

# Модел померања терена услед утицаја рударских радова на основу радарских сателитских снимака; Terrain movement model due to mine influence based on the radar satellite images

Зоран Гојковић



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Модел померања терена услед утицаја рударских радова на основу радарских сателитских снимака; Terrain movement model due to mine influence based on the radar satellite images | Зоран Гојковић | | 2023 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0008652>

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
РУДАРСКО – ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ

Зоран М. Гојковић

**МОДЕЛ ПОМЕРАЊА ТЕРЕНА УСЛЕД  
УТИЦАЈА РУДАРСКИХ РАДОВА НА  
ОСНОВУ РАДАРСКИХ САТЕЛИТСКИХ  
СНИМАКА**

Докторска дисертација

Београд, 2023.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Zoran M. Gojković

**TERRAIN MOVEMENT MODEL DUE TO  
MINE INFLUENCE BASED ON THE RADAR  
SATELLITE IMAGES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023.



Ментор:

---

**Др Александар Ганић, редовни професор**  
Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет  
Ужа научна област: Рударска мерења

Чланови комисије:

---

**Др Александар Милутиновић, редовни професор**  
Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет  
Ужа научна област: Рударска мерења

---

**Др Милан Килибарда, ванредни професор**  
Универзитет у Београду – Грађевински факултет  
Ужа научна област: Геоинформатика

Датум одбране: \_\_\_\_\_



---

Посвећено мојој породици.



## ЗАХВАЛНИЦА

Пре свега захвалност дугујем проф. др Александру Ганићу, као ментору, и проф. др Милану Килибарди, на стрпљењу, преданом раду и времену које су уложили. Без њихове подршке, идеја и мотивације коју су ми пружили, израда ове дисертације не би била могућа.

Захвалност дугујем проф. др Љиљани Брајовић, проф. др Александру Милутиновићу, проф. др Игору Миљановићу и проф. др Милошу Марјановићу за несебичну помоћ, разумевање и подељено знање.

Такође, захвалио бих се свим пријатељима, колегама и сарадницима који су на разне начине помогли писање дисертације.

Велико хвала мојим родитељима, сестрама и браћи на животним лекцијама.

На крају, хвала мојима Јовану, Петру, Александру и Весни што постоје.



## Сажетак

Површински коп, као систем који обезбеђује енергетску стабилност или снабдевање сировинама које су од изузетне важности за привредни напредак, својим функционисањем утиче на околна насељена места. Међу бројним аспектима овог утицаја, може се издвојити издвојити и анализирати утицај вертикалних и хоризонталних померања која се јављају на површи терена. Мониторинг вертикалних и хоризонталних померања површи терена околних насељених места треба да има што бољу временску резолуцију (временски период између праћења деформација) како би се вертикална и хоризонтална померања контролисала и спречили инциденти већих размера. Овај рад анализира временске серије вертикалних померања, генерисаних из радарских снимака Коперникус мисије помоћу Сентинел 1 сателита А и Б, користећи метод интерферометрије перманентних скатерера са циљем да се прате вертикална померања у околини површинског копа.

Праћење и мерење вертикалних и хоризонталних померања могуће је вршити и помоћу класичних геодетских метода, међу којима треба издвојити класична терестричка мерења као и сателитска праћења помоћу сензора за прецизно одређивање положаја, али такви приступи се ретко срећу у пракси због тога што су, трошкови опреме превелики и/или захтевају пуно времена да се спроведу одговарајућа мерења.

Лансирањем сателита Сентинел-1 и Сентинел-2 из Коперникус мисије коју спроводи Европска свемирска организација омогућено континуално је опажање површи Земље помоћу радарских и класичних сензора, а самим тим отворена је велика количина радарских и оптичких сателитских снимака који се слободно могу користити за процесирање и анализу временских серија. Такође, је и омогућена подлога за даљинско детектовање и праћење вертикалних и хоризонталних померања које се простиру на великим површинама терена. Коришћењем снимака, пре свега из Сентинел-1 мисије према којој су доступни и отворени за коришћење радарски снимци целокупне површине планете, отворена су врата за примену радарске интерферометрије са синтетичким отвором која представља новији приступ код праћења, мерења и детектовања вертикалних и хоризонталних померања на површи терена. Целокупан систем Сентинел-1 мисије обезбеђује временску резолуцију од шест дана и користити се за генерисање величина прецизних вертикалних и хоризонталних померања терена без обзира на површину подручја од интереса.

Користећи радарске снимке отвореног приступа, из Сентинел-1 мисије, свих 513 снимака из репозиторијума је преузето од октобра 2016. до краја децембра 2020. У овом раду биће представљено процесирање по корацима у циљу добијања финалног алгорита за аутоматско процесирање вертикалних померања користећи софтверске алате отвореног кода; процесирано је 402 снимка док су 111 преосталих одбачени због неодговарајућих временских прилика или као неисправни. Од укупно 402 процесираних снимака 215 снимака припада узлазној сателитској путањи док 187 припада силазној сателитској путањи.

У оквиру радарске интерферометрије треба издвојити методу перманентних скатерера као једну од водећих приликом квантификације и праћења вертикалних и хоризонталних померања на површи терена. Метода интерферометрије перманентних скатерера није никада коришћена за праћење вертикалних и хоризонталних померања услед утицаја рудника на територији Републике Србије као ни у геодетској пракси.

У оквиру радова на изградњи димњака на новом блоку Б3 термоелектране „Костолац-Б“ вршена су мерења на праћењу слегања димњака. Урађена је нулта серија нивелманских мерења као и девет додатних епоха, у временском периоду од априла 2019. године до фебруара 2021. године.



Резултати слегања добијени на основу Сентинел-1 снимака упоређени су са резултатима геодетског нивелања, моделом геотехничког слегања као и моделом за неотектонско вертикално померање. Линеје тренда слегања добијене методом радарске интерферометрије перманентних скатерера и одговарајућег нивелмана поклапају се значајно (Пирсонова вредност корелације износи 85% са  $n$ -вредности од 0,015). Финална евалуација добијених резултата вертикалних померања на одговарајућем реперу показује вредност од 3,4 mm/god добијених методом радарске интерферометрије перманентних скатерера и 2,7 mm/god добијених методом нивелања. Компарација вертикалних померања добијених методом радарске интерферометрије перманентних скатерера са геотехничким моделом слегања и неотектонским померањима приказује добро поклапање одговарајућих модела, указујући да је модел валидан. Како четири године временских серија добијених методом радарске интерферометрије перманентних скатерера нису довољне за доношење неоспорних закључака о неотектонским померањима, проширивање временских серија (од најмање 10 година) указује на то да ће овај приступ бити од значаја за истраживање неотектонских померања у будућности.

Ово истраживање илуструје не само могућност Сентинел-1 података за квантификацију и картирање вертикалних померања, већ и могућност коришћења добијених резултата за мониторинг геохазарда, као и за мониторинг вертикалног померања терена, генерално.

**Кључне речи:** *Сентинел 1 интерферометрија; слегање; Перманентни скатерери; Костолац*

**Научна област:** Рударско инжењерство

**Ужа научна област:** Рударска мерења

**УДК број:** 622.1:528.4(043.3)





## Abstract

Open pit coal mining affects surrounding populated areas, resulting in terrain surface deformation. Surface deformation should be monitored as often as possible to control deformations and prevent potential incidents. This paper analyses time series deformation estimated from the Sentinel-1 satellite images using the Persistent Scatterer Interferometry method to monitor subsidence rates caused by open pit mining activities.

It is possible to measure deformations using classical geodetic methods, such as terrestrial measurements as well as satellite tracking using sensors for accurate positioning, but those approaches are rarely used in practice because they are time-consuming and expensive for application in large areas.

With the launching of the satellites Sentinel-1 and Sentinel-2 from the Copernicus mission carried out by the European Space Organization, a large amount of satellite images have been distributed as open source for processing and analysing timeseries, as well as providing a basis for remote sensing and monitoring of wide area deformations. Using the images, primarily from the Sentinel-1 mission which provide radar images for the entire planet, the significant step has been made for the synthetic aperture radar interferometry application. Synthetic aperture radar interferometry represents newer approach in monitoring, measuring and detecting deformations on the wide area surfaces. The entire Sentinel-1 mission system provides a six-day temporal resolution and can be used to generate precise ground displacement magnitudes regardless of the area of interest.

Using the open access radar images from the Sentinel-1 mission, 513 images from the repository were downloaded between October 2016 and the end of December 2020. We present the processing steps in detail in order to establish a workflow for the automated processing of vertical displacement estimation using open source tools; a total of 402 images were processed: 215 images belonged to the ascending satellite orbit, 187 images belonged to the descending orbit, and 111 images were rejected because of adverse weather conditions.

Within the radar interferometry, the persistent scatterers method should be mentioned as one of the leading ones when quantifying and monitoring movement on the terrain surface. The persistent scatterers synthetic aperture radar interferometry technique has never been used for the mines of the Republic of Serbia or for land surveying practices related to deformation monitoring.

As part of the works on the chimney construction on the new block B3 of the „Kostolac-B“ thermal power plant, measurements were made to monitor the settlement of chimney. Zero series of levelling measurements as well as nine additional epochs were made, in the period from April 2019 to February 2021.

The settlement results obtained based on the Sentinel-1 radar images and the persistent scatterers synthetic aperture radar interferometry technique were compared with the results of geodetic levelling, the geotechnical settlement model and the model for neotectonic vertical displacement. The results based on the Sentinel-1 images were compared with results from geodetic levelling and with neotectonic uplift trends. The trend lines of vertical displacement obtained from PS and corresponding levelling are significantly similar (a Pearson correlation of 85% with a p-value of 0.015). The final evaluation reported results of vertical displacements at the levelling benchmark of  $-3.4$  mm/year with the PS InSAR method and  $-2.7$  mm/year with the levelling method. A comparison of the PS vertical displacements with a settlement model fits reasonably, suggesting that the measurements are valid. As four years of PS time series data is insufficient to establish undisputable conclusions on the neotectonics uplift, extending the time series (covering at least a



decade) implies that this approach will become attractive in future neotectonic uplift trend estimations.

This research illustrates not only the ability of Sentinel-1 data in mapping vertical deformations, but the obtained results could also be used for geohazard monitoring and land monitoring in general for the area of interest.

**Keywords:** *Sentinel 1 InSAR; mining subsidence; Persistent scatterer interferometry; Kostolac*

**Scientific field:** Mining engineering

**Scientific subfield:** Mine Surveying

**UDC:** 622.1:528.4(043.3)



## Садржај:

|  |           |
|--|-----------|
| Сажетак.....   | iii       |
| Abstract.....  | v         |
| Списак слика: .....  | x         |
| Списак табела .....  | xvi       |
| Списак скраћеница .....                                      | xvii      |
| <b>1 Увод .....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Литературни преглед .....                                | 3         |
| 1.2 Полазне хипотезе, циљеви и предмет истраживања .....     | 5         |
| 1.3 Научне методе истраживања .....                          | 8         |
| 1.4 Научни допринос дисертације .....                        | 8         |
| 1.5 Организација тезе .....                                  | 9         |
| <b>2 Сентинел-1 подаци и локација истраживања .....</b>      | <b>10</b> |
| 2.1 Истраживање локације.....                                | 10        |
| 2.2 ПК Дрмно и термоелектрана Костолац.....                  | 12        |
| 2.3 Геолошка структура локације истраживања.....             | 15        |
| 2.4 Сентинел-1 колекција података .....                      | 17        |
| 2.5 Особине и поступци обраде Сентинел-1 података .....      | 20        |
| 2.5.1 Основне карактеристике електромагнетних таласа.....    | 21        |
| 2.5.1.1 Поларизација.....                                    | 22        |
| 2.5.1.2 Доплеров ефекат .....                                | 23        |
| 2.5.1.3 Кохерентност таласа .....                            | 24        |
| 2.5.1.4 Интерференција .....                                 | 25        |
| 2.5.1.5 Монохроматичност и распон фреквенција .....          | 27        |
| 2.5.2 Микроталаси.....                                       | 28        |
| 2.5.3 Активни радари .....                                   | 29        |
| 2.5.3.1 Једначина радара .....                               | 29        |
| 2.5.3.2 Фактори који утичу на радарски попречни пресек ..... | 31        |
| 2.5.3.3 Грешке радарских мерења .....                        | 35        |
| 2.5.4 Синтетички апертурни радар (SAR) .....                 | 36        |
| 2.5.5 Својства снимака Сентинел-1 мисије .....               | 37        |
| 2.5.6 Пре-процесирање Сентинел-1 података .....              | 41        |
| 2.5.6.1 Преузимање прецизних орбита.....                     | 41        |
| 2.5.6.2 Уклањање термалног шума .....                        | 41        |



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.5.6.3  | Уклањање бразди између врста .....   | 42        |
| 2.5.6.4  | Осредњавање пиксела .....  | 42        |
| 2.5.6.5  | Геометријска корекција .....   | 43        |
| 2.5.6.6  | Радиометријска калибација .....  | 43        |
| 2.5.6.7  | Радиометријска корекција утицаја терена .....  | 44        |
| 2.5.6.8  | Откалњање ефекта мрља (speckle).....   | 44        |
| 2.6      | Теренски радови .....  | 46        |
| 2.6.1    | Нулта епоха.....   | 46        |
| 2.6.2    | Епохе мерења висинских разлика на праћењу стабилности димњака.....   | 47        |
| 2.7      | Улазни параметри за геотехничко моделирање .....   | 47        |
| <b>3</b> | <b>Методe.....</b>   | <b>49</b> |
| 3.1      | SAR – Синтетички Апертурни Радар .....   | 49        |
| 3.2      | Интерферометрија .....   | 50        |
| 3.2.1    | Једначина Кохерентности таласа .....   | 54        |
| 3.3      | Пре-процесирање.....   | 54        |
| 3.4      | Процесирање.....   | 55        |
| 3.4.1    | SNAP процесирање .....   | 55        |
| 3.4.2    | StaMPS процесирање .....   | 59        |
| 3.5      | Пост-процесирање.....  | 60        |
| 3.5.1    | Трансформација из N, E, V (север, исток, вертикална оса) у LOS - ALD<br>геометрију сателитског система.....                                | 61        |
| 3.6      | Метод најмањих квадрата и Пелцеров метод.....  | 65        |
| 3.6.1    | Метод Најмањих Квадрата.....   | 65        |
| 3.6.2    | Пелцорова метода.....  | 66        |
| <b>4</b> | <b>Резултати.....</b>  | <b>70</b> |
| 4.1      | Резултати <i>StaMPS</i> процесирања.....   | 70        |
| 4.2      | Резултати процесирања за ПОИ.....  | 88        |
| 4.3      | Резултати нивелманских мерења на нултој и осталим епохама у оквиру радова на<br>стабилности димњака новог блока БЗ у „ТЕ КОСТОЛАЦ Б“ ..... | 95        |
| 4.3.1    | Изравнање нулте епохе.....   | 96        |
| 4.3.2    | Изравнање и одређивање деформација осталих епоха.....  | 96        |
| 4.4      | Подручје села Дрмно .....  | 97        |
| 4.5      | Подручја села Кличевац и Брадарац .....  | 99        |
| 4.6      | Подручје Термоелектране Костолац (ТЕКО) .....  | 103       |
| 4.6.1    | ТЕКО подручје са реперима нивелманске мреже.....   | 105       |



---

|          |                               |            |
|----------|-------------------------------|------------|
| 4.7      | Подручје Костолац .....       | 106        |
| 4.8      | Модел слегања .....           | 108        |
| <b>5</b> | <b>Закључак .....</b>         | <b>109</b> |
|          | <b>Литература .....</b>       | <b>114</b> |
|          | <b>Биографски подаци.....</b> | <b>122</b> |
|          | <b>Прилози.....</b>           | <b>123</b> |



## Списак слика:

- Слика 1. Локација подручја истраживања: Површински коп угља Костолац са суседним насељеним местима од интереса (сателитски снимак као позадина - Google), (Гојковић и др., 2023). .....3
- Слика 2. Локација подручја истраживања: бразде за процесирање у оквиру подснимка IW1 и IW3 за A102 и D80 путању сателита, где црни полигон представља костолачки угљени басен (сателитска подлога – Open Toro tar), (Гојковић и др., 2023).....11
- Слика 3. Зоне заштите животне средине. У оквиру дефинисаних зона врши се мониторинг квалитативних и квантитативних података утицаја на животну средину, укључујући загађење и буку. Подручје за процесирање углавном се поклапа са зонама заштите (сателитска подлога – Google), (Гојковић и др., 2023).....12
- Слика 4. Ситуациони план за ПК Костолац и ПК Дрмно (Студија оправданости селективног откопавања и одлагања откритке, 2003).....13
- Слика 5. Распоред БТО Система (горе). Одлагалиште по етажама (средина). Систем откопавања угља (доле) (Студија оправданости селективног откопавања и одлагања откритке, 2003). .....14
- Слика 6. План рекултивације ПК Костолац (Студија оправданости селективног откопавања и одлагања откритке, 2003). .....15
- Слика 7. (а) Неотектонска карта ширег ПОИ; (б) Карта тренутног тектонског тренда; (ц) Геолошка карта ширег ПОИ, према [72] ( $Q_2$  = – флувијални Квартарни седименти,  $w$  = – Würm Квартарни седименти,  $r+w$  = – Ris и Würm Квартарни седименти, ?  $r+w$  = – неодређени Ris и Würm Квартарни седименти,  $m$  = – Mindel Квартарни седименти,  $P_1$  = – Плиоценски кластити, глина и лапорци,  $M_2^3 + M_3^2$  = – Миоценски кластити,  $M_2^1$  = – Миоценски пешчари и кречњаци,  $Fq, Pt - Ct$  = – кристални шкриљци Палеозоика); (д) Деформациона карта ширег ПОИ, (Гојковић и др., 2023). .....16
- Слика 8. Сателит Сентинел-1 мисије (преузето са ЕСА портала ([www.esa.int](http://www.esa.int))). .....18
- Слика 9. Локација подручја истраживања: (б) Сентинел-1 отисци радарских снимака, црвено (A102) узлазна и плаво (D80) силазна орбита (сателитска подлога – Open Toro tar), (Гојковић и др., 2023). .....19
- Слика 10. Дужина базних линија код интерферограма радарских снимака. Плаво – снимци силазне орбите сателита, црвено – снимци узлазне орбите сателита .....20
- Слика 11. Спектар електромагнетног зрачења.....20
- Слика 12. Основне карактеристике таласа ( $A$  – амплитуда и  $\lambda$  – таласна дужина). .....21
- Слика 13. Представљање фазора електричног поља преко  $x$  и  $y$  компоненти ([commons.wikimedia.org/wiki/File:Circular\\_Polarization\\_Linear\\_Polarized\\_Light\\_Entering\\_Quarter\\_Wave\\_Plate\\_Components.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Circular_Polarization_Linear_Polarized_Light_Entering_Quarter_Wave_Plate_Components.svg)).....22
- Слика 14. Ротација фазора електричног поља таласа у простору ([commons.wikimedia.org/wiki/File:Circular.Polarization.Circularly.Polarized.Light\\_Without.Components\\_Right\\_Handed.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Circular.Polarization.Circularly.Polarized.Light_Without.Components_Right_Handed.svg)).....23
- Слика 15. Поларизација, лево – линеарна, средина – кружна, десно – елиптична ([emedicalprep.com/study-material/physics/wave-optics/polarization/](http://emedicalprep.com/study-material/physics/wave-optics/polarization/)).....23



|   |    |
|---|----|
| Слика 16. Доплеров ефекат, кретање извора $S$ у односу на посматрача $O$ (Rees, 2012). ....   | 24 |
| Слика 17. Ефекат кохеренције таласа са протоком времена<br>( <a href="http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/Phase_drift.png">upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/Phase_drift.png</a> ).....  | 25 |
| Слика 18. а) – представљање таласа фазором, б) – суперпозиција улазних таласа приликом интерференције (Брајовић., 2013). ....   | 26 |
| Слика 19. Правци конструктивне (црвено) и деструктивне (плаво) интерференције<br>( <a href="http://physicsclassroom.com/class/light/Lesson-3/The-Path-Difference">physicsclassroom.com/class/light/Lesson-3/The-Path-Difference</a> ). ....   | 26 |
| Слика 20. Дигитални приказ интерференције на површини воде<br>( <a href="http://sciencephoto.com/media/530560/view/interference-patterns-artwork">sciencephoto.com/media/530560/view/interference-patterns-artwork</a> ).....   | 27 |
| Слика 21. Зависност расејања електромагнетне енергије од грубости површи од које се рефлектује (Kasischke, 2003).....   | 28 |
| Слика 22. Геометрија снимања бистатичког радара (Rees, 2012).....   | 30 |
| Слика 23. Храпавост површи за фиксни упадни угао и таласну дужину (лево – глатка површ, средина – средње храпава површ, десно – храпава површ), (SAR Handbook, 2019).....   | 31 |
| Слика 24. Електромагнетна пропустљивост Земљине атмосфере, (SAR Handbook, 2019).<br>.....   | 32 |
| Слика 25. Основне величине које описују радарско снимање, ( <a href="http://nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/930">nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/930</a> )..... | 33 |
| Слика 26. Основне величине које описују радарско снимање, (Elach и van Zyl, 2006).....  | 33 |
| Слика 27. Резолуција радарског снимања у правцу азимута, (Rees, 2012). ....   | 34 |
| Слика 28. Ширина емитованог радарског пулса (горе – дужи пулсеви, доле – краћи пулсеви), (Campbell и Wuppe, 2011).....  | 34 |
| Слика 29. Разлика косог и хоризонталног растојања ( <a href="http://step.esa.int">step.esa.int</a> ).....   | 35 |
| Слика 30. Грешке код радарских мерења, а – грешка косог снимања, б – грешка издужења, ц – грешка заклоњености, (Rees, 2012). ....   | 36 |
| Слика 31. Принцип рада SAR система, ( <a href="http://geo.uzh.ch/~fpaul/sar_theory.html">geo.uzh.ch/~fpaul/sar_theory.html</a> ). ....  | 37 |
| Слика 32. Различити модови аквизиције података Сентинел-1 сателита, ( <a href="http://sentinel.esa.int">sentinel.esa.int</a> ).<br>.....  | 38 |
| Слика 33. Сателит емитује прво један импулс у првом под-појасу снимања (плаво), затим и за преостала два под-појаса (зелено и наранџасто), на крају се враћа на први под-појас и даље итеративно наставља, ( <a href="http://elib.dlr.de">elib.dlr.de</a> ).....  | 39 |
| Слика 34. Особине ScanSAR технике, ( <a href="http://ieeexplore.ieee.org">ieeexplore.ieee.org</a> ).....  | 40 |
| Слика 35. Особине ScanSAR технике, ( <a href="http://sentinel.esa.int">sentinel.esa.int</a> ).....  | 41 |
| Слика 36. Спајање пулсева и подпојасева снимања, ( <a href="http://sentinel.esa.int">sentinel.esa.int</a> ).....  | 42 |
| Слика 37. Смањење радиометријског шума користећи операцију осредњавања, (Moreira и др., 2013).....  | 43 |
| Слика 38. Ефекат мрља на радарском снимку. ....   | 44 |



|  |    |
|--|----|
| Слика 39. Електромагнетно зрачење у оквиру једног пиксела представља суму великог броја појединачних извора расејања зрачења унутар пиксела, (SAR Handbook, 2019).....   | 45 |
| Слика 40. Нивелманска мрежа са планом опажања нивелманских страна, (Гојковић и др., 2023).....   | 46 |
| Слика 41. Микроталасни спектар према ознакама бендова електромагнетних таласа.....   | 50 |
| Слика 42. Мастер снимак (M) и помоћни снимак (S) у односу на мету (тачка P) за време аквизиције снимка.....  | 52 |
| Слика 43. SNAP алгоритам за припрему одговарајуће структуре и формата података за даље процесирање у оквиру StaMPS апликације, (Гојковић и др., 2023).....   | 55 |
| Слика 44. Корак редукције величине снимка. ....  | 56 |
| Слика 45. Корак геокодирања уназад. ....   | 57 |
| Слика 46. Корак за ефикаснији спектрални диверзитет. ....  | 58 |
| Слика 47. Корак за формирање интерферограма.....   | 59 |
| Слика 48. Вектор померања (d) са одговарајућом узлазном и силазном орбитом.....  | 61 |
| Слика 49. Геометрија сателита LOS у односу на правоуглу геометрију N, E, V. (s – сателит) – узлазна путања сателита. ....  | 62 |
| Слика 50. Пројекције $d_n$ и $d_e$ на ALD правац.....  | 62 |
| Слика 51. Пројекције $d_n$ и $d_e$ преко ALD на LOS правац.....  | 63 |
| Слика 52. Геометрија сателита LOS у односу на правоуглу геометрију N, E, V. (s – сателит) – силазна путања сателита. ....  | 63 |
| Слика 53. Пројекције $d_n$ и $d_e$ преко ALD на LOS правац, (силазна путања сателита). ....  | 64 |
| Слика 54. Разлике у путањама сателита. ....  | 64 |
| Слика 55. Фазне вредности свих интерферограма за пикселе кандидате за PS, узлазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 17. јул 2018 мастер снимак, и увећано, фазне вредности пиксела кандидата за PS, узлазне орбите сателита, пар мастер помоћни снимак где је 17. јул 2018 мастер снимак док је 29. јул 2018. помоћни снимак..... | 71 |
| Слика 56. Фазне вредности пиксела кандидата за PS, силазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 22. јул 2018 мастер снимак, и увећано фазне вредности пиксела кандидата за PS, силазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 22. јул 2018 мастер снимак, док је помоћни снимак од 28. јула 2018. године. ....         | 72 |
| Слика 57. Вредности фазе после решавања фазне неодређености за PS, узлазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 17. јул 2018 мастер снимак, и горе вредности пара снимака где је помоћни снимак од 29. јул 2018.....   | 73 |
| Слика 58. Вредности фазе после решавања фазне неодређености за PS, силазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 22. јул 2018 мастер снимак, и горе вредности пара снимака где је помоћни снимак од 28. јул 2018.....   | 74 |
| Слика 59. Грешке DEM после корака 7, за PS узлазне сателитске путање.....  | 75 |





- Слика 60. Грешке DEM после корака 7, за PS силазне сателитске путање. .... 76
- Слика 61. Вредности фазе пре решавања фазне неодређености за PS са одузимањем атмосферског утицаја за мастер снимак и грешке DEM, узлазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 17. јул 2018 мастер снимак, и горе вредности пара снимака где је помоћни снимак од 29. јул 2018..... 77
- Слика 62. Вредности фазе пре решавања фазне неодређености за PS са одузимањем атмосферског утицаја за мастер снимак и грешке DEM, силазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 22. јул 2018 мастер снимак, и горе вредности пара снимака где је помоћни снимак од 28. јул 2018..... 78
- Слика 63. Вредности фазе после решавања фазне неодређености за PS и одузимања атмосферског утицаја за мастер снимак и грешке DEM, узлазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 17. јул 2018 мастер снимак, и горе вредности пара снимака где је помоћни снимак од 29. јул 2018..... 79
- Слика 64. Вредности фазе после решавања фазне неодређености за PS и одузимања атмосферског утицаја за мастер снимак и грешке DEM, силазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 22. јул 2018 мастер снимак, и горе вредности пара снимака где је помоћни снимак од 28. јул 2018..... 80
- Слика 65. Средње вредности брзина померања за ПОИ, за узлазну сателитску путању. ..81
- Слика 66. Средње вредности брзина померања за ПОИ, са отклоњеним утицајем DEM и грешака орбита сателита за узлазну сателитску путању. .... 82
- Слика 67. Средње вредности брзина померања за ПОИ, за силазну сателитску путању. ..83
- Слика 68. Средње вредности брзина померања за ПОИ, са отклоњеним утицајем DEM и грешака орбита сателита за силазну сателитску путању..... 84
- Слика 69. Средње вредности брзина померања за ПОИ, ослобођене утицаја DEM, грешака орбита као и атмосферских утицаја коришћењем линеарног атмосферског филтрирања, за узлазну сателитску путању. .... 85
- Слика 70. Средње вредности брзина померања за ПОИ, ослобођене утицаја DEM, грешака орбита као и атмосферских утицаја коришћењем линеарног атмосферског филтрирања, за силазну сателитску путању..... 86
- Слика 71. Стандардна девијација брзина померања за ПОИ, ослобођене утицаја DEM, грешака орбита као и атмосферских утицаја коришћењем линеарног атмосферског филтрирања, за узлазну сателитску путању. .... 87
- Слика 72. Стандардне девијације брзина померања за ПОИ, ослобођене утицаја DEM, грешака орбита као и атмосферских утицаја коришћењем линеарног атмосферског филтрирања, за силазну сателитску путању..... 88
- Слика 73. LOS брзине слегање PS (mm/god) генерисаних са Сентинел-1 А и Сентинел-1 Б узлазне сателитске орбите за ПОИ; црвена боја представља померање PS од сателита, плава боја представља PS који се померају према сателиту. .... 89
- Слика 74. LOS брзине слегање PS (mm/god) генерисаних са Сентинел-1 А и Сентинел-1 Б силазне сателитске орбите за ПОИ; црвена боја представља померање PS од сателита, плава боја представља PS који се померају према сателиту. .... 90
- Слика 75. Вертикална брзина слегања PS (mm/god) после трансформације LOS у правоуглу геометрију, генерисаних са Сентинел-1 А и Сентинел-1 Б узлазне и силазне



|  |            |
|--|------------|
| <i>сателитске орбите за ПОИ; нијансе црвене боје представљају негативна померања PS (слегања), нијансе плаве боје представљају позитивне вредности за PS (издизање) (величина резолуционе ћелије је 50 метара). .....</i>  | <i>91</i>  |
| <i>Слика 76. Хистограм вертикалних брзина померања за PS побтојаних по различитим кластерима. Укупан број вертикалних брзина померања PS је 8951 за процесурано ПОИ. ....</i>  | <i>92</i>  |
| <i>Слика 77. LOS брзине слегања PS (mm/god) генерисаних са Сентинел-1 А узлазне сателитске орбите за ПОИ; црвена боја представља померања PS од сателита, плава боја представља PS који се померају према сателиту. ....</i>   | <i>93</i>  |
| <i>Слика 78. LOS брзине слегања PS (mm/god) генерисаних са Сентинел-1 А силазне сателитске орбите за ПОИ; црвена боја представља померања PS од сателита, плава боја представља PS који се померају према сателиту. ....</i>   | <i>94</i>  |
| <i>Слика 79. LOS брзине слегања PS (mm/god) генерисаних са Сентинел-1 Б узлазне сателитске орбите за ПОИ; црвена боја представља померања PS од сателита, плава боја представља PS који се померају према сателиту. ....</i>   | <i>95</i>  |
| <i>Слика 80. Вертикална брзина слегања PS (mm/god) за подручје села Дрмно; нијансе црвене боје представљају негативна померања PS (слегања), нијансе плаве боје представљају позитивне вредности за PS (издизање) (величина резолуционе ћелије је 50 метара), (Гојковић и др., 2023).....</i>  | <i>98</i>  |
| <i>Слика 81. Број перманентних скатерера за подручје села Дрмно распоређен по кластерима према величини брзине слегања.....</i>  | <i>99</i>  |
| <i>Слика 82. Вертикална брзина слегања PS (mm/god) за подручје села Кличевац; нијансе црвене боје представљају негативна померања PS (слегања), нијансе плаве боје представљају позитивне вредности за PS (издизање) (величина резолуционе ћелије је 50 метара), (Гојковић и др., 2023).....</i>   | <i>100</i> |
| <i>Слика 83. Број перманентних скатерера за подручје села Кличевац распоређен по кластерима према величини брзине слегања. ....</i>  | <i>101</i> |
| <i>Слика 84. Вертикална брзина слегања PS (mm/god) за подручје села Брадарац; нијансе црвене боје представљају негативна померања PS (слегања), нијансе плаве боје представљају позитивне вредности за PS (издизање) (величина резолуционе ћелије је 50 метара), (Гојковић и др., 2023).....</i>   | <i>102</i> |
| <i>Слика 85. Број перманентних скатерера за подручје села Брадарац распоређен по кластерима према величини брзине слегања. ....</i>  | <i>103</i> |
| <i>Слика 86. Вертикална брзина слегања PS (mm/god) за подручје ТЕКО; нијансе црвене боје представљају негативна померања PS (слегања), нијансе плаве боје представљају позитивне вредности за PS (издизање) (величина резолуционе ћелије је 50 метара). Црни ромбови представљају репере нивелманске мреже, (Гојковић и др., 2023). ....</i> | <i>104</i> |
| <i>Слика 87. Број перманентних скатерера за подручје термоелектране Костолац (ТЕКО) распоређен по кластерима према величини брзине слегања.....</i>  | <i>105</i> |
| <i>Слика 88. Репер R6, PS временске серије и временске серије (епохе) нивелмана. Тачкасте линије представљају трендове PS и нивелманских временских серија. (Гојковић и др., 2023).....</i>  | <i>106</i> |



- Слика 89. Вертикална брзина слегања  $PS$  (mm/god) за подручје Костолац; нијансе црвене боје представљају негативна померања  $PS$  (слегања), нијансе плаве боје представљају позитивне вредности за  $PS$  (издизање) (величина резолуционе ћелије је 50 метара), (Гојковић и др., 2023)..... 107
- Слика 90. Број перманентних скатерера за подручје Костолац распоређен по кластерима према величини брзине слегања..... 107
- Слика 91. Плански (лево), коси поглед (средина горе) и попречни профил (средина доле) модела слегања, са црним тачкама које представљају референтно слегање са слегањима датим у метрима (са десне стране налази се графичка презентација геолошког стуба, као додаток скали слегања), (Гојковић и др., 2023). ..... 108
- Слика 92. Компарација  $PS$  мерења и неотектонских трендова вертикалних померања навише (Peduto и др., 2022; Гојковић и др., 2023). ..... 110



## Списак табела

|  |            |
|--|------------|
| <i>Табела 1. Сентинел-1 колекција снимка за процесирање. ....</i>  | <i>19</i>  |
| <i>Табела 2. Број снимака који нису ушли у процесирање услед неадекватних временских услова за време аквизиције, приказаних по годинама. ....</i>    | <i>55</i>  |
| <i>Табела 3. PS основна статистика за LOS узлазне и силазне орбите за процесирано ПОИ, и вертикална декомпозиција узлазне и силазне орбите. ....</i> | <i>88</i>  |
| <i>Табела 4. Висине репера после изравнања нулте епохе. ....</i>   | <i>96</i>  |
| <i>Табела 5. Вредности висина репера и средњих грешака после изравнања приказаним по епохама мерења за основне репере. ....</i>                      | <i>96</i>  |
| <i>Табела 6. Вредности померања основних репера у вертикалној равни по епохама мерења, на основу Пелцерове методе. ....</i>                          | <i>97</i>  |
| <i>Табела 7. PS статистика за подручје села Дрмно (50 метара резолуција растера).....</i>  | <i>98</i>  |
| <i>Табела 8. PS статистика за подручје села Кличевац и села Брадарац (50 метара резолуција растера). ....</i>  | <i>101</i> |
| <i>Табела 9. PS статистика за подручје ТЕКО (50 метара резолуција растера).....</i>  | <i>104</i> |
| <i>Табела 10. PS статистика за подручје Костолац (50 метара резолуција растера).....</i>   | <i>106</i> |



## Списак скраћеница

- ALD* - Азимут правцу сателита (*Azimuth Line Direction*)
- ASF* - Аљаска Сателитски Портал за претрагу сателитских снимака (*Alaska Sattelite Facility*)
- CPT* - Технике Кохерентних Пиксела (*Coherent Pixel Technique*)
- DEM* - Дигитални Елевациони Модел (*Digital Elevation Model*)
- DInSAR* - Диференцијални *InSAR*
- DS* - Дистрибутивни Скатерери
- ESA* - Европска Свемирска Агенција (*European Space Agency*)
- ESD* - Ефикаснији Спектрални Диверзитет (*Enhanced Spectral Diversity*)
- EW* - Широки интерферометријски појас снимања (*Extra Wide*)
- GNSS* - Глобални Навигациони Сателитски Систем (*Global Navigation Satellite System*)
- GRD* - Формат података (*Ground Range Detected*)
- HH* - Хоризонтално поларизован талас и приликом емитовања и приликом пријема
- HV* - Хоризонтално поларизован талас приликом емитовања и вертикално поларизован приликом пријема
- IF* - Формирања Интерферограма (*Interferogram Formation*)
- InSAR* - Интерферометријски Синтетички Апертурни Радар (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*)
- IPTA* - Интерферометријске Тачкасте Циљане Анализе (*Interferometric Point Target Analyses*)
- LOS* - Линији у правцу погледа сателита (*Line of Sight*)
- MNK* - Метод Најмањих Квадрата (*Least Square Method*)
- MT-InSAR* - Мулти-временски *InSAR* (*Multi Temporal InSAR*)
- N, E, V* – Север-исток-висина (*north-east-vertical*)
- NE* – Север-исток (*north-east*)
- PD* – Поправка бразди (*Product Deburst*)
- PolPSI* - Интерферометрија ПОЛаризованих Перманентних Скатерера (*POLarized Permanent Scaterer Interferometry*)
- PS* - Перманентни Скатерери (*Permanent Scaterers*)
- PS-InSAR* - *InSAR* перманентних скатерера (*Permanent Scaterer Interferometric Synthetic Aperture Radar*)
- PSP* - Парови Перманентних скатерера (*Permanent Scaterers Pairs*)
- S1-A* - Сентинел-1 А
- S1-B* - Сентинел-1 Б
- SAR* - Синтетички Апертурни Радар (*Synthetic Aperture Radar*)
- SBAS* - Смањене БАЗне линије Сателита (*Small BASelines*)



*SLC IW* – формат података за *IW* податке (*Single Look Complex Interferometric Wide*)  
*SM* - Стрипмап мод појаса снимања (*Strip Map*)  
*SNAP* - Сентинел Апликациона Платформа (*Sentinel Application Platform*)  
*SPN* - Стабилне Тачаке Мреже (*Stable Point Network*)  
*STaMPS* – Стенфордов метод за интерферометрију перманентних скатерера (*STANford Method for Permanent Scatterers*)  
*TCPI* - Повремено Кохерентне Тачаке Интерферометрије (*Temporarily Coherent Point Interferometry*).  
*TOPSAR* - Теренско Опажање са Прогресивним Скеновима (*Terrain Observation with Progressive Scans*)  
*TPR* – Топографско фазна поправка (*Topo Phase Removal*)  
*TRAIN* - Пакет за атмосферску корекцију (*Toolbox for Reducing Atmospheric Interferometry*)  
*VH* - Вертикално поларизован талас приликом емитовања и хоризонтално поларизован приликом пријема  
*VV* - Вертикално поларизован талас и приликом емитовања и приликом пријема  
*WV* - Таласни мод (*Wave*)  
*1D* – Једнодимензионални  
*2D* – Дводимензионални  
*3D* – Тродимензионални  
БТО - Багер-Транспортер-Одлагач  
ЕПС - ЕлектроПривреда Србије  
ПД-ТЕКО - Привредно Друштво Термоелектране и копови Костолац  
ПК - Површински коп  
ПОИ - Подручје од интереса (*Area of Interest*)  
ССИ-ЈЈЗ – Север-северо-исток-југ-југо-запад  
ТЕКО - Термоелектрана Костолац



## 1 Увод

Експлоатација угља у данашње време представља један од најважнијих делова одрживости енергетског система Републике Србије. У последња два века дошло је до огромног напретка у свим аспектима рударства. Током деветнаестог века најважније достигнуће било је откриће динамита, затим током двадесетог века можда и најважнији аспект било је увођење континуалних система за експлоатацију угља без експлозивних средстава, (*Hartman и Mutmansky, 2002*).

Површинска експлоатација има велики утицај на насељена места која се налазе непосредно у околини места експлоатације, на саобраћајну инфраструктуру, као и на целокупну животну средину, тј. на аспекте који су од великог значаја за миран и удобан свакодневни живот становника. Једна од последица утицаја рударских активности јесте и слегање терена и деформација објеката у зони утицаја рударских радова. Слегање се може очекивати у непосредној близини површинских копова проузроковано активностима везаним за откопавање, минирање, дренажање као и различите хидрогеолошке задатаке за време експлоатације, али и као резултат откопно-транспортних система и радова. Стога, мониторинг слегања или померања објеката на површи терена представља сложен задатак који је до сада пре свега решаван коришћењем класичних терестричких геодетских метода, као и сателитских метода геодезије за прецизно одређивање положаја тачака.

Глобални Навигациони Сателитски Систем (*GNSS*) и класичне геодетске методе, као што је високо прецизно нивелање, у циљу добијања вертикалних и хоризонталних померања веома су поуздане и тачне. Са друге стране, овакве методе су временски захтевне и веома скупе, посебно ако је потребно извршити велики број опажања да би се обухватила широка подручја од интереса. Пре свега због услова приликом извођења опажања као и високих трошкова опажања, мерења класичним методама се ретко понављају тако да временске серије померања немају довољну густину и/или дужину временског периода опажања, што као резултат има нередовно обезбеђивање временских серија вертикалних и хоризонталних померања терена и објеката, или неретко, чак и не постојање временских серија.

Стога, претпоставка је, да је приступ као што је Интерферометријски Синтетички Апертурни Радар (*InSAR*) са анализом на Перманентне Скатерере (*PS*) једно од могућих решења за мониторинг, опажања и процене вертикалних и хоризонталних померања површи терена. Претпоставља се да би интеграција *GNSS* метода и метода нивелања са *InSAR* техникама свакако довела до побољшаних резултата, а био би смањен и број *GNSS* пријемника и обима нивелања, док би *InSAR* приступ обезбедио ширину и густину *PS* тачака које би садржале величину померања.

*InSAR* заснован на подацима Сентинел-1 сателитске мисије јесте нискобуџетна техника опажања великих површина терена, која обезбеђује опажања независна од облачности, насупрот оптичкој даљинској детекцији. Под нискобуџетном техником треба напоменути да се ту сматра, пре свега, приступ отвореним подацима, док су сателити и пратећа инфраструктура веома скупи. Са друге стране, техника није савршена пошто је простирање брзине таласа кроз атмосферу зависно од рефракције различитих слојева атмосфере. Сигнали са ниско орбитирујућих сателита, као што су Сентинел-1 А и Сентинел-1 Б који орбитирују ближе доње границе егзосфере, тзв. егзобазе, на алтитуди од 693 km (где су атмосферски притисак и температура веома ниски) оптерећени су утицајима рефракције.

Веома важан приступ за редукацију утицаја приликом мониторинга Диференцијалним *InSAR* процесом *DInSAR*, где *DInSAR* представља унапређени *InSAR* процес који омогућава мониторинг деформације површи терена или померања у смеру, Линији Од Сателита (*LOS*), чија тачност зависи од просторно временске резолуције и која је углавном оптерећена грешком орбите и атмосферским утицајима, јесте анализом *PS* и њиховог временско просторног

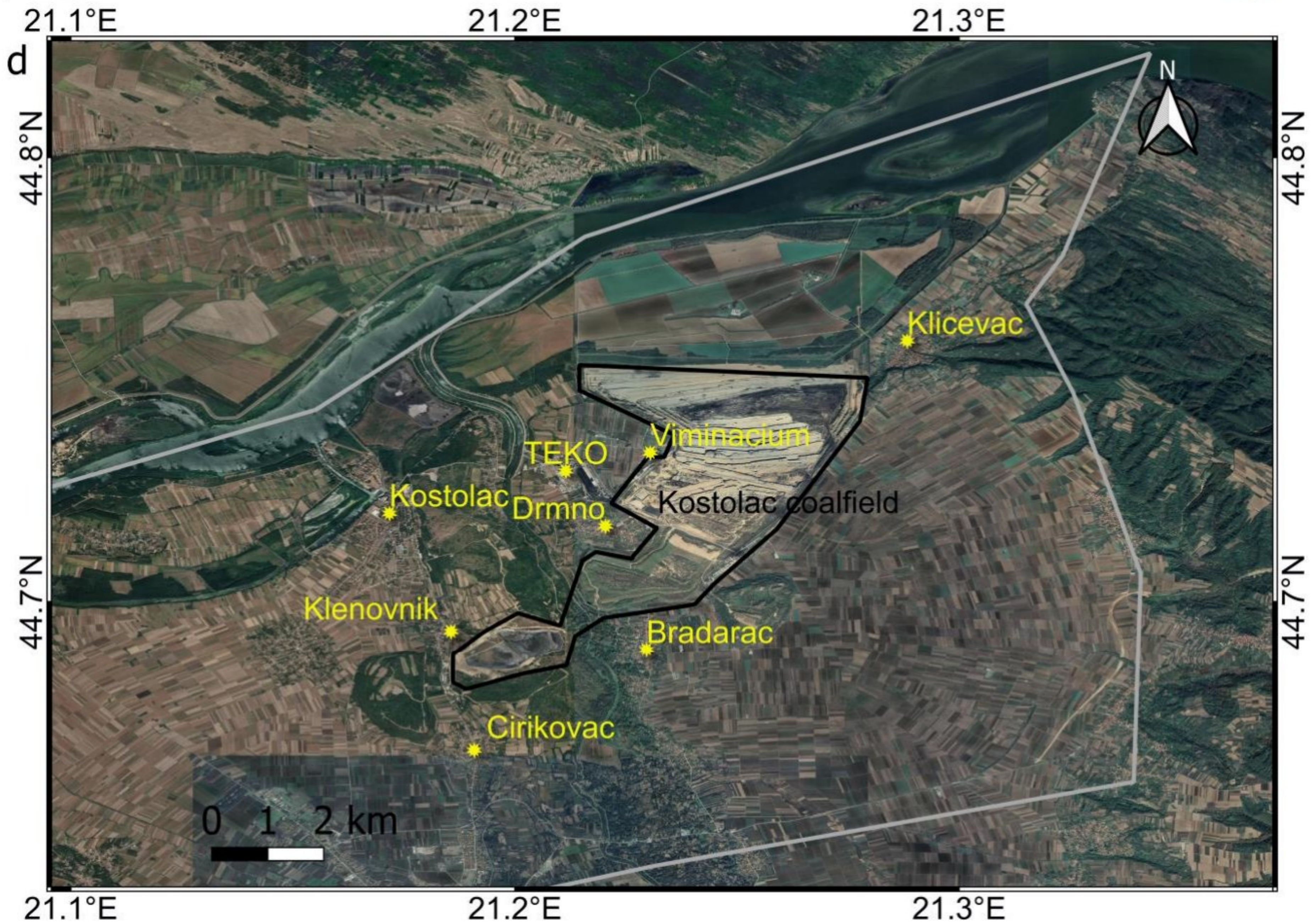


померања. *PS* чине објекти који током времена рефлектују перманентно стабилне *SAR* (Синтетички Апертурни Радар) сигнале назад до сателита током времена. Објекти који испуњавају такве особине су углавном вештачке структуре (грађевине, саобраћајна инфраструктура), природни изданци стена итд. Поред *PS* метода деформационе анализе треба напоменути и метод Смањених БАЗних линија (*SBAS*) који се углавном користи као допуна *PS* метода да покрије подручја без рефлектованог сигнала јер се сигнал рефлектује од равномерно распоређених тачака.

Примарни циљ овог истраживања јесте анализа и процена вертикалних померања околног терена површинског копа “Костолац” које је настало услед утицаја поменутог рудника. За ове потребе коришћена је *PS* техника где се очекивало да број *PS* буде висок у насељеним подручјима и недостатак *PS* на пољопривредном и шумском земљишту. Према сазнањима до којих се дошло у току истраживања, *PS InSAR* техника није никада коришћена за потребе праћења вертикалних померања услед утицаја рудника у Републици Србији, као ни у геодетској пракси везано за мониторинг вертикалних и хоризонталних померања површине терена. Ова студија даје детаљан алгоритам за процесирање временских серија генерисаних из *PS InSAR* радарских снимака, који су доступни као отворени подаци, са циљем да допринесе аутоматском процесирању процене вертикалних померања користећи отворене алате и софтвере отвореног кода. Резултати добијени на основу геотехничког модела за Подручје Од Интереса (ПОИ) су презентовани и упоређени са резултатима *PS InSAR*.

У границама подручја мониторинга, која су обухваћена овим истраживањем, најугроженија села су Дрмно и Кличевац, где су најближе куће лоциране на само 200 метара од ивице површинског копа (слика 1). Поред поменутих села треба напоменути још два села која су у непосредној близини, Брадарац и Кленовник, као и још два подручја: подручје које захвата термоелектрана Костолац и пратећа инфраструктура (ТЕКО) као и подручје самог града Костолца.





Слика 1. Локација подручја истраживања: Површински коп угља Костолац са суседним насељеним местима од интереса (сателитски снимак као позадина - Google), (Гојковић и др., 2023).

## 1.1 Литературни преглед

У оквиру скоријих праћења померања терена треба напоменути да су (Cenni и др., 2021) у свом раду представили мониторинг слегања у области делте реке По у северној Италији коришћењем геодетских мрежа. Такође, у Републици Србији значајне доприносе у оквиру методологије, али праћења померања дали су (Ашанин и Перовић, 1989). У оквиру студије коју су реализовали (Ни и др., 2019) такође је приказан мониторинг слегања за подручје дела Шенжена и Хонг Конга у Кини. Они су користећи податке добијене процесирањем из сателитских мисија које су упоређивали са подацима из GNSS опажања дошли до закључка да су просторна резолуција и вертикална компонента померања, односно слегање или издизање, значајно боље у случају коришћења InSAR приступа, док је за хоризонтално померање према подацима боље резултате показала GNSS метода. InSAR приступ праћења померања скатерера и резултати мониторинга публиковани су кроз радове (Polcari и др., 2016; Pepe, 2018) као и у раду (Bakon и др., 2014), где се такође потврђује релевантност метода базираних на радарским снимцима. У радовима (Raucoules и др., 2007) као и (Crosseto и др., 2016) веома детаљно је приказано како се користи фазна информација из радарских снимака за добијање вредности померања површине терена од неколико дециматара до неколико милиметара. Интеграција GNSS опажања и нивелманских геодетских мерења са InSAR приступом може обезбедити најбоље и најпоузданије резултате. Интеграцијом поменутих метода број GNSS пријемника може бити смањен док би InSAR метода обезбедила густину деформационих тачака као што је приказано у раду (Del Soldato и др., 2021).

Генерисање InSAR интерферограма два радарска снимка истог подручја различитог датума које је у својим радовима објавио (Graham, 1974) датира још из 1974. године. Самом методологијом SAR интерферометрије која је развијана између 1989. и 1991. године бавили су



се и сnose велике заслуге за своја истраживања (*Gabriel u др., 1989*). Диференцијални *InSAR* (*DInSAR*) је следећи, надограђени, корак *InSAR* методе која омогућава мониторинг померања скатерера на површини терена у правцу, линији, гледања сателита (*LOS*), који је објашњен у више радова, од којих треба издвојити радове: (*Luckman u др., 1998; Sun u др., 2002; Tomas u др., 2014; Barber, 1985; Blackledge, 1986; Curlander u др., 1991; Sheurer u Wong, 1991; Runge u Bamler, 1992; Bamler, 1992; Bamler u Schättler, 1993; Krawczyk u др., 2018; Ciampalini u др., 2019*). Прецизност *DInSAR* методологије повезана је директно са просторно-временском резолуцијом сателитских мисија, и оптерећена је пре свега атмосферским утицајима и грешкама орбита. Значајан допринос на редукацији атмосферских утицаја дали су кроз своја истраживања и публикације (*Bakaert u др., 2015; Bakaert, Hooper u Wright, 2015; Fattahi u др., 2014*), где је као резултат ових студија направљен пакет за атмосферску корекцију под називом *TRAIN* доступан на адресама (*davidbekaert.com; github.com*), који је коришћен у оквиру ове дисертације, и који знатно доприноси квалитету података који се генеришу користећи радарске снимке. У последњих петнаест година значајни напори уложени су од стране бројних истраживача да се превазиђу потешкоће и имплементира интерферометријски процес за генерисање и мониторинг површинских померања скатерера коришћењем новолансираних сателита из разних сателитских мисија, као и иновацијом методологије која је била неопходна да би пратила сам напредак технологије, где треба издвојити радове (*Shi u др., 2020; Ma u др., 2016; Pawluszek-Filipiak u др., 2020*).

Прве радове из области интерферометрије перманентних скатерера (*PSI*), познатије још и као метод Перманентних Скатерера (*PS*) изложио је (*Ferreti u др., 2000; Ferreti u др., 2001*) 2000. и 2001. године, док је метод Смањених Базних линија Сателита (*SBAS*) уведен коју годину касније у радовима (*Barardino u др., 2002*). Развој алата и могућност шире примене анализе перманентних скатерера употпунио је својим радовима *Hooper* што је резултирало софтверским пакетом под именом *STaMPS* скраћено од *STANford Method for Permanent Scaterers* који је доступан на адресама (*homepages.see.leeds.ac.uk*). Треба посебно истаћи и радове (*Bechor u Zebker, 2006*), као и (*Zague-Martinez u др., 2016*) на доприносу у поменутој методологији. Последње, актуелно издање *STaMPS* пакета датира из 2018. године, доступно је за слободну употребу као софтвер отвореног кода, и може се бесплатно преузети и користити. Студије као што су реализовали (*Deng u др., 2017; Alatza u др., 2020*) објашњавају употребу хибридног модела анализе померања перманентних скатерера тј. истовремено коришћење *PS* и *SBAS* методе за исте податке и подручја од интереса, при чему се ове две методе значајно допуњују, с обзиром да *PS* метода углавном обезбеђује скатерере у насељеним подручјима док *SBAS* метода обезбеђује скатерере у подручјима, која су за пољопривредне намене, тј., подручја која нису урбанизована.

Поред *PS* и *SBAS* методе постоје и друге методе за анализу померања коришћењем радарских снимка. У раду који су објавили (*Mora u др., 2003*) представљена је анализа и резултати померања коришћењем Технике Кохерентних Пиксела (*CPT*). У раду (*Werner u др., 2003*) урађена је анализа и приказ резултата померања коришћењем Интерферометријске Тачкасте Циљане Анализе (*IPTA*). У раду (*Crosetto u др., 2008*) урађена је анализа и приказ резултата померања коришћењем методе Стабилних Тачака Мреже (*SPN*). Парови Перманентних скатерера (*PSP*) су још једна од техника за добијање резултата померања на површини терена и приказани су у раду (*Costantini u др., 2008*). *Zhang u др., (2012)* су добили резултате приступом методи Повремено Кохерентних Тачака Интерферометрије (*TCPI*).

Велики уложени труд у неким земљама имао је за резултат реализацију мониторинг померања огромних подручја доступних у реалном времену кроз веб картографске сервисе, као што су целокупна територија Немачке, доступна на адреси (*bodenbewegungsdienst.bgr.de*), територија Норвешке (*insar.ngu.no*) и Италије коју је представио (*Costantini u др., 2017*). Рад који су публиковали (*Bakon u др., 2020*) довео је до формирања веб сервиса за помоћ у одлучивању приликом анализе инфраструктурних објеката на могуће несреће под називом *remotIO* која је



базирана на мулти-временским *InSAR* (*MT-InSAR*) подацима. Многе студије приказале су резултате слегања за неке градове и подручја у Европи. Поред поменутих (*Cenni u др., 2021; Hu u др. 2019*) у области престонице Италије, Рима резултате су публиковали (*Delgado-Blasco u др., 2019*). Такође, (*Zhang L. u др., 2012*) објавили су студију у оквиру басена Лос Анђелеса у САД, док су (*Zhang Y. u др., 2021*) представили у својим радовима резултате слегања за целу провинцију Јиангсу у Кини.

Радови на развоју интерферометрије могу се посматрати и према узроку настанка деформација површи терена, услед појаве земљотреса, клизишта, вулканских активности, рударства итд. Тако су (*Polcari u др., 2016; Mora u др., 2016*) објавили радове који анализирају последице претрпљених земљотреса, док су (*Krawczyk u др., 2018; Ma u др., 2016; Pawluszek-Filipiak u др., 2020; Wang u др., 2021*) објавили радове који као узрок деформација анализирају активности везане за рударство. Мониторингом терена и мониторингом обалских подручја бавили су се (*Cenni u др., 2021; Hu u др. 2019; Raucoules u др., 2007; Ciampalini u др., 2019; Shi u др., 2020; Deng u др. 2017; Alatza u др., 2020; Mora u др., 2003;igna u др., 2021*), док су вулканске активности разматрали (*Lu u др., 2007*). Анализом померања глечера бавили су се (*Li u др., 2009*), док су (*Wang u др., 2021*) на основу радарских снимака дошли на идеју да истражују илегалне рударске активности тражећи резултате просторне декорелације у оквиру истражних подручја као информацију за анализу.

Комбиновање различитих поларизација као што су, вертикално поларизован талас и приликом емитовања и приликом пријема (*VV*) као и вертикално поларизован приликом емитовања и хоризонтално поларизован приликом пријема (*VH*), техника ПОЛаризоване Перманентне Скатерер Интерферометрије (*PolPSI*) може се користити за редукују декорелације и добијање бољих резултата мониторинга према радовима (*Zhao u др., 2022*). Компарацијом резултата добијених *InSAR* техникама и техникама геодетског мониторинга, пре свега *GNSS* прецизног одређивања положаја тачака и нивелманских опажања, разматрали су и објавили (*igna u др., 2021*) као и (*Raucoules u др., 2009*). Као додаток компарацији са техником геодетских нивелманских мерења у овој дисертацији представљена је и компарација са геотехничком симулацијом померања површи терена.

На основу ових истраживања, као и узимањем у обзир развој технологија и методологија, у овој дисертацији биће представљени алгоритми за процесирање и генерисање временских серија слегања користећи интерферометријски метод перманентних скатерера. Први део процесирања биће имплементиран у Сентинел Апликациону Платформу (*SNAP*) софтвер, доступан на адреси (*esa.int, step.esa.int*), где ће бити креирани интерферограми који представљају круцијални корак у добијању резултата временских серија померања површине терена, и коју је као софтвер отвореног обезбеђује Европска Свемирска Агенција (*ESA*). Други део процесирања биће реализован у оквиру *STaMPS* пакета за процесирање који служи за генерисање временских серија деформација, на основу добијених интерферограма. Као основа биће коришћени радарски снимци преузети из *ESA* репозиторијума снимака Сентинел мисија доступних на адреси (*scihub.copernicus.eu*) преко Аљаска Сателитског Портала за претрагу сателитских снимака (*ASF*) (*search.asf.alaska.edu*). Треба нагласити да ово истраживање обухвата период од око 4,25 година или скоро 1550 дана, тачније од октобра 2016. године до децембра 2020. године.

## 1.2 Полазне хипотезе, циљеви и предмет истраживања

Равнотежа стенских формација нарушава се услед рударских процеса, што доводи до промене рељефа терена и потенцијалних инфраструктурних оштећења. Овај феномен идентификован је као неизбежни ефекат експлоатационе рударске индустрије још током раних почетака рударства. Углавном, рудници су позиционирани тамо где постоје налазишта која су често у близини или директно испод насељених подручја. Тако се током свог историјског развоја ова



област сусретала са етичким и материјалним одговорностима, која проистичу из различитих опасности приликом експлоатације.

Првобитно, у фазама пре експлоатације угља, активности на ископавањима су првенствено укључивале вађење минералних ресурса унутар чврстих стенских маса на дубинама при површини. Померање терена је углавном резултирало дубоким пукотинама које су настајале услед експлоатационих радова, које осим значајних топографских измена нису изазвале штетне утицаје када се мере према савременим стандардима.

Почетак деветнаестог века означио је значајну прекретницу у историји рударства, посебно у контексту индустријске револуције и масовне експлоатације угља. У овом периоду као последице минирања јавља се све већа забринутост, посебно у вези са утицајем на објекте и објекте на површини терена. Велики слојеви угља који су били експлоатисани, често су били огромних површина, а неретко је било неопходно копати и све дубље како би се задовољила све већа потражња за угљем. Померања и слегања су изазвали ломове, пукотине и оштећења су се појављивале не само унутар минираних подручја већ и на местима где се такве последице раније нису очекивале. Ови површински ефекти били су штетни за инфраструктуре, путеве као и за животну средину.

Данашње време захтева посебне приступе и пажњу приликом експлоатације и истраживања минералних сировина. Са повећањем рударских активности повећава се и утицај на животну средину. Рударске операције могу пореметити екосистеме, топографију и загађивати животну средину, где ови ефекти могу имати дуготрајне штетне последице. Технолошки напредак омогућио је ефикаснију експлоатацију минералних сировина. Међутим, растућа потражња за овим ресурсима довела је до повећавања рударских активности, укључујући и површинско и подземно откопавање на већим дубинама. Да би се осигурала одговорна и одржива експлоатација минералних сировина, неопходно је разматрати не само економске предности, већ и утицаје на животну средину, као и приватну имовину појединаца и организација у експлоатационим подручјима. Прецизна квантификација ових утицаја је од великог значаја и укључује процену величине и обима ефеката кроз простор и време, пре, у току, као и после експлоатације. Разумевање ових утицаја помаже у спречавању или минимизирању хоризонталних и вертикалних померања које могу довести до оштећења или уништења станишта и инфраструктуре која се налази у близини рударских локација.

Мерења у циљу одређивања хоризонталних и вертикалних померања терена и објеката су великог обима и могу да трају и више дана, а морају се по истим критеријумима периодично понављати у складу са утврђеном динамиком. У циљу ефикаснијег добијања поузданих података, истраживања у оквиру ове дисертације усмерена су према развоју методологије која омогућава да се на једноставан начин објективно процени и квантификује утицај рударских радова кроз деформације како објеката на површи терена, тако и саме површи терена.

Предмет истраживања у оквиру ове докторске дисертације обухвата обраду сателитских снимака насталих радарским зрачењем Земљине површи микроталасним опсегом електромагнетног спектра, прецизније *C-band* који ради на фреквенцији од 5,404 GHz у циљу генерисања модела вертикалних померања за подручја која су под утицајем рударских радова, а са аспекта развоја нових знања у области техничких наука као и објективизацији процене утицаја рударских радова.

Наиме, досадашња научна истраживања показују да се радарски снимци могу искористити за праћење хоризонталних и вертикалних померања услед било којих генератора померања па тако и оних насталих услед рударских активности. Стога се све више улаже у реализације различитих сателитских мисија, а отварањем података из тих мисија интересовање науке за ову област је порасло нагло.



Циљеви дисертације представљају прикупљање радарских сателитских снимка, њихово процесирање које ће резултовати временским серијама хоризонталних и вертикалних померања, и на крају анализу померања кроз временске серије да би се постигло разумевање и квантификација деформација насталих услед рударских радова.

Неопходно је сагледати и дефинисати све утицаје који доводе до деформација услед различитих рударских активности, детаљно изучавање радарских сателитских система и простирање радарског зрачења, методологије обраде снимака, прилагођавање софтвера и скрипт фајлова за процесирање, визуализације резултата пре изношења дискусије и доношења закључака. Прикупљање снимака, целокупно процесирање и визуализација резултата померања површи терена и објеката на терену извршиће се користећи отворене податке сателитских мисија и софтвере отвореног кода.

Полазне хипотезе:

Ако је циљ ове дисертације креирање ланца за процесирање радарских снимака који би омогућио објективну квантификацију померања на површини терена и објеката насталих услед рударских активности, онда се према њему могу поставити следећа питања на која треба дати одговор као доказ полазне хипотезе:

- Да ли модел померања и излазне променљиве довољно прецизно дефинишу величину вертикалних померања,
- Која је метода процесирања оптимална за квантификацију вертикалних померања, где треба напоменути да су снимци из отворених података док су софтвери за обраду отвореног кода,
- Да ли модел вертикалних померања на основу радарских сателитских снимака може помоћи кориснику за процену померања услед рударских активности.

Хипотеза је базирана на чињеници да померања на површини терена представљају последицу експлоатације минералних сировина и као таква, померања се уз одговарајући приступ и методологију могу идентификовати, а затим и квантификовати. Према критеријумима који се могу дефинисати, померања се могу класификовати и представити као модел који би помогао у систему доношења одлука и управљања као и спречавању потенцијалних инцидената.

За дефинисање и компарацију у циљу верификације померања израдиће се одговарајући математичко-физичко-геотехнички модел. У раду ће се користити подаци добијени из отворених података сателитских мисија Европске Свемирске Агенције (*ESA*) на примеру површинског копа “Костолац”.

Истраживање ће бити обављено у реалним срединама и локалитетима, по јединственој методологији уз уважавање савремених научних принципа.

Циљ дисертације се може реализовати на следећи начин:

Преузимање радарских снимка из репозиторијума *ESA* за временски пероид од око четири године који ће представљати материјал за истраживање простирања и понашања вертикалних померања на површи терена кроз временске серије, где треба дефинисати одговарајућу методологију за процесирање. Анализирањем вредности померања на површини терена и корелацијом са класичним нивелманским мерењима као и корелацијом са геотехничким моделом слегања могуће је унапредити и осавременити приступ код праћења вертикалних померања за велике површине. Завршни модел вертикалних померања на површини терена треба да буде јасан и разумљив крајњем кориснику и да се може лако имплементирати у привреду и као такав помоћи у управљању пре свега рудницима али и у другим гранама привреде. Као улазни подаци ће се користити снимци отворени за слободну употребу, док ће се за процесирање користити софтвери отвореног кода.



### 1.3 Научне методе истраживања

Идеја за овако предложеној тему докторске дисертације настала је практично паралелно са реализацијом сателитске мисије „Сентинел 1“ *ESA* и отварањем података за слободан приступ и коришћење. Подаци који су доступни из наведене мисије су радарски сателитски снимци настали из синтетичког апертурног радарског (*SAR*) система за опажење површи Земље који користи микроталасни опсег електромагнетног спектра, прецизније *C-band* који ради на фреквенцији од 5,404 GHz.

Временска резолуција снимака првобитно је износила 12 дана са лансирањем сателита Сентинел-1 А, да би се каснијим лансирањем сателита Сентинел-1 Б у оквиру ове мисије који се такође може користити као извор података, временска резолуција побољшала на 6 дана.

Фаза таласа које прима радарски сензор директно је повезана са целокупним путем који је талас прешао, од извора до мете и назад. Код даљинске детекције, пасивне и активне, овај пређени пут може бити појединачна вредност дужине ако је сигнал, зрак или зрачење детектовано од површи мете или двострука вредност путање ако је сигнал, зрак или зрачење емитовано са радара и затим рефлектовано од површине, мете назад до радарског сензора. Са активним сензорима даљинске детекције, од извора до мете и назад, могуће је искористити информацију о фазној разлици као извор података кроз технику познату под називом интерферометрија.

Препроцесирање се обавља у софтверу који је специјално развијен од стране *ESA* за ову и касније сателитске мисије и подразумева добијање интерферограма. Даља обрада интерферограма врши се кроз *StaMPS* алгоритме који делом користе и *MATLAB* софтвер, а заснивају се на методи перманентних скатерера (*PS*) праћења померања развијеној на Политехничком Универзитету у Милану, док је у *R* и *QGIS* софтверу направљен алгоритам за анализу и визуализацију вредности вертикалних померања.

Докторска дисертација биће реализована у три фазе, и то:

Теоријска анализа: односиће се на проучавање досадашњих теоријских сазнања и нових резултата везаних за микроталасну даљинску детекцију.

Прикупљање података: ова фаза истраживања обухватиће прикупљање и проучавање неопходних теренских података везаних за дату проблематику, анализу и систематизацију истих.

Обрада и анализа података: обухватиће приказ резултата добијених теренским мерењима на локацијама, спровођење експеримента и на крају приказ укупних резултата. Резултати ће се огледати у реализовању модела за одређивање вертикалних померања и подршку одлучивању приликом експлоатације минералних сировина.

### 1.4 Научни допринос дисертације

У оквиру предложене докторске дисертације дефинисани су следећи научни доприноси:

- Нова сазнања везана за утицај широкопојасног зрачења из сателита на простирање деформација услед рударских радова,
- Формирање базе података радарских снимака доступних у сваком моменту за процесирање и анализу у случају било каквих ванредних догађаја,
- Унапређени ланац процесирања снимака оптимизован за подручје од интереса у циљу добијања вредности вертикалних померања на основу којих се може одлучивати и управљати,
- Оптимизована методологија и алати за побољшано, прецизно и математички квантификовано одређивање вертикалних померања који су једноставни за даљу анализу и одлучивање,



- Практична примена и картографски производи за кориснике, као доказ значаја ове дисертације у одрживој производњи где се јављају све виши захтеви за очувањем животне средине као и здравља људи.

## 1.5 Организација тезе

Истраживање ће се посматрати кроз неколико целина:

- Формирање базе података снимака и алгоритма за избор снимака,
- Добијање дозволе за спровођење експеримента на постојећем активном руднику,
- Формирање и реализација ланца процесирања,
- Одређивање вредности померања на основу *PS* методе,
- Геотехнички модел на основу добијених параметара,
- Компарација вредности вертикалних померања са класичним нивелманским мерењима и геотехничким моделом,
- Писање радова,
- Припрема упутства за примену картографских производа који су погодни за коришћење у реалним условима.

Докторску дисертацију би, поред општих делова, као што су: апстракт на српском и енглеском језику, кључне речи, предговор, садржај, слика, табела, списак скраћеница и литературе, чиниле и следеће структурне целине:

- У уводном делу биће изложени предмет, проблем и циљ истраживања, биће представљене хипотезе истраживања, приказана примењена методологија и изложена структура дисертације;
- Други део садржаће теоријске поставке радарских система за опажање Земљине површи. Конкретно: локацију истраживања, геолошку структуру и улазне параметре за геотехничко моделирање, сателитски програм *ESA* и софтверске платформе које ће се користити за израду дисертације.
- Трећи део садржаће разраду методологије, *SAR* системе, интерферометрију као и детаљну разраду целокупног дела процесирања.
- У четвртном делу приказаће се конкретни резултати срачунатих вертикалних померања са коначним моделом вертикалних померања на локацијама од интереса, резултати компарације вертикалних померања добијених из радарских снимака са геодетским нивелманским мерењима, као и геотехничким моделом померања.
- У последњем петом делу биће објашњени резултати вертикалних померања добијени из радарских система, нивелмана и геотехничког моделирања. Последњи део садржаће и закључна разматрања са предлогом даљих истраживања.
- После закључних разматрања приказаће се коришћена литература.
- На самом крају биће приказани биографски подаци.



