

Ortomozaiik: zajem in obdelava podatkov pri arheološkem dokumentiranju

Orthomosaic: Data Capturing and Processing in Archaeological Documentation

© Matic Zupan

Narodni muzej Slovenije; matic.zupan@nms.si

Izveček: V prispevku avtor predstavi koncept in uporabo ortomozaike v arheološkem dokumentiranju. Z grafičnimi prikazi in praktičnimi primeri opiše postopke zajemanja podatkov in izdelave ortomozaike. Predstavi potrebno opremo, tehnike fotografiranja in merjenja koordinat za dokumentiranje izkopnega polja, preseka in predmeta ter osnovne korake izdelave ortomozaike v računalniškem programu. Opozori tudi na nekatere probleme in potencialne rešitve, s katerimi se lahko srečamo pri delu.

Ključne besede: ortomozaiik, fotogrametrija, metodologija, GIS, 3D

Abstract: In this article, the author presents the concept and usage of orthomosaic in archaeological documentation. Based on graphical and practical examples, he describes the basic steps for data capturing and processing. The author presents the necessary equipment, photography techniques, and ways of measuring coordinates for documenting an excavation field, cross-section, and object, and basic steps for creating the orthomosaic in computer software. He also addresses some issues that may be encountered and describes potential solutions.

Keywords: orthomosaic, photogrammetry, methodology, GIS, 3D

Uvod

Zajem tridimenzionalnih podatkov in fotogrametrija sta v arheologiji prisotna že desetletja (Kimball 2016, 3–10; Marín-Buzón *et al.* 2021, 1–27), v zadnjem času pa so se z napredkom v tehnologiji pojavile nove oblike arheološke dokumentacije. Fotogrametrični zajem terenskih raziskav – od posameznih SE do celih arheoloških kontekstov – omogoča izdelavo tridimenzionalnih modelov, iz katerih izdelamo razpačene in georeferencirane posnetke, t. i. ortomozaike, in digitalne modele višin (DMV). Gre za hiter in izredno natančen zajem velike količine arheoloških podatkov, ki ponuja nove možnosti digitalnega dokumentiranja, interpretiranja in prezentiranja. Ortomozaiik in DMV nadomestita merjenje stratigrafskih plasti s totalno postajo, služita lahko kot fotokica in zračni posnetek, ponujata več možnosti za reinterpretacijo arheoloških kontekstov, tridimenzionalni modeli pa kot stranski produkt služijo za prezentiranje arheoloških raziskav. Vse skupaj prinaša tudi probleme, kot sta shranjevanje povečane količine podatkov ter visoke cene strojne in programske opreme, ki pa kljub temu postaja vse bolj dostopna. Takšna metoda dokumentiranja in zanj obvezna programska oprema zahtevata tudi priučitev novega znanja.¹

Namen tega članka je predstaviti postopke zajetja in obdelave podatkov za ortomozaiik² arheološkega izkopne-

ga polja, preseka ali predmeta. Namenjen je predvsem bralcem, ki nimajo oziroma imajo malo izkušenj na tem področju. Predstavimo osnovne postopke fotografiranja s pomočjo ročnega fotoaparata, uporabne nasvete ter primere dobrih in slabih praks. V članku opišemo tudi osnovne korake izdelave ortomozaike v računalniškem programu Agisoft Metashape. Čeprav je na voljo vrsta programov, vsi delujejo na podlagi fotogrametrije in tridimenzionalnega oblaka točk, zato je osnova delovnega procesa pri vseh podobna. Že omenjeni Agisoft Metashape je za potrebe arheologije trenutno najboljša izbira, vendar je plačljiv. Brezplačne alternative so MeshLab, Meshroom, MicMac idr.

Kaj je ortomozaiik in za kaj ga uporabljamo?

