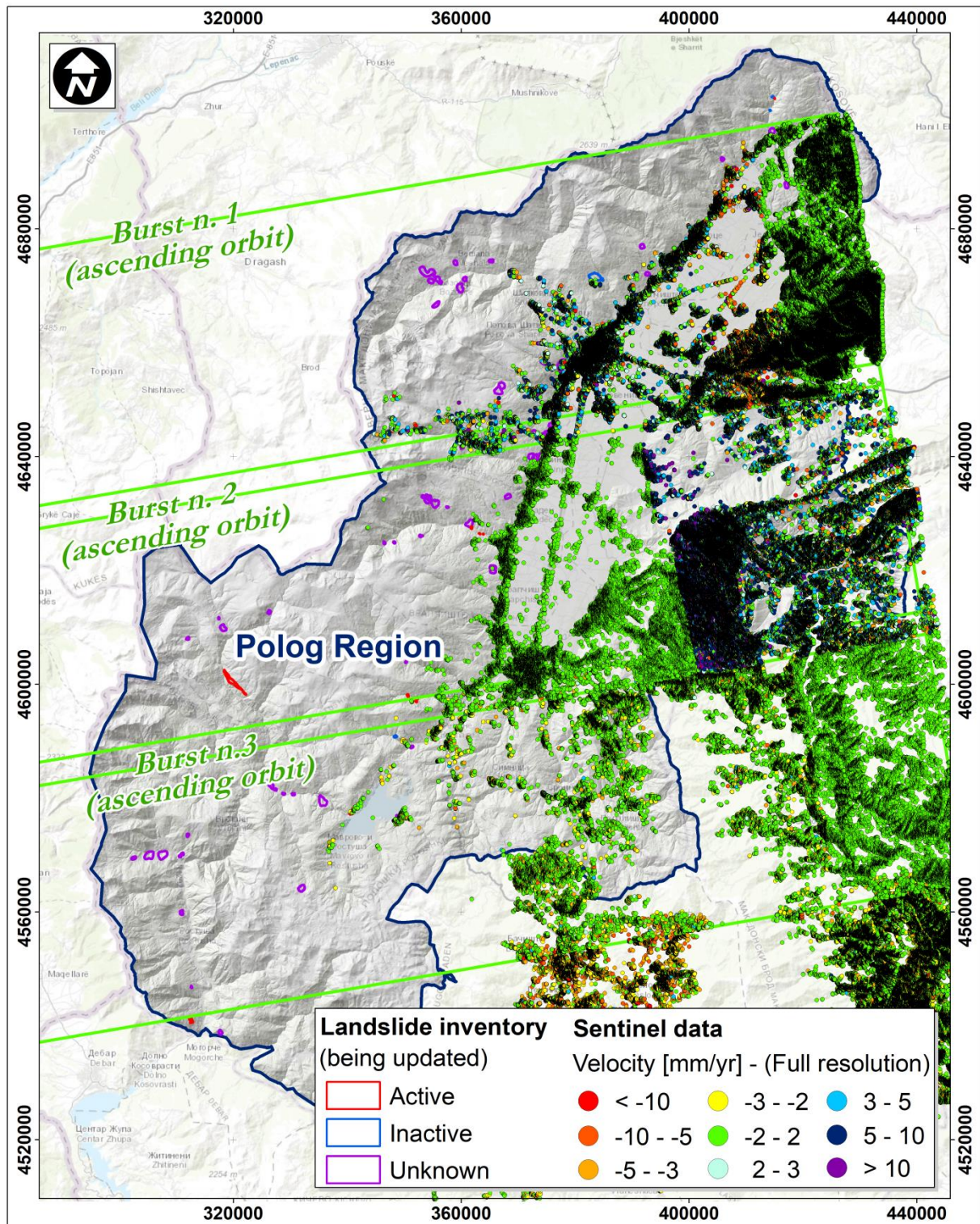


Слика 31 Просторна дистрибуција на DInSAR податоци за брзината добиена со обработка при ниска резолуција (80m x 80m) на Sentinel снимки при растечка орбита

Како што е дадено погоре, обработката на Sentinel-1 SAR податочниот сет при целосна просторна резолуција исто така е спроведена за целиот Полошки регион, а резултатите се прикажани на DInSAR картата на брзина (слика 32).

Како што може да се види на Слика 32, обработката при целосна резолуција обезбедува поголем број на кохерентни репери над осветлената сцена од SAR снимката. Ова овозможува враќање на многу повеќе детали од снимената сцена и снимање на

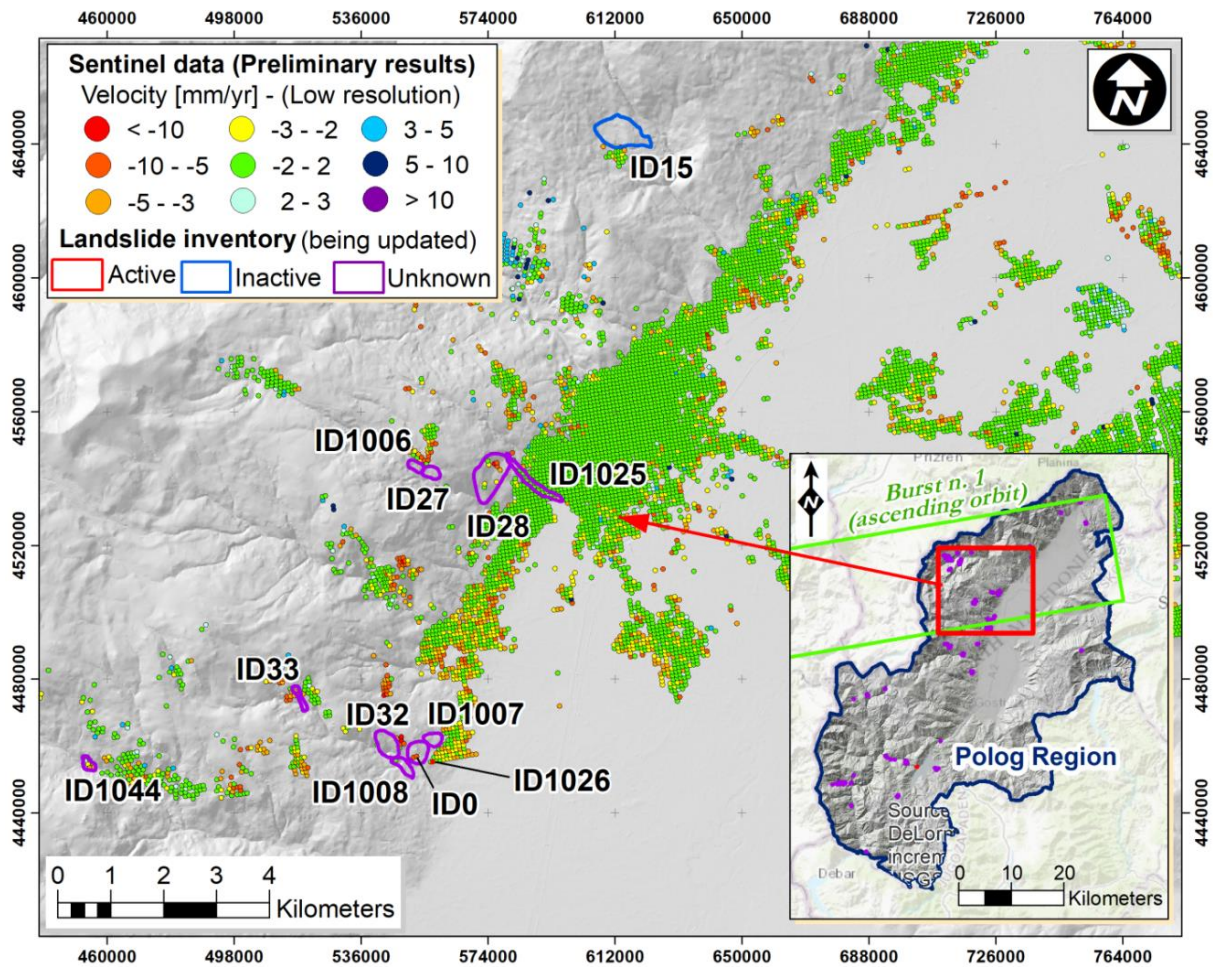
можни ризични ситуации со поголема точност, што е исклучително корисно при анализа во подетален размер, фокусирана на една идентификувана појава.



Слика 32 Просторна дистрибуција на DInSAR податоци за брзината добиена со обработка при целосна резолуција (10m x 10m) на Sentinel снимки при растечка орбита

Во рамките на направените анализи, извршена е проверка на свлечиштата од катастарот каде е пронајден барем еден кохерентен DInSAR пиксел. На Слика 33 и во Табела 8 се прикажани резултатите за подрачјето опфатено со „рафал-1“ каде бројот на

покриени свлечишта е 12 (од вкупно 31 картирано во подрачјето опфатено со „рафал-1“) што претставува 38% од картираните феномени.

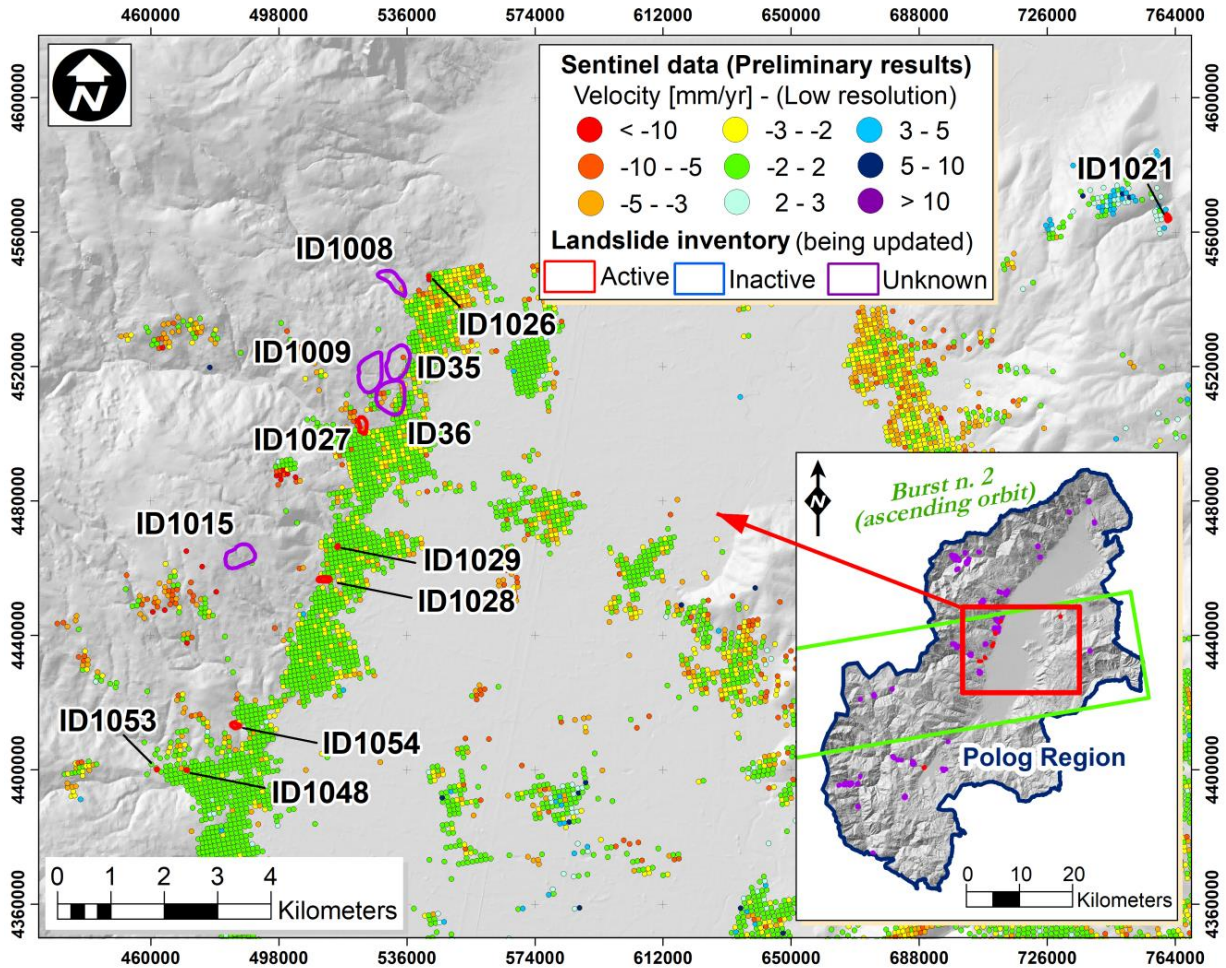


Слика 33 Карта на DInSAR покриени свлечишта во подрачјето опфатено со „рафал-1“

Табела 8 Вид и состојба на активност на DInSAR опфатени свлечишта и измерена брзина во подрачјето опфатено со “рафал 1”

Бр.	ID	ВИД	СОСТОЈБА НА АКТИВНОСТ	DInSAR просечна брзина [mm/year]			
				|min|	|max|	|avg|	std. dev.
1	0	непознато	непознато	1.10	6.40	4.02	1.60
2	15	комплексно	непознато	4.70	38.0	9.10	13.63
3	27	непознато	непознато	0.60	1.80	1.20	1.20
4	28	непознато	непознато	0.40	16.40	2.77	38.05
5	32	непознато	непознато	0.50	2.80	1.96	0.81
6	33	непознато	непознато	0.80	2.40	1.60	0.82
7	1006	непознато	непознато	0.70	7.30	4.00	4.67
8	1007	непознато	непознато	0.00	2.40	0.80	2.20
9	1008	непознато	непознато	1.40	1.40	1.40	0.00
10	1025	непознато	непознато	3.70	6.10	0.42	0.97
11	1026	ротационо	активно	0.80	1.30	1.05	0.35
12	1044	интензивна ерозија	неактивно	1.30	1.30	1.30	0.00

На ист начин, беше извршена проверка на свлечиштата од катастарот што беа опфатени со DInSAR податоците од подрачјето на обработка на „рафал-2“. На Слика 34 и во Табела 9 се прикажани добиените резултати во кои може да се забележат само 14 свлечишта (од вкупно 52 картирани во подрачјето опфатено со „рафал-2“), што значи 27% од картираните феномени се покриени.



Слика 34 Карта на DInSAR покриени свлечишта во подрачјето опфатено со „рафал-2“

Табела 9 Вид и состојба на активност на DInSAR опфатени свлечишта и измерена брзина во подрачјето опфатено со “рафал 2”

Бр.	ID	ВИД	СОСТОЈБА НА АКТИВНОСТ	DInSAR просечна брзина [mm/year]			
				|min|	|max|	|avg.|	std. dev.
1	35	непознато	непознато	0.10	7.00	2.90	3.06
2	36	непознато	непознато	1.30	7.70	2.79	2.40
3	1008	непознато	непознато	1.40	1.40	1.40	0.00
4	1009	непознато	непознато	1.30	1.30	1.30	0.00
5	1015	непознато	непознато	1.40	1.40	1.40	0.00
6	1020	непознато	непознато	1.10	4.30	2.93	1.67
7	1021	лизгање во карпа	активно	2.80	3.40	3.10	0.42
8	1026	ротационо	активно	0.80	1.30	1.05	0.35
9	1027	транслаторно	активно	1.10	7.40	4.13	3.16
10	1028	транслаторно	активно	5.90	5.90	5.90	0.00

Бр.	ID	ВИД	СОСТОЈБА НА АКТИВНОСТ	DInSAR просечна брзина [mm/year]			
				|min|	|max|	|avg|	std. dev.
11	1029	непознато	неактивно	0.90	0.90	0.90	0.00
12	1048	транслаторно	активно	0.10	0.10	0.10	0.00
13	1053	транслаторно	активно	0.20	0.20	0.20	0.00
14	1054	транслаторно	активно	0.90	6.50	3.33	2.56

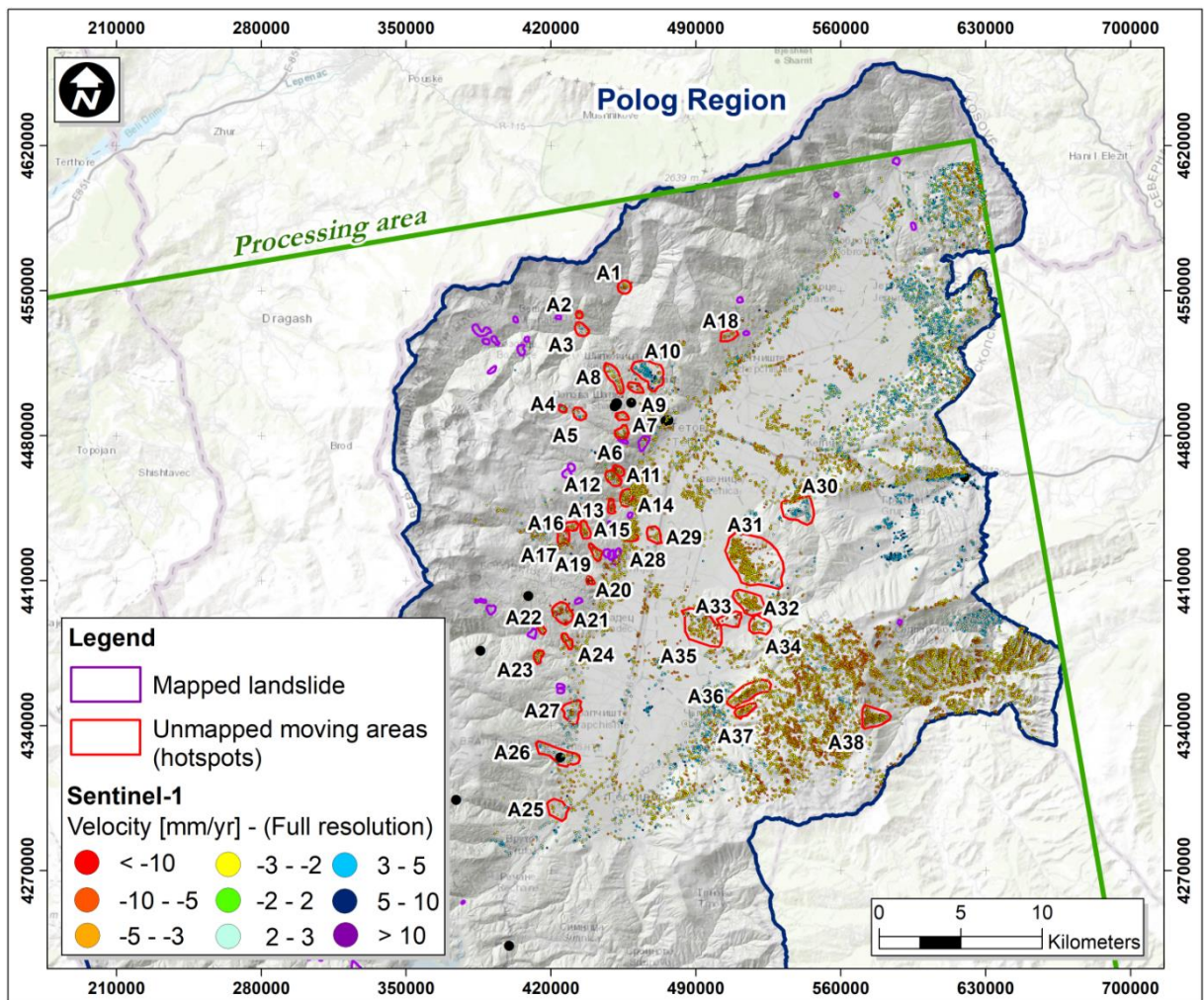
Интересно, само 9 (2 од „рафал-1“ и 7 од „рафал-2“ подрачјата на обработка) од покриените свлечишта се целосно класифицирани во катастарот според видот и состојбата на активност. Соодветно на тоа, подлабока анализа на DInSAR податоците може да биде корисна за да се обезбедат некои согледувања во кинематиката на гореспоменатите појави.

На крај, извршена е проверка на свлечиштата од катастарот за подрачјето опфатено со „рафал-3“. Сепак, подрачјето на „рафал-3“ е делумно покриено со DInSAR податоци. Конкретно, само во делот лоциран на југоисток – каде што нема достапен полигон на свлечиште од достапниот катастар – се добиени кохерентни репери со обработката на SAR снимките.

6.4.5 Откривање на подрачја т.н „жаришта“ кои не се вклучени во катастарот на свлечишта

DInSAR податоците освен што придонесуваат за карактеризација на свлечиштата (дефинирање на граници на подрачја погодени од свлечишта; состојба на активност) може значајно да се надополнат со **геоморфолошки критериуми** при откривање на свлечиштата. За подрачјето на истражување опфатено со Sentinel податоците, направена е анализа за избор на оние кохерентни пиксели кои го надминуваат прагот на брзина претпоставен како индикатор за движење. Овој праг е поставен да е еднаков на 2 mm/година.

Фокусирајќи се на подрачјата опфатени со „рафал-1“ и „рафал-2“, откриени се 38 “жаришта” (18 во подрачјето опфатено со „рафал-1“ и 20 во подрачјето опфатено со „рафал-2“) каде што е идентификувана концентрација на движечки кохерентни пиксели. Овие жаришта (во понатамошниот текст “DInSAR индицирани зони”) се прикажани на Слика 35. Индицираните зони претставуваат подрачја каде обработката на DInSAR податоците заедно со геоморфолошки/геолошки критериуми и фотоинтерпретација ќе се искористат за картирање на досега некартирани.















Слика 35 Карта на индицирани зони преку Sentinel DInSAR податоци





Во следната фаза, се прави дополнителна анализа на DInSAR индицираните зони, земајќи во предвид и други податоци и критериуми за детекција на нови и досега неоткриени свлечишта. Со еден ваков повеќекритериумски пристап, ќе се направи дополнување на постоечкиот катастар со нови појави.



Детекцијата на нови свлечишта, анализирајќи ги DInSAR индицираните зони, се прави во комбинација со проучување на геоморфолошките карактеристики на теренот врз основа на дигитален модел на теренот и орто-фото снимки (визуелна анализа), геолошките карактеристики и достапните податоци за потенцијалот кон плитко свлекување и ерозија во анализираното подрачје. Информациите во однос на потенцијалот за плитко свлекување се извлечени од соодветно подготвениот модел за подложност кон плитко свлекување, детално презентирани во поглавје 7. Податоците за ерозија се извлечени од картата “Специфичен годишен волумен на потенцијална ерозија по речен слив во горниот тек на Вардар”, подготвена во рамки на “Физибилити студија за одредување на опции за менаџирање на продуциран седиментен нанос во Полошкиот регион”.

Врз основа на овие индикации се детектираат нови свлечишта со кои се надополнува катастарот. Деталите се презентирани во Табела 10.

Табела 10 Анализа на Sentinel DInSAR податоци за детекција на свлечишта

DInSAR ИНДИЦИРАНИ ЗОНИ И БРЗИНА [mm/год.]	ЛИТОЛОШКА ЕДИНИЦА ¹⁾	ПОТЕНЦИЈАЛ ЗА ПЛИТКО СВЛЕКУВАЊЕ [Fs]	ПОТЕНЦИЈАЛНА ЕРОЗИЈА [m ³ /km ² /год.]	ВИЗУЕЛНА АНАЛИЗА НА ДТМ СО ВИСОКА РЕЗОЛУЦИЈА	ЕЛЕМЕНТИ ИЗЛОЖЕНИ НА РИЗИК	НОВО СВЛЕЧИШТЕ ВО КАТАСТАР
A1 [-10 – -5]		> 1.5 < 1.5	899	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	Дел од с. Вејце и инфраструктура	-
A2 [-10 – -5]		< 1.5	899	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	Нема	-
A3 [-10 – -5] [3 – 5]		< 1.5	899	Има визуелни индикации за поместувања на теренот	Дел од с. Бродец	S0 S1
A4 [3 – 5]		> 1.5	842	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	Нема	-
A5 [-10 – -5] [3 – 5]		> 1.5 < 1.5	842	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	Скијачки центар Попова Шапка	-
A6 [-10 – -5]		< 1.5	842	Има визуелни индикации за поместувања на теренот; во близина на свлечиште со ID1006	Нема	S2 S3
A7 [-10 – -5]		> 1.5	1374	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	Инфраструктура и неколку објекти	-
A8 [-10 – -5]		< 1.5 > 1.5	899	Во индицираната зона се свлечиштата со ID1074 и ID1075; без други јасни визуелни индикации за поместувања	Инфраструктура и дел од с. Шипковица	-
A9 < -10		> 1.5	899	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	Неколку објекти	-
A10 [-10 – -5] [3 – 5]		< 1.5 > 1.5	899	Има визуелни индикации за поместувања на теренот	с. Селце	S4 S5 S6 S7
A11 < -10		< 1.5 > 1.5	1040	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	Нема	-
A12 < -10		< 1.5	1040	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	Нема	-

DInSAR ИНДИЦИРАНИ ЗОНИ И БРЗИНА [mm/год.]	ЛИТОЛОШКА ЕДИНИЦА ¹⁾	ПОТЕНЦИЈАЛ ЗА ПЛИТКО СВЛЕКУВАЊЕ [Fs]	ПОТЕНЦИЈАЛНА ЕРОЗИЈА [m ³ /km ² /год.]	ВИЗУЕЛНА АНАЛИЗА НА ДТМ СО ВИСОКА РЕЗОЛУЦИЈА	ЕЛЕМЕНТИ ИЗЛОЖЕНИ НА РИЗИК	НОВО СВЛЕЧИШТЕ ВО КАТАСТАР
A13 < -10		< 1.5	нема податок	Има визуелни индикации за поместувања на теренот	Нема	S8
A14 [-10 – -5]		< 1.5 > 1.5	1040	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	Дел од с. Долно Палчиште	-
A15 [-10 – -5]		< 1.5 > 1.5	996- 1259	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	Дел од с. Урвич	-
A16 [-10 – -5]		> 1.5	1259	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	Канал за вода	-
A17 [-10 – -5]		< 1.5 > 1.5	1259	Во индицираната зона е свлечиште со ID1043; без други јасни индикации за поместувања	Инфраструктура и дел од с. Ново Село	-
A18 [-10 – -5]		> 1.5	нема податок	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	с. Сетоле	-
A19 [-10 – -5]		< 1.5 > 1.5	1259	Има визуелни индикации за поместувања на теренот	Инфраструктура	S9
A20 < -10		> 1.5	1259	Има визуелни индикации за поместувања на теренот	Инфраструктура и с. Раковец	S10
A21 < -10		> 1.5 < 1.5	/	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	Нема	-
A22 [-10 – -5] [2 – 3]		> 1.5 < 1.5	1374	Има визуелни индикации за поместувања на теренот. Во индицираната зона се свлечиштата ID24 и ID1049. Направено е ажурирање на границата на свлечиштето ID24.	Инфраструктура и с. Гурѓевиште	-
A23 < -10 [3 – 5]		< 1.5 > 1.5	1374	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	с. Калиште	-
A24 [-10 – -5] [2 – 3]		> 1.5	1374	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	Инфраструктура	-
A25 [-10 – -5] [3 – 5]		> 1.5	1200	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	с. Здуње	-
A26 [-10 – -5] [3 – 5]		> 1.5 < 1.5	1037- 1097	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	с. Дебреше с. Врановци	-

DInSAR ИНДИЦИРАНИ ЗОНИ И БРЗИНА [mm/год.]	ЛИТОЛОШКА ЕДИНИЦА ¹⁾	ПОТЕНЦИЈАЛ ЗА ПЛИТКО СВЛЕКУВАЊЕ [Fs]	ПОТЕНЦИЈАЛНА ЕРОЗИЈА [m ³ /km ² /год.]	ВИЗУЕЛНА АНАЛИЗА НА ДТМ СО ВИСОКА РЕЗОЛУЦИЈА	ЕЛЕМЕНТИ ИЗЛОЖЕНИ НА РИЗИК	НОВО СВЛЕЧИШТЕ ВО КАТАСТАР
A27 < -10 [3 – 5]		> 1.5 < 1.5	/	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот	Нема	-
A28 [-10 – -5]		> 1.5 < 1.5	996	Нема визуелни индикации за поместувања на теренот освен веќе регистрираните свличишта ID1008, ID1026 и ID33	с. Камењане	-

1) Легенда за “Литолошка единица”

Епидот актинолитски шкрилци	Гранитоидни карпести маси
Кварц карбонатни серицитски шкрилци и филити	Албит хлорит серицитски шкрилци
Мермери и мермерести варовници	Дијабази и спилити
Кристалести варовници со рожњаци	Филитоиди
Кварц порфири	Кварцити и кварцни песочници
Метापесочници	Плиоцен песоци и глини супесоци и суглини

Може да се заклучи дека индицираните зони во кои се издвоени свличишта врз основа на оваа анализа, се карактеризираат со видливи геоморфолошки индикации за присуство на поместувања, со потенцијал кон плитко свлекување и ерозија. Кај останатите зони каде што DInSAR технологијата регистрира поместувања, иако не се видливи визуелни индикации за присуство на нестабилност, сите се карактеризираат или со потенцијал кон плитко свлекување и ерозија или пак во издвоената зона се наоѓаат делови или цели веќе регистрирани свличишта кои се дел од катастарот, па нивната претходна или актуелна активност резултира во забележливи поместувања на теренот.

Анализа на DInSAR индицираните зони може да се направи и од аспект на тоа дали во нивната зона се наоѓаат населени места или инфраструктура (патишта, канали за вода и сл.). Кај индицираните зони: A1, A3, A5, A7, A8, A9, A14-A20, A22-A26 и A28 се дава препорака за мониторинг на поместувањата со оглед на тоа дека во овие зони се наоѓаат цели населени места или дел од населени места и инфраструктура, кои всушност се изложени на ризик од свлекување на теренот. Останатите индицирани зони, иако се зони со потенцијал за свлекување, кај нив не постои ризик од свлекување, бидејќи се далеку од урбанизирани зони и не загрозуваат инфраструктура или население во својата поблиска околина.

6.5 Резиме на досега направените анализи

Заклучокот од слика 23, дека најголем број на архивски податоци за свличишта се достапни за северозападниот планински дел од регионот, се потврдува и на слика 36 каде дополнително се претставени и DInSAR индицираните зони. Заради видливоста на сензорот, DInSAR издвоените зони исто така во најголем дел се во рамки на овој потег (жолта линија на слика 36). Издвоената зона е со протегање од граница со Косово на запад до подножјето на Шар Планина на исток, односно до контактот на Шар Планинскиот масив со Полошката котлина. Истата ги опфаќа општините Тетово, Боговиње и Врапчиште. Најголем дел од населените места се наоѓаат во подножјето на планинските масиви, каде се регистрирани и голем дел од свличиштата. Во издвоената

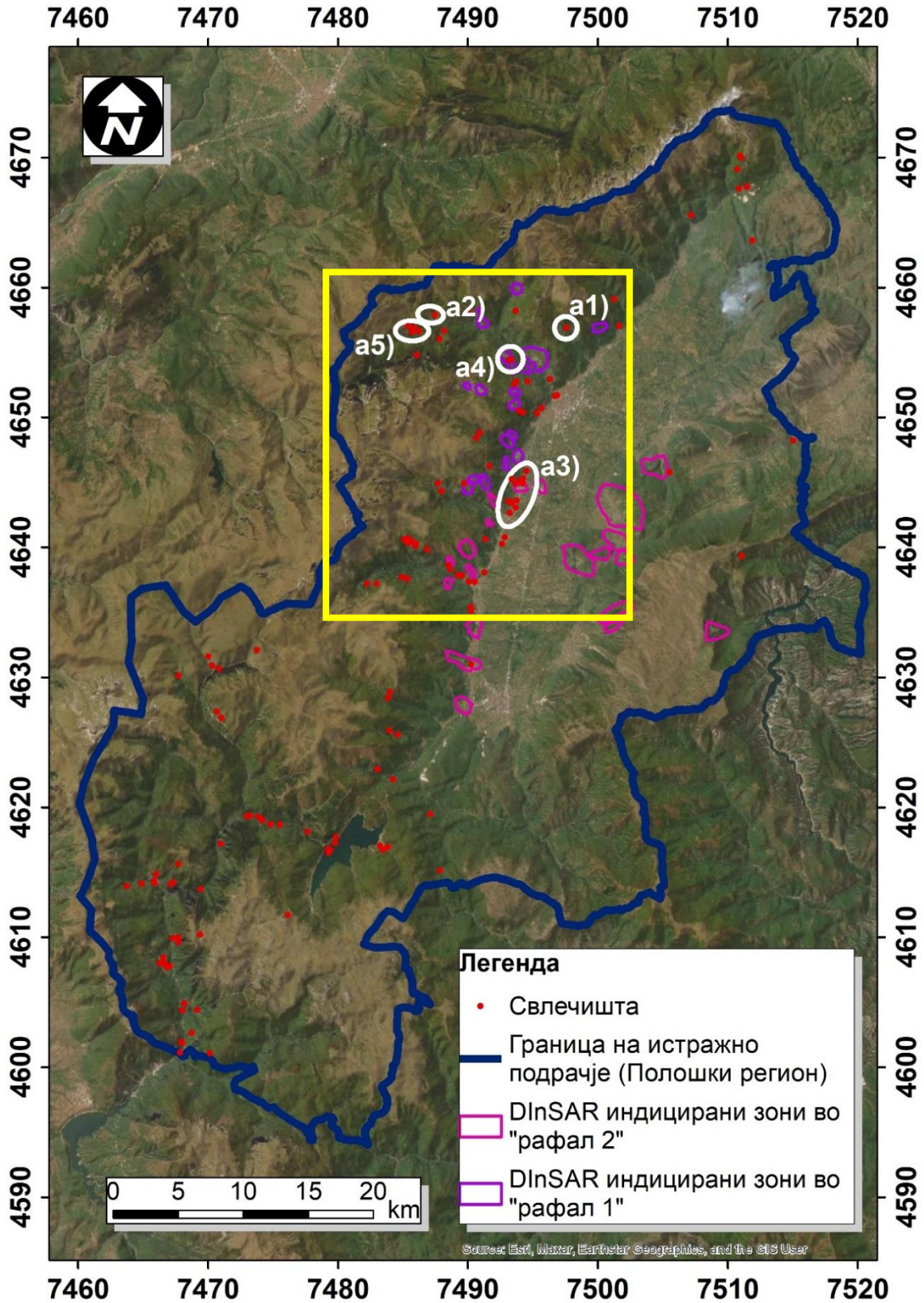
зона се наоѓаат 64 свлечишта од вкупно 136 регистрирани свлечишта, или скоро 50% од свлечиштата кои се дел од подготвениот архивски катастар, како и 26 од вкупно 38 DInSAR индицирани зони.

На картата на слика 36 се издвоени пет области означени со a1), a2), a3), a4) и a5), каде се присутни свлечишта во околина на населени места, како што се селата: Гермо, Бзовце, Боговиње, Камењане, Шипковица и Вешала. Приказ на овие зони, со присутните свлечишта е даден на слика 37. Овие примери укажуваат на неопходноста и ургентноста за соодветно управување со ризикот во овој дел од земјата, а детекцијата и карактеризацијата на нестабилните појави на теренот со цел формирање на комплетен катастар, се главен предуслов за реална проценка на подложноста кон свлекување.

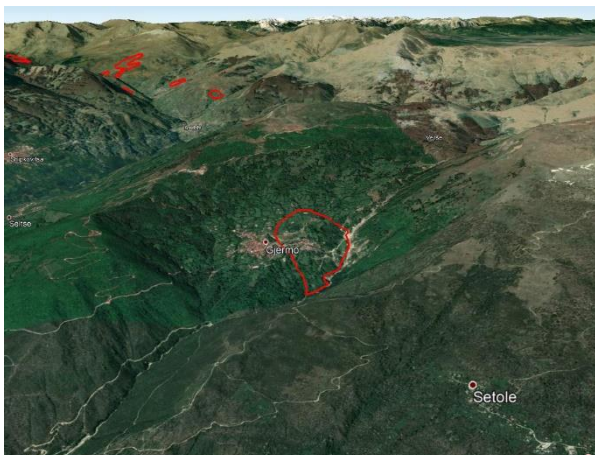
Согласно препораките во стручната литература (Calvello et al. 2013), дека во случаи каде комплетен катастар на свлечишта не е достапен за да изврши зонирање на теренот во големи региони, може да се применат два алтернативни пристапи: 1) да се направи нов катастар за целиот регион, или 2) да се направи нов катастар за еден дел од регионот, да се развие модел за да се идентификува врската помеѓу свлечиштата и условите на теренот, а потоа да се експортираат добиените резултати на останатиот дел од регионот.

Согласно досегашните индикации за повеќе достапни податоци за свлечишта во издвоената северозападна зона во однос на останатите делови од регионот, во понатамошните чекори се применува вториот принцип предложен од Calvello et al. (2013), односно преку примена на друг современ пристап за детекција на нестабилни појави се детектираат дополнителни појави на нестабилност само за овој дел од регионот, со цел да се создаде целосна слика за дистрибуцијата на минатите свлечишта. Анализата за врската помеѓу случените свлечишта и влијателните фактори за нивна појава ќе се искористи и за останатиот дел од регионот, со цел да се направи зонирање на подложноста кон свлекување.

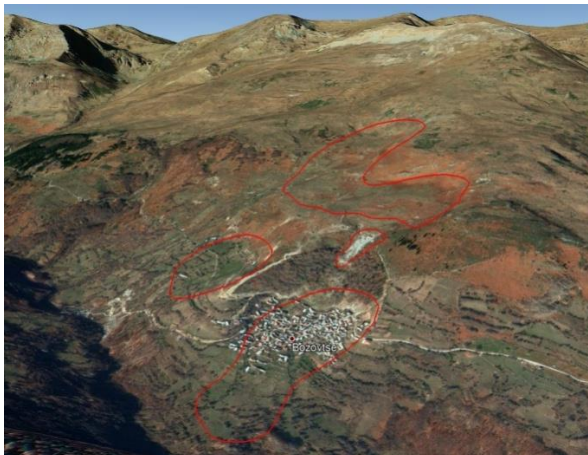
Ваквиот пристап на анализа се смета за особено практичен во случај на регионални анализи и примена на далечински методи за детекција на нестабилности. Всушност теренската верификација на детектираните појави преку систематско геоморфолошко картирање на цел регион е далеку посложен процес, временски и логистички неспоредливо пообемн, во споредба со картирање на само една издвоена зона.