## 2 Сентинел-1 подаци и локација истраживања

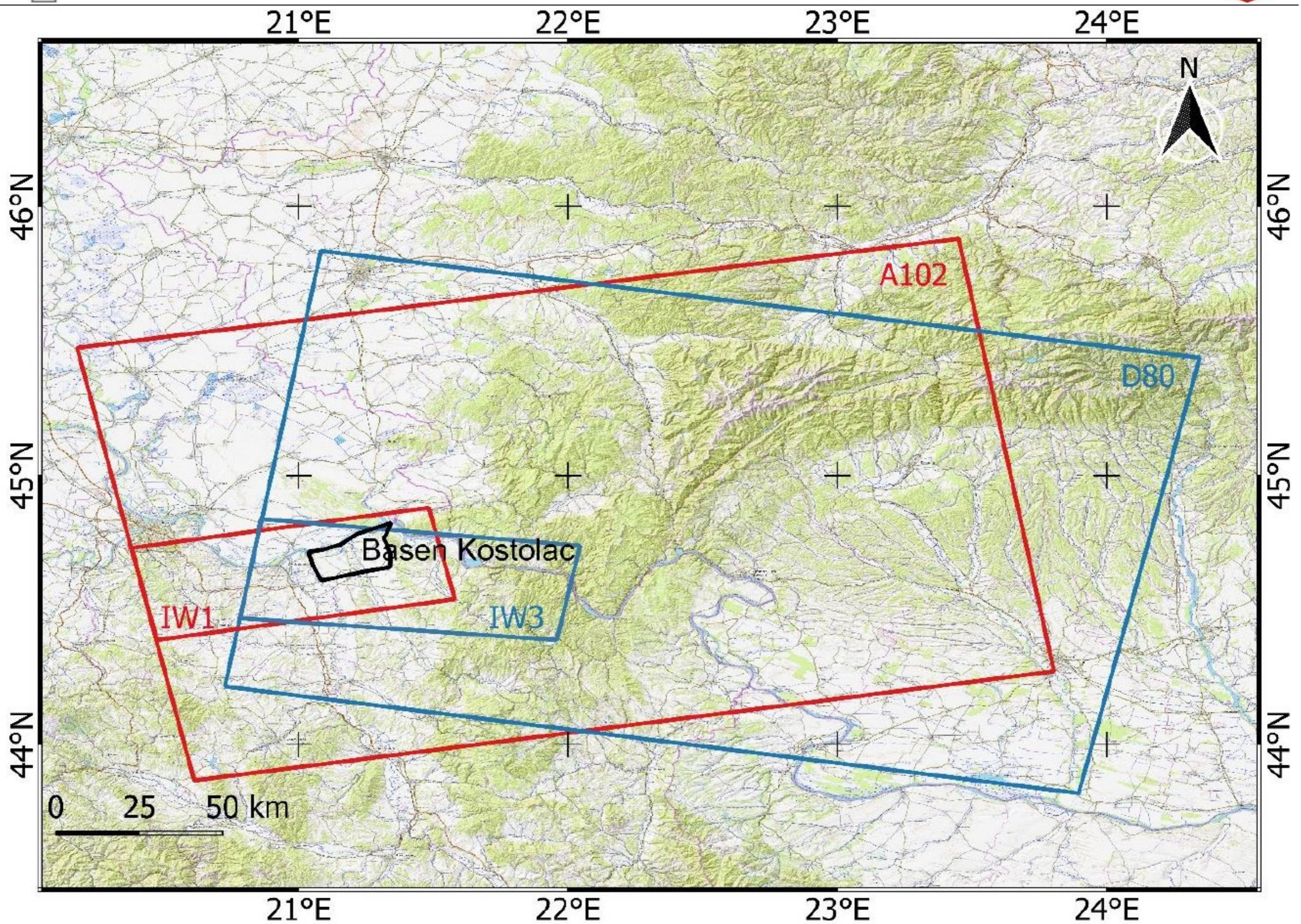
Научна истраживања су показала да се сателитски радарски системи могу искористити за квалитетно праћење деформација на површини терена као и саме деформације површине терена. Како циљ овог истраживања јесте да анализира и процени слегање околног терена услед утицаја околног површинског копа за експлоатацију угља „Костолац“ користиће се метода перманентних скатерера за генерисање временских серија померања како је очекиван велики број перманентних скатерера у насељеним подручјима и недостатак скатерера у пољопривредним деловима. За улазне радарске сателитске снимке преузети су сви снимци Сентинел-1 А и Б сателита. Методологија обраде снимка заснива се на техници која се назива интерферометрија и која је од почетка примене еволуирала све до данашње технике под називом интерферометрија перманентних скатерера (*PS-InSAR*) која није никада примењивана на рудницима Републике Србије, или у геодетској пракси повезаној са деформационим мониторингом.

У оквиру подручја од интереса издвајају се села Дрмно и Кличевац као најугроженија насеља, где се најближе куће налазе на мање од 200 метара од ивице површинског копа (слика 1). Анализа деформација урађена је и за села, Брадарац и Кленовник која се такође налазе у непосредној близини површинског копа. Поред ових насеља анализа је урађена и за насеље Костолац, али и посебно за део који покрива термоелектрана и објекти од значаја за производњу угља. За валидацију оваквог истраживања и да би се превазишле грешке које су саставни део оваквог процеса, *PS* анализа је упоређена са техником геодетског нивелмана, који је подразумевао теренске радове, после којих је *ID* изравнање извршено користећи Метод Најмањих Квадрата (*MNK*) (*Перовић и др., 2005*). Деформациона анализа урађена је помоћу Пелцерове методе, (*Pelzer, 1971*). Улазни подаци, особине и поступци обраде приказани су у поглављу 2, укључујући геотехничке карте и податке док су методе приказане у поглављу 3. Резултати анализе временских серија презентовани су у поглављу 4 док су сумарни резултати и закључна разматрања дати у поглављу 5.

### 2.1 Истраживање локације

Костолачки угљени басен, налази се 90 km источно од Београда, главног града Републике Србије и подељен је на четири угљена лежишта. Први део заузима Дрмно које се налази на источној и југоисточној страни басена, други део представља Ћириковац који заузима централни део басена, трећи део назива се Смедеревско Поморавље и заузима западни део басена, док се последњи преостали део, четврти, назива Кленовник. Басен заузима површину од приближно 25 километара по дужини и 10 километара по ширини, и такође је познат под називом Стишки басен или само Стиг (слика 2).





Слика 2. Локација подручја истраживања: бразде за процесирање у оквиру поднимка IW1 и IW3 за A102 и D80 путању сателита, где црни полигон представља костолачки угљени басен (сателитска подлога – Open Topo map), (Гојковић и др., 2023).

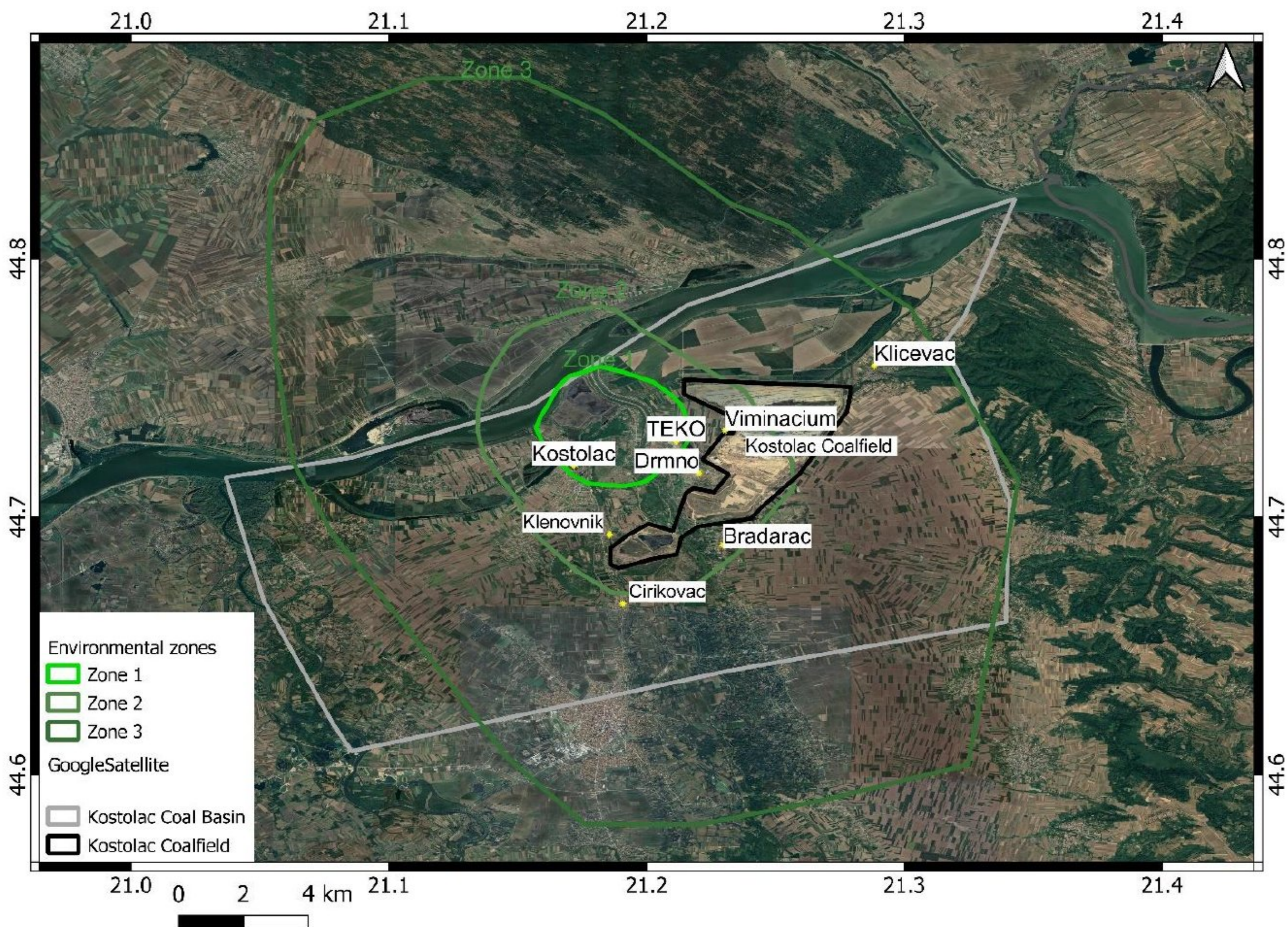
Угљени басен се налази у трећем, уједно и последњем периоду експлоатације, који је почео 2019. и завршиће се 2049. Главни део Костолачког угљеног басена је површински коп (слика 1) који обезбеђује сирови материјал неопходан за производњу електричне енергије у четири Костолачке термоелектране. Пројектована производња угља од 9 милиона тона годишње подразумева континуалан рад од пет Багер-Транспортер-Одлагач (БТО) система за неопходне радове на откривци, плус један додатни на скидању и депоновању хумуса као и откопне системе на два нивоа за експлоатацију угља.

Слој угља на површинском копу у Костолцу је хомогене структуре без прослојака глине, са просечном дебелином између 18 и 20 метара. Слој угља има пад према западу од око 6 степени и према североистоку између 3 степена и 4 степена. Североисточна страна представља уједно и правац напредовања радова на експлоатацији угља, тзв., чело површинског копа. Терен је релативно раван, и због угла пада слоја угља дебелина откривке се креће од 20 метара на источној страни до 120 метара на западној страни површинског копа.

Услед близине реке Млаве са западне стране и реке Дунав са северне стране, као и због неповољне литолошке грађе горњи део слоја угља је комплетно поплављен. За одводњавање копа коришћене су комбиноване методе за дренарање да би се избегло исушивање околног пољопривредног земљишта као и да околна насеља не остану без воде, у мери у којој је то могуће. Јужна и западна граница копа заштићене су водонепропусним фолијама, које спречавају доток површинске воде у површински коп, као и исушивање земљишта у правцу села Брадарац и Мајуревац. Са северне, источне и југоисточне стране површинског копа дренарање је обезбеђено помоћу система бунара. Како систем обезбеђује исушивање откривке са једне стране, са друге стране оставља село Дрмно без воде у сопственим бунарима, тако да је урађен водовод за снабдевање становника овог села.

Термоелектрана “Костолац А” налази се на десној страни реке Дунав на територији Костолаца, док се термоелектрана “Костолац Б” налази неколико километара даље, на ушћу реке Млаве у реку Дунав, што је ближе објашњено на адреси ([www.eps.rs](http://www.eps.rs)). Са 1000 мегавата инсталиране снаге, костолачке термоелектране годишње производе пет милијарди мегавата електричне енергије, што представља удео од 14% укупне производње електричне енергије Републике Србије, (Костовић и др., 2018).

Подручје за процесирање обухвата преко 500 квадратних километара, али примарна подручја за анализу су Дрмно, Кличевац, Брадарац, ТЕКО подручја и Костолац, која заузимају око 65 километара квадратних површине (слика 1), и припадају зонама животне заштите 1, 2 и 3 на основу утицаја површинског копа (слика 3), ([www.eps.rs](http://www.eps.rs)). Истражна локација представља подручје од интереса (ПОИ) које обухвата резерве угља укључујући и околна насеља, која се и налазе на резервама угља али и на граници површинског копа.



Слика 3. Зоне заштите животне средине. У оквиру дефинисаних зона врши се мониторинг квалитативних и квантитативних података утицаја на животну средину, укључујући загађење и буку. Подручје за процесирање углавном се поклапа са зонама заштите (сателитска подлога – Google), (Гојковић и др., 2023).

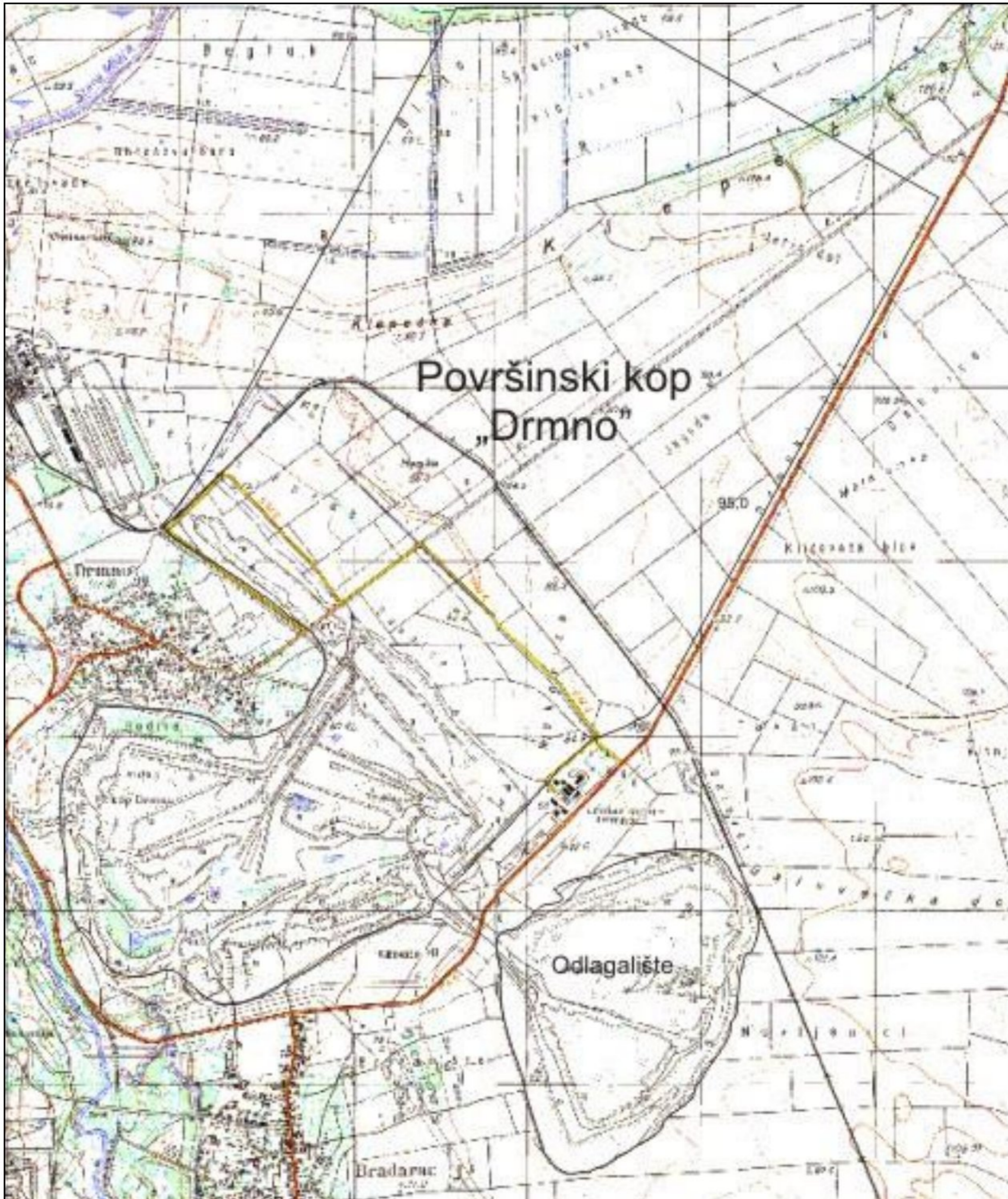
Један од проблема који се јавља јесте слегање насељених места. Како површински коп “Костолац” нема сервис за мониторинг овакве врсте утицаја, ово истраживање презентује решење за успостављање мониторинг сервиса и имплементира процедуру за праћење слегања околних вештачких објеката као и животне средине.

## 2.2 ПК Дрмно и термоелектрана Костолац

На основу „Студије оправданости селективног откопавања и одлагања откритке“ у овом поглављу биће представљени основни подаци ПК Костолац, (Студија оправданости селективног откопавања и одлагања откритке, 2003).

Привредно Друштво Термоелектране и копови Костолац (ПД-ТЕКО), у државној својини, које производи термоелектричну енергију и коју испоручује ЕлектроПривреди Србије (ЕПС) запошљава близу 4 000 радника. Основни циљ друштва је поуздано снабдевање потрошача квалитетном електричном енергијом, са посебном пажњом на заштиту животне средине и коришћење ресурса.

ПК Дрмно почео је са радом 1987. године уз производњу од 5,5 милиона тона угља годишње. Према педолошким извештајима хумусни слој је до 2,5 метара дубине, где се откопани материјал утовара на етажни транспортер и транспортује до одлагача и наноси се на више делове највише етажне и етажних равни као и на бочне стране (слика 4).



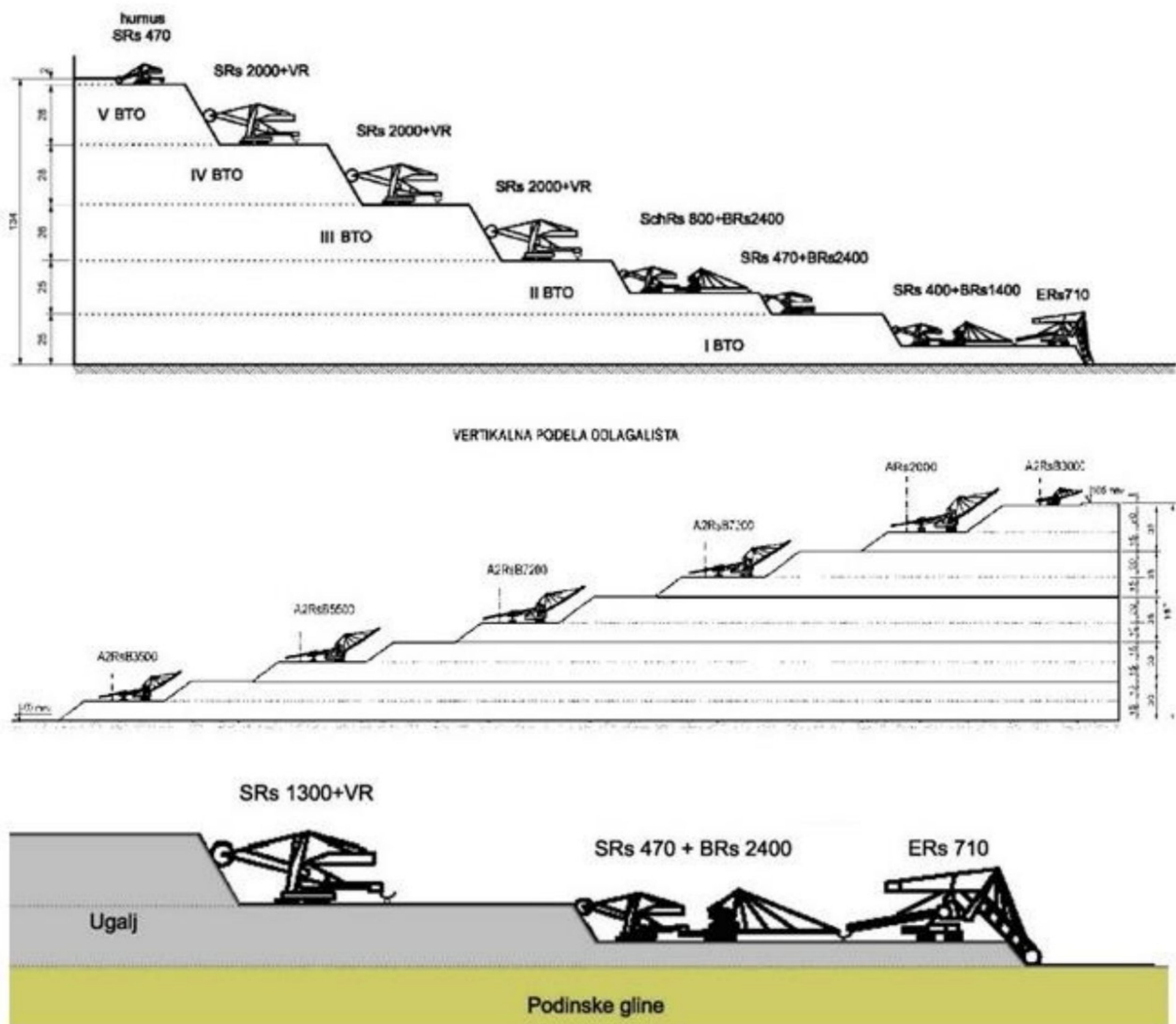
Слика 4. Ситуациони план за ПК Костолац и ПК Дрмно (Студија оправданости селективног откопавања и одлагања откритке, 2003).

Према геометрији фронта разликују се три периода експлоатације ПК Дрмно:

1. од 2009. до 2013. године,
2. од 2014. до 2018. године,
3. од 2019. до краја експлоатације 2049. године.

У првом периоду је највеће напредовање и брзина радова на откривци зато што је фронт радова око 3000 метара и дебљина откривке између 62 и 81 метар. Годишње напредовање радова на откривци износило је око 290 метара, на угљу око 170 метара, а на унутрашњем одлагалишту око 235 метара. У другом периоду фронт радова на угљу и откривци износи око 190 метара а на унутрашњем одлагалишту око 180 метара, док у трећем периоду на откривци напредовање фронта износи око 110 метара, на угљу 130 метара и 90 метара на одлагалишту.

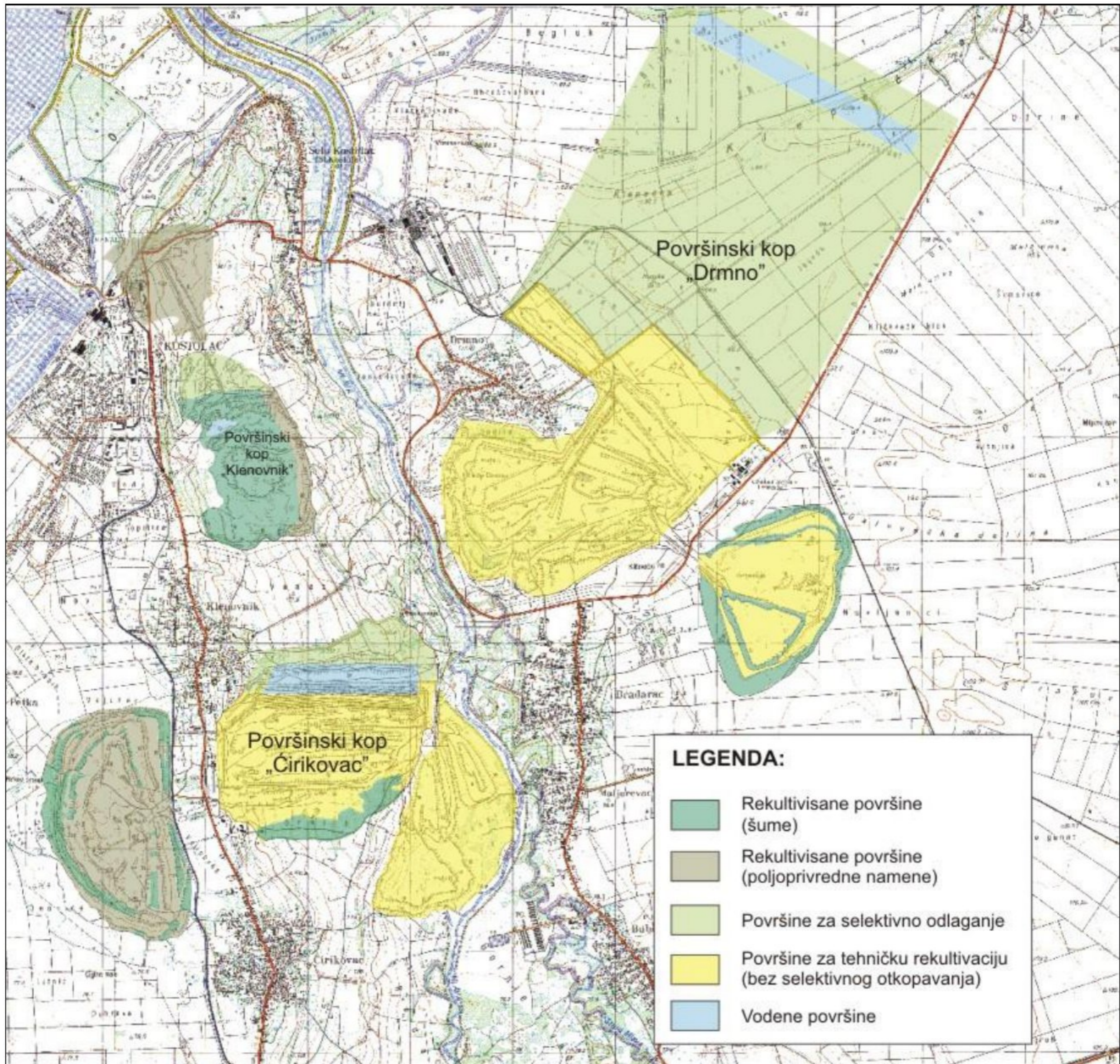
За експлоатацију од 9 000 000 тона годишње потребно је 5 БТО система на откривци, 1 БТО систем на откривању хумуса и два откопна етажна система за угљени слој, док се одлагање врши са 6 одлагача (слика 5).



Слика 5. Распоред БТО Система (горе). Одлагалиште по етажама (средина). Систем откопавања угља (доле)  
(Студија оправданости селективног откопавања и одлагања откривке, 2003).

Унутрашње одлагалиште ПК Дрмно које ће достићи близу 700 хектара на крају експлоатације као и спољашње одлагалиште од око 200 хектара поседује све услове за правилно одлагање хумуса који је високог квалитета тзв. чернозем. У оквиру плана рекултивације на косинама

одлагалишта треба посадити шуме, на благим косинама и равним деловима, треба реализovati воћарство и ратарство, као и обезбедити лако доступне изворе наводњавања (слика 6).



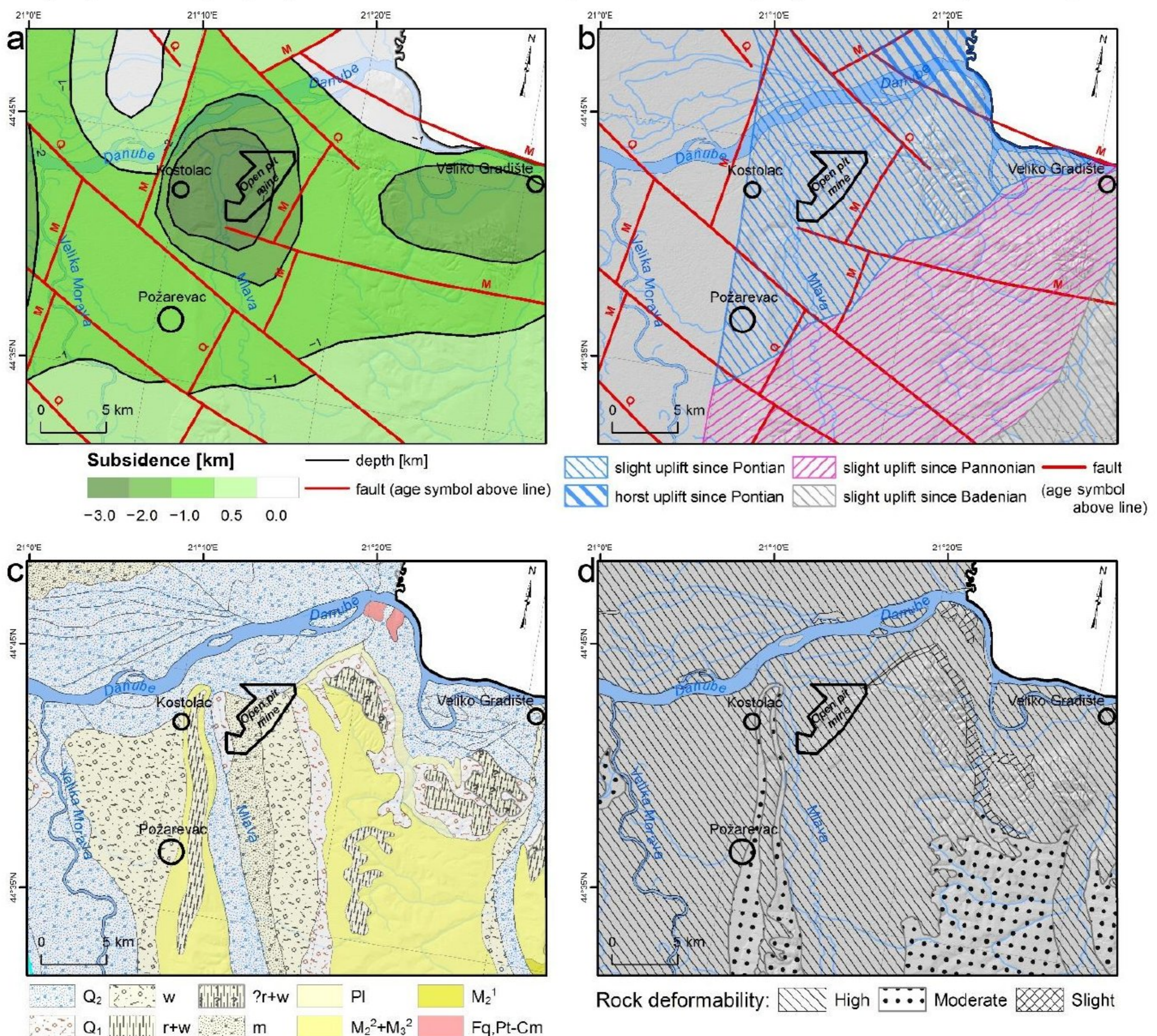
Слика 6. План рекултивације ПК Костолац (Студија оправданости селективног откопавања и одлагања откривке, 2003).

### 2.3 Геолошка структура локације истраживања

Шире ПОИ географски је оивичено реком Дунав на северу, долином реке Ресаве на југу, реком Великом Моравом на западу и Голубачким планинама на истоку. Припада Панонском басену (његовој јужној периферији) познатом као Костолачки басен, где су слојеви угља формирано током ере Понта (горњи Миоцен).

Депресија Дрмно је централни део Костолачког басена, окружена суседном Смедеревском депресијом на западу и депресијом Велико Градиште на истоку а Пожаревачким гребен доминира средином (слика 7а), где се више може видети на адреси ([geoliss.mre.gov.rs](http://geoliss.mre.gov.rs)). Његова основа, неколико километара дубоко испод, обухвата стари кристални комплекс, образујући високо тектонизоване, тектонске стене високог и ниског степена. Ови шкриљци из доба Палеозоика појављују се на обалама реке Дунав у облику малих закрпа (слика 7ц). После веома дугог континенталног развоја, подручје је потонуло са развојем Панонског басена у

Терцијалној ери. Продубљивање свих ових депресија било је значајно. Процењено је да је дубина била 3000 метара у централном делу депресије Дрмно и најмање 2000 метара у осталим депресијама (Смедерево, Пожаревац и Велико Градиште). Састоје се првенствено од кластичних седимената, слабо цементиран до ломљив, са варирајућим уделима песка, муља и глине који су у зависности од локације кречњачки или лапоровити, и прослојани су са неколико хоризоната лигнитног угља (Ђоковић и др., 2018). Налазе се слојеви угља променљиве дебљине од слоја дебљине мање од метар до слојева дебљине преко 1890 метара (Ђоковић и др., 2018). Квартарни седименти налазе се на врху доминантних миоценских формација. Огромни речни систем који чине реке Дунав, Велика Морава и Млава уобичајено формирају густе алувијалне равни и тераце које се пре свега састоје од шљунка и песка. Највиши делови Пожареваца и Сиракова су прекривени лесом. Понирући са ових равни, делувијални и пролувијални седименти досежу седименте алувијалне основе (слика 7ц).



Слика 7. (а) Неотектонска карта ширег ПОИ; (б) Карта тренутног тектонског тренда; (ц) Геолошка карта ширег ПОИ, према [72] (Q<sub>2</sub>= – флувијални Квартарни седименти, w= – Würm Квартарни седименти, r+w= – Ris и Würm Квартарни седименти, ? r+w= – неодређени Ris и Würm Квартарни седименти, m= – Mindel Квартарни седименти, Pl= – Плиоценски кластити, глина и лапорци, M<sub>2</sub><sup>3</sup>+M<sub>3</sub><sup>2</sup>= – Миоценски кластити, M<sub>2</sub><sup>1</sup>= – Миоценски пешчари и кречњаџи, Fq,Pt-Cm= – кристални шкриљџи Палеозоиџа); (д) Деформациона карта ширег ПОИ, (Ђоковић и др., 2023).

Преовлађујуће структуре имају трендове нормалних раседа из Алпског тектонског доба (ера Миоцена) који се протежу ССИ-ЈЈЗ. Пресечени су млађим (Квартарни период) нормалним



раседима који се протежу у правцу СЗ-ЈИ, дуж којих су се слегли гребени и удубљења. Неотектонска активност указује на благо издизање преко целе источне половине ПОИ од раног Миоцена па надаље (Слика 7б), укључујући и издизање хорста у најсевернијем углу. Најмлађи тренд издизања од доба Понта на овамо налази се око Костолачког басена (Слика 7б). Западни делови не показују промене у тренду, тј. благо слегање из времена настанка басена (Слика 7б). Пликативне структуре нису јасне, али благо савијање са малим угловима је типично за све миоценске формације у ПОИ.

Са геотехничке тачке гледишта, ове формације се крећу од веома деформабилних до умерено и благо деформабилних (Слика 7д). Већина деформабилних формација повезана је са квартарним растреситим седиментима, који имају типичну грађу (песак и шљунак доминирају), док су лесне равни и слабо везани миоценски седименти благо или умерено деформабилни, са могућом врстом консолидованог слегања због променљивог глинског или органског (угаљ) садржаја. Прашина од пепела депонованог у јаловини на површинском копу је такође пешчане фракције, што значи да је очекивано тренутно слегање, иако су уочене и неке друге врсте померања терена као што су клизишта, (Божих, 2022). Овакве карактеристике су повољне за *InSAR* методологију, која је коришћена за праћење процеса у дужини од четири године око површинског копа. Режим подземних вода такође има велики утицај (Peduto и др., 2022), и може се очекивати да систем бунара за дренажу стално спушта ниво подземних вода испод нивоа дна копа услед чега се може закључити да су услови на површини или близу површине веома суви, (Божих, 2022).

#### 2.4 Сентинел-1 колекција података

Сентинел-1 је део Коперникус сателитског програма европске свемирске агенције, који се састоји од два сателита Сентинел-1А и Сентинел-1Б лансираних 3. априла 2014. и 25. априла 2016 (слика 8). Они врше константан мониторинг Земљине површи, обезбеђујући тако репозиторијум радарских снимака, који се могу користити за мапирање и одређивање промена Земљине површи, деформације тла, анализу поплавлених подручја, итд. Као констелација два сателита чије се орбите разликују за  $180^\circ$ , обезбеђују временску резолуцију од 6 дана, и зраче површину Земље Синтетичким Апертурним Радаром (*SAR*) *C-benda* на фреквенцији од 5,405 гигагерца, независно од временских услова и доба дана са ширином појаса зрачења од око 250 километара.



Слика 8. Сателит Сентинел-1 мисије (преузето са ЕСА портала ([www.esa.int](http://www.esa.int))).

Радарски снимци доступни су од октобра 2014. године када Сентинел-1 А сателит достиже своју пуну оперативност. Најреализованији формат података и формат који је највише заступљен у процесирању је *SLC IW* (*Single Look Complex Interferometric Wide* (видети поглавље 2.5.5)) тип података. *SLC* подаци садрже сирове радарске податке опажане површи Земље који су геореференцирани коришћењем прецизних орбита и података који су саставни делови мисије и који су испоручени у *LOS* геометрији (видети поглавље 2.5.3.3). Такође, подаци су и поправљени за одређене грешке као што су: азимутно бистатичко кашњење, шеме антене и губитака у преносу сигнала. *LOS* је карактеристично радарско опажање, радарска геометрија код сателита, које се може посматрати као линија вида (*LOS – Line Of Sight*) од сензора (радара) до сваког рефлектујућег објекта тј., мете. Код *SLC IW* снимака сваки снимак се састоји од три подснимка где се сваки подснимак састоји од врсти у правцу азимута. За ове снимке зрачење врсте (опажање) траје око 2,75 секунди са преклопом између врста од 0,4 секунде који је довољан да обезбеди преклапање са суседним тереном, али треба напоменути да преклоп може варирати.

*IW* начин опажања Земљине површи Сентинел-1 сателитом је најзаступљенији и одговара на скоро све изазове у праћењу промена на површи терена. Један *IW* снимак има ширину око 250 километара и просторну резолуцију од 2,7 m x 22 m до 3,5 m x 22 m. За генерисање три подснимка користи се техника Теренског Опажања са Прогресивним Скеновима *TOPSAR* којом се управља зрак по врстама, избегава тзв., гужвање таласа и која на крају генерише хомогени снимак у погледу квалитета.

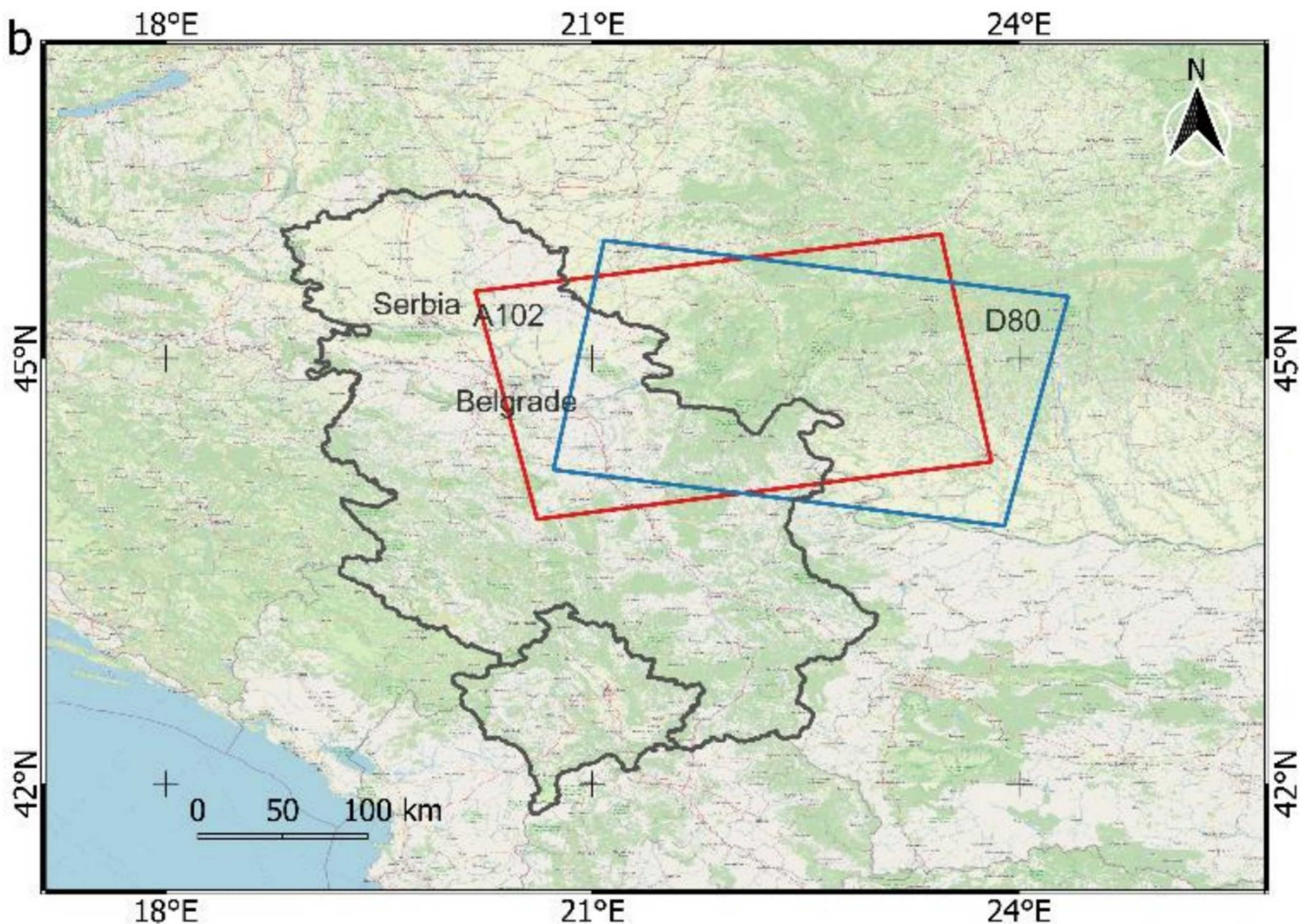
*IW* мод ради између вредности инцидентног угла од  $29,1^\circ$  до  $46^\circ$ , и може имати неколико различитих поларизација, двојне: крос-поларизоване *HH+HV* и *VV+VH*, као и појединачне ко-поларизоване *VV* и *HH*, ([esa.int](http://esa.int)). Поред мерења интензитета могу се мерити и фазе, на које се



и односи поларизација, и омогућава бољу анализу својстава скатерера, односно промена на површи терена.

Просторна резолуција *SLC* снимака зависи од врсте аквизиције. Поред поменутог *IW* мода који има резолуцију око 5 m x 20 m, постоје још три различита мода која се налазе у употреби. *SM* (*Strip Map*) мод има најбољу резолуцију од 1,5 m x 3,6 m до 3,6 m x 4,9 m, и активира се непосредно после хазарда, *EW* (*Extra Wide*) мод има резолуцију од 7,9 m x 43 m до 15 m x 43 m са ширином снимка од око 410 km, и пре свега се користи код зрачења мора и океана, и *WV* (*Wave*) мод са резолуцијом од 2 m x 4,8 m до 3,1 m x 4,8 m (видети поглавље 2.5.5.).

Сви снимци су преузети из репозиторијума за Сентинел-1А и Сентинел-1Б, узлазне и силазне путање, у широком интерферометријском моду (*IW*), са бројем орбите 102 за узлазну путању и бројем орбите 80 за силазну путању сателита, који се простиру од октобра 2016 (слика 9). до краја децембра 2020. (око 1542 дана), и као такви су коришћени за процесирање (табела 1).

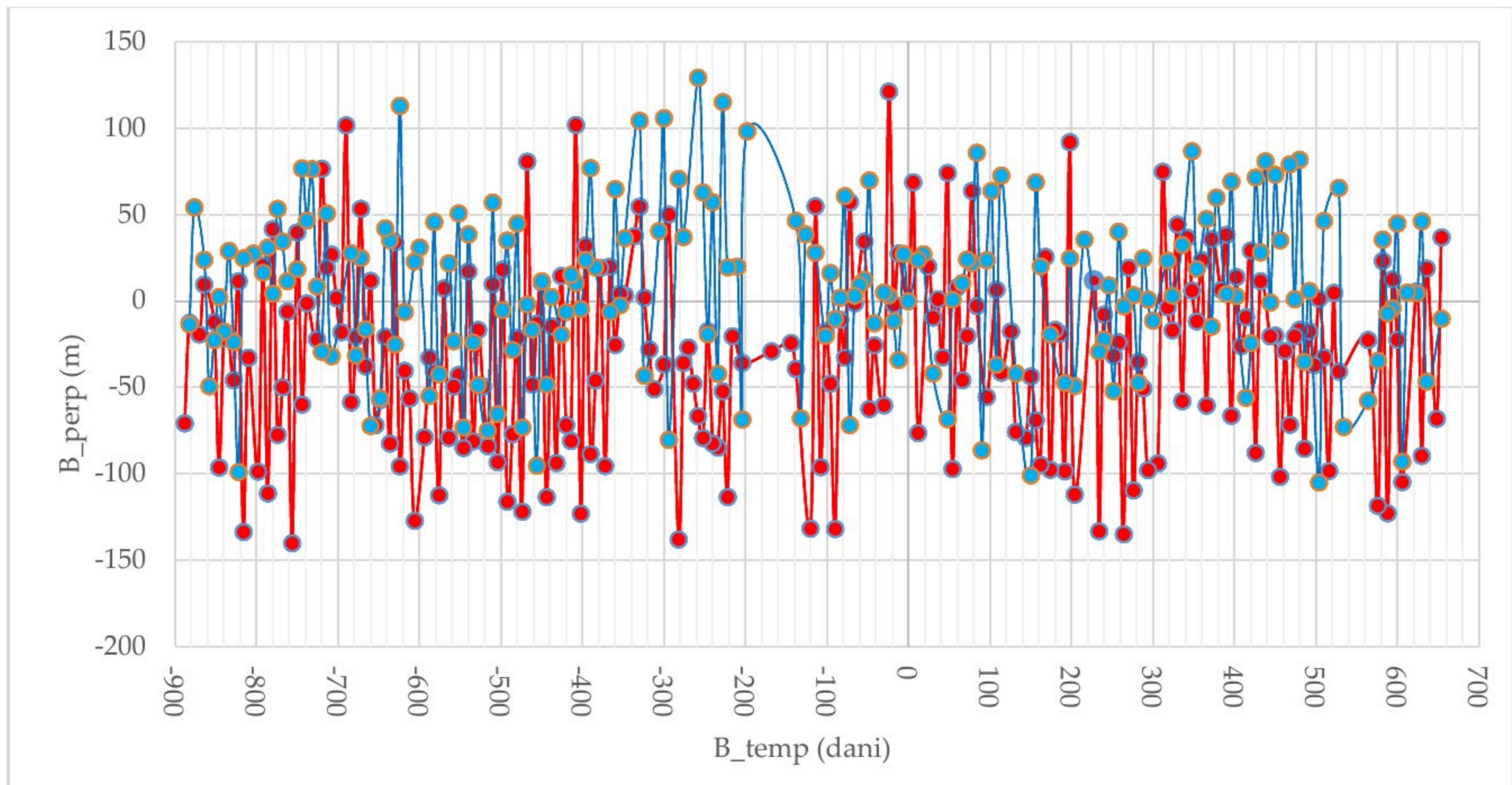


Слика 9. Локација подручја истраживања: (б) Сентинел-1 отисци радарских снимака, црвено (*A102*) узлазна и плаво (*D80*) силазна орбита (сателитска подлога – *Open Topo map*), (Гојковић и др., 2023).

Табела 1. Сентинел-1 колекција снимака за процесирање.

| Сателит | Први/Последњи Снимак  | Орбита  | Путања | Врста   | Аквизиција Мастер Снимка | Број Снимака | Поларизација |
|---------|-----------------------|---------|--------|---------|--------------------------|--------------|--------------|
| С-1 А   | 01.10.2016–15.12.2020 | Узлазна | 102    | IW1 4–5 | 17.07. 2018              | 127          | vv           |
|         | 24.10.2016–14.12.2020 | Силазна | 80     | IW3 6–7 | 22.07. 2018              | 128          | vv           |
| С-1 Б   | 07.10.2016–21.12.2020 | Узлазна | 102    | IW1 4–5 | 17.07. 2018              | 130          | vv           |

На слици 10 приказане су вредности базних линија, где вредност нула одговара мастер снимку, крајња лево вредност одговара октобру 2016. године док вредност крајња десно одговара децембру 2020. године. Дужина базне линије је један од одлучујућих параметара за квалитетно и успешно генерисање интерферограма, где важи да је за мању вредност базне линије квалитет интерферограма већи.



Слика 10. Дужина базних линија код интерферограма радарских снимака. Плаво – снимци силазне орбите сателита, црвено – снимци узлазне орбите сателита

## 2.5 Особине и поступци обраде Сентинел-1 података

Радарски системи за прикупљање података користе електромагнетно зрачење у одређеном спектру, најчешће микроталасном (слика 11). Електромагнетно зрачење генерише се кретањем наелектрисањанарочито услед убрзања наелектрисаних честица. Ово зрачење простире се у свим правцима од извора зрачења брзином светлости, (299.792.458 m/s, за простирање кроз вакуум). Електромагнетно зрачење је двоструке природе и може се посматрати и као честица и као талас, како је описано у квантној механици. У контексту *InSAR* система и примене, таласна природа електромагнетног зрачења биће подразумевана, (Reddy u Singh, 2018).



Слика 11. Спектар електромагнетног зрачења

Електромагнетно зрачење може се поделити према извору зрачења на природно и вештачко. Према таласној дужини тј., фреквенцији таласа, такође, се може подалити на: гама зрачење, X зрачење, ултраљубичасто зрачење, видљиво зрачење, инфрацрвено, микроталасни део зрачења и радио таласе (слика 11). Природно зрачење долази пре свега од Сунца, али подразумева и термално зрачење, итд., док вештачко зрачење долази од: радара, ласера, рендгена итд.

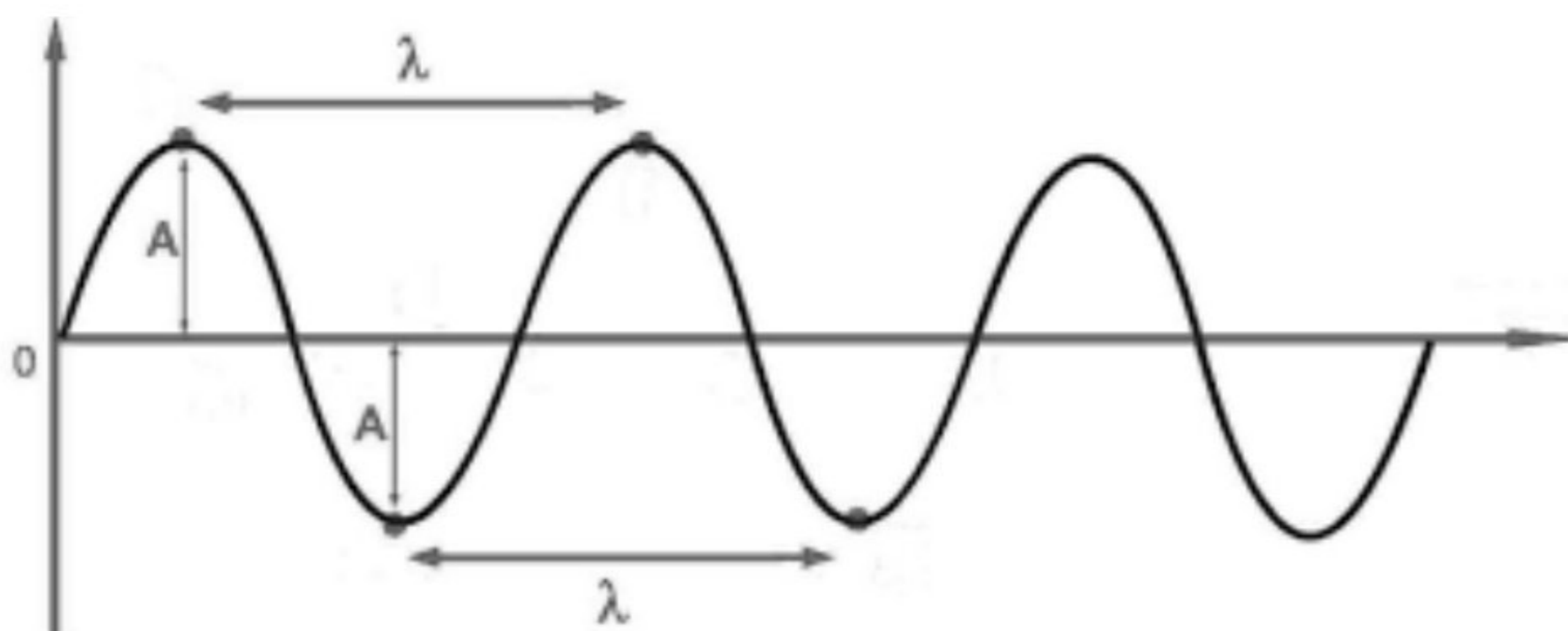


Електромагнетни таласи могу настати вештачким путем, претварањем (нпр. термалне) енергије у електромагнетно зрачење. Овај процес претварања омогућава намерно генерисање електромагнетног зрачења за различите потребе, укључујући и даљинску детекцију. Поред могућности да се вештачки произведе електромагнетно зрачење, веома битна чињеница јесте и да се то зрачење може детектовати и измерити одговарајућим сензорима. Сензори се могу категоризовати на активне и пасивне. Активни сензори истовремено и емитују и детектују електромагнетно зрачење, што значи да емитују пулсеве електромагнетног зрачења након чега мере рефлектовани сигнали. Пасивни сензори само детектују природно електромагнетно зрачење, без да активно емитују било какав сигнал, као пример могу послужити оптички сензори који детектују сунчеву светлост рефлектовану од површи Земље. Оваква мерења се користе за добијање информација из природе и информација које долазе од површи терена, јер карактеристике електромагнетног зрачења зависе од одређених услова који се мењају у додиру са објектима, тлом али и срединином кроз коју се простиру. Средина кроз коју се простиру електромагнетни таласи утиче на карактеристике самог зрачења, нпр., одређени део зрачења може бити апсорбован (атмосферски) што се може искористити као информација. У случају сателитских сензора, као што су радар, електромагнетна пропустљивост атмосфере представља важан ограничавајући фактор.

Радарски снимци у оквиру овог истраживања подразумевају информације о мерењима електромагнетног зрачења емитованог са сателита и рефлектованог од површи терена и објекта на терену. Радар емитује електромагнетно зрачење из микроталасног опсега и детектује амплитуду и фазу таласа који се враћа од површи Земље. Са обзиром да су микроталаси погодни за пенетрацију кроз атмосферу, мерени сигнал садржи у односу на емитовани сигнал важне детаље о површини од које је рефлектован, као што су састав, храпавост, влажност итд., али и податке о атмосферским срединама. Атмосферски услови могу утицати на варијације у радарским сигналимa које такође треба искористити или елиминисати. Примарни циљ даљинске детекције, у контексту радарских снимака јесте екстракција и коришћење информација садржаних у детектованим и измереним сигналимa. Добијени подаци могу бити различите природе, укључујући и податке својствима површи Земље али и компензацију на рачун атмосферских утицаја. Могу користити за мониторинг животне средине, класификацију и употребу земљишта и детектовање промена на површини терена.

### 2.5.1 Основне карактеристике електромагнетних таласа

На основу (Rees, 2012; Woodhouse, 2006) могу се представити основе електромагнетних таласа. Електромагнетни таласи представљају спрегу електричног и магнетног поља које се простиру кроз простор. Ако су таласи синусоидални (ако се могу описати синусном функцијом) онда поседују главне карактеристике као што су амплитуда, таласна дужина, период осциловања, фаза, брзина таласа али и параметре који се могу одредити на основу главних карактеристика као што су таласни број, фреквенција и угаона фреквенција (слика 12). Ове карактеристике имају значајну примену у значајну примену у физици, инжењерству и комуникацијама, и омогућавају разумевање и анализу електромагнетних таласа у различитим контекстима.



Слика 12. Основне карактеристике таласа ( $A$  – амплитуда и  $\lambda$  – таласна дужина).



Функција која описује кретање таласа кроз простор и време може се представити једначином:

$$\varphi(z, t) = A \sin k(z - vt) \quad (1)$$

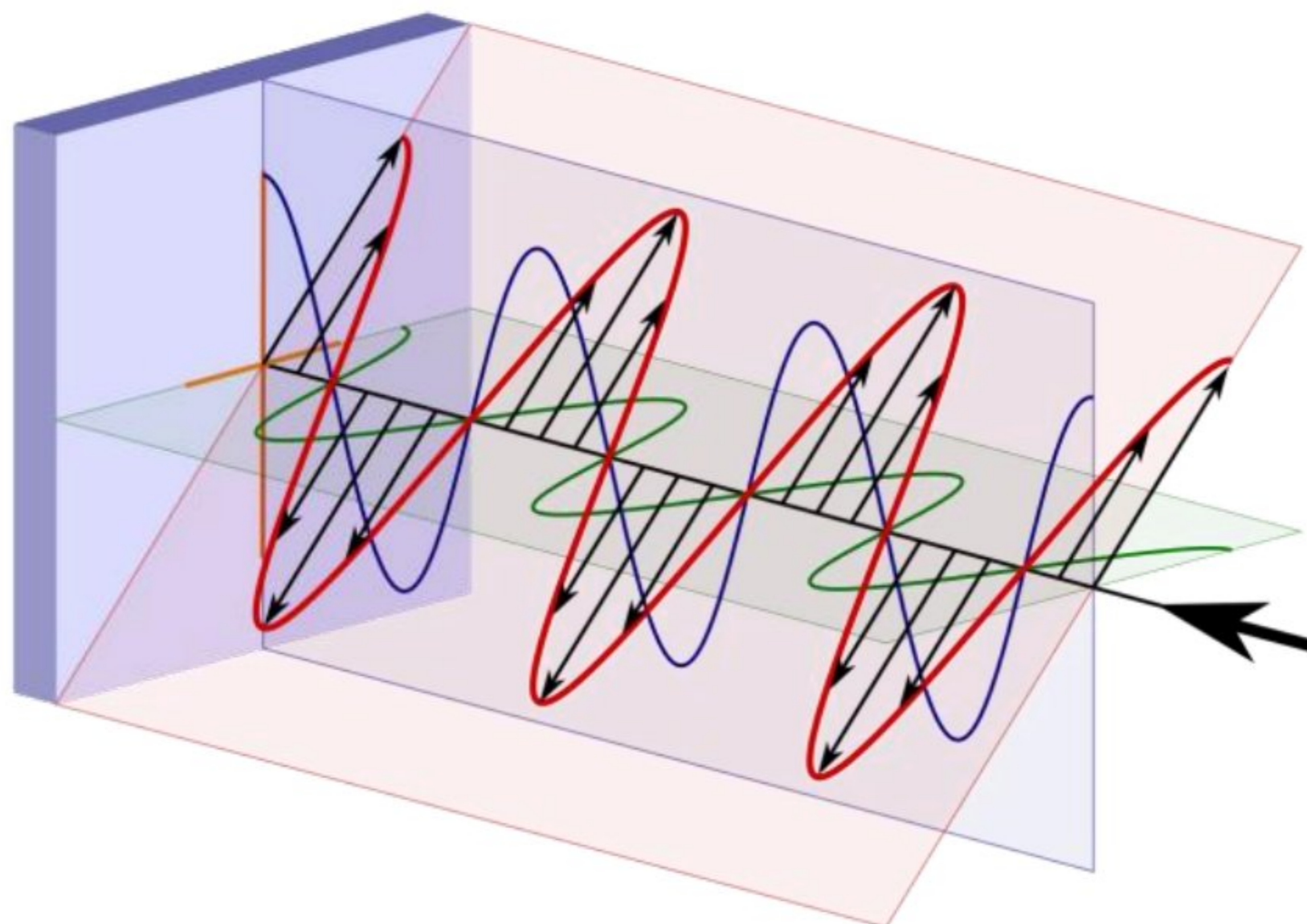
Где је  $A$  – амплитуда таласа,  $k$  – таласни број,  $v$  - брзина таласа,  $z$  – растојање дуж правца простирања таласа,  $t$  – време.

### 2.5.1.1 Поларизација

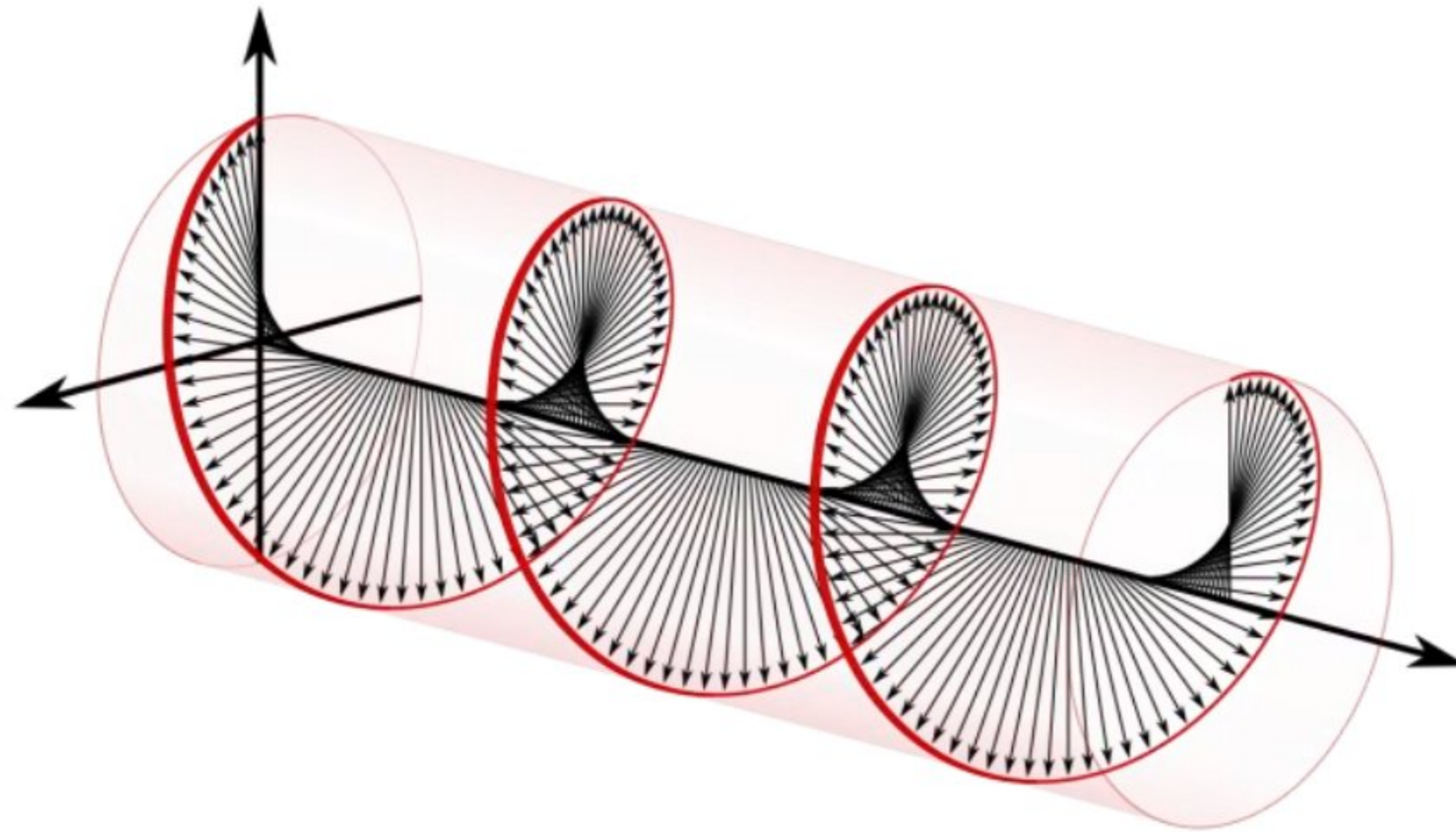
Простирање електромагнетних таласа одвија се праволинијски кроз простор, при чему су вектори електричног и магнетног поља таласа међусобно управни и управни на правац простирања таласа. Усваја се да је вектор електричног поља „носећи“ вектор електромагнетног таласа. Однос амплитуда електричног и магнетног поља је једнак брзини кретања таласа у вакууму. Вектори електричног и магнетног поља, у свакој тачки, са смером кретања таласа образују десно оријентисан систем, што значи да уколико поклопимо палац десне руке са правцем простирања таласа, кажипрст ће показивати правац електричног поља а средњи прст правац магнетног поља, и та три прста представљаће десно оријентисани систем. Познавање карактеристика електричног поља довољно је да се у потпуности опише и магнетно поље таласа, у оквирима даљинске детекције микроталасним зрачењем.

Вектор електричног поља, који је компонента електромагнетног таласа, осцилује кроз време и простор, што мења и његову оријентацију. За визуализацију таласа у одређеном временском интервалу или на неком одређеном простору, усваја се да смер простирања таласа одговара позитивном смеру  $z$  – осе Декартовог координатног система. У оваквом систему, за сваку тачку дуж правца простирања таласа, вектор електричног поља се може описати као збир његових компоненти по координатним осама  $x$  и  $y$ . Оваква поставка је битна за разумевање простирања електромагнетних таласа у  $3D$  простору, што омогућује комплетније моделирање и схватање понашања таласа за различите примене.

Дуж правца простирања таласа (или у фиксној тачки у току одређеног времена), вектори  $E_x$  и  $E_y$  описују синусоиде и осцилују са истом фреквенцијом као и електромагнетни талас (слика 13). Резултујући вектор у свакој временској тачки представља збир два вектора (електричног и магнетног) и узима вредности од  $+A$  до  $-A$  као и оријентацију у простору (слика 14). Просторно-временска промена оријентације и дужине резултујућег вектора представља поларизацију електромагнетног таласа (Woodhouse, 2006).

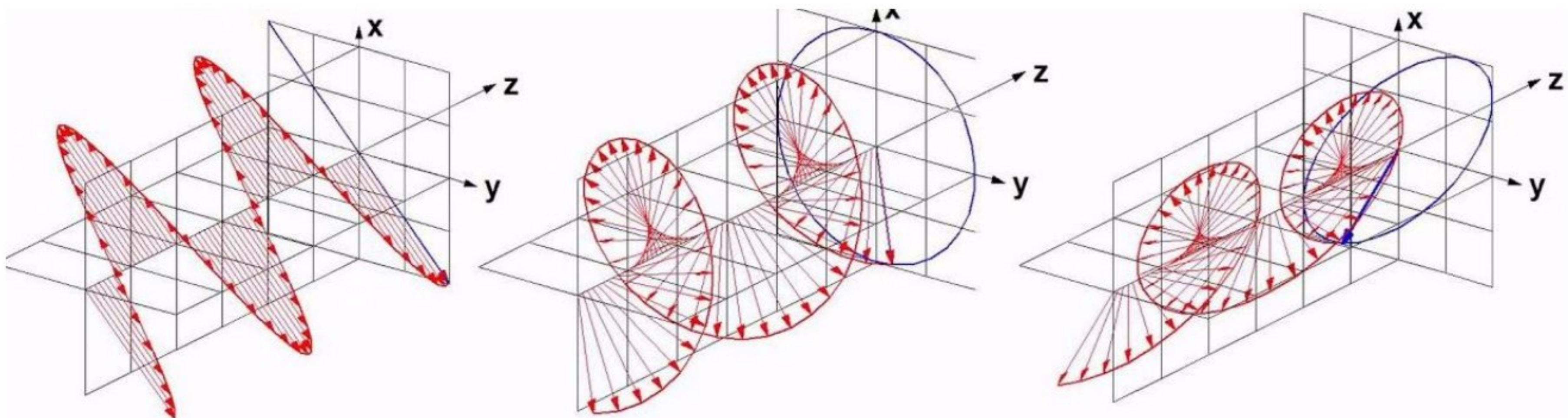


Слика 13. Представљање фазора електричног поља преко  $x$  и  $y$  компоненти ([commons.wikimedia.org/wiki/File:Circular\\_Polarization\\_Linear\\_Polarized\\_Light\\_Entering\\_Quarter\\_Wave\\_Plate\\_Components.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Circular_Polarization_Linear_Polarized_Light_Entering_Quarter_Wave_Plate_Components.svg)).



Слика 14. Потација фазора електричног поља таласа у простору ([commons.wikimedia.org/wiki/File:Circular.Polarization.Circularly.Polarized.Light\\_Without.Components\\_Right.Hand.ed.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Circular.Polarization.Circularly.Polarized.Light_Without.Components_Right.Hand.ed.svg)).

Поларизација је геометријска интерпретација која се односи на електричну компоненту електромагнетног таласа, и може се разликовати: линеарна, кружна и елиптична поларизација (слика 15). Ако је фазна разлика 0 или  $\pi$  назива се линеарна поларизација, ако је фазна разлика  $\pi/2$  или  $3\pi/2$  и амплитуде су им једнаке онда је талас кружно поларизован, ако је фазна разлика  $\pi/2$  или  $3\pi/2$  и амплитуде имају различите вредности каже се да таласи имају елиптичну поларизацију.



Слика 15. Поларизација, лево – линеарна, средина – кружна, десно – елиптична ([emedicalprep.com/study-material/physics/wave-optics/polarization/](https://emedicalprep.com/study-material/physics/wave-optics/polarization/)).

Поларизација може бити лева или десна (у смеру кретања казаљке на сату или супротном), у зависности од смера кружења вектора или тачке посматрања. У пракси се усваја да се таласи простиру од тачке посматрања, и тада се за вектор који осцилује у смеру кретања казаљке на сату каже да је десно оријентисан.

Електромагнетни таласи које емитује Сунце су неполаризовани, док су електромагнетни таласи емитовани од вештачких извора поларизовани.

### 2.5.1.2 Доплеров ефекат

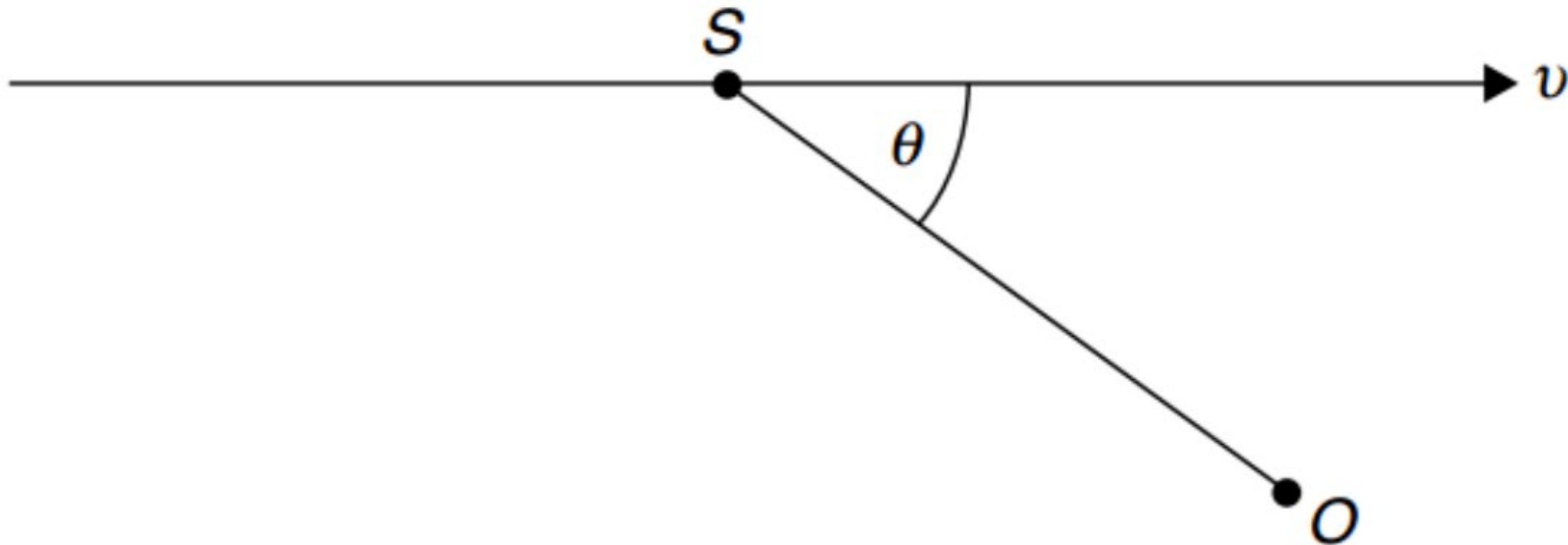
Доплеров ефекат јесте промена у фреквенцији (таласној дужини) таласа у зависности од кретања пријемника у односу на извор. Важи да ако се извор електромагнетног зрачења креће у односу на посматрача, где посматрач региструје зрачење са измењеном фреквенцијом, ако се извор приближава према посматрачу фреквенција се повећава, и обрнуто, (Rees, 2012). Доплеров ефекат има разне примене, али је битно разумевање одређивање брзине објекта који се померају, за оквире даљинске детекције.