Za lažje razumevanje članka bomo nekaj besed posvetili izrazom fotogrametrija, ortofoto in ortomozaiik. Fotogrametrija je v najširšem pomenu tehnologija pridobivanja zanesljivih meritev o fizičnih objektih in okolju s postopki snemanja, merjenja ter interpretacije slik in vzorcev, pridobljenih s senzorskim sistemom, ki zaznava elektromagnetno sevanje (Wolf, Dewitt, Wilkinson 2014). Temelji na združevanju dveh ali več fotografij istega objekta, zajetih pod različnimi koti, ki jih poravnamo in sestavimo v fotogrametrični posnetek (Booyesen *et al.* 2021, 7301–7314; Aber, Marzolf, Ries 2010, 23). Fotogrametrija je lahko podlaga tako za dvodimenzionalne panoramske slike, fotomozaike in ortofoto kot tridimenzionalne modele objektov (slika 1).

V nadaljevanju pojasnimo nekatere izraze in predlagamo njihovo uporabo.

¹ Za primere arheoloških raziskav glej Kimball 2016; Benavides López *et al.* 2016; Sapirstein, Murray 2017; Bagi 2018 in tam citirano literaturo.

² V slovenski arheologiji se za ortomozaiik pogosto uporablja neroden izraz *3D fotokica*, saj še nimamo vzpostavljene terminologije.



Slika 1. Posnetek ostankov srednjeveške utrdbe iz petih zlepljenih fotografij (levo) in tridimenzionalni model keramičnega lonca (desno). Oba posnetka sta izdelana na podlagi fotogrametrije (avtor: M. Zupan).

Figure 1. An image of the remains of medieval fortifications, which was created by stitching together five photos (left) and a three-dimensional model of a ceramic pot (right). Both are based on photogrammetry (author: M. Zupan).

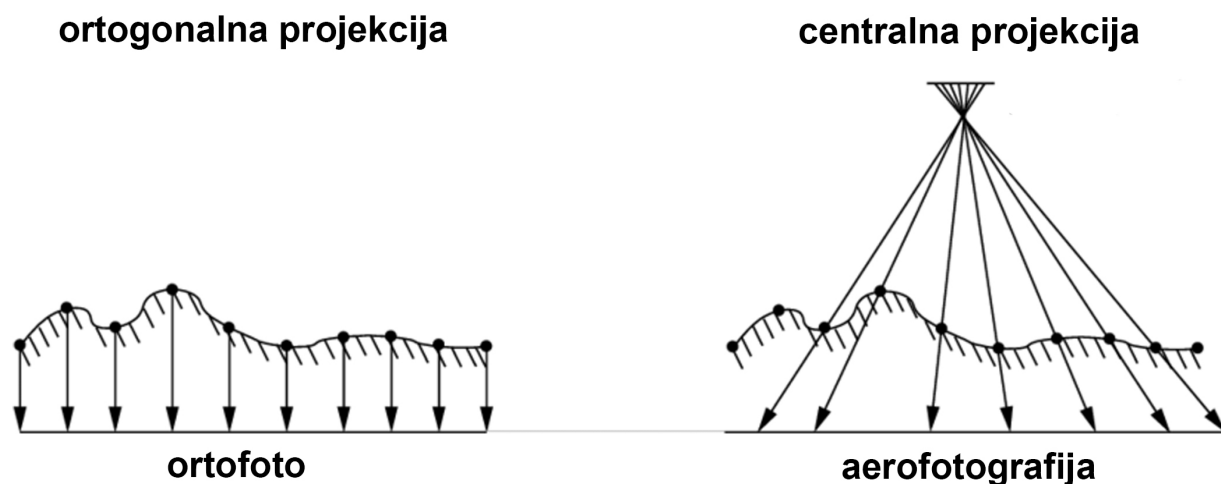
Ortofoto definiramo kot razpačeno fotografijo,³ ki je z upoštevanjem podatkov o reliefu in absolutne orientacije fotografije pretvorjena v ortogonalno projekcijo. V metričnem smislu je ortofoto enak linijskemu načrtu ali karti, zato je z njim mogoče izvajati natančne topografske meritve razdalj, kotov in površin ter prenašati situacijo na druge karte enakega merila (Splet 1; Aber, Marzolf, Ries 2010, 34–35; Elias, Alderton 2020, 301–314). Na ortofotu torej z razpačenjem izničimo vpliv naklona kamere in vsako točko vidimo tako, kot če bi stali povsem pravokotno nanjo (slika 2). Ker pa ortofoto upošteva podatke digitalnega modela reliefa (DMR),⁴ vegetacija, stavbe, mostovi in drugi objekti, ki so visoko nad reliefom, niso razpačeni – primer je državni ortofoto načrt Slovenije (Splet 2), na katerem so jasno vidni zidovi nerazpačenih stavb. Na drugi strani pravi ortofoto (ang. *true orthophoto*) temelji na digitalnem modelu ploskev (DMP), ki zajema tudi višine vegetacije in objektov nad zemljenim površjem, zato je razpačena vsaka vidna površina (slika 3) (Deng *et al.* 2015; Nielsen 2004).