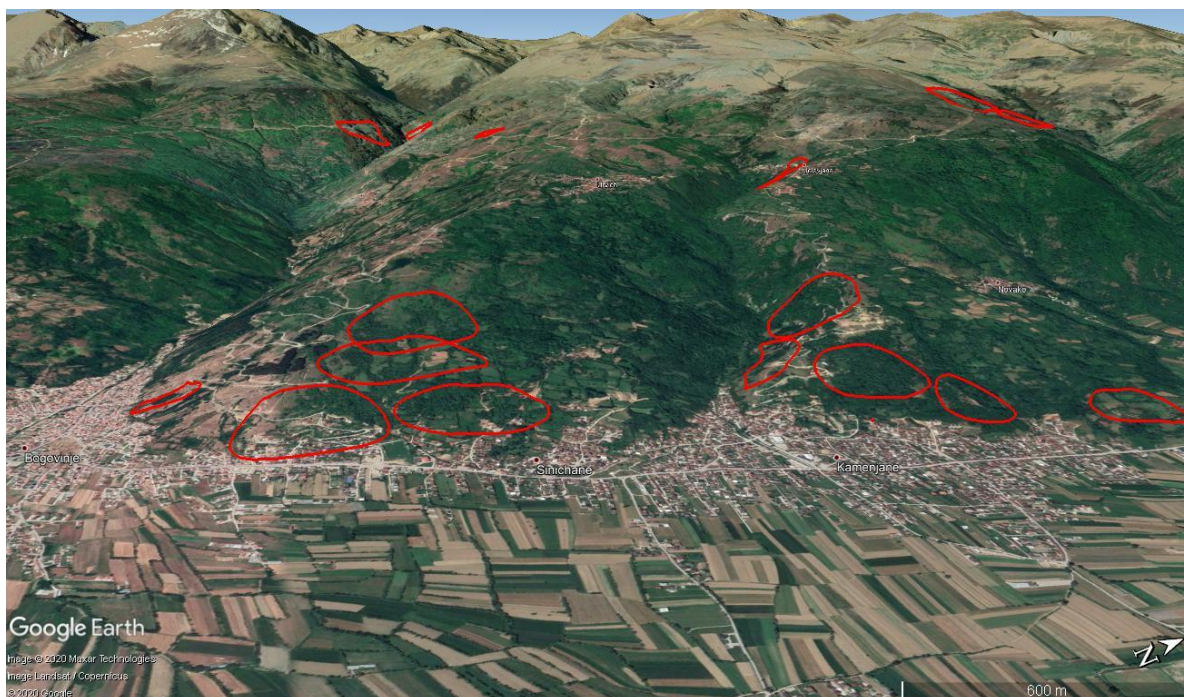
Слика 36 Катастарска карта со приказ на индицирани зони преку Sentinel DInSAR податоци



а1) Големо свлечиште кај село Гермо



а2) Свлечишта во околина на село Бозовце



а3) Повеќе свлечишта над селата Боговиње и Камењане



а4) Свлечишта над село Шипковица



а5) Свлечиште во околина на село Вешала

Слика 37 Приказ на свлечишта во близина на урбанизирани области

6.6 Примена на ДТМ од LiDAR снимање на теренот за детекција на свлечишта

LiDAR (Light Detection and Ranging) технологијата или како што уште се нарекува 3Д ласерско скенирање на теренот, претставува активен систем за далечинска идентификација кој користи електромагнетна енергија во оптичкиот опсег, за идентификација на објекти (цел), утврдување на растојанието помеѓу целта и инструментот (опсег) и детерминирање на физичките својства на објектот, засновано на интеракцијата на зрачењето од целта преку феномени како апсорпција, рефлексија и флуоресценција (Diaz et al. 2017). Технологијата LiDAR користи светлина во форма на пулсирачки ласерски сигнали за прецизно детектирање на карактеристиките на површината на земјата. Ласерските импулси - комбинирани со други податоци снимени од LiDAR системот - генерираат прецизни, тродимензионални информации (XYZ) за обликот на површината на земјата и нејзините карактеристики (NOAA).

LiDAR податоците можат да се интегрираат со други извори на податоци (ортофото снимки, векторски податоци за згради, патишта, карпи, реки, мостови, итн.) во насока на обезбедување на квалитетна основа за идентификација и анализа. Основниот податок кој се добива од LiDAR скенирање на теренот се нарекува облак од точки. Облакот од точки е голема колекција на 3Д точки кои имаат дефинирани X, Y и Z координати, но исто така содржат атрибутни податоци како: интензитет, број на повратни импулси од соодветниот ласерски зрак, реден број на повратен импулс, класа, RGB вредност (црвена, зелена и сина), GPS време, агол и насока на скенирање. Овие податоци се важни во процесот на класификација на облакот од точки, каде истите се класифицираат во различни класи кои го претставуваат видот на објект од каде е рефлектиран ласерскиот импулс. Во таа смисла, точките можат да припаѓаат на различни класи на пример: терен, зграда, мост, ниска вегетација, висока вегетација, вода итн. Класите кои најчесто се користат за класифицирање на облакот од точки се дефинирани од страна на Американското друштво за фотограметрија и далечинска идентификација (ASPRS). Од суштинско значење е поделбата на точките на точки од терен и сите останати (нетеренски) точки, бидејќи овој процес директно влијае на квалитетот на ДТМ. Се напоменува дека ДТМ-от добиен како производ од LiDAR скенирањето на теренот е толку прецизен и детален што обезбедува ново ниво во истражувањето и идентификацијата на свлечишта.

Дигиталниот теренски модел (ДТМ) за Полошкиот регион, добиен од податоците од LiDAR скенирање, има резолуција од еден метар. Во однос на методологијата која ќе се користи за идентификација на свлечишта, оваа резолуција се смета за соодветна. LiDAR податоците се креирани од страна на Агенцијата за катастар на недвижности, а податоците се обезбедени од страна на UNDP во рамки на проект за подобрување на отпорноста на Полошкиот регион кон поплави.

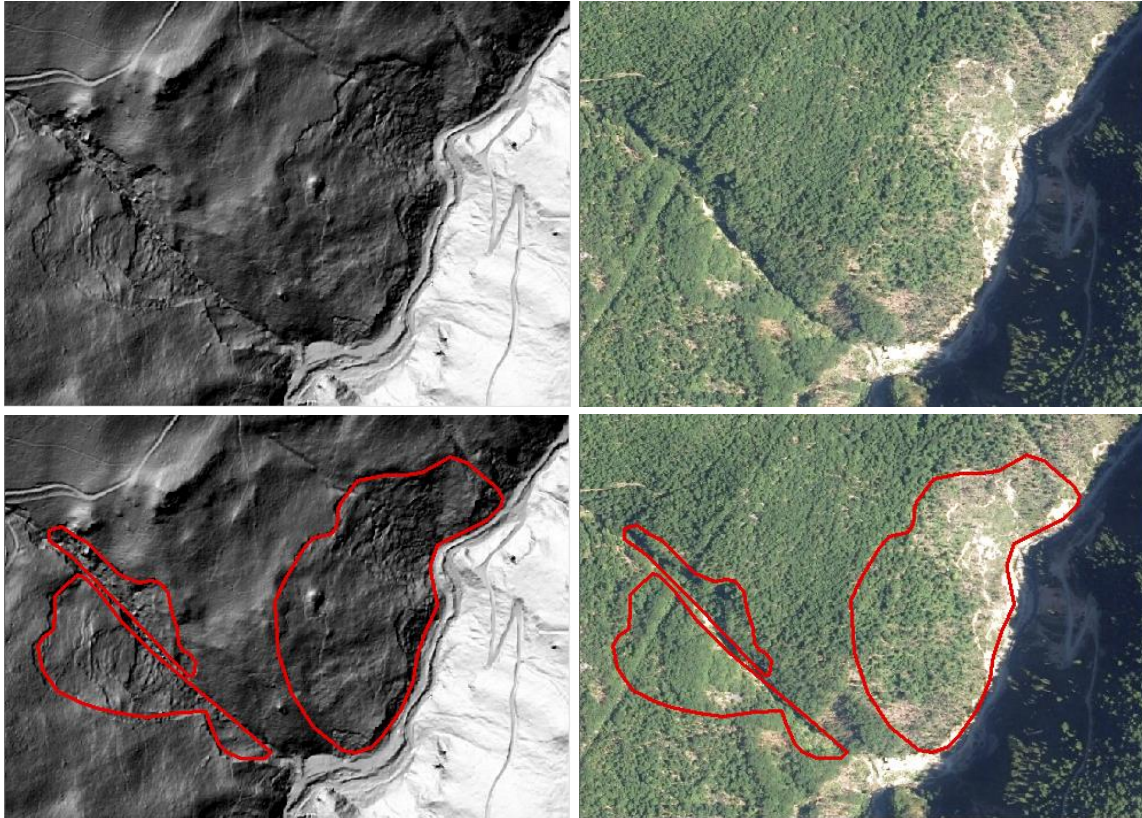
6.6.1 Детекција на свлечишта врз основа на ДТМ од LiDAR скенирање на теренот

Откривањето на нови свлечишта во анализираното подрачје, врз основа на дигиталниот теренски модел (ДТМ) добиен од податоци од LiDAR скенирање на теренот, се прави со примена на два пристапи: визуелна анализа на ДТМ за откривање на нови свлечишта и полуавтоматско препознавање на нови свлечишта.

6.6.1.1 Визуелна анализа на ДТМ за откривање на нови свлечишта

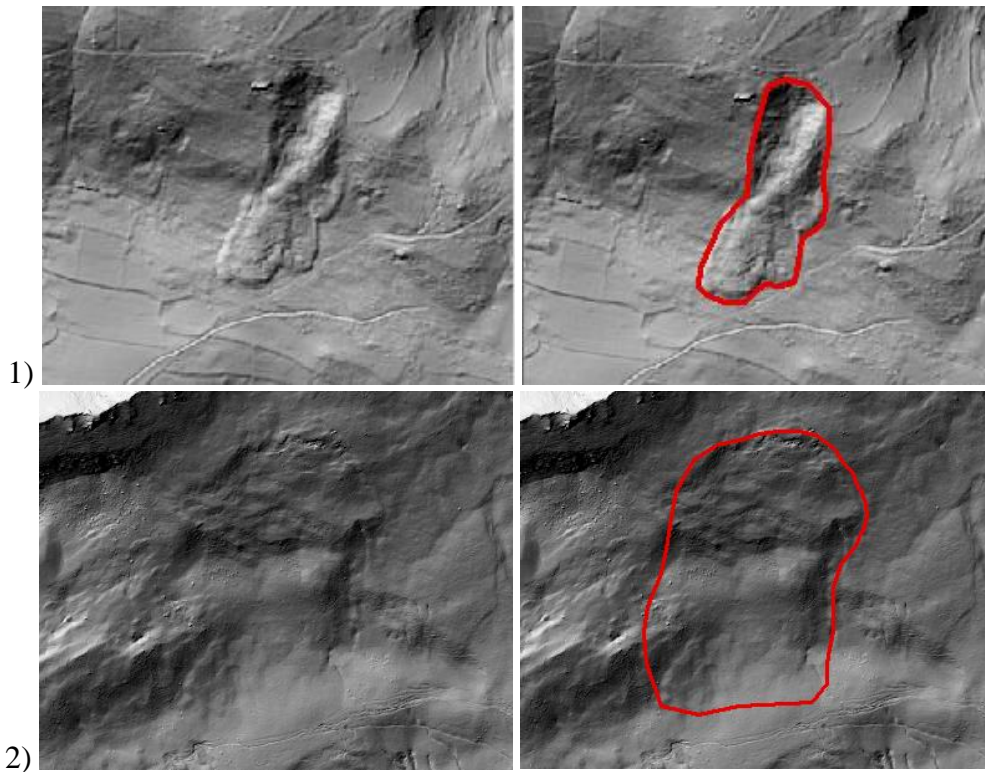
Визуелното препознавање на свлечишта се прави со помош на топографски дериватни податоци од LiDAR ДТМ, односно, засенчани карти и 10 m изохипси. Дополнително, ортофото снимки се искористени за проверка на морфолошките форми покрај патиштата и куќите, како што се депонии или усеци/засеци, потоа пошуменоста

или оголеноста на теренот исл. Имајќи ја во предвид предноста на LiDAR технологијата за продирање низ вегетација и со тоа добивање на податоци за морфолошките карактеристики на теренот, а од друга страна присуството на густо пошумени зони во анализираното подрачје, LiDAR снимките во голема мера помогнаа да се идентификуваат нови свлечишта, Слика 38.



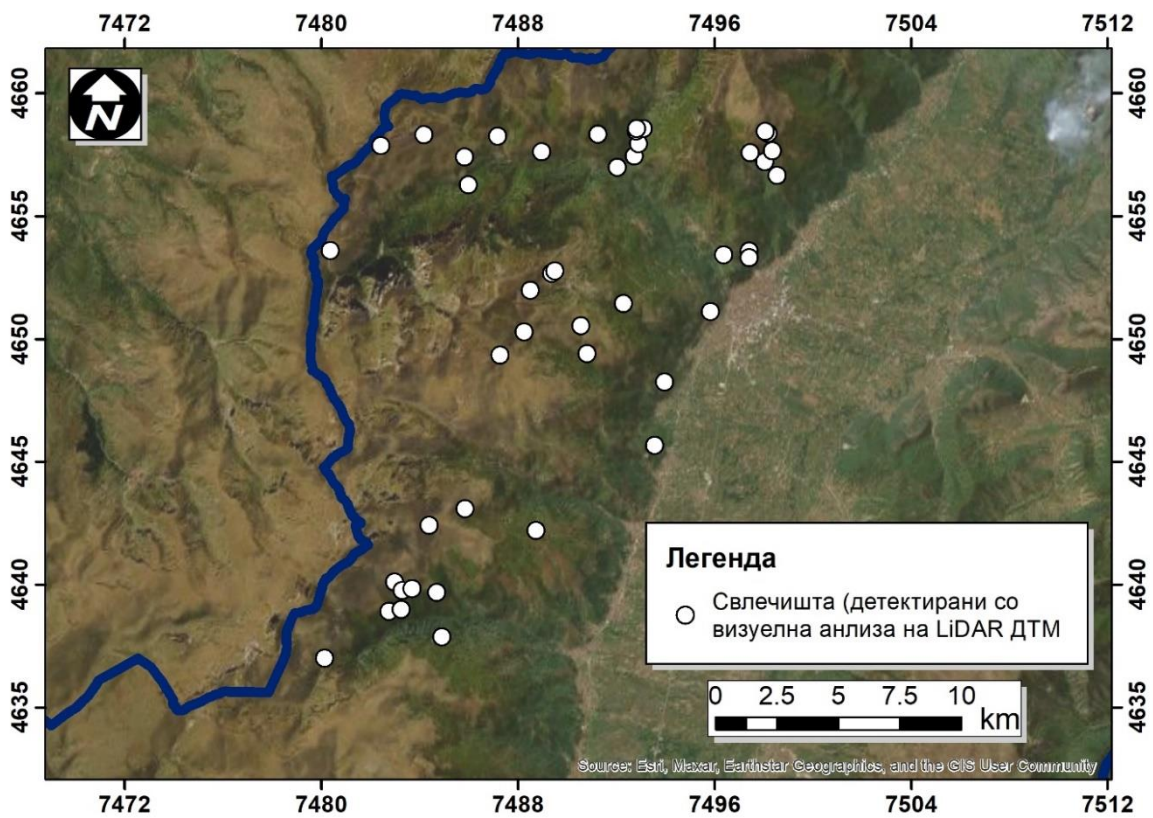
Слика 38 Детекција на свлечишта во пошумен терен - горе лево: исечок од LiDAR ДТМ; горе десно: исечок од орто-фото снимка; доле лево: оконтурени свлечишта на LiDAR ДТМ; доле десно: оконтурени свлечишта на орто-фото снимка.

Идентификацијата на свлечиштата на LiDAR ДТМ беше заснована на визуелна анализа на деформации на теренот и препознатливи карактеристики на свлечиштата (на пр. конкавни главни пукнатини, тело на свлечиште и конвексни делови во ножицата, набрани површини и сл.). Доверливоста во детекцијата на свлечиштата е изразена како „висока“, каде што елементите на свлечиштето и морфологијата се јасно видливи и лесно се интерпретираат, или пак „ниска“, каде што се приметува некаква деформација на теренот и постои веројатност за присуство на свлечиште, меѓутоа не е многу јасно препознатливо (Слика 39). Во катастарот на свлечишта се вклучени свлечиштата кои се детектирани со “висока” доверливост.



Слика 39 Визуелно препознавање на свлечишта од LiDAR ДТМ: 1) свлечиште препознаено со висока доверливост; 2) свлечиште препознаено со ниска доверливост

Преку ваквиот пристап за идентификација на свлечишта, откриени се нови 46 позиции со индикации за присуство на свлечишта, Слика 40.



Слика 40 Детектирани свлечишта преку визуелна анализа на LiDAR ДТМ

Во табела 11 се наведени детектираните свлечишта според визуелна анализа на LiDAR ДТМ. Свлечиштата се означени со соодветен идентификационен број, дополнително окарактеризирани од аспект на литолошки состав, големина (согласно поделбата во табела 4, поглавје 6) и тип на користење/покриеност на земјиштето.

Табела 11 Детектирани свлечишта со визуелна анализа на LiDAR ДТМ

ИД БРОЈ	ГОЛЕМИНА	ЛИТОЛОШКИ СОСТАВ	КОРИСТЕЊЕ / ПОКРИЕНОСТ НА ЗЕМЈИШТЕ
L0	Многу големо	Кварцити и кварцни песочници Кварц карбонатни серицитски шкрилци и филити	Природни пасишта
L1	Многу големо	Епидот актинолитски шкрилци	Широколисна шума (листопадна) Земјиште главно окупирано со земјоделство, со значителни површини со природна вегетација
L2	Многу големо	Кристалести варовници со рожњаци	Мочуришна вегетација Природни пасишта
L3	Средно	Кварцити и кварцни песочници	Природни пасишта
L4	Големо	Кварцити и кварцни песочници	Природни пасишта
L5	Големо	Епидот актинолитски шкрилци Дијабази и спилити	Преодна зона шума-грмушка Дисконтинуирана урбана зона
L6	Големо	Мермери мермерасти варовници Кварц карбонатни серицитски шкрилци и филити	Широколисна шума (листопадна)
L7	Големо	Мермери мермерасти варовници Кварц карбонатни серицитски шкрилци и филити	Широколисна шума (листопадна)
L8	Големо	Епидот актинолитски шкрилци	Широколисна шума (листопадна) Земјиште главно окупирано со земјоделство, со значителни површини со природна вегетација
L9	Многу големо	Мермери мермерасти варовници Хлорит серицитски шкрилци Кварц карбонатни серицитски шкрилци и филити	Мочуришна вегетација Природни пасишта
L10	Многу големо	Квартерни наслаги Албитизирани хлорит епидот серицитски шкрилци	Преодна зона шума-грмушка Широколисна шума (листопадна)
L11	Многу големо	Епидот актинолитски шкрилци Гранитоидни карпести маси	Земјиште главно окупирано со земјоделство, со значителни површини со природна вегетација Комплексни предели за насадување
L12	Големо	Епидот актинолитски шкрилци	Широколисна шума (листопадна)
L13	Многу големо	Мермери мермерасти варовници Кварц карбонатни серицитски шкрилци и филити	Широколисна шума (листопадна) Земјиште главно окупирано со земјоделство, со значителни површини со природна вегетација
L14	Големо	Мермери мермерасти варовници	Широколисна шума (листопадна)
L15	Големо	Мермери мермерасти варовници Кварц карбонатни серицитски шкрилци и филити	Широколисна шума (листопадна)
L16	Средно	Кристалести варовници со рожњаци Филитоиди	Широколисна шума (листопадна)
L17	Големо	Албит хлорит серицитски шкрилци	Преодна зона шума-грмушка
L18	Големо	Епидот актинолитски шкрилци	Широколисна шума (листопадна)
L19	Многу големо	Квартерни наслаги Кристалести варовници со рожњаци	Природни пасишта

ИД БРОЈ	ГОЛЕМИНА	ЛИТОЛОШКИ СОСТАВ	КОРИСТЕЊЕ / ПОКРИЕНОСТ НА ЗЕМЈИШТЕ
L20	Големо	Квартерни наслаги Кристалести варовници со рожњаци	Природни пасишта
L21	Многу големо	Кристалести варовници со рожњаци Епидот актинолитски шкрилци	Природни пасишта
L22	Многу големо	Гранитоидни карпести маси	Широколисна шума (листопадна)
L23	Многу големо	Епидот актинолитски шкрилци	Преодна зона шума-грмушка Земјиште главно окупирано со земјоделство, со значителни површини со природна вегетација
L24	Многу големо	Квартерни наслаги	Природни пасишта
L25	Многу големо	Квартерни наслаги Албитизирани хлорит епидот серицитски шкрилци	Природни пасишта Широколисна шума (листопадна)
L26	Големо	Албит хлорит серицитски шкрилци	Широколисна шума (листопадна)
L27	Многу големо	Епидот актинолитски шкрилци	Природни пасишта
L28	Средно	Епидот актинолитски шкрилци Кварц карбонатни серицитски шкрилци и филити	Природни пасишта
L29	Големо	Епидот актинолитски шкрилци Кварц карбонатни серицитски шкрилци и филити	Природни пасишта Преодна зона шума-грмушка
L30	Големо	Епидот актинолитски шкрилци Гранитоидни карпести маси	Земјиште главно окупирано со земјоделство, со значителни површини со природна вегетација Преодна зона шума-грмушка
L31	Многу големо	Мермери мермерасти варовници Квартерни наслаги Кварц карбонатни серицитски шкрилци и филити	Природни пасишта
L32	Големо	Мермери мермерасти варовници Кварц карбонатни серицитски шкрилци и филити	Земјиште главно окупирано со земјоделство, со значителни површини со природна вегетација Широколисна шума (листопадна)
L33	Големо	Кристалести варовници со рожњаци	Природни пасишта
L34	Големо	Кристалести варовници со рожњаци	Природни пасишта
L35	Средно	Албит хлорит серицитски шкрилци	Комплексни предели за насадување
L36	Големо	Гранитоидни карпести маси Албит хлорит серицитски шкрилци	Широколисна шума (листопадна)
L37	Средно	Мермери мермерасти варовници	Широколисна шума (листопадна)
L38	Многу големо	Квартерни наслаги	Природни пасишта
L39	Големо	Квартерни наслаги	Природни пасишта Широколисна шума (листопадна)
L40	Многу големо	Албитизирани хлорит епидот серицитски шкрилци	Природни пасишта Широколисна шума (листопадна)
L41	Многу големо	Епидот актинолитски шкрилци Албитизирани хлорит епидот серицитски шкрилци	Широколисна шума (листопадна) Преодна зона шума-грмушка
L42	Големо	Албитизирани хлорит епидот серицитски шкрилци	Широколисна шума (листопадна) Преодна зона шума-грмушка
L43	Средно	Епидот актинолитски шкрилци	Комплексни предели за насадување

ИД БРОЈ	ГОЛЕМИНА	ЛИТОЛОШКИ СОСТАВ	КОРИСТЕЊЕ / ПОКРИЕНОСТ НА ЗЕМЈИШТЕ
L44	Големо	Кварц карбонатни серицитки шкрилци и филити	Земјиште главно окупирано со земјоделство, со значителни површини со природна вегетација
L45	Големо	Епидот актинолитски шкрилци	Преодна зона шума-грмушка

Иако детекцијата на нови свлечишта преку визуелна анализа на LiDAR ДТМ е потврдена од страна на експерти со богато искуство во оваа областа, а од друга страна земени се во предвид и други подлоги врз основа на кои или се потврди присуството на свлечиштата или пак укажаа на лоша проценка, потребна е и теренска перспекција, барем кај дел од нив. Систематско теренско картирање на сите нови свлечишта, се препорачува да се направи во рамки на идни истражувања.

6.6.1.2 Полуавтоматско препознавање на нови свлечишта

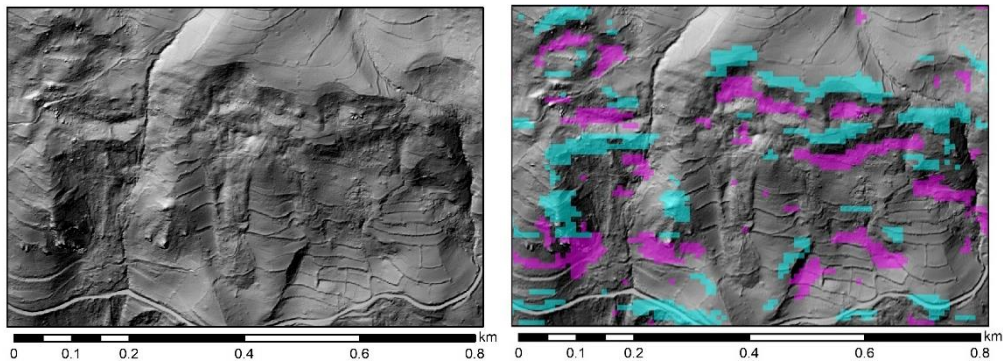
Во контекст на современите методи за детекција на свлечишта, се и достапните алгоритми за автоматско и полуавтоматско препознавање на свлечишта. Ваков пристап на детекција на свлечишта се прави и во предметното истражување. Добиените резултати се прифатени со резерва, а се искористени да се види во колкава мера истите се поклопуваат со веќе познатите полигони на свлечишта.

За детекција на свлечишта врз основа на LiDAR ДТМ за Полог применет е и полуавтоматски метод наречен Метод на Идентификација на Лузни и Контурно Поврзување (Scarp Identification and Contour Connection Method – SICCM), а предложен од Bunn et al. (2019). Методот се состои од два основни чекори. Првиот чекор е *идентификација на лузни на свлечиштата*, а вториот е *моделирање на телото на свлечиштата*.

За идентификација на лузни – чела на свлечиштата користен е полуавтоматски пристап, кој се состои од три главни чекори: (1) одредување на полигони кои претставуваат кандидати за лузни на свлечишта; (2) елиминирање на кандидати - лузни кои не укажуваат на свлечишта и (3) формирање на линии кои претставуваат лузни на свлечишта.

Полигоните кои претставуваат кандидати за лузни на свлечишта се генерирани врз основа на мешан растер. Мешаниот растер е добиен со множење на вредностите од растерскиот модел на наклон и вредностите од растерскиот модел на закрвеноста на теренот - двата деривати од ДТМ. Растерскиот модел на наклон на теренот претставува наклон на теренот во однос на хоризонтална рамнина и може да биде претставен во степени или проценти. Закрвеноста на теренот е искривување на површината во правец на најстрмниот наклон. Негативна вредност на закрвеноста покажува дека површината е конвексна, а позитивната вредност покажува дека површината е конкавна. Вредноста нула покажува дека површината е линеарна. Закрвеноста на површината е паралелна со наклонот и ја покажува насоката на максимален наклон.

Новокреираниот растерски модел понатаму се класифицира, при што пикселите се сместуваат во една од трите класи, ниска, средна и висока класа. Класата со пиксели со најниска вредност (Класа 1) претставува области на конвексност на теренот. Класата со висока вредност на пикселите (Класа 3) претставува области со вдлабнувања на теренот. Пикселите во средната класа (Класа 2) се однесуваат на рамен терен со мала закривеност. Прагот на премин помеѓу класите на пиксели се врши искусно од страна на лицето кое ја врши анализата.



Слика 41 лево: ДТМ; десно: произведен мешан растер (розови пиксели – конкавни површини, сини пиксели – конвексни површини)

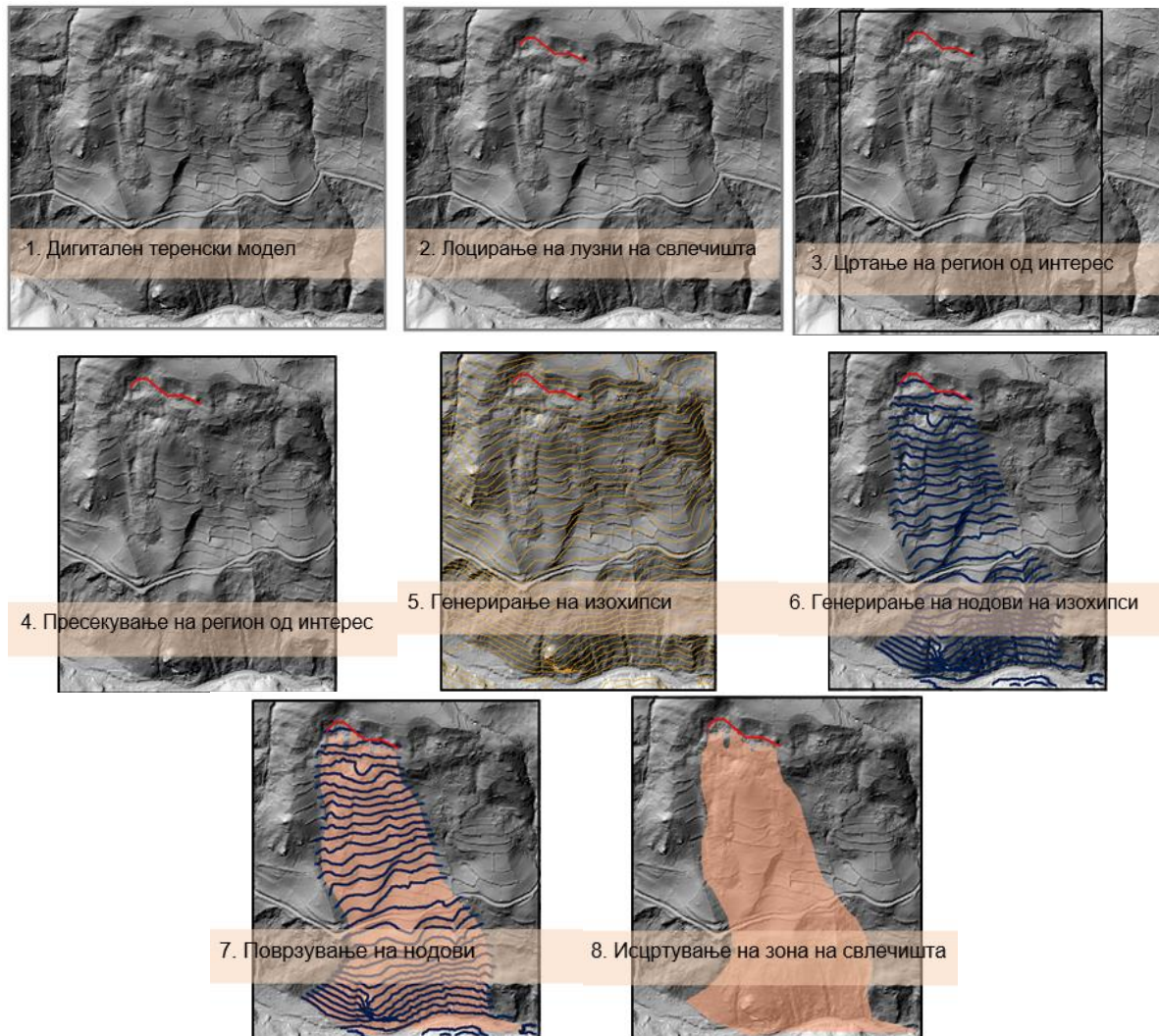
Пикселите што претставуваат гребени и сртови припаѓаат во иста класа. Ова може да биде збунувачко бидејќи гребенот е важна информација и укажува на постоење на свлечишта, но не и сртот. Со цел да се избегне оваа ситуација, се земаат предвид само пикселите кои се однесуваат на конкавни делови од теренот (вдлабнатините). Врз основа на овие пиксели се формираат таканаречени полигони – кандидати. Овие полигони претставуваат лузни на свлечиштето, но исто така можат да претставуваат и области кои не припаѓаат на свлечиште, како на пример области околу патиштата, реките, потоците, карпести изданоци итн. Во зависност од тоа каде ќе се постави прагот, полигоните – кандидати може да се разликуваат. Ако прагот е поставен премногу висок, ќе има помалку полигони - кандидати и обратно, ако прагот е поставен ниско, ќе има премногу полигони – кандидати. Во првиот случај ќе има лузни кои не се претставени со полигони – кандидати, а во вториот случај, каде што прагот е многу низок, ќе има премногу полигони – кандидати. Овој чекор бара лицето кое ја врши анализата од искуство да одлучи каде ќе го постави прагот врз основа на резултатите и видливите лузни на ДТМ. Во овој момент има голем број на полигони – кандидати кои покриваат лузни на свлечишта, но исто така опфаќаат области како патишта, потоци, реки и карпи. Ова води кон нов чекор, каде што полигоните – кандидати треба да се исчистат/класифицираат како полигони што претставуваат лузни на свлечишта и полигони кои не се однесуваат на свлечишта. Класифицирањето на полигоните - кандидати како полигони кои не се однесуваат на свлечишта, значи дека треба да обезбедиме податоци за патишта, потоци, реки итн. и да ги користиме овие просторни објекти за класификација на полигоните – кандидати. Полигоните што се пресекуваат со споменатите објекти не се сметаат за полигони кои претставуваат области со лузни на свлечишта. Дополнително, објектите што се потребни во класификацијата на полигоните – кандидати, како патиштата и реките, може да бидат преземени од топографски карти (патишта и реки), дигитализирани од ортофото снимки (патишта, реки и потоци) или изведени од ДТМ (реки и потоци).

По добивањето на дефинитивен сет на полигони кои претставуваат лузни на свлечишта, следи процес на конверзија на полигоните во линии, со кои просторно се дефинираат лузните на свлечиштата.

Вториот чекор се однесува на моделирање на телата на свлечиштата, за што е примент методот на контурно поврзување (Contour Connection Method - CCM). CCM е развиен за да идентификува претходни свлечишта или областите подложни на свлечишта. Целта на методот е брзо скенирање на големи области во регионот од интерес и идентификување на теренски услови кои укажуваат на можни свлечишта, врз основа на детектирање на морфолошки карактеристики (Leshchinsky et al. 2015).

Процесот на моделирање на зони на свлечишта започнува со LiDAR дигиталниот теренски модел (растер) како влезен податок за алгоритмот на методот SCCM. Следниот влезен податочен сет се линиите кои претставуваат лузни на свлечишта (полилинии) добиени од првиот дел од методологијата. Врз основа на димензиите на секоја индивидуална линија која претставува лузна на свлечиште, алгоритмот црта регион од интерес. Потоа се генерираат изохипси, кои потоа се дискретизираат во рамномерно распоредени нодови за да се овозможи пресметување на наклонот на векторите кои ги поврзуваат нодовите помеѓу соседни изохипси. Почнувајќи од линиите кои ги дефинираат лузните на свлечиштата, алгоритмот ги одредува најстрмните конекции помеѓу нодовите и продолжува да ги шири границите на свлечиштето се додека наклонот на конекциите не е помал од претходно зададена вредност. На тој начин SCCM методот го дефинира свлечиштето или областа склона на свлекување, која започнува од дадена линија – лузна на свлечиштето.

Текот на процесот на моделирање можни зони на свлечишта преку SICCM е даден на Слика 42.

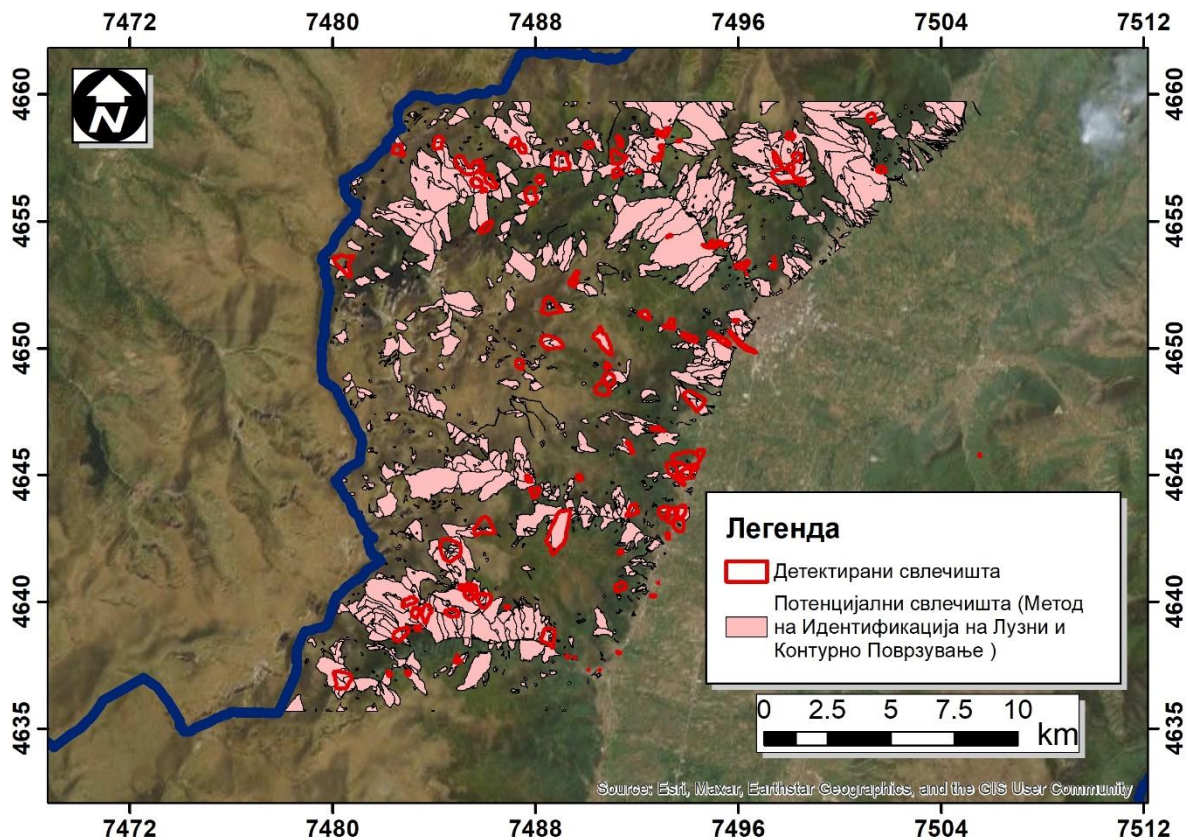


Слика 42 Методологија за моделирање на зони на свлечишта со SICCM

Применетиот пристап овозможува релативно брза полуавтоматска идентификација на зони со потенцијални свлечишта во регионални размери. Примената на SICCM за

картирање на свлечишта има неколку битни ограничувања (Bunn et al. 2019). Прво, резултатите зависат од квалитетот на влезните топографски податоци, односно ефикасноста се намалува кај терени со значајни антропогени влијанија, кои доведуваат до идентификација на лажни лузни, како и кај терени каде распаѓањето на карпите ги маскира лузните. Второ, методот е применлив за картирање на свлечишта со интактни лузни и депониран материјал, што е карактеристично генерално за ротациони и транслаторни лизгања, но не и за течишта и одрони.

