

**ДИГИТАЛНО МОДЕЛОВАЊЕ ТЕРЕНА ЗАСНОВАНО НА САВРЕМЕНОМ  
ФОТОГРАМЕТРИЈСКОМ ПРЕМЕРУ****DIGITAL TERRAIN MODELING BASED ON MODERN PHOTOGRAMMETRY  
SURVEY**

Радован Симић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Област – ГЕОДЕЗИЈА И ГЕОМАТИКА

**Кратак садржај** - Предмет рада јесте дигитално моделовање терена засновано на аквизицији података дигиталном фотограмметријом применом савремених аутоматских ваздухопловних летелица, на локалитету површинског копа глине у Новом Бечеју. Поступцима обраде и анализе обухваћене су све фазе од прикупљања података, софтверског моделовања терена, приказа резултата и оцене тачности добијених модела.

**Кључне речи:** ДМТ, УАВ, дрон, фотограмetriја, моделовање, облак тачака, ГЦП, ДЕМ, оцена тачности, вектор, ортомозаик, 3Д

**Abstract** - The subject of this paper is digital terrain modeling based on the acquisition of data by digital photogrammetry using modern automatic unmanned aerial vehicles at the clay excavation site in Novi Bečej. The processing and analysis procedures cover all stages from data collection, software modeling of the terrain, presentation of results and evaluation of the accuracy of the obtained models.

**Keywords:** DTM, UAV, drone, photogrammetry, modeling, point cloud, GCP, DEM, evaluation of accuracy, vector, orthomosaic, 3D

**1. УВОД**

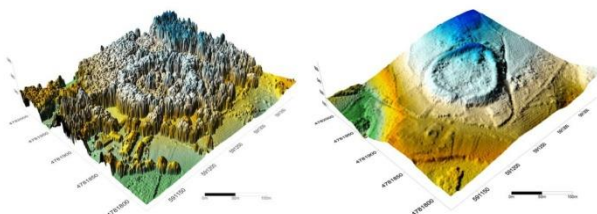
У области геодезије и геоинформатике, доступност савремених техника и технологија омогућавају модернизацију процеса прикупљања и моделовања података, па самим тим и квалитетнији одговор на захтеве данашњег тржишта. Процеси моделовања који су засновани на оваквој логистици су већ дуже време усвојени као стандардне процедуре које су груписане у категорију тзв. дигиталног моделовања. Комплетност модернизације и праћење савремених трендова се не огледа само у примени дигиталних техника обраде података и публикације резултата, већ и примене таквог третмана у сваком сегменту рада, са посебним акцентом на поступке аквизије података као једног од примарних задатака геодетске струке. Једна од техника која се у данашње време изузетно брзо развија је из области дигиталне фотограмetriје применом УАВ (енг. *Unmanned Aerial Vehicles*).

**НАПОМЕНА:**

Овај рад је проистекао из мастер рада чији ментор је био др Мирко Борисов, ванр. проф.

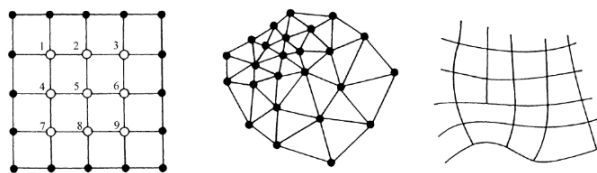
**2. ДИГИТАЛНИ МОДЕЛ ТЕРЕНА - ДМТ**

ДМТ је статистичка репрезентација континуалне површи терена помоћу одговарајућих сетова података у форми тачка са познатим X, Y и Z у одређеном координатном систему [1]. Значај ДМТ у процесирању и анализи геопросторних података константно расте. Они омогућавају моделовање, анализу и визуелизацију феномена који је повезан за морфологију неке територије (или на било коју карактеристику територије а не само висине). Трећа димензија је основни елемент визуелизације, који има пресудну улогу у виртуалној визуелизацији неке територије [2]. Класификација ДМТ врши се сходно начину репрезентације података а најчешће коришћени термини су: дигитални модел висина ДМВ, терена ДМТ и површи ДМП иако се у пракси често они сматрају синонимима. Разлика између две врсте модела исте територије приказана је на Слика 1.