³ Ortofoto največkrat povezujemo z aerofotografijo ali satelitskimi posnetki, vendar zaobjema tudi fotografiranje površja ali drugih površin s tal.

⁴ Točne definicije so se z leti v slovenski in tuji literaturi spreminjale, zato v članku DMR enačimo z angleškim DTM (digital terrain model), DMP pa z angleškim DSM (digital surface model). Njuna nadpomenka je digitalni model višin (DMV ali ang. DEM) (Štular, Lozić, Eichert 2021, 2–3).

Rezultat združevanja ortofotov je ortomozaik, ki se v zadnjem času vse pogostejše uporablja kot nova metoda arheološkega dokumentiranja. Ortomozaik ustvarimo s fotogrametričnim zajetjem površine ali objekta in postopkom struktura iz gibanja (ang. *structure from motion* ali *SfM*). SfM omogoča izračun relativne projekcijske geometrije in izdelavo oblaka točk, ki ga na podlagi iskanja in ujemanja pikslov, sestavi iz serije fotografij, posnetih z različnih položajev. Z različnimi parametri v računalniškem programu sestavimo gost oblak točk, iz katerega z mreženjem (ang. *meshing*) ustvarimo tridimenzionalni model (Westoby *et al.* 2012, 300–314; Benavides López *et al.* 2016, 495–506). Ob pravilnem zajemu in obdelavi podatkov, opisanih v nadaljevanju, je takšen tridimenzionalni model podlaga za ortomozaik in digitalni model višin (DMV) izkopnega polja, preseka ali predmeta. Med arheološkim dokumentiranjem tako dobimo mnogo več podatkov, ki nam nudijo večjo natančnost in objektivnost pri interpretiranju. Za vsako točko na površini ortomozaika lahko določimo točne koordinate, izrišemo in izmerimo lahko površine in prostornine stratigrafskih enot, dobimo pregledno sliko z zraka, vsako interpretacijo ortomozaika pa je mogoče naknadno preveriti, spremeniti ali dopolniti (Benavides López *et al.* 2016, 504–506; Marín-Buzón *et al.* 2021, 22).

Kot vsaka nova metoda tudi ta prinaša izzive, spremembe in težave, ki smo jih deloma omenili že v uvodnem delu. Ena od sprememb je, da k standardnemu sistemu



Slika 2. Razlika med pogledom pri ortogonalni in centralni projekciji. Slednja bo imela popačeno površino, ker jo gledamo iz ene same točke (po Neteler, Mitasova 2002, Fig. 10).

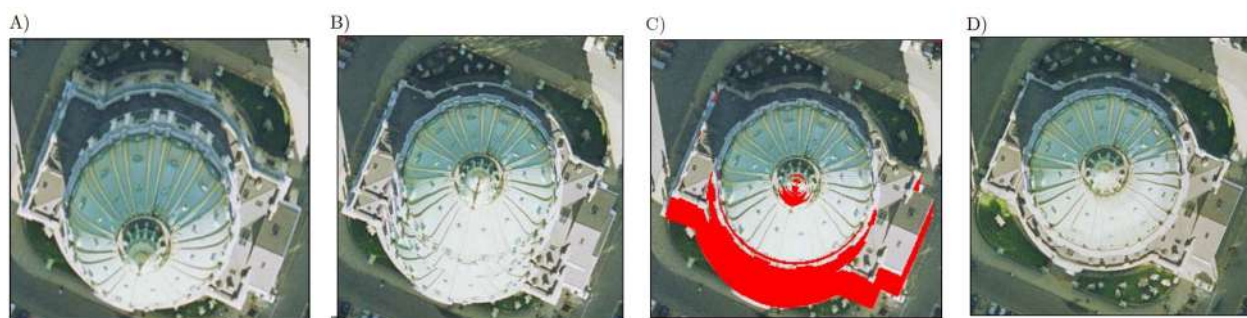
Figure 2: The difference between an orthogonal and central projection. The latter will have distorted surface, due to the singular point of view (after Neteler, Mitasova 2002, Fig. 10).