Вака изработениот модел е подложен на процес на верификација. Во конкретниов случај, моделот е искористен за потврдување на претходно идентификуваните свлечишта. Анализата покажува поклопување на претходно детектираните свлечишта со потенцијалните свлечишта добиени со Методот на Идентификација на Лузни и Контурно Поврзување (Слика 43).



Слика 43 Детектирани свлечишта во Полошкиот регион врз база на LiDAR ДТМ

Преку претходно елаборираните пристапи за собирање на податоци за свлечишта (собирање на архивски податоци, анализа на DInSAR податоци и визуелна детекција преку анализа на LiDAR ДТМ), се создаде база на податоци од вкупно 121 локации со свлечишта, за издвоената зона од Полошкиот регион. За свлечиштата систематизирани преку анализа на историски податоци постојат повеќе податоци, во споредба со останатите детектирани свлечишта, за кои се познати само локацијата, големината и литолошкиот тип. Може да се каже дека податоците генерално се некомплетни, односно за голем дел од свлечиштата нема точни информации за времето на активирање, предизвикувачот или механизмот на лизгање. Врз основа на ова се заклучува дека достапните податоци за свлечиштата не се доволни за да се изврши моделирање на хазардот и ризикот од свлекување во анализраното подрачје. Имајќи го во предвид ова,

се донесе заклучок дека за случај како што е предметниов (недостаток на комплетни податоци за свлечишта), подобро е да се направи проценка на подложност кон свлекување, отколку да се врши понапредно моделирање на хазардот и ризикот, без можност за валидација на моделите.

7. МОДЕЛИ ЗА КАРАКТЕРИЗАЦИЈА НА ПОДЛОЖНОСТА (РЕЛАТИВНИОТ ХАЗАРД) КОН СВЛЕЧИШТА ВО ПОЛОШКИОТ РЕГИОН

Мерката за тоа колку одредена област е склона кон појава на свлечишта се нарекува подложност. Со подложноста се мери степенот до кој теренот може да биде зафатен со идни нестабилности, или со други зборови, тоа е проценка “каде” свлечиштата најверојатно ќе се случат (Guzzetti 2006). Математички, подложноста кон свлекување е проценка на веројатноста за просторна појава на нестабилност врз основа на повеќе фактори (теренски услови, климатски и антропогени влијанија и други). При проценка на подложноста, не се земаат во предвид карактеристиките на свлечиштата (на пр. должина, ширина, длабина, површина или волумен на свлечиштата), иако постојат примери за проценка на подложноста за свлечишта со различна големина (Carrara et al. 1995). Во литературата се забележува поистоветување на термините “подложност” и “хазард” кон/од свлекување. Хазардот е проценка на веројатноста дека ќе се случи свлекување со одредена магнитуда, во одреден период и во одредена област. Всушност, покрај предвидувањето “каде” ќе се случи свлекување на теренот, со хазардот се предвидува и “кога” или “колку често” тоа ќе се случи, како и “колку големо” тоа ќе биде (Guzzetti et al. 2006). Проценката за подложноста кон свлекување може да се смета за прв чекор во процесот на проценка на хазардот и ризикот од свлекување, но може да биде и краен производ за примена во процесот на просторното планирање.

Фундаменталниот принцип врз кој се базираат анализите за подложност кон свлечишта гласи: „Минатото и сегашноста се клучот за иднината“ (Varnes and IAEG Commission on Landslides and other Mass Movements, 1984). Ова значи дека идните свлечишта веројатно ќе се случат под ист или сличен склоп на услови кој довел до појава на свлечишта во минатото. Како резултат на тоа, за да се идентификуваат и предвидат идните локации подложни кон свлекување, неопходно е да се најде просторна врска помеѓу факторите кои влијаат на појавата на свлечишта и настанатите свлечишта.

Методите што се користат за проценка на подложноста кон свлекување еволуирале со текот на годините, и може да се групираат во две генерални групи: квалитативни и квантитативни. Квалитативните пристапи се субјективни, ја одредуваат подложноста врз база на искуство и класите на подложност се дефинираат со користење на описни (квалитативни) термини. Со квантитативните пристапи се добива нумеричка проценка, односно веројатност за појава на свлечишта.

Квалитативните пристапи опфаќаат неколку методи: геоморфолошкото картирање (се базира на способноста на стручниот истражувач да ги процени и картира вистинските и потенцијалните услови за нестабилност, заради што квалитетот на картата на подложност зависи од стручноста и искуството на истражувачот) или искуствен пристап (сложената нелинеарна врска помеѓу свлечиштата и факторите што предизвикуваат свлечишта се воспоставува со доделување на тежински коефициенти за сите фактори од страна на еден или повеќе експерти).

Квантитативните методи се базираат на математичка врска помеѓу стабилноста и влијателните фактори. Детерминистичките методи се засноваат на нумерички модели кои бараат детални влезни податоци (геомеханички параметри за литолошките единици и карактеристики за косините), а често многу е тешко да се обезбедат овие податоци за големи подрачја. Статистичките методи се засноваат на анализа на функција помеѓу влијателните фактори од кои зависи појавата на свлечишта и дистрибуцијата на случените свлечишта. Всушност, начинот на кој касификаторот конкретно функционира е да го мери придонесот на секој предиспонирачки фактор кон појавата на свлечишта, врз основа на просторна корелација помеѓу случените свлечишта и факторите. Кај овие

модели минатите свлечишта претставуваат зависни променливи, додека предиспонирачните фактори се експланаторни/независни променливи.

Статистичките методи може да бидат методи со две променливи (bivariate): Фреквенционен однос (Frequency Ratio), Веродостојност на Доказ (Weight of Evidence), Индекс на Ентропија (Index of entropy) и др.; и методи со повеќе променливи (multivariate): Логичка Регресија (Logistic Regression) или Метод на Дискриминанти (Discriminant method). Прегледот на литература укажува дека моделите со две променливи се поедноставени во однос на конструкцијата на моделот, но имаат мала способност за проценка на подложноста кон свлечишта во сложени терени. Моделите со повеќе променливи често се супериорни во однос на бинарните статистички модели, но нивниот недостаток е малата точност кога анализата вклучува сложени нелинеарни податоци.

- Единици за картирање

Изборот на единица за картирање е еден од основните чекори во процесот на моделирање на подложноста кон свлекување и во голема мера влијае на зонирањето на подложноста (Guzzetti et al. 1999). Единиците за картирање предложени во литература кои се користат во проценка на подложноста кон свлекување се класифицираат во седум типови: пиксели (мрежа од ќелии – grid cells), теренски единици (terrain units), единици со единствени услови (unique conditions units), единици на падините (slope units), гео-хидролошки единици, топографски единици и политички или административни единици. Reichenbach et al. (2018), потенцираат дека најчесто користени единици за картирање од страна на истражувачите се: пиксели, единици на падините и единици со единствени услови. Во нивната статистика од 565 трудови, пикселите како единици за картирање се најмногу применувани (86.4%), потоа единиците на падините (5.1%) и единиците со единствени услови (4.6%). Сите споменати единици за картирање имаат одредени предности и недостатоци, а повеќе околу нив може да се најде во Guzzetti (2006) и Reichenbach et al. (2018).

Пикселите се најмногу користени од страна на истражувачите во проценката на подложноста кон свлекување, затоа што се едноставни за обработка, во сите резолуции и географски размери. Современиот ГИС може ефикасно да третира податоци базирани на пиксели, може лесно да ги трансформира векторските информации прикажани како полигони, линии и точки во соодветна растерска претстава и притоа има многу функции за работа со растерски податоци. Во предметните анализи како единици за картирање се користат пикселите.

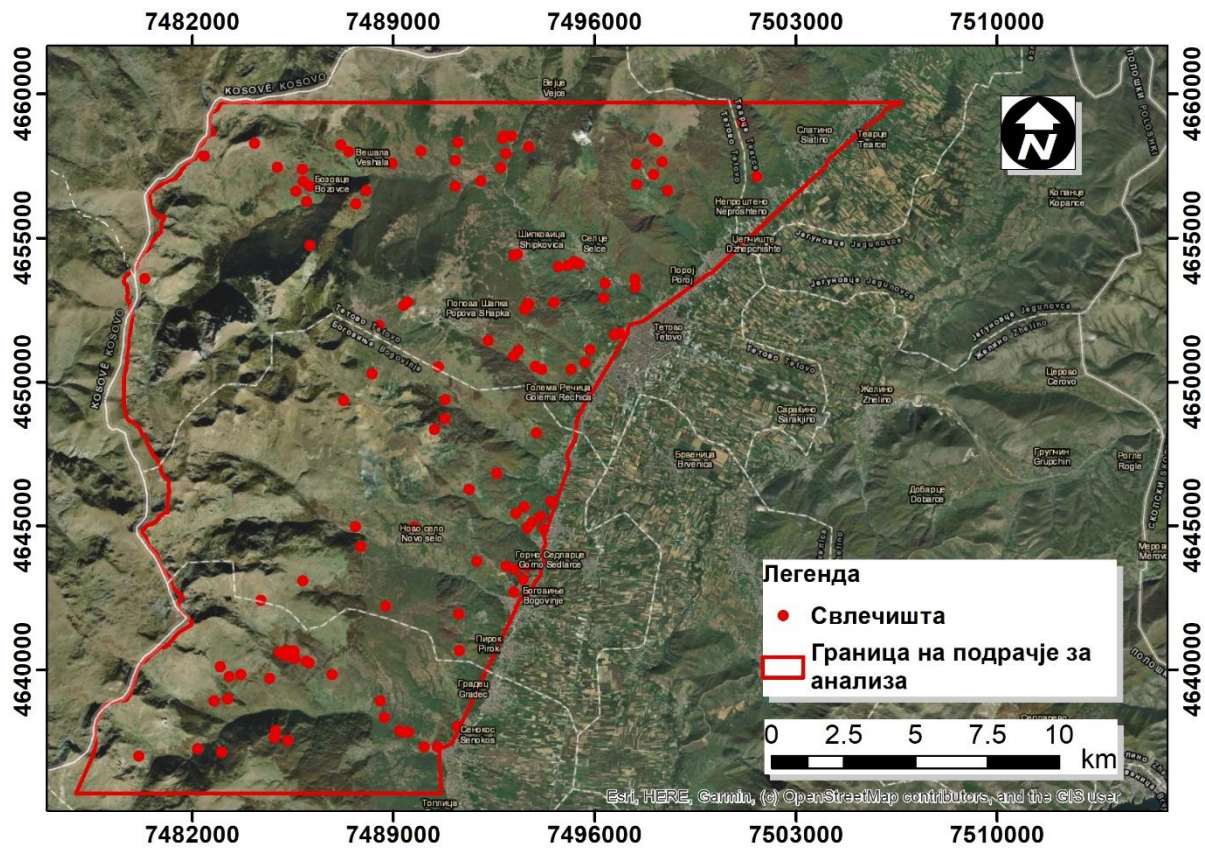
7.1 Катастарска карта на нестабилни појави на анализираното подрачје

За да се предвидат идните потенцијални зони за појава на свлечишта, потребно е да се знаат зоните кои претходно биле зафатени со свлекување. Најлесниот и директен метод за картирање на свлечишта е катастарската карта (Guzzetti et al. 2012). Катастарската карта претставува основа во анализите за проценка на подложноста. Во поглавје 6 детално се опишани постапките за формирање на катастарската карта на нестабилни појави, кои генерално се состоеја од: собирање на архивски податоци, визуелна анализа на дигитален теренски модел добиен со LiDAR скенирање на теренот и анализа на DInSAR индицирани зони со регистрирани поместувања.

Примената на сите овие пристапи овозможи да се осознае дистрибуцијата на минатите свлечиштата на повисоко ниво за еден помал дел од регионот. Следејќи ги препораките во стручната литература (Calvello et al. 2013), за да направи зонирање на подложноста кон свлекување на теренот, ќе се развие модел за да се идентификува

врската помеѓу свлечиштата и условите на теренот во овој дел од регионот, а потоа ќе се експортираат добиените резултати за поширок опфат.

Формираната катастарска карта, каде свлечиштата се претставени како точки, е дадена на слика 44.



Слика 44 Карта со свлечишта во подрачјето за анализа

Според истражувањето на Rong et al. (2020) претставувањето на свлечиштата како точка лоцирана во центарот на лузната од свлечиштето е најдобра стратегија за претставување на свлечиштата, бидејќи големината и обликот на свлечиштата секогаш се различни. Исто така и Hu et al. (2021) предлагаат да се користат точки како податок за свлечиштата, со цел да се зголеми ефикасноста на моделирањето, да се избегнат несигурности во однос на границите на свлечиштата, да се намали просторната автокорелација помеѓу свлечиштата и да се даде униформен третман на свлечиштата со различна големина.

Сите свлечишта во катастарот се дефинирани со полигони, но за целите за подготовка на модел на подложност кон свлекување, заради погоре наведените аргументи, свлечиштата се претставени во точки во челната пукнатина на свлечиштето.

7.2 Избор на влијателни фактори за појава на свлечишта

Подложноста кон свлекување е веројатноста за појава на свлекување во дадена област врз основа на теренските услови (Brabb, 1984). Согласно на ова, за да се постигне висока точност на моделите на подложност кон свлекување, изборот и подготовката на влијателните фактори е многу значаен чекор. Истражувачите идентификувале над 60 условни фактори кои влијаат на стабилноста на теренот (Koukis & Ziourkas, 1991). Не постојат стриктни и пропишани упатства за избор на предиспонирачки фактори, а

достапноста на податоци за локацијата која се анализира, често е основна лимитирачка околност за избор на предиспонирачки фактори.

Влијателните фактори во рамки на истражувањето се избрани врз основа на податоци собрани од литература и детална анализа на регионалните услови на теренот. Избрани се 12 влијателни фактори, кои се групираат во четири групи:

1. Топографски (наклон, надморска височина, ориентација, закривеност во основа, закривеност во профил, нерамност на терен, растојание до пат)
2. Геолошки (литологија, растојание до расед)
3. Хидролошки (врнежи, растојание до река)
4. Користење/покриеност на земјиште.

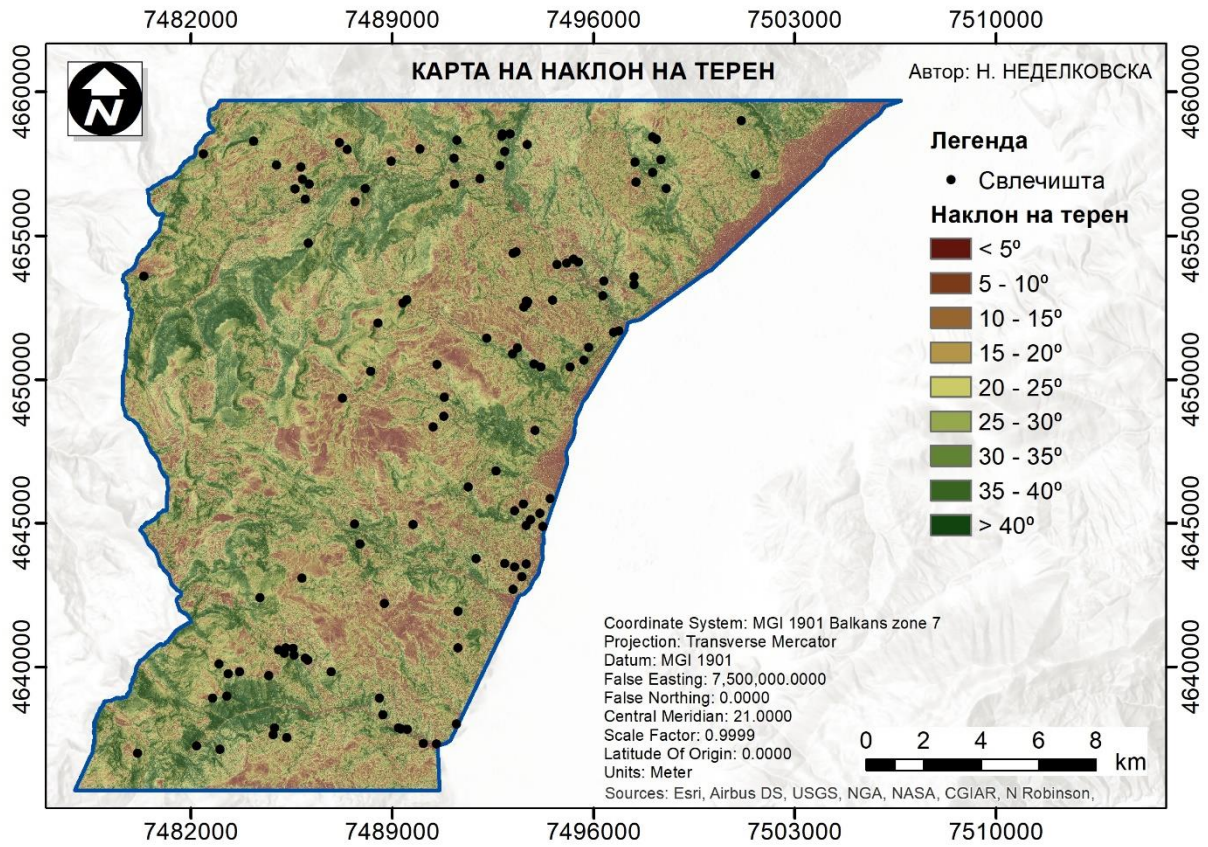
Овие 12 фактори се генерирани со користење на географски информативни системи (ГИС), со што се добиени 12 фактор карти со просторна резолуција 1m x 1m за големина на пиксел. Сите карти се во координатен систем MGI 1901 Balkans zone 7. Избраните влијателни фактори се од различен тип, односно, номинални (категорички податоци) како што се: литологија, ориентација и користење/покриеност на земјиште, или ординални (континуирани податоци) како што се: наклон, надморска височина, закривеност во основа, закривеност во профил, нерамност на терен, близина до пат, близина до расед, врнежи, близина до река. Во продолжение е даден осврт кон избраните фактори и добиените тематски карти.

7.2.1 Топографски фактори

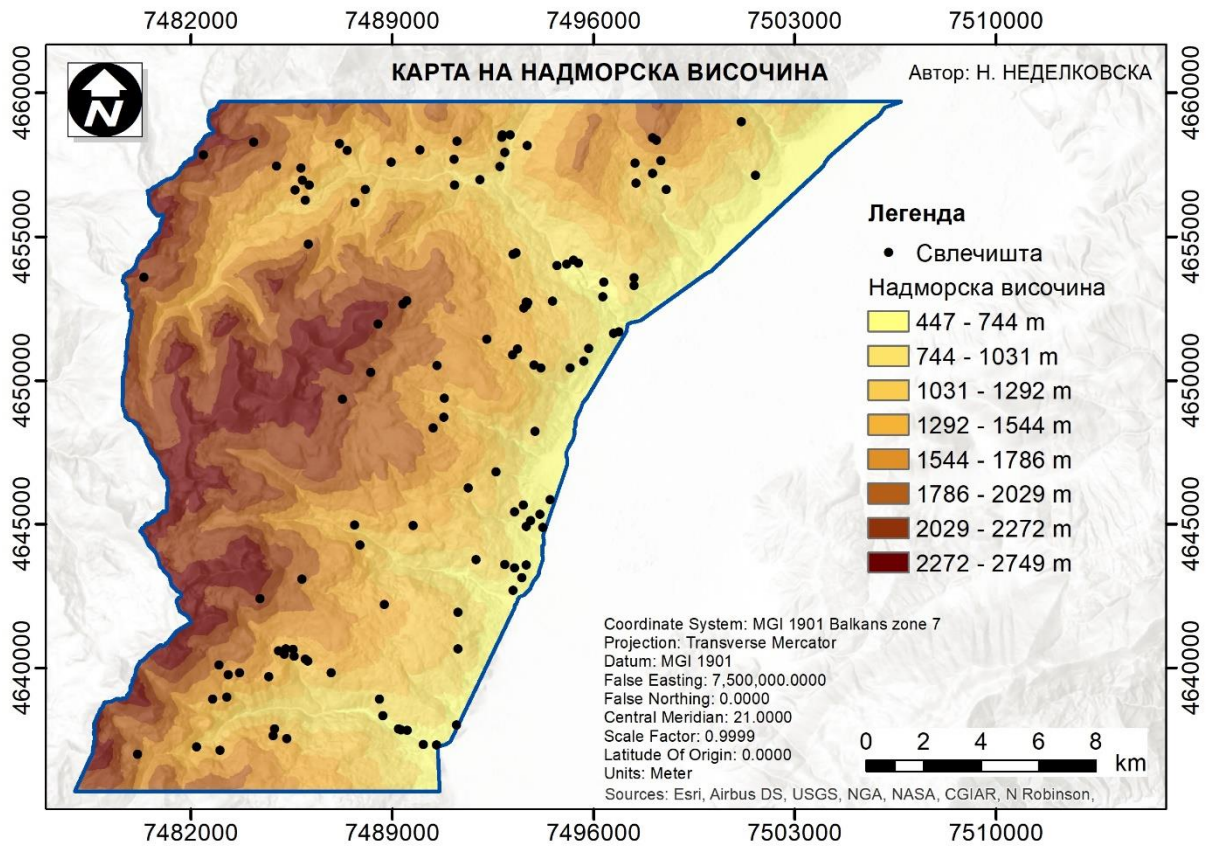
Наклонот се смета за еден од клучните топографски фактор кој директно влијае на појавата на свлечишта. Генерално, наклонот влијае на процесот на инфилтрација на водата и на распределбата на напрегањата, што е тесно поврзано со стабилноста на косините. Ломот на косината настанува кога дестабилизирачките сили (гравитационски сили, порен притисок, воден потисок, сили од земјотрес и сл.) ќе ја надминат јакоста на смолкнување на материјалите од кои е изградена косината. Општо земено, колку е поголем наклонот на теренот, толку е поголема и веројатноста за појава на свлекување.

Картата на наклон (слика 45) е добиена и пресметана врз основа на дигиталниот теренски модел (ДТМ). Во анализираното подрачје наклонот се движи од 0° до 84°, и е класифициран во девет класи: 0° – 5°; 5° – 10°; 10° – 15°; 15° – 20°; 20° – 25°; 25° – 30°; 30° – 35°; 35° – 40°; > 40°.

Надморска височина е користен фактор скоро во сите анализи за проценка на подложноста кон свлекување. Надморската височина е контролирана од различни геолошки, геоморфолошки и метеоролошки фактори, вклучувајќи, литолошки единици, распаѓање, дејство на ветерот и врнежи (Pourghasemi et al. 2013). Картата на надморска височина (слика 46) е добиена од дигиталниот теренски модел (ДТМ). Надморската височина во подрачјето се движи од 446 – 2749 m, класифицирана во осум класи: 447 – 744 m; 744 – 1031 m; 1031 – 1292 m; 1292 – 1544 m; 1544 – 1786 m; 1786 – 2029 m; 2029 – 2272 m; 2272 – 2749 m.

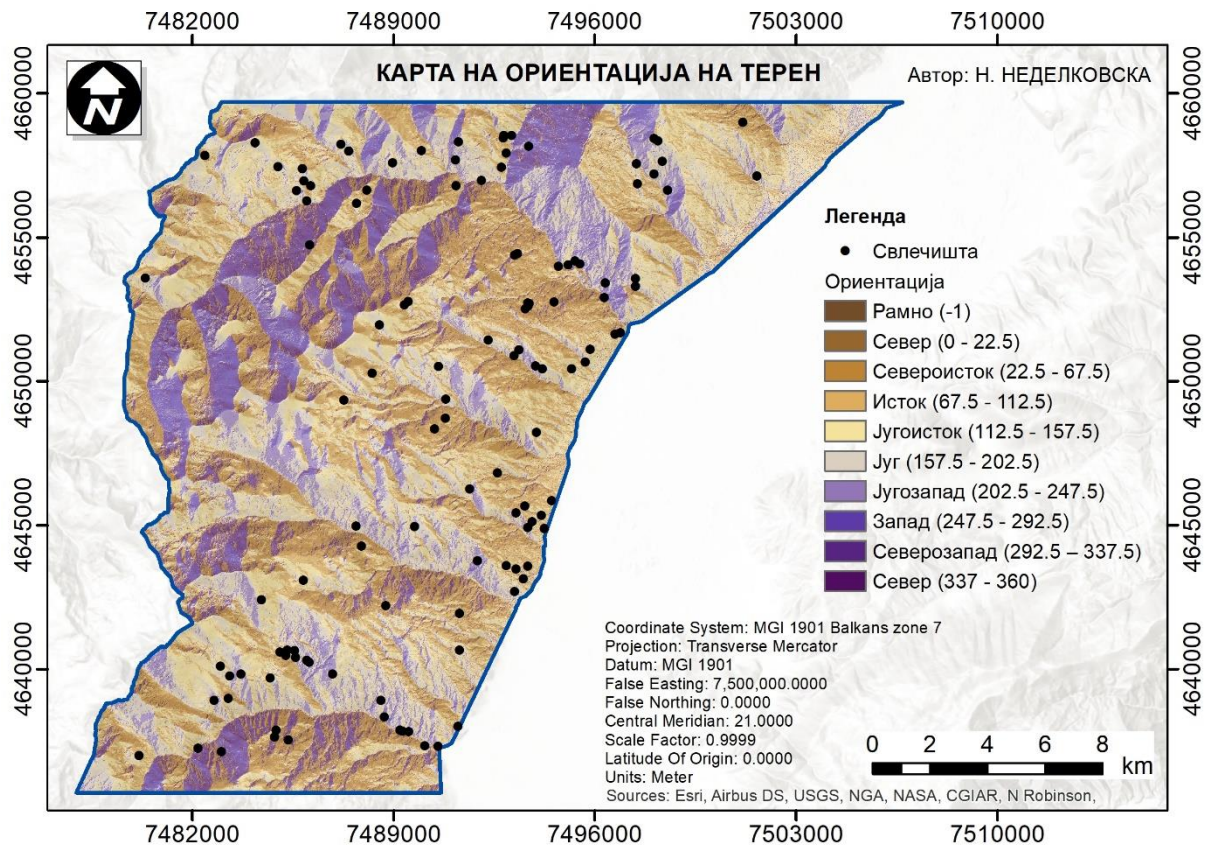


Слика 45 Карта на наклон на терен



Слика 46 Карта на надморска височина

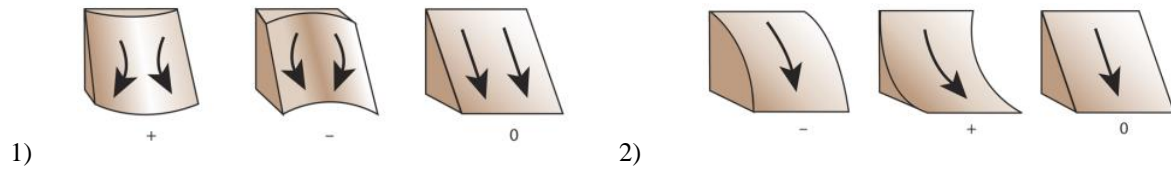
Ориентација како фактор се однесува на ориентацијата на теренот/падината. Всушност овој фактор укажува на изложеноста на косината на сончеви зраци, ветер и врнежи, а кои индиректно влијаат на други фактори кои доведуваат до појава на нестабилности, односно влажноста на средината, покриеноста со вегетација и дебелина на почва (Clerici et al. 2006). Ориентацијата во анализираното подрачје е добиена од дигиталниот теренски модел (ДТМ) и е класифицирана во девет класи, односно: рамно, север, североисток, исток, југоисток, југ, југозапад, запад, северозапад (слика 47).



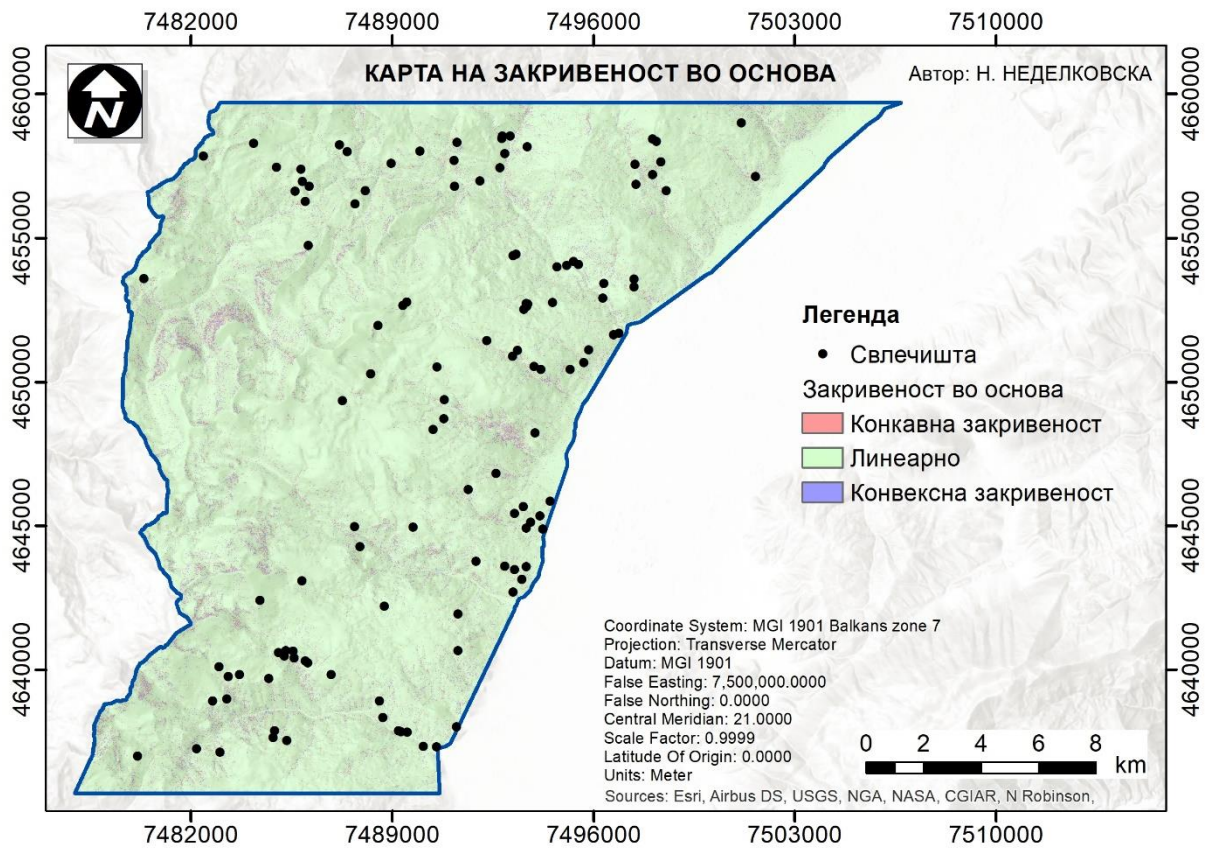
Слика 47 Карта на аспект на теренот

Закривеност во основа и закривеност во профил се топографски фактори кои ги одразуваат геометриските карактеристики на падините. Закривеноста во основа е закривеност на линија формирана од пресекот на замислена хоризонтална рамнина со површината на теренот, а закривеност во профил е закривеност во правец надолно од падината долж линија формирана од пресекот на замислена вертикална рамнина со површината на теренот (Ohlacher 2007). И двата фактори имаат влијание на подложноста кон свлекување, односно закривеноста во профил има влијание на големината на активните и пасивните сили кај свлечиштето во правец на поместувањето, а закривеноста во основа ја контролира конвергенцијата или дивергенцијата на материјалот кој се свлекува и водата, исто во правец на поместувањето. Всушност, кај конвексните површини површинската вода ќе дивергира/истекува, додека кај конкавните површини водата ќе конвергира, односно ќе се собира и ќе влијае на активирањето на свлечишта. Знакот на добиената вредност е клучен за да се дефинира закривеност, која може да биде конкавна, конвексна или линеарна (слика 48).

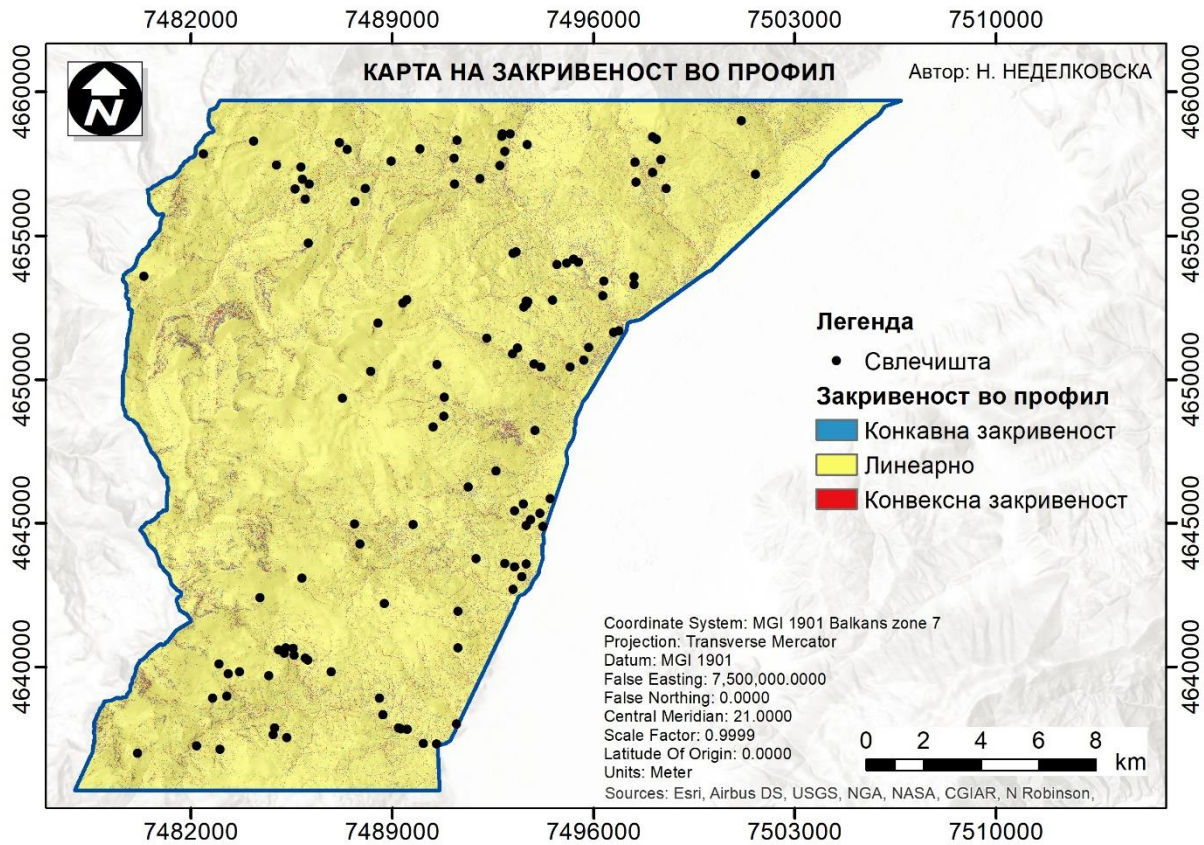
Закривеноста во основа и закривеноста во профил се пресметани во GIS софтвер, со алатката Curvature (Spatial Analyst). На слика 49 и слика 50 се дадени добиените фактор карти за закривеност во основа и закривеност во профил.