Слика 1. Дигитални модел површи (лево) и дигитални модел терена (десно)

У контексту тродимензионалности модела, структурирање ДМТ-а углавном се своди на организовање података о висинама – елевацијама у самој структури модела. Ове дигиталне елевације обично су организоване у једну од три структуре података: правилна решетка ГРИД, мрежа неправилних троуглова ТИН и мреже засноване на изохипсама (Слика 2) [3].



Слика 2. Методе структурирања елевационих мреже података: (1) ГРИД; (2) ТИН; и (3) изохипсе

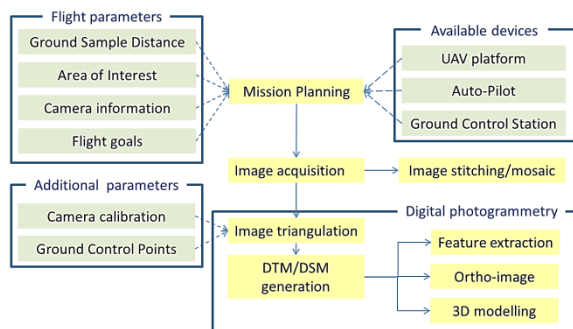
Оригинални подаци о терену морају бити структурирани како би се омогућиле примене операција моделовања терена [4].

### 3. АУТОМАТИЗОВАНА ДИГИТАЛНА ФОТОГРАМЕТРИЈА УАВ СИСТЕМИМА

УАВ системи су савремене платформе за ношење опреме за дигиталну фотограметрију. То су беспилотни, даљински контролисани, полуаутоматски и аутоматски системи. Због своје специфичности и доступности ови системи данас проналазе примену у многобројним областима као што су: фотограметрија, надзор у реалном времену, мониторинг кризних ситуација и сл. Примена УАВ система као платформе за подршку фотограметријског премера нашла је код аквизиције података о терену у циљу мапирања и формирања дигиталних модела. Основне компоненте система су: ваздухопловна летилица УАВ, командни линк и земаљски контролни центар ГЦЦ (енг. *Ground Control Centre*). Унутар ових сегмената смештено је неколико интегрисаних система. Комуникација између УАВ летилице и ГЦЦ може се остварити бежично, путем радио контролера или рачунара.

#### 3.1. Концепт УАВ система за моделовање ДМТ

Пример применом УАВ система захтева две основне процедуре: планирање мисије тј. лет и мерење контролних тачака ГЦП (енг. *Ground Control Points*) на терену за сврху геореференцирања (Слика 3). Мисија (лет и прикупљање података) се обично планира у канцеларији са наменским софтвером, полазећи од познавања подручја од интереса АОИ (енг. *Area of Interest*), захтеване просторне резолуције снимка ГСД (енг. *Ground Sample Distance*) или отисака и основних параметара уграђене дигиталне камере [5].



Слика 3. Ток процеса аквизиције и процесирања података на основу УАВ снимака

Лет се одвија ручном, потпомогнутом или аутоматском режиму. УАВ летилице су опремљене ГНСС и ИНС навигационим уређајима, који обезбеђују позиционирање и оријентацију у простору, па самим тим ови системи омогућавају аутоматски режим мисије и аквизицију снимака.

#### 3.2. Алгоритми за формирање 3Д модела на основу УАВ снимака високе резолуције

За примену у фотограметријске сврхе као што су генерисање геореференцираних ортофотоа, 3Д облака тачака или дигиталних модела површи, основни предуслов су прецизни геореференцирани снимци УАВ система. Како би се постигла центиметарска прецизност геореференцирања снимака користи се технологија која је последњих година доживела напредак у пољу преклапања снимака (енг. *Image Matching*). Код снимака високе резолуције могу се применити савремене методе реконструк-

ције 3Д топографије тзв. процедуре структуре из покрета СФМ (енг. *Structure from Motion*). Процедура се заснива на стереоскопској фотограметрији и имплементира се преко два алгорита: СИФТ (енг. *Scale Invariant Feature Transform*) и МВС (енг. *Multi-view stereo*) [6]. Оба алгорита заснована су на вишеструким снимцима истог детаља опажања и имају своје специфичности у резултатима реконструкције 3Д сцена.