dokumentiranja posameznega konteksta (Novaković *et al.* 2007, 82) ortomozaiki dodajo možnost dokumentiranja več kontekstov hkrati, saj lahko na primer na enem ortomozaiku (skupaj z vsemi podatki, ki jih vsebuje) hkrati prikažemo vse stratigrafske enote, ki predstavljajo točno določeno fazo naselbine. Novosti, ki jih prinaša ortomozaik, tako ne smemo gledati kot popolno opustitev obstoječe metodologije, temveč kot zamenjavo nekaterih tehnik dokumentiranja in dopolnitev drugih (Kimball 2016, 61–62).

Kaj potrebujemo za zajem podatkov?

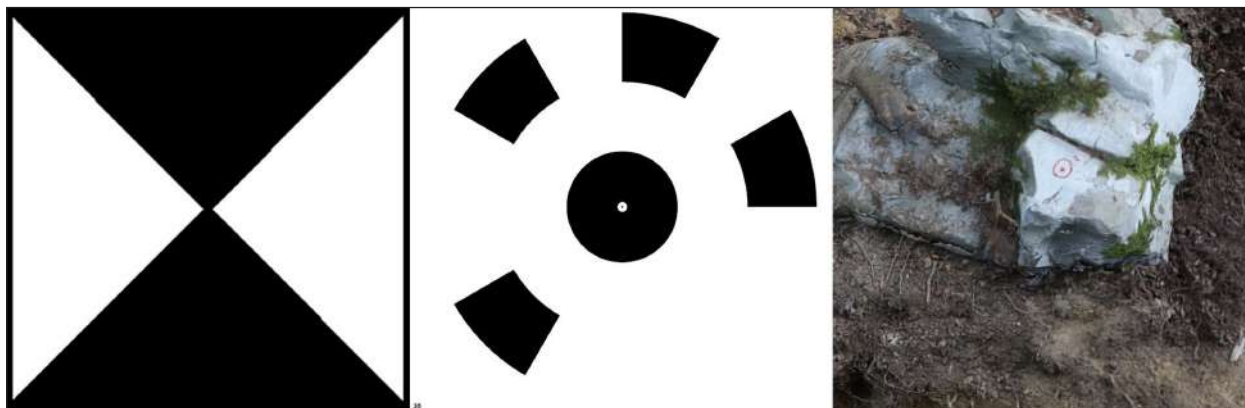
Fotoaparati

Osnovno orodje za zajem podatkov pri ortomozaiku je ročni fotoaparati. Potrebujemo fotografije, ki se bodo med seboj prekrivale in povezale v tridimenzionalni model. To lahko storimo tudi z mobilnimi telefoni, ki pa imajo običajno slabše kamere, zato bo slabša tudi kvaliteta ortomozaika. V arheologiji se zelo pogosto uporablja letéči



Slika 3. A) Ortofoto na podlagi DMR, zato cerkev ni razpačena. B) Razpačenje cerkve, kjer so še vidne sledi razpačenja. C) Brisanje sledi razpačenja. D) Pravi ortofoto (po Nielsen 2004, Fig. 2.9).

Figure 3. A) Orthophoto based on DTM, which is why the church is distorted. B) Corrected orthophoto with traces of the distortion still visible. C) Traces of the distortion, that will be removed. D) True orthophoto. (adapted from Nielsen 2004, Fig. 2.9).



Slika 4. Trije primeri fototočk: običajna (levo), ki ji pri izdelavi ortomozaiika ročno dodelimo izmerjene koordinate; kodirana (sredina) za program Agisoft Metashape, ki koordinate samodejno poveže s fototočkami; narisana na skalo in označena s številko (desno) (foto: M. Zupan).