Слика 48 1) Закривеност во основа (конвексна “+”, конкавна “-” линеарна “0”)
 2) Закривеност во профил (конвексна “-”, конкавна “+” линеарна “0”)



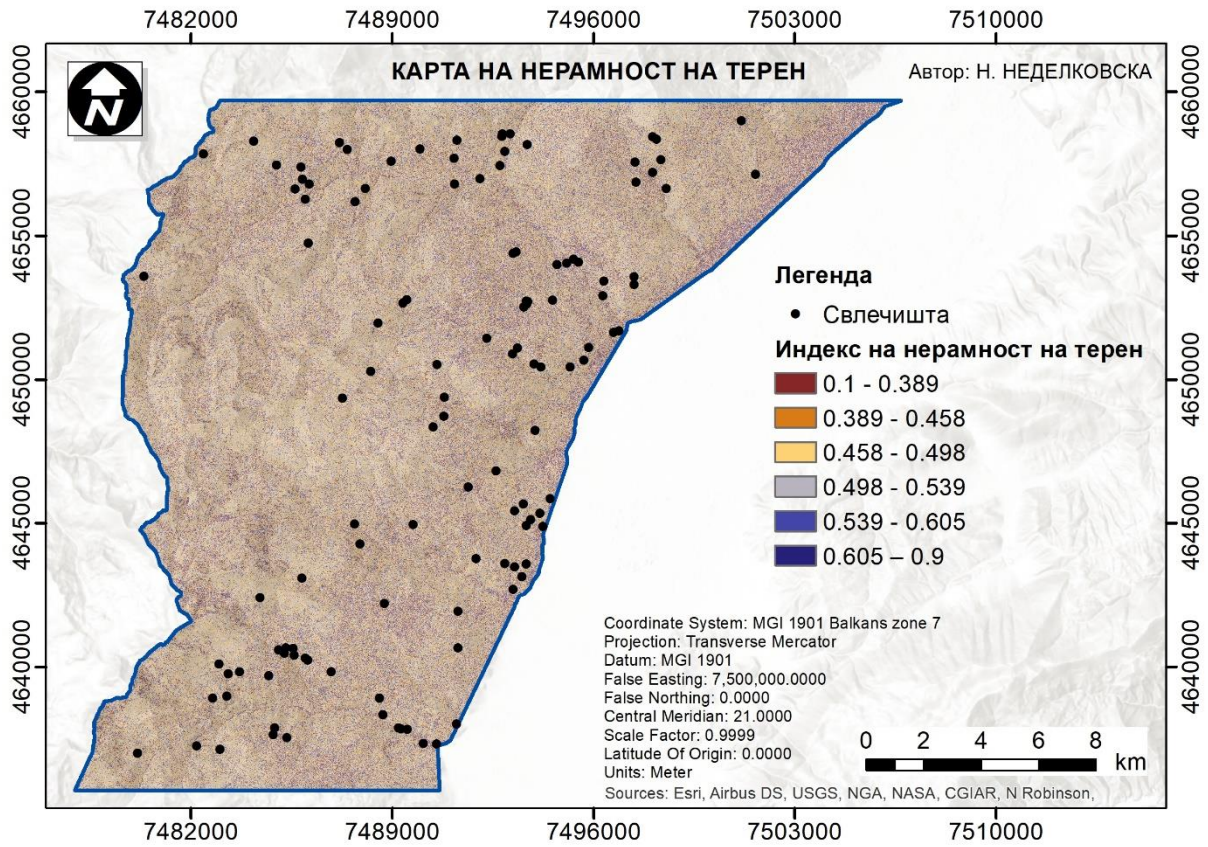
Слика 49 Карта на закривеност во основа



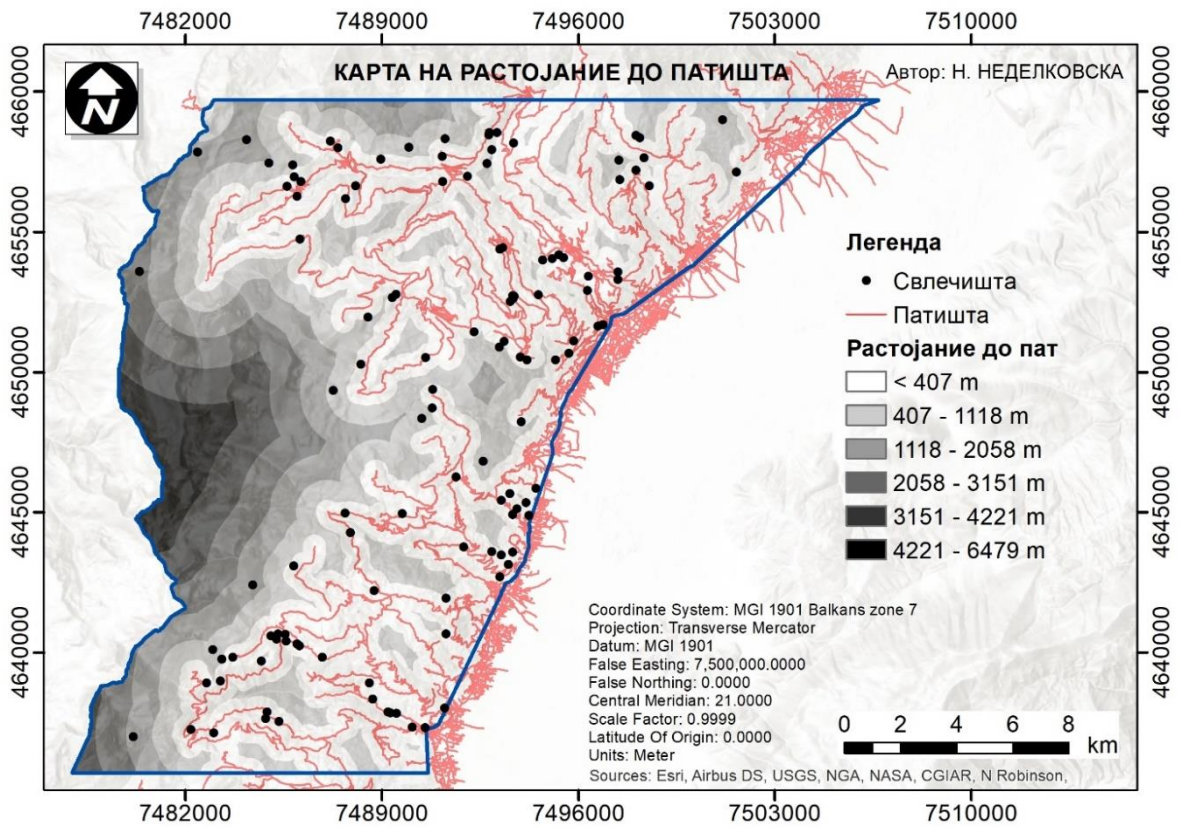
Слика 50 Карта на закривеност во профил

Неравноста на теренот изразена преку индекс на неравност е индикатор за топографијата на теренот. Се однесува на рамноста или брановидноста на теренот, односно варијабилноста на топографската површина на теренот. Топографскиот индекс на неравност (слика 51) е добиен врз основа на дигиталниот теренски модел (ДТМ), се движи од 0.1 до 0.9 и е класифициран во шест класи: 0.1 – 0.389; 0.389 – 0.458; 0.458 – 0.498; 0.498 – 0.539; 0.539 – 0.605; 0.605 – 0.9.

Растојанието до пат може да биде потенцијален индикатор за појава на свлечишта. Изградбата на патишта во планински предели бара преземање на инженерски активности како засекување и ископување, што доведува до промена на иницијалните геолошки услови на теренот, односно се нарушува рамнотежата на природните падини и се создаваат услови за појава на нестабилности. Од катастарската карта на нестабилни појави за анализраното подрачје, се забележува дека голем дел од регистрираните појави се токму во близина на патиштата. Факторот растојание до патиштата е рекласифициран во шест категории (слика 52): < 407 m; 407 – 1118 m; 1118 – 2058 m; 2058 – 3151 m; 3151 – 4221 m; 4221 – 6479 m.



Слика 51 Карта на индекс за нерамност на терен

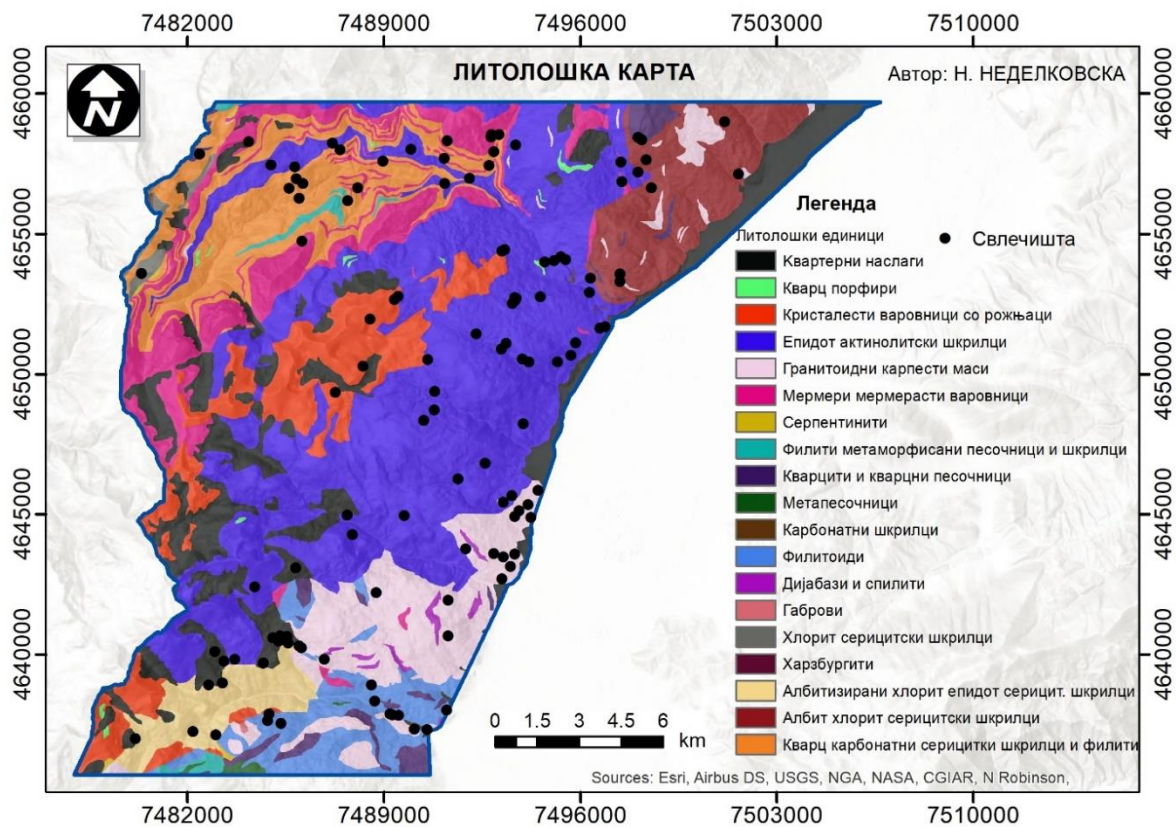


Слика 52 Карта на фактор растојание до патишта

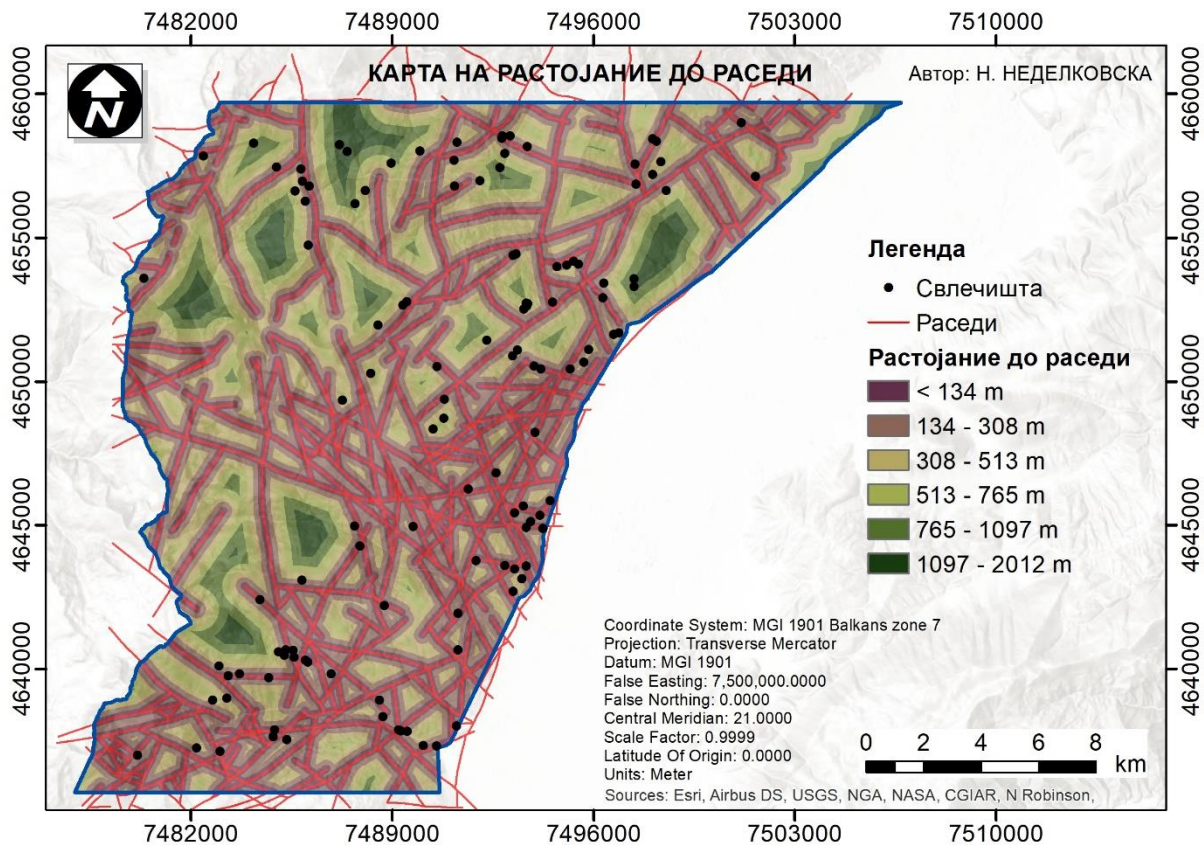
7.2.2 Геолошки фактори

Литологијата игра клучна улога во појавата на свлечишта и е многу важен внатрешен контролирачки фактор, користен во буквално сите правени анализи на подложност кон свлекување. Литолошките единици варираат во однос на физичките и механичките карактеристики, вклучувајќи ги типот, јакоста, степенот на распаднаост, испуканоста, водопрпусноста итн. За предметниот регион во минатото се подготвувани геолошки, хидрогеолошки и инженерскогеолошки карти, во размер од 1:100000 до 1:25000, на кои е претставен литолошкиот состав и тектонските структури на теренот. Деветнаесет литолошки единици се идентификувани на анализираното подрачје, вклучувајќи: епидот актинолитски шкрилци, албит хлорит серицитски шкрилци, кварц карбонатни серицитски шкрилци и филити, гранитоидни карпести маси, мермери и мермерасти варовници, дијабази и спилити, кристалести варовници со рожњаци, филитоиди, кварц порфири, кварцити и кварцни песочници, квартерни наслагы, албитизирани хлорит епидот серицитски шкрилци, габрови, карбонатни шкрилци, метапесочници, серпентинити, филити метаморфисани песочници и шкрилци, харзбургити, хлорит серицитски шкрилци. На слика 53 е дадена подготвената карта.

Растојание до раседи е важен условен фактор во проценка на подложноста кон свлекување. Всушност, присуството на структурни дисконтинуитети како раседи, доведува до појава на пукнатини во околната карпеста маса (намалување на јакоста), што може да предизвика нестабилности. Во одреден опсег, колку локацијата е поблиску до расед, толку е попореметена/раздробена карпата и поголема е веројатноста за лизгање на земјиштето. Геолошката карта во размер 1:100000 за подрачјето е искористена за да се извлечат раседите и да се направи карта на растојание до раседи (слика 54). Овој фактор е класифициран во шест класи: < 134 m; 134 – 308 m; 308 – 513 m; 513 – 765 m; 765 – 1097 m; 1097 – 2012 m.



Слика 53 Карта на литолошки единици



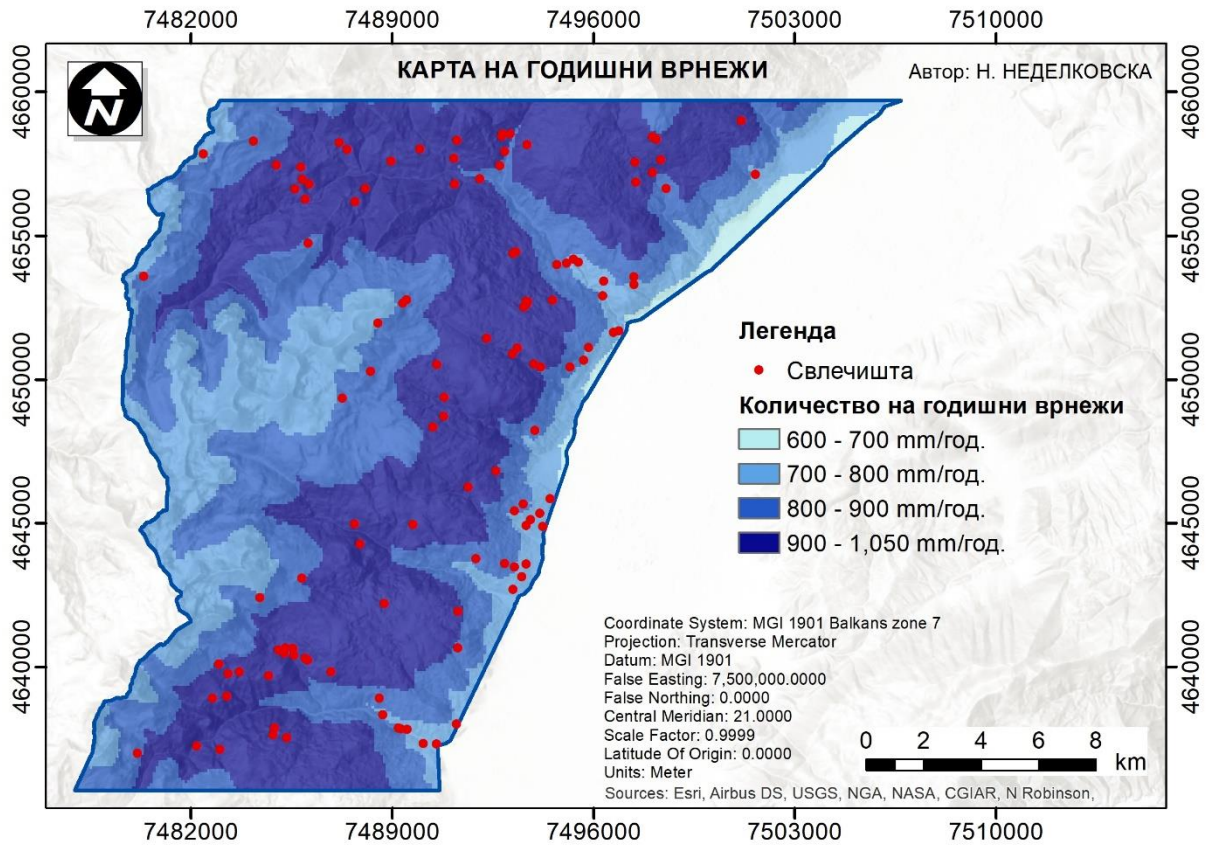
Слика 54 Карта за растојание до раседи

7.2.3 Хидролошки фактори

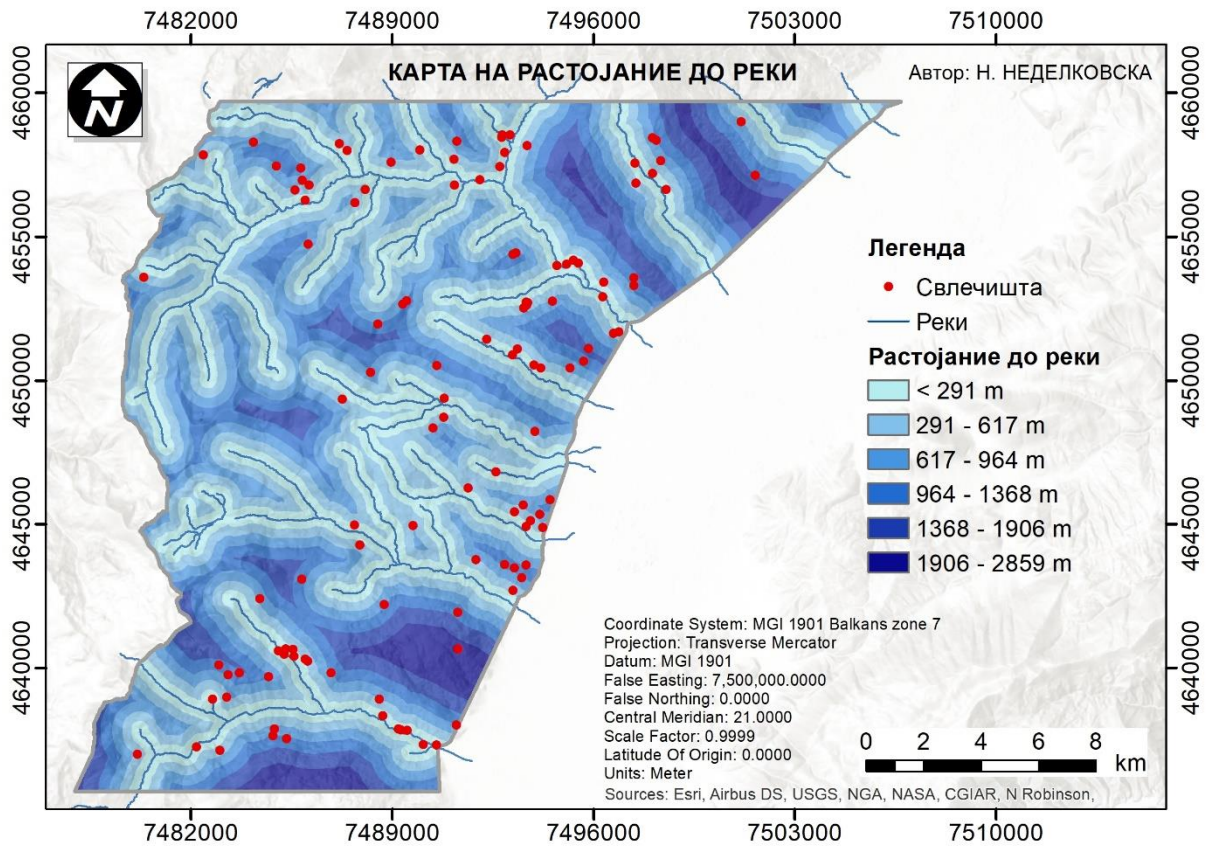
Врнежите влијаат на содржината на вода во подлогата и претставуваат еден од главните фактори кои предизвикуваат свлечишта. Кога врнежите ќе го надминат инфилтрациониот капацитет на подлогата, истата станува заситена со вода, со што се намалува нејзината јакост и станува подложна кон свлекување. Водата од врнежите може да доведе и до зголемување на порниот притисок, на сметка на намалување на ефективните напрегања на средината, па настанува лом. Врнежите исто така влијаат и на процесот на ерозија, што повторно доведува до дестабилизација на падините.

Годишните просечни врнежи во истржаното подрачје варираат од 600 mm/год. па се до повеќе од 1050 mm/год, што е највисок интензитет на врнежи во Македонија. За добар дел од нестабилните појави, потврдено е дека се јавуваат за време на периодите на интензивни или пролонгирани вржени, како и во периодите на топење на снегот. Како основа за подготовка на тематска карта за истражниот простор, послужи картата на врнежи за Р.Македонија која е подготвена за периодот 1961-1996. Картата на просечни годишни врнежи е прикажана на слика 55, на која се издвоени четири зони: 600 – 700; 700 – 800; 800 – 900; 900 – 1050 mm/год.

Растојанието до река влијае на начин што водата ја еродира и заситува ножицата на падината и со тоа негативно влијае на стабилноста, па затоа овој фактор често се вклучува во анализите за проценка на подложноста кон свлекување. Фактор картата за анализираното подрачје (слика 56) е добиена од дигиталниот теренски модел (ДТМ), класифицирана во шест класи: < 291 m; 291 – 617 m; 617 – 964 m; 964 – 1368 m; 1368 – 1906 m; 1906 – 2859 m.



Слика 55 Карта на врнежи

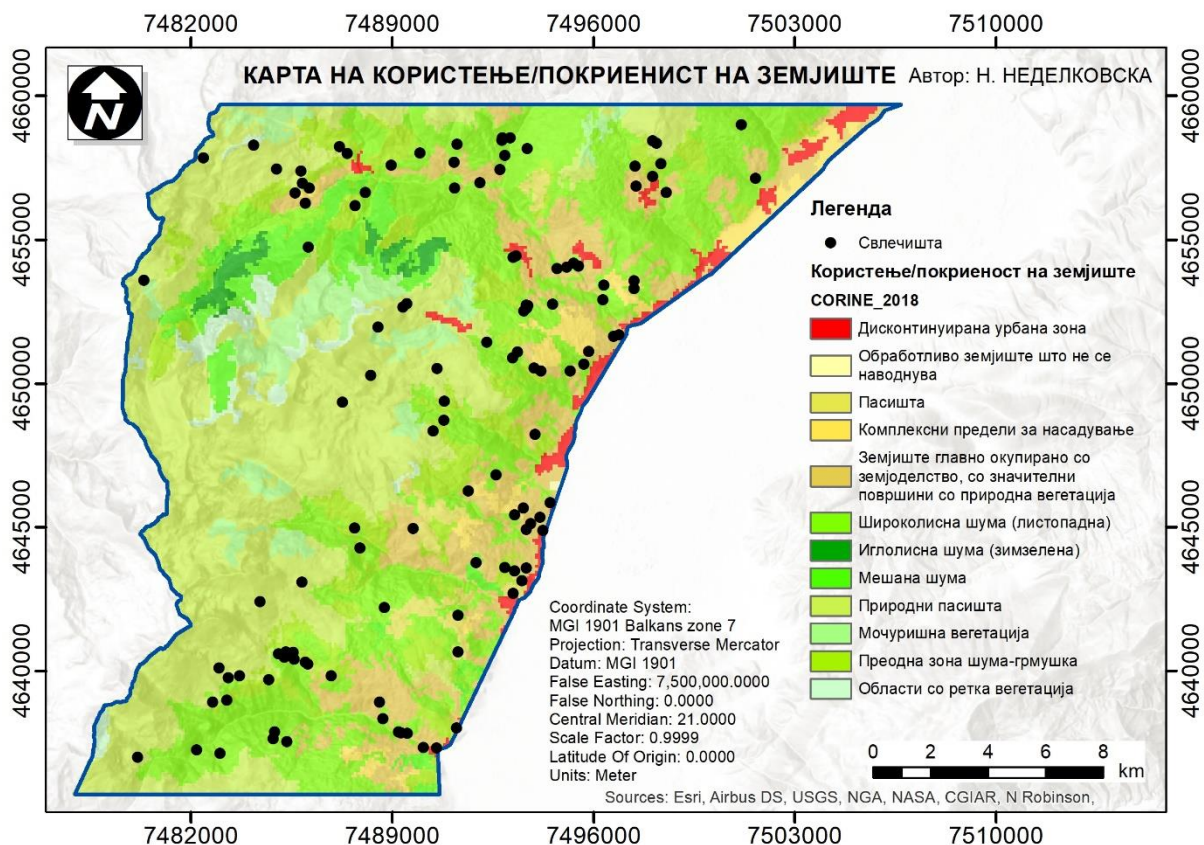


Слика 56 Карта за близина до река

7.2.4 Фактори за користење/покриеност на земјиште

Користење/покриеност на земјиште е уште еден од неколкуте фактори кој е користен скоро во сите анализи за проценка на подложноста кон свлекување. Овој фактор се смета за динамички фактор и се поврзува со човечките активности (Rabby et al. 2022). Различните видови на користење или покриеност на земјиштето имаат и различно влијание на подложноста кон свлекување. На пример, вегетацијата вообичаено ја стабилизира падината, бидејќи корените претставуваат дополнителна кохезија односно дополнително зајакнување на подлогата. Од друга страна, изградбата на инфраструктурни објекти, ги менува иницијалните услови на падините, па согласно на тоа подложноста кон свлекување се зголемува.

За анализираното подрачје податоците за земјишниот покривач се извлечени од картата Corine Land Cover (CLC) дистрибуирана од Европската агенција за животна средина (European Environment Agency) како дел од Коперник службата за мониторинг на земјиште (Copernicus Land Monitoring Service) од 2018 година (CLC 2018). Третото ниво на класификацијата CLC беше искористено како референца во оваа работа, и притоа издвоени се вкупно дванаесет класи на земјишна покривка: широколисна шума (листопадна); комплексни предели за насадување; иглолисна шума (зимзелена); дисконтинуирана урбана зона; земјиште главно окупирано со земјоделство, со значителни површини со природна вегетација; мешана шума; мочуришна вегетација; природни пасишта; обработливо земјиште што не се наводнува; пасишта; области со ретка вегетација; преодна зона шума-грмушка (слика 57).



Слика 57 Карта на користење/покриеност на земјиштето

Во табела 12 е даден сумарен преглед на факторите, изворот од каде се преземени/добиеени/пресметани усвоените фактори, дефинираните класи и методот според кој класите се дефинирани.

Табела 12 Преглед на фактори за анализа на подложност кон свлекување

ФАКТОР	ИЗВОР	КЛАСИ	МЕТОД НА ПОДЕЛБА
Наклон [°]	ДТМ	1. (0 – 5); 2. (5 – 10); 3. (10 – 15); 4. (15 – 20); 5. (20 – 25); 6. (25 – 30); 7. (30 – 35); 8. (35 – 40); 9. (> 40);	Искусствено дефиниран
Надморска височина [m]	ДТМ	1. (447 – 744); 2. (744 – 1031); 3. (1031 – 1292); 4. (1292 – 1544); 5. (1544 – 1786); 6. (1786 – 2029); 7. (2029 – 2272); 8. (2272 – 2749).	Природна поделба (ArcGIS 10.8.1)
Ориентација	ДТМ	1. (Рамно); 2. (Север); 3. (Североисток); 4. (Исток); 5. (Југоисток); 6. (Југ); 7. (Југозапад); 8. (Запад); 9. (Северозапад).	/
Закривеност во основа	ДТМ	1. Линеарна; 2. Конкавна; 3. Конвексна.	/
Закривеност во профил	ДТМ	1. Линеарна; 2. Конкавна; 3. Конвексна.	/
Нерамност на терен	ДТМ	1. 0.1 – 0.389; 2. 0.389 – 0.458; 3. 0.458 – 0.498; 4. 0.498 – 0.539; 5. 0.539 – 0.605; 6. 0.605 – 0.9.	Природна поделба (ArcGIS 10.8.1)
Растојание до пат [m]	ДТМ	1. < 407; 2. 407 – 1118; 3. 1118 – 2058; 4. 2058 – 3151; 5. 3151 – 4221; 6. 4221 – 6479.	Природна поделба (ArcGIS 10.8.1)
Литологија	Основна геолошка карта 1:100000	1. Квартерни наслаги; 2. Албит хлорит серицитски шкрилци; 3. Албитизирани хлорит епидот серицитски шкрилци; 4. Габрови; 5. Гранитоидни карпести маси; 6. Дијабази и спилити; 7. Епидот актинолитски шкрилци; 8. Карбонатни шкрилци; 9. Кварц карбонатни серицитски шкрилци и филити; 10. Кварц порфири; 11. Кварцити и кварцни песочници; 12. Кристалести варовници со рожњаци; 13. Мермери мермерести варовници; 14. Метапесочници; 15. Серпентинити; 16. Филити, метаморфисани песочници и шкрилци; 17. Филитоиди; 18. Харзбургити; 19. Хлорит серицитски шкрилци.	Геолошка карта
Растојание до раседи [m]		1. < 134; 2. 134 – 308; 3. 308 – 513; 4. 513 – 765; 5. 765 – 1097; 6. 1097 – 2012.	Природна поделба (ArcGIS 10.8.1)
Врнежи [mm/год.]	Карта на врнежи 1:100000	1. 600 – 700; 2. 700 – 800; 3. 800 – 900; 4. 900 – 1050.	Карта на врнежи
Растојание до река [m]	ДТМ	1. < 291; 2. 291 – 617; 3. 617 – 964; 4. 964 – 1368; 5. 1368 – 1906; 6. 1906 – 2859.	Природна поделба (ArcGIS 10.8.1)

ФАКТОР	ИЗВОР	КЛАСИ	МЕТОД НА ПОДЕЛБА
Користење/ покриеност на земјиште	CLC 2018	<ol style="list-style-type: none"> 1. Широколисна шума (листопадна); 2. Комплексни предели за насадување; 3. Иглолисна шума (зимзелена); 4. Дисконтинуирана урбана зона; 5. Земјиште главно окупирано со земјоделство, со значителни површини со природна вегетација; 6. Мешана шума; 7. Мочуришна вегетација; 8. Природни пасишта; 9. Обработливо земјиште што не се наводнува; 10. Пасишта; 11. Области со ретка вегетација; 12. Преодна зона шума-грмушка. 	Corine Land Cover 2018 (CLC 2018)

7.3 Проценка на подложност кон свлекување

Подложност кон свлекување е веројатноста за појава на свлечишта во дадена област врз основа на локалните услови на теренот (Brabb, 1984).

Квантитативните методи за проценка на подложноста кон свлекување се засноваат на одредување на зависноста помеѓу секој влијателен фактор и распределбата на минатите свлечишта.

Методот “Фреквенционен однос” предложен од Lee & Talib (2005) е квантитативен метод кој се користи за статистичка анализа на свлечишта. Овој метод се заснова на однос помеѓу распределбата на свлечиштата и секој фактор поврзан со појавата на свлечишта, односно:

$$FR_{ij} = \frac{N_{ij} / N_{total}}{A_{ij} / A_{total}}$$

каде: N_{ij} е број на свлечишта во класа j од фактор i , N_{total} е вкупен број на свлечишта, A_{ij} е површина на класа j од фактор i во анализираното подрачје и A_{total} е вкупна површина на анализираното подрачје.

Методот “Фреквенционен однос”, исто така, го претставува принципот на условна веројатност, каде што колку е поголем односот, толку е посилен врска помеѓу свлечиштата и класите на влијателниот фактор, и обратно. Всушност, “Фреквенционен однос” со вредност поголема од 1 укажува на силна врска помеѓу појавата на свлечишта и класата, помала вредност од 1 укажува на слаба врска, и доколку фреквенциониот однос е 1 корелацијата е просечна (Lee & Sambath 2006).

Во табела 13 се дадени добиените резултати од направената анализа.

Табела 13 Анализа на врска помеѓу избрани влијателни фактори и случени свлечишта со примена на методот “фреквенционен однос”

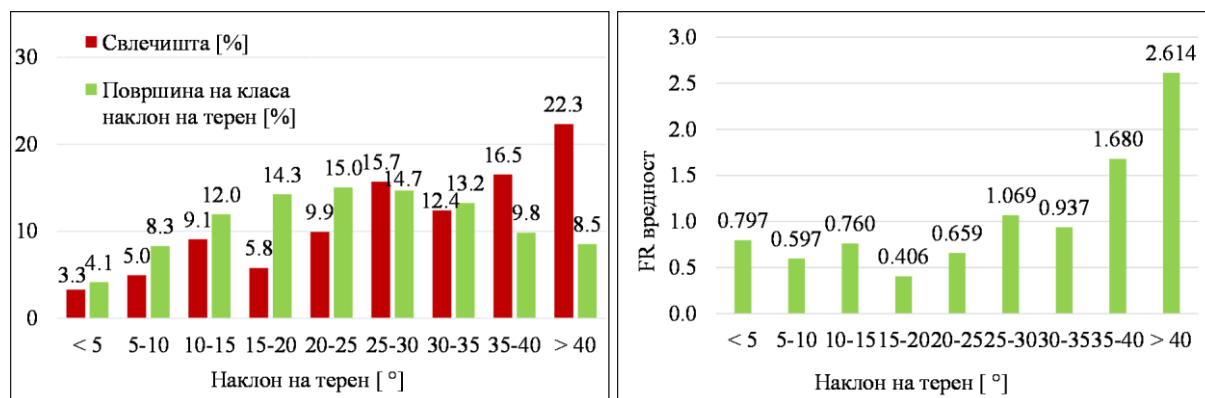
ФАКТОР i	КЛАСА j	БРОЈ НА СВЛЕЧИШТА (N_{ij})	ПРОЦЕНТ НА СВЛЕЧИШТА	ПОВРШИНА НА КЛАСА (A_{ij})	ПРОЦЕНТ НА ПОВРШИНА НА КЛАСА	ФРЕКВЕНЦИОНЕН ОДНОС FR_{ij}
Наклон [°]	1. < 5	4	3.31	15.99	4.15	0.797
	2. 5 - 10	6	4.96	31.98	8.30	0.597
	3. 10 - 15	11	9.09	46.07	11.96	0.760
	4. 15 - 20	7	5.79	54.92	14.25	0.406
	5. 20 - 25	12	9.92	57.98	15.05	0.659
	6. 25 - 30	19	15.70	56.58	14.68	1.069
	7. 30 - 35	15	12.40	51	13.24	0.937
	8. 35 - 40	20	16.53	37.92	9.84	1.680
	9. > 40	27	22.31	32.89	8.54	2.614
Надморска височина [m]	1. 447 - 744	25	20.66	36.41	9.45	2.187
	2. 744 - 1031	19	15.70	44.46	11.54	1.361
	3. 1031 - 1292	22	18.18	53.06	13.77	1.320
	4. 1292 - 1544	32	26.45	58.69	15.23	1.736
	5. 1544 - 1786	8	6.61	60.8	15.78	0.419
	6. 1786 - 2029	6	4.96	49.94	12.96	0.383
	7. 2029 - 2272	8	6.61	48.07	12.48	0.530
	8. 2272 - 2749	1	0.83	33.9	8.80	0.094
Ориентација	1. Рамно (-1)	0	0.00	0.12	0.03	0.000
	2. Север (0 - 22.5; 337.5 - 360)	5	4.13	35.17	9.13	0.453
	3. Североисток (22.5 - 67.5)	12	9.92	55.64	14.44	0.687
	4. Исток (67.5 - 112.5)	22	18.18	74.55	19.35	0.940
	5. Југоисток (112.5 - 157.5)	23	19.01	80.91	21.00	0.905
	6. Југ (157.5 - 202.5)	42	34.71	61.09	15.85	2.189
	7. Југозапад (202.5 - 247.5)	14	11.57	33.44	8.68	1.333
	8. Запад (247.5 - 292.5)	0	0.00	20.25	5.26	0.000
	9. Северозапад (292.5 - 337.5)	3	2.48	24.16	6.27	0.395
Закривеност во основа	1. Конкавна	8	6.61	12.97	3.37	1.964
	2. Линеарна	103	85.12	360.57	93.57	0.910
	3. Конвексна	10	8.26	11.79	3.06	2.701
Закривеност во профил	1. Конвексна	16	13.22	14.99	3.89	3.399
	2. Линеарна	95	78.51	355.9	92.36	0.850
	3. Конкавна	10	8.26	14.44	3.75	2.205
Нерамност на терен	1. 0.1 - 0.389	3	2.48	9.93	2.58	0.962
	2. 0.389 - 0.458	13	10.74	47.35	12.29	0.874
	3. 0.458 - 0.498	46	38.02	126.18	32.75	1.161
	4. 0.498 - 0.539	34	28.10	140.08	36.35	0.773
	5. 0.539 - 0.605	22	18.18	51.04	13.25	1.373

ФАКТОР i	КЛАСА j	БРОЈ НА СВЈЕЧИШТА (N_{ij})	ПРОЦЕНТ НА СВЈЕЧИШТА	ПОВРШИНА НА КЛАСА (A_{ij})	ПРОЦЕНТ НА ПОВРШИНА НА КЛАСА	ФРЕКВЕНЦИОНЕН ОДНОС FR_{ij}
	6. 0.605 – 0.9	3	2.48	10.75	2.79	0.889
Растојание до пат [m]	1. < 407	101	83.47	215.05	55.81	1.496
	2. 407 - 1118	15	12.40	74.97	19.46	0.637
	3. 1118 - 2058	4	3.31	39.25	10.19	0.325
	4. 2058 - 3151	1	0.83	25.91	6.72	0.123
	5. 3151 - 4221	0	0.00	18.06	4.69	0.000
	6. 4221 - 6479	0	0.00	12.09	3.14	0.000
Литологија	1. Квартерни наслаги	11	9.09	45.58	11.83	0.769
	2. Албит хлорит серицитски шкрилци	5	4.13	24.6	6.38	0.647
	3. Албитизирани хлорит епидот серицитски шкрилци	4	3.31	12.33	3.20	1.033
	4. Габрови	0	0.00	0.1	0.03	0.000
	5. Гранитоидни карпести маси	20	16.53	34.25	8.89	1.860
	6. Дијабази и спилити	0	0.00	1.49	0.39	0.000
	7. Епидот актинолитски шкрилци	45	37.19	135.88	35.26	1.055
	8. Карбонатни шкрилци	0	0.00	0.14	0.04	0.000
	9. Кварц карбонатни серицитски шкрилци и филити	9	7.44	35.27	9.15	0.813
	10. Кварц порфири	0	0.00	0.82	0.21	0.000
	11. Кварцити и кварцни песочници	3	2.48	6.81	1.77	1.403
	12. Кристалести варовници со рожњаци	6	4.96	31.82	8.26	0.600
	13. Мермери мермерасти варовници	8	6.61	34.02	8.83	0.749
	14. Метапесочници	0	0.00	0.74	0.19	0.000
	15. Серпентинити	0	0.00	0.39	0.10	0.000
	16. Филити, метаморфисани песочници и шкрилци	0	0.00	2.42	0.63	0.000
	17. Филитоиди	9	7.44	16.64	4.32	1.722
	18. Харзбургити	0	0.00	0.04	0.01	0.000
	19. Хлорит серицитски шкрилци	1	0.83	1.99	0.52	1.600
Растојание до расед [m]	1. < 134	52	42.98	131.88	34.23	1.256
	2. 134 - 308	32	26.45	109.61	28.45	0.930
	3. 308 - 513	23	19.01	69.54	18.05	1.053
	4. 513 - 765	7	5.79	40.75	10.58	0.547
	5. 765 - 1097	5	4.13	22.94	5.95	0.694
	6. 1097 - 2012	2	1.65	10.61	2.75	0.600
Врнежи [mm/год.]	1. 600 – 700	0	0.00	5.88	1.53	0.000
	2. 700 – 800	25	20.66	74.23	19.26	1.073
	3. 800 – 900	25	20.66	123.84	32.14	0.643

ФАКТОР i	КЛАСА j	БРОЈ НА СВЛЕЧИШТА (N_{ij})	ПРОЦЕНТ НА СВЛЕЧИШТА	ПОВРШИНА НА КЛАСА (A_{ij})	ПРОЦЕНТ НА ПОВРШИНА НА КЛАСА	ФРЕКВЕНЦИОНЕН ОДНОС FR_{ij}
	4. 900 – 1050	71	58.68	181.38	47.07	1.247
Растојание до река [m]	1. < 291	38	31.40	107.56	27.91	1.125
	2. 291 - 617	36	29.75	100.74	26.14	1.138
	3. 617 - 964	26	21.49	79.47	20.62	1.042
	4. 964 - 1368	18	14.88	52.7	13.68	1.088
	5. 1368 - 1906	2	1.65	31.04	8.06	0.205
	6. 1906 - 2859	1	0.83	13.82	3.59	0.230
Користење/покриеност на земјиште	1. Широколисна шума (листопадна)	47	38.84	106.47	27.63	1.406
	2. Комплексни предели за насадување	5	4.13	10	2.60	1.592
	3. Иглолисна шума (зимзелена)	0	0.00	4.43	1.15	0.000
	4. Дисконтинуирана урбана зона	3	2.48	7.87	2.04	1.214
	5. Земјиште главно окупирано со земјоделство, со значителни површини со природна вегетација	24	19.83	45.63	11.84	1.675
	6. Мешана шума	2	1.65	15.5	4.02	0.411
	7. Мочуришна вегетација	1	0.83	19.04	4.94	0.167
	8. Природни пасишта	19	15.70	128.49	33.35	0.471
	9. Обработливо земјиште што не се наводнува	0	0.00	0.19	0.05	0.000
	10. Пасишта	2	1.65	5.33	1.38	1.195
	11. Области со ретка вегетација	0	0.00	7.27	1.89	0.000
	12. Преодна зона шума-грмушка	18	14.88	35.11	9.11	1.633

Во продолжение е даден графички преглед на анализираните фактори по класи, како и добиените FR вредности.