Ако се извор  $S$  креће према посматрачу  $O$  брзином  $v$ , у правцу угла  $\theta$  (у односу на правац  $SO$ ) (слика 16), Доплеров ефекат се може изразити преко једначине:

$$\frac{f'}{f} = \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - v \cdot \cos \frac{\theta}{c}} \quad (2)$$

Где је  $c$  – брзина светлости. Како је релативна брзина  $v$ , релативно мала у односу на брзину светлости, важи апроксимација претходне једначине:

$$\frac{f'}{f} = 1 + \frac{v \cdot \cos \theta}{c} \quad (3)$$



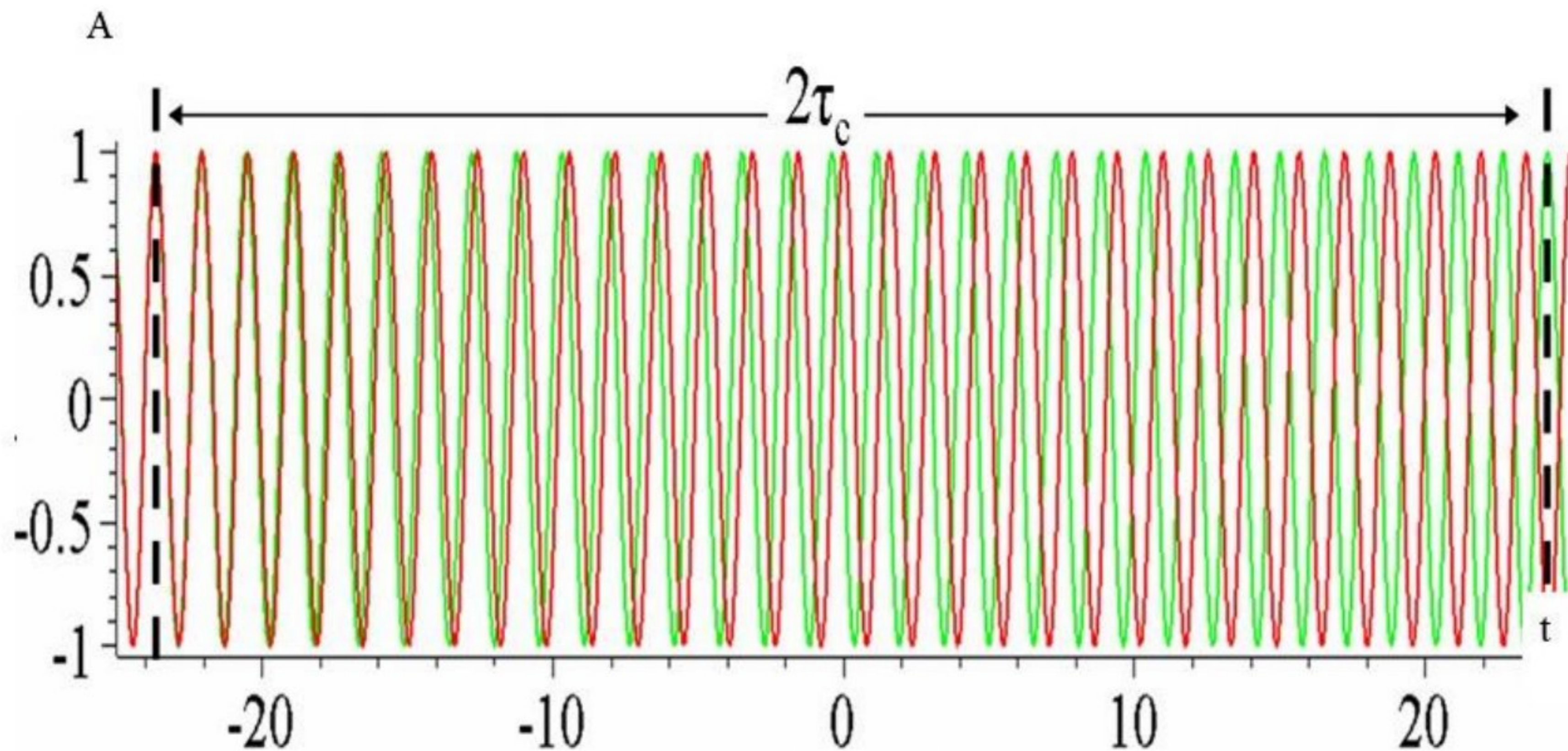
Слика 16. Доплеров ефекат, кретање извора  $S$  у односу на посматрача  $O$  (Rees, 2012).

### 2.5.1.3 Кохерентност таласа

Два таласа сматрају се кохерентним ако важи да је њихова фазна разлика константна са протоком времена, што значи да им амплитуде и почетне фазе могу бити различите али фреквенције морају бити исте (Jakob u van Zyl, 2006). Ово својство омогућава да се таласи могу посматрати као стационарни вектори, али ако би се таласи ротирали различитим угаоним фреквенцијама резултат векторског померања би се мењао са протоком времена. Кохерентност два таласа служи као мера предвидивости, познавањем карактеристика једног таласа могу се предвидети карактеристике другог талас. Може се рећи, на основу претходног, да кохерентност представља и меру сличности два таласа, посматрано у одређеном времену и простору. Кохерентност се може дефинисати и као мера корелације која постоји између фазе таласа мерене у различитим тачкама, и зависи од карактеристика извора таласа. Код електромагнетних таласа разликују се два типа кохеренције, временска и просторна. Разумевање кохеренције код радарских система омогућава предикцију понашања таласа на основу чега се могу пројектовати одговарајући радарски системи.

Када се говори о кохерентности два таласа то може представљати и један исти талас у различитом времену односно простору. Време за које талас пређе растојање  $l_c$  се назива временом кохеренције,  $t_c = \frac{l_c}{c} = \frac{1}{\Delta\omega t}$ . Ако је позната таласна ширина, односно опсег фреквенција електромагнетног таласа, може се израчунати време односно дужина кохерентности. Када фазна разлика достигне  $\Delta\varphi = 1$  ( $\Delta\varphi \sim 60^\circ$ ) таласи се не сматрају кохерентним.

Ако се посматра простирање једног таласа кроз време његова фаза није идеално стабилана, тј., после одређеног времена јавиће се фазна разлика у односу на почетни талас која ће се повећавати све док талас не буде достигао супротну фазу од своје почетне (слика 17). Време потребно да талас толико промени фазу у односу на почетну назива се временом кохеренције  $\tau_c$ . Дужина кохеренције јесте растојање које талас пређе за ово време које му је потребно да потпуно испадне из фазе, где јасно важи да су време кохерентности и растојање кохерентности повезани.



Слика 17. Ефекат кохеренције таласа са протоком времена ([upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/Phase\\_drift.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/Phase_drift.png)).

Кохерентност таласа зависи од монохроматичности извора. Идеалан монохроматски талас има само једну фреквенцију и време кохеренције, док су дужина кохеренције и област кохеренције бесконачни. Реални извори електромагнетних таласа нису монохроматски, већ емитују таласе у одређеном опсегу  $\lambda + \Delta\lambda$  (односно фреквенција  $\omega + \Delta\omega$ ), где време кохерентности таласа зависи од опсега фреквенција.

Сви реални таласи представљају пулсеве који трају одређен временски период, имају коначан распон у односу на правац простирања и математички могу бити описани преко непериодичних функција. Анализом непериодичних функција одређују се фреквенције садржане у таласу потребне за одређивање  $\Delta\omega$  и растојања кохеренције. Једна од кључних карактеристика радарских система јесте кохеренција између узастопних пулсева која доприноси тачности и поузданости самих радарских система.

#### 2.5.1.4 Интерференција

Интерференција је феномен који се јавља приликом преклапања (узајамног дејства) два или више кохерентних таласа у некој тачки приликом кретања кроз исту средину. Интерференција се одвија по принципу суперпозиције која је карактеристична за линеарне системе, што значи да је сила која делује на честице у некој тачки у којој се више таласа узајамно слаже једнака збиру појединачних сила сваког таласа које делују на честицу, (Брајовић, 2013).

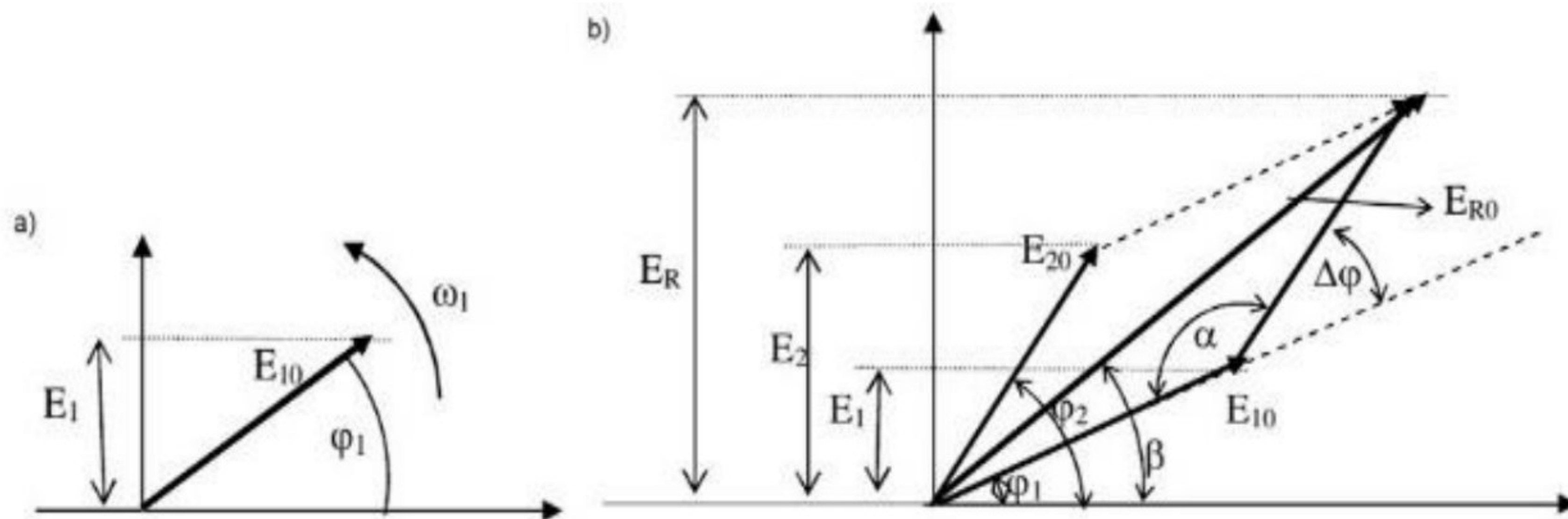
Интерференција може бити конструктивна (већа амплитуда) и деструктивна (мања амплитуда), у зависности да ли се таласи међусобно појачавају или слабе. Нека је талас представљен једначином:

$$E_1 = E_{10} \sin(\omega_1 t - k_1 x_1 + \varphi_{10}) = E_{10} \sin(\varphi_1) \quad (4)$$

Где је:  $E_1$  - тренутни интензитетелектричног поља електромагнетног таласа,  $E_{10}$  - амплитуда електричног пољ,  $\omega_1$  - угаона фреквенција таласа,  $k_1$  - таласни број,  $x_1$  - пређени пут таласа,  $\varphi_{10}$  - почетна фаза таласа и  $\varphi_1$  - тренутна фаза таласа.

Исти талас се може приказати фазором (слика 18а). Фазор је вектор који ротира око координатног почетка одређеном брзином у смеру супротном од казаљке на сату. Интензитет тј. дужина вектора одговара амплитуди таласа  $E_0$ , пројекција вектора на вертикалну осу једнака је тренутном интензитету таласа  $E$ . Брзина ротирања вектора једнака је угаоној фреквенцији  $\omega$ , а угао који вектор заклапша са хоризонталном осом представља тренутну фазу

$\varphi$ . Геометријски приказ електромагнетних таласа омогућава лакше рачунање резултујућег таласа приликом интерференције (слика 18).



Слика 18. а) – представљање таласа фазором, б) – суперпозиција улазних таласа приликом интерференције (Брајовић., 2013).

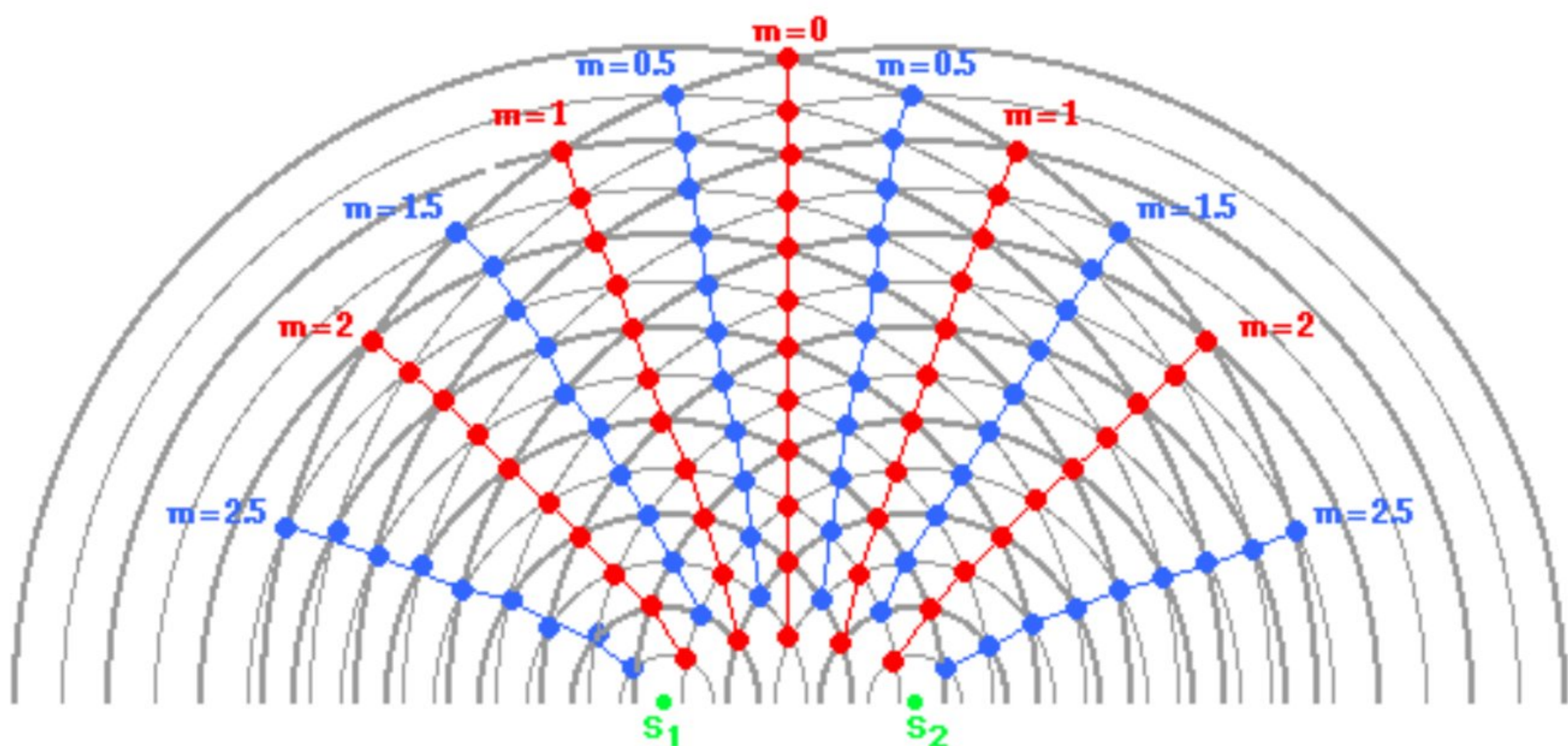
Коришћењем слике 18 и косинусне теореме може се израчунати интензитет резултујућег таласа као интерференција два таласа:

$$E_{R0}^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20} \cos(\Delta\varphi) \quad (5)$$

Из једначине 5 следи да резултат интерференције зависи од фазне разлике таласа:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = (\omega_2 - \omega_1)t + (k_2x_2 - k_1x_1) + (\varphi_{20} - \varphi_{10}) \quad (6)$$

Тако је распон могућих вредности резултујућег интензитета од  $E_{10} - E_{20}$  (тзв., деструктивна интерференција) до  $E_{10} + E_{20}$  (тзв., конструктивна интерференција). Ако фазну разлику између два таласа који интерферирају напишемо као  $m\pi$ , из једначине се види да конструктивна интерференција наступа када је  $m = 0, 1, 2, \dots$ , док деструктивна интерференција узима  $m = 0,5, 1,5, 2,5, \dots$  (слика 19).



Слика 19. Правни конструктивне (црвено) и деструктивне (плаво) интерференције ([physicsclassroom.com/class/light/Lesson-3/The-Path-Difference](https://physicsclassroom.com/class/light/Lesson-3/The-Path-Difference)).

Ако се посматрају два извора зрачења која се налазе на неком растојању  $d$ , где сваки извор емитује електромагнетне таласе кружног облика таласног фронта могуће је објаснити





усмеравање електромагнетних таласа. Кохерентни таласи имају фазну разлику и интензитет константан током времена у свакој тачки где долази до интерференције. Распоред интензитета интерференције у простору се назива шрафура или образац интерференције, где се променом растојања између извора повећава број зракова који се јављају у шрафури интерференције (слика 20).



Слика 20. Дигитални приказ интерференције на површини воде ([sciencephoto.com/media/530560/view/interference-patterns-artwork](http://sciencephoto.com/media/530560/view/interference-patterns-artwork)).

У непосредној близини извора, образац (шрафура) интерференције знатно је комплекснија, и каже се да се о овом случају ради о сферном таласном фронту који се назива још и блиско поље. На већој удаљености зраци интерференције се јасно оцртавају, и ради се о раванском таласном фронту који се још назива и далеко поље. Да ли се нека област сматра блиским или далеким пољем не зависи само од удаљености извора већ и од величине посматране области. *Fraunhoferov* критеријум од  $\lambda/8$ , користи се за дефинисање блиског и далеког поља. Када је разлика између раванског и реалног таласног фронта мања од  $\lambda/8$  каже се да се ради о далеком пољу, док ако је већа каже се да се ради о блиском пољу. У даљинској детекцији готово увек се ради о далеком пољу.

Да би се испољио ефекат интерференције таласи поред услова кохерентности морају бити и поларизовани на исти начин, што значи да њихови вектори електричног поља морају бити колинеарни.

Интерференција је значајна појава за конструкцију антена. Фазна антенска решетка се састоји од великог броја малих предајника који су поређани у низ или матрицу. Електронска контрола сваког предајника променом почетних фаза омогућава усмеравање антенског снопа тако да антена емитује најјачи сигнал у жељеном правцу.

### 2.5.1.5 Монохроматичност и распон фреквенција

Електромагнетно зрачење сматра се монохроматским ако садржи таласе једне таласне дужине тј., фреквенције. На слици 12 приказан је монохроматски кохерентни талас. Реални таласи, нису никада чисто монохроматски, тј., никада се не састоје од само једне фреквенције, већ представљају скуп таласа различитих фреквенција. Опсег фреквенција електромагнетног зрачења садржаних у таласу назива се ширина фреквентног опсега -  $\Delta f$ .

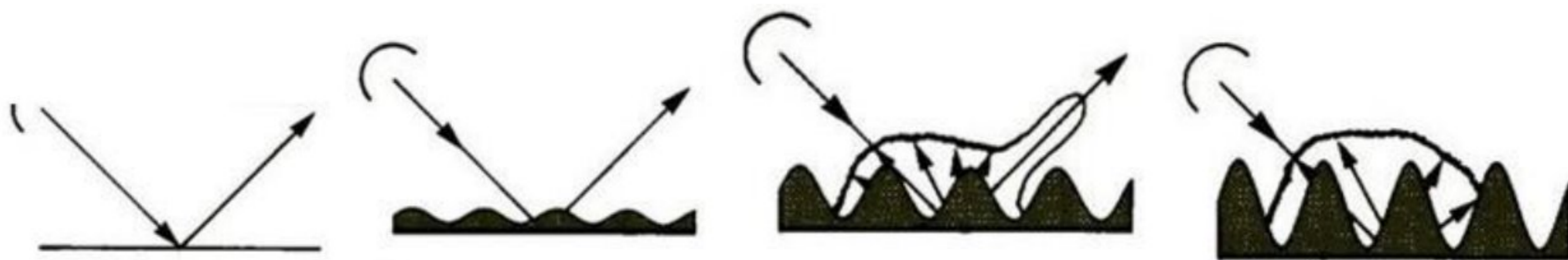
Пулс који траје време  $T$  мора да садржи опсег фреквенција  $B = 1/T$ . Фуријеова трансформација је математички алат који се користи да се исти талас тј., пулс прикаже у различитим фреквенцијама и времену, тј., обезбеђује анализу сигнала и у временском и у фреквентном опсегу.

Количина информација која се може пренети таласом одређена је његовим фреквентним опсегом, који је у директој вези са трајањем таласа. Већи фреквентни опсег подразумева мање временско трајање и може пренети више информација. Веза између фреквентног опсега и трајања таласног снопа јесте значајна за просторну резолуцију радарског пулса у правцу мерења растојања, (Woodhouse, 2006).

### 2.5.2 Микроталаси

Микроталаси, који обухватају таласе електромагнетног спектра таласних дужина од 1 mm до 1 m или у фреквентном опсегу од 0,3 до 300 GHz, имају одређене предности које их чине веома значајним у оквирима даљинске детекције, (Woodhouse, 2006). Пре свега због пенетрације кроз атмосферу и функционисања независно од Сунчевог зрачења, где степен пенетрације микроталаса зависи од влажности, густине вегетације и таласне дужине. Пенетрација микроталаса у зависности је од таласне дужине зрачења, краће таласне дужине преносе информације о горњим слојевима вегетације, док дуже таласне дужине микроталаса су ефикасније за информације о нижим слојевима вегетације и о земљишту. Информације које се добијају микроталасним зрачењем су различите од оних добијених коришћењем оптичких сензора, али ове две врсте података се изузетно добро допуњују, (Campbell и Wynne, 2011). Ово допуњавање између оптичких и радарских снимака веома је значајно за разумевање понашања површине терена, здравља животне средине, пољопривреде, шумарства и климатских студија, али активно доприноси и тачности и поузданости прикупљених информација.

Расејање микроталаса је појава до које долази приликом простирања таласа кроз окружење које садржи објекте чије су димензије величине таласне дужине или мање, и тада долази до расипања енергије у свим правцима (тзв., скатеровање). Део оваквог расејаног зрачења се враћа назад до извора које региструје и мери антена, и назива се повратно расејање (тзв., бекскатер), (Слика 21).



Слика 21. Зависност расејања електромагнетне енергије од грубости површи од које се рефлектује (Kasischke, 2003).

Код микроталаса користе се активни и пасивни сензори за прикупљање информација. Сваки објекат или површина емитује карактеристично микроталасно зрачење које зависи од температуре и влажности. Овакво емитовано зрачење је слабог интензитета услед чега видно поље антене мора бити велико како би прикупила довољно енергије и регистровала сигнал, што значи да је просторна резолуција пасивних сензора ниска. Пасивни микроталасни сензори називају се радиометри.

Активни микроталасни сензори имају веома важну улогу у даљинској детекцији емитујући зрачење којим осветљавају подручје снимања и детектујући повратне сигнале. У зависности од детектованих резултата може се извршити подела сензора снимања на једнодимензионалне (алтиметри и скатерометри) и дводимензионалне. Алтиметри и скатерометри представљају једнодимензионалне сензоре, док радари припадају категорији дводимензионалних сензора. Алтиметри су дизајнирани да мере висину терена у надиру (правац нормале од сателита према терену) емитовањем низа кратких импулса приликом чега се добија вертикални профил терена. Алтиметри су сензори који пре свега мере растојања са великом прецизношћу. Скатерометри са великом прецизношћу мере коефицијент повратног расејања, али имају малу просторну резолуцију. Фокус скатерометара је прикупљање информација о радиометријским карактеристикама површи зрачења. Радари имају бољу просторну резолуцију у односу на



скатерометре, али због велике радиометријске варијације имају лошију радиометријску резолуцију. Варијације у радиометријским својствима, која су карактеристика радарских мерења могу бити захтеван, што се превазилази тако што се велики број независних мерења осредњава.

### 2.5.3 Активни радари

Радар емитује електромагнетни пулс ка објектима и површи терена, одређеног трајања и централне фреквенције, распона фреквенције и јачине. Приликом интеракције импулса са површи долази до расејања сигнала, тако да се део расејаног сигнала враћа назад ка антени која региструје кашњење, фазу, поларизацију и амплитуду повратног сигнала.

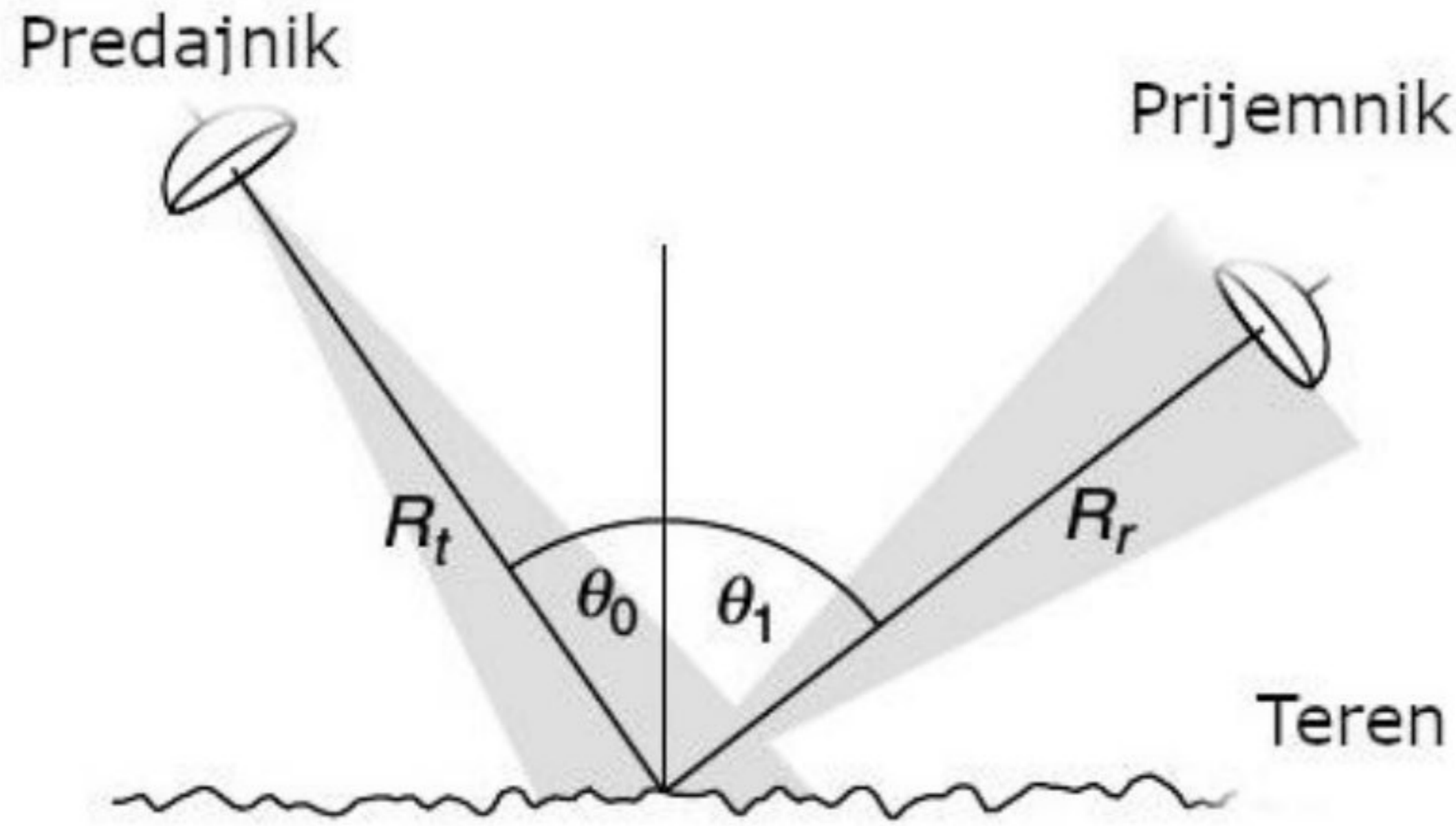
Радарски системи имају две основне компоненте, антену и пријемник. Антена прикупља електромагнетно зрачење из одређеног правца (из одређеног распона упадних углова), док пријемник, примљени сигнал појачава и из њега екстрактује зрачење из одређеног распона фреквенција. Поред ове две основне компоненте радарске платформе укључују и систем за обраду података који дигитализује (квантификује, форматира и калибрише) пријемни сигнал и групише га са додатним подацима из сензора (позиција инструмента, угао гледања антене, итд.). процесирање је код већине радара одвојена компонента у односу на антену и пријемник, и чине је станице за процесирање на Земљи, једним делом због величине података који се прикупљају. Радари се могу категоризовати као моностатички и бистатички. Ако се користи иста антена за слање и пријем сигнала онда се ради о моностатичком радару, али ако се користе две антене онда се ради о бистатичком радару.

Сателит емитује и прима електромагнетне таласе користећи фазну антенску решетку која се састоји од низа или мреже (великог броја) малих елемената (предајника и пријемника). Сваки од елемената емитује електромагнетне таласе исте фреквенције са одређеном почетном фазом, који уз помоћ интерференције формирају већи талас. Мењањем фазе и амплитуде емитованог импулса на сваком елементу могуће је усмеравање и мењање облика укупног таласа емитованог са антене. Ови импулси емитују се великом фреквенцијом, и антена може да региструје хоризонтално и вертикално поларизоване таласе, а неки системи могу да региструју и обе поларизације одједном.

Код радарских снимака подручје се не снима одједном већ се генерише низ електромагнетних импулса. Систем користи временско кашњење појединачних импулса расејаних од површи терена, како би одредио позицију сваког враћеног импулса дуж правца управног на правац кретања сателита, угао емитовања или промену фреквенције (Доплеров ефекат), али и да би се раздвојили пиксели у правцу кретања сателита, (*Woodhouse, 2006*). Оптички сензори, насупрот, помоћу огледала пројектују Сунчево електромагнетно зрачење расејано од Земље на матрицу детектора који то зрачење претварају у електричне величине.

#### 2.5.3.1 Једначина радара

Једначина радара повезује карактеристике предајника, геометрију снимања, особине снимљеног објекта или површи и примљени сигнал (*Rees, 2012*). Код извођења ове једначине полази се од општег случаја где су предајник и пријемник одвојени (Слика 22).



Слика 22. Геометрија снимања бистатичког радара (Rees, 2012).

Где су  $R_t$  и  $R_r$  растојања од површине до предајника односно пријемника,  $\theta_0$  и  $\theta_1$  углови између нормале на правац површи и упадног односно рефлектованог зрачења.

Нека предајник емитује електромагнетно зрачење снагом  $P_t$ . Код неусмереног зрачења антена емитује сигнал равномерно у свим правцима. Са удаљавањем од пријемника густина радарског зрачења се смањује  $\frac{P_t}{4\pi R_t^2}$  (енергија се дели на већу површину). Густина радарског зрачења се множи са добитком антене  $G_t$ , (производ ефикасности и директивности антене) како би се добила густина флукса у правцу главног антенског снопа:

$$F = \frac{G_t P_t}{4\pi R_t^2} \quad (7)$$

Зрачење пада на површину под углом  $\theta_0$  у односу на нормалу, па је онда једначина зрачења које пада на површину (осветљеност површи) дата преко:

$$E = F \cos \theta_0 = \frac{G_t P_t}{4\pi R_t^2} \cos \theta_0 \quad (8)$$

Део овог зрачења се расејава према пријемнику који се налази у правцу  $\theta_1$ . Јачина зрачења рефлектована ка пријемнику зависи од бистатичког коефицијента расејања  $\gamma$ :

$$L = \frac{\gamma E}{4\pi \cos \theta_1} = \frac{\gamma G_t P_t \cos \theta_0}{(4\pi)^2 R_t^2 \cos \theta_1} \quad (9)$$

Коначно, расејано зрачење са површине  $A$  долази до антене пријемникам који има површину  $A_r$  и налази се на растојању  $R_r$  од зрачене површине. Примљена снага дата је преко једначине:

$$P_r = LA \frac{A_r}{R_r^2} \cos \theta_1 = \frac{A_r \gamma G_t P_t \cos \theta_0}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2} \quad (10)$$

И представља радарску једначину за бистатички радар, која описује везу између примљене и емитоване снаге, геометрије радара и расејавајућих карактеристика површине. За моностатички радар једначина је једноставнија:

$$P_r = \frac{A_e G P_t \cos \theta_\gamma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (11)$$

Када се узму у обзир однос ефективне површине антене  $A_e$  и добитка антене  $G$  где је  $A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi\eta}$ , као и да је коефицијент повратног расејања  $\sigma^0 = \gamma \cos \theta_0$ , следи:

$$P_r = \frac{\lambda^2 G^2 P_t \sigma^0 A}{(4\pi)^3 \eta R^4} \quad (12)$$

Где је  $\eta$  – ефикасност антене,  $A$  – површина од које се пулс расејао.

Коефицијент повратног расејања  $\sigma^0$  јесте бездимензионална величина која се најчешће изражава у децибелима. Представља радарски попречни пресек по једници површине, односно меру колико добро нека површина рефлектује микроталасно зрачење натраг ка сензору. Зависи од упадног угла  $\theta$ , као и од азимута путање сателита и поларизације емитовања и пријема импулса. Комплетан опис радарских особина неког објекта може се описати матрицом расејања.

Ако се нека површина осветли зрачењем  $E$ , зрачење расејано у одређеном правцу  $L_1(Q_1, F_1)$ , где је  $Q_1$  излазни угао расејаног зрака а његов азимут  $F_1$ , одређено је бидирекционом функцијом дистрибуције рефлексије  $R = \frac{L_1}{E}$ , где се код радара ова величина изражава као бистатички коефицијент расејања:

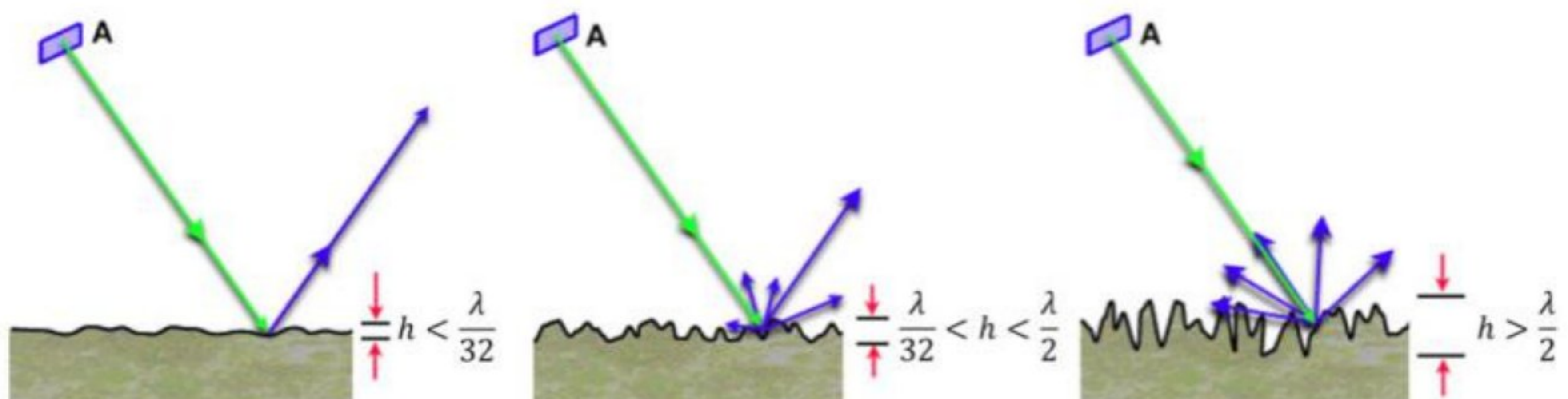
$$\gamma = \gamma \cos \theta_0 = 4\pi R \cos^2 \theta_0 \quad (13)$$

Како је већина радарских система моностатична (користи исту антену за предају и пријем сигнала) и тако региструје само повратно расејање од снимане површине, следи да су упадни и излазни углови и азимути по којима се електромагнетни талас креће при доласку на површину и при расејању исти  $\theta_1 = \theta_0$  и  $F_1 = F_0$ . Представљање зрачења које се вратило од површине ка сензору јесте преко коефицијента повратног расејања који зависи само од упадног угла зрака на сниману површ:

$$\sigma^0 = 4\pi R \cos \theta_1 \quad (14)$$

### 2.5.3.2 Фактори који утичу на радарски попречни пресек

Већина површина на Земљи са ниском вегетацијом веома слабо пропушта микроталасно зрачење, што значи да велики део јачине детектованог зрачења расејаног од површи зависи од храпавости површи. Храпавост неке површи описује се помоћу стандардног одступања висинске разлике  $h_r$  у односу на неку средњу висину посматране површи. Према *Fraunhoferovom* критеријуму површина се сматра храпавом ако стандардно одступање висинске разлике прелази вредност  $h_r = \frac{\lambda}{32 \cos \theta_i}$ , где се види да храпавост зависи од таласне дужине и упадног угла зрака. За сталан упадни угао и таласну дужину, подела површи према храпавости приказана је на слици 23.



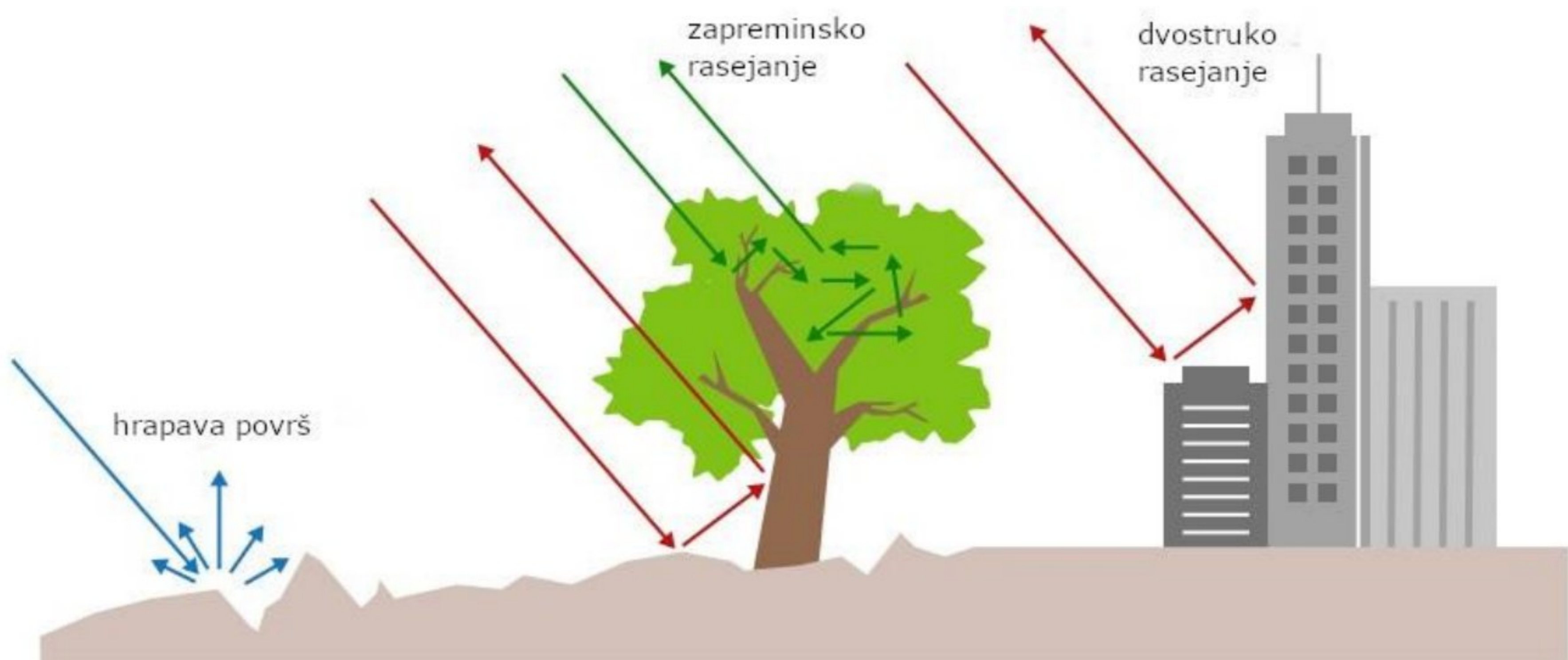
Слика 23. Храпавост површи за фиксни упадни угао и таласну дужину (лево – глатка површи, средина – средње храпава површи, десно – храпава површи), (SAR Handbook, 2019).

Радарски попречни пресек представља однос између интензитета емитованог и примљеног радарског таласа  $\sigma = \frac{I_{\text{primljeno}}}{I_{\text{emitovano}}} 4\pi R^2 [m^2]$ . Приликом интерпретације радарског попречног пресека објекта снимљеног радаром у обзир треба узети карактеристике објекта и сензора.

Главни утицаји на  $\sigma$  су храпавост  $h_r$  и диелектричне особине објекта које се описују комплексном релативном и диелектричном константом  $\epsilon_r$ . Храпавост површи одређује колики део расејане енергије се враћа назад ка сензору, док диелектричне особине објекта одређују пенетрацију сигнала у површину. Параметри  $h_r$  и  $\epsilon_r$  зависе од таласне дужине емитованог сигнала.

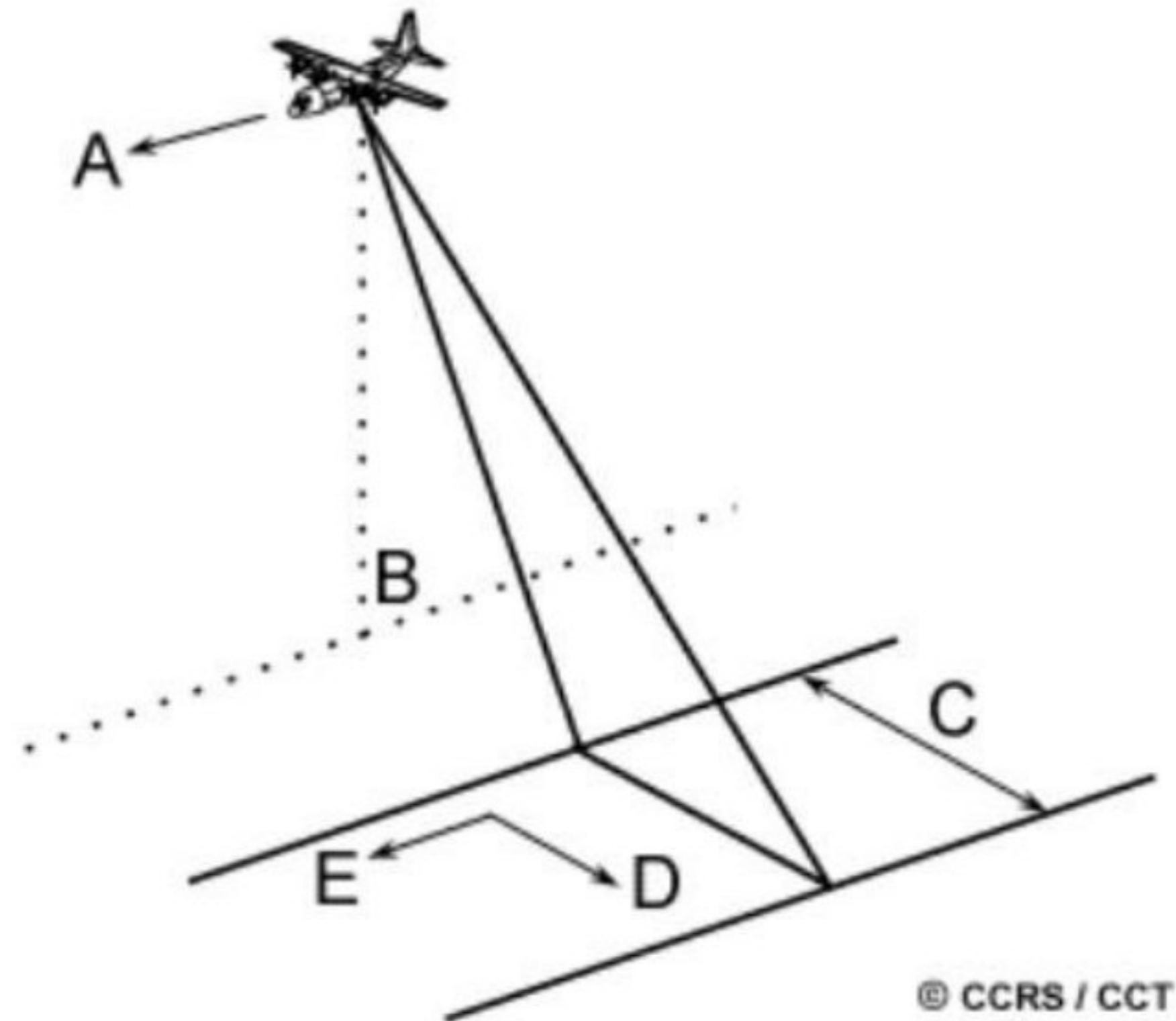
Поларизација емитованог сигнала и поларизација у којој пријемник прима рефлектовани талас су информације које се морају узети у обзир приликом обраде радарских снимака. Различите поларизације понашају се различито у интеракцији са површи терена. Већина радарских система користи  $HH$ ,  $HV$ ,  $VH$  и  $VV$  поларизације, где сензор наизменично емитује хоризонтално и вертикално поларизоване таласе и истовремено региструје таласе обе поларизације. Ове врсте снимака познати су под називом полариметријски снимци док се снимање назива полариметрија.

Разликују се три основна типа објекта према расејању таласа: расејање храпавих површина, расејање двоструког одбијања и запреминско расејање (слика 24). Ова три типа објекта не расејавају сигнал једнаком јачином у свим полариметријским каналима.



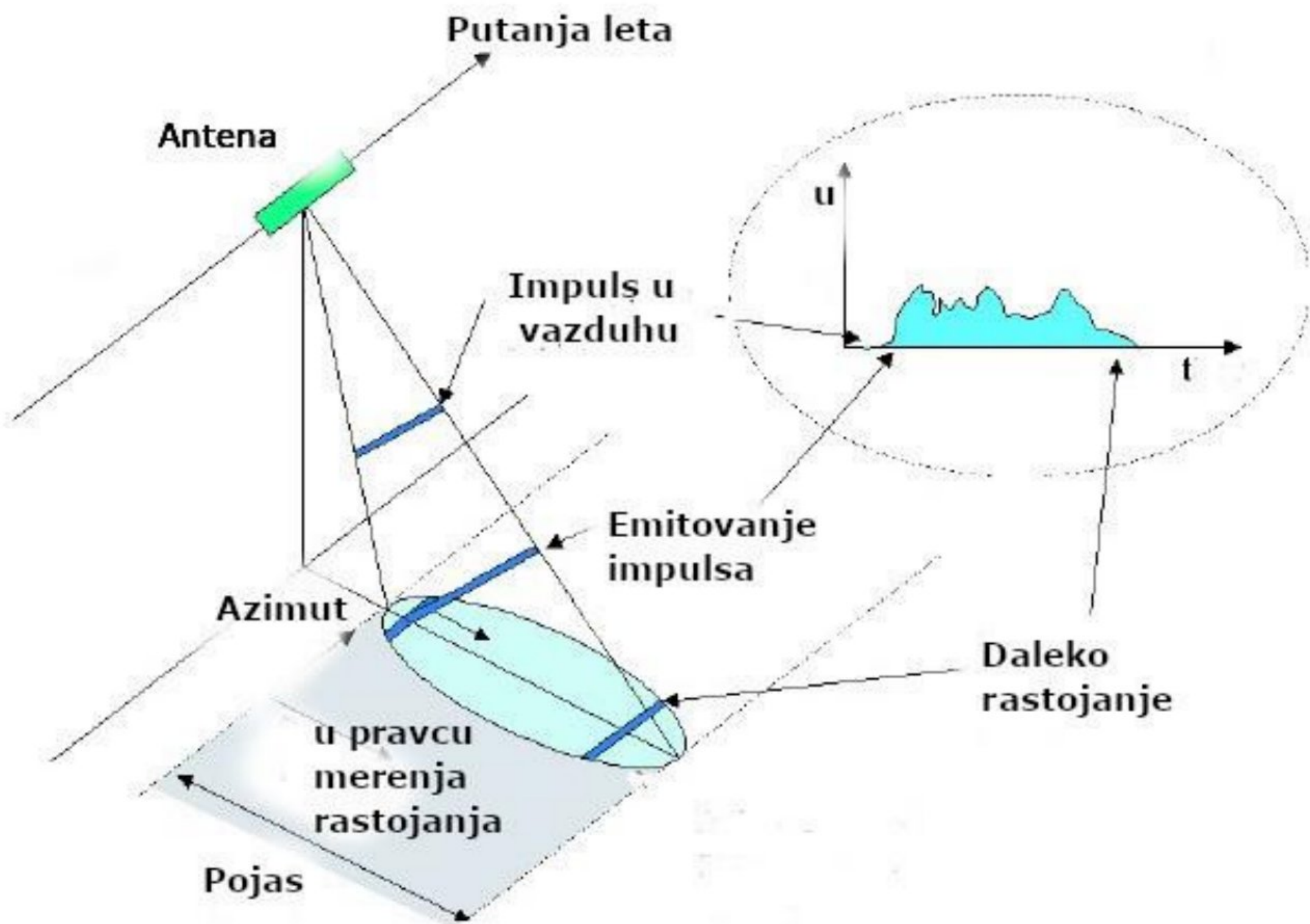
Слика 24. Електромагнетна пропустљивост Земљине атмосфере, (SAR Handbook, 2019).

Већина радарских система има постављену антену тако да врши бочно снимање у односу на правац путање сателита (слика 25). Сателитска платформа се креће напред у правцу снимања  $A$ , надир  $B$  је тачка која се налази директно испод сателита. Електромагнетни сноп таласа се емитује бочно од сателита, управно на путању кретања, зрачећи појас  $C$  на површи Земље. Растојање  $D$  се односи на растојање дуж појаса снимања, у правцу управном на правац снимања ( $range$ ), док се растојање  $E$  односи на растојање паралелно правцу снимања ( $azimuth$ ).



Слика 25. Основне величине које описују радарско снимање, ([nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/930](http://nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/930)).

Током лета радар емитује низ електромагнетних импулса одређене фреквенције. Двострумензионални снимак настаје обједињавањем скупа повратних сигнала појединачних импулса које сензор емитује приликом прелетања подручја, (Elach u van Zyl, 2006). Сваки импулс представља једну линију на снимку, и обухвата на Земљи појас одређене ширине управан на правац лета. На слици 26 приказан је отисак једног импулса на Земљиној површи и повратни сигнал који антена региструје.



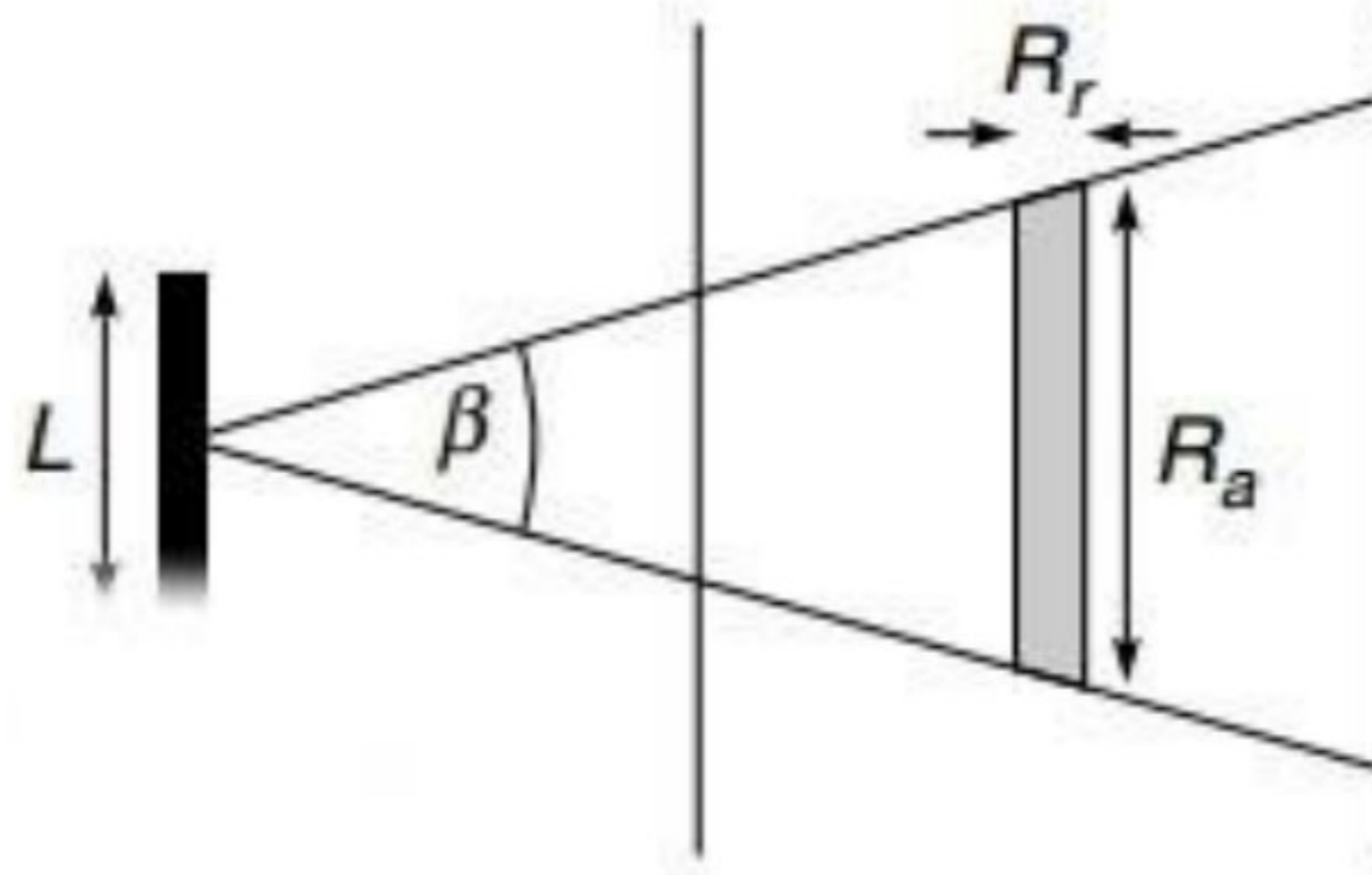
Слика 26. Основне величине које описују радарско снимање, (Elach u van Zyl, 2006).

Резолуција је најмање растојање између две тачке, такво да сензор може да раздвоји два узастопна повратна сигнала. Код радарских система разликује се резолуција у правцу лета сателита (азимут резолуција) и резолуција у правцу мерења растојања (*range* резолуција). Резолуција у правцу лета код радара са реалном апертуром зависи од ширине емитованог импулса, ужи импулс осветљава ужи појас на терену, а самим тим и резолуција је боља.

Ширина импулса, уга  $\beta$ , ограничена је дифракционим лимитом и зависи од дужине антене и таласне дужине  $\beta = \frac{\lambda}{l}$ . Једначина за азимутну резолуцију је:

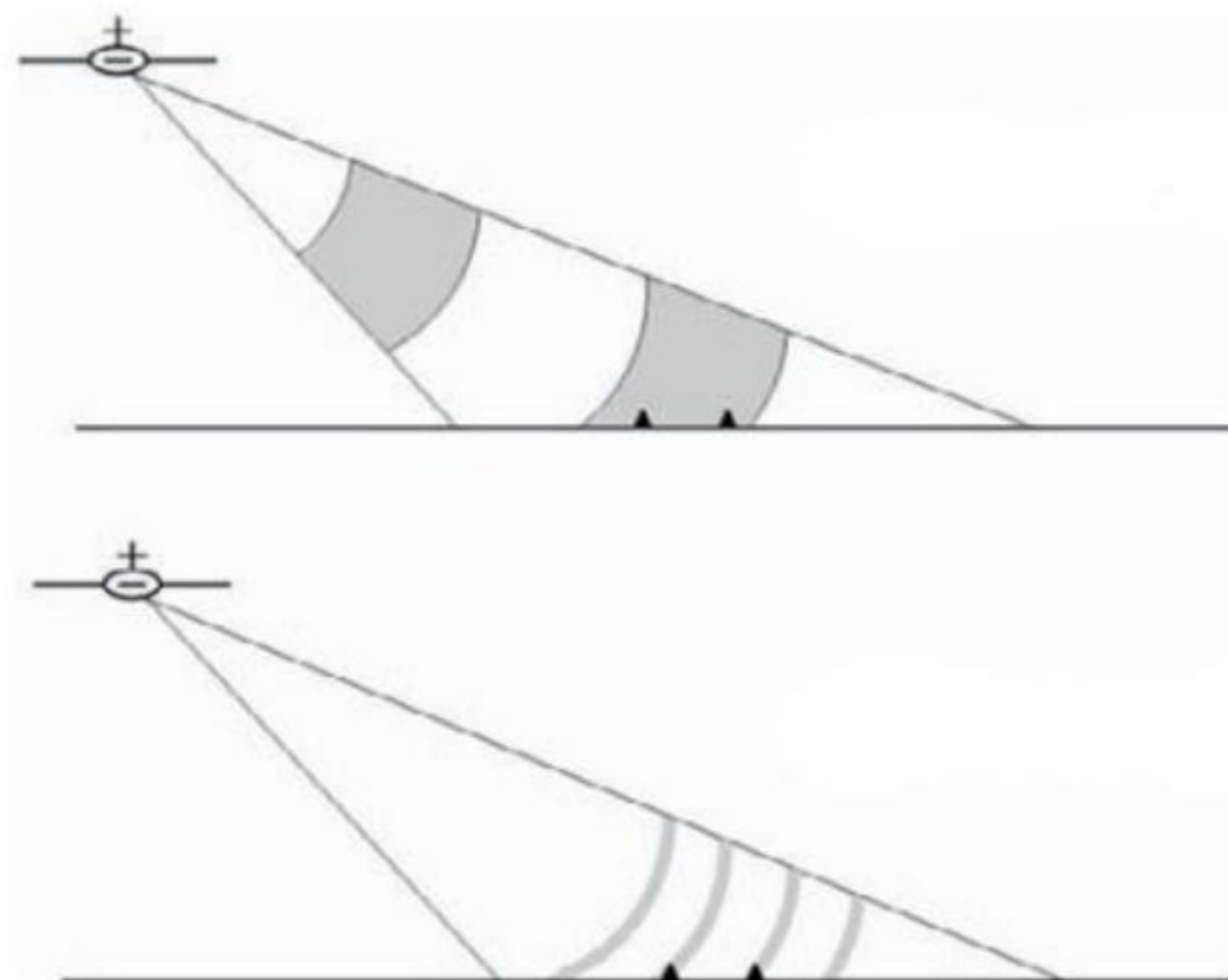
$$R_{\alpha} = \frac{\lambda}{l} R \quad (15)$$

Где је  $R$  - косо расојање,  $l$  - дужина антене и  $\lambda$  таласна дужина. Код радара са реалном апертуром, боља резолуција у правцу лета добија се повећавањем антене, према односу таласне дужине и дужине антене који дефинише ширину емитованог импулса ( $\beta$ ), (слика 27), (Rees, 2012).



Слика 27. Резолуција радарског снимања у правцу азимута, (Rees, 2012).

Резолуција у правцу мерења растојања (*range*) зависи од времена трајања импулса, односно од ширине фреквентног опсега емитованог таласа. Радар емитује импулс ка површини где је таласни фронт сферног облика и има одређену ширину која зависи од времена трајања импулса (слика 28), (Campbell и Wynne, 2011).



Слика 28. Ширина емитованог радарског пулса (горе – дужи пулсеви, доле – краћи пулсеви), (Campbell и Wynne, 2011).

Ако је емитовани пулс временски одређен временом  $T$ , пулс који се рефлектује назад ка сензору имаће исто трајање. Да би се два сигнала раздвојила на пријемнику не сме бити преклапања, што значи да сигнал рефлектован од даљег објекта мора до пријемника да стигне



најраније са закашњењем  $T$  у односу на први сигнал. Може се закључити из претходног да мете морају бити удаљене за минимум  $cT/2$  у правцу простирања радарског таласа.

Резолуција у правцу мерења растојања која се добија формирањем радарског снимка не односи се на резолуцију на терену, већ дуж правца простирања сигнала између сателита и површи. За добијање резолуције на површини неопходно је помножити резолуцију у правцу просторања таласа са синусом угла отклона  $\theta$ , да би се добила резолуција у правцу мерења растојања на терену преко једначине:

$$R_r = \frac{cT}{2 \sin \theta} R \quad (16)$$

Где се види да величина пиксела зависи од угла отклона, и добија се да је најлошија резолуција у правцу мерења растојања у надиру, док је на крају линије најбоља.

На слици 29 приказана је разлика између резолуције у правцу мерења растојања (коса резолуција) и резолуције у правцу мерења растојања на површини Земље (хоризонтална-резолуција).



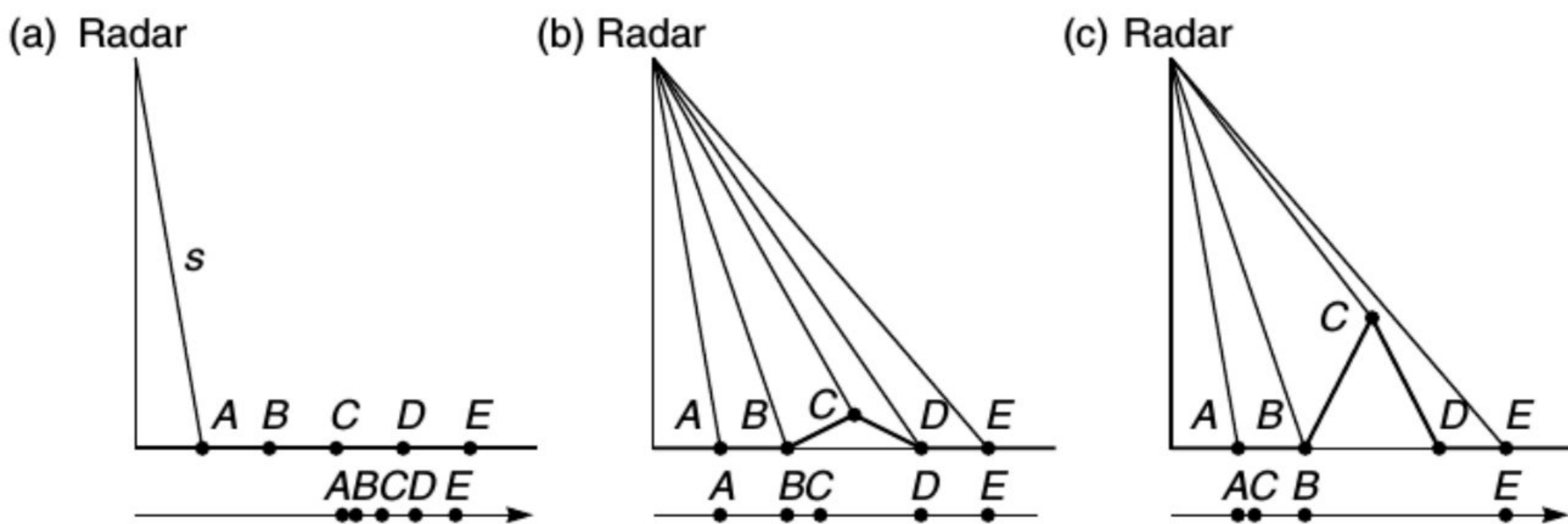
Слика 29. Разлика косог и хоризонталног растојања ([step.esa.int](http://step.esa.int)).

У једначинама 15 и 16 фигурирају угао отклона и косо растојање  $R$ , због чега се резолуција близу надира и на крају линије разликује. Са удаљавањем од надира азимутна резолуција се повећава (погоршава), због повећања косог растојања, док се резолуција управна на правац лета смањује (побољшава) због повећања угла отклона. Како би се повећала резолуција у правцу управном на правац кретања, користи се техника под називом *chirp*. Азимутна резолуција повећава се коришћењем синтетичке апертуре (*SAR*), код које у основи важи да пиксел остаје озрачен радарским снопом довољно времена и да је опажан са више локација дуж путање сателита.

### 2.5.3.3 Грешке радарских мерења

Код радарских мерења присутне су одређене грешке као последица геометрије снимања и облика терена. Основна грешка је грешка косог снимања настала као последица мерења радарског система косе дужине, од сензора до објекта (слика 30 а). Косо растојање не повећава се у истој мери као хоризонтално и добија се да слика делује издужено на једном крају. Ову грешку могуће је уклонити на начин описан у претходном поглављу.

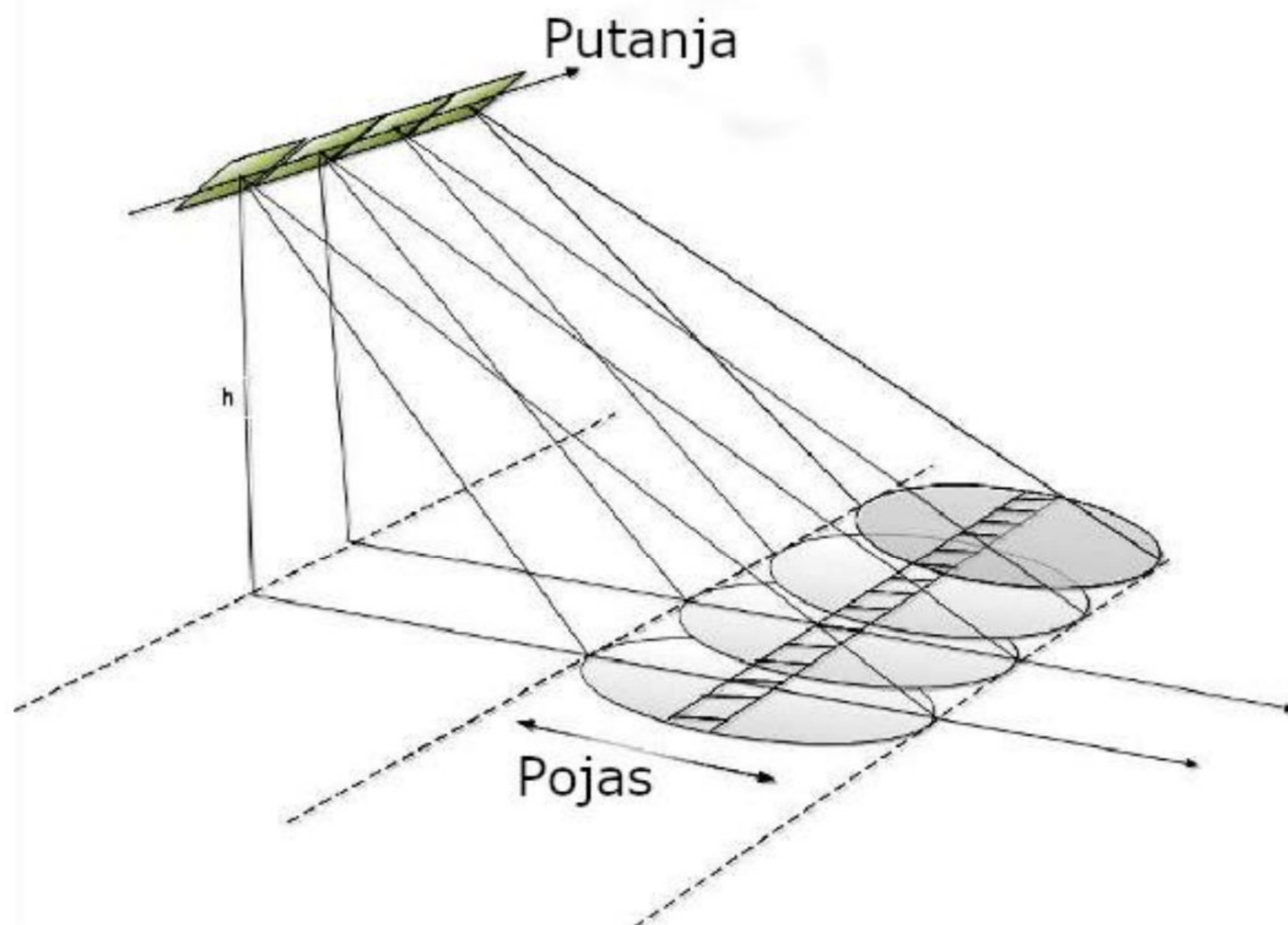
Поред ове грешке јављају се и грешке издужења и заклањања. Грешка издужења настаје као последица тога што се косо растојање користи за одређивање локације објекта дуж појаса снимања, ова грешка се може уклонити ако је доступан што бољи дигитални модел терена (слика 30 б). Поред геометрије ова грешка утиче и на радиометријске карактеристике снимка што за резултат има да се неки делови на снимку приказују светлије или тамније. Тако терен чији је пад окренут према радару има више скатерера по јединици растојања на снимку, што значи и већу вредност рефлектованог осветљења, због чега изгледа светлије. Обрнуто, терен који је супротног пада у односу на радар има мању осветљеност на снимку. Ако је овај пад превеликог нагиба може доћи до потпуне заклоњености од радарског сензора (слика 30 ц), тако да радарски зраци уопште не падају на терен и нема никаквих регистрованих информација на пријемнику. Оваква подручја јављају се на снимцима црна у потпуности. Када је терен превеликог нагиба али окренут према радару може се догодити да врх падине и подножје замене места на снимцима (слика 30 ц), (Rees, 2012).



Слика 30. Грешке код радарских мерења, а – грешка косог снимања, б – грешка издужења, ц – грешка заклоњености, (Rees, 2012).

#### 2.5.4 Синтетички апертурни радар (SAR)

Радар са синтетичком апертуром (SAR) у основи је исти као и радар са реалном апертуром, где је разлика у процесирању повратног сигнала. Да би се превазишла ограничења у погледу зависности азимутне резолуције од растојања радара, површи и величине антене, SAR систем (за разлику од система сареалном апертуром) користи кретање пријемника како би симулирао већу дужину антене а самим тим и бољу азимутну резолуцију. Сателит се креће по орбити константном брзином и емитује сноп таласа којом радар зрачи површину (фреквенција пулсева је значајно већа у односу на брзину кретања сателита), где свака тачка на путањи снимања улази у сноп зрачења у одређеном тренутку, задржава се у снопу и на крају излази из снопа. За време зрачења тачка ће за сваки емитовани пулс вратити сигнал натраг ка сензору (слика 31), (Moreira и др., 2013).



Слика 31. Принцип рада SAR система, ([geo.uzh.ch/~fpaul/sar\\_theory.html](http://geo.uzh.ch/~fpaul/sar_theory.html)).