Figure 4. Three examples of photo markers: an ordinary photo marker (left), to which we manually assign coordinates when creating an orthomosaic; a coded marker (middle) for Agisoft Metashape, which automatically assigns coordinates to each marker; a hand-drawn marker with a number (right) (photo: M. Zupan).

dron s kamero, za katerega veljajo enaka pravila fotografiranja kot z ročnim fotoaparatom.⁵

Fototočke in merilo

Fototočke nam pomagajo pri umestitvi ortomozaiika v prostor. Fototočka je lahko kakršna koli točka (slika 4), ki bo vidna na ortomozaiiku in ji z ustrežno napravo, kot sta teodolit in GPS,⁶ izmerimo koordinate. Te v postopku izdelave dodamo na ortomozaiik, ki bo tako natančno umeščen v prostor.

Pri fotografiranju *in situ* predmetov vedno uporabimo fototočke, medtem ko za predmete po odstranitvi ali mikroizkopavanja v laboratoriju ni potrebe po umestitvi v prostor, zato fototočk ne potrebujemo in dodamo le merilo oziroma merilni predmet (trasirka, ravnilo, merilni trak). Kasneje v računalniškem programu merilnemu predmetu določimo točne dimenzije in tako bo ortomozaiik v pravem merilu (glej poglavje Potencialni problemi in rešitve).

Dodatna oprema

Predvsem za fotografiranje večjih površin je priročna fotografska palica (monopod), s katero lahko fotoaparat dvignemo višje in s tem na fotografiji zajamemo večjo površino. Številne znamke fotoaparata imajo že mobilne aplikacije, ki omogočajo, da pametni telefon prek Bluetooth ali WiFi signala povežemo s fotoaparatom in z njim upravljamo na daljavo.

Za fotografiranje predmetov v notranjih prostorih pripravimo ustrezno osvetlitev z vseh strani, da se izognemo sencam in prevelikim kontrastom. Luči postavimo dovolj visoko, da med fotografiranjem ne bodo svetile v objektiv fotoaparata.

Kako zajeti podatke?

Območje ortomozaiika

Pred začetkom fotografiranja z območja umaknemo orodje in drugo opremo. Če uporabljamo fototočke, poskrbimo, da bodo na vidnih mestih – smiselno jih je postaviti tik izven roba območja, da jih lahko po potrebi izrežemo iz ortomozaiika (slika 5). Za natančno umestitev ortomozaiika v prostor uporabimo vsaj 4 fototočke, vsaka od njih pa mora biti vidna vsaj na dveh fotografijah. Pri

⁵ V članku ne govorimo o dronu, ker predvidevamo, da bo vsak začetnik najprej poprijel za ročni fotoaparat, ne pa za letelci dron, ki zahteva še izpit za upravljanje, dovoljenje za uporabo itd.

⁶ GPS ima manjšo natančnost, ki je lahko v dobrih pogojih še sprejemljiva.

večjih površinah uporabimo več fototočk v medsebojni razdalji do največ nekaj metrov. Na razgibanih površinah dodatne fototočke niso potrebne, temveč je osnova za kvaliteten ortomozaik še vedno dovoljšna količina kvalitetnih fotografij. Dodatne fototočke na vrhu vsakega zidu in dnu jarka zato niso potrebne.