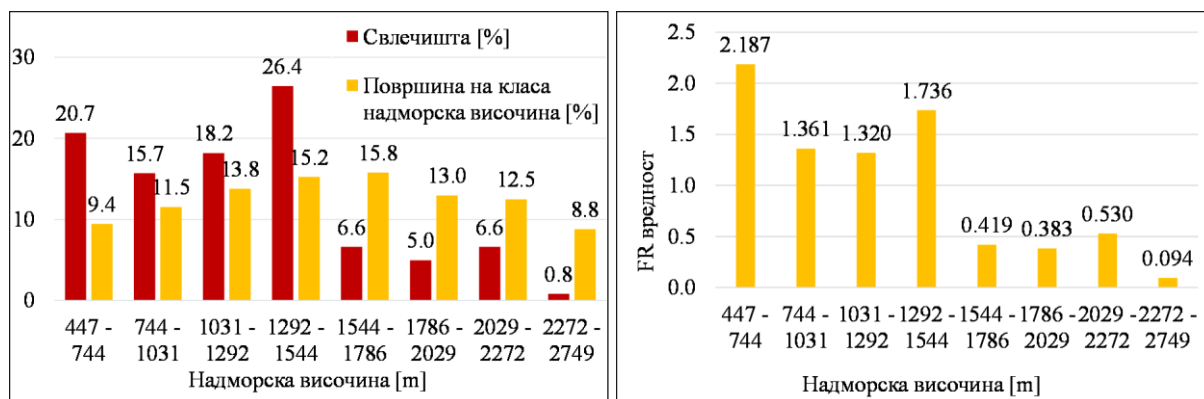
- Наклон на терен



Слика 58 Статистичка обработка на резултати за фактор “наклон на терен”

Генерално, може да се заклучи дека со зголемување на наклонот, се зголемува и веројатноста за појава на свлечишта. Во конкретниов случај, за вредности на наклон на терен класифицирани во класи <math> < 5^\circ </math>, $5-10^\circ$, $10-15^\circ$, $15-20^\circ$ и $20-25^\circ$ добиена е слаба врска со појавата на свлечишта, односно FR вредности помали од 1. За наклон на терен од $25-30^\circ$ и $30-35^\circ$ добиена е просечна корелација со појавата на свлечишта, односно FR вредности околу 1. За наклон на терен од $35-40^\circ$ и $>40^\circ$ добиена е силна корелација со појавата на свлечишта, или FR вредности од 1.680 и 2.614, соодветно.

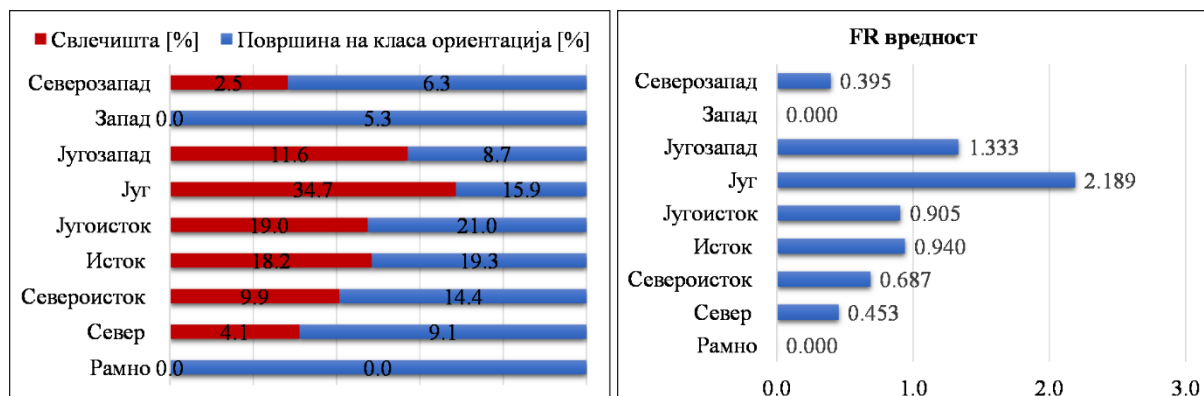
- Надморска височина



Слика 59 Статистичка обработка на резултати за фактор “надморска височина”

Факторот надморска височина нема некаков правилен тренд на зависност со дистрибуцијата на свлечишта. Поголема дистрибуција на свлечишта се забележува кај класите: 447-744 m, 744-1031 m, 1031-1292 m и 1292-1544 m, каде и FR вредностите се поголеми од 1 и укажуваат на силна корелација. За останатите класи кои покриваат надморска височина од 1544 m па се до 2749 m, FR вредностите се помали од 1, односно постои слаба корелација на овој дијапазон вредности за надморската височина со појавата на свлечишта.

- Ориентација

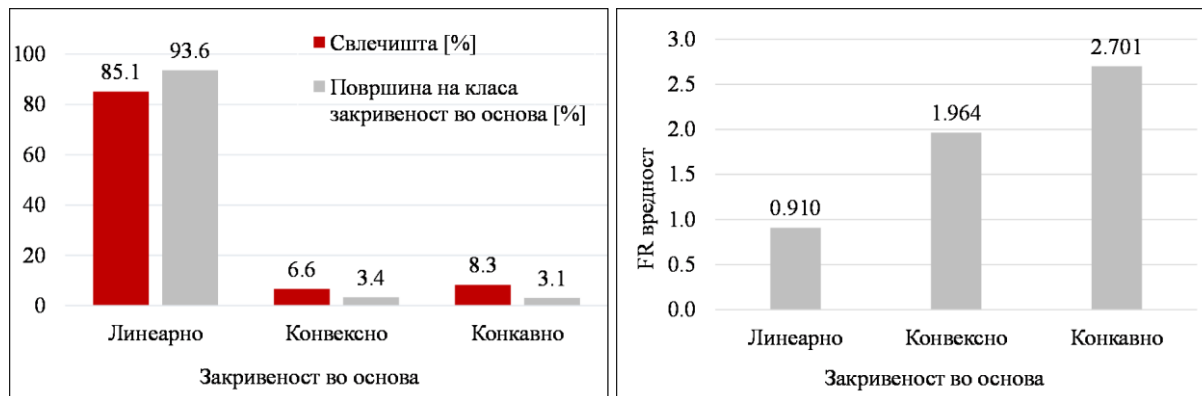


Слика 60 Статистичка обработка на резултати за фактор “ориентација”

Анализата на факторот ”ориентација” покажува дека бројот на свлечишта е највисок за падини со ориентација кон “југ” (34.7 %), за што и FR вредноста е највисока (2.189). Потоа следи ориентација југозапад со FR вредност од 1.333. Прогресот продолжува за ориентација кон југоисток и југ (19 % и 18.2 %) со FR вредност околу 1, односно 0.905 и 0.940, што укажува на просечна врска помеѓу овие класи и појавата на свлечишта. За останатите класи, добиени се FR вредности помали од 1.

Генералниот заклучок е дека на сончевите падини (падини подолго изложени на сонце) сончевото осветлување е многу подлого во споредба со падините во сенка, што придонесува за поголема температурна разлика помеѓу денот и ноќта како и побрз циклус на влажнење-сушење кај сончевите падини во однос на падините во сенка. Во овој случај, распаѓањето на карпестата маса на сончева падина е поинтензивно во споредба со падините во сенка, заради што се намалува јакоста на карпестата маса и се зголемува веројатноста за активирање на свлечишта.

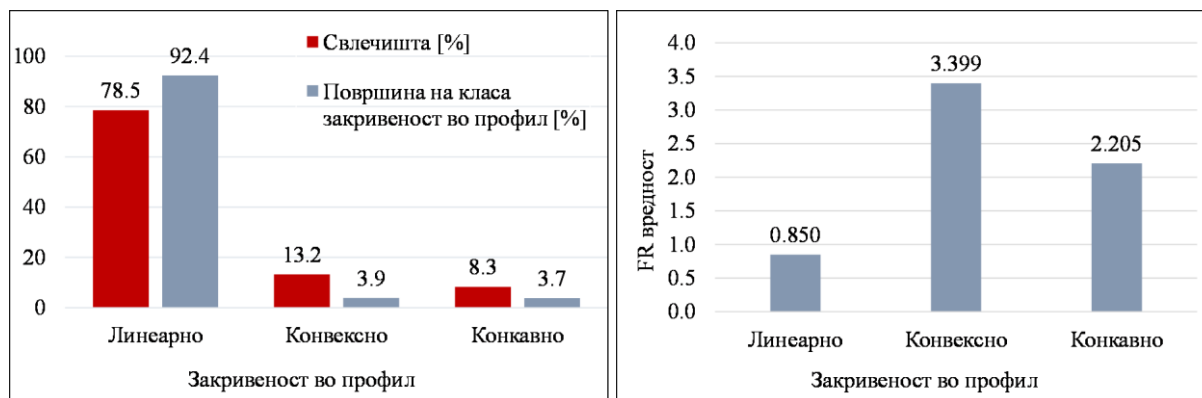
- Закривеност во основа



Слика 61 Статистичка обработка на резултати за фактор “закривеност во основа”

Најмногу свлечишта (85.1 %), но и многу голема површина (93.6 %) опфаќа класата “линеарна” во однос на класите “конкавна” и “конвексна” закривеност. Иако процентот на свлечишта е мал за класите “конкавна” и “конвексна” закривеност, сепак истите се дистрибуирани на многу мал дел од површината на целото анализирано подрачје. Согласно на ова, се заклучува дека конкавните површини имаат најголем придонес кон појавата на свлечишта (FR=2.701), што го потврдува ставот дека кај овие зони водата ќе конвергира, односно ќе се собира и ќе влијае на активирањето на свлечишта. После тоа се конвексните површини со помал придонес кон појава на свлечишта (FR=1.964) во однос на конкавните површини, затоа што кај овие зони водата ќе дивергира/истекува. За класа “линеарна” добиена е FR вредност пониска од 1, што покажува на постоење на слаба врска на оваа класа со појавата на свлечиштата. Иако овој заклучок е спротивност на фактот дека кај оваа класа дистрибуцијата на свлечишта е најголема, треба да се има во предвид дека свлекувањето е резултат на збирно влијание од повеќе фактори, па многу веројатно е дека придонесот на некои од останатите фактори кај површините покриени со оваа класа е многу поголемо.

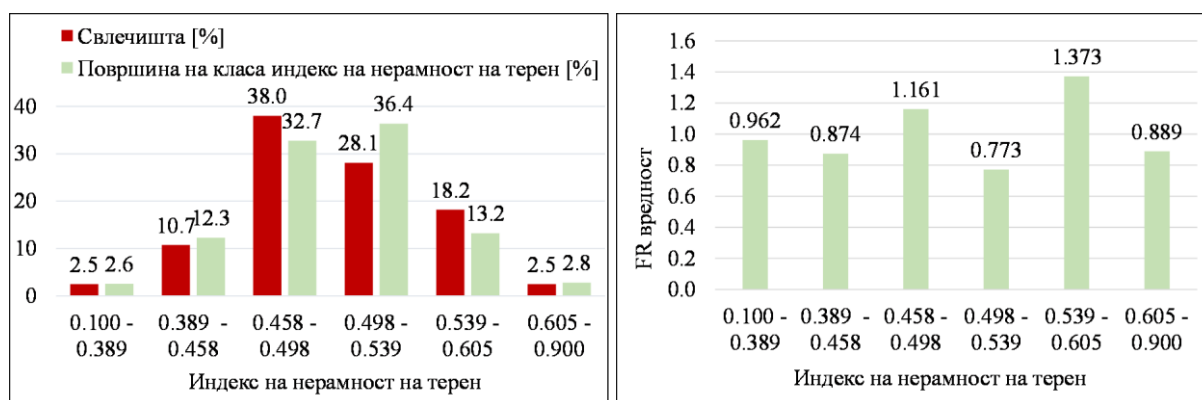
- Закривеност во профил



Слика 62 Статистичка обработка на резултати за фактор “закривеност во профил”

Слично како кај факторот “закривеност во основа” и овде, најмногу свлечишта (78.5 %), но и многу голема површина (92.4 %) опфаќа класата “линеарна” во однос на класите “конкавна” и “конвексна” закривеност. Иако процентот на свлечишта е мал за класите “конкавна” и “конвексна” закривеност, сепак истите се дистрибуирани на многу мал дел од површината на целото анализирано подрачје. Согласно на ова, се заклучува дека конвексните површини имаат најголем придонес кон појавата на свлечишта (FR=3.399), после што следуваат конкавните површини со помал придонес кон појава на свлечишта (FR=2.205). Доколку се анализира стабилноста на конкавна и конвексна падина, веројатноста за лом на конвексната падина ќе биде поголема поради поголемиот волумен на потенцијалната маса за свлекување. За класа “линеарна” добиена е FR вредност пониска од 1, што покажува на постоење на слаба врска на оваа класа со појавата на свлечиштата.

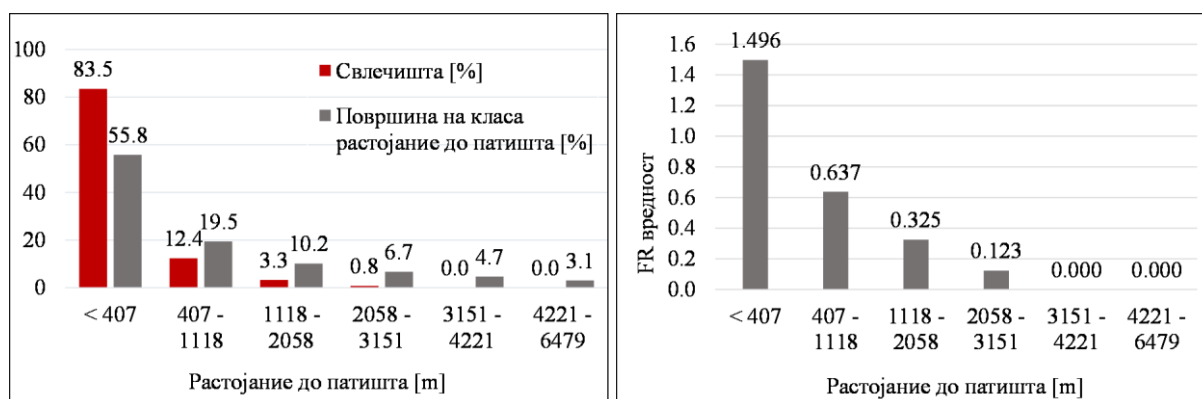
- Нерамност на терен



Слика 63 Статистичка обработка на резултати за фактор “нерамност на терен”

Факторот нерамност на топографската површина, изразен преку индекс на нерамност на терен нема правилен тренд на зависност со дистрибуцијата на свлечишта. Силна врска на овој фактор со појавата на свлечишта има за класите 0.458-0.498 m и 0.539-0.605 m, односно FR вредности од 1.161 и 1.373 соодветно. За сите останати класи FR вредностите се помали од 1, односно постои слаба корелација на индексот на нерамност со појавата на свлечишта.

- Растојание до патишта

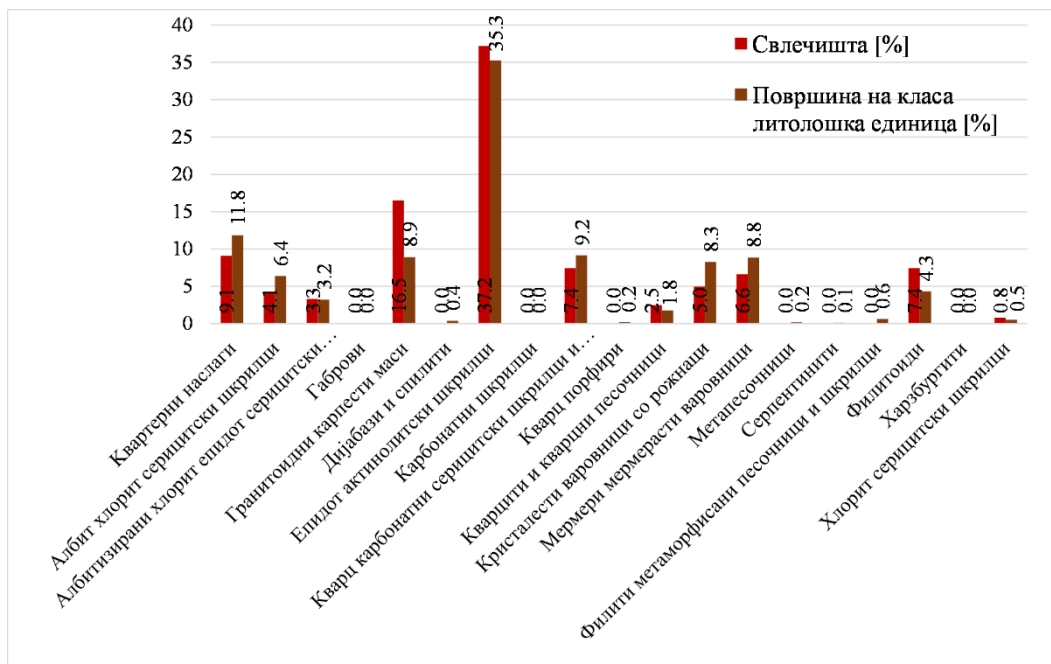


Слика 64 Статистичка обработка на резултати за фактор “растојание до патишта”

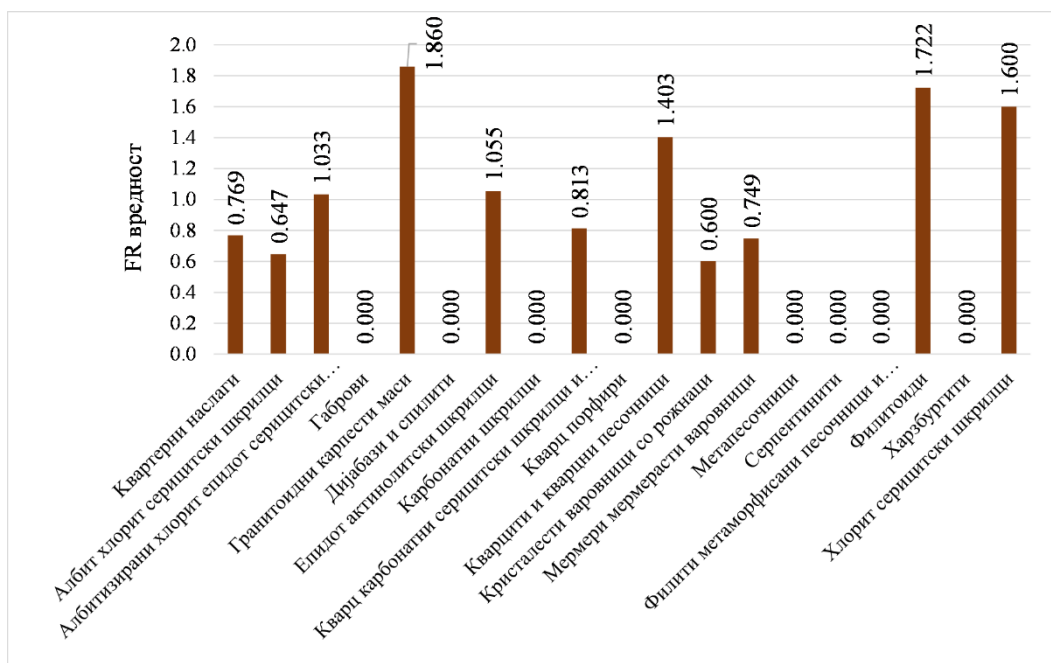
83.5 % од свлечиштата се во класата со најблиско растојание до патишта (< 407 m). Познато е дека човечката активност е најизразена во близина на патиштата, во споредба

со внатрешноста на планинските предели. FR вредноста за оваа класа е највисока (1.494) и единствено оваа класа укажува на силна врска со појавата на свлечишта. За останатите класи FR вредноста е помала 1. За овој фактор потврдена е обратно пропорционалната зависност помеѓу појавата на свлечишта и оддалеченоста од патишта: на поголема оддалеченост од патишта - помалку свлечишта.

- Литологија



Слика 65 Статистичка обработка на резултати за фактор “литологија”

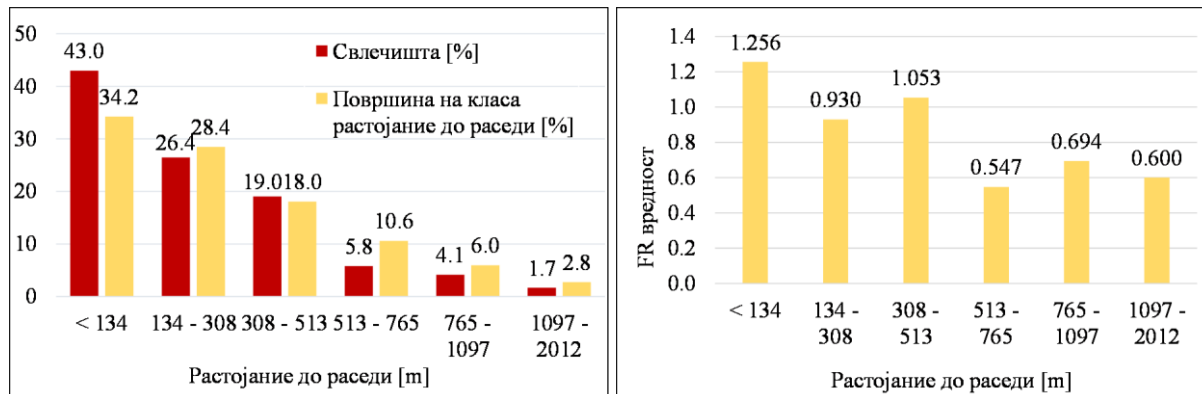


Слика 66 Статистичка обработка на резултати за фактор “литологија”

Од добиените резултати за факторот “литологија” се воочува дека FR вредности поголеми од 1 се добиени за следните литолошки единици: Албитизирани хлорит епидот

серицитски шкрилци; Епидот актинолитски шкрилци; Хлорит серицитски шкрилци; Филитоиди; Гранитоидни карпести маси; и Кварцити и кварцни песочници. За останатите литолошки единици добиени се FR вредности пониски од 1.

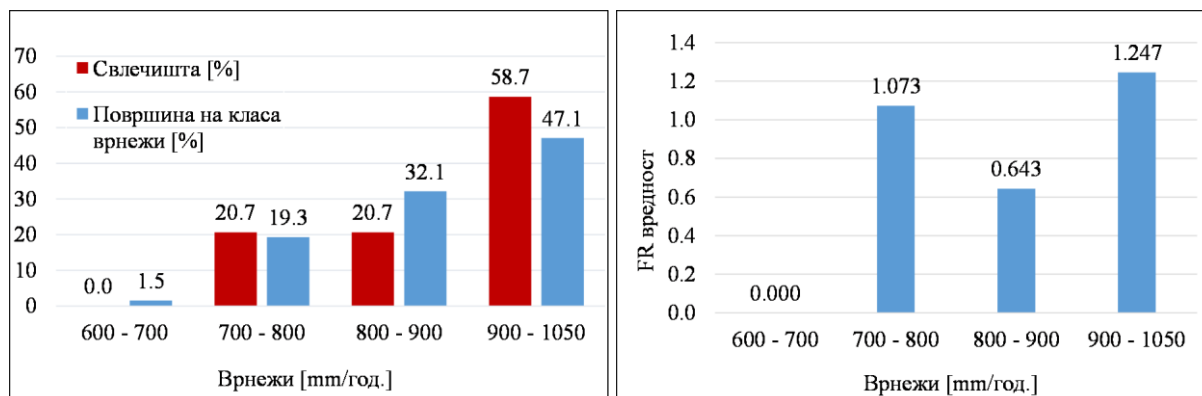
- Растојание до раседи



Слика 67 Статистичка обработка на резултати за фактор “растојание до раседи”

Зависноста помеѓу појавата на свљечишта и растојанието до раседи, е со ист тренд како за факторот “растојание до патишта”. Односно, со оддалечување од зоната на раседите се намалува бројот на свљечишта. Силна врска на појавата свљечишта со овој фактор е добиена за класа < 134 m, односно $FR=1.256$. Просечна врска, односно FR вредност околу 1, е добиена за класите 134 – 308 m и 308 – 513 m. За останатите класи е добиена слаба врска помеѓу растојанието до расед и појвата на свљечишта, односно FR вредности помали од 1. Всушност постоењето на раседи доведува до појава на пукнатини во околната карпеста маса што од друга страна пак придонесува кон фрагментација на карпестата маса и намалување на оппорноста кон распаѓање. Овие влијанија врз карпестата маса се намалуваат на поголема оддалеченост од раседите.

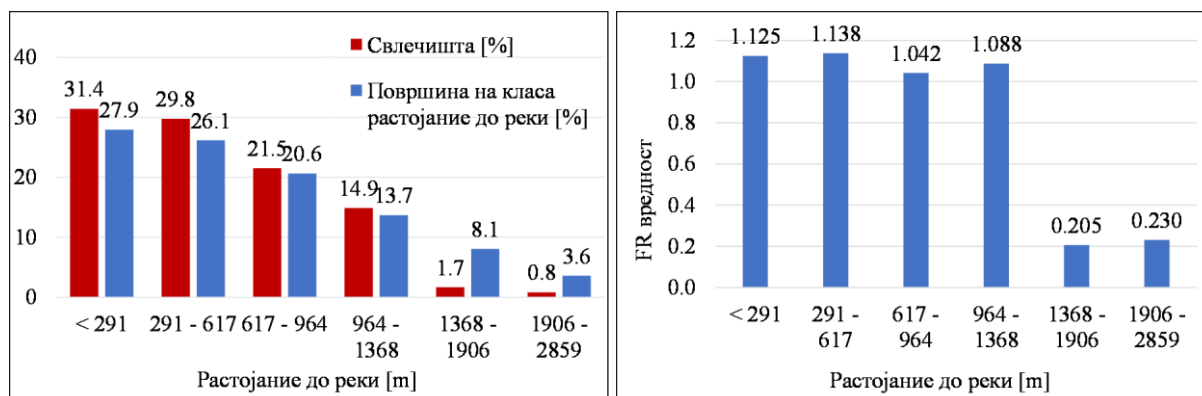
- Врнежи



Слика 68 Статистичка обработка на резултати за фактор “врнежи”

Највисока фреквенција на свљечишта (58.7 %) се забележува каде вкупните врнежи се најинтензивни, односно 900 – 1050 mm/годишно. FR вредноста изнесува 1.247 и укажува на силна врска помеѓу појавата на свљечишта и овие врнежи. За врнежи 700 – 800 и 800 – 900 mm/годишно дистрибуцијата на свљечишта е идентична (20.7 %), но разликата во површината на теренот која ја покриваат овие количини на врнежи, доведува до различни вредности за FR вредноста, односно 1.073 и 0.643.

- Растојание до реки



Слика 69 Статистичка обработка на резултати за фактор “растојание до реки”

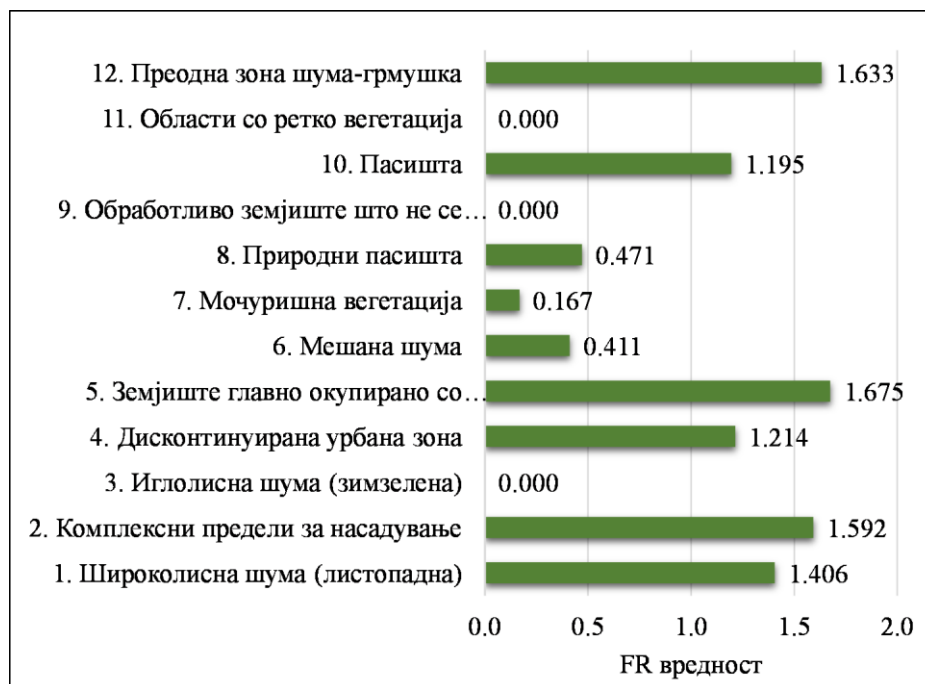
Зависноста на факторот “растојание до реки” со појавата на свлечишта е: поголема оддалеченост од реки – помалку свлечишта. Силна врска на појавата свлечишта со овој фактор е добиена за класа < 291 m и 291 – 617 m, односно FR вредност од 1.125 и 1.138 соодветно. Просечна врска, односно FR вредност околу 1, е добиена за класите 617 – 964 m и 964 – 1368 m. За останатите две класи е добиена слаба врска помеѓу растојанието до реки и појвата на свлечишта, односно FR вредности помали од 1.

- Користење/покриеност на земјиште

Со анализа на факторот покриеност/користење на земјиште се воочува дека постои силна врска на појавата на свлечишта со следните класи: преодна зона шума-грмушка; пасишта; земјиште главно окупирано со земјоделство, со значителни површини со природна вегетација; дисконтинуирана урбана зона; комплексни предели за насадување; и зони со широколиска шума (листопадна). За останатите класи е добиена слаба корелација со појавата на свлечишта, односно FR вредности помали од 1.



Слика 70 Статистичка обработка на резултати за фактор “користење/покриеност на земјиште”



Слика 71 Статистичка обработка на резултати за фактор “користење/покриеност на земјиште”

Откако е добиена вредноста на “фреквенциониот однос” на секоја класа од факторите, кој всушност претставува тежински коефициент кој на квантитативен начин го мери придонесот на секоја вредност на факторот кон појавата на свлечишта, се врши преклопување на тематските тежински карти во ArcGIS. Всушност, се прави сумирање на вредностите на фреквенциониот однос од секој фактор во секој пиксел, со што се добива т.н. индекс на подложност кон свлекување (LSI).

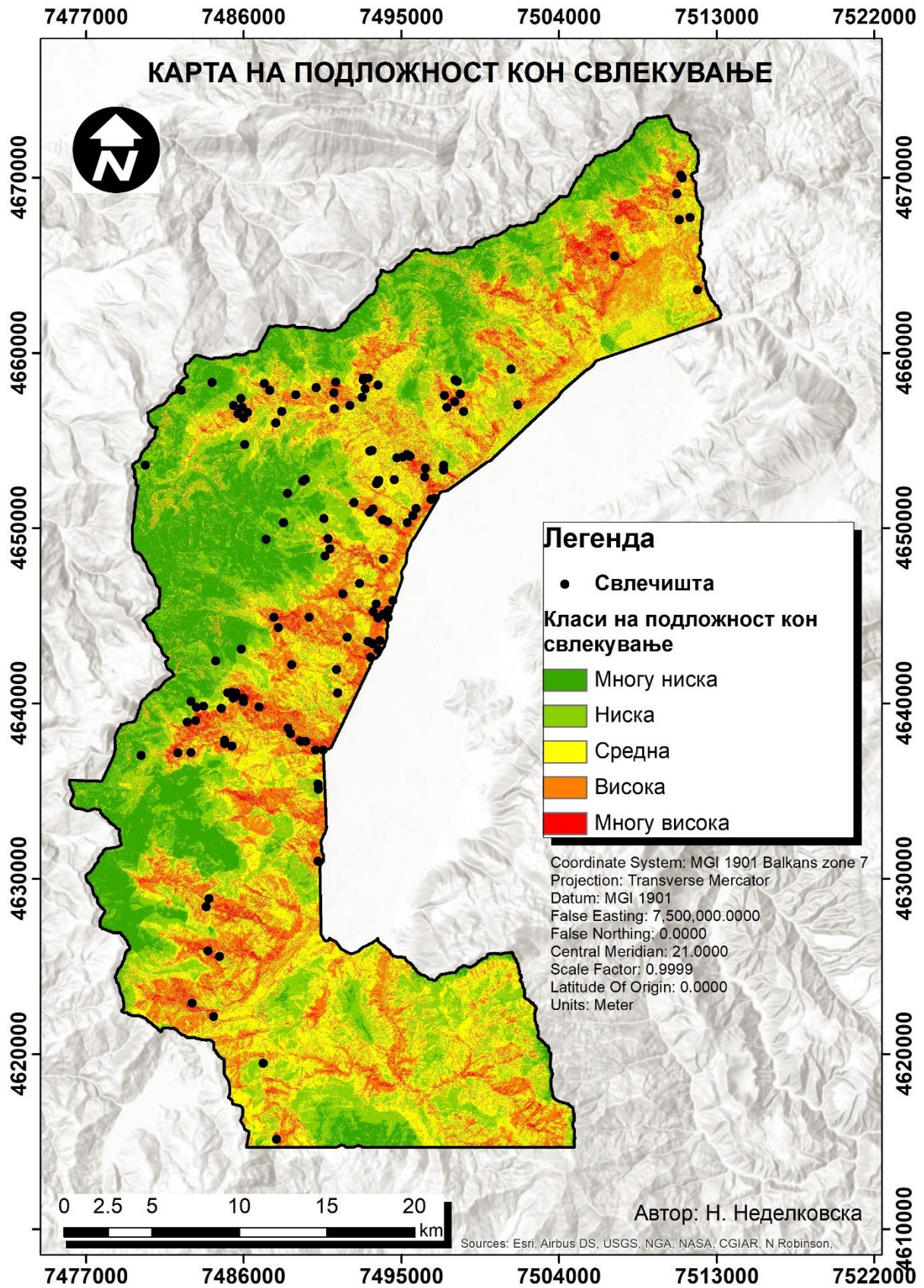
$$LSI = \sum_{i=1}^n FR_{ij}$$

Колку е повисока вредноста на LSI значи поголема подложност кон свлекување на теренот, и обратно, пониска вредност на LSI укажува на помала подложност кон свлекување.