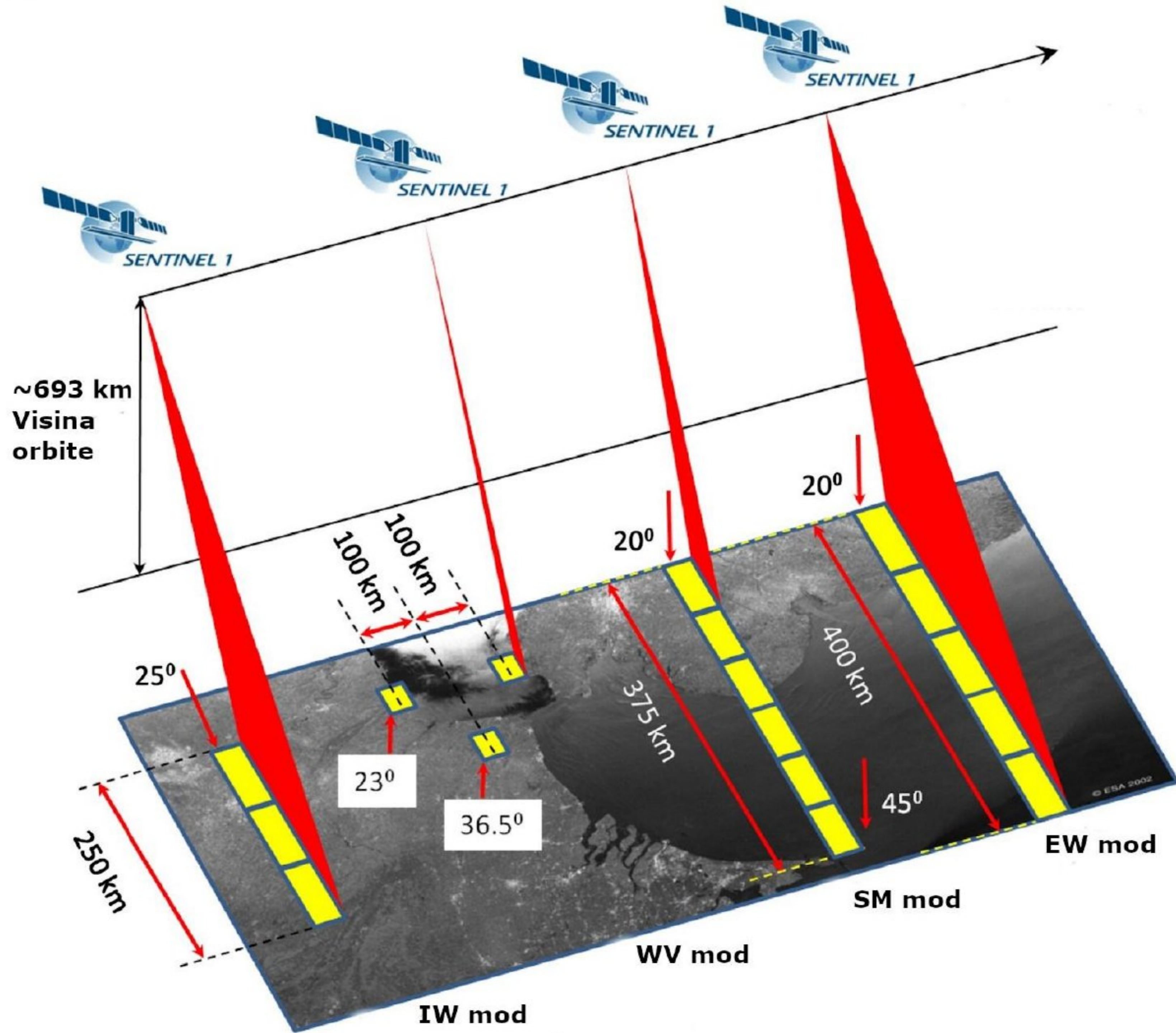
SAR системи региструју повратни сигнал од површи терена дуж орбите сателита, комбинујући принципе интерферометрије и Доплеровог ефекта заједно са одговарајућим процесирањем повратног сигнала могу симулирати већу дужину антене. Агрегацијом повратних сигнала, уз коришћење принципа интерференције и Доплеровог ефекта, могуће је теоретски повећати азимутну резолуцију до половине дужине антене. Регистровање интензитета, амплитуде и фазе повратног сигнала омогућава симулирање синтетичке антене и повећање азимутне резолуције изван граница система са реалном апертуром.

### 2.5.5 Својства снимака Сентинел-1 мисије

Сентинел-1 мисија део је Коперникус програма који реализује *ESA*. Мисија се састоји од два сателита који деле заједничку орбиту са фазама различитим за  $180^\circ$  и емитују таласе *C-benda* на фреквенцији од 5,405 гигахерца са ширином канала од 0 – 100 MHz, упадним углом од  $20^\circ$  -  $46^\circ$  и ширином пулса 5 – 100  $\mu$ s. Сателитске платформе опремљене су SAR системом који региструју податке у различитим поларизацијама.

Сателити су програмирани да раде у четири различита мода (слика 32):

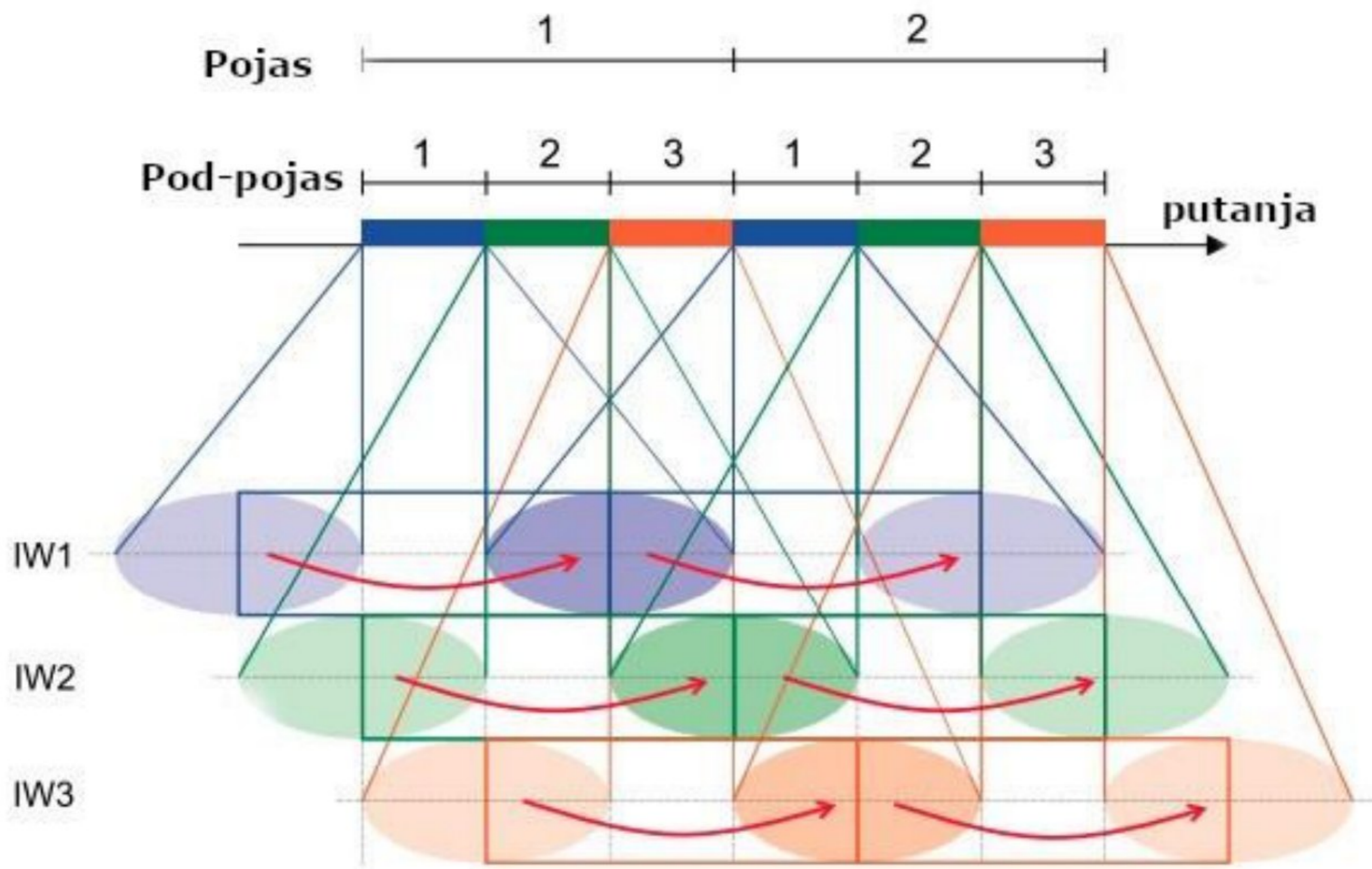
- Стрипмап мод (*SM*),
- Широки интерферометријски појас снимања (*IW*),
- Екстра-широки појас снимања (*EW*),
- Таласни мод (*WV*).



Слика 32. Различити модови аквизиције података Сентинел-1 сателита, ([sentinel.esa.int](http://sentinel.esa.int)).

Код стрипмап (*SM*) мода подаци се прикупљају дуж појаса ширине 80 km просторне резолуције 5 m. Појас се зрачи непрекидним низом пулсева, антенски сноп има константан азимут и приближно сталан падни угао, тако да снимци имају хомоген квалитет дуж целог појаса снимања, са приближно истим упадним углом.

Интерферометријски широки појас (*IW*) користи се за шире примене јер задовољава већину корисника и прикупља податке дуж појаса ширине 250 km резолуције око 5x20 m. Овај мод прикупљања података дуж три мања појаса (под-појаса) користећи технику снимања терена прогресивним скеновима ([sentinel.esa.int](http://sentinel.esa.int)), познату под називом *TOPSAR* (слика 33). Ова техника омогућава померање антенског снопа како дуж појас снимања тако и у правцу азимута.



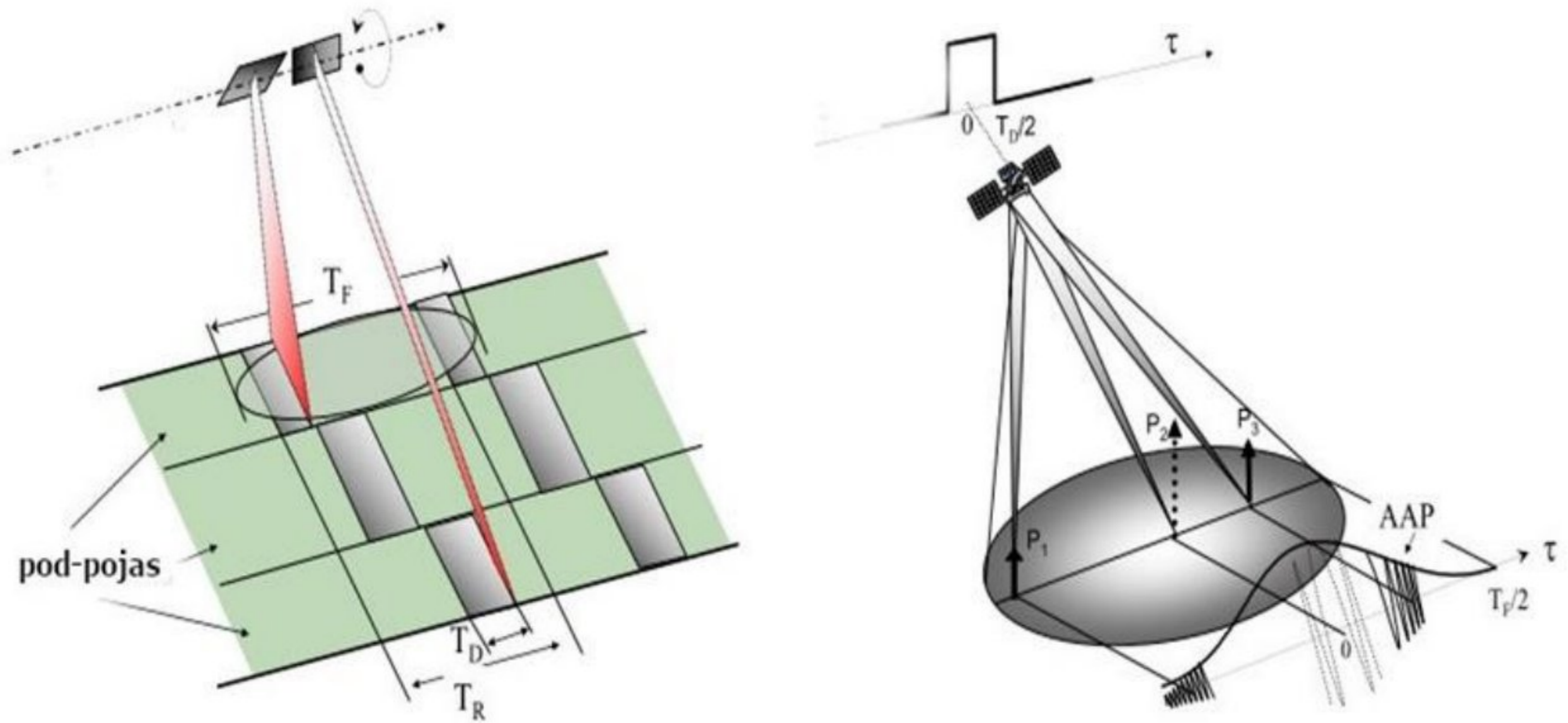
Слика 33. Сателит емитује прво један импулс у првом под-појасу снимања (плаво), затим и за преостала два под-појаса (зелено и наранџасто), на крају се враћа на први под-појас и даље итеративно наставља, (elib.dlr.de).

Екстра широки појас прикупљања података (*EW*) такође се заснива на *TOPSAR* техници притом има већу ширину зраченог појаса, од око 400 km коју чине пет мањих под-појаса дуж којих се прикупљају подаци са просторном резолуцијом од 20 x 40 m. *SLC EW* садрже један снимак за сваки од пет подпојаса и по један за сваки поларизациони канал, (De Zan и Guarnieri, 2006).

Таласни мод (*WV*) прикупља податке зрачењем малих сцена 20x20 km просторне резолуције 5x5 m. Сцене се зраче наизменично са размаком од 100 km дуж орбите и са два упадана угла.

*SM*, *IW* и *EW* продукти доступни су у једнострукој (*HH* или *VV*) или двострукој (*HH+HV* или *VV+VH*) поларизацији. *WV* снимци су доступни само у једнострукој поларизацији. Основни мод снимања изнад копна је *IW* мод (*VV + VH* поларизације), док се за океане и мора користи *WV* мод поларизације. *EW* мод се користи код снимања поларних зона, обала, бродског саобраћаја, нафтних мрља и праћење леда у океанима. *SM* мод налази примену код мањих острва и мониторинга хитних случајева, где се активира после природних хазарда.

Техника под називом *ScanSAR* користи се за снимање појасева великих ширина, мењајући нагиб антенског снопа и тако покрива неколико подпојасева, у правцу управном на правац кретања сателита (слика 34). У сваком од под-појасева антена прикупља пулсове у трајању  $T_D$  са периодом понављања  $T_R$ .  $T_F$  је време трајања отиска (трага) антене. Услед ширег појаса снимања резолуција у правцу азимута се смањује. Проблем код ове врсте прикупљања података је пре свега у нестационарности функције одзива, што значи да за један отисак антене различите тачке имају различите спектралне одзиве, централне фреквенције и неједнако доприносе крајњем резултату (слика 34).

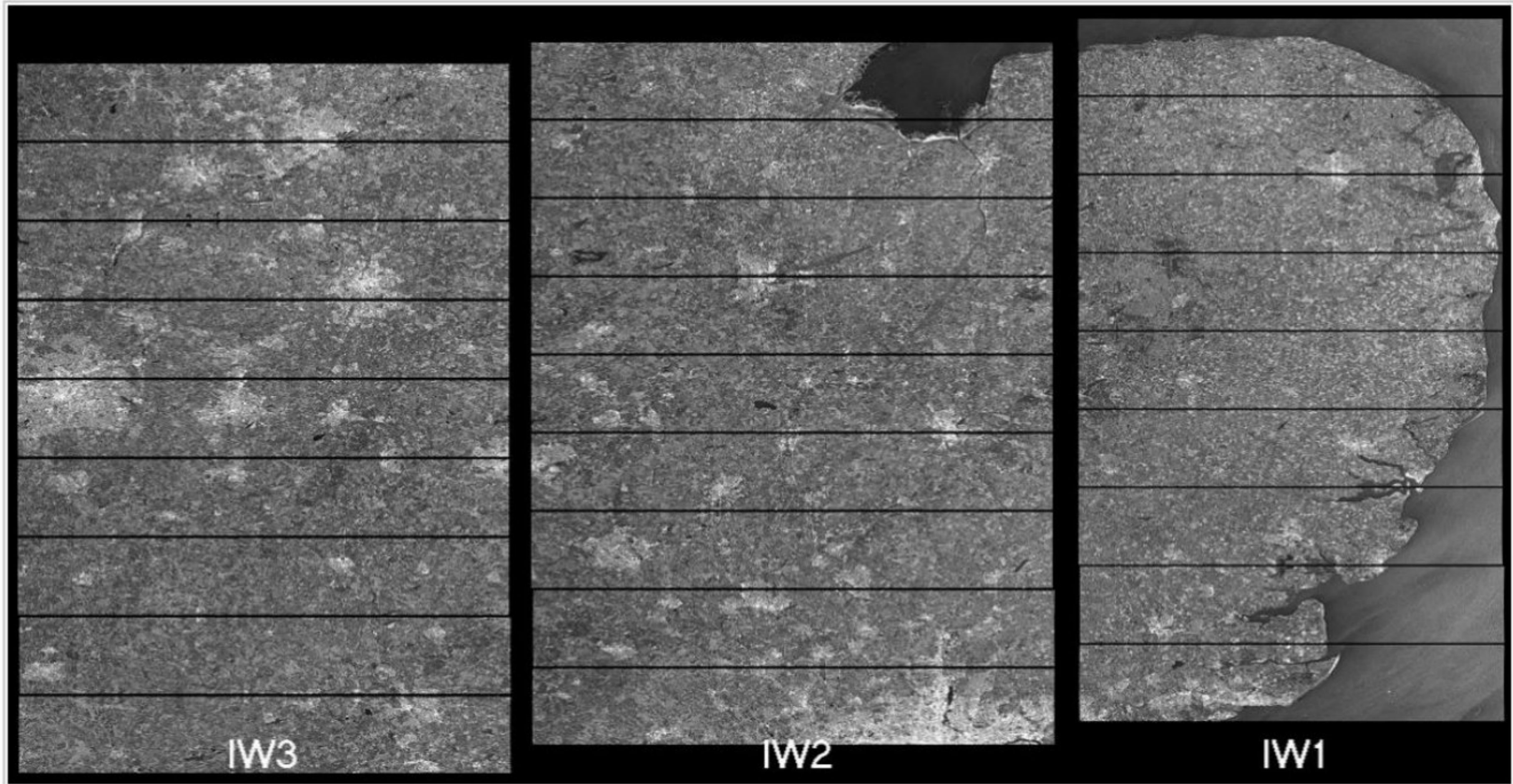


Слика 34. Особине ScanSAR технике, (ieeexplore.ieee.org).

*TOPSAR* замењује традиционалну *ScanSAR* технику снимања, притом покривеност и просторна резолуција остају исте. У односу на *SM* мод азимутна резолуција је мања због краћег трајања импулса.

Снимци Сентинел-1 мисије осмим по моду снимања разликују се и по нивоима процесирања, док у случају ниво 1 *GRD* (*Ground Range Detected*) продуката и по резолуцији. Постоји три нивоа процесирања за све продукте: ниво 0, ниво 1 и ниво 2. Сви продукти се добијају након процесирања продуката нивоа 0. Продукти нивоа 0 садрже само компресоване, нефокусиране сирове податке. Да би уопште било могуће користити податке за процесирање потребни је софтверски декомпресовати и фокусирати податке. Подаци нивоа 0 садрже шум, интерну калибрацију, изворне податке сензора, податке о орбити и висини лета сателита. Ови подаци се чувају у репозиторијумима и могуће је на основу њих направити податке нивоа 1 и нивоа 2. Ниво 1 подаци су намењени већини корисника и добијају се процесирањем података нивоа 0, тј., сирових података, и представљају основу за добијање података нивоа 2. Код података нивоа 1 треба издвојити два типа података - *Single Look Complex (SLC)* и *Ground Range Detected (GRD)*. Ниво 2 подаци садрже геофизичке производе на основу података нивоа 1 и могу се користити за праћење морских струја, ветрова на океанима и таласа, (*SAR Handbook, 2019*).

*Single Look Complex (SLC)* снимци садрже фокусиране *SAR* податке, геореференцираних на основу орбита и висине лета сателита, и доступне у косој геометрији. *SLC* снимак садржи једну сцену за сваку поларизацију, користи пуну спектралну ширину сигнала и комплексне бројеве за запис амплитуде и фазе у оквиру сваког пиксела. *IW* продукти садрже три мања појаса снимања. *EW* продукти имају пет подпојасева, где се сваки подпојас састоји од серије импулса и свака серија импулса је процесирана као посебан *SLC* снимак који је спојен у један снимак на основу података о димензији времену и локацији прикупљања импулса (слика 35). Подручја зрачена истим низом пулсева се преклапају са суседним пулсевима из истог и суседног подручја, што доприноси да нема рупа између снимака, (*SAR Handbook, 2019*).



Слика 35. Особине ScanSAR технике, (sentinel.esa.int).

Ниво 1 *GRD* производи састоје се од фокусираних *SAR* података који су прикупљени, осредњени (*multi-look*) и пројектовани на елипсоид *WGS84*. пројекција на елипсоид је са поправком на основу висине терена која се добија из метаподатака на основу модела терена. Вредности пиксела односе се на вредности амплитуде, док се информација о фази губи. Ови производи доступни су у три резолуције у зависности од мода аквизиције податак и нивоа осредњавања: пуна (3,5 m x 3,5 m), висока (10 m x 10 m) и средња резолуција (40 m x 40 m).

### 2.5.6 Пре-процесирање Сентинел-1 података

Кораци обраде зависе од Сентинел-1 снимака који се користе и од намене за коју је намењено процесирање. Генерално, пре употребе на снимцима је потребно извршити геометријску и радиометријску корекцију. Препорука је да се пре процесирања снимци, због своје величине и захтевности у процесирању одређених операција, смање на подручје од интереса.

#### 2.5.6.1 Преузимање прецизних орбита

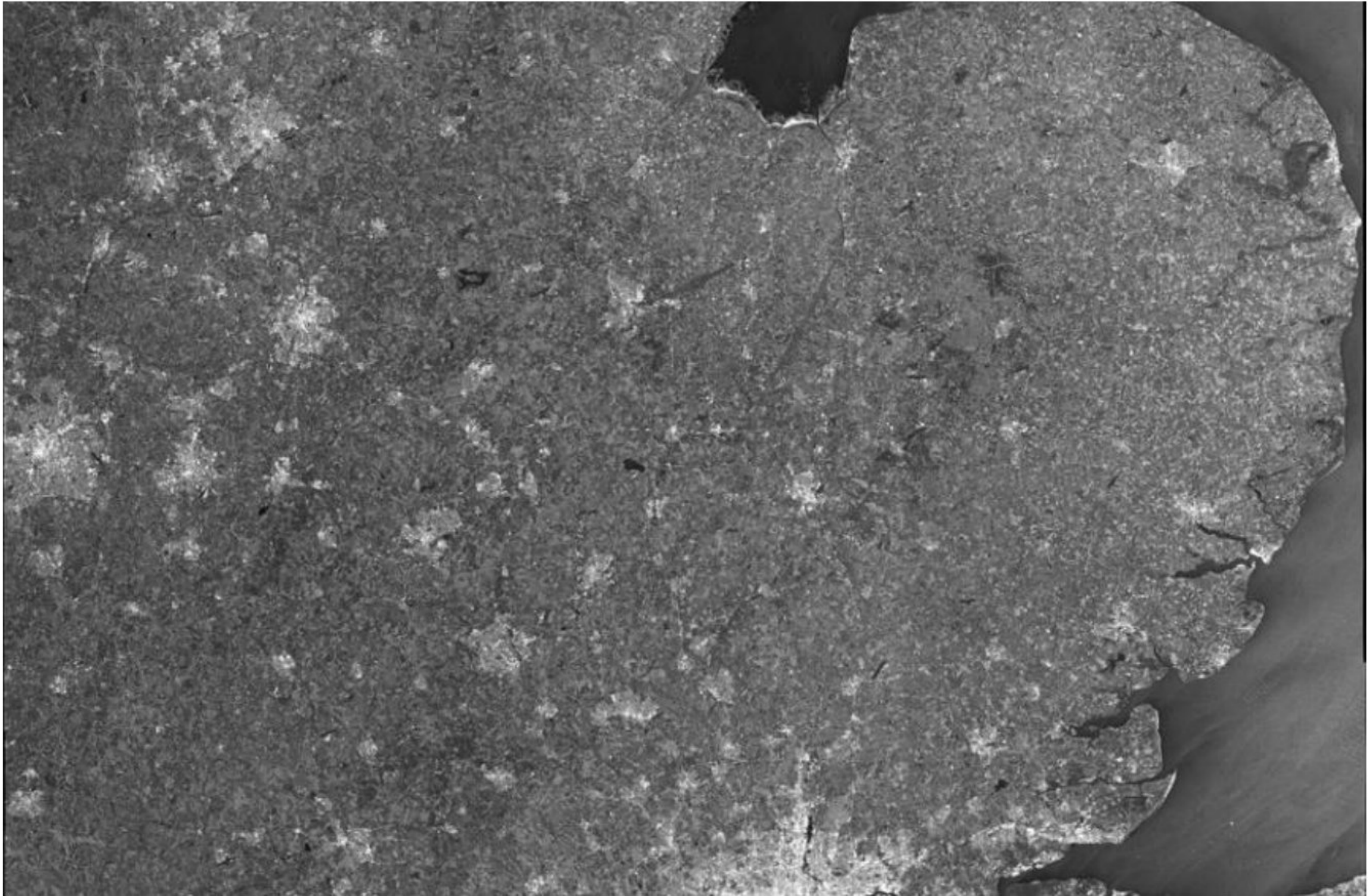
По правилу, као први корак геометријског процесирања *SAR* снимака јесте преузимање прецизних орбита сателита. Термин прецизне орбите односи се на тачне податке о позицији и брзини сателита током времена. Приликом прикупљања података прецизне ефемериде сателита нису познате, рачунају се накнадно и доступне су најкасније 20 дана након снимања за Сентинел-1 сателите. Потребно је преузети прецизне ефемериде за снимке који се користе у процесирању како би прецизност геокодирања била што боља. Од прецизности орбите зависи и прецизност трансформације координата из координатног система снимка у геокодирани координатни систем, односно пројекцију. Прецизне ефемериде снимака имају велики значај и за одређене наредне кораке у пре-процесирању и правило је да се увек користе најбоље доступне прецизне орбите, (*SAR Handbook*, 2019).

#### 2.5.6.2 Уклањање термалног шума

Термални шум узрокован је позадинском енергијом *SAR* пријемника и не зависи од снаге примљеног сигнала. Овај шум се појављује насумично у оквиру снимка, али има мале вредности. Највећи утицај испољава у областима где су детектовани сигнали ниски као што су мирна језера и реке. За уклањање термалног шума користе се одређене табеле доступне у оквиру Сентинел-1 нивоа 1 података.

### 2.5.6.3 Уклањање бразди између врста

Уклањање бразди (*Debursting*) између врста врши се у оквиру подснимака, представља спајање више повратних пулсева и подпојасева снимања код *SLC* података у један снимак. Сентинел-1 *IW SLC* производи су сачињени од више врста (пулсева) које се преклапају по азимуту за сваки подпојас снимања где се раздвојеност манифестује црним линијама. Након овог оператора добија се јединствен снимак, који се може видети на слици 36, који је пре оператора приказан на слици 35.

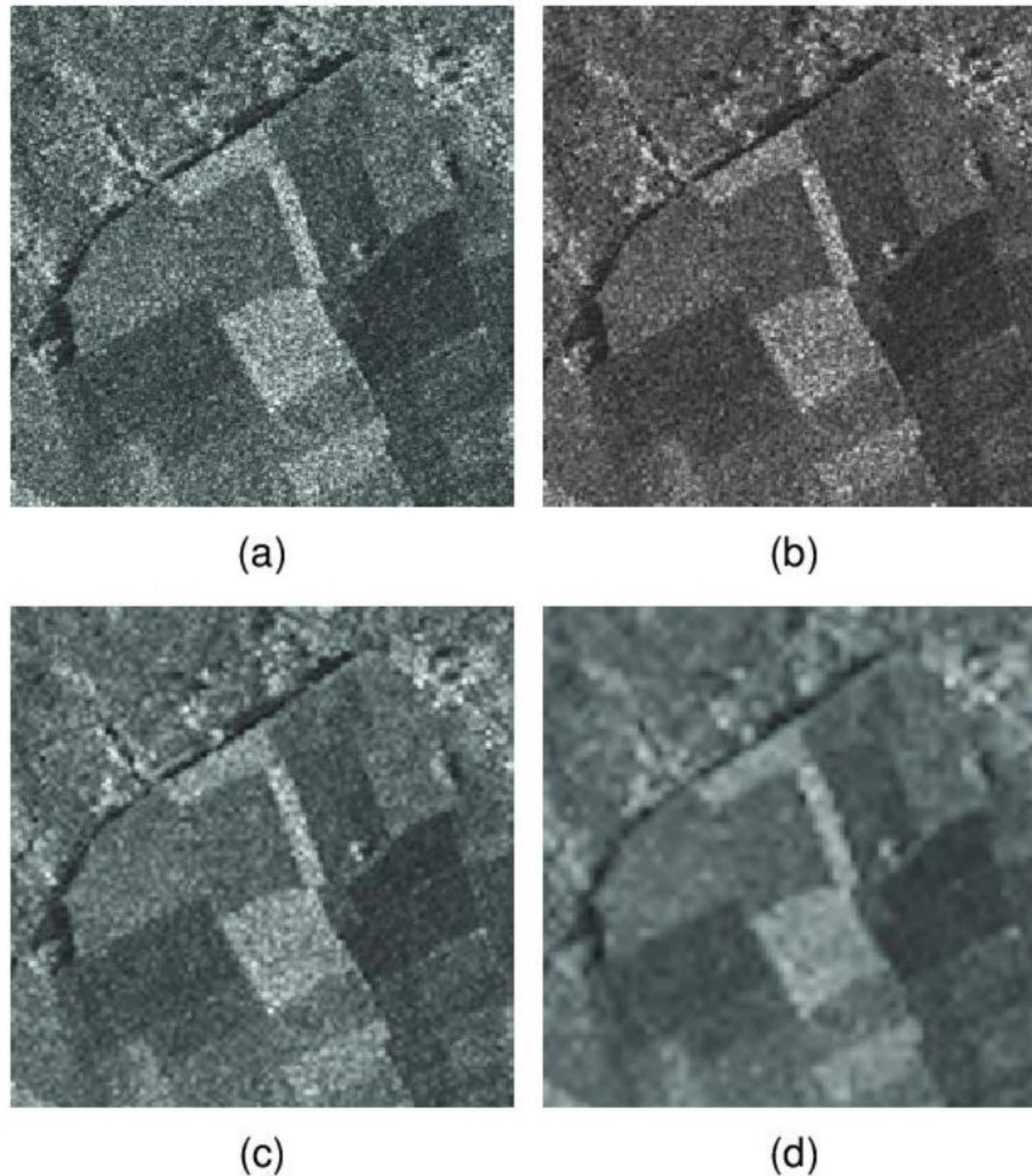


Слика 36. Спајање пулсева и подпојасева снимања, ([sentinel.esa.int](http://sentinel.esa.int)).

### 2.5.6.4 Осредњавање пиксела

Овај корак (оператор) представља интерполацију (осредњавање пиксела (*multilooking*)) према неком претходно дефинисаном распореду, где је циљ добијање хомогеног облика и величине пиксела на целом снимку на штету резолуције. Величина пиксела излазног снимка зависи од броја осредњавања приликом интерполације, тј., колико улазних пиксела је коришћено. Приликом хомогенизације величине пиксела, као додатна последица јавља се смањење радиометријског шума (слика 37). Операција се користи пре свега за *SLC* податке после операције уклањања бразди. Може се користити и за усклађивање величине пиксела код *SAR* података са величином пиксела код података модела терена, пре теренске корекције, (*Moreira и др., 2013*).





Слика 37. Смањење радиометријског шума користећи операцију осредњавања, (Moreira и др., 2013).

#### 2.5.6.5 Геометријска корекција

Циљ геометријске корекције јесте елиминација грешака које настају при снимању због геометрије снимања као и због топографије терена (слика 30). Да би се омогућило мултидисциплинарно коришћење SAR снимака, тј., коришћење са снимцима других радарских система као и са оптичким снимцима али и неким другим подацима на подручју од интереса, SAR снимци морају бити геокодирани. Геокодирање представља трансформацију снимка из геометрије косог растојања или косе геометрије у хоризонталну геометрију односно геометрију хоризонталног растојања. Код овог оператора снимак се пројектује на дигитални модел терена или на одређени елипсоид. Више о овој теми представљено је у (Woodhouse, 2006; SAR Handbook, 2019).

Поступак геокодирања врши се на два начина: унапред и уназад. У пракси је заступљен поступак геокодирања уназад, где се за сваки пиксел резултујуће, геокодиране, слике рачуна, помоћу модела терена или елипсоида, његова локација у оригиналном снимку (коси снимак), интерполацијом вредности суседних пиксела на оригиналном снимку.

#### 2.5.6.6 Радиометријска калибрација

Сентинел-1 подаци нивоа 1 нису радиометриски калибрисани. За квантитативно коришћење SAR снимака потребно је превођење измерене радарске рефлексивности у физичке јединице. Без овога немогуће је поредити податке са истог или различитих сензора различитих датума и различитих модова аквизиције података. За радиометријску калибрацију користе се подаци доступни из прегледних табела.

### 2.5.6.7 Радиометријска корекција утицаја терена

Радиометријске деформације јављају се пре свега услед слабљења, неретко и губитка сигнала на путу између објекта и сензора, пре свега услед грешке антене али и других извора деградације сигнала. Већина радиометријских корекција врши се пре уношења геометријских корекција, а неке се врше упоредо, где је циљ да се редукује шум у оквиру прикупљених података. У пракси се ретко изводи ова корекција над осредњеним подацима у оквиру пиксела (*multilooking*) и треба је избегавати, јер је резултат бољи ако се користе оригиналне вредности пиксела. Сентинел-1 прегледне табеле са параметрима радиометријске калибрације добијају се коришћењем упадних углова радарских снопова у односу на усвојени елипсоид.

Да би се прецизно интерпретирали, радарски подаци морају се радиометријски поправити за утицај локалног упадног угла (утицај топографије) и нормализовати на праву површину пиксела. Радиометријска теренска коорекција (*RTC*) одређује се рачунањем повратног расејања у односу на локални упадни угао:

$$\sigma_{NORLIM}^0 = \sigma_{EU} \frac{\sin \theta_{LIA}}{\sin \theta_{EU}} \quad (17)$$

где је  $\theta_{LIA}$  локални упадни угао одређен коришћењем дигиталног модела терена,  $\theta_{EU}$  упадни угао у односу на елипсоид који је коришћен за радиометријску калибрацију преко које је добијена вредност повратног расејања  $\sigma_{EU}$  срачуната у односу на коришћени елипсоид.

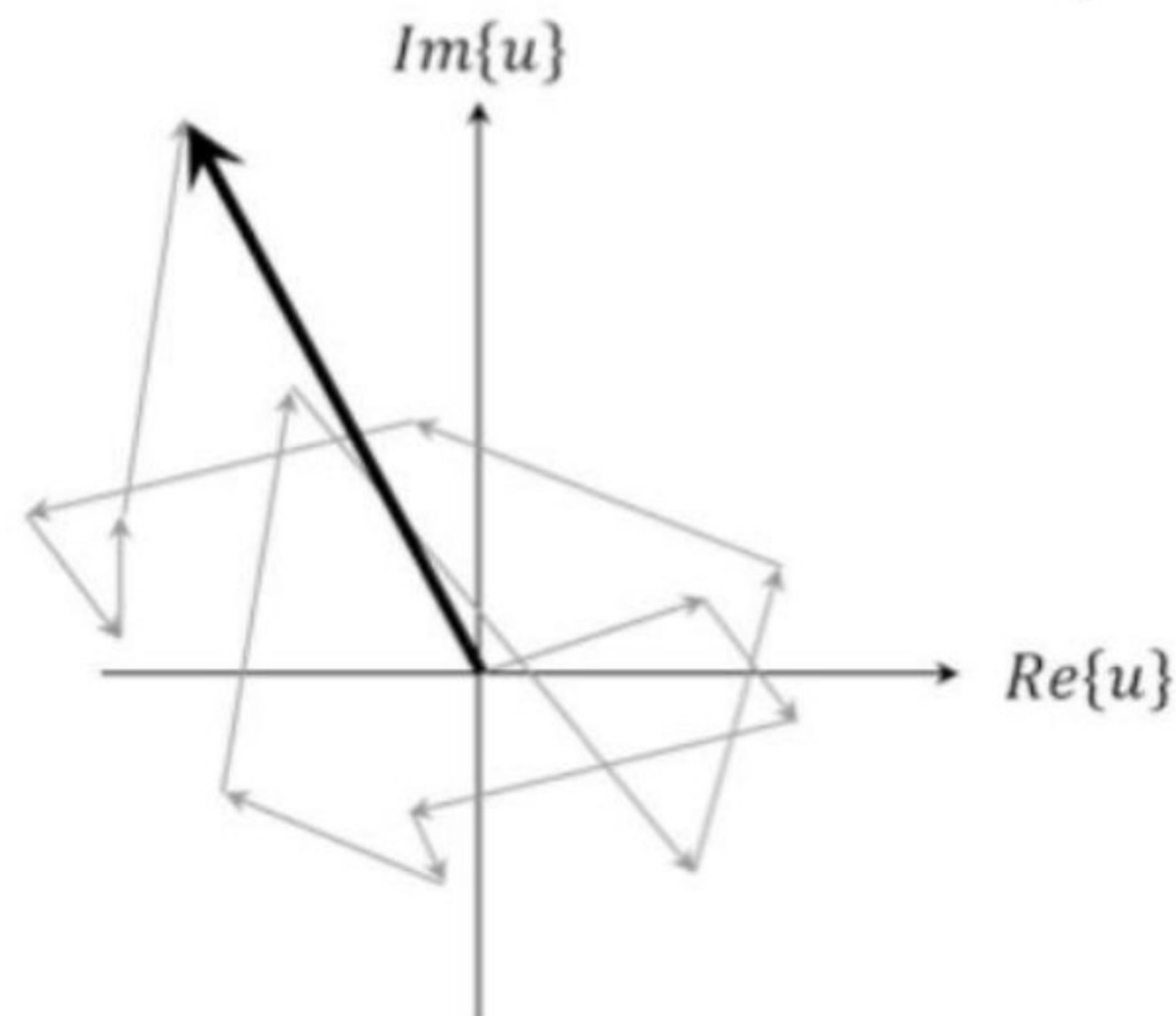
### 2.5.6.8 Откалњање ефекта мрља (*speckle*)

Поред геометријских утицаја *SAR* снимци имају веома карактеристичан и препознатљив изглед, тзв., зрнасту структуру познатију као „со и бибер“ (слика 38), асоцирајући на наизменичну појаву светлијих и тамнијих пиксела у оквиру снимка. Овај ефекат се назива ефекат мрља (*speckle*) и производ је интерференције кохерентних таласа који су рефлектовани од појединачних извора (мета) унутар пиксела. Зрачење које је детектовано и приказано на једном пикселу *SAR* снимка репрезентује кохерентну суму електромагнетних таласа који су расејани од великог броја мањих објеката који се налазе унутар тог пиксела. Ова сума је случајног карактера што значи да се и вредности пиксела природно разликују и у случајевима када је подлога потпуно хомогена, (*SAR Handbook, 2019*).



Слика 38. Ефекат мрља на радарском снимку.

Ефекат мрља може се најлакше појаснити на примеру зрачења пољопривредног земљишта (ливаде) на којем је непосредно пре зрачења скинута трава, где се добија да су електромагнетне енергије расејане од сваке (сваког дела) биљке и земљишта испод и једнаке су по интензитету. Положаји ових појединачних извора расејања разликују се унутар пиксела, фазе расејаних таласа ће се разликовати а интензитети ће бити исти. Укупно електромагнетно зрачење детектовано из тог пиксела представља суму хиљада случајних вектора из појединачних извора (слика 39). Амплитуда и фаза резултујућег вектора разликоваће се од пиксела до пиксела, због распореда појединачних извора расејаног зрачења, што као резултат даје „со и бибер“ карактеристичан шум на *SAR* снимцима.



Слика 39. Електромагнетно зрачење у оквиру једног пиксела представља суму великог броја појединачних извора расејања зрачења унутар пиксела, (*SAR Handbook*, 2019).

Ако је број извора расејања (скатерера) велики, распоред интензитета у оквиру снимака описује се експоненцијалном формом:

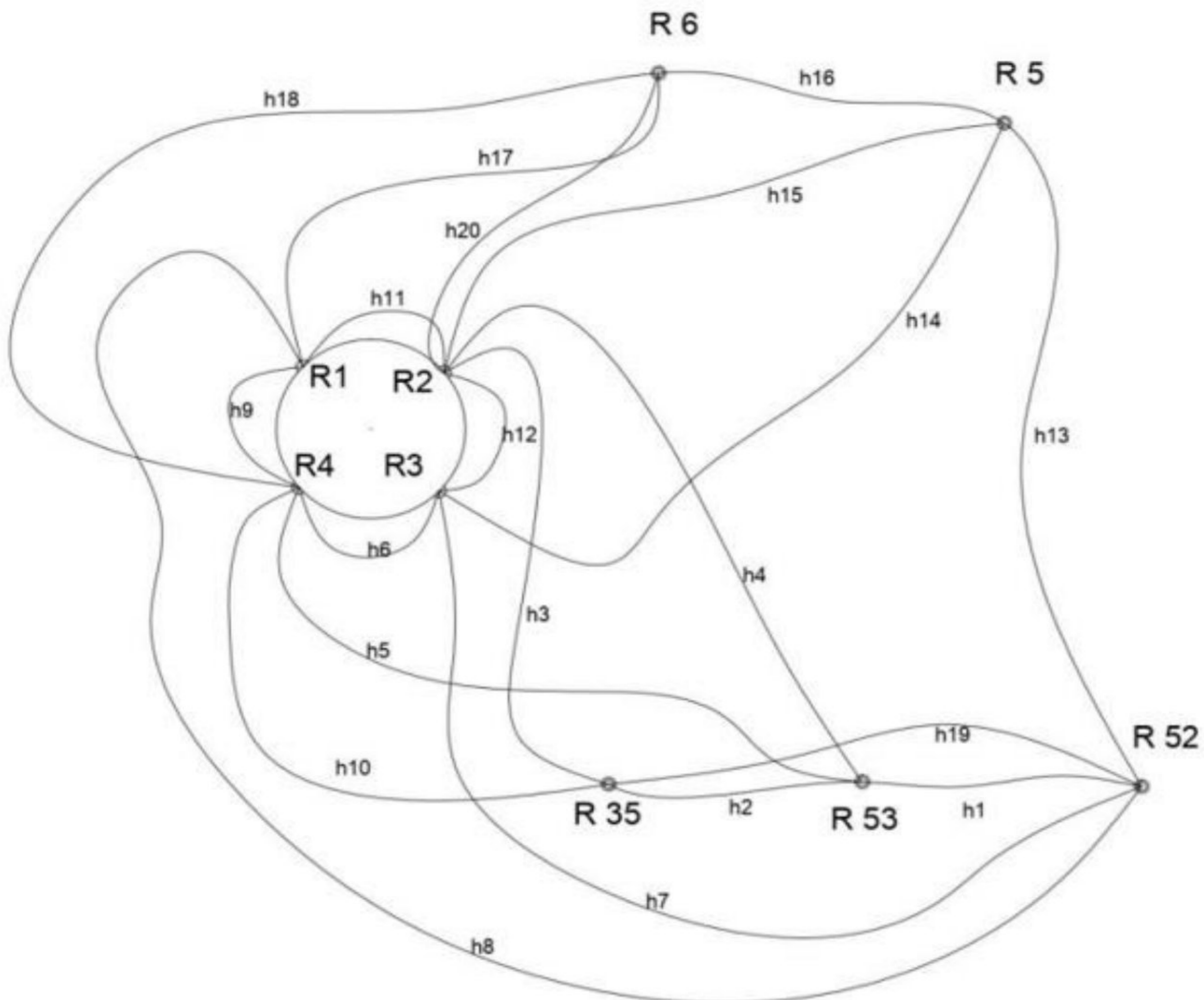
$$pdf(I|\sigma^0) = \frac{1}{\sigma^0} e^{-\frac{I}{\sigma^0}} \quad (18)$$

где је  $I = Re\{u\}^2 + Im\{u\}^2$  интензитет пиксела. Ова расподела се назива расподела мрља и описује понашање шума мрља за хомогене објекте у оквиру *SAR* снимака. Из једначине 18 види се да облик криве расподеле зависи од нормализованог радарског попречног пресека  $\sigma^0$  објекта, тако да светлији делови снимка имају више шума. У зависности од интензитета мрље се на снимку могу разликовати од других шума, који су у великом броју случајева систематског утицаја на целом снимку.

Мултипликативни шум је, попут мрља, тешко уклонити јер се разликује од пиксела до пиксела, и неопходно је познавање вредности радарског попречног пресека објекта са снимка да би се на одговарајући начин моделирала функција  $pdf(I|\sigma^0)$ . Како ово није могуће извести у потпуности, развијен је велики број филтера и агоритама за мрље који покушавају да умање или елиминишу овај шум са снимака. Већина филтера за ефекат мрља користи у основи две полазне хипотезе. Прва је да се просторним осредњавањем мањих елемената велике хомогене површи добија иста вредност као и што би се добила осредњавањем великог броја мерења целе површи. Ова хипотеза се назива ергодичност: да је осредњавање по простору или по времену исто као и осредњавање великог броја мерења исте појаве. Друга хипотеза јесте да снимак који се филтрира покрива подручје састављено од великог броја већих површина са хомогеним радарским попречним пресеком.

## 2.6 Теренски радови

У циљу унапређења радова на експлоатацији угља приликом изградње димњака, нивелмански радови на праћењу слегања димњака извођени су од априла 2019. до фебруара 2021. Било је неопходно извршити нулту, као и додатне серије мерења у геодетској *ID* мрежи за осматрање димњака новог блока БЗ у „ТЕ КОСТОЛАЦ Б“. За ту намену урађено је девет серија нивелмана, плус нулта серија са циљем да се испрати слегање димњака до његове стабилизације. Праћење слегања подразумевало је формирање нивелманске мреже која се састоји од 5 основних репера (R5, R6, R52, R53 и R35), под називом и основна нивелманска мрежа, и 4 радна репера (R1, R2, R3 и R4). Основни репери су постављени на осигураним и безбедним местима ван зоне утицаја саме конструкције и израде димњака, док су радни репери постављени на самом димњаку (слика 40).



Слика 40. Нивелманска мрежа са планом опажања нивелманских страна, (Гојковић и др., 2023).

Током праћења слегања у периоду од априла 2019. када је урађена нулта серија, па све до фебруара 2021. године, првих осам епоха су рађене на по два месеца размака од нулте, док је последња, девета епоха урађена накнадно у фебруару 2021. План опажања (слика 40) подразумевао је 20 нивелманских страна које су биле мерене приликом сваке епохе.

### 2.6.1 Нулта епоха

Методом геометријског нивелмана одређене су висинске разлике *ID* мреже за осматрање стабилности димњака приликом градње. Поред висинских разлика мерене су и дужине нивелманских страна. Мерења су извршена инструментом *LEICA DNA 03* декларисане тачности  $m_h=0,3 \text{ mm/km}$  и инварским нивелманским летвама са бар кодом. Приликом мерења



коришћене су одговарајуће папуче за нивелање, испитани радни услови за нивелир и пратећу опрему, али и пажљиво изабрани део дана и услови при мерењу. Мерење је реализовано нивелањем висинских разлика напред-назад, са двоструким читањем летве („задња летва“ – „предња летва“ – „предња летва“ – „задња летва“) при чему је у току мерења вршена контрола упоређењем висинских разлика напред-назад (дозвољено одступање нивелања напред-назад је 0,5 mm) и затварањем полигона. Инструмент јештићен сунцобраном док су трајала мерења и период адаптације инструмента на спољашње услове од 30 минута је такође поштован. Сва мерења су извршена истог дана и то „напред“ пре подне, а „назад“ после подне.

### 2.6.2 Епохе мерења висинских разлика на праћењу стабилности димњака

Након извршене нулте епохе било је потребно извршити прву епоху мерења, као и остале епохе у геодетској *ID* мрежи за осматрање димњака новог блока БЗ у „ТЕ КОСТОЛАЦ Б“, све до коначне стабилизације димњака. Након тога потребно је било извршити:

- изравнање нулте и текуће и оцењивање средње грешке јединице тежине,
- одређивање идентичних тачака у два епохама,
- одређивање подударног (стабилног) дела основне мреже,
- одређивање померања тачака, у односу на „стабилни“ део основне мреже.

Комплетни теренски радови реализовани су као и за нулту епоху, са истим приступом и истом пажњом према инструментима и опреми.

## 2.7 Улазни параметри за геотехничко моделирање

Геотехнички параметри, као што је јединица тежине  $\gamma$  и ограничени деформациони модул  $E_s$ , били су неопходни да се изврши једноставно *3D* моделирање слегања терена и упореде са резултатима перманентних скатерера добијених анализом 4,25 година података Помоћу *PS* методе. Иако су геотехничка мерења вршена редовно да би се утврдио ниво компактности јаловинске прашине, мало или нимало података је доступно слободно или јавно, укључујући параметре и општу геометрију локације, јаловиште итд. Усмена комуникација са геолошким и геотехничким инжењерима укључених у извођење теренских истраживања била је један од кључних извора процена коришћених у овом раду. Због недостатка потребних истраживања (лабораторијски тестови, теренска мерења, итд.) треба нагласити да су параметри геотехничког моделирања грубо процењени и да се добијени резултати могу користити само за приказ општег тренда слегања као и за компарацију са добијеним *PS* резултатима.

Следећи профил земљишта је разматран:

- лес, 30 m дебљина,  $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$ ,  $s = 20,0 \text{ MPa}$ , само непосредно слегање,
- глиновити песак, 50 m дебљина,  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ ,  $E_s = 10,0 \text{ MPa}$ , само непосредно слегање,
- слој угља 1, 15 m дебљина,  $\gamma = 12 \text{ kN/m}^3$ ,  $E_s = 1,0 \text{ MPa}$ , само непосредно слегање,
- глиновити песак 10 m дебљина,  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ ,  $E_s = 10,0 \text{ MPa}$ , само непосредно слегање,
- слој угља 2, 15 m дебљина,  $\gamma = 12 \text{ kN/m}^3$ ,  $E_s = 1,0 \text{ MPa}$ , само непосредно слегање,
- глиновити песак 35 m дебљина,  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ ,  $E_s = 10,0 \text{ MPa}$ , само непосредно слегање,
- слој угља 3 5 m дебљина,  $\gamma = 12 \text{ kN/m}^3$ ,  $E_s = 1,0 \text{ MPa}$ , само непосредно слегање,
- глиновити песак 50 m дебљина,  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ ,  $E_s = 10,0 \text{ MPa}$ , само непосредно слегање.

Модел слегања не укључује утицај подземних вода, иако би овај утицај могао бити значајан, (Божич, 2022). Претпоставка је да су услови суви (због сталног одводњавања површинског копа), да нема порних притисака и да је слегање непосредно (примарно).



Други сегмент који је примарни разлог потенцијалног слегања, око површинског копа, јесте прашина која се јавља због ископавања и прашина која долази из термоелектране. Они се одвајају непропусном фолијом а затим сабијају до густине од  $11 \text{ kN/m}^3$  када су суви. Претпоставка је да свако јаловиште може достићи 30 метара висине са странама нагиба 1:1, као и да је песковито-блатњавог састава (*Peduto* и др., 2022). Величина и геометрија површинског копа реконструисани су са доступних сателитских снимака, а дубина је одређена на основу положаја слоја угља. Све симулације подразумевале су дно првог слоја угља на коти  $-80$  метара као референтним нивоом.

Све симулације извршене су у софтверском пакету *Rocscience module Settle3*, користећи *Boussinesq* методе напона  $\sigma_b$  простирања оптерећења  $F$ , једначина (19), која је базирана на теорији еластичности и примењује се за било коју тачку у хомогеном полу-простору (испод земљине површи) на дубини  $z$  и углу померања  $\theta$  (угао између вертикале и линије која повезује посматрану тачку и тачку оптерећења). Непосредно слегање које се јавља истовремено као оптерећење (у овом случају, слојеви пепела и прашине) пропорционално је разлици напона (у овом случају,  $\sigma_b$ ) и односу модула, једначина (20).

$$\sigma_b = \frac{3F}{2\pi z^2} \cdot \cos^5 \theta \quad (19)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E_s} \quad (20)$$

Прорачуни су урађени само за подручја села Дрмно и Брадарац и упоређени су са добијеним резултатима *PS* методе.



### 3 Методе

Технике за генерисање *InSAR* временских серија померања могу се пре свега поделити у три групе. Прва група обухвата *PS* технике код којих долазе до изражаја доминантни скатерери тзв. перманентни скатерери чија рефлектујућа својства радарског сигнала остају стабилна са протоком времена у периоду за који се врши опажање, што се може најбоље видети код (*Ferreti и др., 2000; Ferreti и др., 2001*). Друга група подразумева технике које користе карактеристику кратких базних линија (*SBAS*) за генерисање временских серија померања комбиновањем свих интерферограма који имају што мању вредност базне линије, (*Berardino и др. 2002*). Трећа група обухвата хибридне технике где се временске серије померања добијају комбинацијом *PS* и *SBAS* техника. Све три групе техника које су поменуте изнад, имплементирани су у различите софтверске пакете.

Европска Свемирска Асоцијација *ESA* развија различите алате и софтвере за процесирање опажања Земље од којих је један од софтвера под називом *SNAP* који се може преузети на адреси ([step.esa.int](http://step.esa.int)) развијан од 2014. године, који обухвата све три групе техника. *SNAP* је софтвер отвореног кода који је настао на основама, претходно развијених софтвера, *BEAM* и *NEST*, са својом последњом верзијом 9.0 доступном од 29. јуна 2022. године. *SNAP* софтвер може издвојити ПОИ, припремити интерферограме, процесирати различите корекције и параметре, и експортирати податке за друге софтверске пакете или формате у којима се може извршити процесирање интерферограма кроз временске серије померања. Један од софтверских пакета за процесирање интерферограма у циљу генерисања временских серија померања је *StaMPS* ([homepages.sse.leeds.ac.uk](http://homepages.sse.leeds.ac.uk)). *StaMPS* је софтверски пакет отвореног кода, али који за део процесирања користи комерцијални софтвер *MATLAB*, и користи се највише у наставно-научне сврхе као додатна анализа померања на површи Земље. *StaMPS* је развијен за две технике процесирања временских серија померања, *PS* и *SBAS*, док се резултати *PS* и *SBAS* могу комбиновати, тзв., хибридни приступ.

У овом раду изабран је *PS* метод за генерисање временских серија померања обзиром да се очекују, траже и анализирају деформације у урбаним срединама. Поред урбаних средина, остатак ПОИ сачињава пољопривредно земљиште. Процесирање у софтверима у овом раду подељено је на три фазе:

1. Филтрирање снимака или препроцесирање,
2. Процесирање кроз *SNAP* и *StaMPS* софтвер,
3. Коришћење софтвера отвореног кода и скрипт фајлова за анализирање и визуелизацију резултата.

На крају, урађено је упоређивање које се састоји од корелационих тестова између тренда резултата добијених нивелањем и генерисаних *PS* временских серија померања добијених на одговарајућим реперима. Додатно је извршено и упоређивање генерисаних *PS* временских серија са геотехничким моделом слегања.

#### 3.1 SAR – Синтетички Апертурни Радар

Радари спадају у активне микроталасне сензоре који раде на принципу одашиљања електромагнетног таласа и записивања повратног одговора тог таласа када се врати назад од мете. Микроталасни опсег није строго дефинисан, али може се узети да се микроталаси простиру у приближном опсегу који одговара вредностима од 0,3 GHz до 300 GHz (слика 41). Предности коришћења микроталаса огледају се пре свега у њиховој независности од сунца (дана или ноћи), као и њихове могућности да се простиру кроз атмосферске слојеве. Микроталаси у односу на оптичке, остају без утицаја доба дана и нивоа облачности, продиру дубље у вегетацију, где дубина продирања зависи од густине вегетације и фреквенције



микроталаса, тако да боја добијена микроталсанним зрачењем на снимцима представља геометријска и диелектрична својства (*Ulaby и др., 1981; Ulaby и др., 1982; Ulaby и др., 1986*).

| Bend                | P   | L  | S  | C  | X  | K   | Q | V | W |
|---------------------|-----|----|----|----|----|-----|---|---|---|
| Frekvencija (GHz)   | 0.3 | 1  | 3  | 10 | 30 | 100 |   |   |   |
| Talasna duzina (cm) | 100 | 30 | 10 | 3  | 1  | 0.3 |   |   |   |

Слика 41. Микроталасни спектар према ознакама бендова електромагнетних таласа.

Синтетички Апертурни Радар (*SAR*) је врста радара која је инсталирана на покретну платформу где између осталих покретних платформи, исту може представљати и сателит. Овакви *SAR* системи генеришу снимке Земљине површине високе резолуције, од неколико метара до неколико стотина метара, који могу дати одговоре на различита питања. Може се анализирати геолошка структура терена, померање глечера и отапање поларног леда, површине мора и океана, начини искоришћавања земљишта, деформацијаме које се могу јавити на површи терена услед различитих утицаја као што су земљотреси и вулканске активности или као последица утицаја човека, нпр., рударства. *SAR* је радар који има тзв., бочни поглед, што значи да му је антена усмерена са стране и коме је зрак вертикално широк и уско хоризонталан. Електро-магнетни таласи се континуално емитују а њихови повратни одговори се по пријему преводе у дигитални облик и чувају да би се касније могли обрадити. Емитовање и пријем радарског сигнала појављују се у различито време а то значи и различите позиције. Системи који користе *SAR* мере серије повратних радарских сигнала који се процесирају у циљу добијања података као што су амплитуда и фаза за све појединачне пикселе једног снимка.

Тродимензионално процесирање код *SAR* снимака врши се из два дела, азимут правац и правац управан на путању сателита се користе у првом делу за добијање *2D* снимака високе резолуције, након чега се употребом одговарајућег висинског модела терена мере фазне разлике између комплексних снимака, који су одређени из различитих углова погледа сателита да би се генерисала вредност висине.

### 3.2 Интерферометрија

Интерферометријски *SAR* (*InSAR*) јесте комбинација конвенционалне *SAR* технике и принципа интерферометрије, као што су приказали (*Rees, 2013; Bamler и др., 1998; Richards, 2007*). Код интерферометријских метода, фазна разлика између два Електро-Магнетна (ЕМ) таласа која се простиру и долазе до исте тачке добија се из интиензитета интерферометријских прстенова, и користи се да би се измерила разлика у дужини њихових пређених путања. У циљу формирања интерферограма, *InSAR* технике користе најмање два комплексно валоризована *SAR* снимка истог подручја направљена са две *SAR* антене које се налазе на одређеној удаљености (базна линија), од којих свака преноси информацију о амплитуди и фази рефлектујућег микроталаса од свих скатерера. Појединачни тзв., антена-оријентисани *InSAR* систем у пракси прави снимке истог подручја два пута, само са мало другачије позиције у орбити и у друго време. Да би се добила вредност интерферометријске фазне разлике између ова два пролаза може се узети као сума фазних помераја. Најважнији међу њима преноси информацију о промени висине скатерера. Други фазни помераји односе се пре свега на топографију подручја скатерера, фазну неодређеност, различите атмосферске утицаје, грешке непознавања тачних позиција антена, фазни шум као и промене карактеристика скатерера са протоком времена (*Crosetto и др., 2016*).





Конвенционална SAR методологија мери само локацију мете у дводимензионалном координатном систему, код кога је једна оса дуж путање сателита (оса дуж путање сателита, X-оса), а друга оса је дефинисана као раздаљина од SAR сензора до мете (управно на осу дуж путање сателита, оса R). Према томе, дигитални SAR снимак је дводимензионални низ пиксела подељен на врсте и колоне, где је сваки пиксел повезан са малим делом површи Земље, и где површина зависи од резолуције. Сваки пиксел представља комплексан број који у себи носи информацију о амплитуди и фази микроталасног поља враћеног од свих скатерера који се налазе у оквиру једног пиксела.

Реални део фазе може бити представљен преко  $\varphi = 2\pi \cdot N + \Delta\varphi'$ , где је први члан повезан са бројем N целих таласних дужина, а други члан  $\Delta\varphi'$ , чија је вредност из интервала од 0 до  $2\pi$  радијана, представља фазну неодређеност као фазну информацију комплексног SAR снимка. Како је N велики и углавном непознат број зато што су удаљености углавном вишеструко веће од таласне дужине, код конвенционалног SAR снимка фазна информација је углавном занемарена због фазне неодређености.

У исто време, интерферометријске методе су широко коришћене за прецизно мерење удаљености због тога што користе кохерентна својства електромагнетног зрачења и чињенице да фаза таласа јесте мера растојања које талас пређе. Мерењем фазне разлике између два кохерентна електромагнетна таласа који су прешли различите путање, може се срачунати разлика између пређених путања са тачношћу пуно мањом од таласне дужине зрачења. Два таласа која се упоређују имају исте амплитуде и фазе као и исте фреквенције и таласне дужине на свом извору (изворима), једначина (21). После преласка различитих путања два таласа су детектована и њихове комплексне презентације сигнала су:

$$\begin{aligned} a_1 &= A_{01}e^{-i\varphi_1} \\ a_2 &= A_{02}e^{-i\varphi_2} \end{aligned} \quad (21)$$

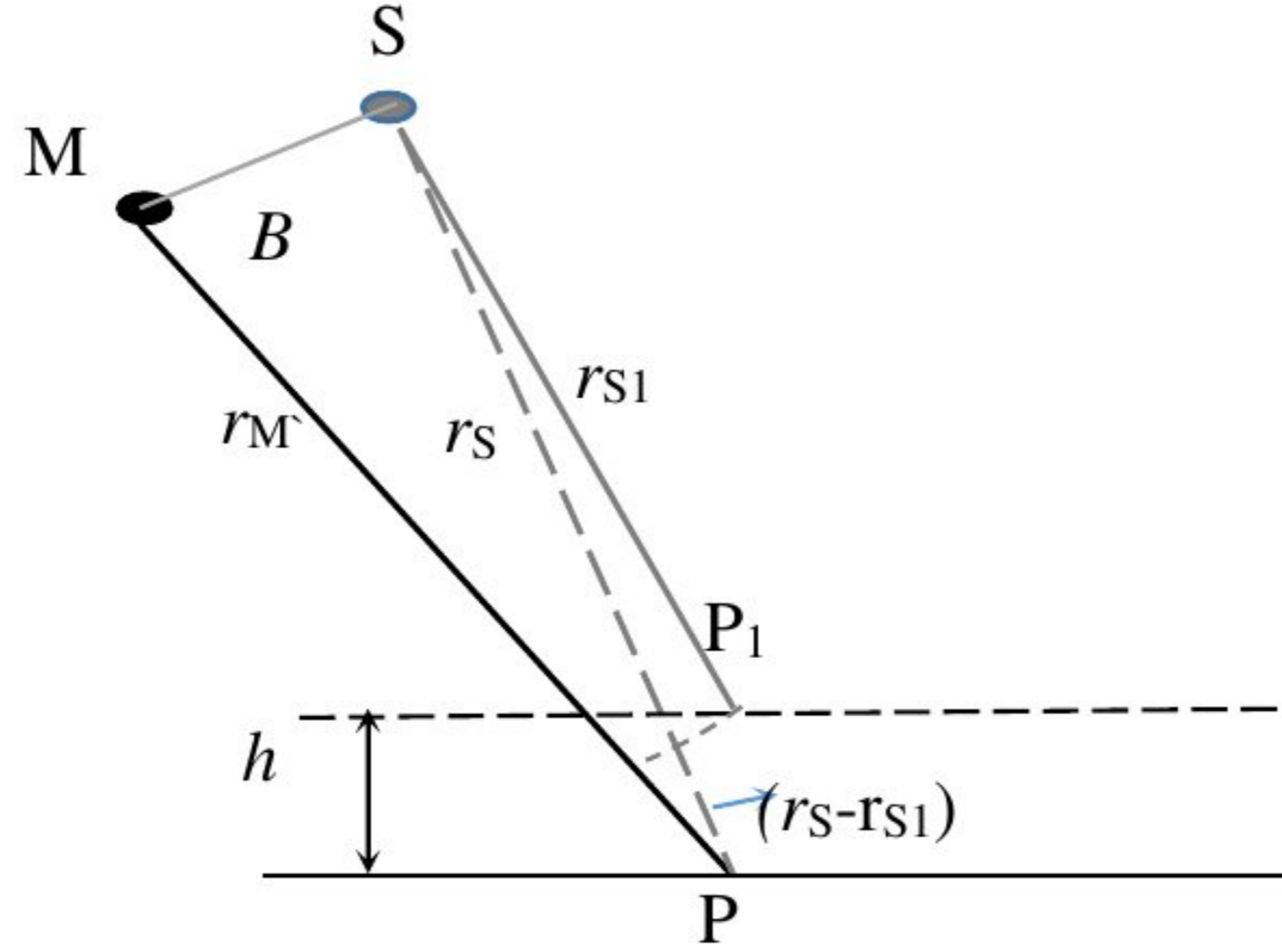
где су  $A_{01}$  и  $A_{02}$  амплитуде таласа а  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  њихове одговарајуће фазе, које зависе од њихове пређене путање. Да би се добио интерферограм, комплексни број  $a_1$  помножен је са коњуговано-комплексном вредности сигнала  $a_2$ , једначина (22):

$$a_1 a_2^* = A_{01} A_{02} e^{i(\varphi_2 - \varphi_1)} = A_{0M} A_{0S} e^{i\Delta\varphi_{int}} \quad (22)$$

и приказује интензитет прстенова у зависности од њихове фазне разлике  $\Delta\varphi_{int}$ . Неодређеност фазне разлике у интервалу од 0 до  $2\pi$  (или од  $-\pi$  до  $\pi$ ) може бити инверзно срачуната из интензитета прстенова. Да би се добили високо видљиви прстенови и осетљива мерења високе резолуције, фазна разлика треба да буде константна за време мерења а амплитуда треба да буде константна и висока.

Како је раније објашњено, *InSAR* је комбинација конвенционалне SAR технике и принципа интерферометрије. Користи најмање два комплексна SAR снимка истог подручја да би се добило више информација из њихових фазних разлика. Ови парови снимака треба да се разликују најмање у једном параметру, и SAR снимци се формирају помоћу две SAR антене постављене на одређеној удаљености B која се још назива и базна линија. Чешће се користи једно-антенски SAR систем који формира снимке истог подручја два пута са веома мало различитих позиција орбите и у различито време (интерферометрија поновног пролаза). Да би се испунио основни интерферометријски услов да су два таласа кохерентна, поред коришћења истог радарског сензора, неопходна је и позиција радара и временски интервал између поновног пролаза да би се обезбедила просторно-временска корелација радарских таласа. Због тога, раздаљина између радарских антена мора бити у одређеном интервалу, као и временски интервал између оговарајућих снимака који мора бити што краћи. Како фазна разлика носи додатну информацију, *InSAR*, поред раванских координата мете обезбеђује и висину као трећу димензију.

Први SAR снимак у интерферометријском пару назива се мастер а други се назива помоћни снимак. Њихова позиција за време аквизиције снимка у односу на циљано подручје је представљена на слици 42.



Слика 42. Мастер снимак (M) и помоћни снимак (S) у односу на мету (тачка P) за време аквизиције снимка.

Ако је мастер радарски сензор (M) на дистанци  $r_M$  од мете у тачки P која се налази на површини терена, онда је враћени талас који прелази двоструку раздаљину детектовао следећу фазу, једначина (23):

$$\varphi_M = \varphi_{rM} + \varphi_{scat M} + \varphi_{inflM} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot r_M + \varphi_{scat M} + \varphi_{othM} \quad (23)$$

Где је  $\varphi_{rM}$  део фазе зависан од двоструке вредности дистанце од мастер антене до мете,  $\lambda$  је таласна дужина радарског сигнала,  $\varphi_{scat M}$  је фазни померај узрокован интеракцијом микроталаса и мете док је  $\varphi_{othM}$  фазни померај узрокован неким другим утицајима. Овај фазни померај може се представити као сума, једначина (24):

$$\varphi_{othM} = \varphi_{atmM} + \varphi_{orb M} + \varphi_{noise} \quad (24)$$

где је  $\varphi_{atmM}$  фазна промена услед атмосферских утицаја као што су промене у коефицијенту преламања дуж путање простирања сигнала и савијања сигнала због рефракције у различитим атмосферским слојевима. Члан  $\varphi_{orb M}$  је фазна промена услед грешака орбита које онемогућавају познавање тачне позиције мастер антене за време аквизиције снимка,  $\varphi_{noise M}$  јесте фазни шум мастер антене. Ако је, за време аквизиције помоћног снимка, антена у незнатно другачијој позицији (S) у односу на мету, не мења висину и то је иста тачка (P), дистанца од помоћне антене до мете износи  $r_S$  (слика 42). Фаза помоћног таласа са сличним својствима као у једначини (23) једнака је:

$$\varphi_S = \varphi_{rS} + \varphi_{scat S} + \varphi_{inflS} = \frac{4\pi}{\lambda} r_S + \varphi_{scat S} + \varphi_{othS} \quad (25)$$

Претходно описани утицај фазне промене (чланова) сада има индекс S зато што је у вези са аквизицијом помоћног снимка. Фазна разлика између помоћног и мастер снимка назива се интерферометријска фаза и у овом случају износи:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{int} &= \varphi_S - \varphi_M = \varphi_{rS} - \varphi_{rM} + \varphi_{scat S} - \varphi_{scat M} + \varphi_{othS} - \varphi_{othM} = \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} (r_S - r_M) + (\varphi_{scat S} - \varphi_{scat M}) + (\varphi_{othS} - \varphi_{othM}) \end{aligned} \quad (26)$$

У случају када је висина  $h$  исте мете промењена и мета се налази у тачки  $P_1$ , онда би помоћни сензор из позиције S мерио незнатно различиту дистанцу до мете, означену као  $r_{S1}$ . Фаза одбијеног поља у оквиру помоћног снимка може се приказати као:



$$\varphi_{S1} = \varphi_{rS1} + \varphi_{scat S1} + \varphi_{iothS1} = \frac{4\pi}{\lambda} r_{S1} + \varphi_{scat S1} + \varphi_{othS1} \quad (27)$$

где је индекс  $S_1$  повезан са помоћним снимком када је мета у тачки  $P_1$ . Интерферометријска фаза  $\Delta\varphi_{int1}$  између помоћног и мастер снимка у овом случају износи:

$$\Delta\varphi_{int1} = \varphi_{S1} - \varphi_M = \varphi_{rS1} - \varphi_{rM} + \varphi_{scat S1} - \varphi_{scat M} + \varphi_{othS1} - \varphi_{othM} = \frac{4\pi}{\lambda} (r_{S1} - r_M) + (\varphi_{scat S1} - \varphi_{scat M}) + (\varphi_{othS1} - \varphi_{othM}) \quad (28)$$

Ако се једначина (26) среди додавањем и дељењем са  $r_S$  у заградама у првом члану са десне стране и онда се подели на два дела, може се написати као:

$$\Delta\varphi_{int1} = \frac{4\pi}{\lambda} (r_S - r_M) + \frac{4\pi}{\lambda} (r_{S1} - r_S) + (\varphi_{scat S1} - \varphi_{scat M}) + (\varphi_{othS1} - \varphi_{othM}) \quad (29)$$

где је најважнији члан у једначини (29):

$$\Delta\varphi_{displ} = \frac{4\pi}{\lambda} (r_{S1} - r_S) \quad (30)$$

из које се висина  $P_1$  може инверзно добити из односа  $r_{S1} - r_S$ , дистанцом до мастер радара и базном линијом  $B$ . Утицај осталих чланова треба бити занемарив колико је могуће у циљу тачног рачунања висине. Први члан у једначини (29) не зависи од висине  $h$ , већ од топографије подручја које се опажа и чија вредност се може добити из Дигиталног Елевационог Модела ( $DEM$ ) подручја, али са неком грешком. Ова фазна промена која се заснива на  $DEM$  означена као  $\Delta\varphi_{topoDEM}$  може се добити из  $\Delta\varphi_{int1}$  као:

$$\Delta\varphi_{int1} - \frac{4\pi}{\lambda} (r_S - r_M) \approx \Delta\varphi_{int1} - \Delta\varphi_{itopoDEM1} = \Delta\varphi_{iD-int} \quad (31)$$

Ово је први корак у одређивању неодређености добијене интерферометријске фазе. Код диференцијалне  $SAR$  интерферометрије  $\Delta\varphi_{iD-int}$  познатој под називом  $DInSAR$  фаза.