Osnovna načela fotografiranja za ortomozaik

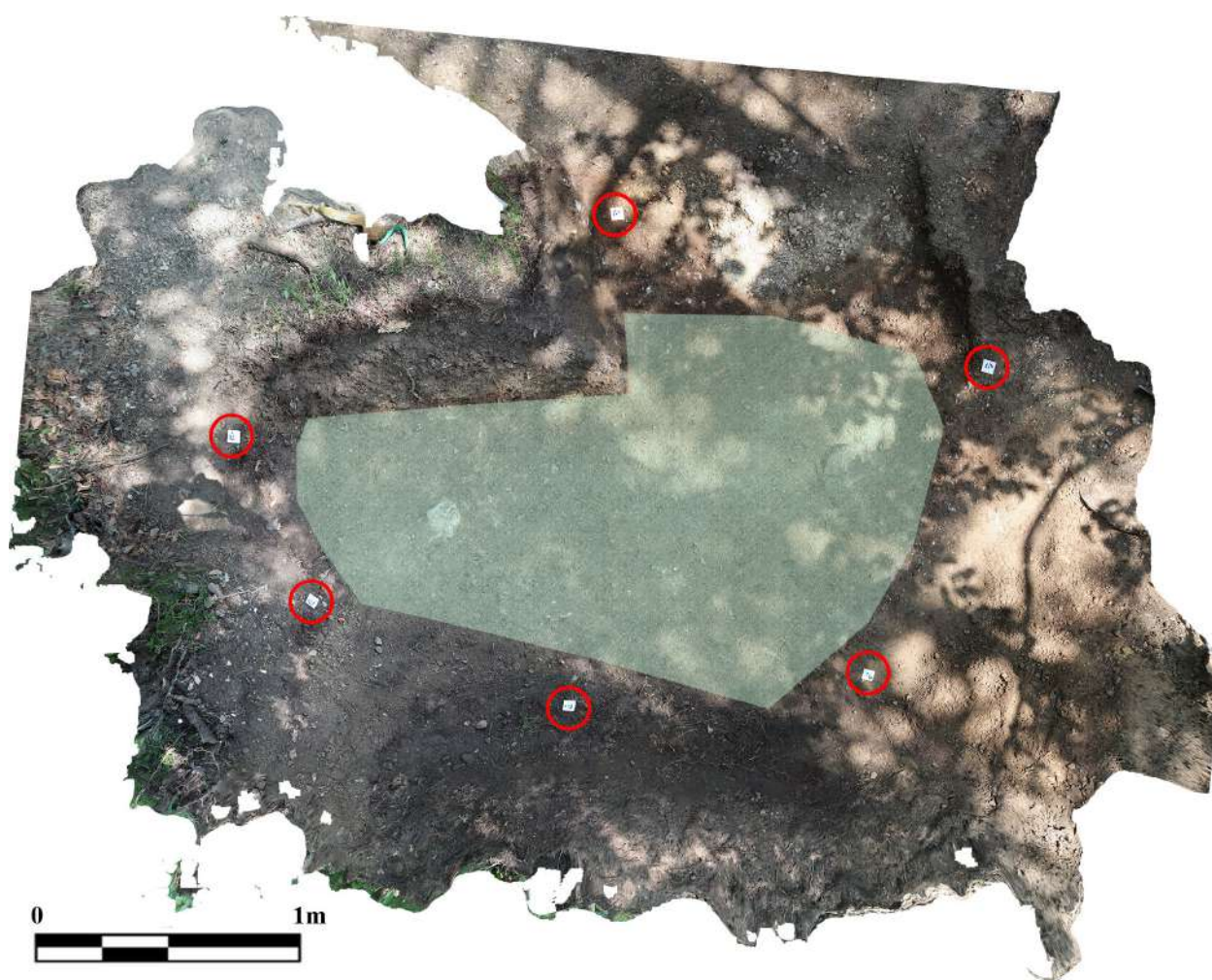
Vedno je bolje narediti več fotografij kot premalo. Na vsaki fotografiji naj bo le del območja ortomozaika, tako

da na koncu s serijo fotografij zajamemo vse površine. Enako velja za fotografiranje predmetov.

Fotografije naj se navpično in vodoravno medsebojno prekrivajo okoli 60 %, s čimer poskrbimo, da bo vsaka točka območja na najmanj dveh fotografijah.

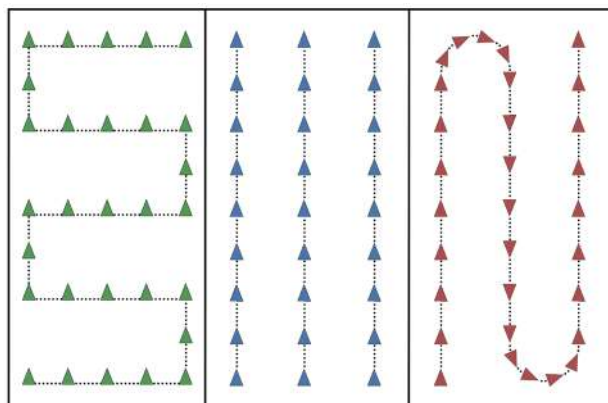
Fotografiramo brez povečave (zoooma). Na fotografijah zajamemo čim manj ozadja – to še posebej velja za fotografiranje predmetov. Fotografij ne obrezujemo.