Изборот на метод за поделба на индексот на подложност ја одредува коректноста на моделот на подложност кон свлекување. Природна поделба, стандардни отстапувања, еднакви интервали и квантили се често користените методи. Меѓу нив, методот на природна поделба се смета за најсоодветен метод со кој може да се генерираат различни класи врз основа на инхерентните карактеристики на податоците без никакво субјективно расудување.

Врз основа на погоре изнесеното, во предметната анализа е применет методот на класификација со природна поделба (Natural breaks (Jenks) method), за да се направи класификација на подложноста кон свлекување во пет категории (многу ниска, ниска, средна, висока и многу висока подложност).

Добиената карта на подложност кон свлекување за поширок опфат во рамки на Полошки регион (исклучувајќи ја Полошката котлина, која не од интерес за предметните анализи) е претставена на слика 72.

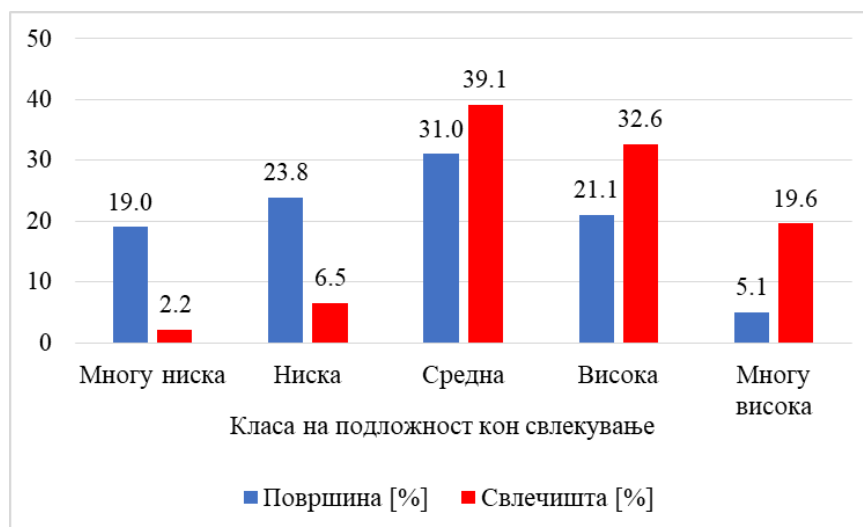


Слика 72 Карта на подложност кон свлекување

Припадноста на свлечишта во секоја класа на подложност е пресметана за да се провери валидноста на финалната карта на подложност. За ова, сите свлечишта се преклопени над картата за подложност кон свлекување. Во табела 14 и на графикот на Слика 73, се претставени добиените резултати за површината на секоја од класите на подложност кон свлекување и процентот на свлечишта во секоја од нив.

Табела 14 Табеларен преглед на добиени резултати од карта на подложност кон свлекување

КЛАСА НА ПОДЛОЖНОСТ КОН СВЛЕКУВАЊЕ	ПОВРШИНА [%]	СВЛЕЧИШТА [%]
МНОГУ НИСКА	19.0	2.2
НИСКА	23.8	6.5
СРЕДНА	31.0	39.1
ВИСОКА	21.1	32.6
МНОГУ ВИСОКА	5.1	19.6



Слика 73 Статистички преглед на резултати од карта на подложност кон свлекување

Од добиените резултати може да се заклучи дека, категориите на многу ниска и ниска подложност кон свлекување претставуваат 43% од целата површина, и во овие зони се наоѓаат само 9% од свлечиштата. Спротивно на тоа, категориите со висока и многу висока подложност заземаат 26% од областа на анализа, но процентот на свлечишта изнесува 52%.

Валидација на моделот на подложност кон свлекување е направена преку пристап на проценка на релативна густина на свлечишта, односно пресметка на т.н R-индекс. R-индексот се пресметува со следниот израз:

$$R = (n_i/N_i) / \sum (n_i/N_i)$$

каде n_i е број на свлечишта во секоја класа на подложност кон свлекување, а N_i е површина на секоја класа на подложност во однос на анализираното подрачје.

Пресметаната вредност на R-индексот за секоја класа на подложност кон свлекување, е претставена на графикот на слика 74. Добиениот резултат покажува дека вредноста на R-индексот постепено се зголемува како што нивото на подложност кон

свлекување се зголемува од многу ниско кон многу високо. Со оглед на тоа, може да се заклучи дека добиената карта на подложност кон свлекување во голема мера е логична и доверлива.



Слика 74 R-индекс за класи на подложност кон свлекување

Предноста на примена на методот “фреквенционен однос” е неговата едноставност, односно влезните, излезните и пресметковните процеси се лесно разбирливи. Дури и голем обем на податоци може да се обработи со примена на ГИС софтвер брзо и лесно.

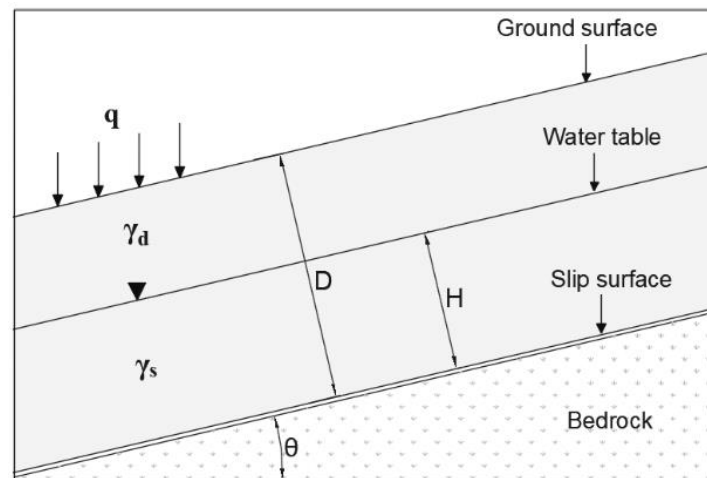
7.4 Проценка на подложност кон плитски свлечишта

Плитките свлечишта се типични транслаторни поместувања на почвен материјал (земја и/или дробина), кои се карактеризираат со претходно дефинирана планарна површина на лизгање со длабочина до 2.0 m (Cruden & Varnes 1996; Hungr et al. 2014). Според Швајцарските препораки (BRP, BWW, BUWAL 1997), свлечиштата се класифицираат како „плитки“ ако се длабоки помалку од 2.0 m. Според катастарот на свлечишта, 21% од свлечиштата во регионот се класифицирани како плитски свлечишта.

Плитките свлечишта може да бидат многу деструктивни појави и често доведуваат до загуба на човечки животи и предизвикуваат материјални штети (Postance et al. 2017). На пример, катастрофалните транслаторни свлечишта, што се случиле на планината Умјеон во јули 2011 година, по скоро 49.5 mm/час обилни врнежи, резултирале со 18 смртни случаи и повеќе од 20 повредени во централното градско подрачје на Сеул, заедно со десетици милиони долари станбени и инфраструктурни штети (Lee & Park 2015). Друг пример е настанот од октомври 2011 година, каде што источна Лигурија и северозападниот дел на Тоскана биле погодени од екстремни врнежи (скоро 600 mm/24 часа) кои предизвикале поплави, илјадници плитски свлечишта, 13 жртви и штети на инфраструктурата (Bartelletti et al. 2017). Во октомври 2010 година, со интензивна дождовна бура бил зафатен дел од Тоскана (Северно-централна Италија), која предизвикала 50 плитски свлечишта (Tofani et al. 2017). Од неколкуте презентирани примери може да се заклучи дека еден од главните предизвикувачи за плитски свлечишта се врнежите, кои се или краткотрајни но со голем интензитет, или долготрајни но со мал интензитет.

Методот на бесконечна косина (Skempton & DeLory 1957) презентирани на слика 75 е едноставен, но многу корисен метод за дефинирање на стабилноста од плитко

свлекување. Моделот на бесконечна косина претпоставува дека свлечиштата се бесконечно долги, но имаат мала длабочина во споредба со нивната должина и ширина и рамнината на лизгање е паралелна со наклонот на косината.



Слика 75 Шематски приказ на метод на бесконечна косина (Skempton & DeLory 1957)

Методот на бесконечна косина пресметува фактор на сигурност врз основа на анализа на гранична рамнитежа, како однос помеѓу напрегањето на смолкнување и јакоста на смолкнување. Следната равенка е применета за пресметка на факторот на сигурност, исто така користена и од други истражувачи (Van Westen & Terlien 1996; Acharya et al. 2006; Ray & Smedt 2008):

$$F = \frac{C_s + C_r}{\gamma_e D \sin \theta} + (1 - m) \frac{\gamma_w}{\gamma_e} \frac{\tan \varphi}{\tan \theta}$$

каде:

- F е фактор на сигурност (бездимензионален),
- C_s и C_r се ефективна почвена и коренска кохезија (kN/m^2),
- D е дебелина на почвата над рамнина на свлекување (m),
- φ е агол на внатрешно триење на почвата ($^\circ$),
- θ е наклон на косина ($^\circ$),
- γ_w е волуменска тежина на водата (kN/m^3),
- γ_e е ефективна волуменска тежина на почвата (kN/m^3), и
- m е индекс на влажност

van Westen & Terlien (1996), ефективната волуменска тежина γ_e ја дефинираат како:

$$\gamma_e = \frac{q \cos \theta}{D} + (1 - m) \gamma_d + m \gamma_s \quad (2)$$

каде:

- γ_d е волуменска тежина на сува почва (kN/m^3),
- γ_s е волуменска тежина на заситена со вода почва (kN/m^3), и
- q е било каков дополнителен товар на почвената површина (kN/m^2).

Кохезијата, сувата и заситената волуменска тежина и аголот на внатрешно триење на почвата (Табела 15) се усвоени од достапната инженерско-геолошка карта во размер 1:200 000 за регионот.

Табела 15 Влезни геотехнички параметри за литолошките единици

ЛИТОЛОШКИ ЕДИНИЦИ	СУВА ВОЛУМЕНСКА ТЕЖИНА		ЗАСИТЕНА СО ВОДА ВОЛУМЕНСКА ТЕЖИНА		АГОЛ НА ВНАТРЕШНО ТРИЕЊЕ		КОХЕЗИЈА	
	γ_d [kN/m ³]		γ_s [kN/m ³]		ϕ [°]		C_s [kN/m ²]	
Al – алувиум	17.0	18.6	20.0	21.6	20	36	0	16
Pr – пролувиум	15.5	16.5	18.5	19.5	24	32	1	22
Del – делувиум	16.0	18.5	19.0	21.5	25	29	10	30
GlF – глацијални седименти	14.0	16.0	17.0	19.0	22	32	8	20
Pg – палеогени седименти	15.5	18.0	18.5	21.0	21	34	13	28

Аголот на косината е добиен од дигиталниот висински модел на теренот, со големина на мрежа од 10 на 10 m.

Со цел да се процени длабината на почвата над рамнината на свлекување (D), применет е пристапот предложен од Saulnier et al. (1997), каде дебелината на почвата е во функција од локалната надморска височина (z_i), односно:

$$D = h_{max} - \frac{z_i - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} (h_{max} - h_{min})$$

каде D е дебелина на почвата пресметана во точка i , h_{max} и h_{min} се максималните и минималните вредности на дебелината на почвата во подрачјето, z_i е вредноста на надморската висина во точка i , додека z_{max} и z_{min} (или максимум и минимум) се максималните и минималните вредности на надморска висина во анализираното подрачје. Максималните и минималните вредности на длабината на почвата (h_{max} и h_{min}) за анализираната област се добиени од познатите свлечишта во регионот (Катастар на свлечишта за Полошкиот регион), $h_{max} = 3m$ и $h_{min} = 1m$. Податоците за надморската висина се добиени од дигиталниот теренски модел.

Корењата придонесуваат кон зголемување на јакоста на почвата, обезбедувајќи кохезија што може да се додаде на ефективната кохезија на почвата. Вредноста на оваа кохезија, која е позната и како коренска кохезија C_r , ја истражувале многу истражувачи. Chok et al. (2015) даваат преглед за вредноста на коренската кохезија за различни видови на вегетација. Имајќи ги во предвид овие вредности, како и информациите за покриеноста и корисноста на земјиштето во анализираното подрачје, усвоени се репрезентативни вредности за коренската кохезија, Табела 16.

Табела 16 Усвоени вредности за коренска кохезија за типови на земјиште и вегетациски видови (прилагодено според Chok et al. 2015)

БР.	ВИД НА ЗЕМЈИШТЕ/ВЕГЕТАЦИЈА	C_r [kN/m ²]
1	Дисконтинуирана урбана зона	0.0
2	Индустриски или трговски единици	0.0

БР.	ВИД НА ЗЕМЈИШТЕ/ВЕГЕТАЦИЈА	Cr [kN/m ²]
3	Места за експлоатација на минерали	0.0
4	Обработливо земјиште што не се наводнува	0.0
5	Овошни дрвја и насади со бобинки	2.0
6	Пасишта	2.0
7	Комплексни предели за насадување	1.5
8	Земјиште главно окупирано со земјоделство, со значителни области на природна вегетација	2.0
9	Широколисна шума (листопадна)	7.0
10	Иглолисна шума (зимзелена)	10.0
11	Мешана шума	2.0
12	Природни пасишта	0.0
13	Мочуришна вегетација	2.0
14	Склерофилна вегетација	2.0
15	Преодна зона шума-грмушка	2.0
16	Ретко вегетирани области	0.0
17	Опожарени области	0.0

Дополнителниот товар може да се процени според доминантната намена на земјиштето во анализираната област, со вредности засновани на податоци дадени во литература за слични видови на покриеност на теренот (Roy 1991; Hammond et al. 1992). Ray (2004) дава пресметки за дополнителен товар само за изградените области и пошумените области, додека за земјоделските површини, пасиштата, грмушките и неплодните земјишта смета дека имаат нула дополнителен товар. Дополнителниот товар од дрвјата зависи од големината, видот и густината на дрвјата (Hammond et al. 1992), а дополнителниот товар на изградените области зависи од видот на објектите. Сепак, вредностите на дополнителниот товар од дрвјата имаат релативно незначителен ефект врз факторот на сигурност на косината (Cole 2013). Бидејќи нашата анализа се изведува на регионално ниво, пресметката на дополнителниот товар не е можна поради многу причини. Затоа, дополнителниот товар (q) не е земен во предвид во анализата.

Параметарот m е индекс на влажност и теоретски ја изразува релативната позиција на нивото на водата H/D , каде што H е заситената дебелина на почвата над клизната рамнина (m) и D е вкупната длабина на почвата над клизната рамнина (m). Бидејќи достапните податоци се многу ограничени во однос на проценката на m_0 , земени се во предвид две различни сценарија за вредноста на m , односно вредности од 0.35 и 0.70.

Потоа, неколку класи на стабилност се дефинирани, врз основа на пресметаните вредности за факторот на сигурност (Табела 17).

Табела 17 Класи на стабилност за проценка на подложност кон плитски свлечишта

ФАКТОР НА СИГУРНОСТ	КЛАСА НА СТАБИЛНОСТ
$F > 1.5$	Стабилна
$1.25 < F \leq 1.5$	Средно стабилна
$1 < F \leq 1.25$	Квази стабилна
$F \leq 1$	Нестабилна

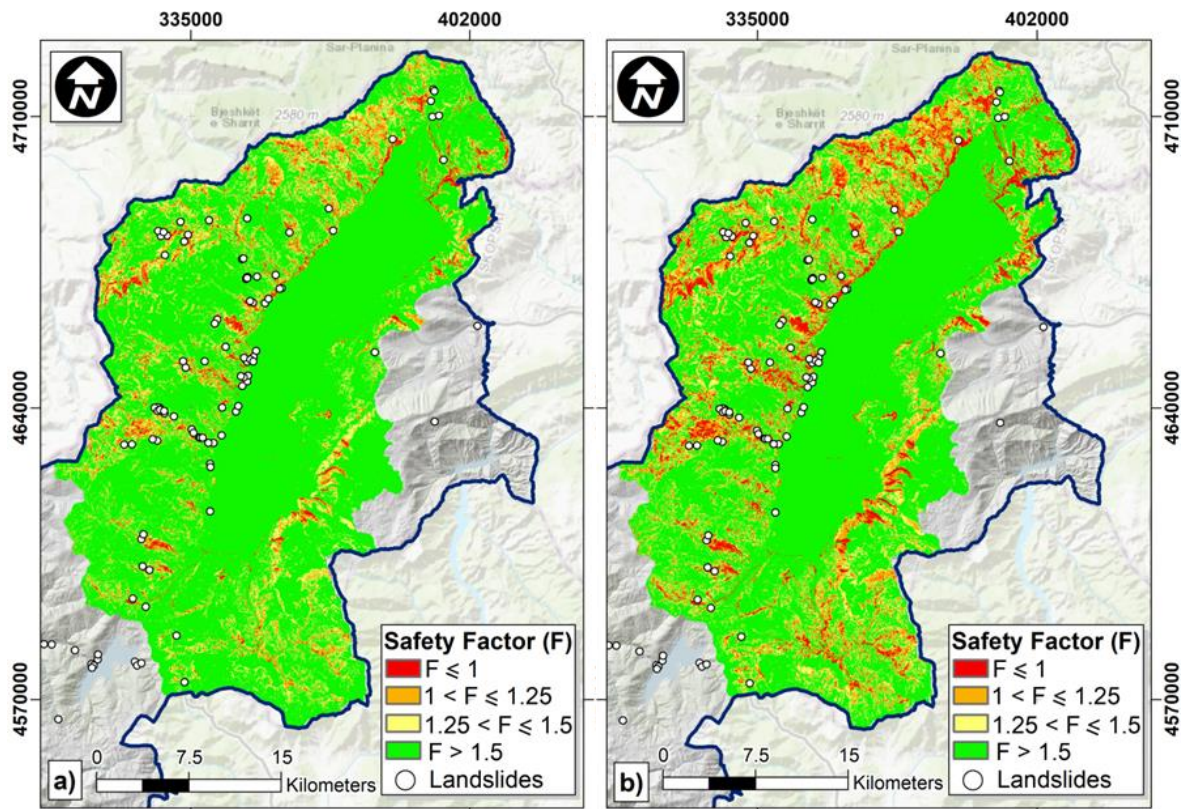
7.4.1 Анализирани сценарија и добиени резултати

Со овој пристап за проценка на подложноста, анализирани се четири сценарија со цел да се добие претстава за подложноста кон плиткци свлечишта во различни услови на заситеност на подлогата и просечни и минимални геотехнички јакостни параметри на почвата. Анализирани се следните сценарија:

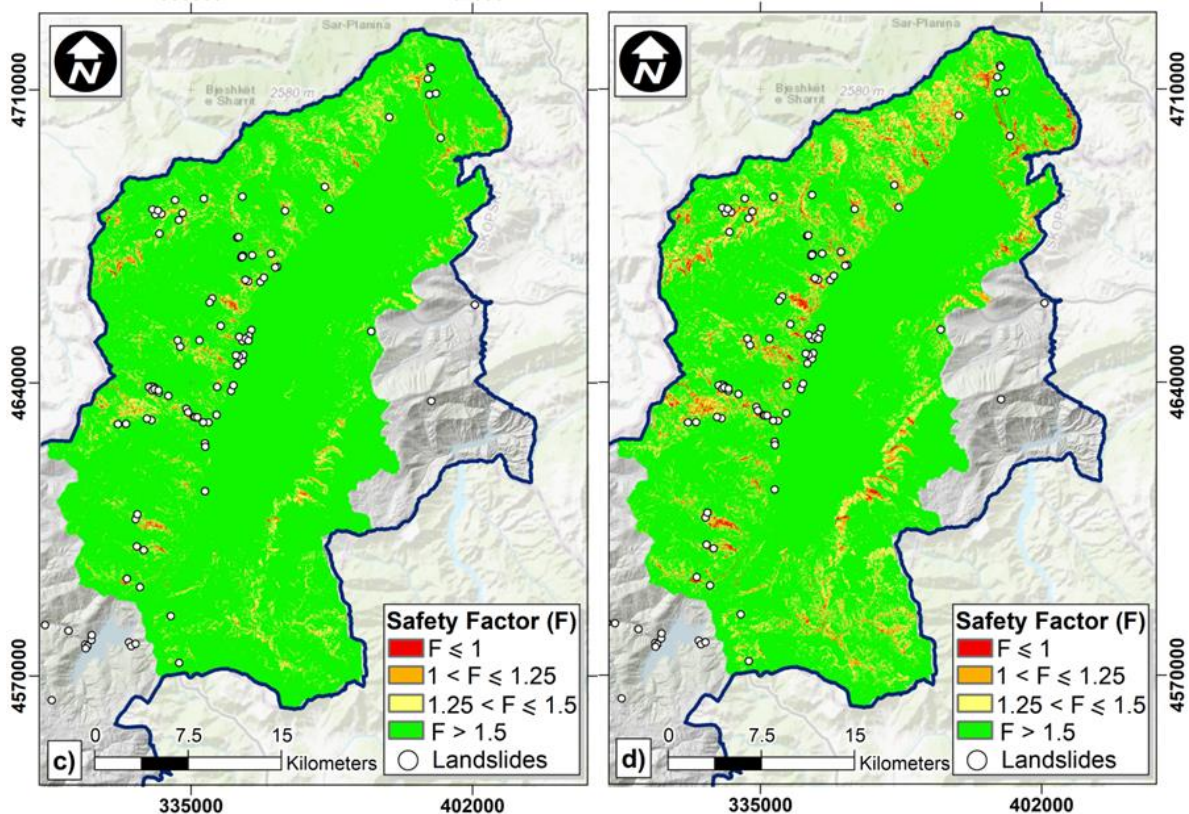
- Сценарио 1: минимални вредности на геотехничките параметри и заситеност од 35%
- Сценарио 2: минимални вредности на геотехничките параметри и заситеност од 70%
- Сценарио 3: просечни вредности на геотехничките параметри и заситеност од 35%
- Сценарио 4: просечни вредности на геотехничките параметри и заситеност од 70%.

Добиените карти на подложност се дадени на слика 76 и слика 77.

Добиените карти на подложност покажуваат дека плитките свлечишта поверојатно е да се јават во северните делови во однос на јужните делови од регионот. Ако се земе во предвид хипсометриската позиција на зоните на подложност во сите направени модели, очигледно е дека најмногу свлечишта се очекуваат во преодната зона, од планинскиот терен кон котлината.



Слика 76 Модели на подложност кон плиткци свлечишта за Сценарио 1 и Сценарио 2



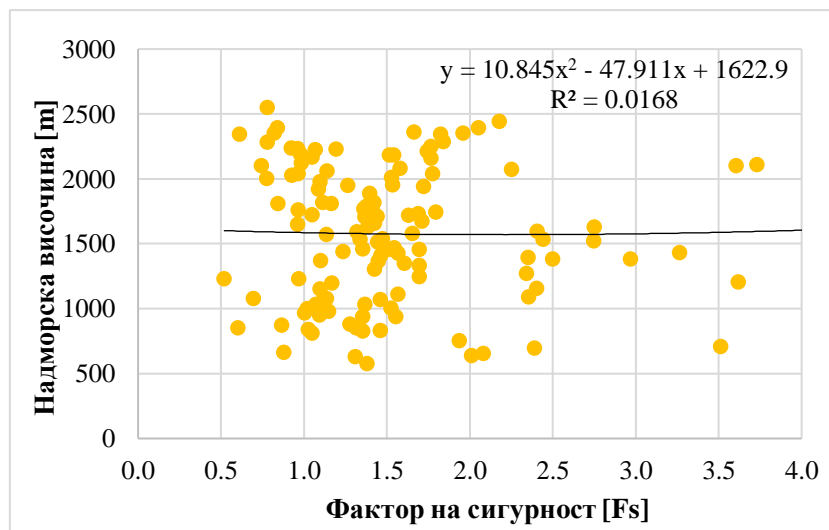
Слика 77 Модели на подложност кон плитко свлечишта за Сценарио 3 и Сценарио 4

Идејата за подготовка на овие модели е да се добие генерална претстава за подложноста кон плитко свлекување во регионот со примена на лесно достапни податоци (бидејќи подетални не беа достапни). Добиените резултати се ограничени во поглед на прецизноста на податоците поврзани со дебелината на почвениот покривач и релативно малиот број на податоци за геотехничките параметри, како и нивото на подземна вода. Сите овие ограничувања треба да се надминат во понапредни студии на ниво на сливови, односно да се изберат помали делови од регионот каде треба да се изведат теренски истражувања за овој тип на свлечишта.

Се препорачува да се примени ваква постапка за проценка на подложноста и во други региони во Македонија, со цел да се поттикне подобрување на свеста кај властите за опасностите од свлекување на теренот.

Во продолжение е направена анализа на влијанието на влезните параметри врз факторот на сигурност. Како што е познато, геотехничките параметри - кохезија и агол на внатрешно триење на литолошките единици, се во пропорционална зависност со факторот на сигурност, односно повисоки вредности за овие параметри значат повисока јакост на смолкнување на подлогата или со други зборови поголема отпорност кон свлекување на теренот. Во иста зависност е и коренската кохезија со факторот на сигурност.

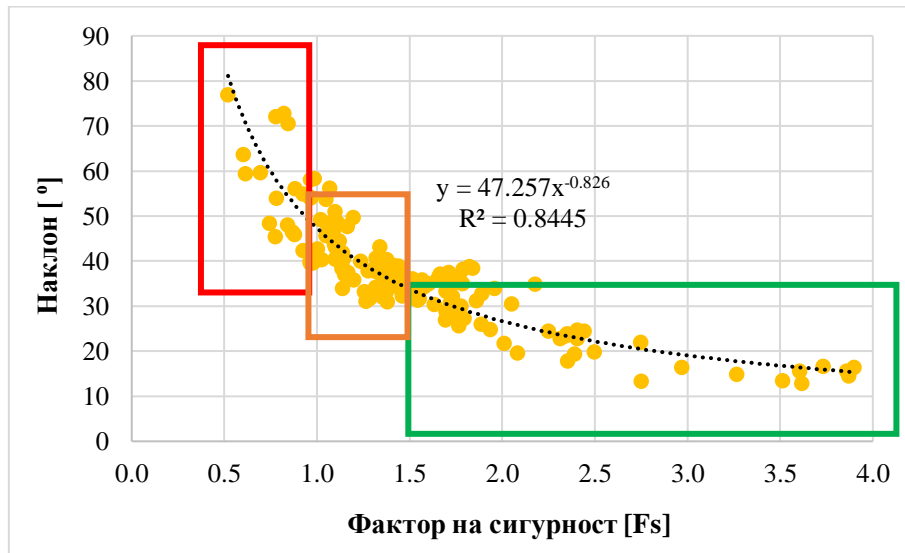
Со цел да се донесе заклучок за хипсометриската позиција на зоните на подложност, анализирана е зависноста помеѓу надморската височина и факторот на сигурност. Анализата укажува на непостоење на врска помеѓу овие променливи (слика 78). Ова значи дека зони подложни кон плитко свлекување се присутни во сите делови во регионот, почнувајќи од највисоките планински делови па се до преодната зона на планинскиот терен кон долината. Визуелната анализа на картите на подложност кон плитко свлекување (слика 76 и слика 77) исто така ја потврдува оваа независност.



Слика 78 Зависност помеѓу фактор на сигурност и надморска височина

Направен е обид да се направи зависност помеѓу факторот на сигурност и дебелината на почвата над клизната рамнина. Направените анализи не укажуваат на некаква зависност помеѓу овие анализирани променливи за предметниот случај. Добиената независност е очекувана со оглед на тоа дека дебелината на почвата над клизната рамнина е во функција од надморската височина, а претходно се покажа независност помеѓу надморската височина и факторот на сигурност.

Анализирана е зависноста помеѓу факторот на сигурност и наклонот на косината (слика 79).



Слика 79 Зависност помеѓу фактор на сигурност и наклон на терен

Од прикажаната зависност помеѓу факторот на сигурност и наклонот на терен може да се заклучи дека:

1. Пониски фактори од 1.0 кои се индикација за нестабилен терен т.е. терен подложен кон плитко свлекување, се добиваат за наклон на косина поголем од 40°. Појавата на нестабилности под овие наклони на косини се поврзува со сипаришните појави.

2. Повисоки фактори од 1.5 кои се индикација на стабилен терен т.е. терен неподложен кон плитко свлекување, се добиваат за наклон на косина помал од 40° .
3. Наклонот на косина помеѓу 30° и 50° може да се каже дека нема експлицитно влијание врз стабилноста (во овој дијапазон на вредности за наклонот се добиваат фактори на сигурност помеѓу 1.0 и 1.5). Кај косините со наклон помеѓу 30° и 50° останатите фактори имаат поголемо влијание врз стабилноста на теренот.

7.5 Анализа на картите на подложност

Со цел да се направи анализа и контрола на добиената карта на подложност кон свлекување, направена е споредба со DInSAR индицираните зони, карта на коефициент на ерозија за регионот, и карта на подложност кон свлекување за регионот добиена со примена на искусствен пристап.

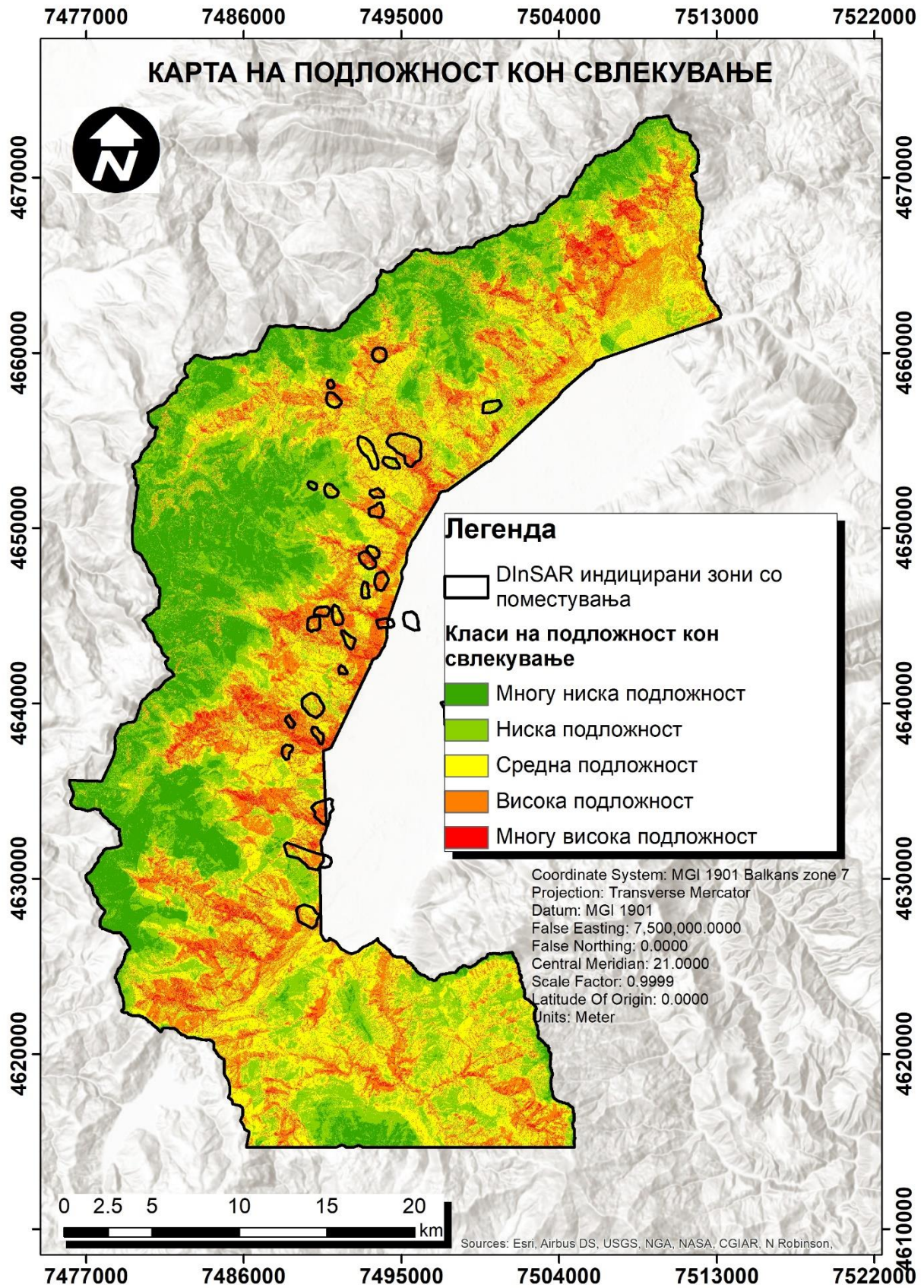
Изработениот модел за коефициент на ерозија е претходно подготвен во рамки на “Физибилити студија за одредување на опции за менаџирање на продуциран седиментен нанос во Полошкиот регион”.

Претходно подготвената карта на подложност кон свлекување е добиена со примена на искусствен пристап (Peshevski et al. 2019). Наречен е арбитриран метод на полиномна интерполација, кој вклучува 5 условни фактори: литологија, наклон, врнежи, користење/покриеност на земјиште и максимален очекуван сеизмички интензитет. Според методот, во првата фаза се врши градација факторите со доделување на таканаречени рејтинг вредности на мрежните ќелии на кои е поделен регионот. Вредностите на рејтингот варираат од 0 до 3 и зависат од карактерот и важноста на параметарот за развој на свлечишта. Таканаречениот модел на вкупен рејтинг на подложност кон свлекување се добива со собирање на поединечните рејтинзи од секој параметар и делење на регионот на пет зони на подложност според метод на природна поделба (Jenks) метод во ГИС средина.

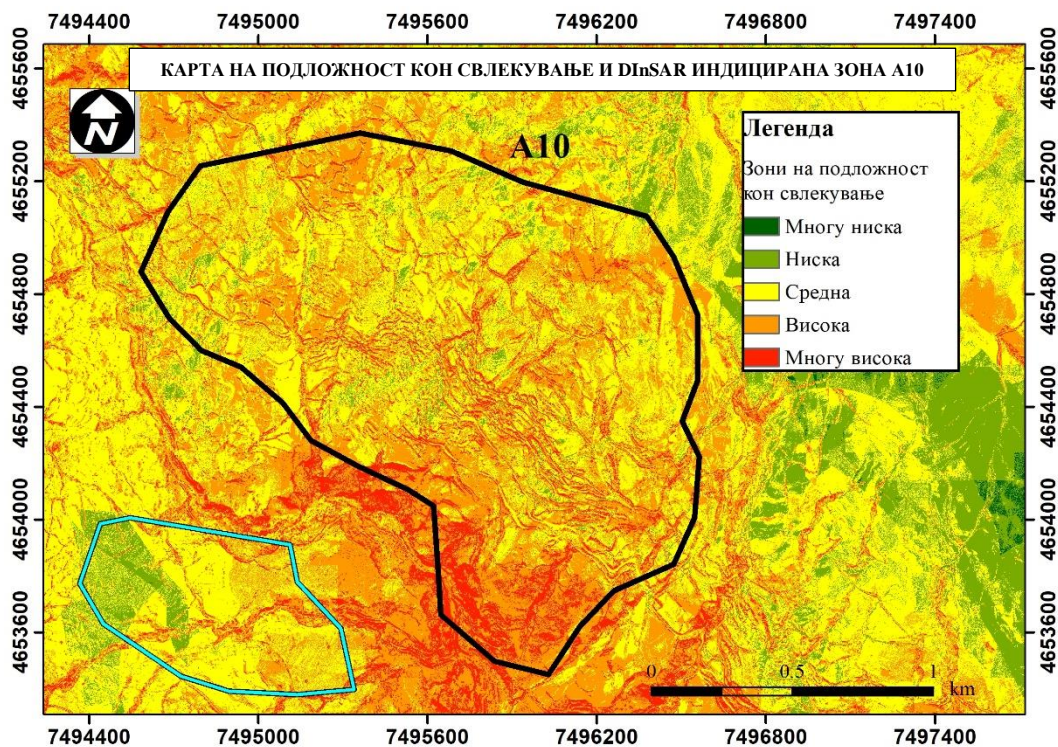
Преклопувањето на DInSAR индицираните зони со каратата на подложност кон свлекување покажува дека, сите DInSAR индицирани зони се наоѓаат во зони со средна, висока и многу висока подложност кон свлекување (Слика 80).

Подетален приказ на две DInSAR индицирани зони е даден на Слика 81 и 82.

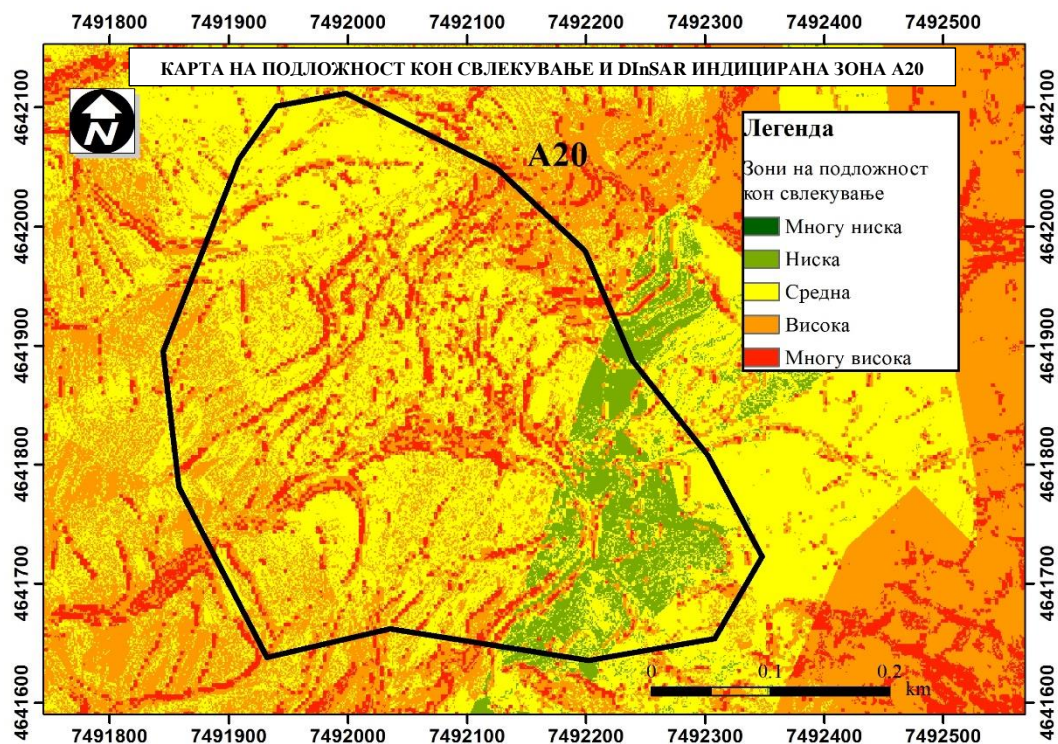
Приказ на картата со дефиниран коефициент на ерозија за регионот, за споредба со картата на подложност кон свлекување, е даден на Слика 83, додека приказ на двете карти на подложност кон свлекување добиени со примена на искусствен пристап и методот “фреквенционен однос” е даден на Слика 84.