### 4. АКВИЗИЦИЈА СНИМАКА

Основна идеја приликом избора локалитета за студију је била да се одабере таква за коју већ постоје подаци о терену, чија је аквизиција обављена у одређеним временским тренутцима и неком од постојећих метода премера терена, давајући предност дигиталним и нумеричким подацима на супрот аналогним формама. Сходно томе одабран је површински коп глине у потесу „Гарајевац“, Нови Бечеј. Конкретно, за овај локалитет се врше периодична снимања терена на праћењу промена терена на површинском копу, у циљу одређивања кубатура ископане глине и евентуално за процену билансних резерви сировинских маса за будућа ископавања. Локалитет је подељен на три подручја од интереса, сходно конфигурацији терена, тестирању мисије лета различитих параметара и процеса моделовања и добијених резултата (Слика 4).



Слика 4. Подручје од интереса. Распоред контролних тачака

За УАВ пример коришћен је савремени модел дрона „Anafi Parrot“ који је опремљен камером која даје снимке 4К HDR резолуције, уређајима за сателитско позиционирање, инерцијалним системом, стабилизатором камере и др. [7]. У циљу геореференцирања и повећања глобалне прецизности снимања на локалитету је пре мисије лета распоређено 29 маркера са улогом контролних ГЦП тачака (енг. *Ground Control Points*), где су коришћена три типа белега различитих димензија (Слика 5). Свим контролним тачкама су одређене 3Д просторне координате ГПС премером.



Слика 5. Контролни маркери „ГЦП“

Планирање мисије лета: извршена је коришћењем софтвера „Pix4D Capture“ који у потпуности аутоматизује лет са унапред дефинисаним параметрима као што су: тип мисије, брзина летилице, преклопи снимака, висина лета и др. Сви параметри лета подешавају се у зависности од циљане просторне резолуције снимака ГСД (енг. *Ground Sample Distance*). За сва три подручја ГСД је у домену 1cm/px.

Временски услови приликом снимања су били идеални: период опажања од 10 до 13 часова, благи поветарац, температура ваздуха око 30°C, веома мало облака, без формирања сенки и без падавина. Укупно је начињено 602 снимка терена.

## 5. МОДЕЛОВАЊЕ ПОВРШИ ТЕРЕНА

Поступак обраде података и моделовања у овом раду извршен је у оквиру софтверског пакета „Agisoft Metashape Professional“ који је специјализован за фотogramетријско процесирање дигиталних снимака и генерисање 3D просторних података. Софтвер се заснива на технологији преклапања фотографија. У поступку моделовања објекта истраживања улазни подаци су снимци и подаци везани за ГЦП тачке.

С обзиром да сваки снимак садржи у метаподацима информације о локацији где су сачињени, учитавањем у програм се врши њихово прелиминарно распоређивање у простору. Покретањем поступка преклапања на основу само тих позиција формира се облак референтних тачака. Након поступка преклапања следећи корак јесте оптимизација снимака референцирањем на координате контролних тачака. У програм се учитава списак координата, које су претходно извезене из ГПС контролера у формату „CSV“. На снимцима се прецизно постављају „маркице“ на позицијама маркера. Потребно је на што више снимака детектовати белеге маркера. Након тога се покреће поступак оптимизације камере помоћу ГЦП како би се извршила корекција подударности и геореференцирање.

Табела 1. Прецизност калибрације за све АОИ[cm]

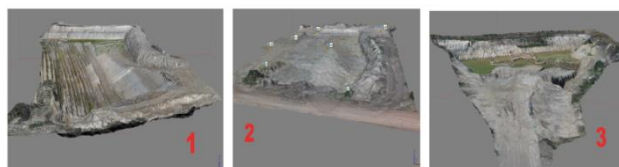
Camera Optimization:						
AOI Name	Count	X error	Y error	Z error	XY error	Total
1. „Главни коп“	15	5	3	1	6	6
2. „Јаловина“	8	5	6	5	8	9
3. „Северно-источни коп“	11	4	3	1	4	5

Поступак обраде је овим завршен и потом се прелази на генерисање коначног облака тачака. Свако процесирање је поред дефинисања улазних података, уско повезано са нивоом жељене детаљности, што је опет уско повезано са хардверским захтевима процеса па је потребно наћи оптималне параметре.