После овог корака користећи једначине (24), (29) и (31) и узимајући у обзир све претходно изостављене утицаје добија се следеће:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{iD-int} &= \Delta\varphi_{int1} - \Delta\varphi_{itopoDEM1} \\ &= \Delta\varphi_{displ} + (\varphi_{scat S1} - \varphi_{scat M}) + (\varphi_{atmS1} - \varphi_{atmM}) \\ &\quad + (\varphi_{orbS1} - \varphi_{arbM}) + \varphi_{topo RTS} + \varphi_{Noise} + 2k\pi \end{aligned} \quad (32)$$

У овој једначини члан  $\varphi_{topo RTS}$  представља резидуал грешке топографије ( $RTS$ ),  $k$  је цео број док члан  $2k\pi$  јесте фазна неодређеност која је резултат „замотане“ природе члана  $\Delta\varphi_{iD-int}$ . Члан  $\varphi_{Noise}$  представља укупан шум узрокован различитим одбијањима, термалним шумом, грешкама корегистрације, непоузданости тачне позиције фазног центра у правцу азимута као и шума саме конструкције антене.

Да би се занемарио члан  $(\varphi_{scat S1} - \varphi_{scat M})$ , важно је да се користе мете чија својства одбијања варирају веома мало са протоком времена. Такве мете се могу класификовати у два типа. Први тип има перманентне (сталне) скатерере у резолуционој ћелији који се понашају као снажни рефлектујући објекти и њихов рефлектујући одговор је доминантан у односу на остале скатерере кроз време. Перманентни скатерери ( $PS$ )  $InSAR$  као такви превазилазе декорелациони проблем идентификујући резолуционе елементе чији је ехо доминантан од појединачног скатерера у серији интерферограма и они се уобичајено налазе у подручјима са изграђеним вештачким објектима и структурама. Други тип чине Дистрибутивни Скатерери ( $DS$ ) који су равномерно распоређени у резолуционој ћелији чији појединачни рефлектујући сигнал варира са протоком времена, али просечна вредност  $DS$  одговора из целе резолуционе ћелије је константна током времена. Избор  $PS$  користећи корелацију амплитуде и фазе



суседних пиксела и пиксела који су близу је један од најважнијих задатака у оквиру *PS InSAR* методологије.

Да би се смањило утицај члана ( $\varphi_{atms1} - \varphi_{atmM}$ ) неопходно је да се имају подаци о атмосферским условима за време аквизиције помоћног и мастер снимка и да се одреди овај утицај у циљу да се издвоји из  $\Delta\varphi_{ID-int}$ , и због тога захтева да се узима средња вредност из што већег броја снимака.

Кључни корак је решавање фазе како за случај да је  $k > 0$ , фазни члан  $2k\pi$  има највећи утицај на тачност одређене висине.

Све процедуре за контролисање и занемаривање нежељених утицаја морају се извести над серијом снимака, док су одређене процедуре зависне једна у односу на другу и морају се урадити по одређеном редоследу, просторно-временском домену и са контролом између корака.

*PSInSAR* приступ за добијање временских серија померања површи терена је релативно нов и заснива се на анализи пиксела који остају непромењени (кохерентни) за цео временски период мониторинга на интерферограмима. Састоји се у проналажењу сталних објеката на површини терена који имају повратни сигнал до сателита тј. сензора стабилан и сталан током времена трајања мониторинга. Циљани објекти који се називају скатерери, или у случају овог истраживања Перманентни Скатерери (*PS*), могу бити величине пиксела или што је уобичајенији случај, могу бити мањи од пиксела и, морају бити саставни део сваког *SAR* снимка. Узимајући претходно наведено јасно је да *PSInSAR* техника са оваквим приступом најпогоднија за употребу у урбанизованим подручјима.

### 3.2.1 Једначина Кохерентности таласа

Кохеренција таласа представља основни услов за њихову интерференцију. Кохерентност се може такође дефинисати и као фазна разлика између два таласа која остаје константна у времену, што значи да су им фреквенције исте, док се амплитуде и фазе могу разликовати. Математички се ова вредност може изразити (као предвидљивост) као степен сличности два таласа.

Кохеренција између два таласа  $E_1$  и  $E_2$  означава се грчким словом  $\gamma$ ,

$$\gamma = \frac{\sum_N E_1 E_2^*}{\sqrt{\sum_N |E_1|^2 \sum_N |E_2|^2}} \quad (33)$$

Где  $\Sigma$  означава суму од  $N$  елемената (број узорака над којима се процењује кохеренција), док симбол  $*$  означава комплексно сједињавање, (*Woodhouse, 2006*). Кохеренција таласа узима вредности између 0 и 1, где је 1 ако и само ако  $E_1 = E_2$  и у овом случају важи да су таласи потпуно кохерентни, док се за вредност 0 каже да су таласи некохерентни.

## 3.3 Пре-процесирање

Прва фаза процесирања подразумева преузимање снимака преко портала за преузимање отворених података који контролоше *ESA (scihub.copernicus.eu)* користећи *ASF* претраживач података (*search.asf.alaska.edu*), као и њихово филтрирање у односу на атмосферске услове посебно узимајући у обзир снежни покривач и падавине за време аквизиције снимака. Преузети су сви снимци који су се налазили у репозиторијуму података и који се односе на период од почетка октобра 2016. до краја децембра 2020. Подаци о временским утицајима преузети су са *OGIMET* отворене базе података (*ogimet.com*) за метеоролошку станицу Велико Градиште под идентификационим бројем 13285, која је уједно и најближа метеоролошка станица у односу на ПОИ. После ове фазе преостала су 402 снимка, 215 снимака који припадају узлазној сателитској путањи и 187 снимака који припадају силазној сателитској путањи. У

табели 2. приказан је број одбачених снимака по годинама због неодговарајућих временских услова, укупно 104 снимка су одбачена, док је 7 снимака додатно одбачено у току процесирања јер су били оштећени.

Табела 2. Број снимака који нису ушли у процесирање услед неадекватних временских услова за време аквизиције, приказаних по годинама.

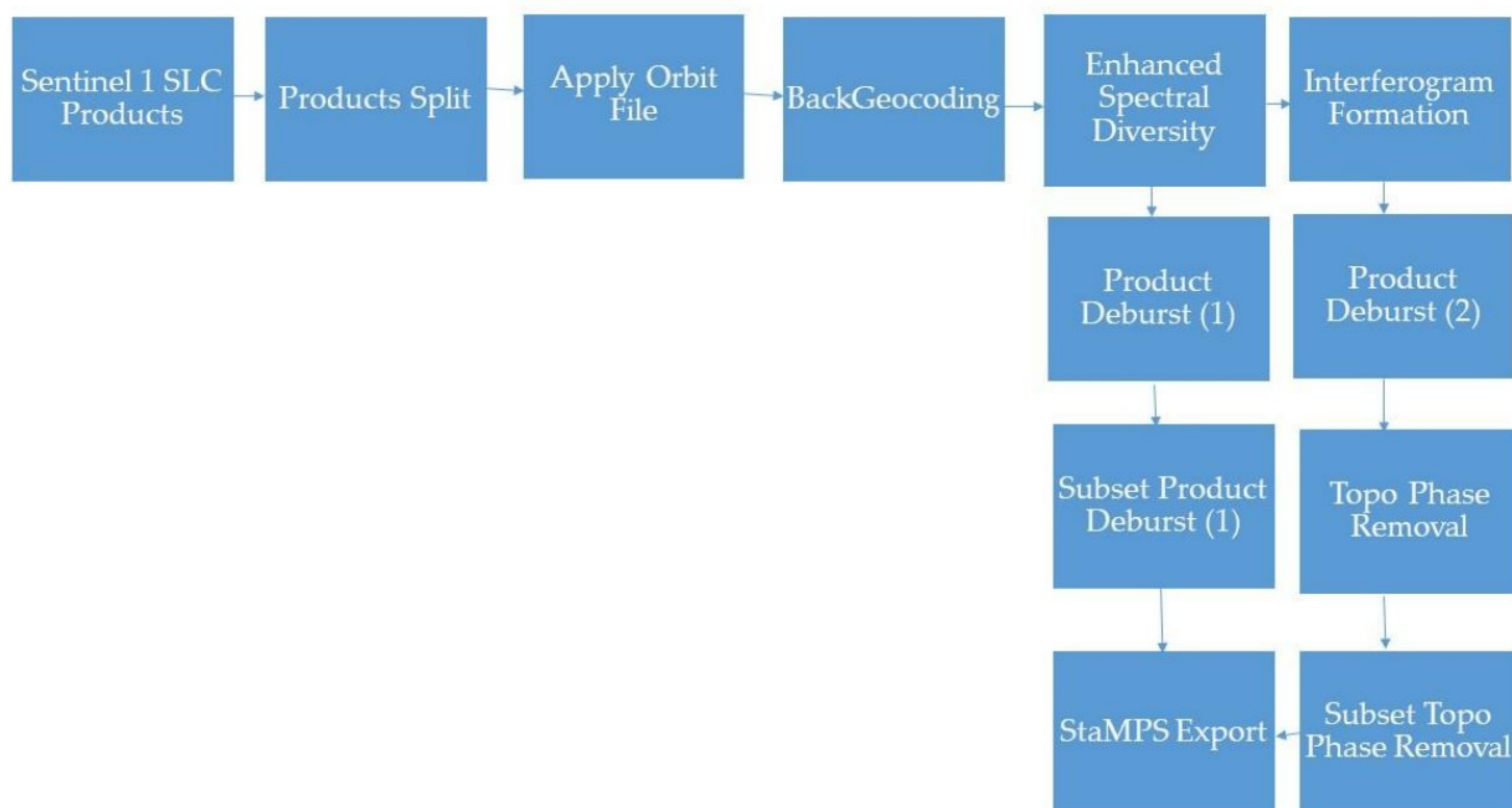
| Сателит | Орбита | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | Време аквизиције | Метео. станица |
|---------|--------|------|------|------|------|------|------------------|----------------|
| S-1A    | Узл.   | 2    | 7    | 7    | 6    | 4    | 16:00            | 13285          |
| S-1A    | Сил.   | 1    | 8    | 11   | 10   | 4    | 16:00            | 13285          |
| S-1B    | Узл.   | 1    | 2    | 5    | 3    | 4    | 04:00            | 13285          |
| S-1B    | Сил.   | 0    | 8    | 7    | 6    | 8    | 04:00            | 13285          |

### 3.4 Процесирање

Кључни део процесирања подразумева два одвојена алгоритма за процесирање; први алгоритам за процесирање назива се СеНтинел Апликациона Платформа (*SNAP*) док се други алгоритам за процесирање назива Стенфордска Метод за Перманентне Скатерере (*StaMPS*). Алгоритам за процесирање *SNAP* је у потпуности отвореног кода и одвија се у *SNAP* софтверу који је слободан за преузимање, по којем је и добио име. Други део процесирање одвија се у *StaMPS* софтверском пакету који се заснива на скрипт фајловима за процесирање који су отвореног кода али где се подаци већим делом процесирају у *MATLAB* софтверу који је комерцијалан.

#### 3.4.1 *SNAP* процесирање

СеНтинел Апликациона Платформа (*SNAP*) алгоритам за процесирање приказан је на слици 43 и обезбеђује структуру и улазне податке за *StaMPS mt\_prep\_snap* скрипт фајл који је неопходан за даље процесирање кроз *StaMPS* пакет.

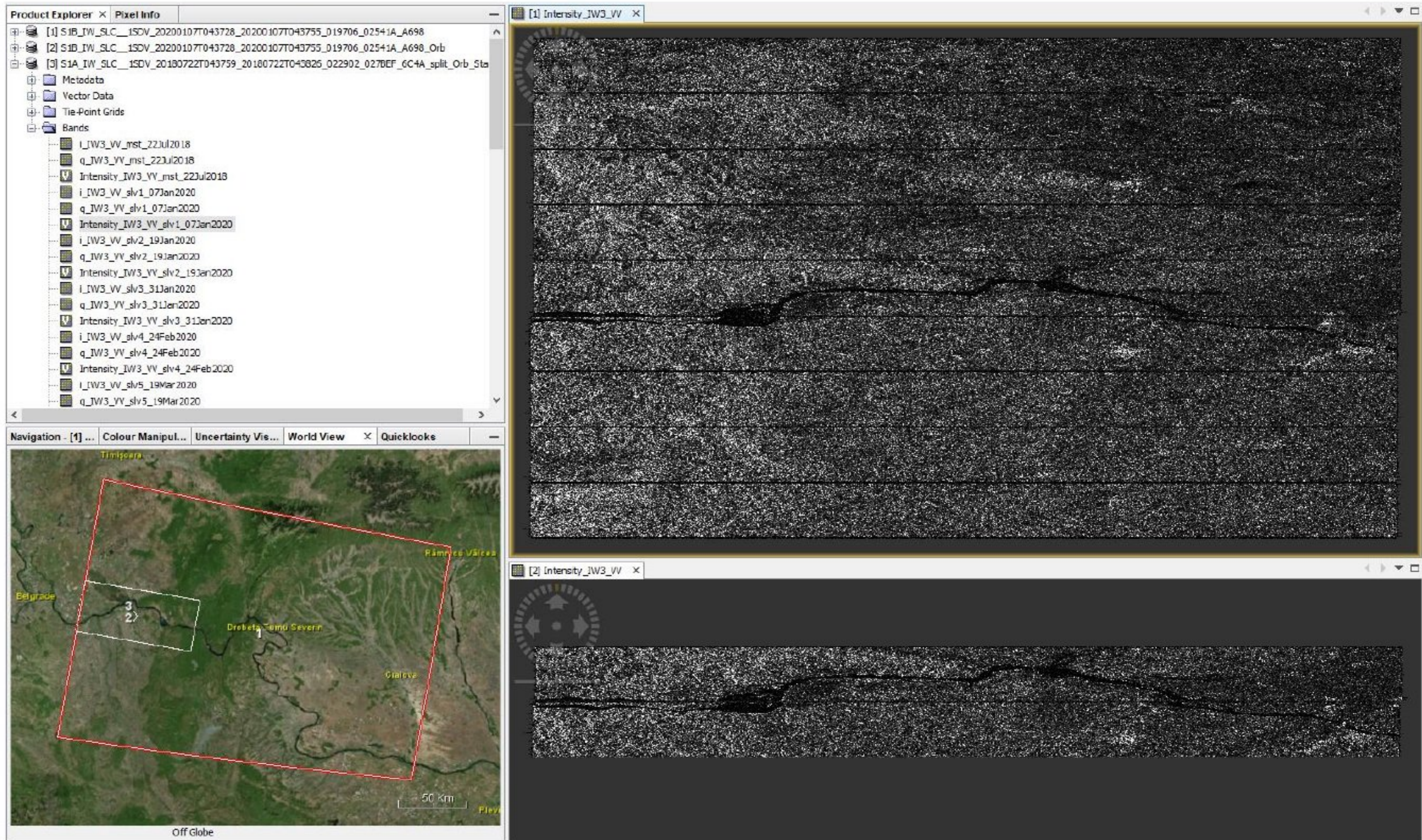


Слика 43. *SNAP* алгоритам за припрему одговарајуће структуре и формата података за даље процесирање у оквиру *StaMPS* апликације, (Гојковић и др., 2023).

После преузимања и филтрирања снимака у зависности од временских услова, описаних у претходном делу, прво је потребно извршити смањивање величине Сентинел-1 *SLC* снимака, где је потребно изабрати одговарајуће делове снимака и одговарајуће врсте снимака у



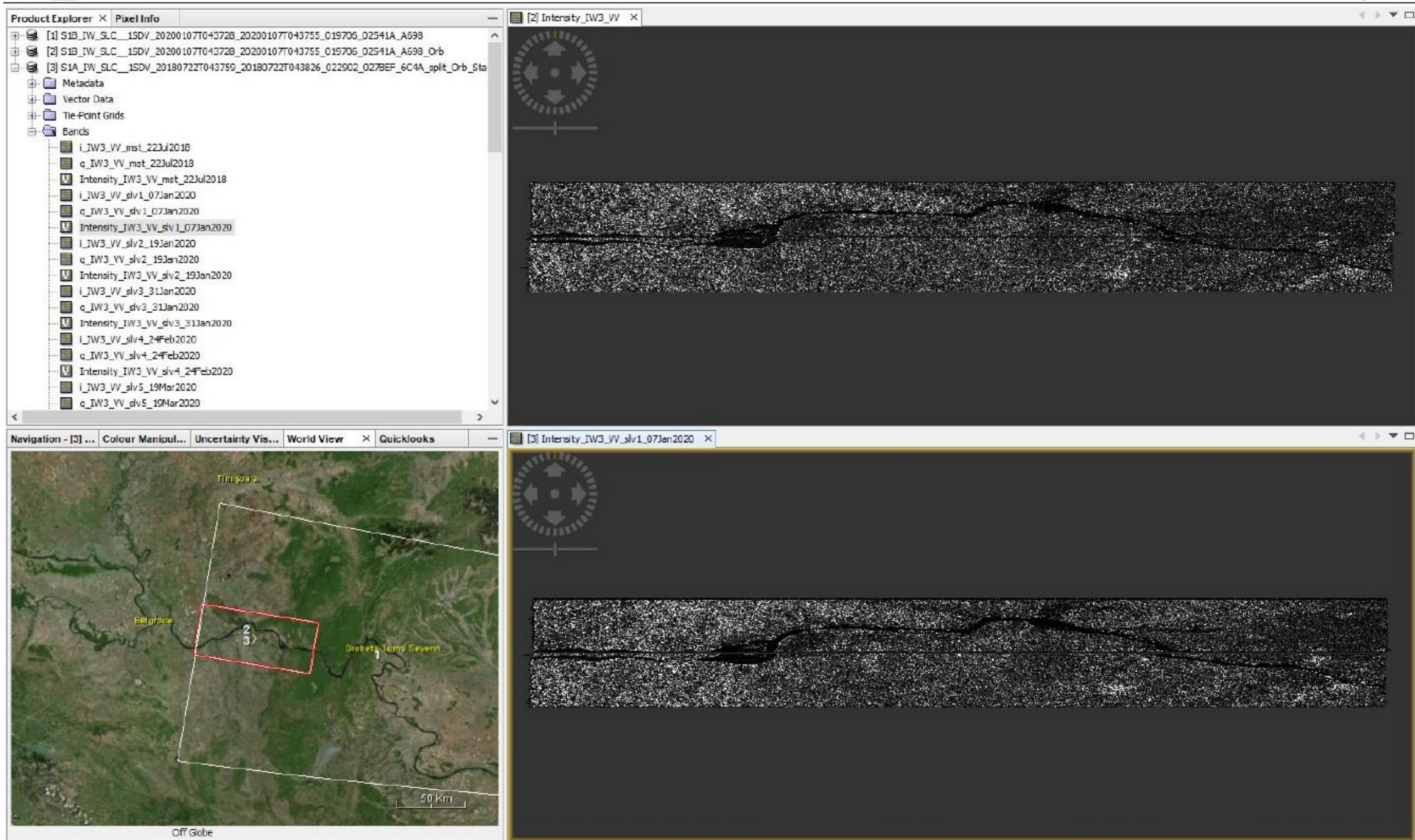
зависности где се налази ПОИ, у циљу да се не процесира непотребан део снимака чиме се скраћује време обраде и значајно смањују хардверски захтеви, пре свега за неопходном меморијом. У оквиру овог корака могуће је и додатно преполовити величину снимака тако што ће се изабрати одговарајућа поларизација. Циљ првог корака је редукција величине снимака и као производ добијају се нови мањи, по величини, снимци за ПОИ (слика 44).



Слика 44. Корак редукције величине снимака.

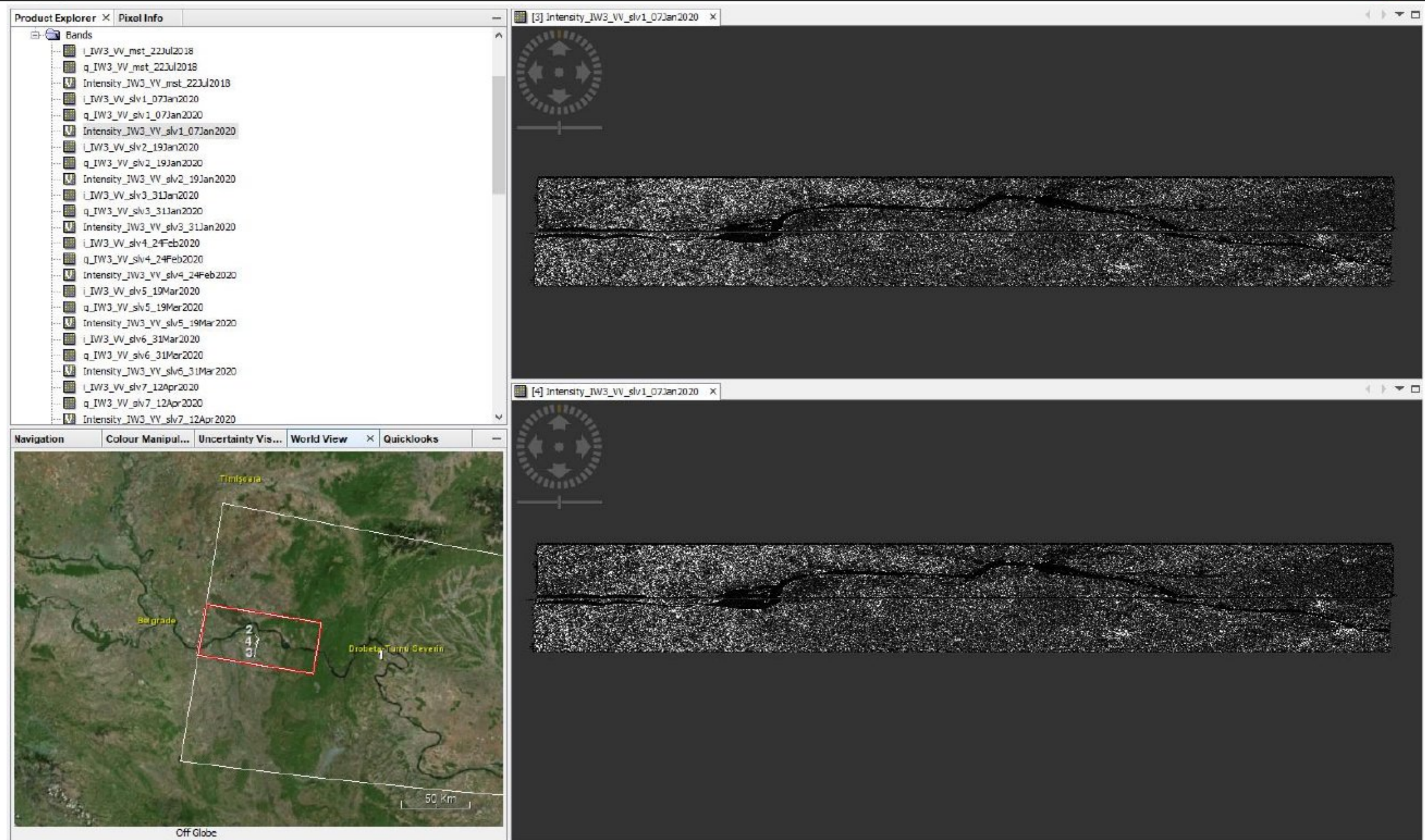
После смањивања величине снимака, за све снимке треба преузети и учитати прецизне фајлове за орбите сателита што се ради за сваки снимак посебно, и може се урадити паралелно са првим кораком редукције снимака. Овај корак обезбедиће прецизне координате позиција и брзине сателита, тако да ће на крају вектори орбита бити ажурирани у оквиру метаподатака.

Следећи корак подразумева примену геокодирања уназад које ће извршити корегистрацију свих снимака и формирати групу снимака са паровима који сачињавају мастер и помоћни снимак, од којих је исти мастер снимак за сваки пар мастер и помоћни снимак. Квалитетна корегистрација SAR снимака је од веома великог значаја за генерисање интерферограма. Овде треба обратити пажњу да строги захтеви за корегистрацију у правцу азимута код *TOPS* аквизиције снимака могу довести до декорелације. Да би се превазишао овај проблем када се користи група снимака предлаже се да се сви интерферограми међусобно споје. Овакав приступ даје боље резултате за разлику од класичног приступа са једним мастер снимком (слика 45).



Слика 45. Корак геокодирања уназад.

Ефикаснији Спектрални Диверзитет (*ESD*) се наставља на претходни корак и обезбеђује корегистроване мастер-помоћни снимак парове са корекцијама у правцу азимута и у правцу мете који се примењују на помоћне снимке како је приказано код (*Yague-Martínez и др., 2016; Fattahi и др., 2017*). Постизање неопходне азимутне корегистрације у највећем броју случајева се врши поменутом техником. *ESD* техника користи предности спектралних разлика у подацима унутар делова снимка који су преклопљени тј. преклоп између суседних врста. Код приступа са једним мастером *ESD* се користи преклоп између сваког снимка и изабраног мастер снимка. Треба напоменути да са повећањем временских линија може доћи до смањења тачности процене *ESD* због узимања у обзир кохерентности (слика 46).



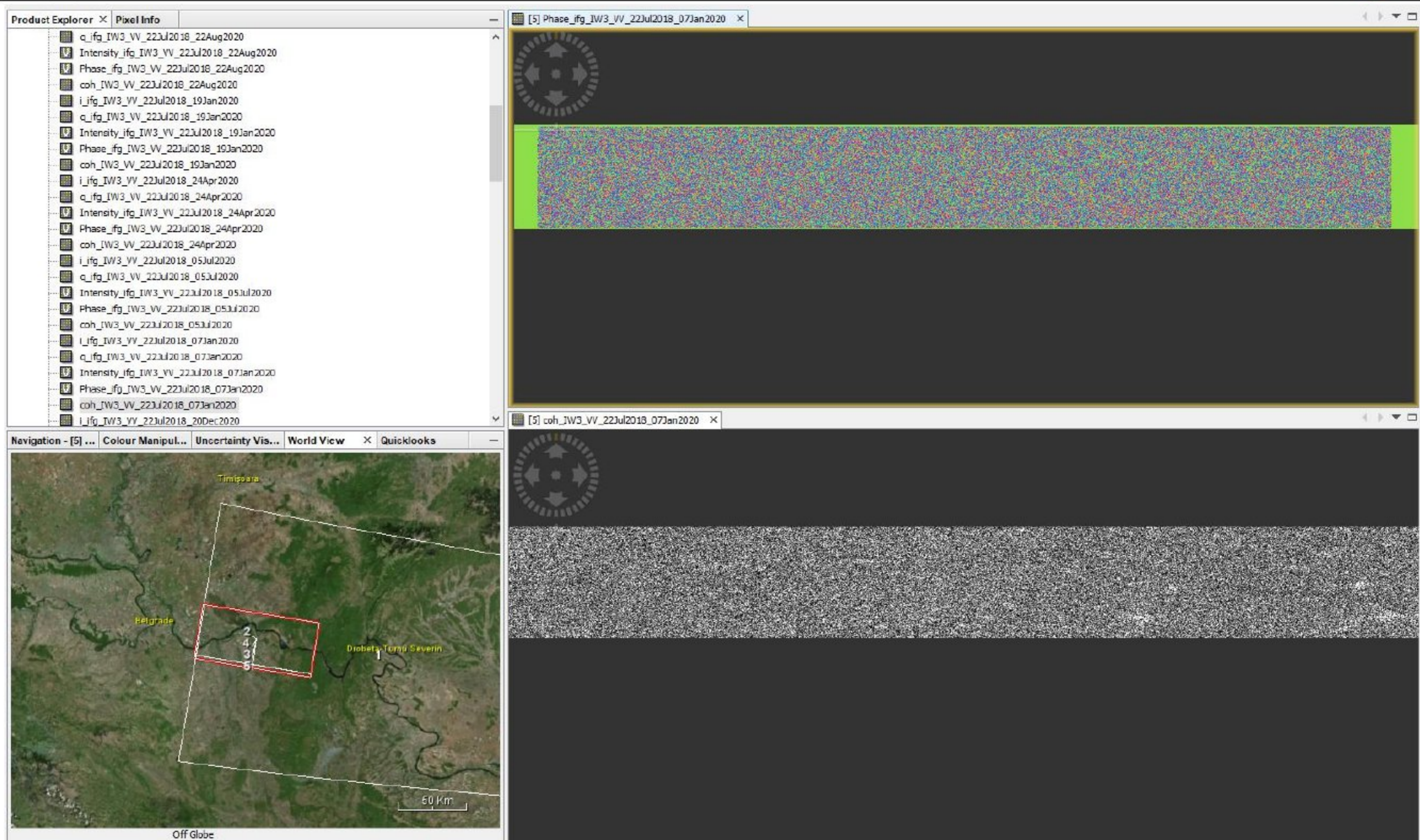
Слика 46. Корак за ефикаснији спектрални диверзитет.

Корак *ESD* се даље дели на две гране.

Прва грана почиње са *PD* (*Product Deburst*) оператором који је задужен да споји суседне врсте и/или суседне делове снимка. Сваки Интерферометријски широки снимак (*IW*) *SLC* састоји се из три дела (подснимка), и сваки подснимак се састоји из низа врста, где је свака врста процесирана као независни *SLC* снимак. Врсте имају преклоп од 50 до 100 узорака, тако да се после спајања добија један јединствен снимак. После спајања врста у наредном кораку се могу додатно смањити снимци, према површини коју заузимају, на ПОИ што ће додатно редуковати величину снимка.

Друга грана почиње са оператором Формирања Интерферограма (*IF*) где се формирају комплексни интерферограми, после кога корисници треба да поново примене корак за састављање делова и/или врста снимка. Након тога, уклања се топографија из фазе, *TPR* оператор који рачуна и уклања утицај топографије на вредност фазе у интерферограмима. Ова грана се такође може завршити тако што се исече само ПОИ, што смањује величину снимка (слика 47).





Слика 47. Корак за формирање интерферограма.

Финални корак подразумева учитавање резултата и прве и друге гране у *StaMPS* експорт оператор који ће направити одговарајући формат и структуру података да би исти били читљиви у *StaMPS* апликацији за процесирање интерферограма.

### 3.4.2 *StaMPS* процесирање

*StaMPS* је софтверски пакет ([homepages.see.leeds.ac.uk](http://homepages.see.leeds.ac.uk)) за генерисање величине деформација *PS* кроз временске серије користећи корегистроване *SLC* збирке снимака мастер-помоћних интерферограм парова добијених кроз *SNAP* алгоритам процесирања према (Hooper и др., 2012), или кроз неке друге софтвере и решења. Процесирање у *StaMPS* апликацији полази од процесирања *mt\_prep\_snap* скрипт фајла који врши иницијализацију кандидата за *PS* и записује њихове информације, и који се најчешће процесира из командне линије. После експортовања фајлова из *SNAP* софтвера и процесирања *mt\_prep\_snap* скрипт фајла, постоји осам корака који се извршавају један за другим да би се генерисале временске серије деформација на одговарајућим *PS*. Свих осам корака процесира се у *MATLAB* софтверу ([mathworks.com](http://mathworks.com)), и овај део представља једини део процесирања који није у софтверима отвореног кода, већ у комерцијалном софтверу.

Први корак процесирања је (*stamps* (1,1)) који учитава кандидате за *PS* из *mt\_prep\_snap* скрипт фајла, са дисперзијом амплитуде као граничном вредности од 0.4.

Корак (*stamps* (2,2)) подразумева рачунање фазног шума за сваки пиксел интерферограма који је кандидат за *PS*, рачуна просторно корелисану фазу за сваког кандидата за *PS* и отклања је из резултата, затим рачуна просторно некорелисану грешку због Дигиталног Елевационог Модела (*DEM*) за сваки *PS* кандидат, затим отклања је из резултата и рачуна временску кохеренцију за сваки *PS* кандидат. Према подешавањима овај процес се итеративно понавља три пута, што се може прилагодити и на друге начине.

Корак (*stamps* (3,3)) подразумева финално усвајање *PS*, базирано на вероватноћи поређењем резултата са произвољном фазом, и према *StaMPS* подешавањима понавља се два пута, после првог пута темпорална кохеренција за сваки *PS* срачуната је поново прецизније, а затим се процес селекције *PS* понавља.



Корак (stamps (4,4)) филтрира *PS*, тј. елиминише пикселе са превише шума, где се елиминација заснива на близини суседних *PS* и кривој деформације са протоком времена.

Корак (stamps (5,5)) подразумева фазну корекцију за грешку *DEM* модела просторно декорелисаног и сачуване *PS* као нову верзију. *StaMPS* (4,5) кораке потребно је поновити неколико пута како би се добио максималан број *PS* а шум умањио на што мању вредност, што се може постићи променом параметара процесирања за ова два корака.

Корак (stamps (6,6)) корак подразумева решавање фазе, (*Chen u Zebker, 2000; Chen u Zebker, 2001; Chen u Zebker, 2002*) као и алгоритам са решавање фазе који се може пронаћи на адреси ([web.stanford.edu](http://web.stanford.edu)).

Корак (stamps (7,7)) рачуна грешку просторно корелисаног угла мете (*SCLA*), тј., укупну грешку *DEM* модела, атмосферски утицај на мастер снимак и грешке орбита.

Последњи корак је (stamps (8,8)), који захтева коришћење додатних фајлова за процесирање тзв, Алат за Редукцију Атмосферског *InSAR* шума (*TRAIN*), где је примењено линеарно атмосферско филтрирање, према (*Bekaert, Walters u др., 2015; Bekaert, Hooper u др., 2015; Fattahi u Amelung, 2014*), који се може преузети са адреса ([davidbekaert.com](http://davidbekaert.com), [github.com/dbekaert/TRAIN](https://github.com/dbekaert/TRAIN)), да би се редуковала топографски корелисана атмосферска фаза. Срачунати атмосферски шум затим је елиминисан из резултата временских серија деформација *PS*.

За Дигитални Елевациони Модел (*DEM*) коришћен је *SRTM* из радарске топографске мисије који има резолуцију од 3 лучне секунде ([www2.jpl.nasa.gov/srtm/](http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/)).

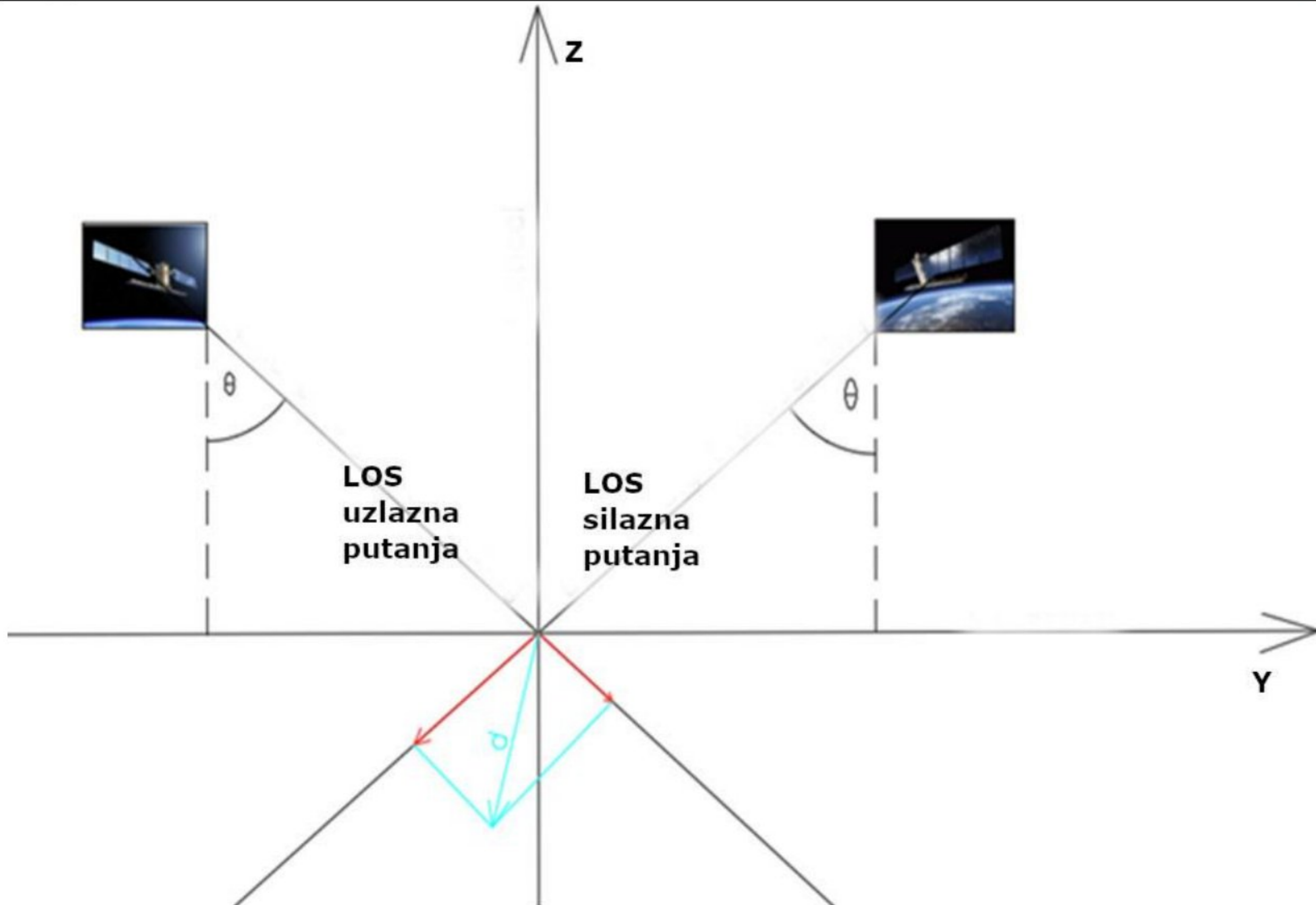
Селектована је стабилна референтна тачка у средини ПОИ (означена на одговарајућим сликама као црни троугао), која показује деформацију од 0 милиметара по години у вертикалном правцу. Комплетно суседно подручје око референтне тачке показује стабилне карактеристике фазе кроз временске серије.

### 3.5 Пост-процесирање

Користећи описане алгоритме кроз *SNAP* и *StaMPS* процесирање могуће је генерисати два сета узлазних и силазних линија погледа (*LOS*) померања кроз временске серије са сателита Сентинел-1 А и Сентинел-1 Б. Ова два сета због својих геометријских својстава могуће је трансформисати из *LOS* геометрије у геометрију где се померања дефинишу у хоризонталном односно вертикалном правцу (слика 48). Као производ се добијају померања у *LOS* геометрији која се могу груписати на узлазна и силазна *LOS* померања, и користећи једначину (34) *LOS* померања је могуће трансформисати у правцу хоризонталних и вертикалних померања на основу следеће једначине:

$$\begin{bmatrix} d_v \\ d_{h_{ALD}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{asc} & \frac{\sin\theta_{asc}}{\cos\Delta\alpha} \\ \cos\theta_{desc} & \sin\theta_{desc} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} d_{LOS_{asc}} \\ d_{LOS_{desc}} \end{bmatrix} \quad (34)$$

где је  $d_v$  вертикално померање,  $d_{h_{ALD}}$  представља пројекцију хоризонталног померања у силазном азимут правцу сателита (*ALD*),  $\theta$  је инцидентни угао,  $\Delta\alpha$  разлика у напредовању између узлазне и силазне орбите и  $d_{LOS}$  представља померање у *LOS* правцу. У овом раду фокус је био само на вертикална померања. Трансформација резултата из *LOS* геометрије у хоризонтални/ вертикални правац урађена је према радовима (*Delgado Blasco u др., 2019; Mora u др., 2016; Samieie-Esfahany u др., 2009; Fomelis, 2018*).



Слика 48. Вектор померања ( $d$ ) са одговарајућом узлазном и силазном орбитом.

Финална анализа на крају је урађена у КВАНТУМ ГеоИнформационом Софтверу (*QGIS*) ([qgis.org](http://qgis.org)) у циљу визуализације и генерисања мапа које као подлогу користе сателитске оптичке снимке. Са оваквим приступом омогућено је визуелно јасно приказивање вертикалних померања у различитим ПОИ.

### 3.5.1 Трансформација из $N, E, V$ (север, исток, вертикална оса) у $LOS - ALD$ геометрију сателитског система

$LOS - ALD$  систем представља систем који је везан за раван и правац путање сателита када пролази изнад неке тачке.  $LOS$  се може посматрати као дуж која спаја сателит и тачку при мерењу приликом чега се мери промена дужине, тако да се мери  $d_{LOS}$  при сваком проласку сателита изнад тачке, било при проласку у силазној или узлазној путањи.  $ALD$  правац је правац који је нормалан на правац путање сателита када се пројектује у  $NE$  раван.

$N, E, V$  (север, исток, вертикална оса) је  $3D$  координатни систем орјентисан у правцу север-исток и који има вертикалну осу за приказ висина или висинских разлика.

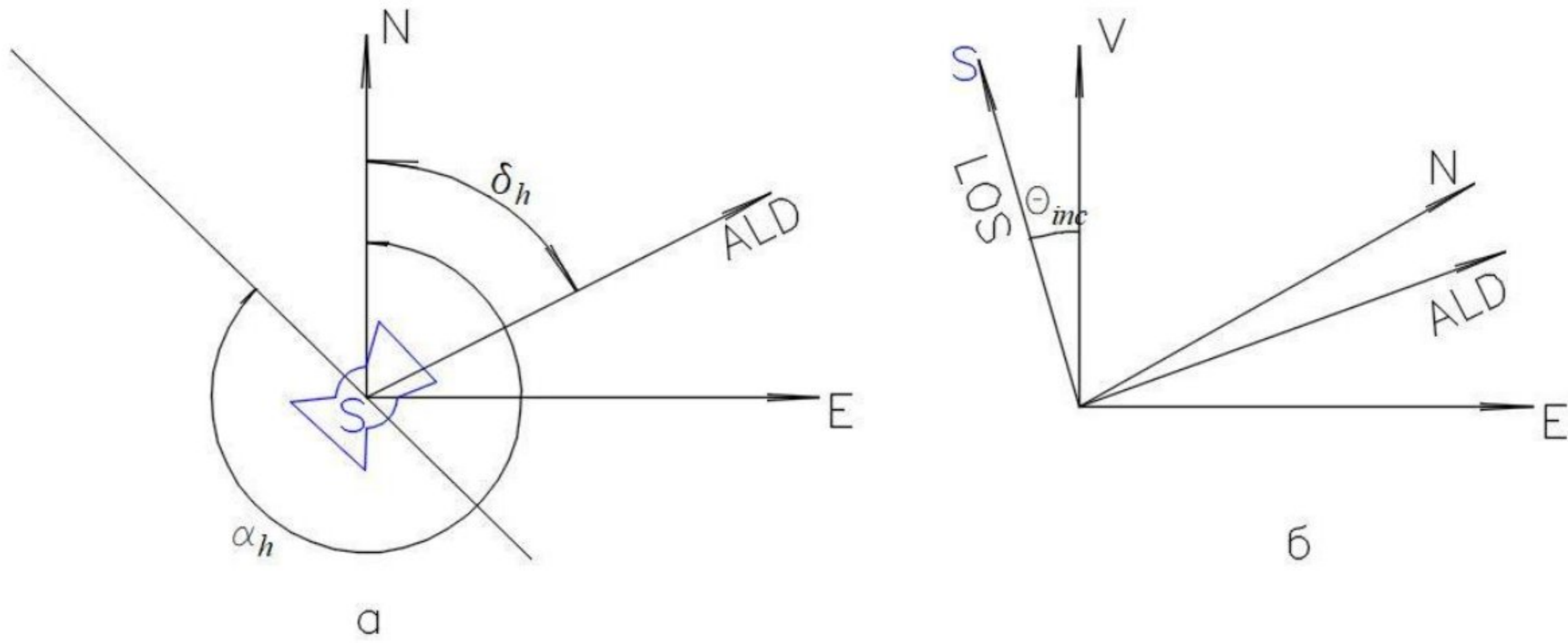
Путања сателита је дефинисана углом  $\theta_{inc}$  који  $LOS$  правац заклапа са вертикалном осом и преко угла  $\alpha_h$  у  $NE$  равни, тј. угла који правац путање сателита који је пројектован у  $NE$  раван заклапа са  $N$  осом.  $ALD$  оса заклапа угао  $\delta_h$  са  $N$  осом.

На слици 49. дат је случај када је сателит у узлазној путањи. За случај као на слици 49 ако је померај неке тачке на земљи  $\vec{d}$  он се може у  $N, E, V$  координатном систему разложити на:

$$\vec{d} = \vec{d}_v + \vec{d}_n + \vec{d}_e \quad (35)$$

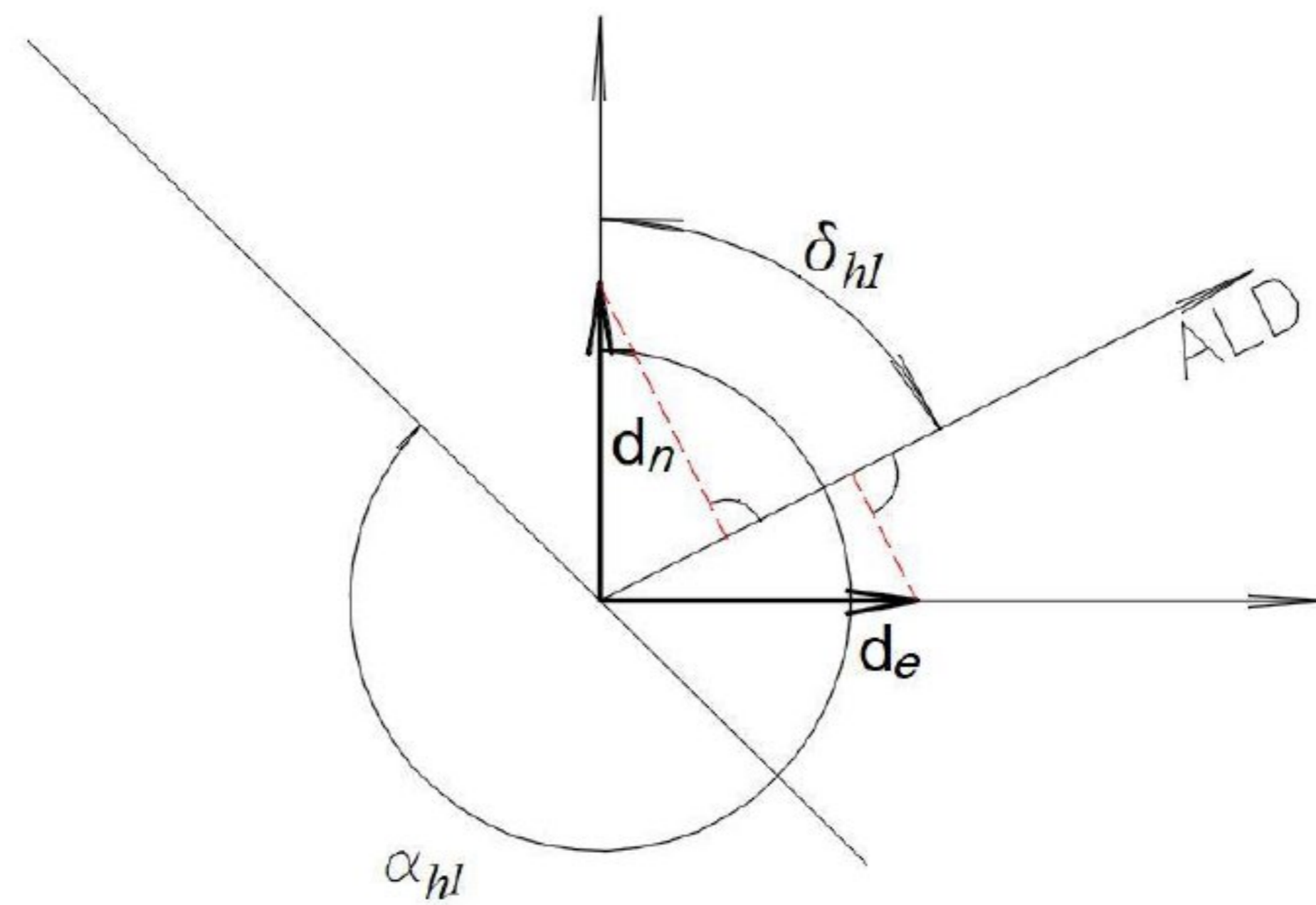
И нека су њихови модули:

$$|\vec{d}_v| = d_v; |\vec{d}_n| = d_n; |\vec{d}_e| = d_e \quad (36)$$



Слика 49. Геометрија сателита  $LOS$  у односу на правоуглу геометрију  $N, E, V$ . ( $s$  – сателит) – узлазна путања сателита.

$d_{ALD}$  чине пројекције  $d_n$  и  $d_e$  на  $ALD$  правац (слика 50):



Слика 50. Пројекције  $d_n$  и  $d_e$  на  $ALD$  правац

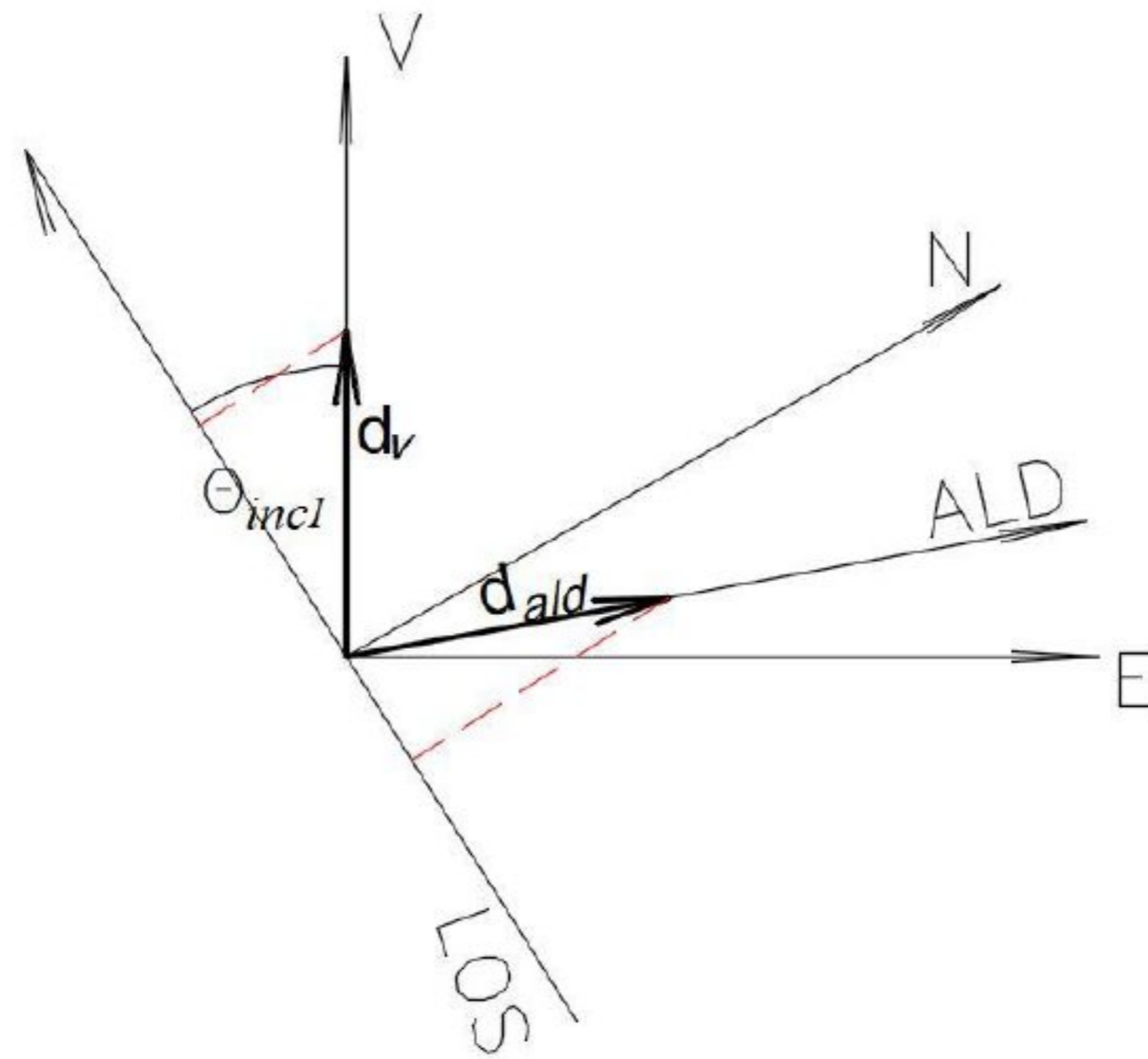
$$d_{ald1} = d_n \cos \delta_{h1} + d_e \sin \delta_{h1} \quad (37)$$

где је  $\delta_{h1} = \alpha_{h1} - \frac{3\pi}{2}$ ,

$$d_{ald1} = d_n \cos \left( \alpha_{h1} - \frac{3\pi}{2} \right) + d_e \sin \left( \alpha_{h1} - \frac{3\pi}{2} \right) \quad (38)$$

$$d_{ald1} = -d_n \sin(\alpha_{h1}) + d_e \cos(\alpha_{h1}) \quad (39)$$

Помераји  $d_n$  и  $d_e$  се преко  $d_{ALD}$  пројектују на  $LOS$  правац. У овом случају је (слика 51):



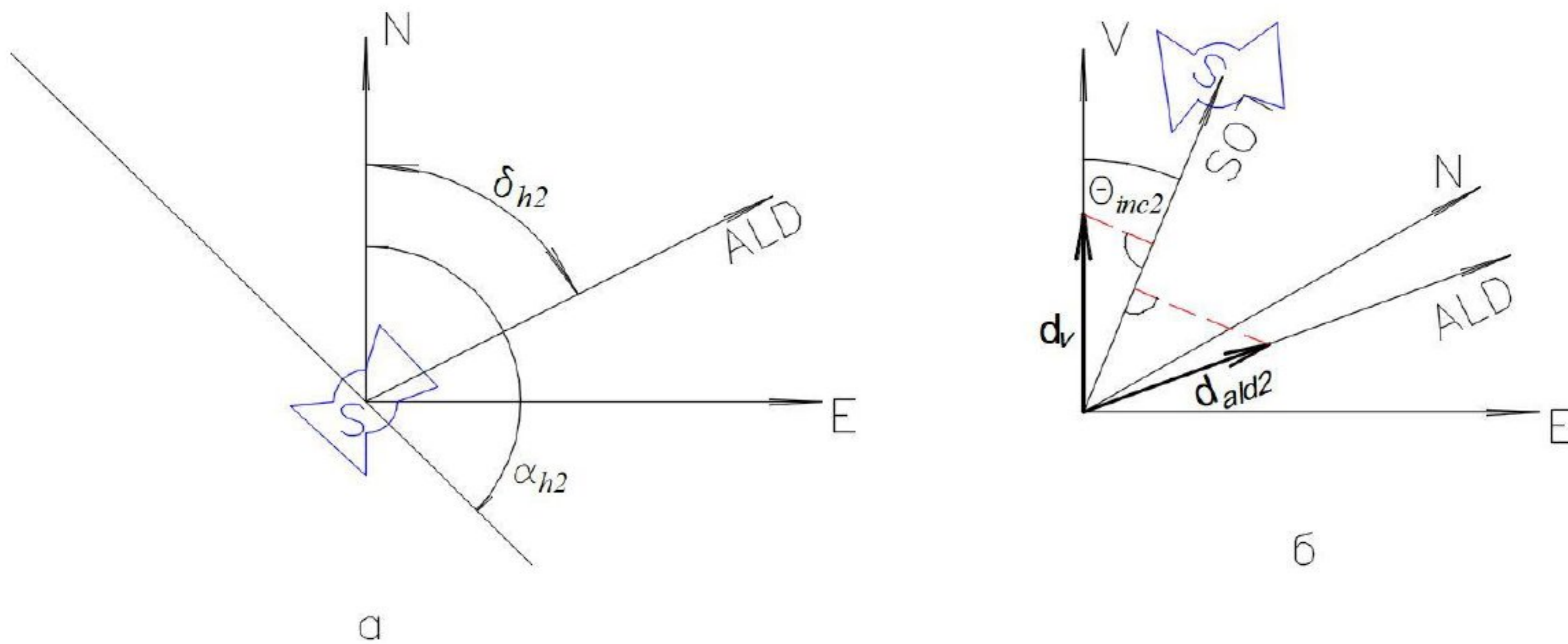
Слика 51. Пројекције  $d_n$  и  $d_e$  преко  $ALD$  на  $LOS$  правац.

$$d_{LOS1} = d_v \cos \theta_{inc1} - d_{ald1} \sin \theta_{inc1} \quad (40)$$

где заменом са једначином 39, следи:

$$d_{LOS1} = d_v \cos \theta_{inc1} - \sin \theta_{inc1} (-d_n \sin(\alpha_{h1}) + d_e \cos(\alpha_{h1})) \quad (41)$$

За случај када је сателит у силазној путањи важи следеће (слика 52):



Слика 52. Геометрија сателита  $LOS$  у односу на правоуглу геометрију  $N, E, V$ . ( $s$  – сателит) – силазна путања сателита.

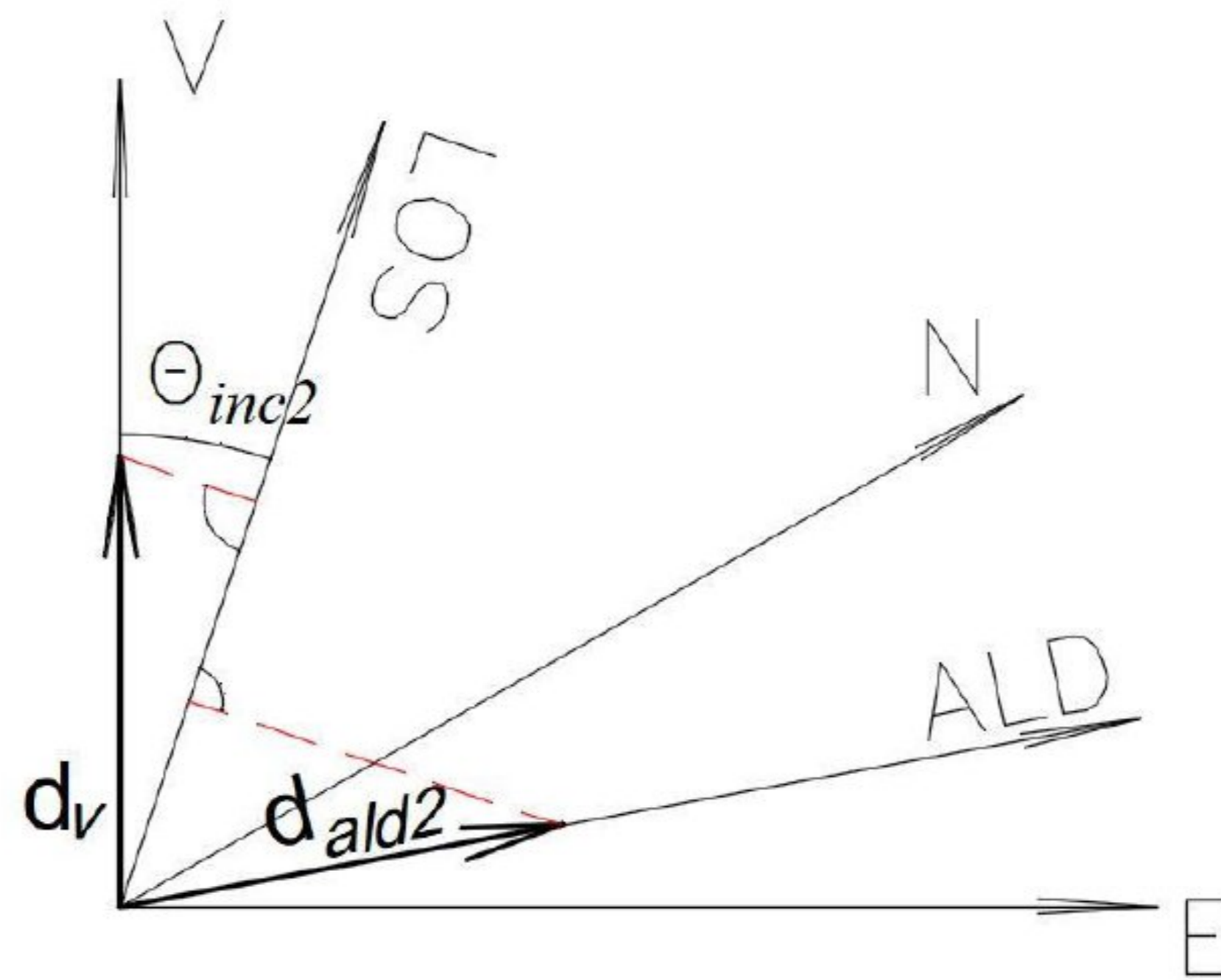
$$d_{ald2} = d_n \cos \delta_{h2} + d_e \sin \delta_{h2} \quad (42)$$

где је  $\delta_{h2} = \alpha_{h2} - \frac{\pi}{2}$ ,

$$d_{ald2} = d_n \cos \left( \alpha_{h2} - \frac{\pi}{2} \right) + d_e \sin \left( \alpha_{h2} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (43)$$

$$d_{ald2} = d_n \sin(\alpha_{h2}) - d_e \cos(\alpha_{h2}) \quad (44)$$

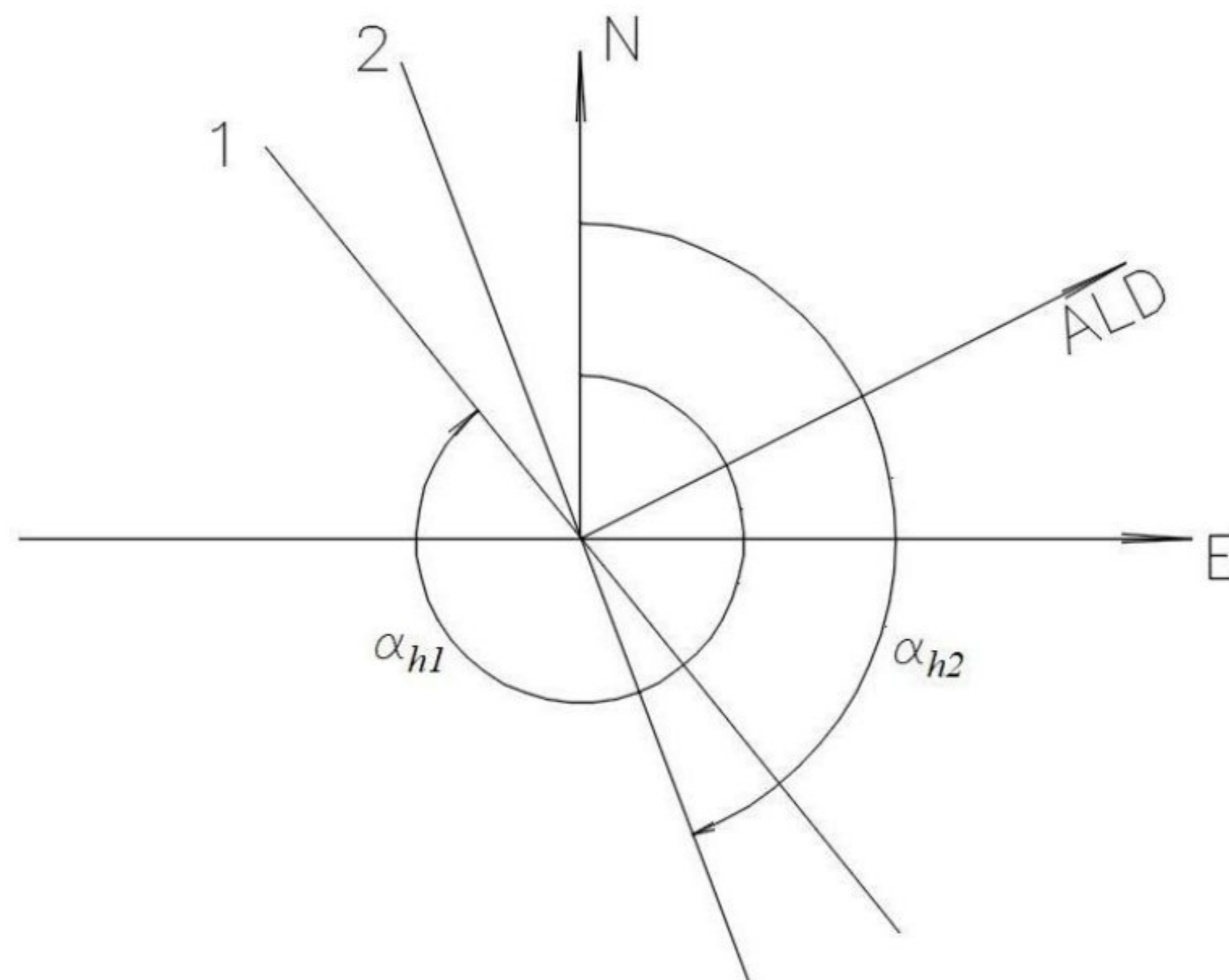
Пројекција на  $LOS$  правац је (слика 53):



Слика 53. Пројекције  $d_n$  и  $d_e$  преко  $ALD$  на  $LOS$  правац, (силазна путања сателита).

$$d_{LOS2} = d_v \cos \theta_{inc2} + d_{ald2} \sin \theta_{inc2} \quad (45)$$

$$d_{LOS2} = d_v \cos \theta_{inc2} + \sin \theta_{inc2} (d_n \sin(\alpha_{h2}) - d_e \cos(\alpha_{h2})) \quad (46)$$



Слика 54. Разлике у путањама сателита.

Ако се уведу разлике у путањама 1 и 2, важи следеће:

$$\Delta\alpha = \alpha_{h2} - \alpha_{h1}, \text{ што значи да је } \alpha_{h2} = \alpha_{h1} + \Delta\alpha \quad (47)$$

$$d_{ald2} = d_n \sin(\alpha_{h2}) - d_e \cos(\alpha_{h2}) \quad (48)$$



Заменом једначине 47 у једначину 48 следи:

$$d_{ald2} = d_n \sin(\alpha_{h1} + \Delta\alpha) - d_e \cos(\alpha_{h1} + \Delta\alpha) \quad (49)$$

Где се, након сређивања једначине 49, и занемаривањем члана  $\sin(\Delta\alpha)$ , јер је занемарљиво мала вредност, добија:

$$d_{ald2} = -d_{ald1} * \cos(\Delta\alpha) \quad (50)$$

Коришћењем ове апроксимације добија се систем једначина:

$$\begin{aligned} d_{LOS1} &= d_v \cos \theta_{inc1} - d_{ald1} \sin \theta_{inc1} \\ d_{LOS2} &= d_v \cos \theta_{inc2} + d_{ald2} \sin \theta_{inc2} \end{aligned} \quad (51)$$

Како је на основу једначине 50:

$$d_{ald1} \approx -\frac{d_{ald2}}{\cos(\Delta\alpha)} = -\frac{d_{ald2}}{\cos(\Delta\alpha)} \quad (52)$$

Систем једначина 51 онда постаје:

$$\begin{aligned} d_{LOS1} &= d_v \cos \theta_{inc1} + \frac{d_{ald2}}{\cos(\Delta\alpha)} \sin \theta_{inc1} \\ d_{LOS2} &= d_v \cos \theta_{inc2} + d_{ald2} \sin \theta_{inc2} \end{aligned} \quad (53)$$

Што се може записати у матричном облику:

$$\begin{bmatrix} d_{LOS1} \\ d_{LOS2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{inc1} & \frac{\sin\theta_{inc2}}{\cos\Delta\alpha} \\ \cos\theta_{inc2} & \sin\theta_{inc2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_v \\ d_{ald2} \end{bmatrix} \quad (54)$$

Где се после усклађивања нотације и пребацивања познатих и непознатих вредности добија једначина 34, која је основна једначина за трансформацију резултата у регуларну геометрију.

### 3.6 Метод најмањих квадрата и Пелцеров метод

Класични приступ за деформациону анализу подразумева прикупљена теренска опажања методом класичног терестричког мерења висинских разлика (*Врачарић и Алексић, 2007*), познатије као метода нивелања. Теренска опажања касније су процесирана кроз алгоритме који се заснивају на Методи Најмањих Квадрата (*MNK*), (*Перовић и др., 2005*) за изравнање мреже, док је за деформациону анализу коришћен Пелцеров метод, (*Pelzer, 1971*) који се базира на временским серијама.

#### 3.6.1 Метод Најмањих Квадрата

У практичним применама код изравнања геодетских мрежа најзаступљенија метода изравнања јесте по методи посредних мерења, где треба дефинисати функционални и стохастички модел, примену *MNK*, ковариационе матрице изравнатих величина и алгоритам изравнања, (*Михаиловић и Алексић, 2008*).

Код изравнања нивелманских мерења можемо разликовати три врсте величина: дате величине (висине датих репера), непознате параметре (висине непознатих репера) и мерене величине (висинске разлике између репера одређене нивелманским мерењима на терену). Изравнање нивелманских мерења заснива се на *MNK* која даје најбоље резултате и тачност.

Мерене величине можемо означити вектором  $L = [l_1, l_2, \dots, l_n]$ , одговарајућу коваријациону матрицу обележавамо са  $K_l$ , да бисмо стохастички модел записали у облику:



$$K_l = \sigma_0^2 * Q_l \quad (55)$$

где је  $Q_l$  матрица кофактора, а  $\sigma_0$  стандардна девијација јединице тежине мерених величина.

Линеарни функционални модел посредног изравнања гласи:

$$V = A * c + f \quad (56)$$

где је  $V$  – вектор поправака,  $A$  – матрица коефицијената,  $\hat{x}$  – вектор прираштаја и  $f$  – вектор слободних чланова.