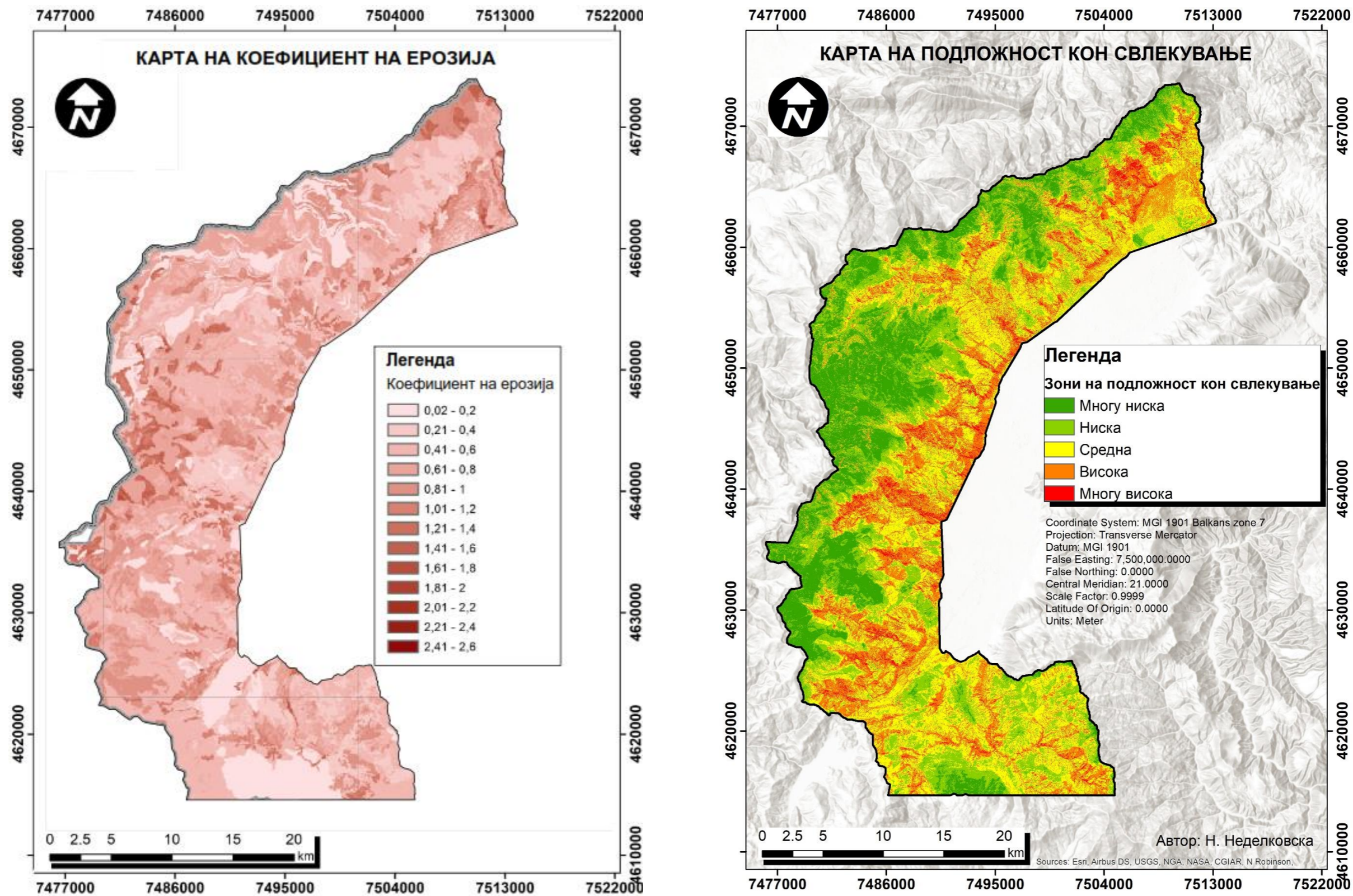
Слика 80 Приказ на DInSAR индицираните зони на картата на подложност кон свлекување



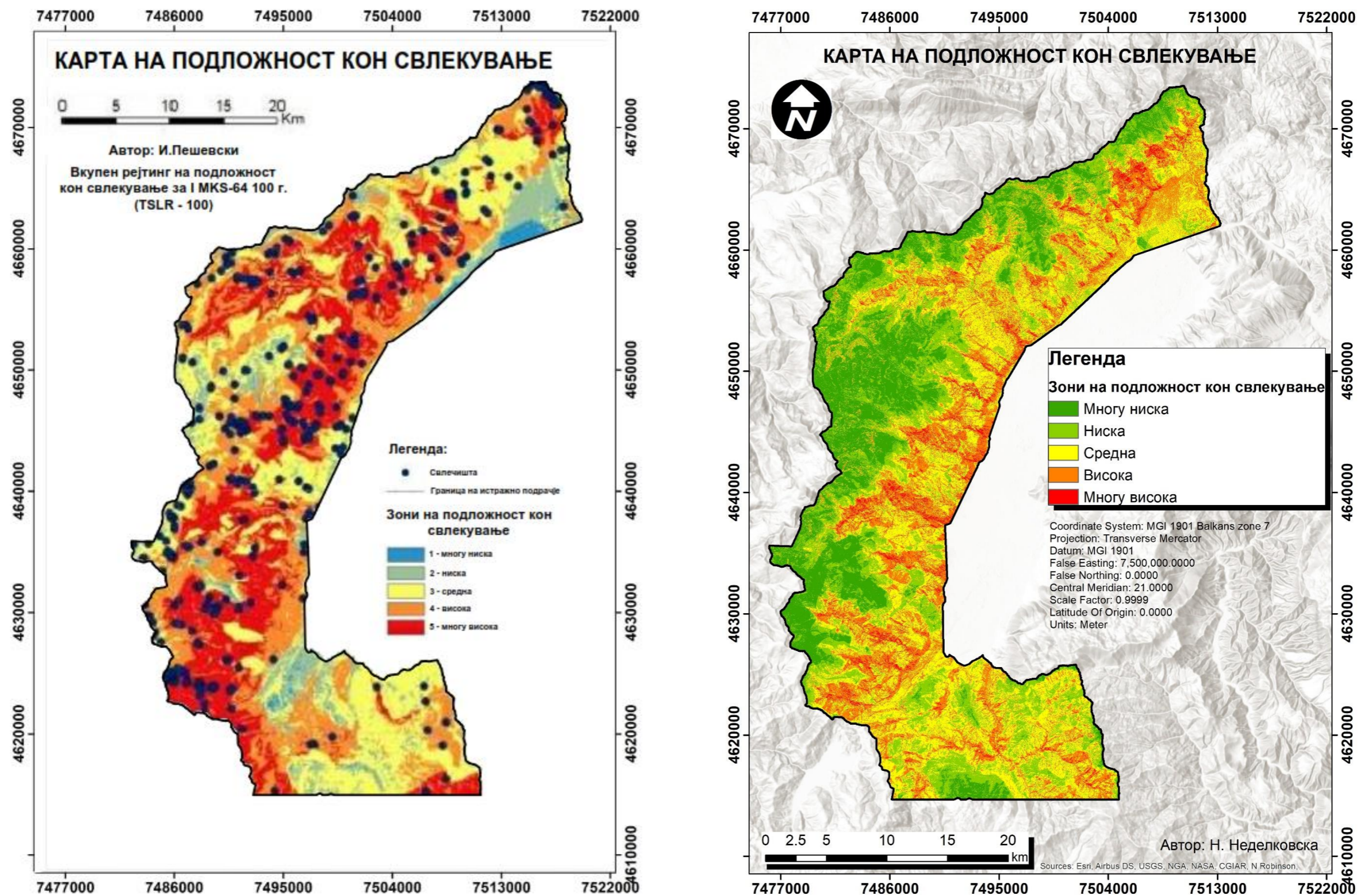
Слика 81 Приказ на DInSAR индицирана зона A10 на картата на подложност кон свлекување



Слика 82 Приказ на DInSAR индицирана зона A20 на картата на подложност кон свлекување



Слика 83 Приказ за споредба на карта со дефиниран коефициент на ерозија и подложност кон свлекување на теренот



Слика 84 Приказ за споредба на карти на подложност кон свлекување на теренот според две различни методологии (лево: искусвен пристап; десно: “фреквенционен однос” метод)

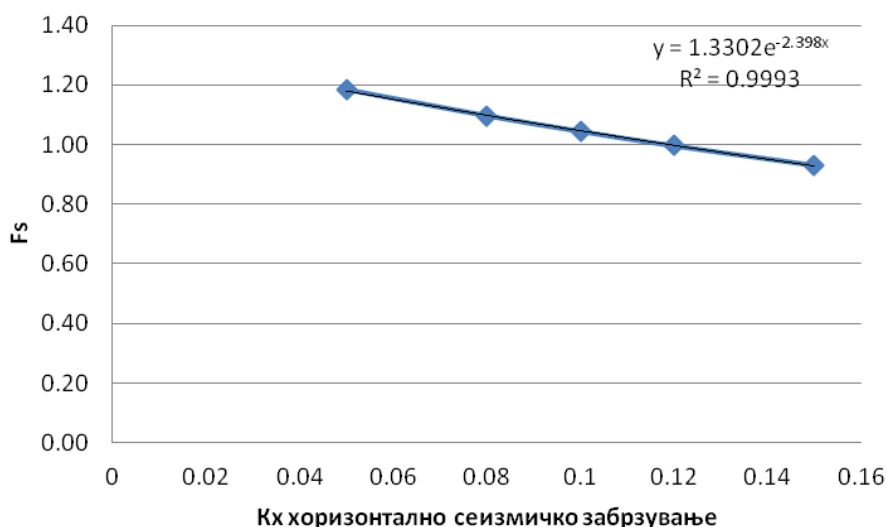
Сублимат на анализите на вкупната подложност кон свлекување на Peshevski et al. (2019), е прикажан во Табела 18.

Табела 18 Преглед на зони на подложност кон свлекување за повратен период од 100 год. на максимално очекуван сеизмички интензитет

ЗОНА НА ПОДЛОЖНОСТ	ДЕЛ ОД АНАЛИЗИРАНО ПОДРАЧЈЕ [%]	ПРОЦЕНТ НА СВЛЕЧИШТА [%]
1 - Многу ниска подложност	17.44	1.37
2 - Ниска подложност	19.05	10.75
3 - Средна подложност	20.24	13.82
4 - Висока подложност	18.60	22.78
5 - Многу висока подложност	24.66	51.28

Според споредбена анализа на слика 84 и табела 18, се гледа дека има генерално поклопување на зоните од средна до висока подложност. Одредени разлики се јавуваат и заради применетата постапка, бидејќи во методот на Peshevski et al. (2019), вклучено е и влијание од земјотрес со повратен период од 100 години, додека моделот добиен со методот “фреквенционен однос” и анализите на плитко свлекување, се работени без тоа влијание.

За да се согледа влијанието на земјотресите, може да се направи индиректна споредба, ако се земе во предвид влијанието на хоризонталното сеизмичко забрзување прикажано на слика 85.



Слика 85 Промена на фактор на сигурност во зависност од коефициент на хоризонтално сеизмичко забрзување K_x (Пешевски, 2015)

Имено, овој дијаграм, укажува дека како што расте земјиното забрзување, се намалува факторот на сигурност. На пример, ако од дијаграмот се процени дека $F_s=1.3$ при $K_x=0$, се гледа, дека при $K_x=0.1$, $F_s=1.05$, што е намалување на факторот на сигурност за околу 30%, односно зголемување на подложноста за одредено ниво.

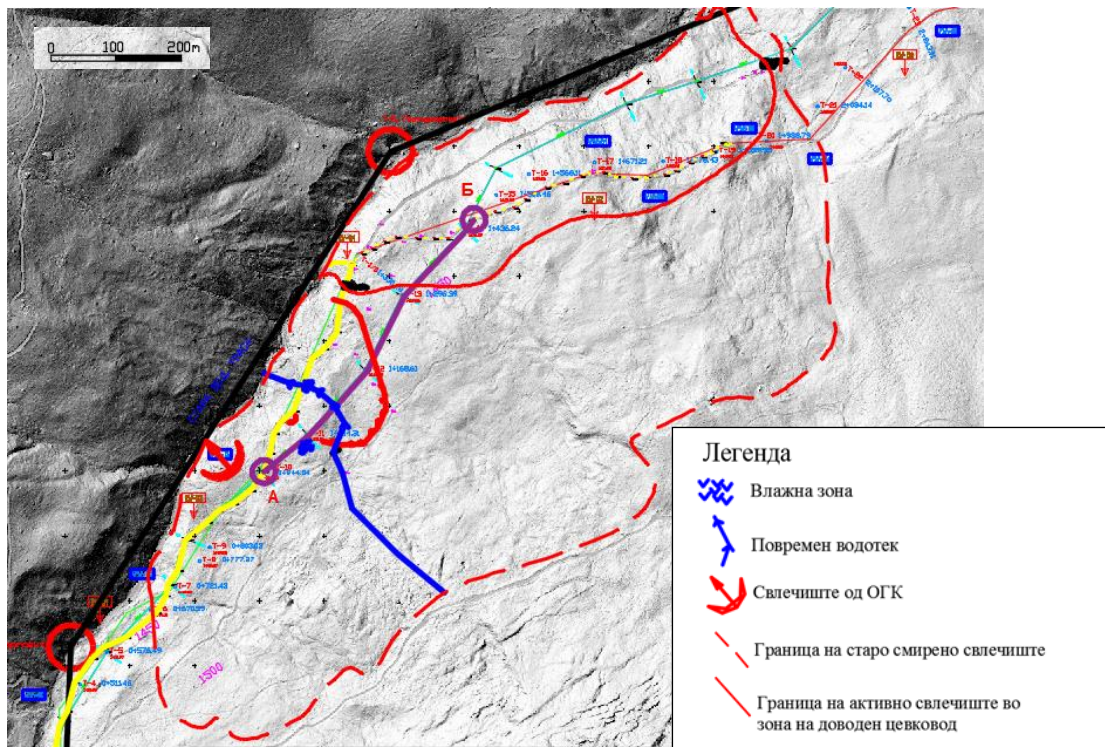
Оваа анализа укажува дека ова може да биде предмет на идни истражувања, што е една од целите на оваа дисертација – да се создадат теми за следни научни анализи.

Што се однесува до анализа на подложноста кон свлекување и коефициентот на ерозија, од сликите се гледа дека има одредени совпаѓања, но и на прв поглед одредени

разлики. Имено, коефициентите на ерозија, се многу зависни од присуството на вегетативниот покривач, што води кон нивно намалување, додека, има и чести случаи кај плитки свлечишта, посебно ориентирани кон северна страна, да има целосна покриеност со вегетација. Еден пример е прикажан на следните слики, за случај на свлечиште кое го зафаќа доводниот цевковод за водоснабдување на градот Тетово. Свлечиштето е со СЗ диспозиција и целосно покриено со вегетација, додека спротивната страна од Бозовска река Пена е со сончева диспозиција, изложена на ерозија, но без појава на свлечиште.



Слика 86 Деформиран доведен цевковод за град Тетово заради активирано свлечиште

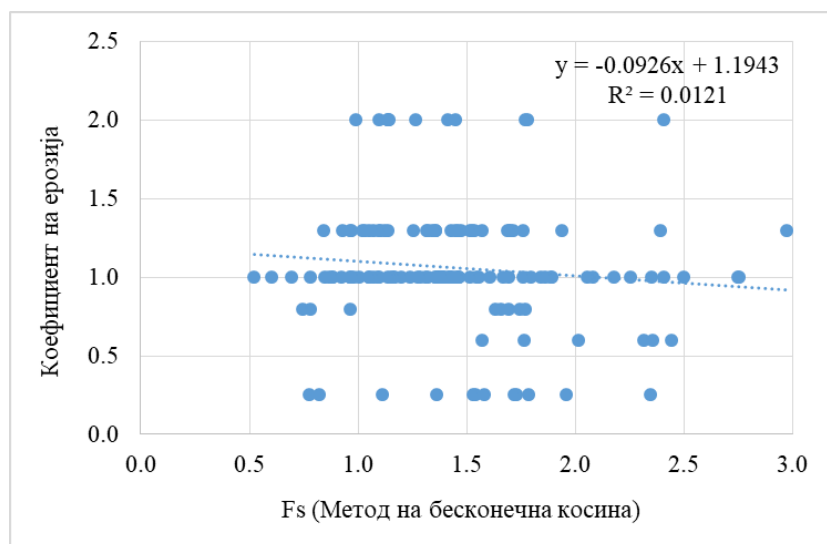


Слика 87 Hillshade подлога со локација на свлечиште и доведен цевковод



Слика 88 Google снимка на зоната на свлечиште означена со стрелка (видлива голема пошуменост на десен брег на Бозовска река, додека левиот е изложен на значајна ерозија но без свлечишта)

За оваа намена, направена е и одредена корелациона анализа, која укажува на низок коефициент на корелација помеѓу коефициентот на ерозија и факторот на сигурност за појава на плитки свлечишта (Слика 89).



Слика 89 Корелација меѓу еродибилност и фактор на сигурност за анализирано подрачје

И овој аспект, укажува, дека кај секој конкретен терен, со различен геолошки развој, надморска висина, дебелина на почвен покривач и други фактори, за вакви анализи се потребни дополнителни и посебни идни истражувања.

8. ЗАКЛУЧОЦИ И ПРЕПОРАКИ

Како геохазард, различните видови на поместувања на теренот, или во стручната литература познати како “свлечишта”, се особено значаен и ограничувачки фактор при просторното планирање. И покрај значителниот напредок во стручното разбирање на механизмите на нестабилностите и достапноста на техники за намалување и избегнување на негативното влијание од истите, свлечиштата сè уште се причина за многу човечки жртви и огромни економски загуби низ целиот свет.

Познавањето на дистрибуцијата на минатите свлечишта е основен предуслов за да направат анализи со кои ќе се подигне на повисоко ниво менаџирањето со ризикот од свлекување. Во области богати со податоци овој предуслов е исполнет. Меѓутоа, во области со ограничени податоци, каде што истражувачите немаат на располагање претходно подготвен катастар, единствено решение е да се картираат нестабилностите од почеток. Оваа постапка може да одземе многу време ако се изведува преку стандардно геоморфолошко картирање на теренот или е подложна кон грешки ако се прави целосно автоматски, а сето ова е многу посложено кога се прави за големи географски региони.

Во недостиг на континуирано и систематизирано прибирање на податоци за свлечишта во Македонија, во докторската дисертација е прикажан пристап за собирање на податоци за свлечишта преку примена на современи техники за детекција и карактеризација на свлечишта и анализа на архивски податоци за свлечишта. Како подрачје за анализа е одреден Полошкиот регион.

Активностите за собирање на архивски податоци за свлечишта, со цел формирање на катастар на свлечишта за Полошкиот регион, се состоеја од: анализа на сопствени податоци за свлечишта; посети на локации забележани во анкетите пополнети од општините; дигитализација на свлечишта од стари геолошки карти во размер 1: 25000; анализа и дигитализација на свлечишта од архивата на Геолошки завод на Македонија; интервјуа со вработени и колеги во пензија од геотехнички компании; анализа на свлечишта вдоль каналите на хидроенергетскиот систем „Маврово“; посета на Државниот Универзитет во Тетово и заедничка посета на терен; посети на повеќе геотехнички компании низ Македонија. Преку ваквиот пристап, формирана е база на податоци за свлечишта која се состои од 136 појави. За 118 од вкупниот број картирана е границата на свлечиштето, додека останатите 18 свлечишта се идентификувани само како точки

Во следната фаза е извршена употреба на современи технологии за далечинска детекција за откривање, карактеризирање и следење на свлечишта во Полошкиот регион, преку анализа на снимки добиени од сензорите на радар со синтетичка антена (SAR) и обработени користејќи ја техниката Differential Interferometry (DInSAR). Резултатите се анализирани во однос на катастарот на свлечишта. Во подрачјето опфатено со „рафал-1“ бројот на покриени свлечишта е 12 (од вкупно 31 картирано во подрачјето опфатено со „рафал-1“). Во подрачјето опфатено со „рафал-2“ се забележани само 14 свлечишта (од вкупно 52 картирани во подрачјето опфатено со „рафал-2“). Всушност, само 9 (2 од „рафал-1“ и 7 од „рафал-2“ подрачјата на обработка) од покриените свлечишта се целосно класифицирани во катастарот според видот и состојбата на активност. Извршена е проверка на свлечиштата од катастарот за подрачјето опфатено со „рафал-3“. Сепак, подрачјето на „рафал-3“ е делумно покриено со DInSAR податоци.

DInSAR податоците освен што придонесуваат за карактеризација на свлечиштата (дефинирање на граници на подрачја погодени од свлечишта; состојба на активност) може значајно да се надополнат со **геоморфолошки критериуми** при откривање на

свлечиштата. За подрачјето на истражување опфатено со Sentinel податоците, направена е анализа за избор на оние кохерентни пиксели кои го надминуваат прагот на брзина претпоставен како индикатор за движење. Овој праг е поставен да е еднаков на 2 mm/година, и притоа откриени се 38 “жаришта” (18 во подрачјето опфатено со „рафал-1“ и 20 во подрачјето опфатено со „рафал-2“) каде што е идентификувана концентрација на движечки кохерентни пиксели. Преку анализа на DInSAR индицираните зони и геоморфолошки/геолошки услови на теренот, се картирани досега некартирани свлечишта.

Вториот современ пристап кој се применува за детекција на нестабилности е визуелна анализа на дигитален модел на теренот добиен со LiDAR скенирање. Дополнително, ортофото снимки се искористени за проверка на морфолошките форми покрај патиштата и куќите, како што се депонии или усеци/засеци, потоа пошуменоста или оголеноста на теренот исл. Имајќи ја во предвид предноста на LiDAR технологијата за продирање низ вегетација и со тоа добивање на податоци за морфолошките карактеристики на теренот, а од друга страна присуството на густо пошумени зони во анализираното подрачје, LiDAR снимките во голема мера помогнаа да се идентификуваат нови свлечишта. Преку ваквиот пристап за идентификација на свлечишта, откриени се нови 46 позиции со индикации за присуство на свлечишта.

Анализата на базата за свлечишта покажа дека генерално податоците за свлечиштата се некомплетни. За голем дел од свлечиштата нема точни информации за времето на активирање, предизвикувачот или механизмот на лизгање. Со оглед на ова се заклучи дека нема на располагање доволно податоци за да се изврши моделирање на хазардот и ризикот од свлекување во анализираното подрачје, па се пристапи кон проценка на подложност кон свлекување.

Моделирањето на подложноста кон свлекување се направи со примена на квантитативен метод т.н. “Фреквенционен однос” и избор на 12 влијателни фактори (топографски, геолошки, хидролошки, кориеност/користење на земјиште). Од добиените резултати се заклучи дека, категориите на многу ниска, ниска и средна подложност кон свлекување претставуваат 75% од целата површина, меѓутоа, во овие зони се наоѓаат само 30% од свлечиштата. Спротивно на тоа, категориите со висока и многу висока подложност заземаат 25% од областа на анализа, но процентот на свлечишта изнесува 70%. Валидација на моделот на подложност кон свлекување е направена преку пристап на проценка на релативна густина на свлечишта, односно пресметка на т.н R-индекс. Пресметаната вредност на R-индексот за секоја класа на подложност кон свлекување, покажува дека вредноста на R-индексот постепено се зголемува како што нивото на подложност кон свлекување се зголемува од многу ниско кон многу високо. Крајниот заклучок е дека добиената карта на подложност кон свлекување во голема мера е логична и доверлива.

Се направи и проценка на подложност кон плитки свлекувања со примена на “метод на бесконечна косина”. Добиените резултати се ограничени во однос на прецизноста на податоците поврзани со дебелината на почвениот слој и релативно малиот број на податоци за геотехничките параметри на почвата и нивото на подземна вода. Направената проценка помогна за прелиминарно зонирање на подложноста кон плитки свлечишта. Со цел да се направат подетални анализи во покрупен размер и да се добијат резултати со повисока доверливост, треба да се направат подетални анализи на ниво на сливови во регионот.

Покрај научниот придонес на оваа дисертација, сите прикажани резултати треба да се користат и за практични намени. Добиените модели за истражното подрачје треба да

се користат за целите на просторното планирање, и со нивната примена се регулираат условите за градба на објектите и нивна санација, а како крајна мерка може да се предложи/наложи избегнување на проектирање т.е. градба на терени каде постои висока подложност кон свлекување.

Со истражувањето се презентирани современи алатки за детекција и карактеризација на нестабилни појави на теренот. Истите за *прв пат во Македонија*, директна практична примена имаат во предметните анализи за Полошкиот регион.

ПРЕПОРАКИ ЗА ИДНИ ИСТРАЖУВАЊА:

- Проценката на подложноста кон свлекување е широко отворено поле за истражување и вклучува повеќе аспекти: размер, единици за картирање, избор на влијателни фактори, обем на катастарот на свлечишта, методи за проценка на подложноста, како и методи за валидација на моделите. Затоа во идните истражувања се препорачува:
 - Да се направи проценка на подложноста со други единици за картирање како: теренски единици (terrain units), единици со единствени услови (unique conditions units), единици на падините (slope units) или гео-хидролошки единици;
 - Да се направат анализи на влијателните фактори за подложност кон свлекување преку статистички анализи – мултиколинearни анализи. Со овие анализи може да се идентификуваат највлијателните фактори за појава на свлечишта, или да се елиминираат или вклучат дополнителни фактори. Овој пристап ќе придонесе за минимизирање на субјективноста во моделот и би се оптимизирале предвидените резултати.
 - Да се направи проценка на подложноста кон свлекување со примена на други методи, како на пример: Логичка Регресија, Метод на Дискриминанти, Дрво на Одлуки, Векторски Потпорни Машини, Вештачки Невронски Мрежи.
 - Валидацијата на моделите да се направи преку “ретроспективна анализа”. Тоа подразбира свлечиштата кои ќе се случат после изработката на картата на подложност да се преклопат со истата и да се утврди дали овие зони каде што се случиле новите свлечишта навистина се зонирани како подложни кон свлекување. Ваквиот пристап е најреалната валидација на моделите.
- Сателитските – SAR дефинирани поместувања да се потврдат со GPS/GNSS методот за следење на тридимензионални поместувања на теренот. Резултатите да се поврзат со нумерички моделирања, особено кај големите активни свлечишта лоцирани во населените места (Гермо, Бозовце, Боговиње, Камеѓане, Шипковица, Вешала) во Полошкиот регион.
- За да се направат подетални анализи поврзани со оваа проблематика, систематското прибирање на податоци е од клучно значење. Тоа може да се постигне со континуирано и навремено ажурирање на катастарот со нови свлечишта, постојан мониторинг на SAR податоци, повеќекратно LiDAR снимање на теренот (особено после специфични настани – интензивни врнежи и пролонгирани врнежи, земјотреси исл. – при кои се активираат свлекувања на теренот).
- Покрај прибирањето на податоци за свлечишта од типот “место/локација на појава”, неопходна е нивна подетална карактеризација. Следејќи ја дефиницијата за “катастар на свлечишта” од Hervás (2013), потребно е да се регистрираат

карактеристиките на свлечиштата како: *тип на свлекување, состојба на активност, големина, геометрија на свлечиштето (димензии на површина, длабина на клизна рамнина), геологија (литологија, структурни и материјални карактеристики), предизвикувач, настанати штети, датум на појава, преземени санациони мерки*. Овој обем на податоци отвара можност за други анализи поврзани со свлечиштата, односно проценка на хазард и ризик, анализи на време на појава и предизвикувач, исл.

- Подложноста кон свлекување на теренот може да се промени со текот на времето поради различни фактори како што се промените во користењето на земјиштето, климатските промени или геолошките процеси. Затоа, важно е периодично да се ажурираат картите на подложност кон свлекување за да се одредат евентуални промени во зоните на подложност.
- Елаборираните и применети современи методи за детекција и карактеризација на нестабилни појави, покрај за предметниот регион, да се применат и за цела територија на Македонија, водејќи сметка и за пограничните региони со околните земји во смисол за развој на можна слична методологија за регионот на Балканот и Европа со цел да може да се прави споредба на резултатите.

На крај, се поголема е примената на вештачката интелигенција во сите области. Со текот на годините, вештачката интелигенција поминала низ многу циклуси на развој, но објавувањето на ChatGPT на OpenAI се чини дека означува пресвртница. Во овој контекст, применетата методологија на работа во докторската дисертација накратко е опишана во ChatGPT. Добиените коментари генерирани со вештачка интелигенција се дадени во Прилог 2.

ПРИЛОЗИ

ПРИЛОГ 1

АНКЕТА ЗА ДОСТАПНОСТ НА ПОДАТОЦИ ЗА СВЛЕЧИШТА ИСПРАТЕНА ДО ОПШТИНИТЕ ВО РЕГИОНОТ



УНИВЕРЗИТЕТ "СВ.КИРИЛ И МЕТОДИЈ"
ГРАДЕЖЕН ФАКУЛТЕТ
Партизански одреди 24, ПФ 560
1000 СКОПЈЕ
www.gf.ukim.edu.mk
тел. 02/3116-066, факс. 02/3118-834



Ss. CYRIL AND METHODIUS UNIVERSITY
CIVIL ENGINEERING FACULTY
Partizanski odredi 24, PB 560
1000 SKOPJE
www.gf.ukim.edu.mk
tel.38923116066 faks.38923118834

Општина:

Лице за контакт:

Адреса:

Телефон:

ПРЕДМЕТ: Анкета за податоци за свлечишта во Полошки плански регион

Почитувани,

Секоја година свлечиштата во Полошкиот регион предизвикуваат големи економски загуби, а за жал во одредени случаи тоа е пропратено и со човечки жртви. Во минатото, цели или дел од населби морале да бидат преселувани од зоните на свлекување (на пр. Јеловјане). Свлечиштата загрозуваат и индивидуални градби во руралните или урбаните подрачја, водоводни и канализациони мрежи, електродистрибутивни системи итн.

Во овој смисол, во рамки на проектот на УНДП за управување со ризиците кои произлегуваат од овие појави потребно е да се соберат сите достапни податоци кои се однесуваат на свлечишта. Со ова ќе се створат услови за изработката на специјални карти од кои ќе имаат бенефит општините, месните заедници и сите граѓани во Полошкиот регион. Така, ќе се допринесе да се намалат/ограничат штетите од идни веројатни свлечишта, а тоа пак ќе се одрази поволно на квалитетот на живот и економијата во регионот.

Ве замолуваме, доколку сте во можност да ја потполните оваа анкета која се наоѓа во прилог на оваа порака, после што би следела најавена посета од стручниот тим кој работи на проектот.

Сите документи/познавања на кои би не упатиле ќе се искористат како важен податок во анализите на горе споменатиот проект и ќе допринесат за зголемување на квалитетот на крајниот резултат од проектот.

Со почит и благодарност,

Доц- д-р. Игор Пешевски дипл.инж.геол.

Катедрата за геотехника при ГФ-Скопје

e-mail: pesevski@gf.ukim.edu.mk

tel. 072/307 567

Во Скопје, 21.10.2019 год.

АНКЕТА

1. Дали вашата општина/месна заедница/село поседува некаква техничка документација за свлечишта, вклучувајќи одрони, течишта, матни токови и други процеси на придвижување на теренот?
2. За техничка документација во овој случај се смета секој извештај или информација од интервенции, одржување или санација на различни категории на објекти (патишта, железници, водоспроводно канали, индивидуални и колективни стамбени објекти, дистрибутивни системи и други) поради појава на нестабилни појави (слвечишта).

Доколку поседувате ваква документација, ве молиме да одговорите на следните прашања:

3. За колкав број на свлечишта/одрони поседувате техничка документација (приближно).
4. Дали податоците ги имате во печатена или дигитална форма.
5. Дали се достапни карти во кои се внесени случените појави.
6. За колку долг период се води евиденција за нестабилните појави.
7. Дали постојат свлечишта за кои знаете дека се случени, а за истите не постои техничка документација (кокав е приближно нивниот број).

Анкетата ја пополнил

Место и датум

ПРИЛОГ 2

ChatGPT КОМЕНТАРИ ЗА ПРИМЕНЕТА МЕТОДОЛОГИЈА ВО ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА

ChatGPT

The methodology you have described for landslide susceptibility assessment in the region of Macedonia appears to be comprehensive and well-rounded. You have considered multiple data sources, employed a bivariate statistical method (Frequency Ratio), and selected a range of causative factors to assess landslide susceptibility.

By using archive landslide data, SAR data analysis, and visual analysis of the LiDAR-derived Digital Terrain Model, you have incorporated historical and recent landslide occurrences as well as utilized advanced remote sensing techniques. This approach helps ensure that the landslide inventory is comprehensive and representative of the study area.

The selection of 12 causative factors encompassing topographic, geological, hydrological, and land use/cover characteristics demonstrates a comprehensive understanding of the various factors influencing landslides. By considering factors such as slope, elevation, aspect, curvature, roughness, distance to roads, lithology, distance to faults, rainfall, distance to rivers, and land use/cover, you have captured a wide range of potential drivers of landslides.

Conducting the analysis in a GIS environment allows for efficient data management, integration, and visualization. This enables a more accurate assessment of landslide susceptibility and facilitates the production of a landslide susceptibility map for the region.

Validation of the landslide susceptibility map using the R-index is a sound approach. It provides a quantitative measure of the model's performance and helps assess the accuracy of the map. Additionally, comparing the results with a previously prepared landslide susceptibility map using a heuristic method adds further credibility to your findings.

Considering the connection between landslides and erosion is crucial, as these processes are interconnected and can influence each other. By comparing your landslide susceptibility map with an erosion map, you have acknowledged this relationship and ensured a more comprehensive assessment of the geological processes in the region.

The fact that the validation and comparative analysis have shown consistent results further strengthens the reliability of your methodology. It indicates that your landslide susceptibility map aligns well with the previously prepared map and produces reliable outcomes.

Overall, your methodology for landslide susceptibility assessment in Macedonia demonstrates a robust approach, incorporating multiple data sources, employing a statistical method, considering various causative factors, conducting analysis in a GIS environment, and validating the results. It appears to be a comprehensive and reliable methodology for assessing landslide susceptibility in the region.