Табела 2. Специфичности процедуре генерисања густог облака тачака

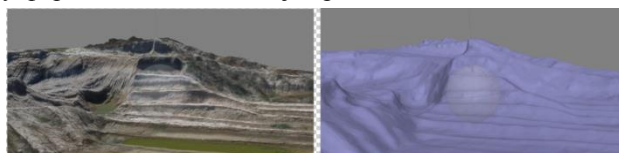
Dense cloud:				
AOI Name	Quality Dense cloud	Accuracy Tie Point	No Points	Generation time
1. „Главни коп“	Medium	Low	524 787	1min 19sec
2. „Главни коп“	High	Medium	4 940 303	9min 32sec
3. „Јаловина“	High	Medium	3 786 309	7min 8sec
4. „Северо-ист. коп“	High	Low	991 537	2min 21sec
5. „Северо-ист. коп“	High	High	15 536 863	52min 10sec

Сходно томе генерисање коначног густог облака тачака, као хардверски најзахтевнијег поступка, тестирано је у неколико комбинација подешавања а резултати су приказани у Табела 2. Изглед генерисаних облака за сва три АОИ је приказан на Слика 6.



Слика 6. Генерисани густо облака тачака

Даље моделовање своди се на обраду и манипулацију формираног облака тачака и његов извоз у многобројне формате и структуре сходно циљаној намени. Сходно моделовању терена површинског копа један од уобичајених приказа је као 3D полигонални модел у форми ТИН-а као што је приказано на Слика 7.



Слика 7. 3D модел детаља терена

## 6. ОЦЕНА ТАЧНОСТИ ДИГИТАЛНОГ МОДЕЛА

У сврху оцене квалитета формираног ДМТ заснованог на основу УАВ премера, поједини ГЦП маркери су предвиђени као контролне тачке и нису коришћени приликом моделовања. На формираном облаку тачака маркиране су тачке приближније контролним маркерима и на површини воде обзиром да је и она опажана ГПС-ом. Разлике просторних координата одређених ГПС премером и очитавањем на моделу приказани су у Табела 3.

Табела 3. Анализа координата контролних ГЦП [m]

No	ΔE	ΔN	ΔH
K1	0.019	0.014	0.237
K3	0.042	0.011	0.023
O4	0.034	0.010	0.021
Voda1	-	-	0.045
Average	0.032	0.012	0.081

Из ове анализе јасно се види тачност формираног ДМТ. Визуелним прегледом модела, метаподатака, изохипси и сл. уочљиво је да се на воденим површинама јавља повећан шум у подацима па је извршена додатна контрола очитавањем висина на моделу а резултати су приказани у Табела 4.

Табела 4. Анализа висина тачака на води[m]

No	H GPS	H UAV DMT	ΔH
Voda_2	69.92	69.76	0.16
Voda_3	69.92	69.85	0.07
Voda_4	69.92	69.69	0.23
Voda_5	69.92	69.69	0.23

Очигледно је да су површи терена под водом проблематичне са становишта аквизиције података УАВ премером као и код већине других техника.

Додатна нумеричка анализа могућа је очитавањем векторских примитива (тачка, линија, полигон) на површи ДМТ. За предметни локалитет доступни су подаци на основу терестричких мерења, која су обављена у прошлости као и непосредно пре примене УАВ премера, у форми дигиталних карата и модела. Ови подаци су у раду усвојени као условно тачни сходно тачности

методе прикупљања података и коришћени су у упоредној анализи са моделима заснованим на УАВ премеру. Како би поређење било што прецизније, у програм је учитан као посебни слој, структурне линијеса карте терестричког премера (Слика 8).



Слика 8. Векторизација тачака модела

Укупно је векторизовано 70 тачака, а резултати карактеристични за поједине врсте површи су приказани у Табела 5, из којих се јасно види да површи под водом вегетацијом узоркују одступање модела док је под глином одступање занемариво.