Када су мерене величине стохастички независне може се применити  $MNK$ ,

$$V^T * P_l * V = \min \quad (57)$$

где је  $P_l$  – матрица тежина.

### 3.6.2 Пелцерова метода

Пелцерова метода (*Pelzer, 1971*) припада научној дисциплини деформационе анализе која се односи на проучавање поузданости резултата померања тачака, објеката и површи терена са одређеном временском резолуцијом. У односу на начин одређивања стабилних тачака на терену разликујемо неколико начина. Један од начина је и Пелцерова метода, (*Михаиловић и Алексић, 2008*), који је развијен од стране Пелцера и познат је још и под називом Хановерски поступак.

Сама методологија је базирана на испитивању подударности тачака (висина), добијених после независних изравнања мерења из две епохе, уз услов да су мерене величине ослобођене утицаја грубих и систематских грешака, тј., садрже само случајне грешке које подлежу нормалној расподели. Изравнања епоха врше се по  $MNK$  са минималним трагом кофакторске матрице:

$$V^T * P * V = \min$$

$$X^T * X = \min \quad (58)$$

$$\text{trag } Q_{\hat{x}} = \min$$

где се може десити да су оба услова минимума испуњена истовремено при изравнању, или се може при изравнању користити само услов  $V^T * P * V = \min$  док се при трансформацији испуњава услов минимума  $X^T * X = \min$ . Ово значи да се текућа епоха трансформише у нулту или претходну епоху. Изравнања појединачних епоха подразумевају статистичко тестирање хипотеза о грубим грешкама сваког опжања, Data Snooping тест.

Метод Пелцера може се посматрати кроз неколико фаза:

1. Прва фаза се може назвати хомогенизацијом тачности опажања из две епохе. Из изравнања две епохе добијају се вредности варијанси  $s_1^2$  и  $s_2^2$  где треба са одређеном вероватноћом утврдити њихову једнакост, што значи да ли су мерене величине хомогене тачности. Да би се овај део решио поставља се хипотеза да ли постоји хомогена тачност, и рачуна тест статистика:

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (59)$$

у случају прихватања хипотезе следи Фишерову централну расподелу, у случају прихватања алтернативне хипотезе тј., да постоји нехомогена тачност мерених величина у две епохе следи Фишерову нецентралну расподелу. Када је вредност тест статистике





мања од граничне вредности, тј., прихвата се хипотеза да је хомогена тачност мерених величина између две епохе, рачуна се експериментална варијанса која представља хомогену тачност мерених величина за обе епохе:

$$s^2 = \frac{f_1 * s_1^2 + f_2 * s_2^2}{f_1 + f_2} \quad (60)$$

где су  $f_1$  и  $f_2$  број степени слободе при изравнању прве, односно друге епохе мерених величина.

- Друга фаза се може представити као испитивање подударности тачака у две епохе, и значи да су тачке подударне ако нису промениле своје висине између епоха. Стабилним тачкама сматрају се тачке које нису промениле висину између две епохе, и висине се између епоха морају слагати у границама тачности мерених величина. Подударност тачака може се утврдити помоћу тестова математичке статистике.

Постављањем нулте хипотезе да су висине тачака подударне у обе епохе и алтернативне да висине тачака нису подударне у обе епохе. Хипотезе се проверавају рачунањем експерименталне варијансе  $\theta^2$  која се назива средње неуклапање или расцеп:

$$\theta^2 = \frac{\hat{\mathbf{d}}^T * \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}}^+ * \hat{\mathbf{d}}}{h} \quad (61)$$

где је  $h = rang \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}}$ , ранг матрице кофактора разлика висина, а  $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}}^+$  псеудоинверзна матрица кофактора разлика висина.

Тест статистика гласи:

$$F = \frac{\theta^2}{s^2} \quad (62)$$

И у случају нулте хипотезе следи Фишерову централну расподелу, а у случају алтернативне следи Фишерову нецентралну расподелу. Када је вредност тест статистике мања од критичне вредности прихвата се нулта хипотеза што значи да су висине тачака подударне у обе епохе, у супротном се прихвата алтернативна хипотеза што значи да у мрежи има нестабилних тачака.

- Трећа фаза представља испитивање подударности основних тачака. Ако тест, једначина 62, покаже да у мрежи има нестабилних тачака, мрежа се дели на тачке основне мреже (s) и тачке радне мреже (o). Постављају се, нулта хипотеза да су висине основних тачака подударне и алтернативна хипотеза да висине основних тачака нису подударне. Средње неуклапање рачуна се према једначини 61 само за основне тачке:

$$\theta^2 = \frac{\hat{\mathbf{d}}_s^T * \overline{\mathbf{P}}_{ss} * \hat{\mathbf{d}}_s}{h_s} \quad (63)$$

где је  $h_s = rang \overline{\mathbf{P}}_{ss}$ , матрица  $\overline{\mathbf{P}}_{ss}$  добија из поделе матрице  $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}}^+$  на субматрице:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}}^+ = \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{d}}} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_{ss} & \mathbf{P}_{so} \\ \mathbf{P}_{os} & \mathbf{P}_{oo} \end{pmatrix} \quad (64)$$

Формира се тест статистика:

$$F = \frac{\theta_s^2}{s^2} \quad (65)$$

која у случају нулте хипотезе следи Фишерову централну расподелу, а у случају алтернативне хипотезе следи Фишерову нецентралну расподелу. За вредност тест



статистике која је мања од критичне вредности прихвата се нулта хипотеза о подударности висина тачака у обе епохе.

4. Четврта фаза представља локализацију нестабилних основних тачака. Ако тест статистика из једначине 65 није испуњена, значи да у мрежи основних тачака постоји или постоје нестабилне тачке и потребно је утврдити које су то тачке. Издвајање нестабилних тачака ради се помоћу локализације нестабилних тачака. Треба прво формирати субвекторе разлике висина:

$$\widehat{\mathbf{d}}_s = \begin{pmatrix} \widehat{\mathbf{d}}_F \\ \widehat{\mathbf{d}}_B \end{pmatrix} \quad (66)$$

Где се у вектору  $\widehat{\mathbf{d}}_F$  налазе разлике висина оних тачака које се сматрају условно стабилним, док се у вектору  $\widehat{\mathbf{d}}_B$  налазе разлике висина тачака које се сматрају условно нестабилним. Треба напоменути да је сада матрица кофактора на субматрице:

$$\mathbf{P}_{ss} = \begin{pmatrix} P_{FF} & P_{FB} \\ P_{BF} & P_{BB} \end{pmatrix} \quad (67)$$

За сваку основну тачку мреже рачуна се средње неуклапање:

$$\theta_j^2 = \frac{\widehat{\mathbf{d}}_B^T * \overline{P_{BB}} * \widehat{\mathbf{d}}_B}{h_B} \quad (68)$$

где је  $h_B = rang P_{BB} = 1$  за  $ID$  мреже, и број расцепа је једнак броју основних тачака мреже. Како постоји онолико расцепа колико и основних тачака за нестабилну тачку узима се она тачка која има вредност  $\theta_j$  максималну, и тачка на коју се односи максимална вредност сматра се нестабилном и она се избацује из скупа основних тачака које се сада и даље сматрају условно стабилним. Може се даље утврђивати стабилност за преостале основне тачке или се закључити да су преостале тачке стабилне.

Зато се онда рачуна расцеп:

$$\theta_{REST}^2 = \frac{\widehat{\mathbf{d}}_F^T * \overline{P_{FF}} * \widehat{\mathbf{d}}_F}{h_F} \quad (69)$$

И тест статистика:

$$F = \frac{\theta_{REST}^2}{s^2} \quad (70)$$

где је  $h_F = rang P_{FF}$ , и у случају нулте хипотезе тест статистика следи Фишерову централну расподелу, сматра се стабилан преостали број тачака, док у случају прихватања алтернативне хипотезе тест статистика следи Фишерову нецентралну расподелу да у преосталим основним тачкама још има нестабилних основних тачака. Ако се прихвати алтернативна хипотеза понавља се поступак, све док не буде испуњена нулта хипотеза, и основне тачке се деле у две групе, стабилне и нестабилне.

5. Пета фаза назива се испитивање померања тачака на објекту. Вектор померања изгледа:

$$\widehat{\mathbf{d}} = \begin{pmatrix} \widehat{\mathbf{d}}_F \\ \widehat{\mathbf{d}}_o \end{pmatrix} \quad (71)$$

Где су у вектору  $\widehat{\mathbf{d}}_F$  разлике у висинама стабилних основних тачака, а у вектору  $\widehat{\mathbf{d}}_o$  разлике у висинама нестабилних тачака основне мреже.

Матрица кофактора разлика висина изгледа:



$$P_{\hat{a}} = \begin{pmatrix} P_{FF} & P_{FO} \\ P_{OF} & P_{OO} \end{pmatrix} \quad (72)$$

Расцеп се рачуна као:

$$\theta_0^2 = \frac{\bar{d}_0^T * P_{oo} * \bar{d}_0}{h_0} \quad (73)$$

где је  $h_0 = rang P_{oo}$ .

Тест статистика стабилности тачака гласи:

$$F = \frac{\theta_0^2}{s^2} \quad (74)$$

где у случају нулте хипотезе тест статистика следи Фишерову централну расподелу, да су тачке објекта стабилне, док у случају алтернативне хипотезе тест статистика прелази критичну вредност и следи Фишерову нецентралну расподелу, односно да су тачке објекта нестабилне.

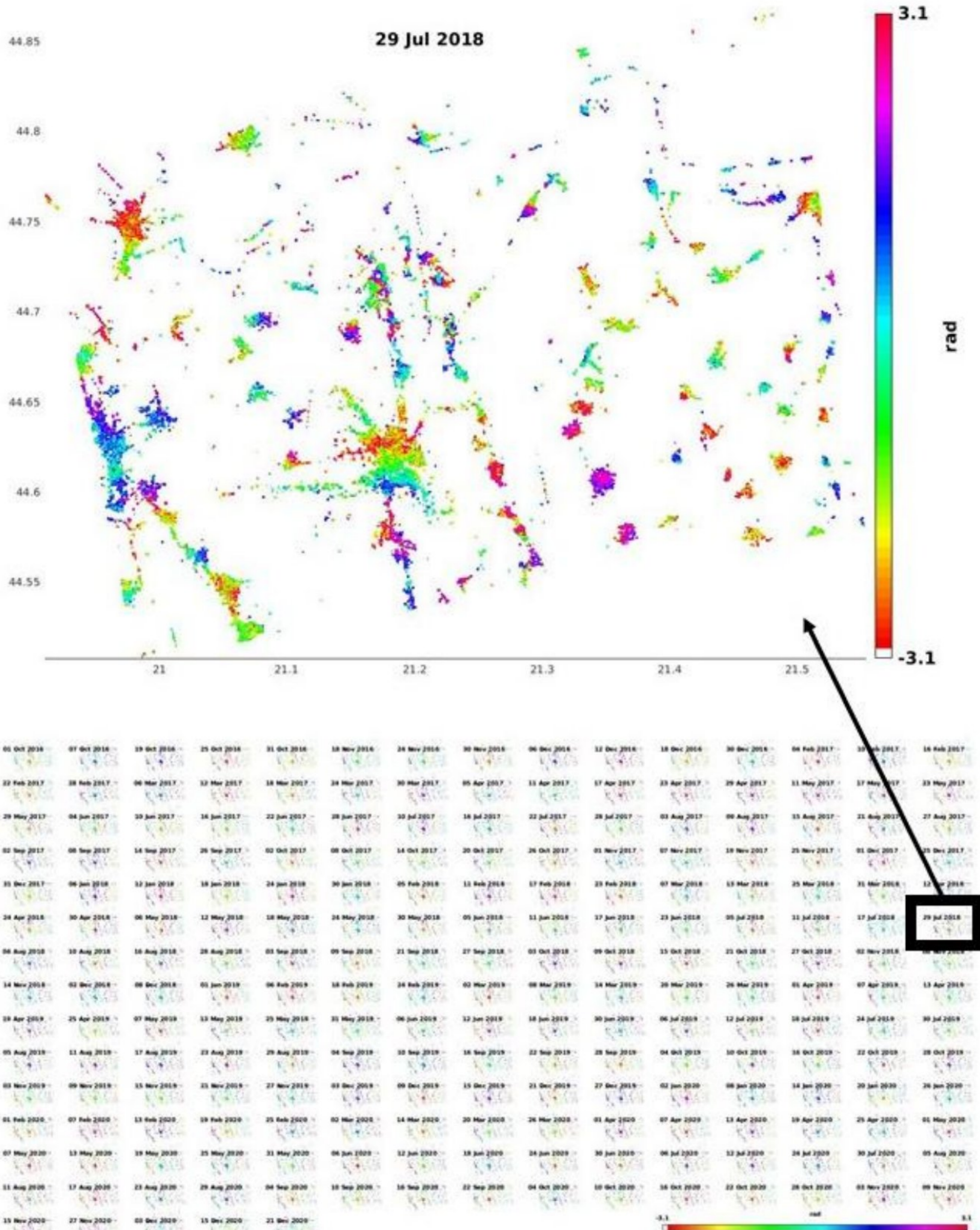


## 4 Резултати

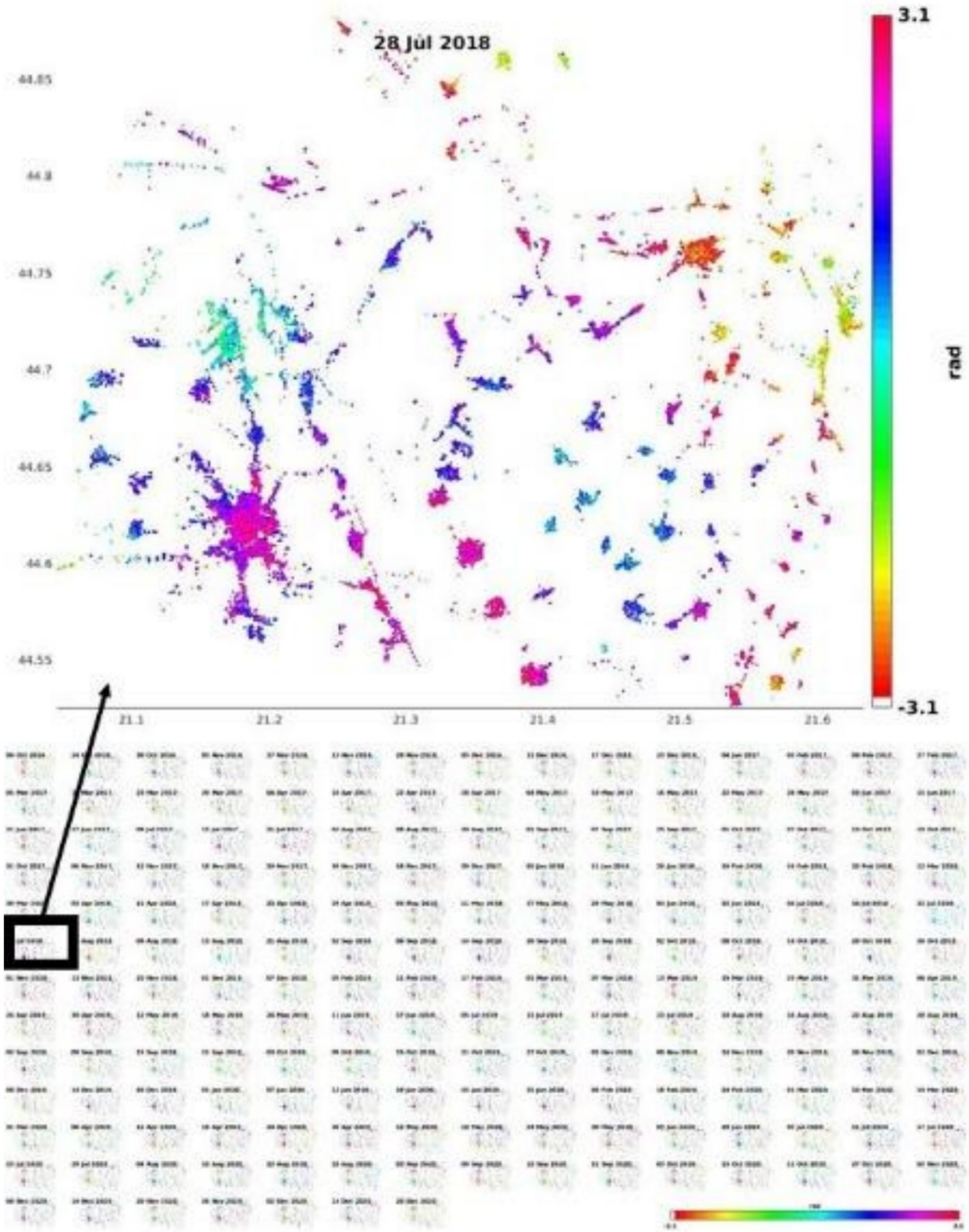
Целокупно ПОИ подељено је на мања подручја која су погоднија за презентацију и визуелизацију резултата. Добијени резултати се односе на брзине слегања и на основу истих су израђене карте које приказују вертикална померања, добијена после пост-процесирања. Подручја која су истражена и приказана су: Дрмно, Кличевац, Кленовник и Брадарац као насеља која се налазе у близини површинског копа. Подручје које заузима термоелектрана Костолац (ТЕКО), Костолац насеље, као и остатак ПОИ за који су добијени резултати после процесирања такође су приказани на одговарајућим картама. Добијени резултати су у потпуности везани за насељена места ПОИ, док су резултати временских серија померања са пољопривредног и земљишта под вегетацијом као и са експлоатационих поља рудника очекивано изостали, како и сама *PS InSAR* теорија предвиђа. Највећи део резултата публикован је у раду који су објавили (Гојковић и др., 2023).

### 4.1 Резултати *StaMPS* процесирања

На сликама 55 и 56 приказане су вредности фазе за пикселе кандидате са интерферограма. На слици 55 приказани су сви парови мастер – помоћни снимак, где је мастер снимак од 17. јула 2018. године, док су на слици 55 (горе) приказане вредности фазе чији је датум помоћног снимка 29. јул 2018. године, где се снимци односе на узлазну путању сателита. На слици 56 приказани су сви парови мастер – помоћни снимак, где је мастер снимак од 22. јула 2018. године, док су на слици 56 (горе) приказане вредности фазе чији је датум помоћног снимка 28. јул 2018. године, где се снимци односе на силазну путању сателита. Може се закључити да после првог корака постоји веома велики број пиксела кандидата за *PS*, чији број се може смањити или повећати променом вредности улазних параметара процесирања.

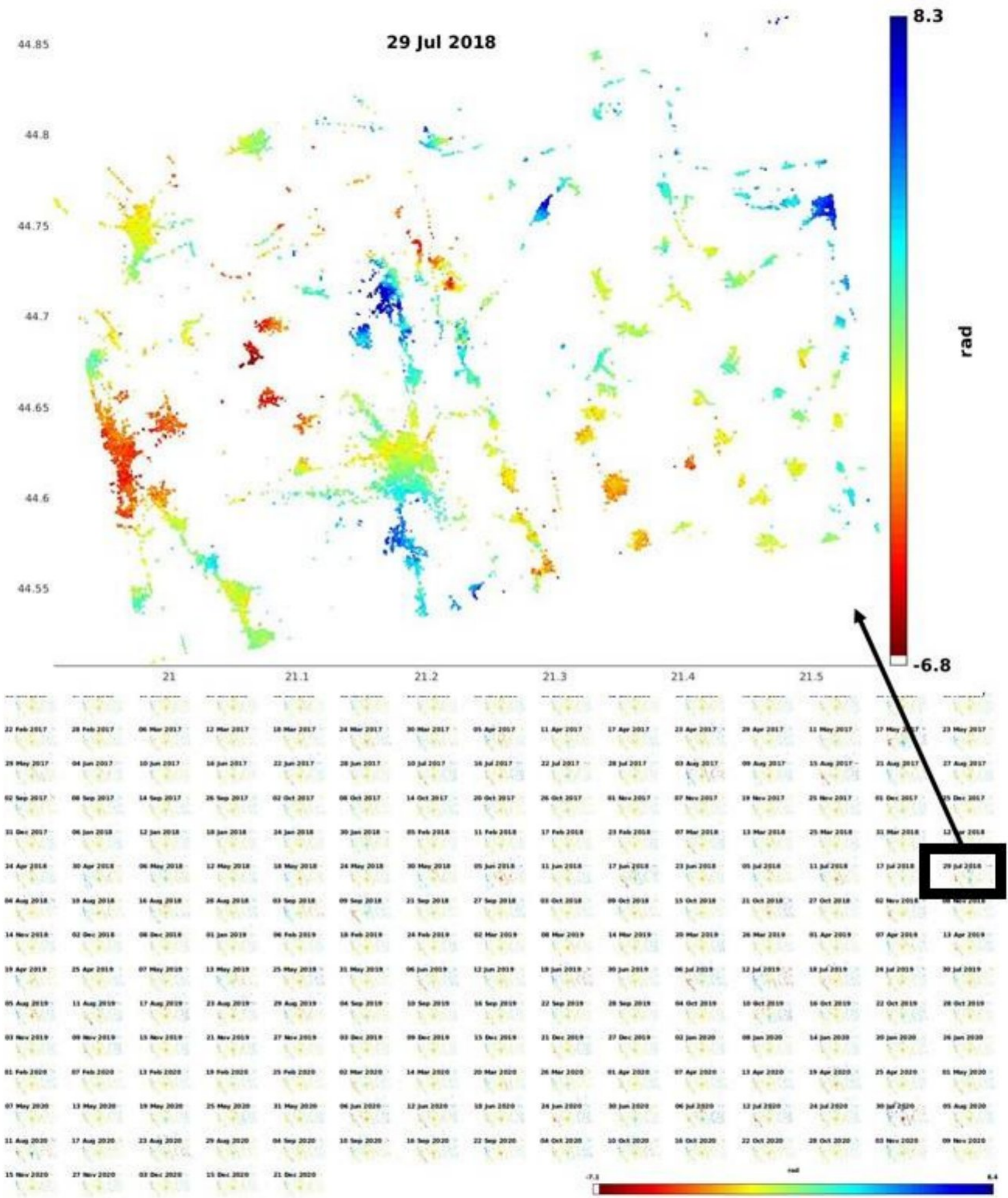


Слика 55. Фазне вредности свих интерферограма за пикселе кандидате за PS, узлазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 17. јул 2018 мастер снимак, и увећано, фазне вредности пиксела кандидата за PS, узлазне орбите сателита, пар мастер помоћни снимак где је 17. јул 2018 мастер снимак док је 29. јул 2018. помоћни снимак.

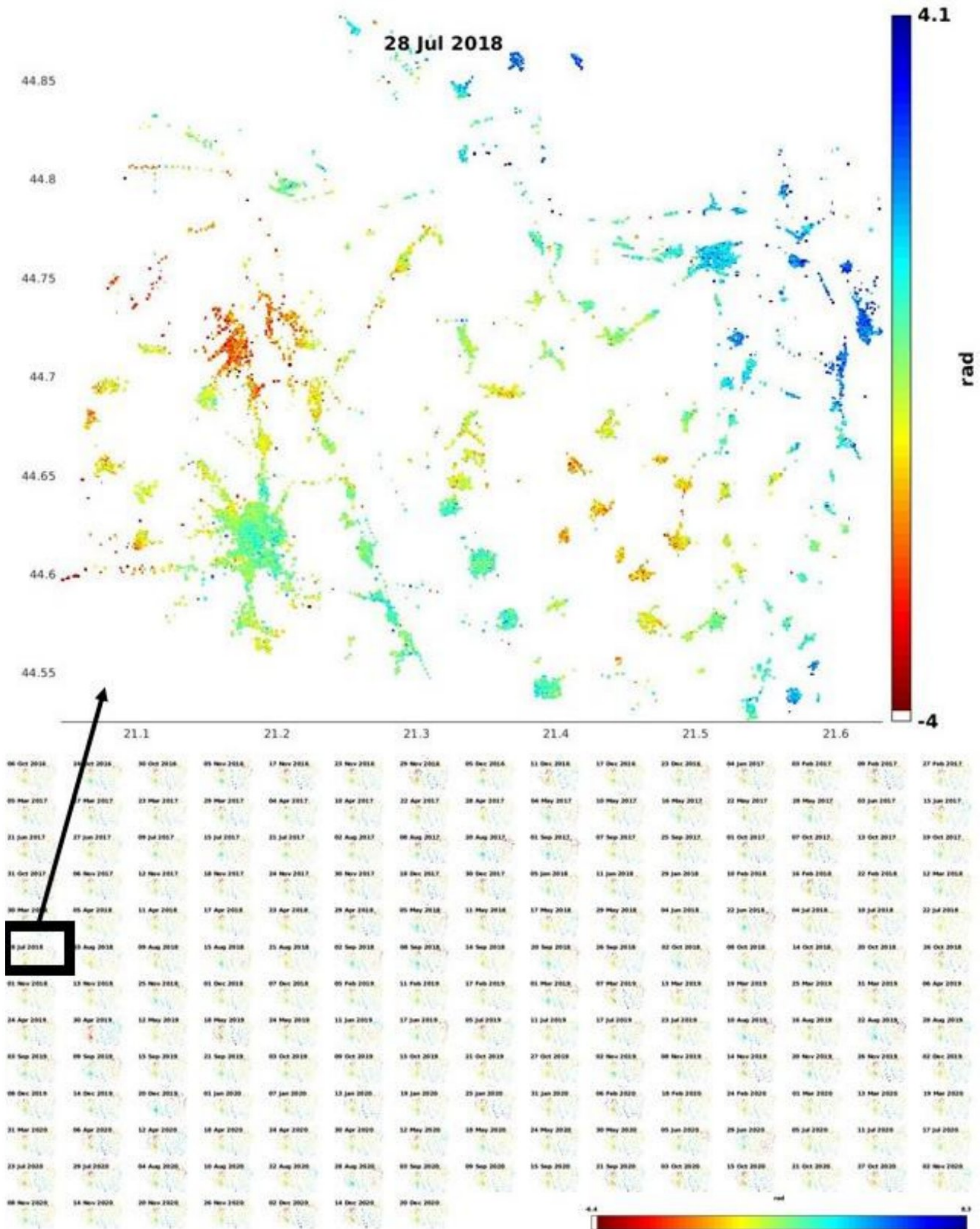


Слика 56. Фазне вредности пиксела кандидата за PS, силазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 22. јул 2018 мастер снимак, и увећано фазне вредности пиксела кандидата за PS, силазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 22. јул 2018 мастер снимак, док је помоћни снимак од 28. јула 2018. године.

На сликама 57 и 58 приказане су вредности фазе после решавања фазне неодређености PS за узлазну и силазну орбиту сателита, респективно.



Слика 57. Вредности фазе после решавања фазне неодређености за PS, узлазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 17. јул 2018 мастер снимак, и горе вредности пара снимака где је помоћни снимак од 29. јул 2018.



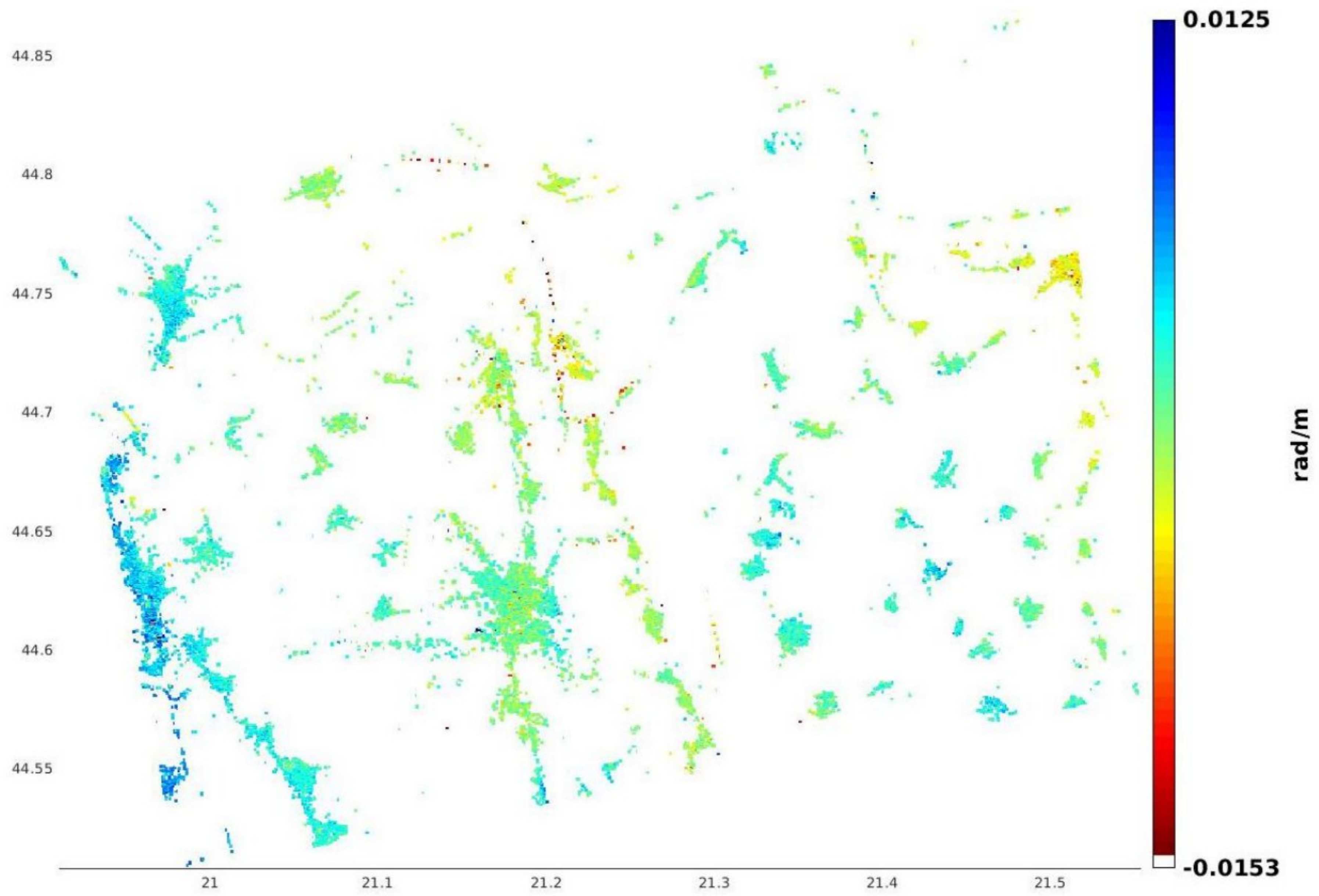
Слика 58. Вредности фазе после решавања фазне неодређености за PS, силазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 22. јул 2018 мастер снимак, и горе вредности пара снимака где је помоћни снимак од 28. јул 2018.

На сликама 59 и 60 приказана је грешка DEM модела за PS узлазне и PS силазне сателитске путање, респективно. На сликама 61 и 62 приказане су вредности фазе пре решавања фазне неодређености са уклањањем утицаја атмосфере мастер снимка и грешке због DEM, респективно. На слици 63 и слици 64 приказане су вредности фазе после решавања фазне

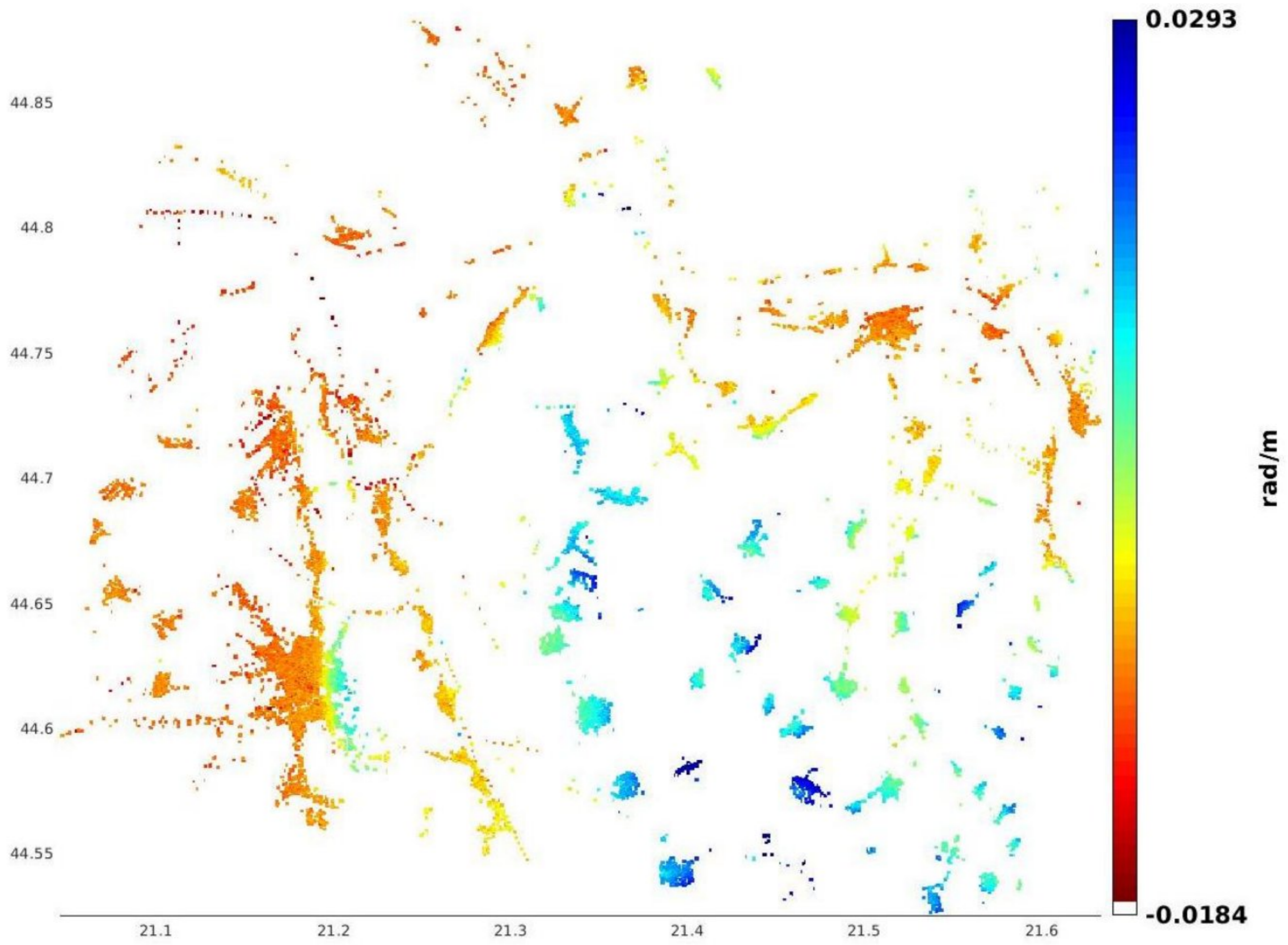




неодређености и уклањања утицаја атмосфере мастер снимка и грешке због *DEM*, респективно.

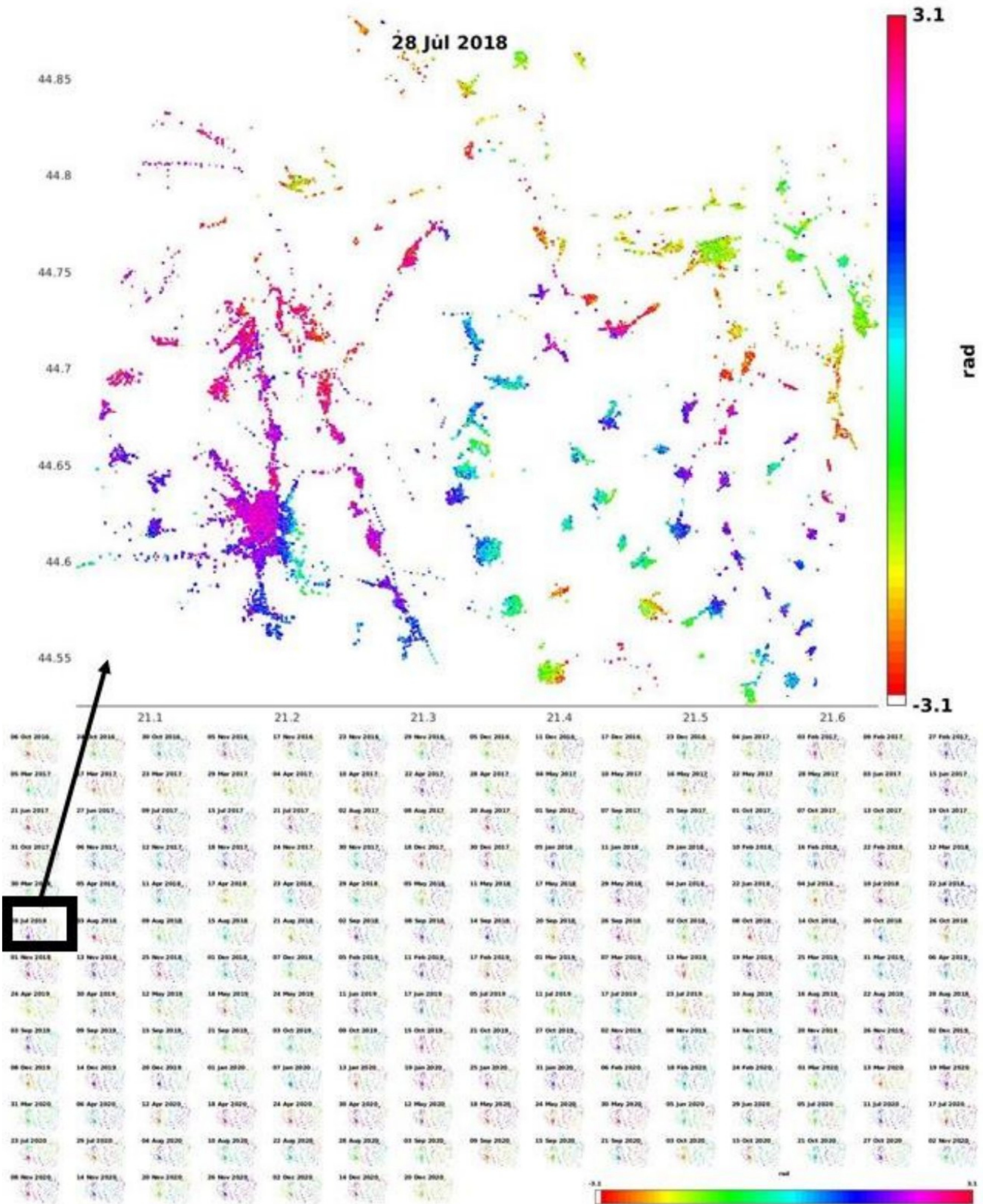


Слика 59. Грешке *DEM* после корака 7, за *PS* узлазне сателитске путање.

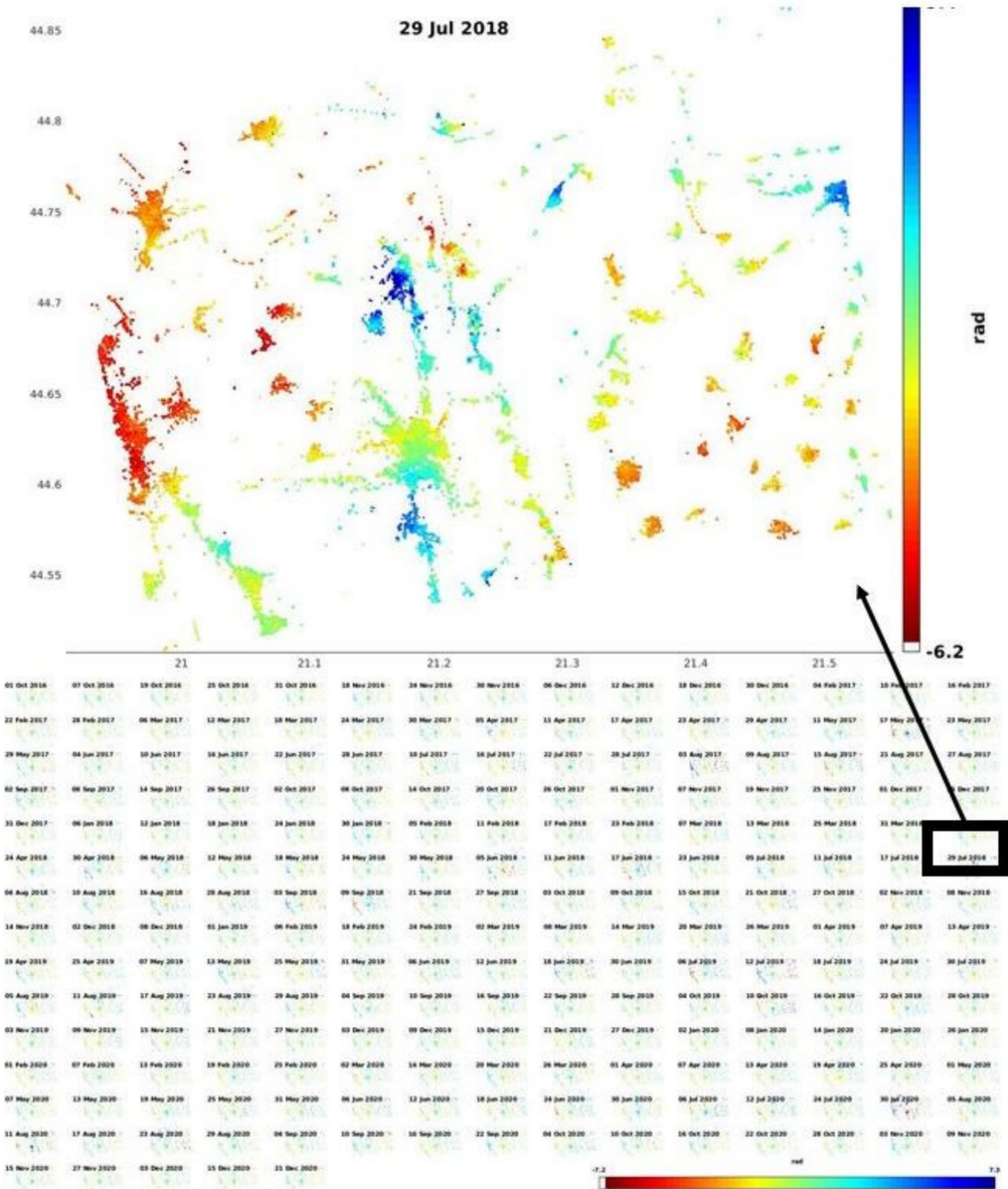


Слика 60. Грешке DEM после корака 7, за PS силазне сателитске путање.

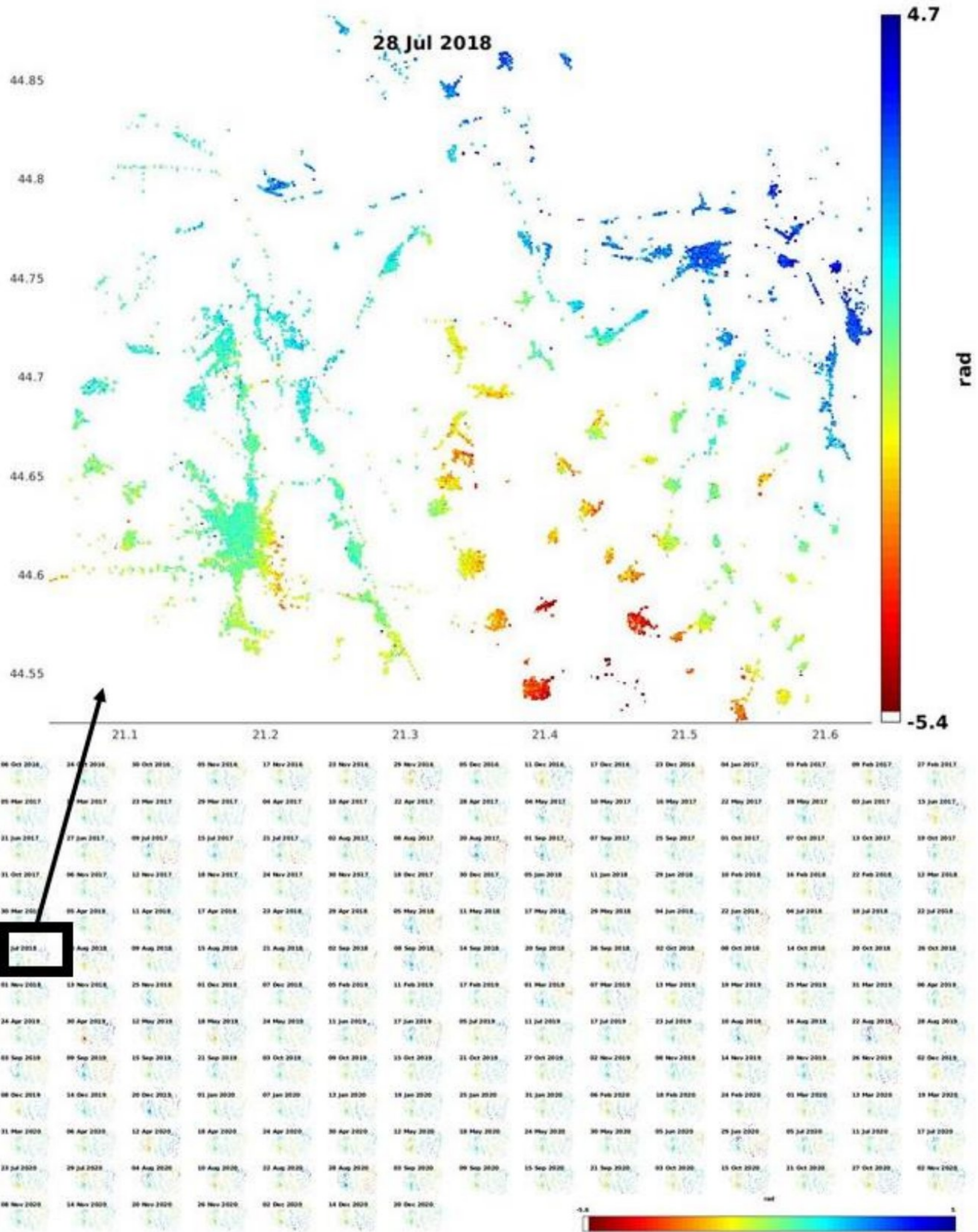




Слика 62. Вредности фазе пре решавања фазне неодређености за PS са одузимањем атмосферског утицаја за мастер снимак и грешке DEM, силазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 22. јул 2018 мастер снимак, и горе вредности пара снимака где је помоћни снимак од 28. јул 2018.



Слика 63. Вредности фазе после решавања фазне неодређености за PS и одузимања атмосферског утицаја за мастер снимак и грешке DEM, узлазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 17. јул 2018 мастер снимак, и горе вредности пара снимака где је помоћни снимак од 29. јул 2018.

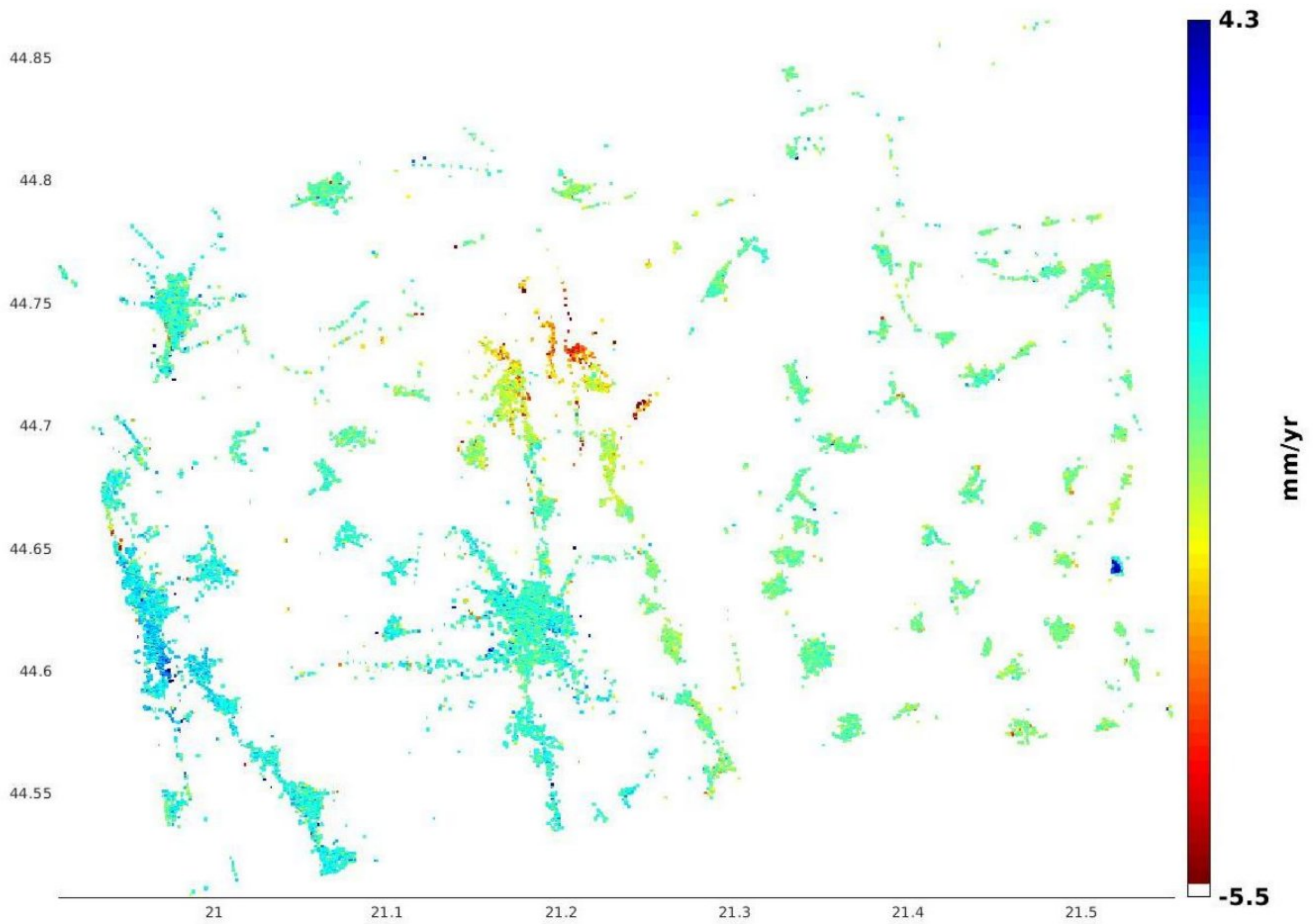


Слика 64. Вредности фазе после решавања фазне неодређености за PS и одузимања атмосферског утицаја за мастер снимак и грешке DEM, силазне орбите сателита, парови мастер помоћни снимак где је 22. јул 2018 мастер снимак, и горе вредности пара снимака где је помоћни снимак од 28. јул 2018.

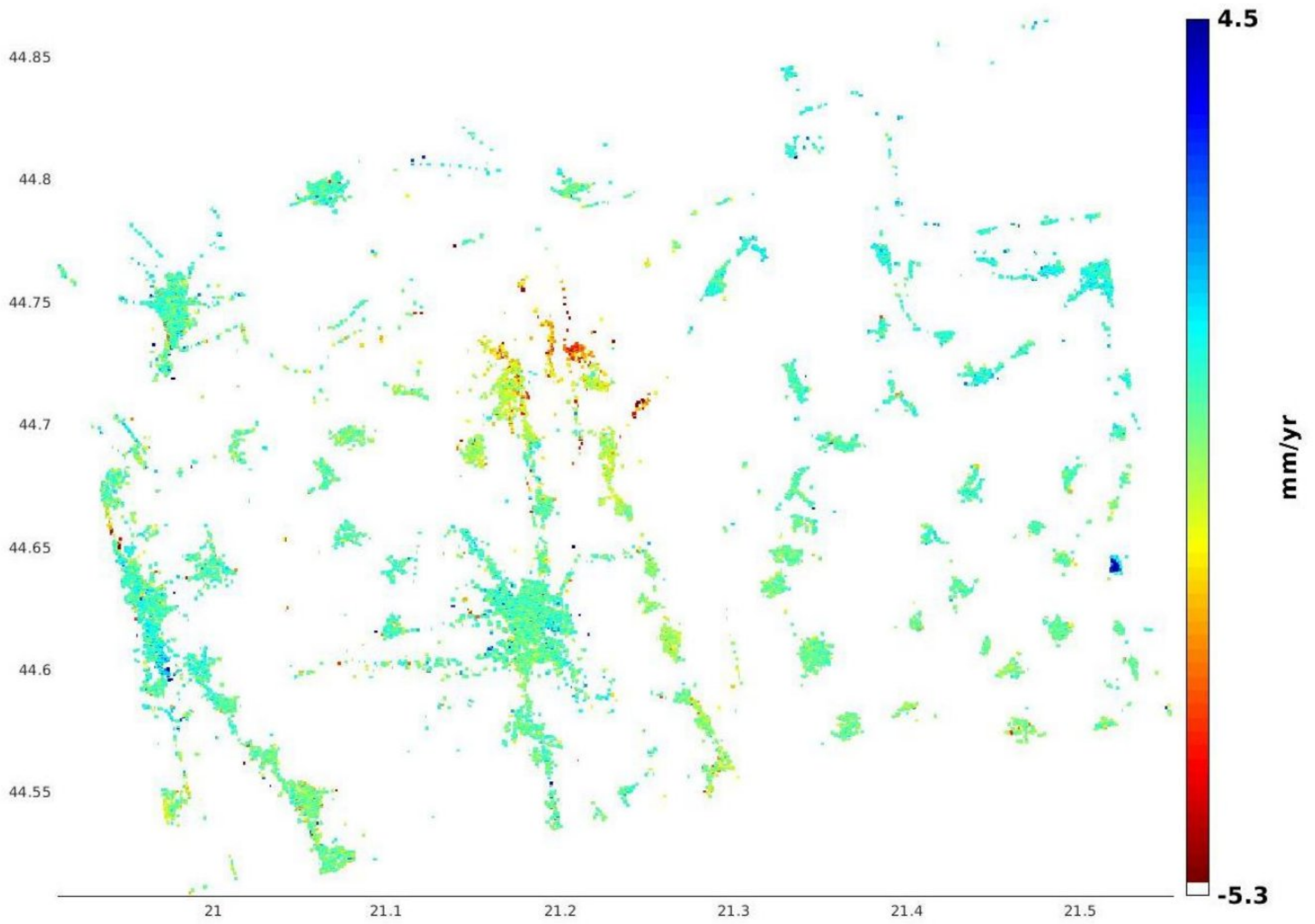
На сликама 65 и 66 приказане су средње вредности брзина деформација у LOS геометрији за сателит са узлазном путањом на слици 65 и сателит са силазном путањом на слици 66. На сликама 67 и 68 приказане су такође брзине деформација у LOS геометрији али ослобођене



утицаја *DEM* али и грешака орбита за сателит са узлазном путањом на слици 67 и сателит са силазном путањом на слици 68.

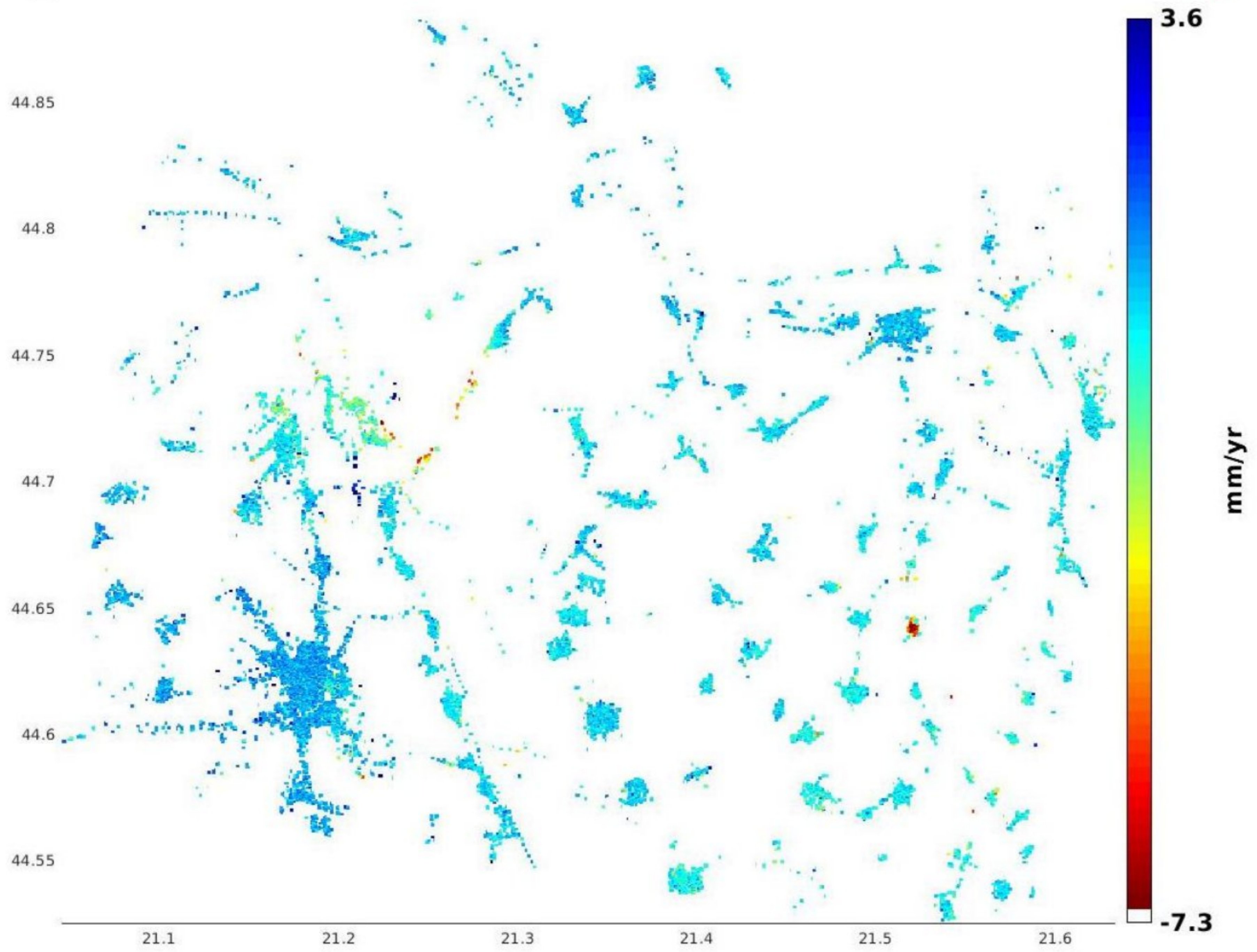


Слика 65. Средње вредности брзина померања за ПОИ, за узлазну сателитску путању.

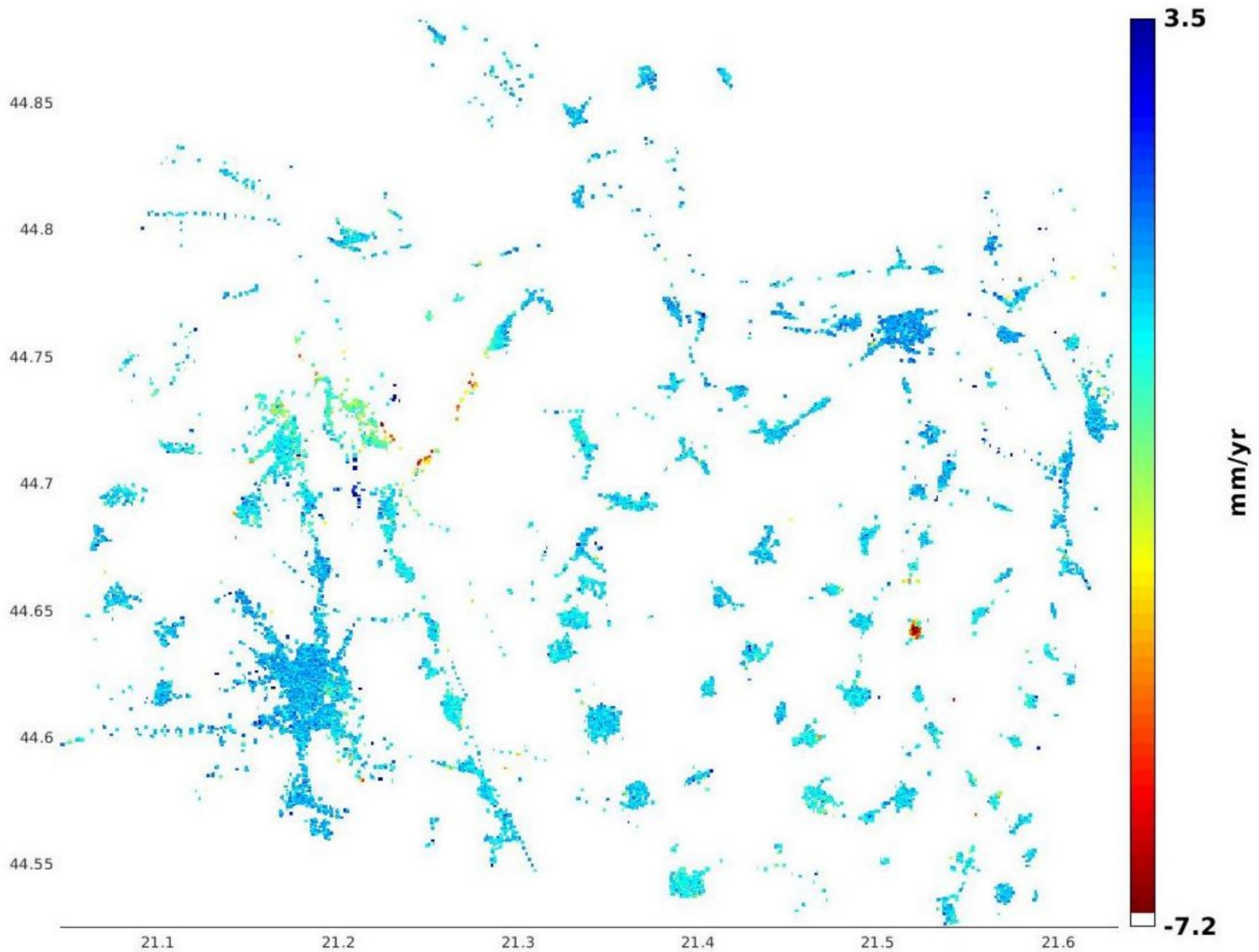


Слика бб. Средње вредности брзина померања за ПОИ, са отклоњеним утицајем DEM и грешака орбита сателита за узлазну сателитску путању.



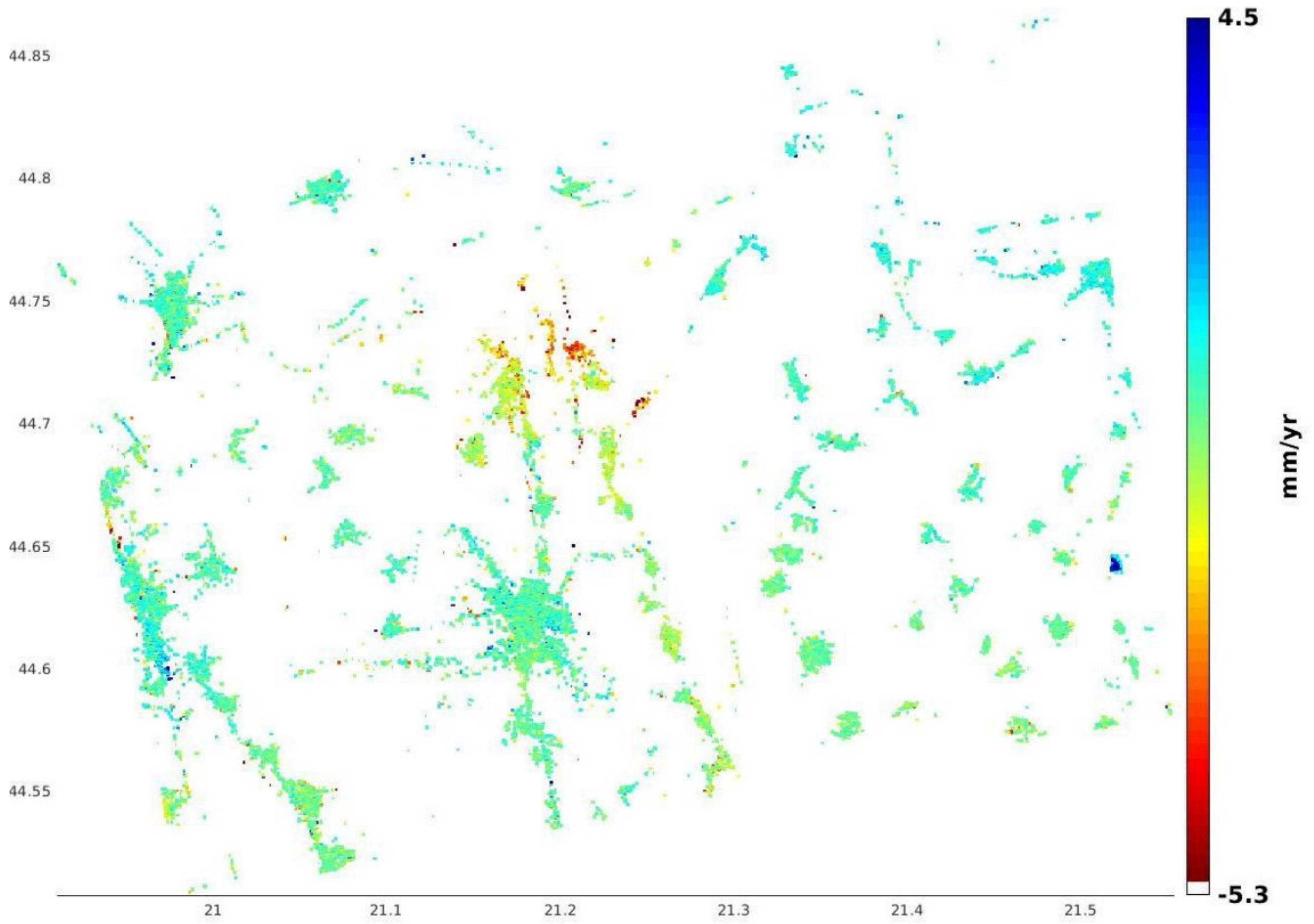


Слика 67. Средње вредности брзина померања за ПОИ, за силазну сателитску путању.

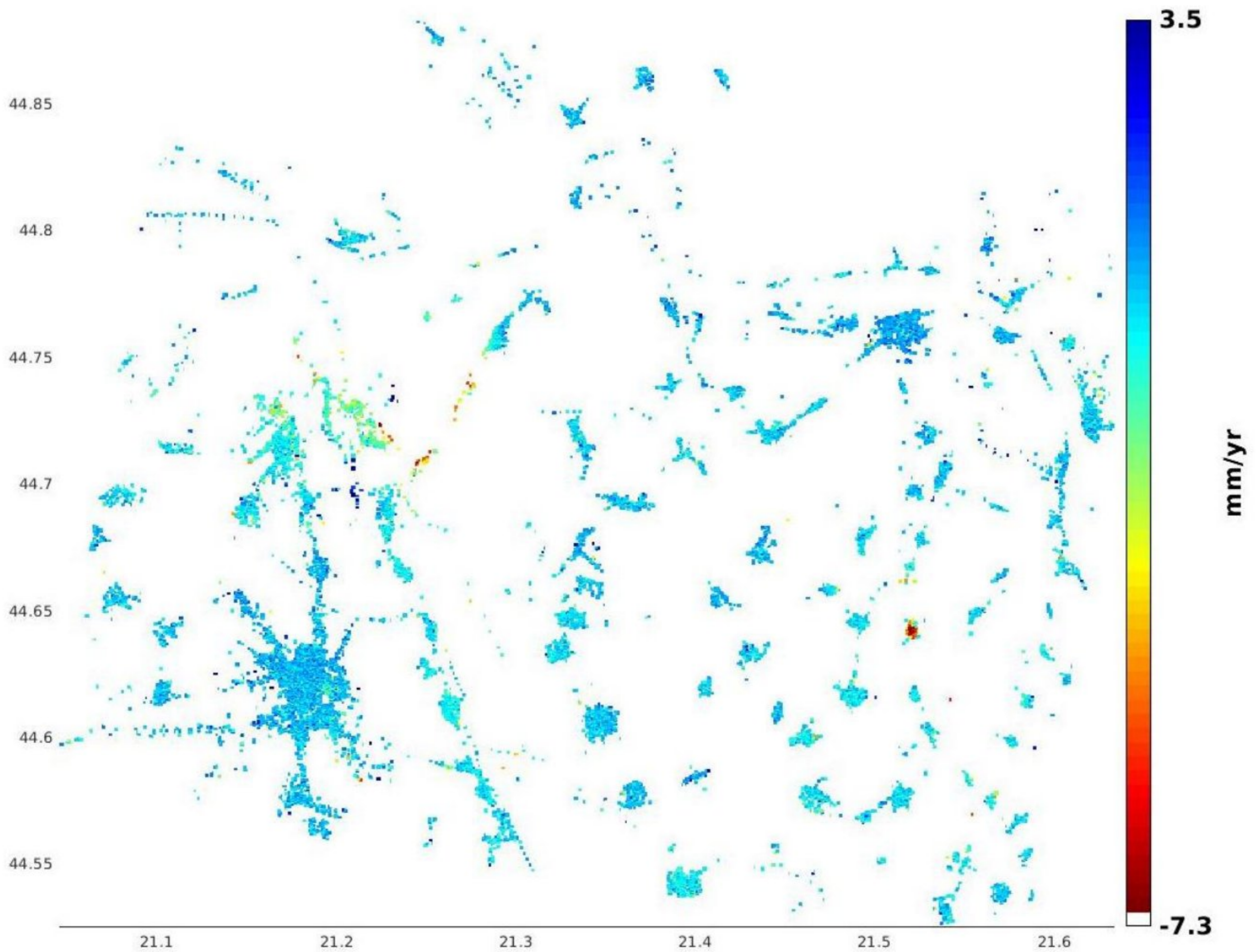


Слика 68. Средње вредности брзина померања за ПОИ, са отклоњеним утицајем DEM и грешака орбита сателита за силазну сателитску путању.

На сликама 69 и 70 приказане су вредности брзине слегања за ПОИ у LOS геометрији ослобођене утицаја DEM, грешака орбита као и атмосферских утицаја коришћењем линеарног атмосферског филтрирања, на слици 69 за сателит у узлазној орбити и на слици 70 за сателит у силазној орбити.