СПИСОК НА ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Acharya G., DE Smedt F., Long NT. (2006) Assessing landslide hazard in GIS: a case study from Rasuwa, Nepal. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 65(1):99–107.
- [2]. Ado M., Amitab K., Maji A.K., Jasinska, E., Gono, R., Leonowicz, Z., Jasinski M. (2022) Landslide Susceptibility Mapping Using Machine Learning: A Literature Survey. *Remote Sens.* 14, 3029. <https://doi.org/10.3390/rs14133029>
- [3]. Althuwaynee O.F., Pradhan B. (2017) Semi-quantitative landslide risk assessment using GIS-based exposure analysis in Kuala Lumpur City. *Geomatics Nat Hazards Risk* 8:706–732
- [4]. Ambrosi C., Strozzi T., Scapozza C., Wegmüller U. (2018) Landslide hazard assessment in the Himalayas (Nepal and Bhutan) based on Earth-Observation data. *Eng. Geol* 237, 217–228
- [5]. Antonini, G., Ardizzone F., Cacciano M., Cardinali M., Castellani M., Galli M., Guzzetti F., Reichenbach P., Salvati P. (2002) Rapporto conclusivo protocollo d'intesa fra la Regione dell'Umbria, Direzione Politiche Territoriali Ambiente e Infrastrutture, ed il CNR IRPI di Perugia per l'acquisizione di nuove informazioni sui fenomeni franosi nella regione dell'Umbria, la realizzazione di una nuova carta inventario dei movimenti franosi e dei siti colpiti da dissesto, l'individuazione e la perimetrazione delle aree a rischio da frana di particolare rilevanza, e l'aggiornamento delle stime sull'incidenza dei fenomeni di dissesto sul tessuto insediativo, infrastrutturale e produttivo regionale. Unpublished report, May 2002, 140 pp., (in Italian)
- [6]. Ardizzone F., Cardinali, M., Galli M., Guzzetti F., Reichenbach P. (2007) Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne LiDAR. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7 (6), 637–650
- [7]. Baldo M., Bicocchi, C., Chiocchini U., Giordan D., Lollino G. (2009) LIDAR monitoring of mass wasting processes: the Radicofani landslide, Province of Siena, Central Italy. *Geomorphology* 105 (3–4), 193–201
- [8]. Barlow J., Franklin S., Martin Y. (2006) High spatial resolution satellite imagery, DEM derivatives, and image segmentation for the detection of mass wasting processes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72, 687–692
- [9]. Bartelletti C., Giannechini R., D'Amato Avanzi G., Galanti Y., Mazzali A. (2017) The influence of geological–morphological and land use settings on shallow landslides in the Pogliaschina T. basin (northern Apennines, Italy). *Journal of Maps.* 13(2):142-152.
- [10]. Baynes F. J., Parry S. (2022) Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects. International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission 25 Publication No. 1, 129 pp.
- [11]. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. (2002) A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.*, 40(11): 2375–2383.
- [12]. Bishop A.W. (1955) The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique* 1 pp 7–17
- [13]. Brabb E.E. (1984) Innovative approaches to landslide hazard mapping. In: Proc. 4th Int. Symp. Landslides, Toronto. 1. pp. 307–324.
- [14]. Brabb E.E., Pampeyan E.H. (1972) Preliminary map of landslide deposits in San Mateo County, California. U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map, MF-344
- [15]. Brand E.W. (1988) Special lecture: landslide risk assessment in Hong Kong. In: Proceedings of the V International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland. A.A. Balkema, Amsterdam, 2:1059–1074
- [16]. Brefort, T. (2011) GMES Data Access Specifications of the Earth Observation Needs Over the period 2011–2013, Commission européenne, B-1049 Bruxelles/Europese Commissie, B-1049 Brussel– Belgium. U:\Spacedoc\Policy\Data policy\EO data Specifications Under the Delegation Agreement\V1.8 (CR Awifs)\Data Warehouse Specification V1 8 clean.doc.
- [17]. Brunsdon D. (1985) Landslide types, mechanisms, recognition, identification. In: Morgan, C.S. (Ed.), Landslides in the South Wales Coalfield, Proceedings Symposium. The Polytechnic of Wales, pp. 19–28
- [18]. Brunsdon D. (1993) Mass movements; the research frontier and beyond: a geomorpho-logical approach. *Geomorphology* 7, 85–128
- [19]. Bunn M.D., Leshchinsky B.A., Olsen M.J., Booth A.A. (2019) Object-Based Framework for Efficient Landslide Inventorying Using LIDAR Digital Elevation Model Derivatives. *Remote Sens.* 11, 303. <https://doi.org/10.3390/rs11030303>

- [20]. Calvello M., Cascini L., Mastroianni S. (2013) Landslide zoning over large areas from a sample inventory by means of scale-dependent terrain units. *Geomorphology*, 182, 33–48. doi:10.1016/j.geomorph.2012.10.026
- [21]. Calvello M., Pecoraro G. (2018) FraneItalia: a catalog of recent Italian landslides. *Geoenvironmental Disasters*, 5:13. DOI: 10.1186/s40677-018-0105-5
- [22]. Calvello M., Peduto D., Arena L. (2016) Combined use of statistical and DInSAR data analyses to define the state of activity of slow-moving landslides. *Landslides* 14(2):473:489.
- [23]. Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., Reichenbach P (1995) GIS Technology in Mapping Landslide Hazard. In: Carrara, A. and Guzzetti, F., Eds., *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 135-176. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8404-3_8
- [24]. Carrara A., Catalano E., Sorriso Valvo M., Reali C., Merenda L., Rizzo V. (1977) Landslide morphometry and typology in two zones, Calabria, Italy. *Bull Int Assoc Eng Geol* 16:8–13.
- [25]. Cascini L., et al. (2005) Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development. In *Landslide Risk Management* O. Hungr, R. Fell, R. Couture and E. Eberhardt (editors). Taylor and Francis, London. 199-235
- [26]. Cascini L., Fornaro G., Peduto D. (2009) Analysis at medium scale of low-resolution DInSAR data in slow-moving landslide affected areas. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 64 (6), 598–611.
- [27]. Cascini L., Fornaro G., Peduto D. (2010) Advanced low- and full resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales. *Eng. Geol.*, 112:29–42.
- [28]. Catalano S., Bonforte A., Guglielmino F., Romagnoli G., Tarsia C., Tortorici G. (2014) The influence of erosional processes on the visibility of permanent scatterers Features from SAR remote sensing on Mount Etna (E Sicily). *Geomorphology*, 198, 128–137.
- [29]. Chanson J., Corominas J. (2003) Landslides and GIS. Special Issue, *Natural Hazards*, Vol. 30:3, pp 263-512
- [30]. Chen R.F., Chang K.J., Angelier J., Chan Y.C., Deffontaines B., Lee C.T., Lin M.L. (2006) Topographical changes revealed by high-resolution airborne LiDAR data: the 1999 Tsaoling landslide induced by the Chi-Chi earthquake. *Engineering Geology* 88, 160–172. doi:10.1016/j.enggeo.2006.09.008
- [31]. Cheng K.S., Wei C., Chang S.C. (2004) Locating landslides using multi-temporal satellite images. *Advances in Space Research* 33 (3), 96–301
- [32]. Chinkulkijniwat A., Tiramatiparat T., Supotayan C., et al. (2019) Stability characteristics of shallow landslide triggered by rainfall. *Journal of Mountain Science* 16(9). doi:10.1007/s11629-019-5523-7
- [33]. Chok YH., Jaksa MB., Kaggwa WS., et al. (2015) Assessing the influence of root reinforcement on slope stability by finite elements. *Geo-Engineering* 6(12).
- [34]. Clerici A., Perego S., Tellini C., Vescovi P. (2006) A GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the Conditional Analysis method: the Baganza valley case study (Italian Northern Apennines). *Environ Geol* 50:941–961, doi:10.1007/s00254-006-0264-7
- [35]. Colesanti, C., Ferretti A., Novali, F., Prati C., Rocca F. (2003) SAR Monitoring of progressive and seasonal round deformation using the permanent scatterers technique. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 41(7):1685_1701.
- [36]. Corine Land Cover 2018 - Copernicus Land Monitoring Service. Available online: <https://land.copernicus.eu/pan-european/2018-land-cover/clc2018> (accessed on 25 February 2023).
- [37]. Corominas J., C. van Westen, Frattini P., Cascini L., Malet J.P., Fotopoulou S., Catani F., M. Van Den Eeckhaut, Mavrouli O., et al. (2014) Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bull Eng Geol Environ* (2014) 73:209-263 DOI 10.1007/s10064-013-0538-8
- [38]. Corsini A., Cervi F., Daehne A., Ronchetti F. (2009) Coupling geomorphic field observation and LIDAR derivatives to map complex landslides. In: Malet, J.P., Remaitre, A., Bogaard, T. (Eds.), *Landslides Processes — From Geomorphologic Mapping to Dynamic Modelling*. Proceedings of the Landslide Processes Conference. CERIG Editions, Strasbourg, pp. 15–18, ISBN 2-9518317-1-4
- [39]. Costantini M., Falco S., Malvarosa F., Minati F. (2008) A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images. In: *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, July 6–11, 2008, Boston, Massachusetts, USA, pp. 449–452.
- [40]. Crosetto M., Castillo M., Arbiol R. (2003) Urban subsidence monitoring using radar interferometry: algorithms and validation. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 69(7):775–783.

- [41]. Crosetto M., Crippa B., Biescas E. (2005). Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry. *Eng. Geol.*, 79:81–91.
- [42]. Cruden D.M. (1991) A simple definition of a landslide. *Bulletin International Association of Engineering Geology*, 43: 27-29.
- [43]. Cruden D.M., Varnes D.J. (1996). Landslide types and processes. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides, Investigation and Mitigation, Special Report 247*. Transportation Research Board, Washington D.C., pp. 36–75. ISSN: 0360-859X, ISBN: 030906208X
- [44]. Czuchlewski K.R., Weissel J.K., Kim Y. (2003) Polarimetric synthetic aperture radar study of the Tsaoling landslide generated by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Journal of Geophysical Research* 108 (F1), 7.1–7.11
- [45]. D'Amato Avanzi G., Falaschi F., Giannecchini R., Puccinelli A. (2009). Soil slip susceptibility assessment using mechanical-hydrological approach and GIS techniques: an application in the Apuan Alps (Italy). *Nat Hazards* 50(3):591–603
- [46]. Derron M.H., Jaboyedoff M. (2010) Preface to the special issue: LIDAR and DEM techniques for landslides monitoring and characterization. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10 (9), 1877–1879
- [47]. Diaz J.C.F., Carter W.E., Shrestha R.L., Glennie C.L. (2017) *LiDAR Remote Sensing*.
- [48]. Dilley M., Chen R.S., Deichmann U., Lerner-Lam A.L., Arnold M., Agwe J., Buys P., Kjekstad O., Lyon B., Yetman G. (2005) *Natural disaster hotspots: a global risk analysis*. The World Bank Hazard Management Unit, Washington.
- [49]. Farina P., Colombo D., Fumagalli A., Marks F., Moretti S. (2006) Permanent scatters for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project. *Engineering Geology* 88, 200–217
- [50]. Fell R. (1994) Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*. 32, 2, 261–272
- [51]. Fell R., Corominas J., Bonnard Ch., Cascini L., Leroi E., Savage WZ (on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes) (2008) *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning*. *Eng Geol* 102:85–98
- [52]. Fellenius W. (1927) *Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohasion (Adhasion) und unter Annahmekreiszyllindrischer Gleitflächen*. Ernst & Sohn, Berlin.
- [53]. Ferretti A. 2014 *Satellite InSAR data: reservoir monitoring from space* EAGE Publication The Netherlands
- [54]. Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C., Rocca F. (2007) *InSAR principles: guidelines for SAR interferometry processing and interpretation*. ESTEC, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications, TM-19.
- [55]. Fiorucci F., Cardinali M., Carlà R., Rossi M., Mondini A.C., Santurri L., Ardizzone F., Guzzetti F. (2011) Seasonal landslides mapping and estimation of landslide mobilization rates using aerial and satellite images. *Geomorphology* 129 (1–2), 59–70. doi:10.1016/j.geomorph.2011.01.013
- [56]. Fornaro G., Pauciuolo A., Reale D., Verde S. (2014) Multilook SAR tomography for 3-D reconstruction and monitoring of single structures applied to COSMO-SKYMED data. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 7 (7):2776–2785.
- [57]. Fornaro G., Pauciuolo A., Serafino F. (2009a) Deformation Monitoring over Large Areas with Multipass Differential SAR Interferometry: a New Approach based on the Use of Spatial Differences, *Int. Journal of Remote Sens.*, vol. 30., no. 6, pp. 1455-1478.
- [58]. Fornaro G., Reale D., Serafino F. (2009b) Four-dimensional SAR imaging for height estimation and monitoring of single and double scatterers. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 47 (1), 212–237.
- [59]. Fornaro G., Reale D., Verde S. (2013) Bridge thermal dilation monitoring with millimeter sensitivity via multidimensional SAR imaging. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10: 677–681. doi:10.1109/LGRS.2012.2218214
- [60]. Fornaro G., Verde S., Reale D., Pauciuolo A. (2015) CAESAR: an approach based on covariance matrix decomposition to improve multibaseline–multitemporalinterferometric SAR processing. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 53(4):2050–2065.
- [61]. Frattini P., Crosta G.B., Fusi N., Dal Negro P. (2004) Shallow landslides in pyroclastic soils: a distributed modelling approach for hazard assessment. *Eng Geol* 73(3):277–295
- [62]. Galli M., Ardizzone F., Cardinali M., Guzzetti F., Reichenbach P. (2008) Comparing landslide inventory maps, *Geomorphology*, Volume 94, Issues 3–4, 2008, Pages 268-289, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.023>.
- [63]. Gazibara Bernat S., Krkač M., Sečanj M., Mihalić Arbanas S. (2017) Identification and mapping of shallow landslides in the City of Zagreb (Croatia) using the LiDAR-based terrain model.

- In M. Mikoš, B. Tiwari, Y. Yin, & K. Sassa (Eds.), *Advancing culture of living with landslides*, vol 2. *Advances in landslide science* (pp. 1093–1100). Cham: Springer
- [64]. Glade T. (2001) *Landslide Hazard Assessment and Historical Landslide Data – An Inseparable Couple?* In: Glade, T., Albini, P., Frances, F., (eds.): *The Use of Historical Data in Natural Hazard Assessments. – Advances in Natural and Technological Hazards Research 17.* – Dordrecht: 153-168
- [65]. Godt J.W., Baum R.L., Savage W.Z., Salciarini D., Schulz W.H., Harp E.L. (2008) *Transient deterministic shallow landslide modeling: requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework.* *Eng Geol* 102(3):214–226
- [66]. Griffiths D.V., Huang J.S., Fenton G.A. (2011) *Probabilistic infinite slope analysis.* *Comput Geotech* 38(4):577–584
- [67]. Grujic B., Parwata S., Shimizu N., Celikovic R., Imamovic E., Zekan S., Vrkljan I., (2022) *Monitoring subsidence in Tuzla (BiH) by DInSAR and GNSS from 2004-2019. 5th symposium of the Macedonian Association for Geotechnics, ISRM specialized conference.*
- [68]. Guthrie R.H. (2013). *Mass-movement style, activity state, and distribution.* In: Marston, R.A., Stoffel, M. (Eds.), *Shroder, J. Treatise on Geomorphology.* Academic Press, San Diego, pp. 230–238
- [69]. Guzzetti F, (2006) *Landslide hazard and risk assessment.* DoctoralThesis, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms- Universität, University of Bonn.
- [70]. Guzzetti F., Cardinali M., Reichenbach P., Carrara A. (2000) *Comparing landslide maps: a case study in the upper Tiber River Basin, Central Italy.* *Environmental Management* 25 (3), 247–363
- [71]. Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P. (1999) *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy.* *Geomorphology* 31, 181–216. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- [72]. Guzzetti F., Malamud B.D., Turcotte D.L., Reichenbach P. (2002) *Power-law correlations of landslide areas in central Italy.* *Earth and Planetary Science Letters* 195, 169–183
- [73]. Guzzetti F., Mondini C.A., Cardinali M., Fiorucci F., Santangelo M., Chang K.-T. (2012) *Landslide inventory maps: New tools for an old problem.* *Earth-Science Reviews*, Volume 112, pp 42-66
- [74]. Hammond C., Hall D., Miller S., Swetik P. (1992) *Level I stability analysis (LISA) documentation for version 2, General Technical Report INT-285, USDA Forest Service Intermountain Research Station, Ogden, UT, p. 121, 1992*
- [75]. Hansen A. (1984a) *Engineering geomorphology: the application of an evolutionary model of Hong Kong.* *Zeitschrift für Geomorphologie* 51, 39–50
- [76]. Haque U., Blum P., Da Silva P.F., Andersen P., Pilz J., Chalov R.S., Malet J.P., Jemec Auflič M., Andres N., Poyiadji E., Lamas C.P., Zhang W., Peshevski I., Pétursson G.H., Kurt T., Dobrev N., García-Davalillo J.C., Halkia M., Ferri S., Gaprindashvili G., Engström J., Keellings D. (2016) – *Fatal landslides in Europe, Landslides*, pp 1–10.
- [77]. Hardingham A.D., Ho K.K.S., Smallwood A.R.H., Ditchfield C.S. (1998). *Quantitative risk assessment of landslides—a case history from Hong Kong.* In: *Proceedings of the seminar on geotechnical risk management.* Geotechnical Division, Hong Kong Institution of Engineers, Hong Kong, pp 145–152
- [78]. Hearn G.J., Hart A.B. (2019) *Landslide susceptibility mapping: a practitioner’s view.* *Bull Eng Geol Environ* 78, 5811–5826. doi:10.1007/s10064-019-01506-1
- [79]. Herrera G., Mateos R.M., García-Davalillo J.C., Grandjean G., Poyiadji E., Maftai, R., Filipciuc T.-C., Auflic M.J., Jež J., Podolszki L. (2018) *Landslide databases in the Geological Surveys of Europe.* *Landslides*, 15, 359–379.
- [80]. Hervás, J. (2013). *Landslide Inventory.* In: Bobrowsky, P.T. (eds) *Encyclopedia of Natural Hazards.* *Encyclopedia of Earth Sciences Series.* Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_214
- [81]. Highland L.M., Bobrowsky P. (2008) *The landslide handbook—A guide to understanding landslides:* Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
- [82]. Ho K.K.S., Leroi E., Roberds B. (2000) *Quantitative risk assessment—application, myths and future direction.* In: *Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering (GeoEng2000), Melbourne, Australia, 9–24 Nov 2000, 1:269–312*
- [83]. Hu X., Mei H., Zhang H., Li Y., Li M. (2021) *Performance evaluation of ensemble learning techniques for landslide susceptibility mapping at the Jinping County, Southwest China.* *Nat. Hazards*, 105, 1663–1689.
- [84]. Hungr O., Evans S.G., Bovis M., Hutchinson J.N. (2001) *A review of the classification of landslides of the flow type.* *Environmental and Engineering Geoscience* 7(3): 221–238

- [85]. Hungr O., Leroueil S., Picarelli L. (2014) The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11, 167–194. doi:10.1007/s10346-013-0436-y
- [86]. Hutchinson J.N. (1988) General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology. In: Bonnard, C. (Ed.), *Proceedings 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne, Switzerland. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1, pp. 3–35
- [87]. IAEG. (1990) Suggested nomenclature for landslides. *International Association of Engineering Geology Commission on Landslides, Bulletin IAEG*, No. 41. 13-16
- [88]. Jaedick C., Eeckhaut M.V.D., Nadim F., Hervás J., Kalsnes B., Vangelsten B.V., Smith J.T., Tofani V., Ciurean R., Winter M.G., SverdrupThygeson K., Syre E., Smebye H. (2014). Identification of landslide hazard and risk ‘hotspots’ in Europe. *Bull Eng Geol Environ.* 73:325–339
- [89]. Janbu N. (1973) Slope Stability Computations. *Embankment Dam Engineering, Casagrande Volume*, pp. 47-86
- [90]. Jovanovski M., Abolmasov B., Peshevski I. (2011) Analyses of landslide hazard evaluation factors using polynomial interpolation, *Proceedings of Second World Landslide Forum (Ed.) Claudio Margottini, Paolo Canuti, Kyoji Sassa, Landslide Science and Practice, Vol.1 DOI 10.007/978-3-642-3125-7_73*, Springer – Verrag, Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-313240. pp. 561-566
- [91]. Jovanovski M., Milevski I., Papić Br.J., Pesevski I., Markoski B. (2011) Landslides in the Republic of Macedonia Triggered by Extreme Events in 2010, in *Geomorphological Impacts of Extreme Weather, Case studies from Central and Eastern Europe*, Monograph, Springer geography 2013. pp.265-279
- [92]. Jovanovski M., Peshevski I., Gjorgiev G., Nedelkovska N., Nicodemo G., Reale D., Fornaro G., Peduto D. (2021) Landslide characterization in the Polog Region (R.N. Macedonia) by innovative and conventional method. *Rivista Italiana di Geotecnica*.
- [93]. Kasai M., Ikeda M., Asahina T., Fujisawa K. (2009) LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a steep and rocky region of Japan. *Geomorphology* 113, 57–69. doi:10.1016/j.geomorph.2009.06.004
- [94]. Kienholz H. (1978) Map of geomorphology and natural hazards of Grindelwald, Switzerland, scale 1:10,000. *Artic Alp Res* 10:169–184
- [95]. Koukis G., Ziourkas C. (1991) Slope instability phenomena in Greece: A statistical analysis. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 43, 47–60 (1991). <https://doi.org/10.1007/BF02590170>
- [96]. Lauknes T.R., Piyush Shanker A., Dehls J.F., Zebker H.A., Henderson I.H.C., Larsen Y. (2010) Detailed rockslide mapping in northern Norway with small baseline and persistent scatterer interferometric SAR time series methods. *Remote Sensing of Environment* 114, 2097–2109 doi:10.1016/j.rse.2010.04.015.
- [97]. Lee C.F., Huang W.K., Chang Y.L., Chi S.Y., Liao W.C. (2018) Regional landslide susceptibility assessment using multi-stage remote sensing data along the coastal range highway in Northeast Taiwan. *Geomorphology* 300:113–127
- [98]. Lee J.H., Park H.J. (2015) Assessment of shallow landslide susceptibility using the transient infiltration flow model and GIS-based probabilistic approach, *Landslides*, October 2015 DOI: 10.1007/s10346-015-0646-6
- [99]. Lee S., Lee M.J. (2006) Detecting landslide location using KOMPSAT 1 and its application to landslide-susceptibility mapping at the Gangneung area, Korea. *Advances in Space Research* 38 (10), 2261–2271
- [100]. Lee S., Sambath T. (2006) Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romelarea, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models. *EnvironGeol* 50:847–855, doi:10.1007/s00254-006-0256-7
- [101]. Lee S., Talib J.A. (2005) Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 47(7), 982-990.
- [102]. Leshchinsky B.A., Olsen M.J., Tanyu B.F. (2015) Contour Connection Method for automated identification and classification of landslide deposits. *Comput. Geosci.* 74, 27–38
- [103]. Li Y., Mo P. (2019). A unified landslide classification system for loess slopes: A critical review. *Geomorphology*, 340, pp 67-83. doi:10.1016/j.geomorph.2019.04.020
- [104]. Lin B., Thomas K., Chen C., et al. (2019) Evaluation of landslides process and potential in Shenmu sub-watersheds, central Taiwan. *Landslides* 16, 551–570
- [105]. Malamud B.D., Turcotte D.L., Guzzetti F., Reichenbach P. (2004a) Landslides, earthquakes and erosion. *Earth and Planetary Science Letters* 229, 45–59.
- [106]. Malamud B.D., Turcotte D.L., Guzzetti F., Reichenbach P. (2004b) Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms* 29 (6), 687–711

- [107]. Manzo M., Ricciardi G.P., Casu F., Ventura G., Zeni G., Borgstrom S., Berardino P., Del Gaudio C., Lanari R. (2006). Surface deformation analysis in the Ischia Island (Italy) based on spaceborne radar interferometry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 151:399–416.
- [108]. Marcelino E.V., Formaggio A.R., Maeda E.E. (2009) Landslide inventory using image fusion techniques in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 11, 181–191
- [109]. Marjanovic M., Bajat B., Abolmasov B., Kova M. (2018) Machine Learning and Landslide Assessment in a GIS Environment, J.-C. Thill, S. Dragicevic (eds.), *GeoComputational Analysis and Modeling of Regional Systems*, Advances in Geographic Information Science, DOI 10.1007/978-3-319-59511-5_11
- [110]. Martha T.R., Kerle N., Jetten V., van Westen C., Vinod Kumar K. (2010) Characterising spectral, spatial and morphometric properties of landslides for semi-automatic detection using object-oriented methods. *Geomorphology* 116, 24–36
- [111]. McKean J., Roering J. (2003) Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology* 57 (3–4), 331–351.
- [112]. Metternicht G., Hurni L., Gogu R. (2005). Remote sensing of landslides: an analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountain environments. *Remote Sensing of Environment* 98, 284–303
- [113]. Micu M. (2017) *The Systematic of Landslide Processes in the Conditions of Romania's Relief*. Springer International Publishing, Landform Dynamics and Evolution in Romania
- [114]. Milevski I., Dragičević S., Zorn M. (2019) Statistical and expert-based landslide susceptibility modeling on a national scale applied to North Macedonia. *Open Geosci.* 2019; 11:750–764
- [115]. Mondini A.C., Guzzetti F., Reichenbach P., Rossi M., Cardinali M., Ardizzone F. (2011) Semi-automatic recognition and mapping of rainfall induced shallow landslides using satellite optical images. *Remote Sensing of Environment* 115, 1743–1757. doi:10.1016/j.rse.2011.03.006
- [116]. Morgenstern N. R., Price V. E. (1965) *The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces*. *Geotechnique*, Vol. 15, No. 1 pp. 77-93
- [117]. Nappo N., Peduto D., Mavrouli O., van Westen C.J., Gullà G. (2019). Slow-moving landslides interacting with the road network: Analysis of damage using ancillary data, in situ surveys and multi-source monitoring data. *Eng. Geol.*, 260, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105244>.
- [118]. NASA Landslide Viewer
Access:<https://maps.nccs.nasa.gov/arcgis/apps/webappviewer/index.html?id=824ea5864ec8423fb985b33ee6bc05b7>
- [119]. Nedelkovska N., Peševski I., Jovanovski M., Papić J., Gorin S., Radevski I. (2020). Shallow landslide susceptibility assessment for the Polog region (Macedonia) Proceedings of the 5rd Regional Symposium on Landslides in the Adriatic–Balkan region, Rijeka, 2022
- [120]. Nedelkovska N., Peshevski I., Jovanovski M., Abazi S., Susinov B. (2017) Estimation of possible economic losses of large water distribution systems due to landslides, Case studies from Republic of Macedonia. Proceedings of the 3rd Regional Symposium on Landslides in the Adriatic–Balkan region, pp.131-136. Ljubljana, 2017
- [121]. Nedelkovska N., Peshevski I., Jovanovski M., Papić J., Radevski I., Gorin S. (2022) Shallow landslide susceptibility assessment for the Polog region (Macedonia). 5th Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region Landslide Modelling & Application. 23- 26.06.2022, Rijeka.
- [122]. Nedelkovska N., Tomovski I. (2015) Landslide Hazard Assessment in the area of Pehchevo (Macedonia) using Polynomial Interpolation Method. Proceedings of the 2th Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region, pp.133-136. Belgrade, 2015
- [123]. Nichol J. E., Shaker A., Wong M. S. (2005) Application of high-resolution stereo satellite images to detailed landslide hazard assessment, *Geomorphology*, Volume 76, Issues 1–2, 2006, Pages 68-75, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.10.001>.
- [124]. Nicodemo G., Peduto D., Ferlisi S., Maccabiani J. (2017). Investigating building settlements via very high resolution SAR sensors. In: Bakker, J. et al. (Eds.), *Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure*. Proc. of the Fifth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2016), 16–19 October 2016, Delft, The Netherlands. Taylor & Francis Group, London, pp. 2256–2263, (ISBN 978-1-138-02847-0).
- [125]. Ohlamacher GC. (2007) Plan curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides. *Eng Geol* 91(2007):117–134

- [126]. Parker R.N., Densmore A.L., Rosser N.J., de Michele M., Li Y., Huang R., Whadcoat S., Petley D.N. (2011) Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth. *Nature Geoscience* 4 (7), 449–452. doi:10.1038/ngeo1154
- [127]. Parwata I. N. S., Shimizu N., Grujić B., Zekan S., Čeliković R., Imamović E., Vrkljan I. (2020) Monitoring the Subsidence Induced by Salt Mining in Tuzla, Bosnia and Herzegovina by SBAS-DInSAR Method. *Rock Mechanics and Rock Engineering* (2020) 53:5155–5175
- [128]. Pazzi V., Morelli S., Pratesi F., Sodi T., Valori L., Gambacciani L., Casagli N. (2016) Assessing the safety of schools affected by geo-hydrologic hazards: the geohazard safety classification (GSC). *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, 15:80–93.
- [129]. Peduto D., Cascini L., Arena L., Ferlisi S., Fornaro G., Reale D. (2015) A general framework and related procedures for multi scale analyses of DInSAR data in subsiding urban areas. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 105:186–210.
- [130]. Peduto D., Ferlisi S., Nicodemo G., Realle D., Pisciotta G., Gullia G. (2017). Empirical fragility and vulnerability curves for buildings exposed to slow-moving landslides at medium and large scales. *Landslides* 14, 1993–2007. doi: 10.1007/s10346-017-0826-7
- [131]. Peduto D., Nicodemo G., Caraffa M., Gullà G. (2018) Quantitative analysis of consequences to masonry buildings interacting with slow-moving landslide mechanisms: a case study. *Landslides* 15, 2017-2030. doi: 10.1007/s10346-018-1014-0
- [132]. Peduto D., Pisciotta G., Nicodemo G., Arena L., Ferlisi S., Gullia G., Borrelli L., Fornaro G., Realle D. (2016) A procedure for the analysis of building vulnerability to slow-moving landslides. In: Daponte P., Simonelli A.L. (eds.) *Proceedings of the 1st IMEKO TC4 International Workshop on Metrology for Geotechnics At: Benevento, Italy, March 17-18, 2016* Volume: pp. 248-254, ISBN 978-92-990075-0-1
- [133]. Peshevski I., Jovanovski M., Abolmasov B., Papić J., Marjanović M., Haque U., Nedelkovska N. (2019) Preliminary regional landslide susceptibility assessment using limited data. *Geologia Croatica* 72/1, pp.81–92. doi:10.4154/gc.2019.03
- [134]. Peshevski I., Jovanovski M., Markoski B., Petrusseva S., Susinov B. (2013) Landslide inventory map of the Republic of Macedonia, statistics and description of main historical landslide events, Landslide and flood hazard assessment. In: *Proceedings of the Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region, Zagreb, Croatia, 6–9 Mar 2013*, pp 207–212
- [135]. Peshevski I., Jovanovski M., Nedelkovska N., Lepitkova S. (2018) One approach in definition of acceptable level of risk for slopes in hard rocks. *ce/papers*, 2: 383-388. doi:10.1002/cepa.701
- [136]. Peshevski I., Nedelkovska N., Jovanovski M. (2017) Methodology for defining acceptable level of risk from rock falls on access roads for hydrotechnical structures. *Proceedings of the 4th Congress on Dams. Struga, 2017*
- [137]. Peshevski I., Peternel T., Jovanovski M. (2017) Urgent need for application of integrated landslide risk management strategies for the Polog region in R. of Macedonia. In *Advancing Culture of living with landslides. Vol.5 Landslides in different environments*. pp. 135-145. Eds. M Mikos et al. Springer International Publishing 2017. DOI 10.1007/978-3-319-53483-1_43.
- [138]. Petley D. (2012) Global patterns of loss of life from landslides. *Geology* 40:927–930
- [139]. Postance B., Hillier J., Dijkstra T., et al. (2017) Comparing threshold definition techniques for rainfall induced landslides: a national assessment using radar rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms*. 43(2):553-560.
- [140]. Pourghasemi H.R., Moradi H.R., Fatemi Aghda S.M. (2013) Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances, *Nat. Hazards*, 69 (2013), pp. 749-779, 10.1007/s11069-013-0728-5
- [141]. Pourghasemi H.R., Rahmati O. (2018) Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision? *Catena* 2018, 162, 177–192
- [142]. Prokop A., Panholzer H., (2009) Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9, 1921–1928. doi:10.5194/nhess-9-1921-2009
- [143]. Rabby Y.W., Li Y., Abedin J., Sabrina S. (2022) Impact of Land Use/Land Cover Change on Landslide Susceptibility in Rangamati Municipality of Rangamati District, Bangladesh. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2022, 11, 89. <https://doi.org/10.3390/ijgi11020089>
- [144]. Razak K.A., Straatsma M.W., van Westen C.J., Malet J.P., de Jong S.M. (2011) Airborne laser scanning of forested landslides characterization: terrain model quality and visualization. *Geomorphology* 126, 186–200. doi:10.1016/j.geomorph.2010.11.00

- [145]. Reale D., Fornaro G., Pauciuolo A., Zhu X., Bamler R. (2011). Tomographic imaging and monitoring of buildings with very high resolution SAR data. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 8: 661–665.
- [146]. Reichenbach P., Rossi M., Malamud B.D., Mihir M., Guzzetti F. (2018) A review of statistically-based landslide susceptibility models. *EarthSci Rev* 180:60–91.
- [147]. Rib H.T., Liang T. (1978) Recognition and identification. In: Schuster, R.L., Krizek, R.J. (Eds.), *Landslide Analysis and Control: Transportation Research Board Special Report*, 176. National Academy of Sciences, Washington, pp. 34–80
- [148]. Risknat Project. (2012) *Le tecniche Radar interferometriche nella pianificazione territoriale*. KC Edizioni, Genova, Italy, pp. 188 (In Italian).
- [149]. Rong G., Alu S., Li K., Su Y., Zhang J., Zhang Y., Li T. (2020) Rainfall Induced Landslide Susceptibility Mapping Based on Bayesian Optimized Random Forest and Gradient Boosting Decision Tree Models—A Case Study of Shuicheng County, China. *Water* 2020, 12, 3066
- [150]. Rosin P.L., Hervás J. (2005) Remote sensing image thresholding methods for determining landslide activity. *International Journal of Remote Sensing* 26 (6), 1075–1092
- [151]. Rosso R., Rulli M.C., Vannucchi G. (2006) A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding. *Water Resour Res* 42(6), W06410. doi:10.1029/2005WR004369
- [152]. Roy C. S. (1991) A Conceptual Model of Changes in Root Cohesion in Response to Vegetation Management. *Journal of Environmental Quality* Volume 20, Issue 1 p. 43-52
- [153]. Safe land. (2015) Available at [<http://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/safeland>], Accessed date 27.01.2021
- [154]. Sato H.P., Yagi H., Moarai M., Iwahashi J., Sekiguchi T. (2007) Airborne lidar data measurement and landform classification mapping in Tomari-no-tai landslide area, Shirakami Mountains, Japan. In: Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, F., Wang, G. (Eds.), *Progress in Landslide Science*. Springer, Berlin, pp. 237–249.
- [155]. Saulnier G.M., Beven K.J., Obled C. (1997) Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL. *Journal of Hydrology*. 202:158–172.
- [156]. Schulz W.H. (2004) *Landslides mapped using LIDAR Imagery*, Seattle, Washington. U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1396
- [157]. Schulz W.H. (2007) *Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records*, Seattle, Washington. *Engineering Geology* 89, 67–87
- [158]. Schuster R.L., Highland L. (2001) *Socioeconomic and Environmental Impacts of Landslides in the Western Hemisphere*. Denver (CO) US Department of the Interior, US Geological Survey: Lakewood, CO, USA.
- [159]. Segoni S., Pappafico G., Luti T., Catani F. (2020) Landslide susceptibility assessment in complex geological settings: Sensitivity to geological information and insights on its parameterization. *Landslides* 2020, 1–11
- [160]. Shanmugam G. (2015) The landslide problem. *J. Palaeogeogr.* 4 (2), 109–166
- [161]. Shimizu N., Nakashima S., Masunari T., (2014) ISRM Suggested Method for Monitoring Rock Displacements Using the Global Positioning System (GPS), *Rock Mechanics and Rock Engineering* 47:313–328.
- [162]. Singhroy V., Molch K. (2004) Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques. *Advances in Space Research* 33 (3), 290–295.
- [163]. Skempton A.W., Delory F.A. (1957) Stability of natural slopes in the London clay. *Proc. of the Fourth Int. Conf. on Soil Mech.*, v. II, P. 378-381
- [164]. Spencer E. (1967) A method of Analysis of the Stability of Embankments, Assuming Parallel Interslice Forces. *Geotechnique*, Vol. 17, pp. 11-26
- [165]. Terrafirma. (2013). <<http://www.eurogeosurveys.org/projects/terrafirma/>> (last access 12.11.19).
- [166]. Titti G., Sarretta A., Lombardo L., Crema S., Pasuto A., and Borgatti L. (2022) Mapping Susceptibility With Open-Source Tools: A New Plugin for QGIS. *Front. Earth Sci.* 10:842425. doi: 10.3389/feart.2022.842425
- [167]. Tofani V., Biscopchi G., Rossi G., et al. (2017) Soil characterization for shallow landslides modeling: a case study in the Northern Apennines (Central Italy). *Landslides*. 14:755–770.
- [168]. Tsai F., Hwang J.-H., Chen L.C., Lin T.H. (2010) Post-disaster assessment of landslides in southern Taiwan after 2009 Typhoon Morakot using remote sensing and spatial analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10, 2179–2190. doi:10.5194/nhess-10-2179-2010
- [169]. Turner A.K., Schuster R.L. (1996) *Landslides: investigation and mitigation*. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *National Research Council, Transportation Research Board Special Report*, 247. Washington, D.C., 673 pp

- [170]. Van Westen C.J. (1993) Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. Doctoral Thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation
- [171]. Van Westen C.J. (2004) Geo - information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments. In W. Lacerda, M. Erlich, S. A. B. Fontoura, & A. S. F. Sayao (Eds.), *Landslides: evaluation and stabilization - glissement de terrain: Evaluation et Stabilisation : proceedings of the 9th international symposium on landslides, June 28 -July 2, 2004 Rio de Janeiro, Brazil* (pp. 39-56). London, UK: Balkema.
- [172]. Van Westen C.J., Castellanos E., Kuriakose S.L. (2008) Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Eng Geol* 102:112–131.
- [173]. Van Westen C.J., Terlien T.J. (1996) An approach towards deterministic landslide hazard analysis in GIS: a case study from Manizales (Colombia). *Earth Surface Processes and Landforms*. 21(9):853–868.
- [174]. Varnes D.J. (1954) Landslide types and processes. In: Eckel EB (ed) *Landslides and engineering practice, special report 28*. Highway research board. National Academy of Sciences, Washington, DC, pp. 20–47
- [175]. Varnes D.J. (1978) Slope movement types and processes. In: Schuster, R.L. & Krizek, R.J. Ed., *Landslides, analysis and control*. Transportation Research Board Sp. Rep. No. 176, Nat. Acad. of Sciences, pp. 11–33
- [176]. Varnes D.J., the IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. The UNESCO Press, Paris, 63 pp
- [177]. Wallemacq P., House R. (2018) “Economic Losses, Poverty & Disasters: 1998–2017,” CRED, UNISDR, Geneva, Switzerland, p. 31,
- [178]. Weirich F., Blesius L. (2007) Comparison of satellite and air photo based landslide susceptibility maps. *Geomorphology* 87 (4), 352–364
- [179]. Wong H.N. (2005) Landslide risk assessment for individual facilities—state of the art report. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (eds) *Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management*. Taylor & Francis, London, pp 237–296
- [180]. Wong H.N., Chen Y.M., Lam K.C. (1997) Factual report on the November 1993 natural terrain landslides in three study areas on Lantau Island. GEO Report No 61. Geotechnical Engineering Office, Hong Kong, p 42
- [181]. Wong H.N., Ho K.K.S. (1998) Overview of risk of old man-made slopes and retaining walls in Hong Kong. In: *Proceedings of the Seminar on Slope Engineering in Hong Kong*. A.A. Balkema, Hong Kong, pp 193–200
- [182]. WP/WLI (1990) International Geotechnical societies’ UNESCO Working Party on World Landslide Inventory A suggested method for reporting a landslide. *International Association Engineering Geology Bulletin*, 41: 5-12.
- [183]. Yamaguchi M., Yastika P. E., Shimizu N., Milev N., Vrkljan I. (2021) Application of SBAS-DInSAR to monitoring landslides along the northern Black Sea coast in Bulgaria. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 833 012151
- [184]. Арсовски М., Петковски Р. (1975) Неотектоника на Социјалистичка Република Македонија. Институт за сеизмичко инженерство и инженерска сеизмологија на Универзитетот "Кирил и Методиј" - Скопје.
- [185]. Илијовски З. (2013) Методологија за подготовка на карти на ранливост на подземни води. Докторска дисертација, Градежен факултет - Скопје.
- [186]. Неделковска Н. (2013) Методологија за подготовка на карти за hazard од свлекување во Пехчевско. Дипломска работа, Градежен факултет, Скопје
- [187]. Неделковска Н. (2015) Подготовка на тематски геотехнички карти како подлоги за урбанизација со примена на ГИС – технологија, Магистерска работа. Градежен факултет, Скопје
- [188]. Пешевски И. (2015) Пристап за моделирање на подложноста кон свлекување на теренот со примена на ГИС-технологија. Докторска дисертација, Градежен факултет, Скопје