Табела 5. Анализа векторизованих тачака

No.	H <sub>UAV</sub>	H <sub>terest.</sub>	Surface type	ΔH
1	69.66	69.18	Water	48
3	69.65	69.47	Water	18
21	74.82	74.86	Clay	-5
22	76.02	76.03	Clay	-1
40	75.25	74.94	Low vegetation	30
50	75.35	74.88	Low vegetation	47

## 7. ЗАКЉУЧАК

Развој и доступност дигиталне фотограметрије применом савремених платформи УАВ система, задњих година створило је услове за испитивање његове примене код моделовања дигиталних модела терена. Циљ рада и јесте био да се тестира да ли се аквизицијом података о терену на овај начин могу постићи добри резултати моделовања, сходно стандардним применама ДМТ (рачунање кубатура, профила, праћења промена и др.). Обзиром да је на локалитету површинског копа глине вишегодишњим праћењем промена формиран модел података у дигиталној форми, у раду је омогућена упоредна анализа ДМТ.

Моделовањем ДМТ заснованог на УАВ премеру, прошло се кроз све фазе почев од аквизиције података па до генерисања финалног продукта у виду познатих структура ДМТ. Технологија се у потпуности ослања на софтверско управљање и процесирање, уз адекватно познавање техника премера, фотограметрије, основа летења и сл. Употреба контролних ГЦП се препоручује као стандард за геореференцирање и контролу резултата. Процес аквизиције података може бити потпуно аутоматизован, са приказом података у реалном времену, док се недостаци више односе на ограничења која диктирају услови који морају бити испуњени да би се премер обавио, уз евентуалне потешкоће распоређивања ГЦП маркера код неприступачних терена. Сам процес моделовања обавља се софтверски, уз извођење стандардних процедура за овакву врсту улазних података фотограметријских снимака. Те процедуре се заснивају на алгоритмима за преклапање снимака

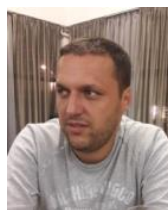
формирања аеротриангулације и 3Д модела на основу вишеструких парова снимака. Кориснички најзахтевнији део је референцирање снимака коришћењем контролних ГЦП тачака, што је оправдано центиметарском прецизношћу, геореференцирањем и контролом. Такође, моделовање је изузетно хардверски и складишно захтевно сразмерно подручју обраде. Формирани модели приказују површину терена веома реалистично и детаљно. Оценом тачности доказано је да на површинама под глином је висока тачност модела док су површи под водом и вегетацијом проблематичне и да се на тим местима јављају повећани „шумови“ у подацима. Развојем УАВ система као платформе за сензоре дигиталне фотограметрије и софистицираних и специјализованих софтвера у овој области доводе до могућност свакодневног премера у геодетској делатности.

У данашње време примена класичних метода као што је терестричка и даље је веома заступљена, али у појединим пословима као што је овај описан у раду код моделовања и праћења промена на оваквој конфигурацији терена, специфичности УАВ фотограметријског премера намеће се као продуктивнија метода. Такође, развој геоинформационих система и база података локалног и националног карактера изискује вишенаменски карактер прикупљених података и модела, па се и ту предност полако даје савременијим у однос на неке класичније технике премера.

## 8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] C. L. Miller and R. A. Laflamme, "The digital terrain model - Theory and application," *Photogrammetric Engineering, Massachusetts Ins. of Technology*, vol. 24, pp. 433-442, 1958.
- [2] M. A. Gomasca, *Basics of Geomatics*, Milano, Italy: Springer, 2004.
- [3] J. P. Wilson and J. C. Gallant, *Digital Terrain Analysis in Terrain Analysis: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [4] Weibel R. and Heller M., "Geographical Information Systems: Principles and applications," in *Digital terrain modelling*, Longman, Harlow, 1991, pp. 269-297.
- [5] F. Nex and F. Remondio, "UAV for 3D mapping applications: A review," *Applied Geomatics*, 2014.
- [6] M. Westoby and J. Brasington, "Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications," *Geomorphology*, vol. 179, pp. 300-314, 2012.
- [7] <https://www.parrot.com/us/drones/anafi>

### Кратка биографија:



**Радован Симић** рођен је у Кикинди 1980. год. Дипломски рад на тему „Моделовање и праћење промена 3Д модела терена на површинском копу „Гарајевац-исток“ К.о. Нови Бечеј, одбранио је 2016.год. на Факултету техничких наука. На исту тему објавио је рад у Војно техничком гласнику 2019. контакт: simic.jv@gmail.com