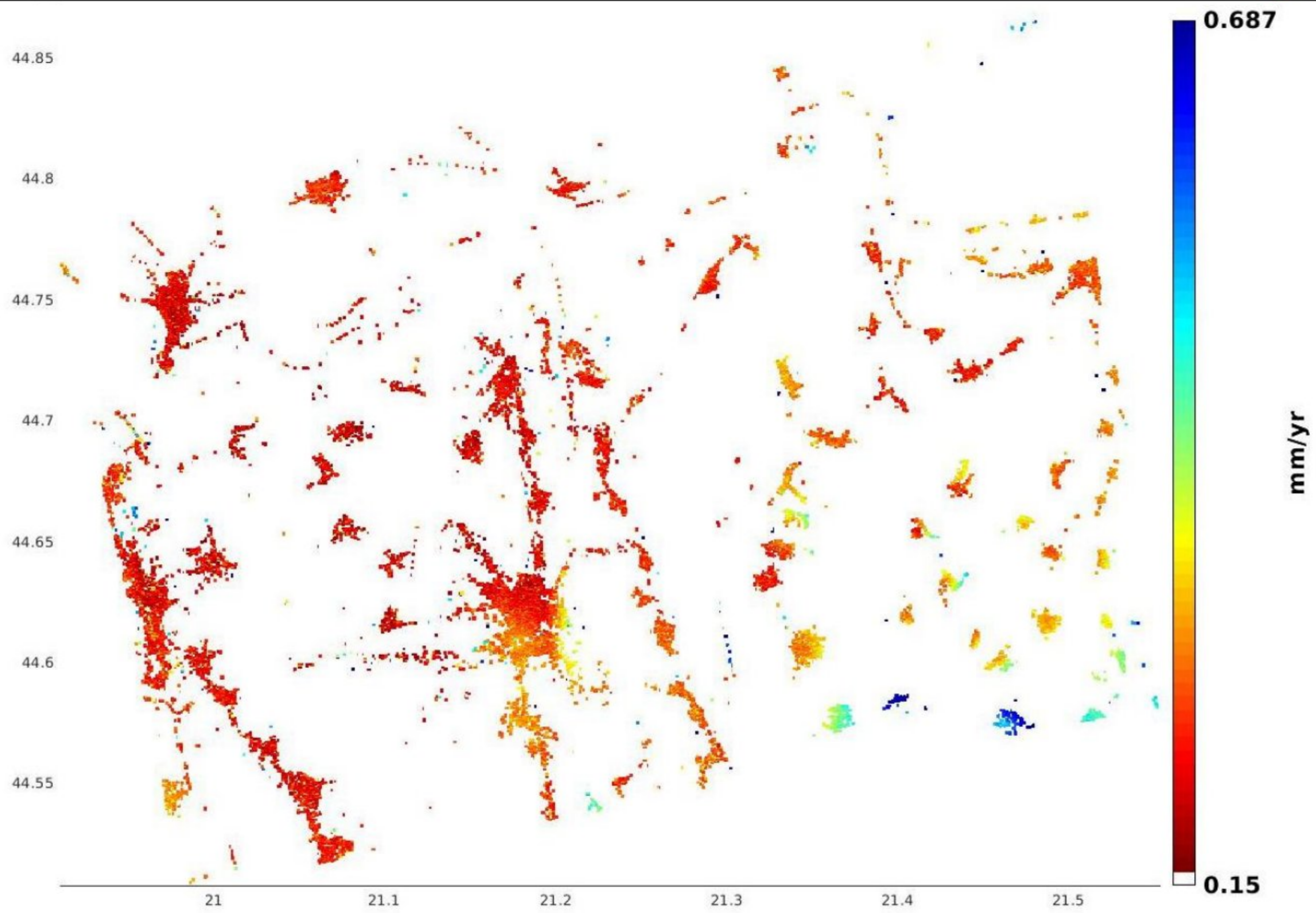


Слика 69. Средње вредности брзина померања за ПОИ, ослобођене утицаја DEM, грешака орбита као и атмосферских утицаја коришћењем линеарног атмосферског филтрирања, за узлазну сателитску путању.

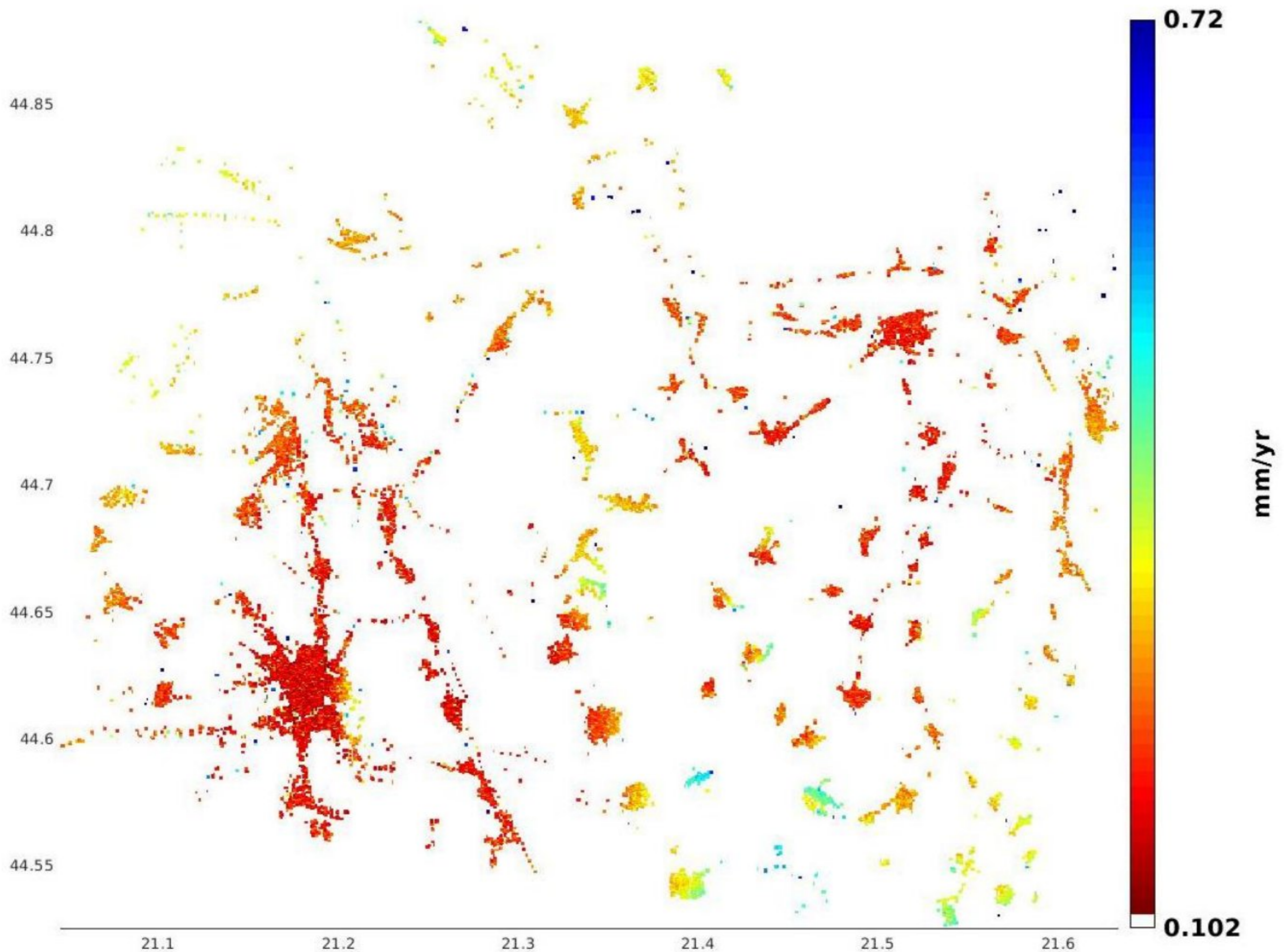


Слика 70. Средње вредности брзина померања за ПОИ, ослобођене утицаја DEM, грешака орбита као и атмосферских утицаја коришћењем линеарног атмосферског филтрирања, за силазну сателитску путању.

На сликама 71 и 72 приказане су стандардне девијације брзина померања у *LOS* геометрији ослобођене утицаја *DEM*, грешака орбита као и атмосферских утицаја коришћењем линеарног атмосферског филтрирања, на слици 71 за сателит у узлазној орбити и на слици 72 за сателит у силазној орбити.



Слика 71. Стандардна девијација брзина померања за ПОИ, ослобођене утицаја DEM, грешака орбита као и атмосферских утицаја коришћењем линеарног атмосферског филтрирања, за узлазну сателитску путању.



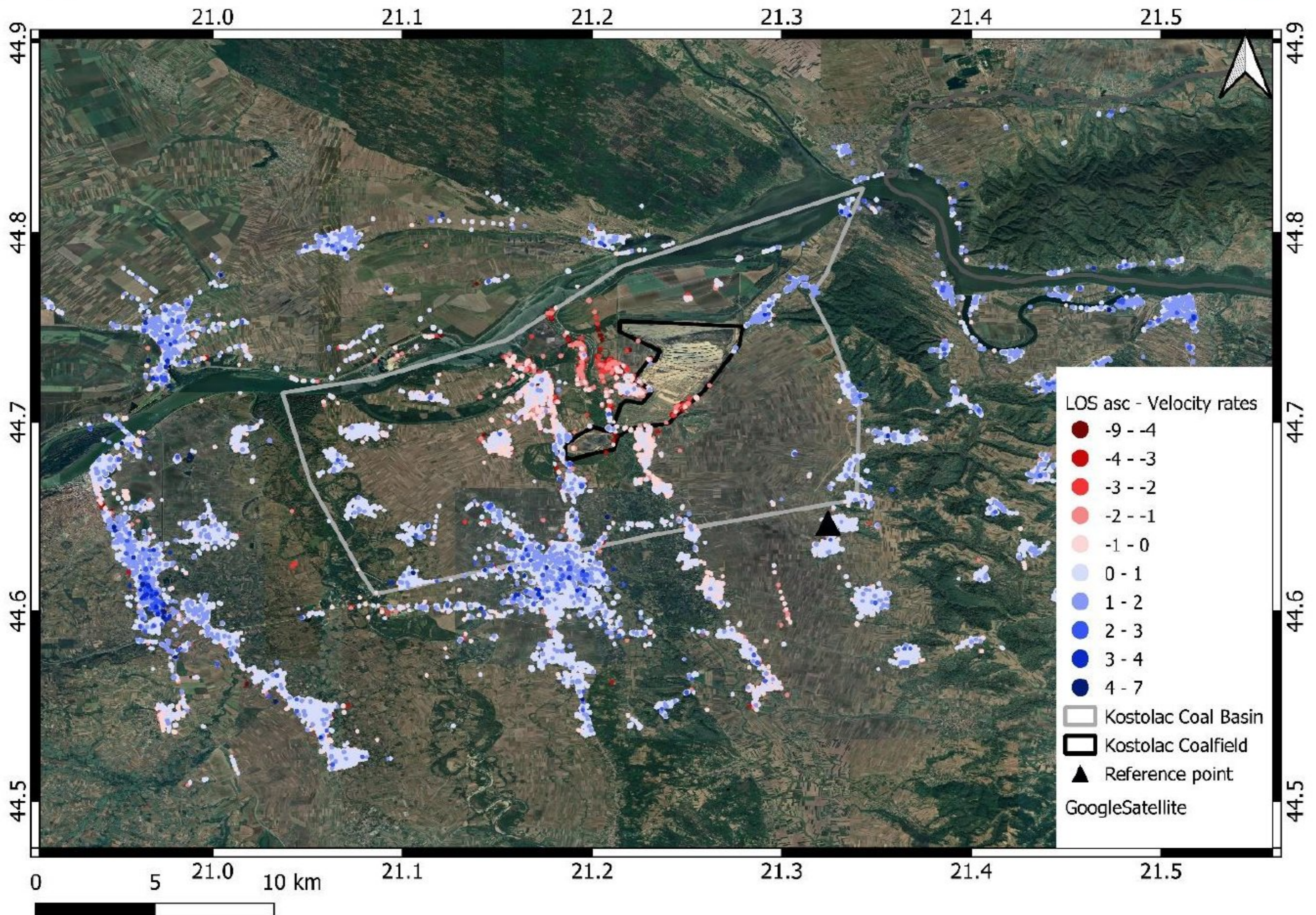
Слика 72. Стандардне девијације брзина померања за ПОИ, ослобођене утицаја DEM, грешака орбита као и атмосферских утицаја коришћењем линеарног атмосферског филтрирања, за силазну сателитску путању.

## 4.2 Резултати процесирања за ПОИ

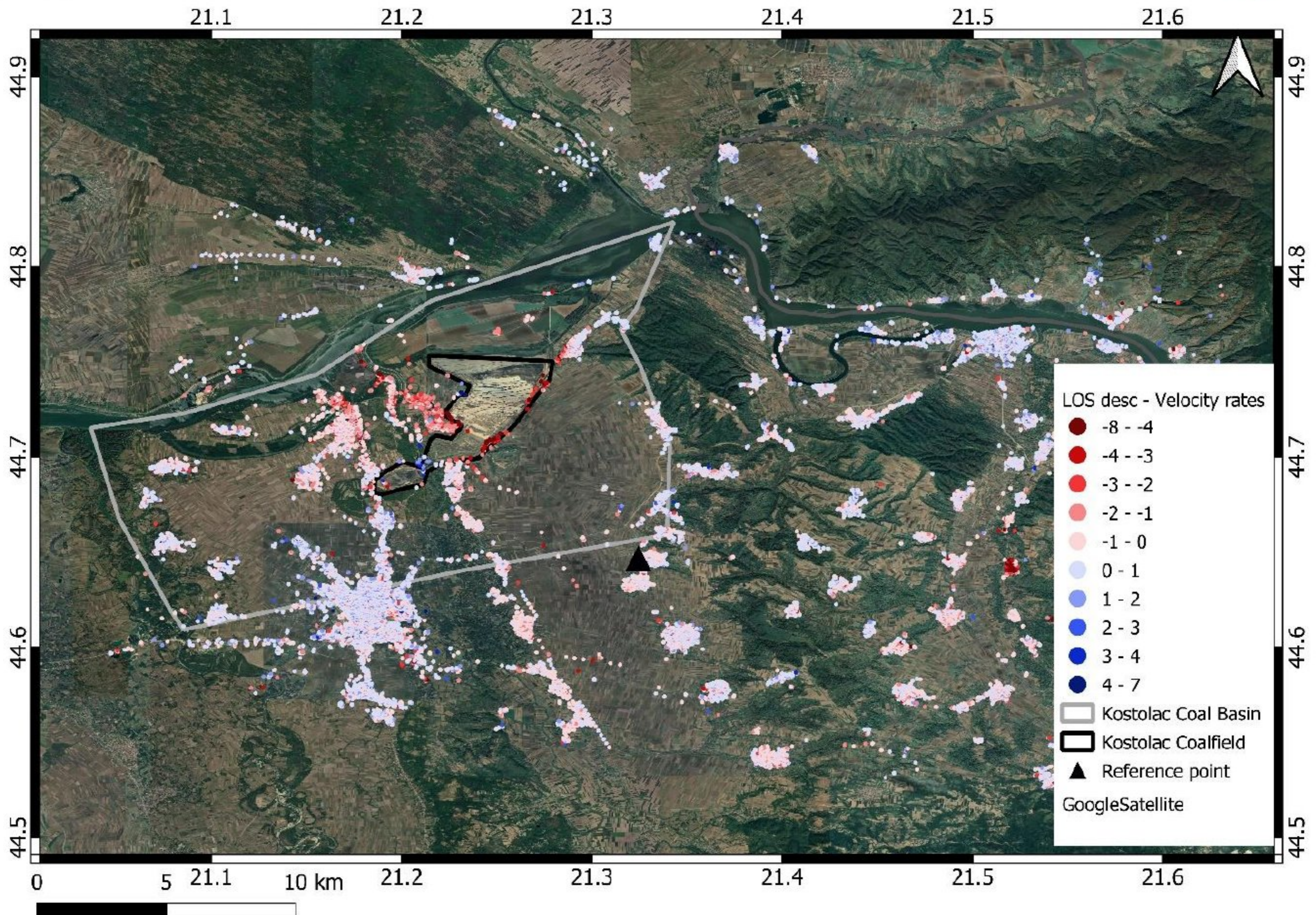
LOS брзине слегања за PS приказане су на слици 73 и слици 74, према врсти орбите, узлазне на слици 73 и силазне на слици 74. Број PS за подручје које је процесирано са датим основним статистичким параметрима приказан је у табели 3.

Табела 3. PS основна статистика за LOS узлазне и силазне орбите за процесирано ПОИ, и вертикална декомпозиција узлазне и силазне орбите.

| Сателит       | PS           | Макс.           | Мин.            | Средње издизање | Средње слегање  |
|---------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>Орбита</b> | <b>(LOS)</b> | <b>[mm/god]</b> | <b>[mm/god]</b> | <b>[mm/god]</b> | <b>[mm/god]</b> |
| Узлазна       | 79.060       | 6,9             | -8,1            | 0,5             | -1,1            |
| Силазна       | 81.217       | 6,1             | -8,8            | 0,5             | -0,7            |
| Узл. + Сил.   | 8.951        | 4,1             | -8,2            | 0,5             | -0,7            |



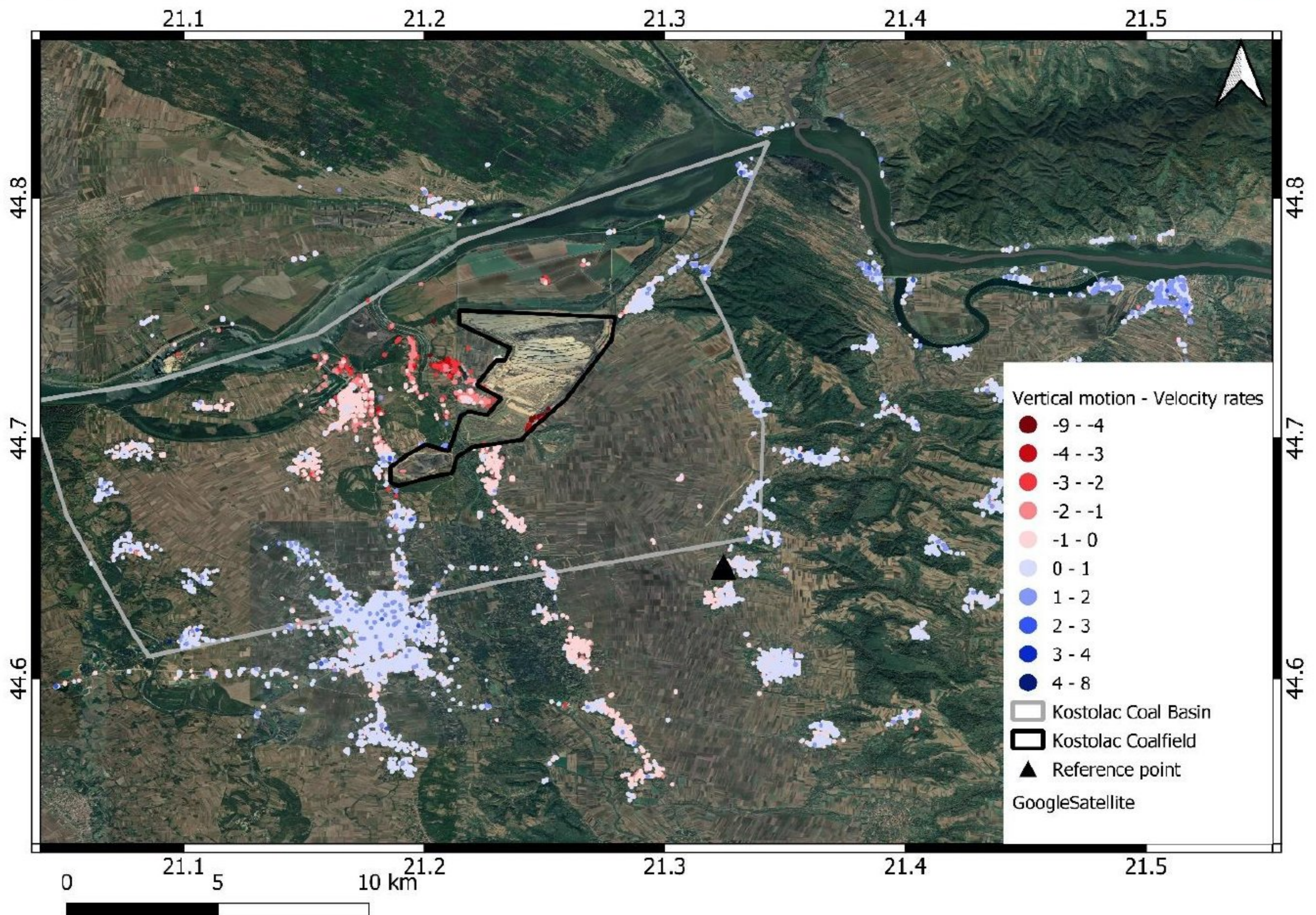
Слика 73. LOS брзине слегање PS (mm/year) генерисаних са Сентинел-1 А и Сентинел-1 Б узлазне сателитске орбите за ПОИ; црвена боја представља померање PS од сателита, плава боја представља PS који се померају према сателиту.



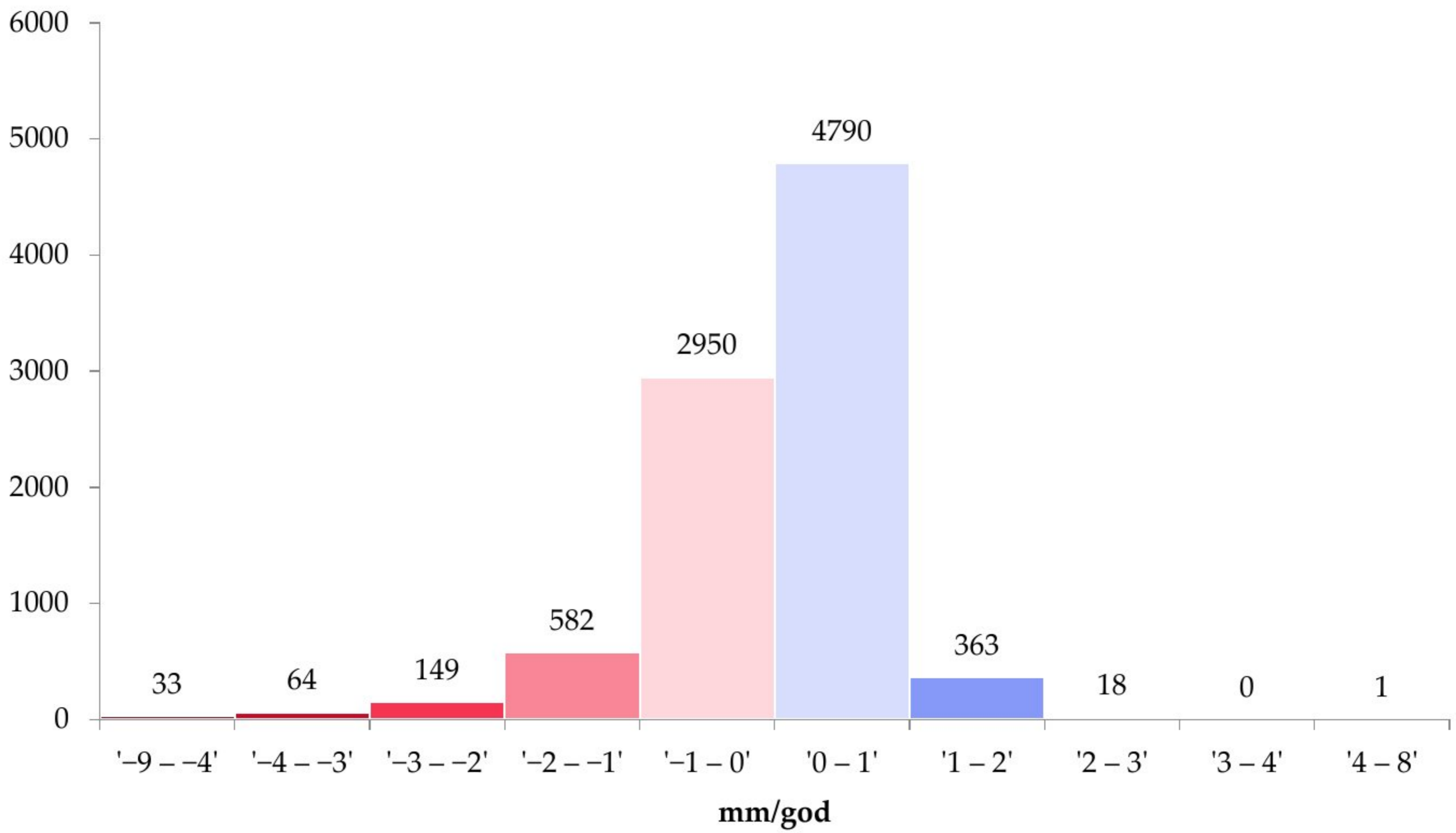
Слика 74. *LOS* брзине слегање *PS* (mm/year) генерисаних са Сентинел-1 А и Сентинел-1 Б силазне сателитске орбите за ПОИ; црвена боја представља померање *PS* од сателита, плава боја представља *PS* који се померају према сателиту.

Трансформисана одговарајућа компонента *LOS* геометрије у вертикалну компоненту брзине померања приказана је на слици 75. Резолуциона ћелија износи 50 метара, 8951 *PS* је генерисан. На слици 76 приказан је хистограм добијених вертикалних померања.



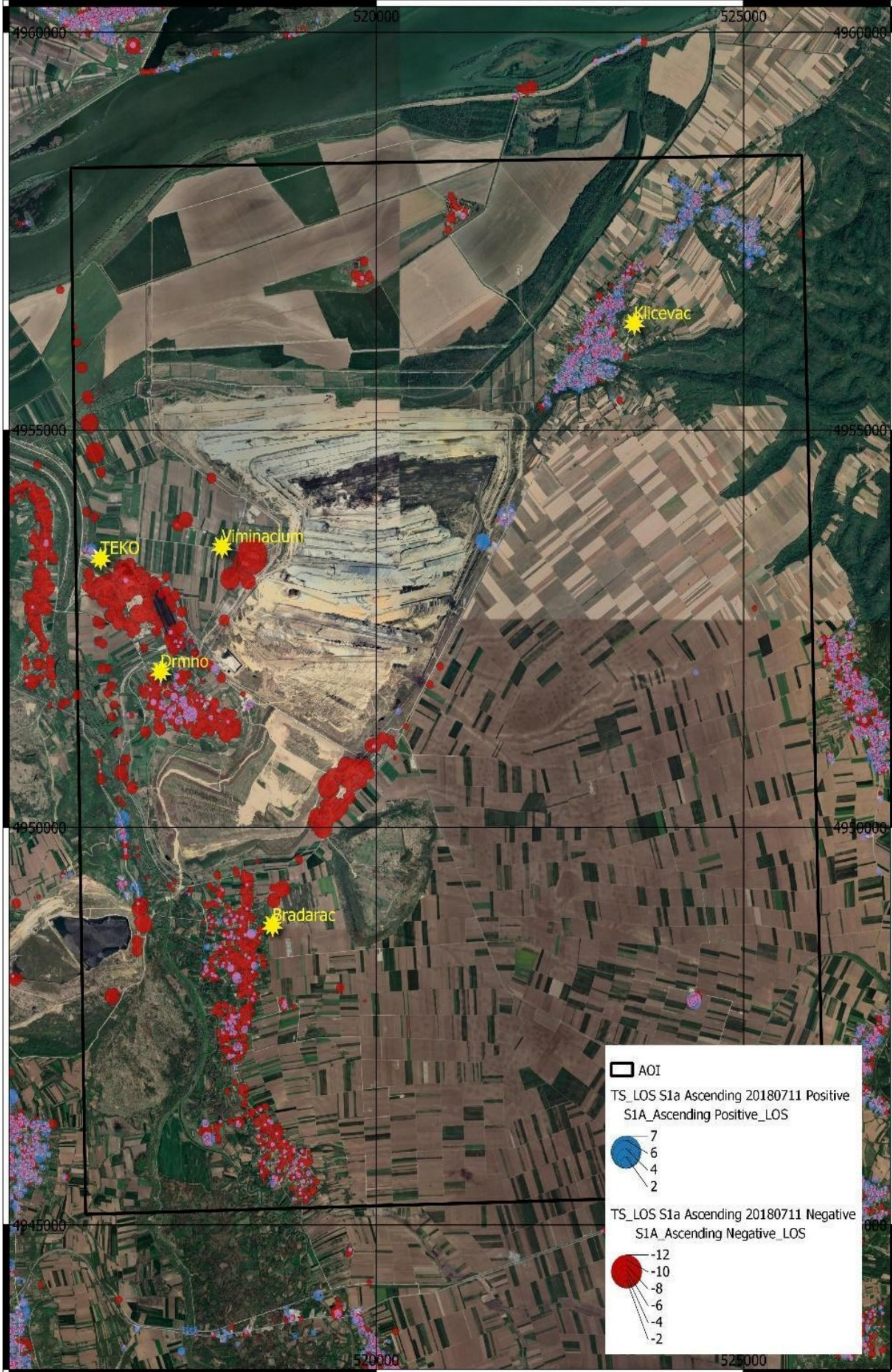


Слика 75. Вертикална брзина слегања PS (mm/god) после трансформације LOS у правоуглу геометрију, генерисаних са Сентинел-1 А и Сентинел-1 Б узлазне и силазне сателитске орбите за ПОИ; нијансе црвене боје представљају негативна померања PS (слегања), нијансе плаве боје представљају позитивне вредности за PS (издизање) (величина резолуционе ћелије је 50 метара).



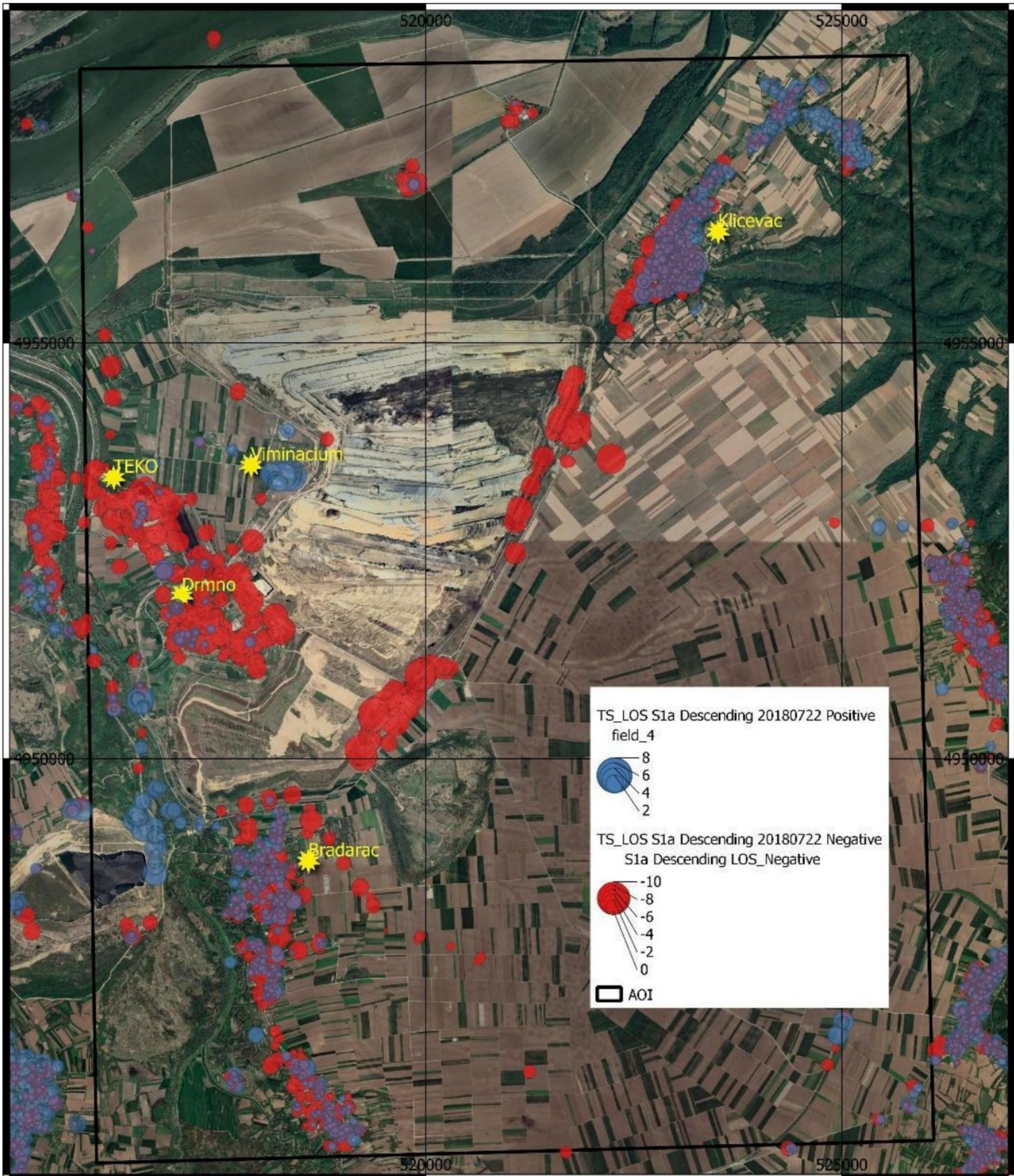
Слика 76. Хистограм вертикалних брзина померања за PS побтојаних по различитим кластерима. Укупан број вертикалних брзина померања PS је 8951 за процесирано ПОИ.

На слици 77 приказане су вредности *LOS* померања површи терена за ПОИ за Сентинел-1 А узлазну путању сателита, где су црвеном бојом представљена померање за PS у правцу од сателита, док плава боја представља PS који се померају према сателиту.



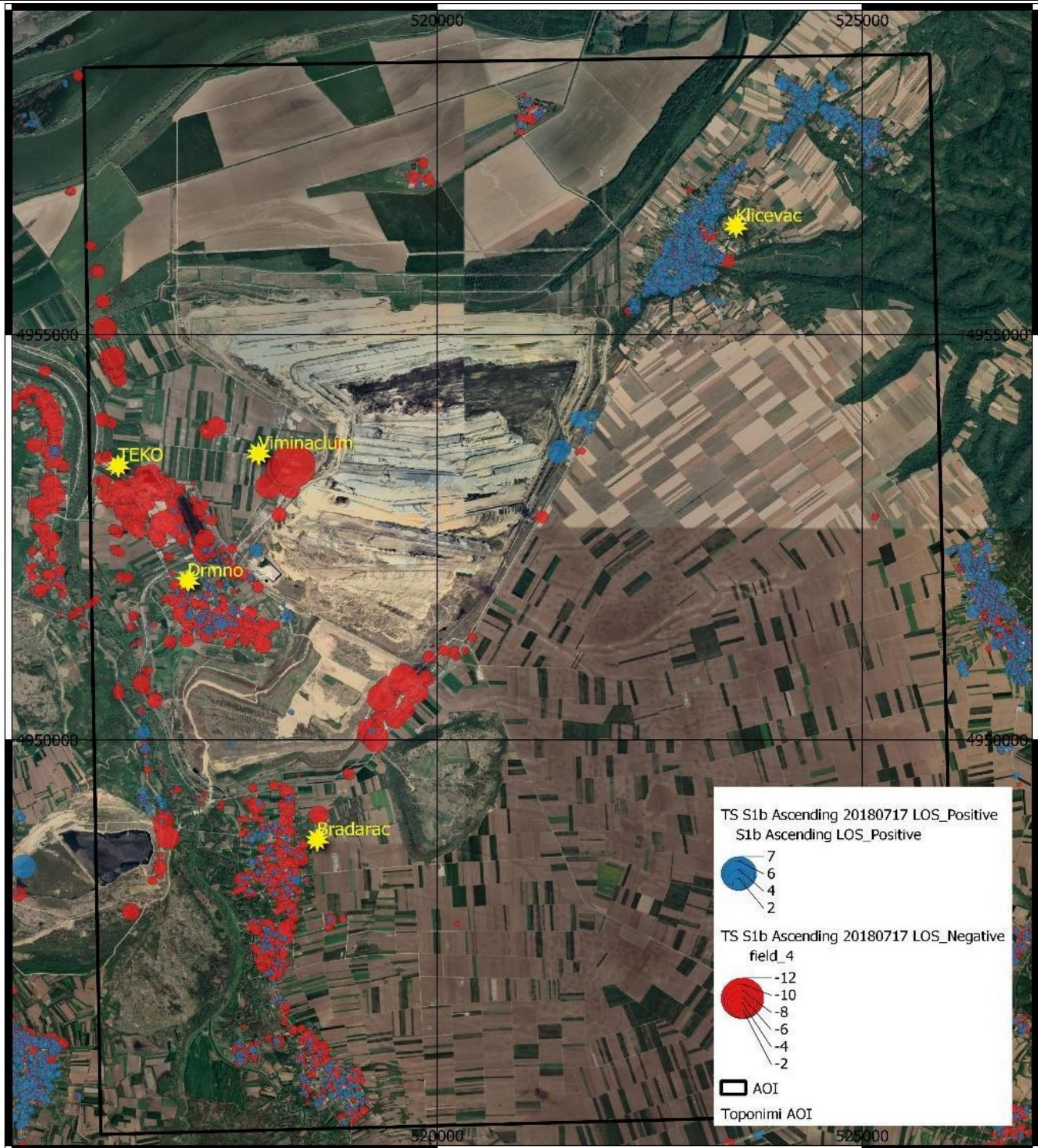
Слика 77. LOS брзине слегање PS (mm/year) генерисаних са Сентинел-1 А узлазне сателитске орбите за ПОИ; црвена боја представља померање PS од сателита, плава боја представља PS који се померају према сателиту.

На слици 78 приказане су вредности *LOS* померања површи терена за ПОИ за Сентинел-1 А силазну путању сателита.



Слика 78. *LOS* брзине слегање *PS* (mm/god) генерисаних са Сентинел-1 А силазне сателитске орбите за ПОИ; црвена боја представља померање *PS* од сателита, плава боја представља *PS* који се померају према сателиту.

На слици 79 приказане су вредности *LOS* померања површи терена за ПОИ за Сентинел-1 Б узлазну путању сателита.



Слика 79. LOS брзине слегање PS (mm/god) генерисаних са Сентинел-1 Б узлазне сателитске орбите за ПОИ; црвена боја представља померање PS од сателита, плава боја представља PS који се померају према сателиту.

#### 4.3 Резултати нивелманских мерења на нултој и осталим епохама у оквиру радова на стабилности димњака новог блока Б3 у „ТЕ КОСТОЛАЦ Б“

За изравнање *ID* нивелманске мреже коришћена је *MNK* метода, док се за одређивање деформација и померање користила Пелцорова метода статичког модела одређивања померања тачака и деформација објеката, (*Пројекат геодетског 1Д и 2Д осматрања димњака новог блока Б3 у ТЕ КОСТОЛАЦ Б у току грађења и експлатације објекта*”, 2019).



### 4.3.1 Изравнање нулте епохе

Обрада резултата мерења извршена је кроз процесе обраде, изравнања и тестирања на грубе грешке. Обрада резултата мерења подразумева рачунање средњих вредности висинских разлика између репера у једном смеру нивелања а затим и у другом смеру нивелања. Овако обрађени резултати су коришћени за изравнање и добијање прираштаја и дефинитивних висина тражених тачака-репера. Тестирање резултата мерења на грубе грешке извршено је глобалним и *DATASNOOPING* тестом и утврђено је да не постоје грубе грешке у резултатима мерења. Изравнање је извршено методом најмањих квадрата, по моделу посредног изравнања.

Изравнање је потврдило веома висок квалитет реализованих мерења. Максимални стандард мерења (висинске разлике) из изравнања износи  $\sigma_{\Delta h_{max}} = 0,53$  mm, док је просечни стандард мерења из изравнања  $\sigma_{\Delta h_i} = 0,44$  mm. На основу оцене непознатих параметара, тј. висина тачака/репера, из изравнања је добијен максимални стандард висина  $\sigma_{H_{max}} = 0,21$  mm, док је просечни стандард висина из изравнања  $\sigma_{H_i} = 0,17$  mm. Добијена средња квадратна грешка јединице тежине у коначном изравнању износи  $m_0 = 0,861$  mm.

На основу изравнања резултата мерења може се закључити да средње грешке висина припадају интервалу [0,13 mm до 0,21 mm], да средња грешка јединице тежине износи  $m_0=0,861$  mm, што указује на веома високу тачност одређивања висина репера. Обзиром на добијену тачност и имајући у виду да средња вредност фактора унутрашње поузданости *ID* мреже износи 0,60, може се закључити да су постигнути резултати на изузетно високом нивоу квалитета.

На основу добијених резултата могло се закључити да је примењена методологија конзистентна и да је постигнута висока поузданост резултата мерења. Дефинитивне вредности висина репера после изравнања нулте епохе са оценом тачности приказане су у табели 4.

Табела 4. Висине репера после изравнања нулте епохе.

| Репер                   | HR52    | HR53    | HR35    | HR1     | HR2    | HR3     | HR4     | HR5     | HR6     |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Изравнате висине</b> | 74,8985 | 76,2434 | 76,6445 | 76,7691 | 7,7574 | 76,7476 | 76,7287 | 77,0251 | 77,0895 |
| <b><math>m_h</math></b> | 0,197   | 0,201   | 0,210   | 0,127   | 0,126  | 0,143   | 0,129   | 0,204   | 0,201   |

### 4.3.2 Изравнање и одређивање деформација осталих епоха

За одређивање деформација и померање користила се Пелцорова метода статичког модела одређивања померања тачака и деформација објеката према усвојеном пројекту. Основне карактеристике одређивања деформација на овај начин су: третирање основне мреже и мреже тачака на објекту као целине, коришћење инваријантних тестова при тестирању подударности делова мреже, тестирање подударности (стабилности) тачака основне мреже у свакој епохи мерења, просторно одређивање померања тачака објеката са симултатним статистичким закључивањем, и висока моћ коришћених критеријума тестирања.

У табели 5 приказане су вредности висина и средњих грешака после изравнања од прве до девете епохе, такође су у првој колони приказани датуми реализације теренских радова на мерењима висинских разлика за репере основне мреже.

Табела 5. Вредности висина репера и средњих грешака после изравнања приказаним по епохама мерења за основне репере.

| Датум      | Епоха           | HR52    | HR53    | HR35    | HR5     | HR6     |
|------------|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 30 04 2019 | E1 – h [m]      | 74,8988 | 76,2435 | 76,6447 | 77,0251 | 77,0896 |
|            | E1 – $m_h$ [mm] | 0,23    | 0,23    | 0,24    | 0,24    | 0,23    |
| 29 05 2019 | E2 – h [m]      | 74,8997 | 76,2443 | 76,6453 | 77,0261 | 77,0904 |
|            | E2 – $m_h$ [mm] | 0,15    | 0,15    | 0,15    | 0,15    | 0,15    |



|            |                          |         |         |         |         |         |
|------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 28 06 2019 | E3 – h [m]               | 74,9005 | 76,2445 | 76,6467 | 77,0265 | 77,0905 |
|            | E3 – m <sub>h</sub> [mm] | 0,19    | 0,19    | 0,19    | 0,2     | 0,19    |
| 05 09 2019 | E4 – h [m]               | 74,9016 | 76,2452 | 76,6476 | 77,0268 | 77,0903 |
|            | E4 – m <sub>h</sub> [mm] | 0,13    | 0,13    | 0,13    | 0,13    | 0,13    |
| 18 11 2019 | E5 – h [m]               | 74,9024 | 76,2468 | 76,6483 | 77,0277 | 77,0906 |
|            | E5 – m <sub>h</sub> [mm] | 0,15    | 0,15    | 0,16    | 0,15    | 0,16    |
| 11 02 2020 | E6 – h [m]               | 74,9024 | 76,2468 | 76,6472 | 77,028  | 77,0911 |
|            | E6 – m <sub>h</sub> [mm] | 0,09    | 0,09    | 0,09    | 0,09    | 0,09    |
| 09 04 2020 | E7 – h [m]               | 74,9025 | 76,2466 | 76,6473 | 77,0278 | 77,0908 |
|            | E7 – m <sub>h</sub> [mm] | 0,1     | 0,1     | 0,1     | 0,1     | 0,1     |
| 13 07 2020 | E8 – h [m]               | 74,9017 | 76,2448 | 76,6469 | 76,7433 | 76,7244 |
|            | E8 – m <sub>h</sub> [mm] | 0,18    | 0,18    | 0,18    | 0,12    | 0,11    |
| 22 02 2021 | E9 – h [m]               | 74,9019 | 76,2455 | 76,6462 | 77,0283 | 77,0965 |
|            | E9 – m <sub>h</sub> [mm] | 0,18    | 0,18    | 0,18    | 0,12    | 0,11    |

Изравнање прве епохе је потврдило веома висок квалитет реализованих мерења. Максимални стандард мерења (висинске разлике) из изравнања износи  $\sigma_{\Delta h_{max}} = 0,38$  mm, док је просечни стандард мерења из изравнања  $\sigma_{\Delta h_i} = 0,26$  mm. На основу оцене непознатих параметара, тј. висина тачака/репера, из изравнања је добијен максимални стандард висина  $\sigma_{H_{max}} = 0,24$  mm, док је просечни стандард висина из изравнања  $\sigma_{H_i} = 0,19$  mm. На основу изравнања резултата мерења може се закључити да средње грешке висина припадају интервалу [0,14 mm до 0,24 mm], средња грешка јединице тежине износи  $m_0=0.987$  mm, што указује на веома високу тачност одређивања кота тачака-репера. Обзиром на добијену тачност и имајући у виду да средња вредност фактора унутрашње поузданости  $ID$  мреже износи 0,60, може се закључити да су постигнути резултати квалитетни (Табела 5).

Изравнање преосталих епоха урађени су по истој методологији као и прва епоха, а резултати су приказани у табели 5.

При тестирању хомогености нулте и прве епохе мерења добијено је да је тачност опажања хомогена у обе епохе. Након тога се приступило испитивању подударности мреже у две епохе, где су резултати показали да су и контролна и мрежа на објекту подударне и да за прву епоху нема померања репера у вертикалној равни. Вредности померања основних репера по епохама мерења на основу одређивања Пелцеровом методом дате су у табели 6.

Тестирања су урађена идентично и за преостале епохе, од друге до девете, (Табела 6).

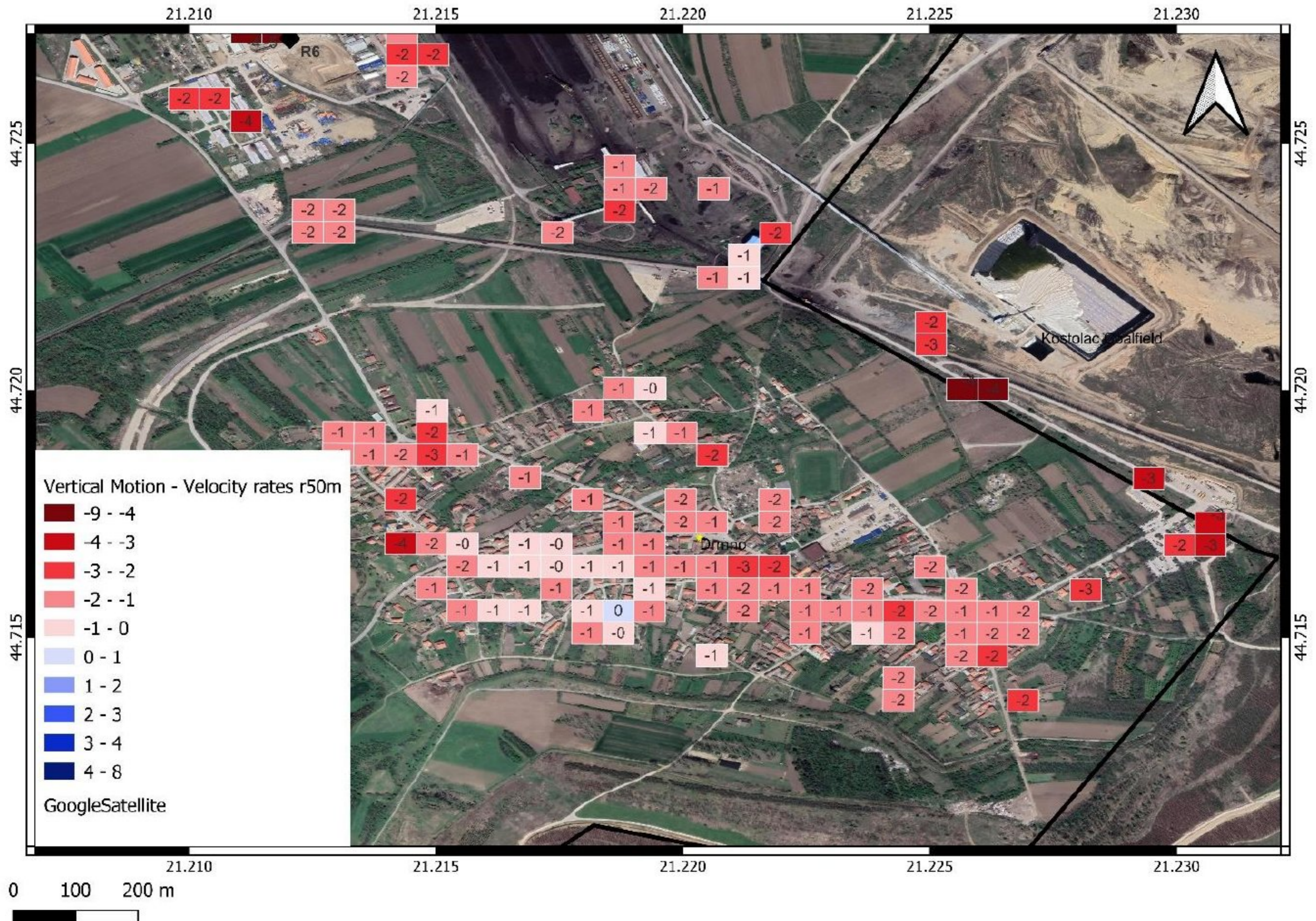
Табела 6. Вредности померања основних репера у вертикалној равни по епохама мерења, на основу Пелцерове методе.

| Репер     | Епоха 1  | Епоха 2      | Епоха 3      | Епоха 4      | Епоха 5      | Епоха 6      | Епоха 7     | Епоха 8     | Епоха 9     |
|-----------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| R52       | 0        | -1,15        | -1,93        | 0            | 0            | 0            | -1,01       | -0,8        | -1,4        |
| R53       | 0        | -0,86        | -0,9         | -1,18        | 0            | 0            | 0           | 1,01        | 0           |
| R35       | 0        | -0,8         | -2,14        | 0            | 0            | -0,82        | 0           | 0           | 0           |
| R5        | 0        | -1,05        | -1,39        | 0            | -1,05        | 0            | 0           | 0           | -1,3        |
| <b>R6</b> | <b>0</b> | <b>-0,87</b> | <b>-0,97</b> | <b>-1,26</b> | <b>-2,58</b> | <b>-1,49</b> | <b>-1,4</b> | <b>-1,4</b> | <b>-5,1</b> |

#### 4.4 Подручје села Дрмно

Подручје села Дрмно налази се у близини рудника, и овај део је у прошлости био највише оптерећен радовима на руднику као и око рудника. У последњих шест година овај део је знатно растерећен како се експлоатација угља удаљавала од села према северу. Слика 80 приказује брзине слегања од -4,5 mm/god до 0 mm/god, где се може видети да цела територија села Дрмна подлеже слегању. Слегање у подручју Дрмна је доминантно и има максималну вредност на

самој граници са рудником. Табела 7 приказује статистичке параметре за вредности  $PS$  у оквиру подручја Дрмно, као и хистограм  $PS$  на слици 81.

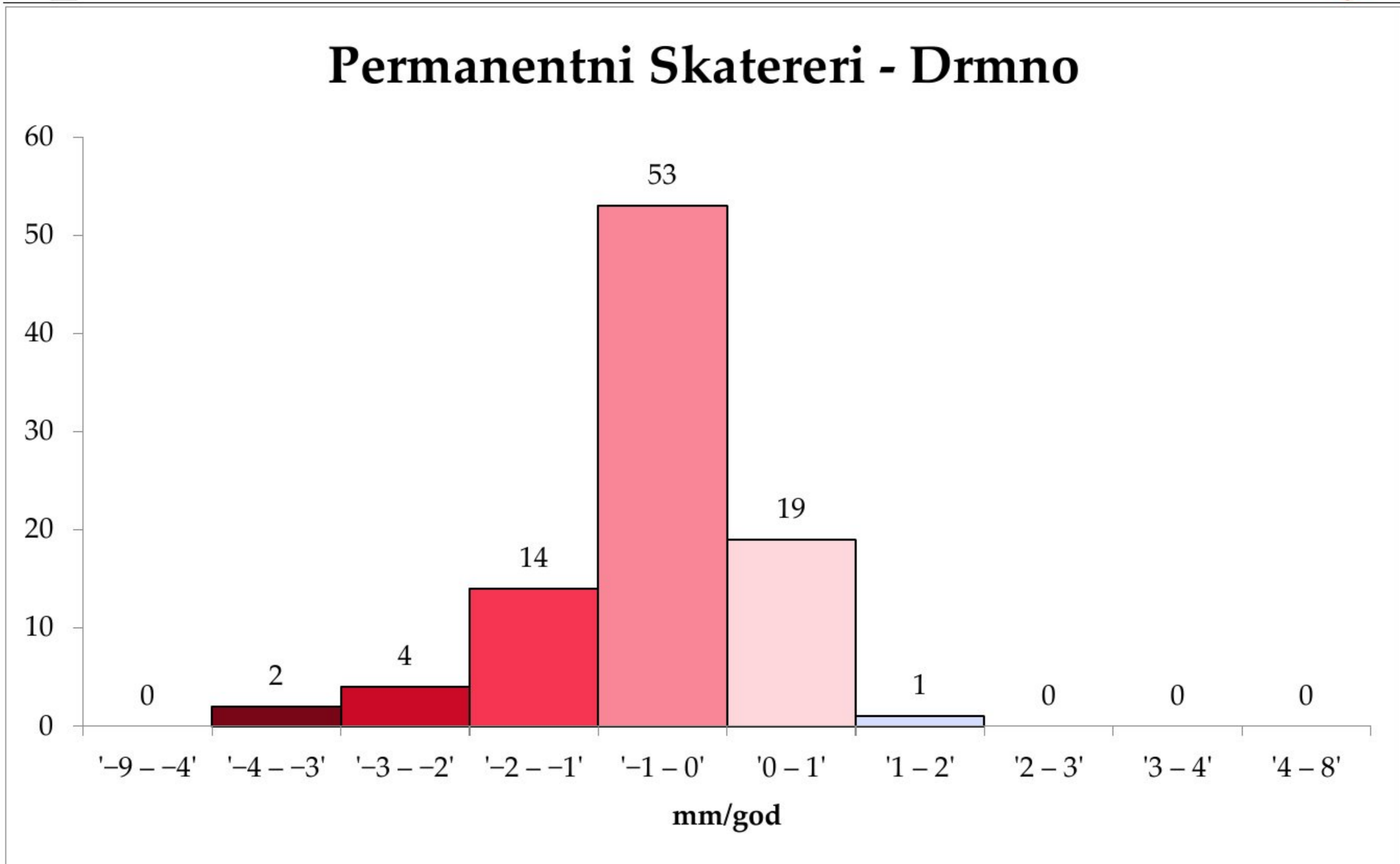


Слика 80. Вертикална брзина слегања  $PS$  (mm/god) за подручје села Дрмно; нијансе црвене боје представљају негативна померања  $PS$  (слегања), нијансе плаве боје представљају позитивне вредности за  $PS$  (издизање) (величина резолуционе ћелије је 50 метара), (Гојковић и др., 2023).

Табела 7.  $PS$  статистика за подручје села Дрмно (50 метара резолуција растера).

| $PS$   | Макс.    | Мин.     | Средње издизање | Средње слегање | Средња вредност померања |
|--------|----------|----------|-----------------|----------------|--------------------------|
| Укупно | [mm/god] | [mm/god] | [mm/god]        | [mm/god]       | [mm/god]                 |
| 93     | 0        | -4,5     | /               | -1,5           | -1,5                     |





Слика 81. Број перманентних скатерера за подручје села Дрмно распоређен по кластерима према величини брзине слегања.

#### 4.5 Подручја села Кличевац и Брадарац

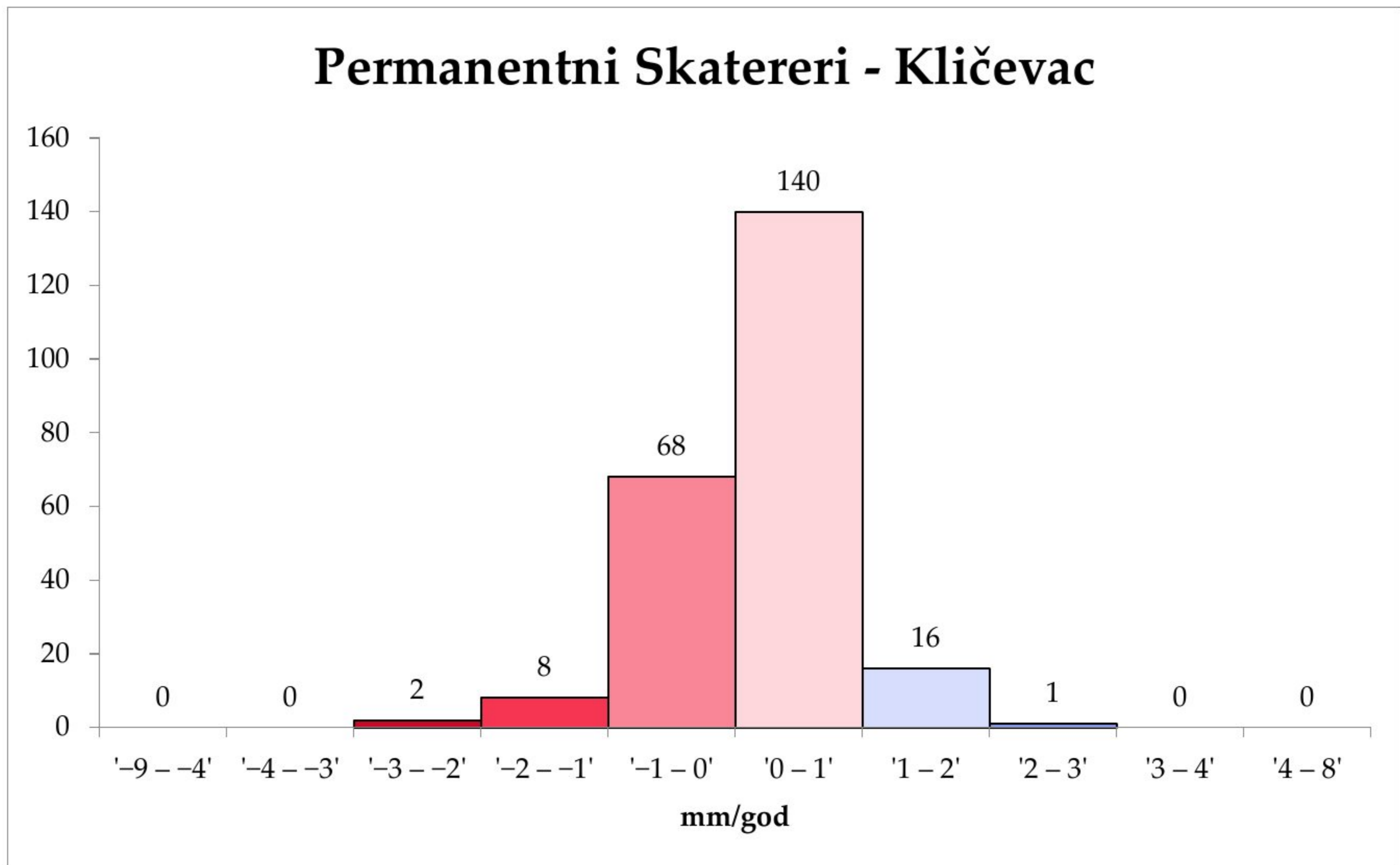
Подручје села Кличевац је позиционирано на североисточној страни од површинског копа, и већина активности и утицаја у данашње време производи се око овог села. ПК пролази поред села где се најближе куће налазе на око 200 метара удаљености, и експлоатација ће проћи веома близу првих насељених кућа у оквиру села. Слика 82 приказује вредности брзине померања *PS* за Кличевац област које се налазе у опсегу од  $-2,2$  mm/god до  $+2,4$  mm/god. Укупно 235 *PS* је коришћено да би се направила карта брзине померања приказана на слици 82, док је у табели 8 приказана основна статистика за вредности *PS*, као и хистограм на слици 83. Слегање на ивици површинског копа и села Кличевац јесте јасно уочљиво, док остатак подручја показује вертикално померање у позитивним вредностима (издизање) како се померамо од ивице ПК ка југозападној страни села, као и према североисточној страни села где издизање достиже свој максимум.





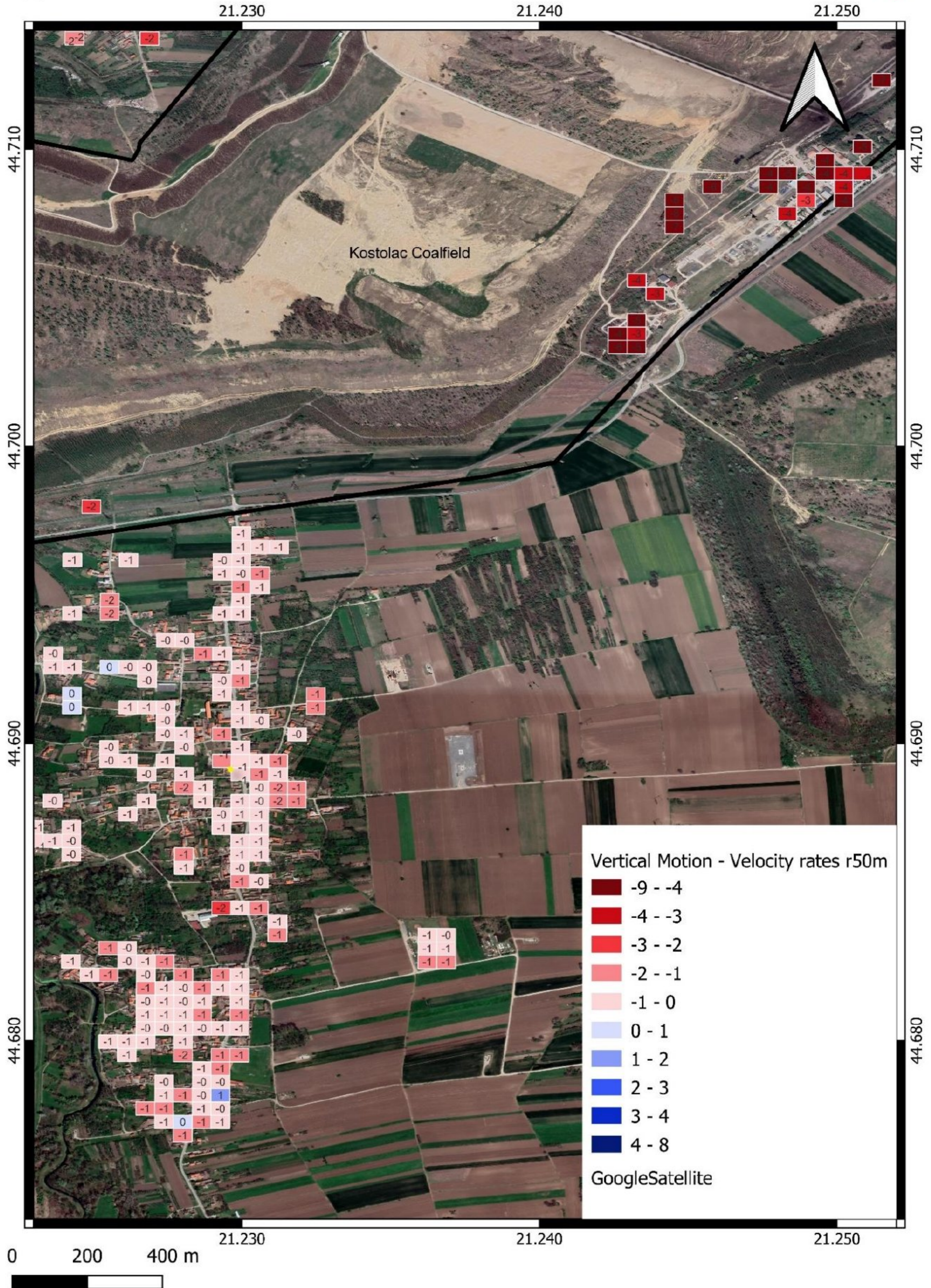
Табела 8. *PS* статистика за подручје села Кличевац и села Брадарац (50 метара резолуција растера).

| ПОИ      | <i>PS</i> | Макс.    | Мин.      | Средње издизање | Средње слегање | Средња вредност померања |
|----------|-----------|----------|-----------|-----------------|----------------|--------------------------|
|          |           | [mm/god] | [mm/ god] | [mm/ god]       | [mm/ god]      | [mm/ god]                |
| Кличевац | 235       | 2,4      | -2,2      | 0,5             | -0,5           | 0,2                      |
| Брадарац | 270       | 1,1      | -8,2      | 0,3             | -1,1           | -1,1                     |

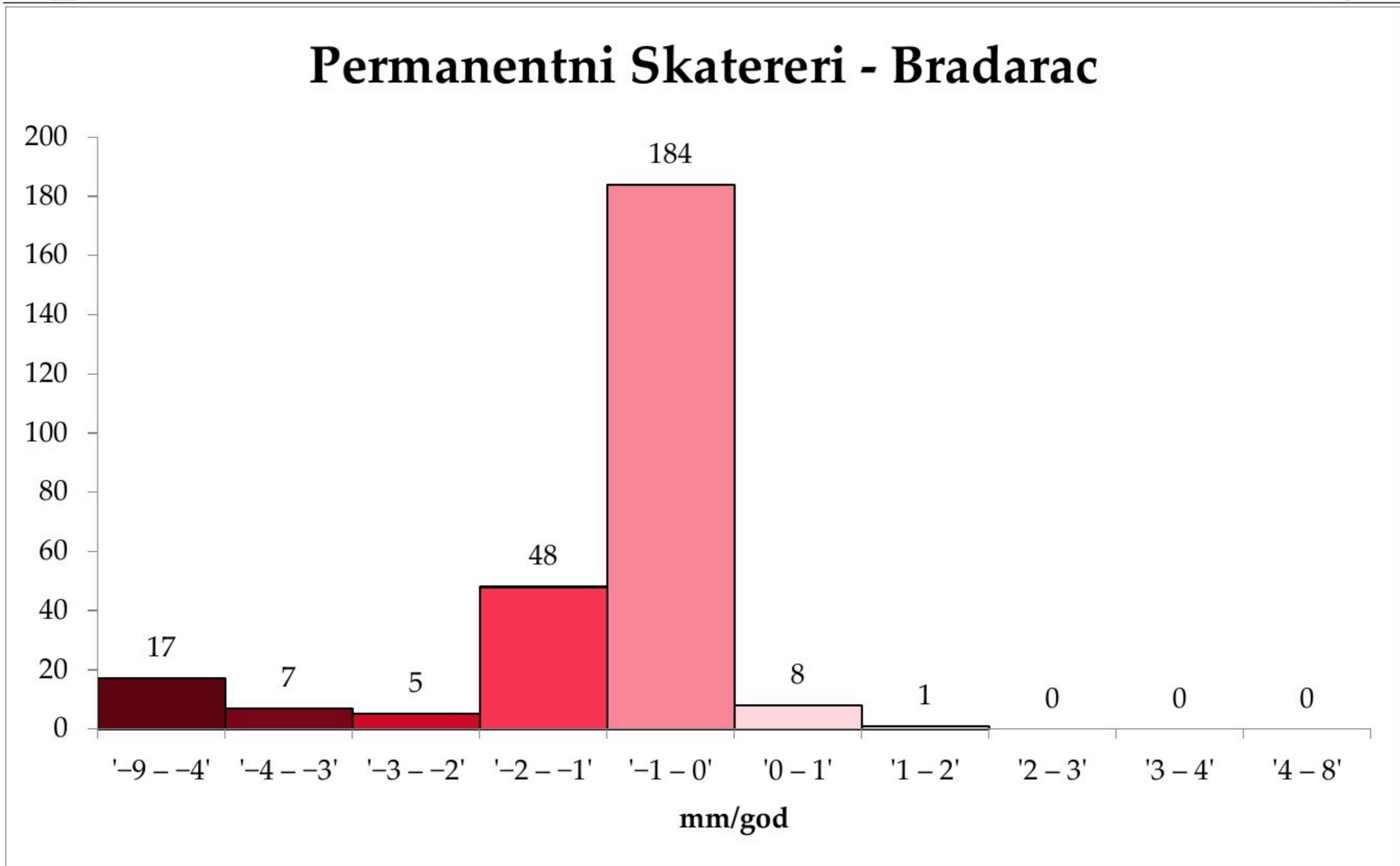


Слика 83. Број перманентних скатерера за подручје села Кличевац распоређен по кластерима према величини брзине слегања.

Подручје села Брадарац позиционирано је на јужној страни ПК. Слика 84 приказује деформациону карту подручја села Брадарац где се брзине слегања налазе у опсегу од -8,2 mm/god до +1,0 mm/god. *PS* који се налазе у близини ивице ПК достижу максималне вредности слегања од -8,2 mm/god. Како се *PS* удаљавају од ивице ПК вредности брзине слегања се смањују. Укупно 270 *PS* је употребљено за израду деформационе карте на подручју села Брадарац приказане на слици 84, док је статистика приказана у табели 8, као и на слици 85 где се може видети хистограм са вредностима слегања по кластерима.



Слика 84. Вертикална брзина слегања PS (mm/god) за подручје села Брадарац; нијансе црвене боје представљају негативна померања PS (слегања), нијансе плаве боје представљају позитивне вредности за PS (издизање) (величина резолуционе ћелије је 50 метара), (Гојковић и др., 2023).



Слика 85. Број перманентних скатерера за подручје села Брадарац распоређен по кластерима према величини брзине слегања.

#### 4.6 Подручје Термоелектране Костолац (ТЕКО)

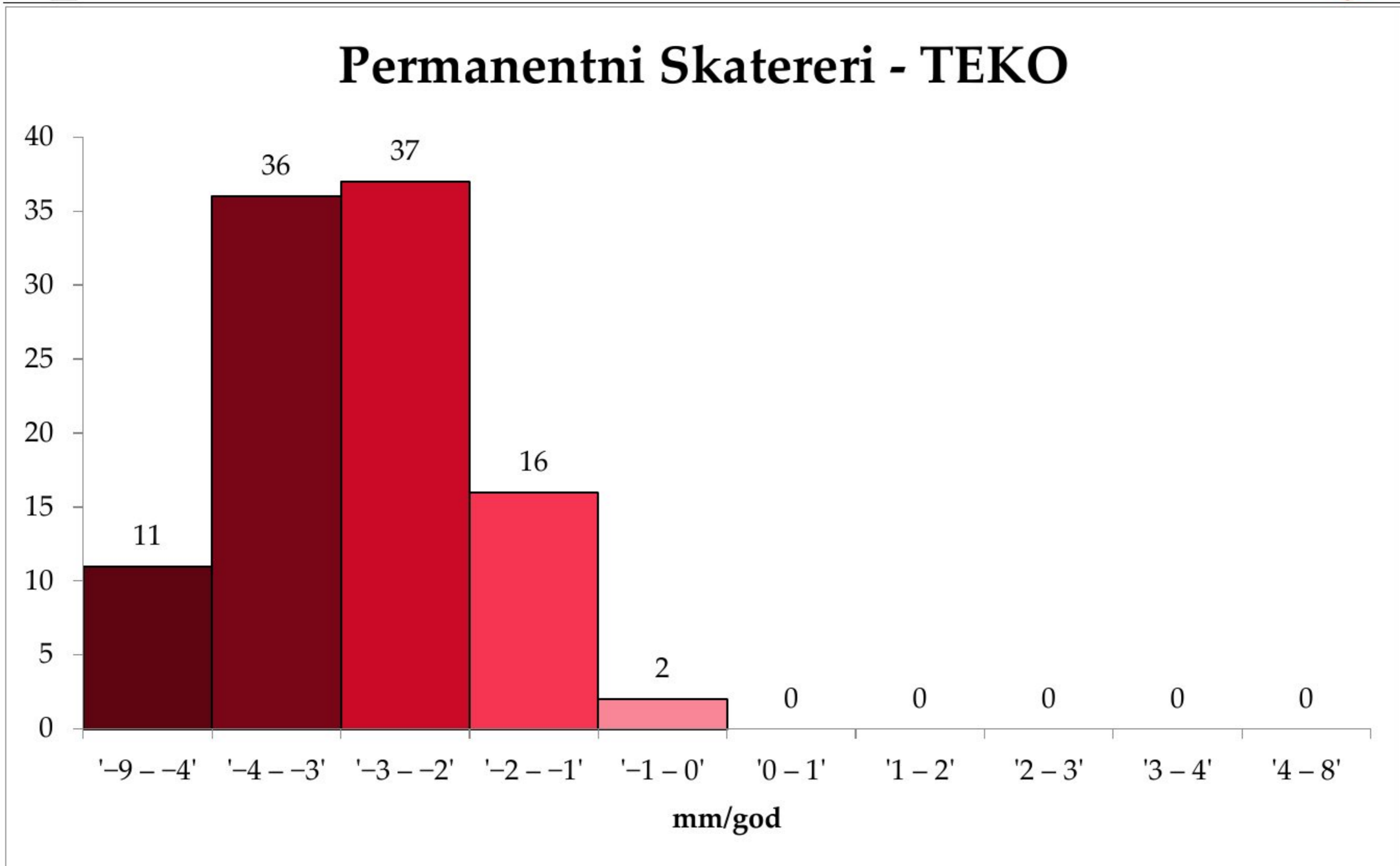
ТЕКО подручје позиционирано је на западној страни ПК и на северној страни подручја села Дрмно. Слика 86 приказује брзине слегања *PS* за ТЕКО подручје. Максимално слегање детектовано је на месту близу „ТЕ Костолац Б“, које је у опсегу од  $-5,0 \text{ mm/god}$  до  $-2,0 \text{ mm/god}$ . Укупно је 102 *PS* коришћено за израду карте вертикалних померања резолуције 50 метара и статистика *PS* је приказана у табели 9, као и на слици 87 где се на хистограму могу видети слегања по кластерима.



Слика 86. Вертикална брзина слегања PS (mm/god) за подручје ТЕКО; нијансе црвене боје представљају негативна померања PS (слегања), нијансе плаве боје представљају позитивне вредности за PS (издизање) (величина резолуционе ћелије је 50 метара). Црни ромбови представљају репере нивелманске мреже, (Гојковић и др., 2023).

Табела 9. PS статистика за подручје ТЕКО (50 метара резолуција растера).

| PS     | Макс.    | Мин.     | Средње издизање | Средње слегање | Средња вредност померања |
|--------|----------|----------|-----------------|----------------|--------------------------|
| Укупно | [mm/god] | [mm/god] | [mm/god]        | [mm/god]       | [mm/god]                 |
| 102    | -0,6     | -5,0     | /               | -2,9           | -2,9                     |

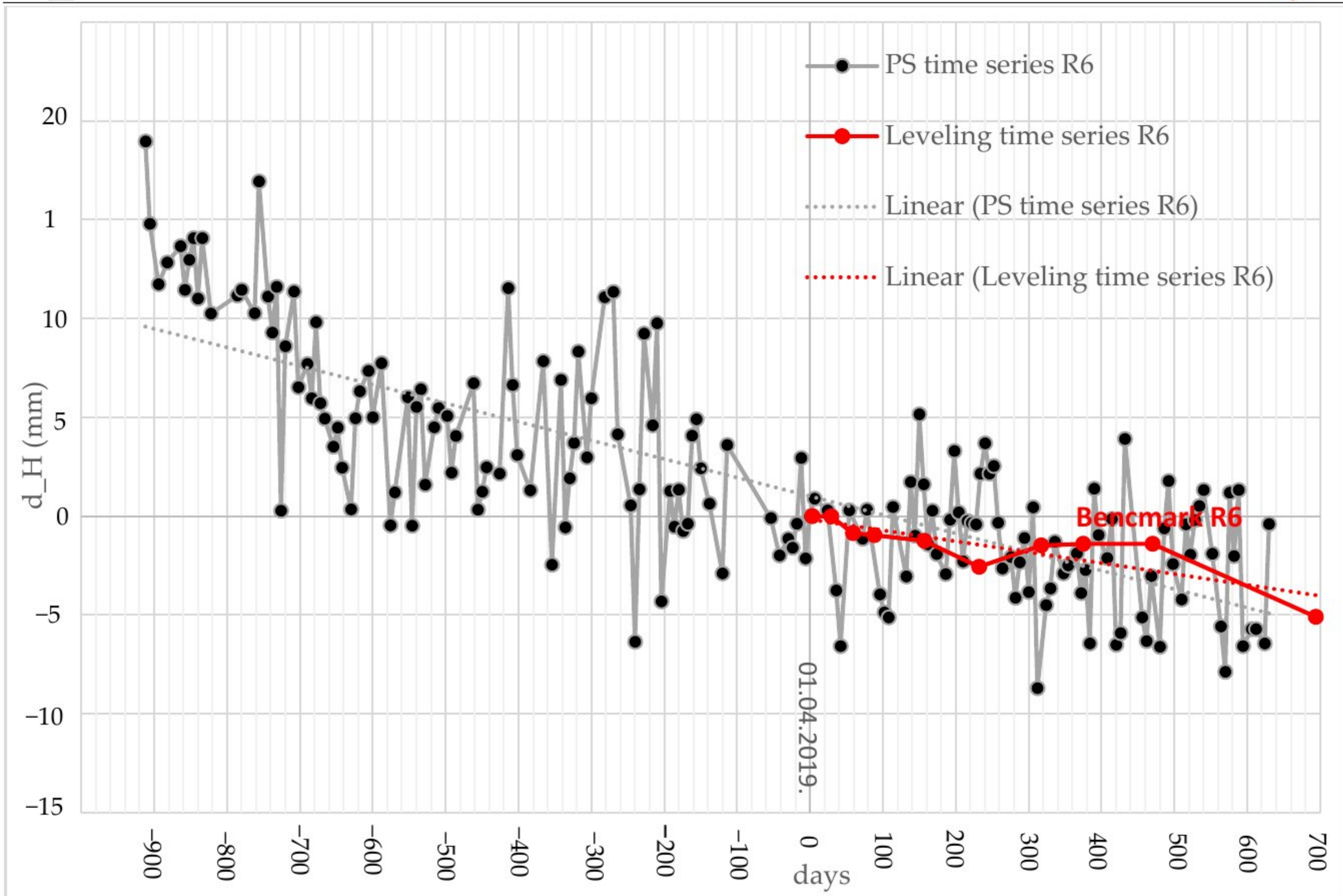


Слика 87. Број перманентних скатерера за подручје термоелектране Костолац (ТЕКО) распоређен по кластерима према величини брзине слегања.

#### 4.6.1 ТЕКО подручје са реперима нивелманске мреже

Основна нивелманска мрежа је опажана у циљу праћења стабилности при изради новог димњака у оквиру плана унапређења производње и повећања капацитета термоелектране Костолац. Основна нивелманска мрежа садржи пет репера: R52, R53, P35, R5 и R6 који су стабилизовани на одређеним објектима и представљају стабилне репере за мониторинг слегања димњака за време изградње као и даље употребе (слика 86). Такође, постоје још четири радна репера који су уграђени директно на димњак за опажање слегања. Епохе нивелмана урађене су од стране подизвођача кога је унајмио ТЕКО и трајале су од априла 2019. године до фебруара 2021. године. Епохе су садржале вредности слегања димњака приликом његове израде и искоришћене су за верификацију резултата добијених методом *PS* интерферометрије.

*PS InSAR* вертикална померања референцирана су на исти датум као и почетак нивелманских епоха да би подаци били упоредиви са подацима нивелмана. Геодетски тим за нивелање користећи примењене методе геодетског нивелмана, дошао је до вредности слегања на реперу R6 од  $-2,7 \text{ mm/god}$  (слика 88), док се у оквиру ове дисертације дошло до вредности слегања од  $-3,4 \text{ mm/god}$  на *PS* који се поклапа са репером R6. Пирсонова корелација између резултата *PS* и репера R6 износи 85% са *p*-вредности од 0,015. Репер R6 био је једини који се преклапа директно са *PS*, где је *PS* представљао кров објекта у чијој је основи био стабилизован репер R6.



Слика 88. Репер R6, PS временске серије и временске серије (епохе) нивелмана. Тачкасте линије представљају трендове PS и нивелманских временских серија. (Гојковић и др., 2023).

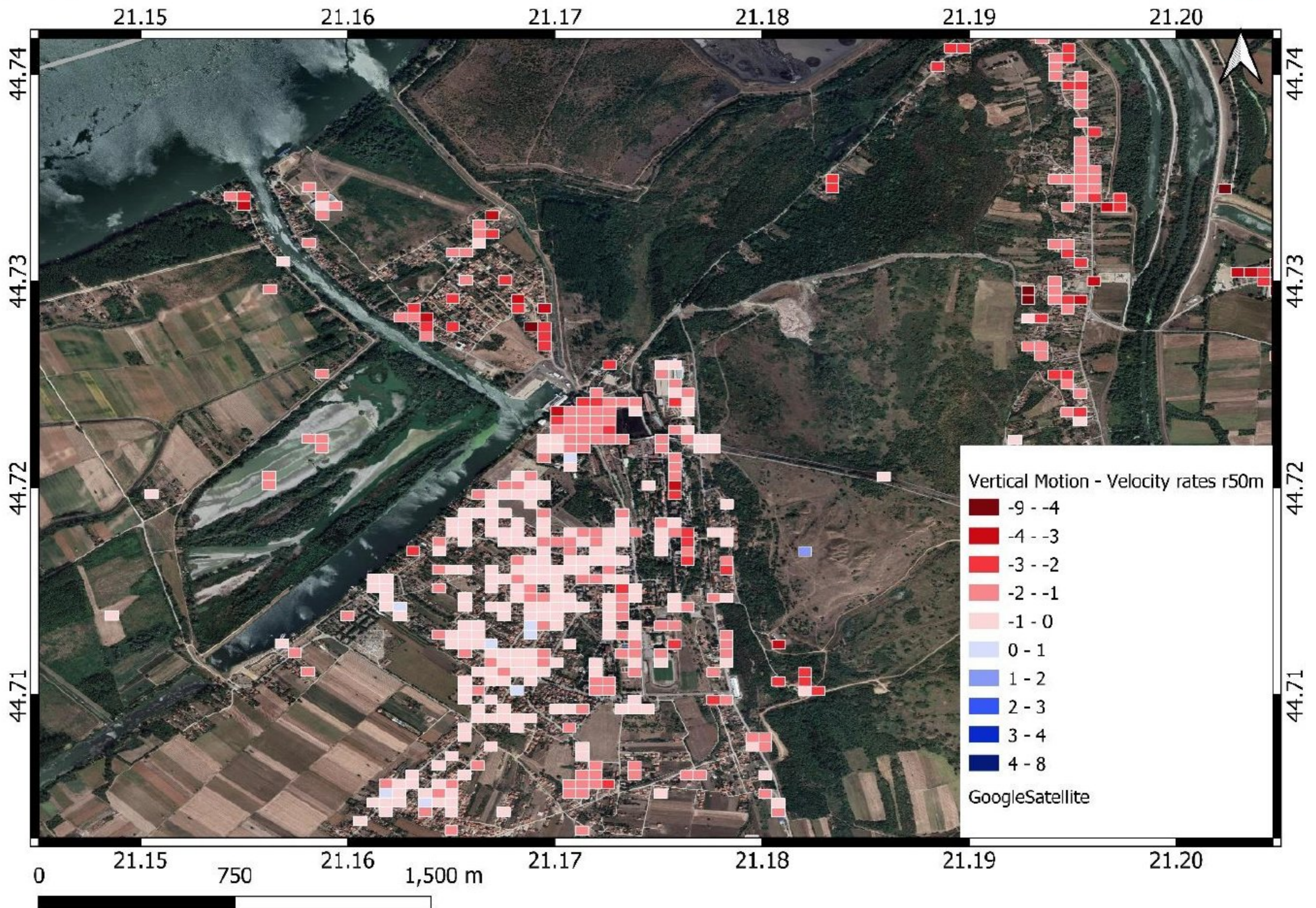
#### 4.7 Подручје Костолац

Насеље Костолац налази се пет километара западно од површинског копа. У северном делу подручја налазе се постројења термоелектране, као и објекти речног и копненог инфраструктурног транспортног чвора. Целокупно подручје показује тренд слегања, које се јасно може видети на слици 89, и које се повећава од југа према северу подручја, где су и активности највеће. Максимално детектовано слегање је  $-4,3 \text{ mm/god}$ . Статистика резултата PS приказана је у табели 10, као и хистограм на слици 90.

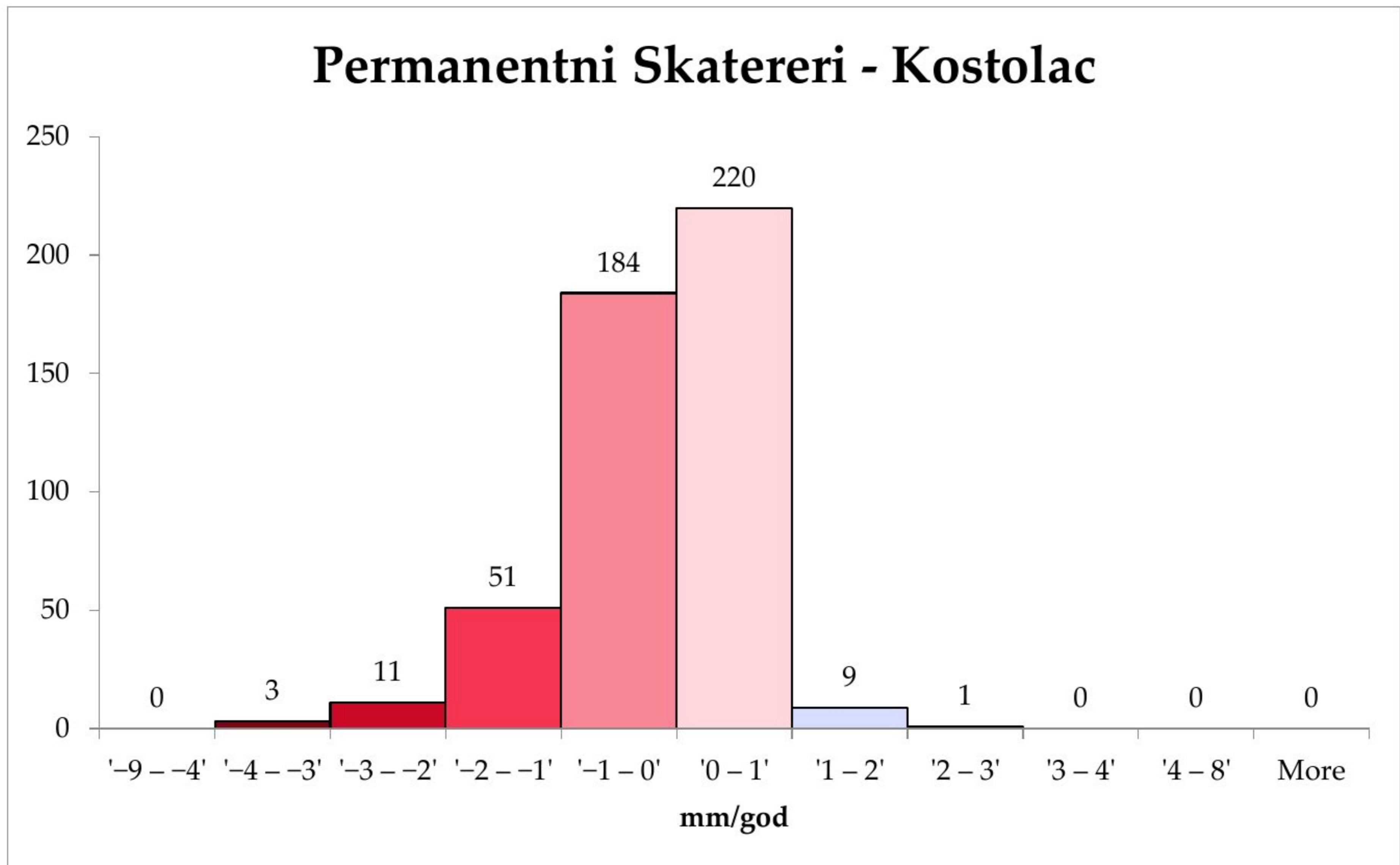
Табела 10. PS статистика за подручје Костолац (50 метара резолуција растера).

| PS     | Макс.    | Мин.     | Средње издизање | Средње слегање | Средња вредност померања |
|--------|----------|----------|-----------------|----------------|--------------------------|
| Укупно | [mm/god] | [mm/god] | [mm/god]        | [mm/god]       | [mm/god]                 |
| 479    | 1,0      | -4,3     | 0,3             | -1,2           | -1,2                     |





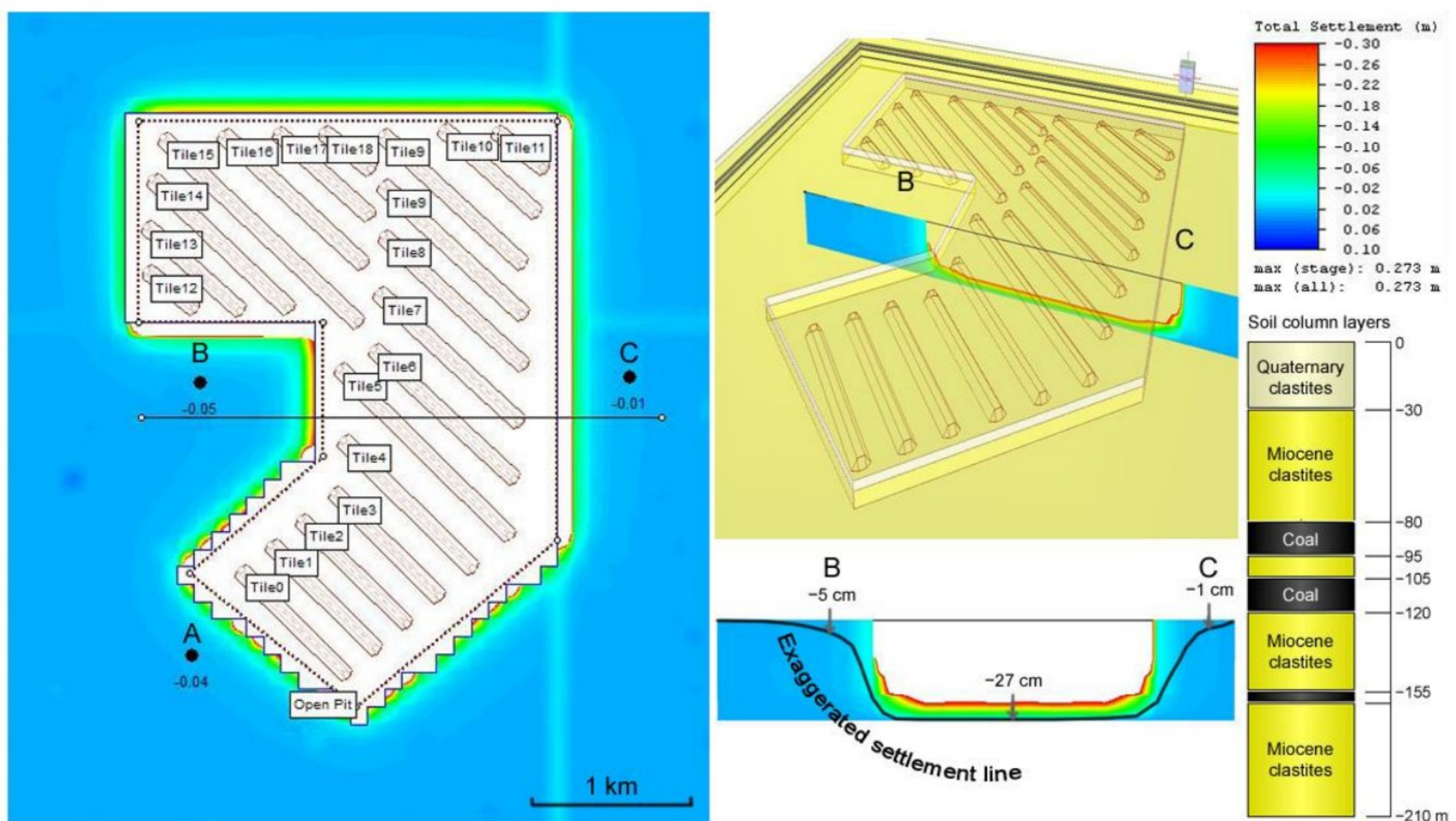
Слика 89. Вертикална брзина слегања PS (mm/year) за подручје Костолац; нијансе црвене боје представљају негативна померања PS (слегања), нијансе плаве боје представљају позитивне вредности за PS (издизање) (величина резолуционе ћелије је 50 метара), (Гојковић и др., 2023).



Слика 90. Број перманентних скатерера за подручје Костолац распоређен по кластерима према величини брзине слегања.

## 4.8 Модел слегања

Модел слегања односи се на подручје села Дрмно и села Брадарац, и обухвата простор крајње јужне границе ПК Дрмно. Симулација, под претпостављеним особинама и условима, показује да површинско слегање од оптерећења може достићи значајне вредности, нпр.  $-4,0$  cm за подручје и  $-5,0$  cm за цело село Дрмно. Такође,  $-1,0$  cm слегања се може очекивати у подручју Брадарац (Слика 91), црне тачке, видети део 2.7 за детаље о геотехничким својствима). Ово су непосредна слегања која се могу закључити на основу модела, али њихове укупне вредности се доста добро поклапају са *PS InSAR* четворогодишњим опажањима на овом подручју. Нпр, на првој контролној тачки (А)  $-4,0$  cm моделованог слегања одговара мереном *PS InSAR* слегању од  $-4,5$  mm/god, што износи  $-1,8$  cm укупно (за цео временски период опажања, четири године). У оквиру подручја Брадарац где се налази друга контролна тачка је супротно. Мерено *PS InSAR* слегање износи  $-8,2$  mm/god, што укупно износи  $-3,3$  cm, док моделовано слегање износи  $-1,0$  cm, али и даље показује исти тренд. На западној периферији (на трећој контролној тачки Б), мерено је  $-2,2$  mm/god, што укупно износи  $-0,9$  cm за период опажања, док је моделовано слегање око  $-5,0$  cm. Имајући у виду да је модел слегања поједностављен и базиран на грубој процени улазних параметара, компарација показује да се модел доста добро поклапа са мереним вредностима. Даља унапређења модела слегања, која тренутно нису изводљива због недостатка оперативних геотехничких података, могу резултовати у још бољем поклапању (нпр., претпостављајући присуство порних притисака и примарном консолидацијом или чак секундарним слегањем, које се може оправдати анализом дужег периода временских серија).



Слика 91. Плански (лево), коси поглед (средина горе) и попречни профил (средина доле) модела слегања, са црним тачкама које представљају референтно слегање са слегањима датим у метрима (са десне стране налази се графичка презентација геолошког стуба, као додатак скали слегања), (Гојковић и др., 2023).



## 5 Закључак

Анализа временских серија и алгоритама процесирања описани су и објашњени детаљно. Целокупан процес није у потпуности аутоматизован, али, како се цео процес заснива на скрипт фајловима и алгоритмима за процесирање, могуће је исти аутоматизовати у потпуности. Процесирање је као резултат генерисало 8951 *PS* у хоризонталној односно вертикалној геометрији, где је површина ПОИ које је процесирано износила око 1000 квадратних километара. Узимајући у обзир и подручја под вегетацијом као и пољопривредна подручја, која заузимају око 50% ПОИ, где *SAR* сигнал није дао резултате, на крају се долази до густине од  $\sim 20$  *PS*/km<sup>2</sup>. Довољна густина поузданих *PS* у оквиру ПОИ представља и обезбеђује одличну основу за мониторинг деформација.

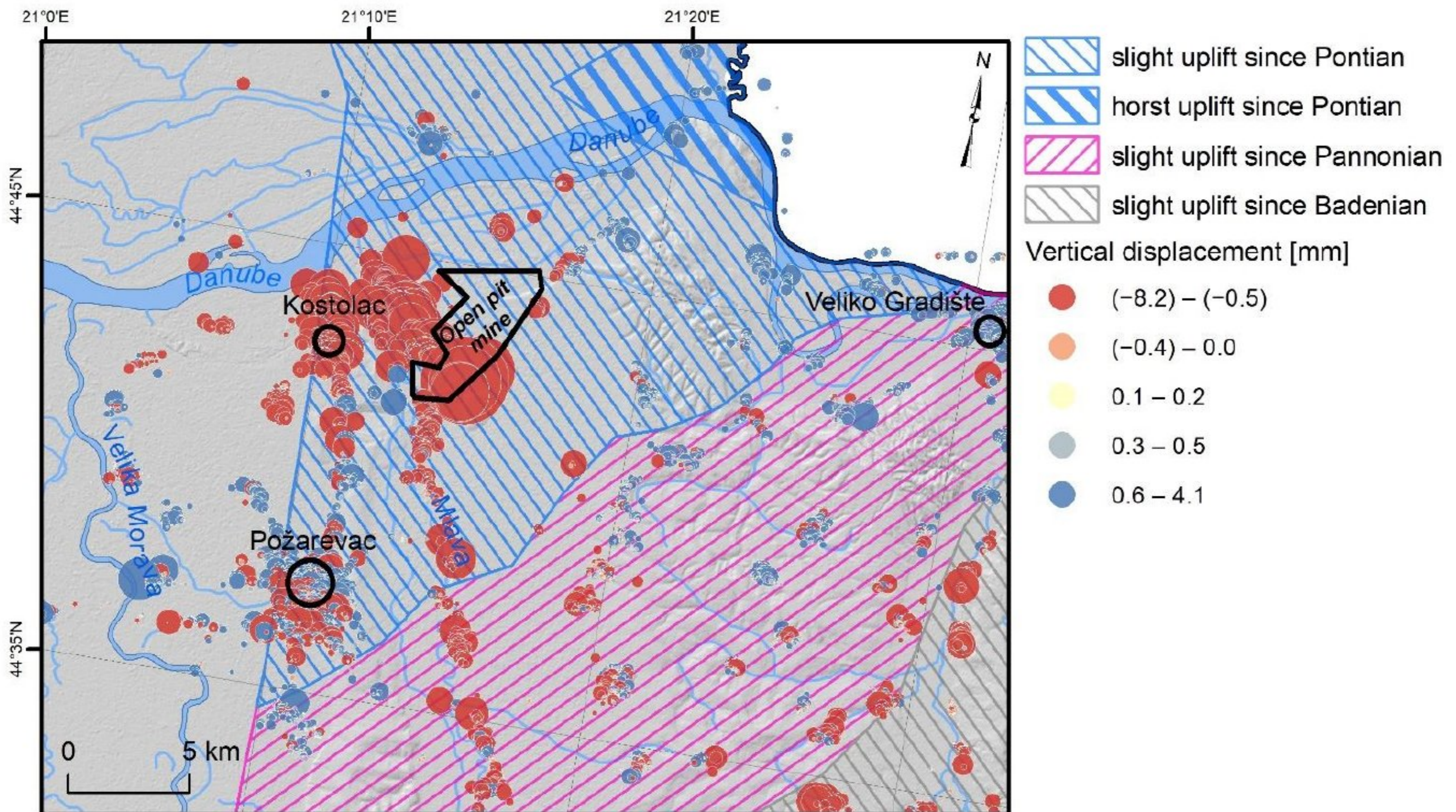
Најмањи број *PS* у оквиру насељених места забележен је у подручју Дрмно. Површина и густина вештачки направљених објеката, у Дрмну је значајно мања него у нпр. подручјима као што су Кличевац и Брадарац, па то може представљати један од разлога за нешто мањи број *PS* у оквиру села Дрмно. У истраживању и процесирању коришћена је само једна поларизација, (*VV*) канал из сателитских снимака. Коришћење обе поларизације (*VV+VH*) као и коришћење радарских снимка који су базирани на другим таласним дужинама, несумњиво би довело до генерисања већег броја *PS*.

Величина пиксела приликом растеризације генерисаних мапа сведена је на вредност од 50 метара за *PS* који су добијени комбиновањем *PS* који припадају узлазној орбити и *PS* који припадају силазној орбити.

ПОИ показује очигледан тренд издизања и слегања, где се јасно може уочити тренд слегања око границе ПК, као и у оквиру подручја термоелектране ТЕКО и у насељу Костолац, који су директно повезани са радовима у вези производње угља. Подручја која показују трендове издизања углавном су удаљена од границе ПК. Највећа вредност брзине слегања може се видети на западној страни у односу на ПК, где су смештени инфраструктурни објекти ТЕКО, као и реализација одређених археолошких радова. Резултати вертикалних померања који се односе на насељена подручја нису показали значајно велике деформационе вредности, док су делови везани за експлоатацију ТЕКО показали веће вредности деформација. Вредности брзина вертикалних померања у оквиру ПОИ одговарају интервалу од +2,4 mm/god у оквиру подручја Кличевац, све до максималне вредности слегања од -8,2 mm/god забележене у оквиру подручја Брадарац. Ови резултати корелисани су са резултатима који су добијени применом класичних геодетских метода, и резултатима преостала четири репера који прате тренд слегања. Процес верификације обављен је компарацијом *PS InSAR* резултата и резултата добијених применом нивелманске методе, где је репер R6 показао вредност Пирсоновог теста корелације од 85% са *p*-вредности од 0,015; где ови параметри потврђују значајну корелацију и препоручују овај метод као алтернативу геодетском нивелању. Истражујући слегање у оквиру насељених подручја, максималне вредности брзине слегања забележене су од -4,5 mm/god за Дрмно, -2,2 mm/god за Кличевац, -8,2 mm/god за Брадарац, -5,0 mm/god за ТЕКО и -4,3 mm/god за Костолац подручје. Максималн вредности брзина издизања су: +2.4 mm/god за Кличевац, +1,1 mm/god за Брадарац, +1,0 mm/god за Костолац, док вредности издизања нису регистроване за подручја која обухватају Дрмно и ТЕКО.

*PS InSAR* метод показао је велики потенцијал за мониторинг померања на површини терена који треба да обухвата велике временске периоде. Узимајући у обзир да је ово техника која се заснива на мисијама старим око једне деценије, за очекивати је да ће анализа геодинамичких померања постати веома популарна у будућности. У оквиру овог ПОИ, генерални правци издизања и трендови који описују померања одређени су из геолошких истраживања (*Ђоковић и др., 2018*). Компарацијом са финалним резултатима *PS InSAR* померања по годинама (слика 92), приметно је да насељена места Пожаревац и Велико Градиште као и села у источном делу

показују верикална померања са позитивним вредностима мале магнитуде (до 4 mm/god). Оваква померања могу бити у вези са геолошком позадином структурних блокова, који се крећу пре свега вертикално навише још од ере Миоцена и касније. Напротив, велики број *PS* са негативним вредностима вертикалних померања су у супротности са претходним. Ово се може објаснити ако се *PS* анализирају као мете које су оштећене услед разних утицаја, као што су минирање, клизишта итд., што је уобичајено за подручја у којима доминирају стене подложне деформацијама.



Слика 92. Компарација *PS* мерења и неотектонских трендова вертикалних померања навише (Peduto и др., 2022; Гојковић и др., 2023).

Важно је напоменути неколико ограничавајућих проблема који прате *SAR* систем и *PS InSAR* процедуру. Први проблем односи се на временску резолуцију (период поновног опажања), који је углавном био проблем у прошлости. Констелацијом сателита Сентинел-1 А и Сентинел-1 Б овај проблем је значајно унапређен где временска резолуција од шест дана омогућава мониторинг и истраживање на веома високом нивоу. Други проблем односи се на веома малу дистрибуцију *PS* у подручјима под вегетацијом и подручјима која имају малу рефелсивност *SAR* сигнала. Додатно, велики нагиб терена и снежни покривач могу довести до комплетног изостанка *PS* а самим тим и комплетне декорелације сигнала што би резултовало изостанком било каквих резултата померања. Трећи проблем који се може издвојити представља тај што се локације *PS* не могу знати пре процесирања, док геодетске технике користе предефинисане тачке од интереса за мониторинг деформација, што значи да компарација деформација који су добијени *PS InSAR* техником и оних добијених геодетском техником нивелања мора бити пажљиво размотрена.

Сентинел-1 снимци укупно имају временску резолуцију од шест дана, што корисницима може обезбедити могућност за имплементацију система за Мониторинг Вертикалних Померања. Према временској резолуцији сателитских података од шест дана, у оквиру овог истраживања, предложена процедура процесирања је прихватљива и препоручује се, зато што су очекиване мале вредности просторно-временских деформација на сваких шест дана. Решавање фазе (фазне неодређености) ограничава опажање феномена који имају деформације брже од 1/4 таласне дужине за време поновног опажања (шест дана) из сателита због фазне неодређености. Још једна од потешкоћа на коју се наилази код *PS InSAR* приступа сигурно представља и то



што анализа резултата у *LOS* геометрији базираној на линији која спаја сателитски сензор и мету на површи терена. Вертикална померања могу се добити трансформацијом за коју се користе вредности *LOS* померања *PS* из различитих парова орбита, тј. парова узлазних и силазних орбита. Карте брзина померања *PS* могу садржати грешке орбита и грешке атмосферских утицаја, које се у великој мери могу елиминисати коришћењем више преклопљених сателитских путања или комбиновањем са геодетским техникама као што је нивелман.

Процес мониторинга показује да коришћење временских серија генерисаних путем *PS InSAR* приступа може бити адекватно самостално решење за праћење деформација, или да се презентовани приступ може користити као допуна временским серијама класичних геодетских техника за праћење деформација, које обезбеђују значајно детаљније временске серије померања (*Pawluszek-Filipiak и др., 2020*) Компарације *PS InSAR* метода са класичним геодетским методама за праћење деформација показује да су резултати значајно корелисани, што се такође може видети код (*Pawluszek-Filipiak и др., 2020*), и показује да овај метод може бити чак и бољи, посебно имајући у виду трошкове и величину подручја коју је могуће опажати. Неколико великих осцилација у деформацијама, (слика 88), могу се видети на деформационој кривој *PS InSAR* временских серија које се не поклапају у односу на резултате добијене класичном геодетском методом. Претпоставља се да су неки спољашњи утицаји изазвали скокове у временским серијама, метална кровна конструкција може осциловати значајно у зависности од јачине соларног зрачења, температуре, или сличних утицаја. Линије тренда за резултате и *PS InSAR* и нивелмана се значајно поклапају (Пирсонов тест корелације износи 85% са *p*-вредности од 0,015); слични резултати објављени су и у другим радовима (*Signa и др., 2021*) у вези са компарацијом линија тренда. Због тога, за вертикална померања треба истраживати линеаран тренд, временски дужих (најмање једна година) временских серија у циљу да буду упоредиве са класичном методом нивелања. Финални резултати показују укупно слегање од -3,4 mm/god генерисаних са *PS InSAR* методом и -2,7 mm/god добијених методом геодетског нивелмана.

Упоређивањем *PS InSAR* вертикалних померања (слика 88) са брзинама вертикалних померања, идентификује се да је целокупно подручје ТЕКО нестабилано, укључујући и све репере нивелманске мреже. Разматрањем претходно наведеног закључка о нестабилности репера нивелманске мреже, примарна сврха нивелманске мреже може бити да покаже где је неко слегање репера веће или мање, у односу на остатак мреже. Према вредностима померања, (слика 88) позиција репера R6 оптерећена је слегањем од око 15 mm (базирано на линији тренда) до 20 mm (базирано на *PS InSAR* резултату временских серија) за време периода од октобра 2016. године до децембра 2020. године. Резултати Пелцерове анализе померања такође потврђују најзначајније слегање на реперу R6 (од априла 2019. до фебруара 2021.). Ово истраживање може помоћи да се идентификују стабилне референтне тачке у подручју ТЕКО за независне процене вертикалних померања на реперима.

Ова дисертација представља анализу у понашању деформација на површини терена око ПК Костолац, пре свега користећи отворене податке Коперникус Сентинел-1 мисије и софтвере отвореног кода који могу користити ове податке. На основу резултата, и дискусије из претходног поглавља, *PS InSAR* процедура је моћан алат за препознавање и разумевање померања на површини терена. Процесирање снимака и генерисање резултата у вертикалној геометрији и преклапањем са ПОИ, било је могуће да се одреди вертикално померање површи терена. Да би се осигурала компаритивност са класичним геодетским методама, препоручује се истраживање линеарног тренда дужих временских серија (најмање једна година) за вертикална померања. Финални резултати открили су померања на годишњем нивоу од -3,4 mm/god генерисаних са *PS InSAR* приступом и -2,7 mm/god користећи класичан нивелмански метод.



На основу резултата приказаних на слици 88 долази се до закључка да је цело подручје ТЕКО нестабилно, укључујући и све репере нивелманске мреже. Упркос неким варијацијама, вертикална померања добијена *PS InSAR* приступом су такође у складу са генералним слегањима добијеним на основу геотехничког модела, (слика 92). Резултати ове дисертације имају потенцијал да понуде проналажење и идентификацију стабилних референтних тачака у оквиру ТЕКО подручја, чиме се добијају независне процене вертикалних померања на реперима нивелманске мреже. Као такав *PS InSAR* метод за процену вертикалних померања доказао би се и као круцијалан у дизајнирању нивелманских мрежа са фокусом на стабилност репера нивелманске мреже.

Како је четворогодишњи период *PS* временских серија недовољан да би се успоставили неоспорни и недвосмислени закључци о неотектонским померањима, које се огледа у значајно већим временским оквирима, продужење временских серија (на најмање једну деценију) било би интересантно, са филтрирањем мета на површини терена и контролом директно на терену (користећи само поуздане, очуване мете као *PS*).

Предложени систем за мониторинг померања може бити имплементиран у типичну рударску или геодетску праксу и фокусира се на процену померања, обезбеђујући резултате померања као главну информацију. У овом случају, због недостатка података нивелања, вертикална померања добијена на основу *PS InSAR* приступа представљају једини извор података за период октобар 2016. до април 2019. Ова чињеница даје на значају *PS InSAR* мониторинг систему у ситуацијама када класични подаци изостају. Истраживање ове врсте јесте прво широкопојасно мапирање вертикалних померања користећи Сентинел-1 снимке за територију Републике Србије. *PS InSAR* приступ праћења померања није био пуно коришћен на територији Балкана, док је у земљама западне Европе доста заступљенији, (*Del Soldato u др., 2021*). Претходно, може се видети у различитим истраживањима да овакав систем представља повољно решење за праћење померања код подземних рудника где су вредности померања значајно веће, (*Ma u др., 2016; Pawluszek-Filipiak u др., 2020*). Добијени резултати за ПОИ могу се такође користити за различите врсте мониторинга, као што су: геохазарди, (*Polcari u др., 2016; Delgado Blasco u др., 2019; Mora u др., 2016*), или за генерално праћење померања на површи терена, (*Cenni u др., 2021; Hu u др., 2019*). Ово указује на разноврсност примене *PS InSAR* система у оквиру заштите животне средине. Узимајући у обзир све предности и недостатке може се дефинисати да *PS InSAR* систем праћења померања представља нови приступ на територији Републике Србије, да се одређеним приступом може равноправно користити како у оквиру праћења утицаја рударских активности тако и шире, што га чини веома корисно, квалитетно и исплативо решење за мониторинг ове врсте на простру Републике Србије али и територији Балкана.

Рад на овој теми у будућности може представљати коришћење различитих метода интерферометрије примењених на ПОИ и њихова компарација са *PS* методом, као и обједињавање резултата добијених различитим методама. Коначно, и сензори са бољом просторном резолуцијом или новим модовима аквизиције, несумњиво, биће доступни у блиској будућности, као додатак већ постојећим, повећавајући тако тачност и густину *PS*. Радари са различитим фреквенцијама сигнала, самим тим и различитим понашањем сигнала приликом зрачења површина које су од интереса умногоме би допринели квалитету анализе понашања Земљине површи као и подповршинског дела у зависности од пенетрације сигнала тј., таласне дужине сигнала.

Интеграција свих доступних радарских података, различитих поларизација, различитих таласних дужина, различитих модова аквизиције, различитих метода за процесирање па и различитих сателита, са све бољом просторно-временском резолуцијом за широке области од интереса биће посебан изазов са напретком технологије. Посебно интересантно било би



обухватити праћење целе територије Републике Србије, коришћењем тренутно доступних података радарских сателитских мисија.

Интегрисани приступ *PS InSAR* технике и геодетских мерења (као што су *GNSS* и нивелманска мерења) јесте најбоље решење за мониторинг померања. Због своје доступности *InSAR* метода се намеће као примарна за одређивање и евалуацију померања, где перманентни скатерери обезбеђују рефлектовање сигнала који дозвољава праћење њихових померања. Интеграција *GNSS* метода и метода нивелања са *InSAR* техникама свакако би оптимизовала број *GNSS* пријемника и обим нивелања, док би *InSAR* приступ дао ширину и густину *PS* тачака које би садржале величину померања, што би мониторинг систем учинило веома ефикасним. Идеална истраживања представљала би мулти-комбинацију, *InSAR* мерења и геодетских мерења (*GNSS* мерења и/или нивелманских мерења), за што дужи временски период како у оквиру рударских утицаја тако и у релевантној геодетској пракси. *InSAR* техника може (и треба да) се користити као подлога за правилно пројектовање *GNSS* и нивелманске мреже. У том случају може се изабрати најстабилнији полажај *GNSS* тачака или репера нивелманске мреже са којих се ће се пратити померања. Али важи, и обратно, да правилним пројектовањем геодетских (*GNSS* и/или нивелманске мреже) обезбедила би се директна поршка за мониторинг *InSAR* методом. У том случају позиције тачака и/или репера би се поклопиле са позицијама скатерера, што би даље омогућило и директну калибрацију померања на основу резултата добијених са више извора. Реципроцитетни дизајн доводи у директну везу тачке геодетских мрежа и *InSAR* скатерере. Предложени приступ интеграције довео би до синергије између поменутих техника у циљу формирања робусног и ефикасног система праћења померања, и капитализације најбољег од сваке технике, пружајући свеобухватно разумевање померања терена у току дугачких временских интервала. Свакако би овакав свеобухватни приступ дао калибрисане висококвалитетне резултате погодне и за рударске и за геодетске моделе одлучивања и правилног реаговања.



## Литература

- Alatza, S.; Papoutsis, I.; Paradissis, D.; Kontoes, C.; Papadopoulos, G.A. Multi-Temporal InSAR Analysis for Monitoring Ground Deformation in Amorgos Island, Greece. *Sensors* **2020**, *20*, 338. <https://doi.org/10.3390/s20020338>.
- Ašanin S.; Perović G. Moć metode analize deformacija u svim kombinacijama. *Geodetski list* br. 1-3, Zagreb, **1989**.
- Bakon, M.; Czikhardt, R.; Papco, J.; Barlak, J.; Rovnak, M.; Adamisin, P.; Perissin, D. remotIO: A Sentinel-1 Multi-Temporal InSAR Infrastructure Monitoring Service with Automatic Updates and Data Mining Capabilities. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 1892. <https://doi.org/10.3390/rs12111892>.
- Bakon, M.; Perissin, D.; Lazecky, M.; Papco, J. Infrastructure Non-Linear Deformation Monitoring via Satellite Radar Interferometry. *Procedia Technol.* **2014**, *16*, 294–300. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.095>.
- Bamler, R. A Comparison of Range-Doppler and Wavenumber Domain SAR Focusing Algorithms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **1992**, *30*, 706–713. <https://doi.org/10.1109/36.158864>.
- Bamler, R.; Hartl, P. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Inverse Probl.* **1998**, *14*, R1–R54. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/14/4/001>.
- Barber, B.C. Theory of Digital Imaging from Orbital Synthetic-Aperture Radar. *Int. J. Remote Sens.* **1985**, *6*, 1009–1057.
- Bechor, N.B.D.; Zebker, H.A. Measuring Two-Dimensional Movements Using a Single InSAR Pair. *Geophys. Res. Lett.* **2006**, *33*, 16. <https://doi.org/10.1029/2006GL026883>.
- Bekaert, D.; Hooper, A.; Wright, T. A Spatially-Variable Power-Law Tropospheric Correction Technique for InSAR Data. *J. Geophys. Res. Solid Earth* **2015**, *120*, 1345–1356. <https://doi.org/10.1002/2014JB011558>.
- Bekaert, D.P.S.; Walters, R.J.; Wright, T.J.; Hooper, A.J.; Parker, D.J. Statistical Comparison of InSAR Tropospheric Correction Techniques. *Remote Sens. Environ.* **2015**, *170*, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.035>.
- Berardino, P.; Fornaro, G.; Lanari, R.; Sansosti, E. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2002**, *40*, 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>.
- Blackledge, J.M. Theory of Imaging with Airborne Synthetic Aperture Radar. *Optik.* **1987**, *78*, 1–11.
- Božić, D. Use of Wingtra and AIBOTIX unmanned airborne vehicles in analysis of landslides of open-pit lignite mines. *Rep. Serb. Geol. Soc.* **2022**, 52–62.
- Brajović, Lj. Interferencija svetlosnih talasa, Tehička Fizika 1 - pisana predavanja, Građevinski Fakultet, Beograd, **2013**.
- Brajović, Lj. Tehnička Fizika 1, Građevinski Fakultet, Beograd, **2013**.
- Campbell, J. B.; Wynne, R. H. Introduction to Remote Sensing (FIFTH EDITION). Guilford Press, New York, USA, **2011**. ISBN 978 160918 176 5
- Cenni, N.; Fiaschi, S.; Fabris, M. Monitoring of Land Subsidence in the Po River Delta (Northern Italy) Using Geodetic Networks. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 1488. <https://doi.org/10.3390/rs13081488>.
- Chen, C.W.; Zebker, H.A. Network Approaches to Two-Dimensional Phase Unwrapping: Intractability and Two New Algorithms. *J. Opt. Soc. Am.* **2000**, *17*, 401–414. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.17.000401>.





- Chen, C.W.; Zebker, H.A. Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms: Statistical Segmentation and Generalized Network Models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2002**, *40*, 1709–1719. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.802453>.
- Chen, C.W.; Zebker, H.A. Two-Dimensional Phase Unwrapping with Use of Statistical Models for Cost Functions in Nonlinear Optimization. *J. Opt. Soc. Am.* **2001**, *18*, 338–351. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.18.000338>.
- Ciampalini, A.; Solari, L.; Giannecchini, R.; Galanti, Y.; Moretti, S. Evaluation of Subsidence Induced by Long-Lasting Buildings Load Using InSAR Technique and Geotechnical Data: The Case Study of a Freight Terminal (Tuscany, Italy). *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **2019**, *82*, 101925. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101925>.
- Cigna, F.; Esquivel Ramírez, R.; Tapete, D. Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR Displacement Velocities against GNSS and Geodetic Leveling Monitoring Data. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 4800. <https://doi.org/10.3390/rs13234800>.
- Cigna, F.; Tapete, D. Sentinel-1 Big Data Processing with P-SBAS InSAR in the Geohazards Exploitation Platform: An Experiment on Coastal Land Subsidence and Landslides in Italy. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 885. <https://doi.org/10.3390/rs13050885>.
- Costantini, M.; Falco, S.; Malvarosa, F.; Minati, F. A New Method for Identification and Analysis of Persistent Scatterers in Series of SAR Images. In Proceedings of the *IGARSS 2008—2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Boston, MA, USA, 8–11 July **2008**; pp. II-449–II-452. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4779025>.
- Costantini, M.; Ferretti, A.; Minati, F.; Falco, S.; Trillo, F.; Colombo, D.; Novali, F.; Malvarosa, F.; Mammone, C.; Vecchioli, F.; et al. Analysis of surface deformations over the whole Italian territory by interferometric processing of ERS, Envisat and COSMO-SkyMed radar data. *Remote Sens. Environ.* **2017**, *202*, 250–275. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.017>.
- Crosetto, M.; Biescas, E.; Duro, J.; Closa, J.; Arnaud, A. Generation of advanced ERS and Envisat interferometric SAR products using the Stable Point Network technique. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **2008**, *74*, 443–451.
- Crosetto, M.; Monserrat, O.; Cuevas-González, M.; Devanthéry, N.; Crippa, B. Persistent Scatterer Interferometry: A Review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2016**, *115*, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>.
- Curlander, J.C.; McDonough, R.N. *Synthetic Aperture Radar*; Wiley: New York, NY, USA, **1991**; Volume 11.
- De Zan, F., Guarnieri, A. M. TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans. *Geoscience and Remote Sensing. IEEE Transactions.* **2006**, *44*(9), 2352–2360. doi:10.1109/TGRS.2006.873853
- Del Soldato, M.; Confuorto, P.; Bianchini, S.; Sbarra, P.; Casagli, N. Review of Works Combining GNSS and InSAR in Europe. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 1684. <https://doi.org/10.3390/rs13091684>.
- Delgado Blasco, J.M.; Fomelis, M.; Stewart, C.; Hooper, A. Measuring Urban Subsidence in the Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS Persistent Scatterer Interferometry. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 129. <https://doi.org/10.3390/rs11020129>.
- Deng, Z.; Ke, Y.; Gong, H.; Li, X.; Li, Z. Land Subsidence Prediction in Beijing Based on PS-InSAR Technique and Improved Grey-Markov Model. *GISci. Remote Sens.* **2017**, *54*, 797–818. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1331511>.
- Đoković, N.; Mitrović, D.; Životić, D.; Bechtel, A.; Sachsenhofer, R.F.; Matić, V.; Glamočanin, L.; Stojanović, K. Petrographical and organic geochemical study of the lignite from the Smederevsko Pomoravlje field (Kostolac Basin, Serbia). *Int. J. Coal Geol.* **2018**, *195*, 139–71.
- Elach, C.; Van Zyl, J. *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*. Second Edition, Wiley, **2006**.



- Fattahi, H.; Agram, P.; Simons, M. A Network-Based Enhanced Spectral Diversity Approach for TOPS Time-Series Analysis. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2017**, *55*, 777–786. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2614925>.
- Fattahi, H.; Amelung, F. InSAR Uncertainty Due to Orbital Errors. *Geophys. J. Int.* **2014**, *199*, 549–560. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu276>.
- Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* **2000**, *38*, 2202–2212. <https://doi.org/10.1109/36.868878>.
- Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2001**, *39*, 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>.
- Foumelis, M. Vector-Based Approach for Combining Ascending and Descending Persistent Scatterers Interferometric Point Measurements. *Geocarto Int.* **2018**, *33*, 38–52. <https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1222636>.
- Gabriel, A.K.; Goldstein, R.M.; Zebker, H.A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *J. Geophys. Res. Solid Earth* **1989**, *94*, 9183–9191.
- Gojković, Z.; Kilibarda, M.; Brajović, L.; Marjanović, M.; Milutinović, A.; Ganić, A. Ground Surface Subsidence Monitoring Using Sentinel-1 in the “Kostolac” Open Pit Coal Mine. *Remote Sens.* **2023**, *15*, 2519. <https://doi.org/10.3390/rs15102519>
- Graham, L.C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. *Proc. IEEE* **1974**, *62*, 763–768.
- Hartman, H.L.; Mutmansky, J.M. *Introductory Mining Engineering*, 2nd ed.; John Wiley: Hoboken, NJ, USA, **2002**; ISBN 0-471-34851-1.
- Hooper, A.; Bekaert, D.; Spaans, K.; Arikan, M. Recent Advances in SAR Interferometry Time Series Analysis for Measuring Crustal Deformation. *Tectonophysics* **2012**, *514*, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>.
- Hu, B.; Chen, J.; Zhang, X. Monitoring the Land Subsidence Area in a Coastal Urban Area with InSAR and GNSS. *Sensors* **2019**, *19*, 3181. <https://doi.org/10.3390/s19143181>.
- Kostovic, M.; Kostović, N.; Tokalić, R. Coal mining and preparation in Serbia. *Podzemn. Rad.* **2018**, *33*, 69–77. <https://doi.org/10.5937/PodRad1833069K>.
- Krawczyk, A.; Grzybek, R. An Evaluation of Processing InSAR Sentinel-1A/B Data for Correlation of Mining Subsidence with Mining Induced Tremors in the Upper Silesian Coal Basin (Poland). *E3S Web Conf.* **2018**, *26*, 00003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20182600003>.
- Li, Z.; Zhou, J.; Tian, B. The glacier movement estimation and analysis with InSAR in the Qinghai-Tibetan plateau. In Proceedings of the 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, 12–17 July **2009**; pp. II-578–II-581.
- Lu, Z. InSAR imaging of volcanic deformation over cloud-prone areas-Aleutian islands. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **2007**, *73*, 245–257. <https://doi.org/10.14358/PERS.73.3.245>.
- Luckman, A.J. Correction of SAR Imagery for Variation in Pixel Scattering Area Caused by Topography. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **1998**, *36*, 344–350. <https://doi.org/10.1109/36.655350>.
- Lusch, D. P. *Introduction to Microwave Remote Sensing*. Michigan State Uni. **1999**.
- Ma, C.; Cheng, X.; Yang, Y.; Zhang, X.; Guo, Z.; Zou, Y. Investigation on Mining Subsidence Based on Multi-Temporal InSAR and Time-Series Analysis of the Small Baseline Subset—Case Study of Working Faces 22201-1/2 in Bu’ertai Mine, Shendong Coalfield, China. *Remote Sens.* **2016**, *8*, 951. <https://doi.org/10.3390/rs8110951>.



- Mihailović, K.; Aleksić, R. I. *Koncepti mreža u geodetskom premeru: monografija*. Geokarta, Beograd, Srbija, **2008**; ISBN 978-86-459-0337-5.
- Mora, O.; Mallorqui, J.J.; Broquetas, A. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2003**, *41*, 10. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.814657>.
- Mora, O.; Ordoqui, P.; Iglesias, R.; Blanco, P. Earthquake Rapid Mapping Using Ascending and Descending Sentinel-1 TOPSAR Interferograms. *Procedia Comput. Sci.* **2016**, *100*, 1135–1140. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.266>.
- Moreira, A.; Prats-Iraola, P.; Younis, M.; Krieger, G.; Hajnsek, I.; Papathanassiou, K. P. A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, March **2013**. vol. 1, no. 1, pp. 6-43. doi: 10.1109/MGRS.2013.2248301
- Obi Reddy, G. P.; Singh, S. K.; *Geospatial Technologies in Land Resources Mapping, Monitoring and Management*. Geotechnologies and the Environment, Springer International Publishing, **2018**. ISBN : 978-3-319-78710-7.
- Pawluszek-Filipiak, K.; Borkowski, A. Integration of DInSAR and SBAS Techniques to Determine Mining-Related Deformations Using Sentinel-1 Data: The Case Study of Rydułtowy Mine in Poland. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 242. <https://doi.org/10.3390/rs12020242>.
- Peduto, D.; Prospero, A.; Nicodemo, G.; Korff, M. District-scale numerical analysis of settlements related to groundwater lowering in variable soil conditions. *Can. Geotech. J.* **2022**, *6*, 978–993.
- Pelzer, H. *Zur Analyse Geodätischer Deformations-Messungen*; DGK, Verlag der Bayer. Akad. d. Wiss.: Munich, Germany, **1971**.
- Pepe, A. *Generation of Earth's Surface Three-Dimensional (3-D) Displacement Time-Series by Multiple-Platform SAR Data*; IntechOpen: Rijeka, Croatia, **2018**; ISBN 978-953-51-3742-9.
- Perović, G.; Ninković, S.; Moritz, H. *Least Squares:(Monograph): With 87 Figures and 90 Tables*; TON: Belgrade, Serbia, **2005**. ISBN 86-907409-0-2.
- Polcari, M.; Palano, M.; Fernández, J.; Samsonov, S.V.; Stramondo, S.; Zerbini, S. 3D Displacement Field Retrieved by Integrating Sentinel-1 InSAR and GPS Data: The 2014 South Napa Earthquake. *Eur. J. Remote Sens.* **2016**, *49*, 1–13. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20164901>.
- Raucoules, D.; Bourguin, B.; de Michele, M.; Le Cozannet, G.; Closset, L.; Bremmer, C.; Veldkamp, H.; Tragheim, D.; Bateson, L.; Crosetto, M.; et al. Validation and intercomparison of Persistent Scatterers Interferometry: PSIC4 project results. *J. Appl. Geophys.* **2009**, *68*, 335–347. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.02.003>.
- Raucoules, D.; Colesanti, C.; Carnec, C. Use of SAR Interferometry for Detecting and Assessing Ground Subsidence. *Comptes Rendus Geosci.* **2007**, *339*, 289–302. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.02.002>.
- Rees, G. *Physical Principles of Remote Sensing*; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, **2013**. ISBN 978-1-107-00473-3.
- Rees, W. *Physical Principles of Remote Sensing (3rd ed.)*. Cambridge: Cambridge University Press, **2012**. doi:10.1017/CBO9781139017411
- Richards, M.A. A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing [AESS Tutorial IV]. *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.* **2007**, *22*, 5–29. <https://doi.org/10.1109/MAES.2007.4350281>.
- Runge, H.; Bamler, R. A Novel High Precision SAR Focussing Algorithm Based on Chirp Scaling. In *Proceedings of the IGARSS'92 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Houston, TX, USA, 26–29 May 1992; Volume 1, pp. 372–375.



- Samieie-Esfahany, S.; Hanssen, R.F.; Van Thienen-Visser, K.; Muntendam-Bos, A.; Systems, S. On the effect of horizontal deformation on insar subsidence estimates. In Proceedings of the 2009 Workshop on Fringe, Frascati, Italy, 30 November–4 December **2009**.
- Scheuer, T.E.; Wong, F.H. Comparison of Sar Processors Based on A Wave Equation Formulation. In Proceedings of the IGARSS'91 Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management, Espoo, Finland, 3–6 June 1991; Volume 2, pp. 635–639.
- Shi, X.; Zhang, L.; Zhong, Y.; Zhang, L.; Liao, M. Detection and Characterization of Active Slope Deformations with Sentinel-1 InSAR Analyses in the Southwest Area of Shanxi, China. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 392. <https://doi.org/10.3390/rs12030392>.
- Sun, G.; Ranson, K.J.; Kharuk, V.I. Radiometric Slope Correction for Forest Biomass Estimation from SAR Data in the Western Sayani Mountains, Siberia. *Remote Sens. Environ.* **2002**, *79*, 279–287. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00279-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00279-6).
- Tomás, R.; Romero, R.; Mulas, J.; Marturià, J.J.; Mallorquí, J.J.; Lopez-Sanchez, J.M.; Herrera, G.; Gutiérrez, F.; González, P.J.; Fernández, J.; et al. Radar Interferometry Techniques for the Study of Ground Subsidence Phenomena: A Review of Practical Issues through Cases in Spain. *Environ. Earth Sci.* **2014**, *71*, 163–181. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2422-z>.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. Microwave remote sensing: Active and passive. Volume 1 - Microwave remote sensing fundamentals and radiometry, Volume 2 - Radar remote sensing and surface scattering and emission theory, Volume 3 - From theory to applications. **1981, 1982, 1986**.
- Vračarić, M. K.; Aleksić, R. I. *Praktična geodezija*. Geokarta, Beograd, Srbija, **2007**; ISBN 978-86-459-0311-5.
- Wang, L.; Yang, L.; Wang, W.; Chen, B.; Sun, X. Monitoring Mining Activities Using Sentinel-1A InSAR Coherence in Open-Pit Coal Mines. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 4485. <https://doi.org/10.3390/rs13214485>.
- Werner, C.; Wegmuller, U.; Strozzi, T.; Wiesmann, A. Interferometric point target analysis for deformation mapping. In Proceedings of the 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, 21–25 July 2003; IEEE: Piscataway, NJ, USA, **2003**; Volume 7, pp. 4362–4364. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1295516>.
- Woodhouse, I. Introduction to Microwave Remote Sensing. Boca Raton: CRC Press, **2006**. <https://doi.org/10.1201/9781315272573>.
- Yagüe-Martínez, N.; Prats-Iraola, P.; Rodríguez González, F.; Brcic, R.; Shau, R.; Geudtner, D.; Eineder, M.; Bamler, R. Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2016**, *54*, 2220–2234. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2497902>.
- Zhang, L.; Lu, Z.; Ding, X.; Jung, H.-S.; Feng, G.; Lee, C.-W. Mapping ground surface deformation using temporarily coherent point SAR interferometry: Application to Los Angeles Basin. *Remote Sens. Environ.* **2012**, *117*, 429–439.
- Zhang, Y.; Wu, H.; Li, M.; Kang, Y.; Lu, Z. Investigating Ground Subsidence and the Causes over the Whole Jiangsu Province, China Using Sentinel-1 SAR Data. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 179. <https://doi.org/10.3390/rs13020179>.
- Zhao, F.; Wang, T.; Zhang, L.; Feng, H.; Yan, S.; Fan, H.; Xu, D.; Wang, Y. Polarimetric Persistent Scatterer Interferometry for Ground Deformation Monitoring with VV-VH Sentinel-1 Data. *Remote Sens.* **2022**, *14*, 309. <https://doi.org/10.3390/rs14020309>.
- A Free and Open Source Geographic Information System. Преузето са: <https://qgis.org/en/site/> (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).
- Alaska Satellite Facility Data Search. Преузето са: <https://search.asf.alaska.edu/#/> (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).



- Bamler, R.; Schättler, B. SAR Data Acquisition and Image Formation. *Geocoding ERS-1 SAR Data Syst.* Wichmann-Verl. 1993, 53–102. Преузето са: [https://www.researchgate.net/publication/224803283\\_SAR\\_Data\\_Acquisition\\_and\\_Image\\_Formation](https://www.researchgate.net/publication/224803283_SAR_Data_Acquisition_and_Image_Formation) (accessed on 8 May 2023).
- Boden Bewegungsdienst Deutschland. Преузето са: <https://bodenbewegungsdienst.bgr.de/mapapps/resources/apps/bbd/index.html?lang=en> (accessed on 13 March 2023).
- Circular polarization. Преузето са: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Circular.Polarization.Circularly.Polarized.Light\\_Without.Components\\_Right.Handed.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Circular.Polarization.Circularly.Polarized.Light_Without.Components_Right.Handed.svg) (веб страници приступљено 25. новембра 2023. године).
- Circular\_Polarization\_Linear\_Polarized. Преузето са: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Circular\\_Polarization\\_Linear\\_Polarized\\_Light\\_Enterinq\\_Quarter\\_Wave\\_Plate\\_Components.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Circular_Polarization_Linear_Polarized_Light_Enterinq_Quarter_Wave_Plate_Components.svg) (веб страници приступљено 25. новембра 2023. године).
- Davidbekaert. Преузето са: [//davidbekaert.com/download/TRAIN\\_manual.pdf](http://davidbekaert.com/download/TRAIN_manual.pdf) (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).
- Electric Power Industry of Serbia Zones of the Influence. Преузето са: <http://www.eps.rs/cir/kostolac/Pages/zastita-zivotne-sredine.aspx> (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).
- Electric Power Industry of Serbia. Преузето са: <http://www.eps.rs/lat/kostolac/Stranice/o-namateko.aspx> (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).
- European Space Agency Satellite Imaginary. Преузето са: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).
- European Space Agency Sentinel-1 Mission. Преузето са: [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Introducing\\_Sentinel-1](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Introducing_Sentinel-1) (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).
- European Space Agency SNAP Software Package. Преузето са: <https://step.esa.int/main/download/snap-download/> (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).
- European Space Agency SNAP Software Package. Преузето са: <https://step.esa.int/main/doc/tutorials/> (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).
- European Space Agency SNAP Software Package. Преузето са: [http://step.esa.int/docs/presentations/SNAP\\_User\\_Forum/2\\_SNAP\\_Introduction%20and%20News.pdf](http://step.esa.int/docs/presentations/SNAP_User_Forum/2_SNAP_Introduction%20and%20News.pdf) (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).
- GEOG 372 - Fall 2003 Overview of Microwave Remote Sensing (Chapter 9 in Jensen) from Prof. Kasischke's lecture October 6, 2003. Преузето са: <https://slideplayer.com/slide/7905032/> (веб страници приступљено 25. новембра 2023. године).
- Geological Information System of Serbia. Преузето са: <http://geoliss.mre.gov.rs/karte/geo300.html> (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).
- GEOS 657 | Microwave Remote Sensing - University of Alaska Fairbanks. Преузето са: <https://radar.community.uaf.edu/> (веб страници приступљено 25. новембра 2023. године).
- Github. Available online: <https://github.com/dbekaert/TRAIN> (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).
- Google Earth. Преузето са: <https://earth.google.com/web/@44.75232586,21.27635474,65.88404334a,6766.13237461d,35y,0.25> (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).



InSAR Norway. Преузето са: <https://insar.ngu.no/>, (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).

Interference patterns. Преузето са: <https://www.sciencephoto.com/media/530560/view/interference-patterns-artwork> (веб страници приступљено 25. новембра 2023. године).

MATLAB Is a Programming and Numeric Computing Platform. Преузето са: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).

Path difference. Преузето са: [The Physics Classroom](https://www.physicsclassroom.com/class/light/Lesson-3/The-Path-Difference) <https://www.physicsclassroom.com/class/light/Lesson-3/The-Path-Difference> (веб страници приступљено 25. новембра 2023. године).

Phase\_drift. Преузето са: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/Phase\\_drift.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/Phase_drift.png) (веб страници приступљено 25. новембра 2023. године).

Phased array antenna. Преузето са: <https://cdn.comsol.com/wordpress/2016/05/Phased-array-antenna.png> (веб страници приступљено 25. новембра 2023. године).

Polarization. Преузето са: <https://www.emedicalprep.com/study-material/physics/wave-optics/polarization/> (веб страници приступљено 25. новембра 2023. године).

Professional Information about on Weather Conditions around the World. Преузето са: <https://www.ogimet.com/gsynres.phtml.en> (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).

Пројекат “*Геодетског 1Д и 2Д осматрања димњака новог блока БЗ у ТЕ КОСТОЛАЦ Б у току грађења и експлатације објекта*”, **2019**.

SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation. Преузето са: [//servirglobal.net/resources/sar-handbook](https://servirglobal.net/resources/sar-handbook) (веб страници приступљено 25. новембра 2023. године).

SAR pre-processing documentation - Thomas Weiß. Преузето са: [https://buildmedia.readthedocs.org/media/pdf/multiply-sar-pre-processing/get\\_to\\_version\\_0.4/multiply-sar-pre-processing.pdf](https://buildmedia.readthedocs.org/media/pdf/multiply-sar-pre-processing/get_to_version_0.4/multiply-sar-pre-processing.pdf) (веб страници приступљено 25. новембра 2023. године).

SA theory. Преузето са: [https://www.geo.uzh.ch/~fpaul/sar\\_theory.html](https://www.geo.uzh.ch/~fpaul/sar_theory.html) (веб страници приступљено 25. новембра 2023. године).

Shuttle Radar Topography Mission. Преузето са: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> (веб страници приступљено 22. јуна 2022. године).

Stamps Software Package. Преузето са: <http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earahoo/stamps/> (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).

Stamps Software Package. Преузето са: [https://homepages.see.leeds.ac.uk/~earahoo/stamps/StaMPS\\_Manual\\_v4.1b1.pdf](https://homepages.see.leeds.ac.uk/~earahoo/stamps/StaMPS_Manual_v4.1b1.pdf) (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).

Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping. Преузето са: <https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/> (веб страници приступљено 5. новембра 2021. године).

Tutorial: Fundamentals of Remote Sensing, Natural resources of Canada. Преузето са: <https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9309> (веб страници приступљено 25. новембра 2023. године).



---

Van Zyl, J.; Kim Y.; Yuen, J. H. Synthetic Aperture Radar Polarimetry. Преузето са:  
[https://descanso.jpl.nasa.gov/SciTechBook/series2/SAR\\_Polarimetry\\_compressed.pdf](https://descanso.jpl.nasa.gov/SciTechBook/series2/SAR_Polarimetry_compressed.pdf) (веб  
страници приступљено 25. новембра 2023. године).



## Биографски подаци

ГОЈКОВИЋ Милан ЗОРАН, рођен 06.04.1982. године у Ваљеву, Република Србија. Завршио је основну школу „Милан Ракић“ 1998. године, а средњу „Геодетску Техничку школу“, завршио је у Београду 2001. године. Уписао је студије геодезије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду 2001. године. Дана 15.07.2008. године завршио је студије на Грађевинском факултету на одсеку за Геодезију, са просечном оценом 8,07 (осам и 07/100) у току студија и оценом 10 на дипломском испиту.

Докторске студије, уписује 2014. године на Рударско-геолошком факултету на студијском програму Рударско инжењерство. За време докторских студија Зоран Гојковић положио је све испите са просечном оценом 10,00, публиковао је као аутор или коаутор радове који су повезани са временским серијама на праћењу померања: 2 рада у часопису (са *SCI* листе), 1 рад са међународне конференције, 6 радова у националним часописима, 2 рада са домаће конференције и један рад као битно побољшано техничко решење на националном нивоу. У децембру 2023. године израдио је докторску дисертацију под називом „*Модел померања терена услед утицаја рударских радова на основу радарских сателитских снимака*“.

Од 2008. године до краја 2014. године радио је за компанију „*Dundee*“ као део тима на пројектима геолошких истраживања. Од фебруара 2015. године до фебруара 2021. године био је ангажован као асистент на Рударско-геолошком факултету, студијском програму Рударско инжењерство на модулу за рударска мерења, а од фебруара 2021. године ангажован је као сарадник.

Као истраживач био је укључен у домаћи пројекат Министарства просвете, науке и технолошког развоја, Републике Србије, број ТР33029 под називом „Изучавање могућности валоризације преосталих резерви угља у циљу обезбеђења енергетског сектора Републике Србије“, као и пројекат *APPOLO* из програма *Horizon 2020*. Био је ангажован на уређивању часописа „Подземни Радови“.

Током докторских студија бавио се стручним усавршавањем, анализом и реализацијом експеримената и прикупљањем литературе за докторску дисертацију, као и израде саме дисертације и публиковања радова у релевантним часописима.



## **Прилози**

Прилог 1: Изјава о ауторству

Прилог 2: Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Прилог 3: Изјава о коришћењу

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора \_\_\_\_\_ Зоран Гојковић \_\_\_\_\_

Број индекса \_\_\_\_\_ Р708/2014 \_\_\_\_\_

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

МОДЕЛ ПОМЕРАЊА ТЕРЕНА УСЛЕД УТИЦАЈА РУДАРСКИХ РАДОВА НА ОСНОВУ  
РАДАРСКИХ САТЕЛИТСКИХ СНИМАКА

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

Потпис аутора

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора \_\_\_\_\_ Зоран Гојковић \_\_\_\_\_

Број индекса \_\_\_\_\_ Р708/2014 \_\_\_\_\_

Студијски програм \_\_\_\_\_ Рударско инжењерство \_\_\_\_\_

Наслов рада \_\_\_\_\_ **МОДЕЛ ПОМЕРАЊА ТЕРЕНА УСЛЕД УТИЦАЈА РУДАРСКИХ РАДОВА**  
\_\_\_\_\_ **НА ОСНОВУ РАДАРСКИХ САТЕЛИТСКИХ СНИМАКА** \_\_\_\_\_

Ментор \_\_\_\_\_ проф. др Александар Ганић \_\_\_\_\_

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

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

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

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Изјава о коришћењу

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

МОДЕЛ ПОМЕРАЊА ТЕРЕНА УСЛЕД УТИЦАЈА РУДАРСКИХ РАДОВА НА ОСНОВУ  
РАДАРСКИХ САТЕЛИТСКИХ СНИМАКА

која је моје ауторско дело.

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

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

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

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

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

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

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

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

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

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

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

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

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

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

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