Fotoaparata med zajemanjem ne obračamo iz pokončne v vodoravno usmerjenost ali obratno.



Slika 5. Ortomozaik izkopnega polja (zeleno) in fototočk (obkroženo rdeče), ki jih lahko po potrebi izrežemo iz končnega ortomozaika (avtor: M. Zupan).

Figure 5. Orthomosaic of an excavation field (green) and markers (red circles), which can be removed from the final orthomosaic (author: M. Zupan).



Slika 6. Tlorisni prikaz fotografiranja horizontalnih površin. Levo: Pri fotografiranju se je najbolje pomikati v povezani liniji, kar pospeši in poenostavi izdelavo ortomosaika. V sončnem vremenu smo obrnjeni proti soncu, da je naša senca za nami in izven objektiv. Sredina: Še posebej na razgibanih terenih je včasih lažje fotografirati v ravnih linijah. Poskrbimo, da je med fotografijami dovolj vodoravnega prekrivanja (okoli 60 %). Desno: V oblačnem vremenu se brez težav pomikamo v povezani liniji in fotografiramo v vse smeri. Paziti moramo, da med obračanjem v drugo linijo naredimo vsaj nekaj vmesnih fotografij (3–4). Ta način premikanja ni primeren za sončno vreme, ker nismo vedno obrnjeni proti soncu in bomo na fotografijah zajeli lastno senco (avtor: M. Zupan).

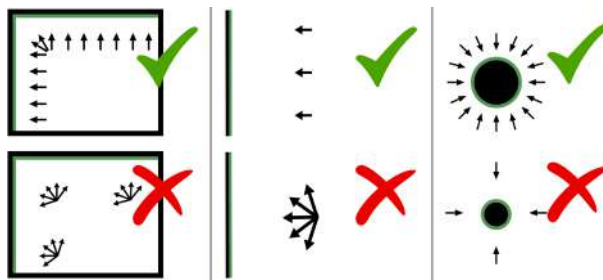
Figure 6. Planar view of photographing horizontal surfaces.

Left: When photographing, it is best to move continuously along one line, which speeds up and simplifies the generation of an orthomosaic. If the weather is sunny, we face the sun, so that our shadow is behind us and out of frame. Middle: Sometimes it is easier to capture the photos in several straight lines, especially on rough terrain. We need to ensure that there is enough horizontal overlap between the photos (cca. 60%). Right: If the weather is cloudy, we can move continuously along one line and capture the photos from all directions. We have to be careful to take at least a few photos (3–4) while turning around. However, this style of movement is not suitable for sunny weather, because we are not always facing the sun and will thus also capture our own shadow (author: M. Zupan).

Fotografiranje, postavitve, premikanje, sence ...

V nadaljevanju grafično in pisno predstavimo napotke za postavitve in premikanje med fotografiranjem, opozorimo na pogoste napake in podamo rešitve za nekatere potencialne težave.⁷

⁷ Tlorisni in stranski prikazi fotografiranja ne prikazujejo zajetja celotnega območja ortomosaika, ampak le različne smeri in naklone fotografiranja posameznih površin, struktur in predmetov.



Slika 7. Tlorisni prikaz fotografiranja vertikalnih površin.

Levo: Med fotografiranjem smo obrnjeni pravokotno na površino in se premikamo vzporedno z njo. Ne stojimo na mestu in se obračamo naokoli, ker bo ortomosaik popačen. Pazimo, da med sosednjima površinama naredimo dovolj vmesnih fotografij. Sredina: Pri manjših presekih in drugih vertikalnih površinah je dovolj že nekaj fotografij, vendar je še vedno pomembno, da stojimo pravokotno na površino in se pomikamo vzporedno z njo. Desno: Fotografiranje predmetov za izdelavo ortomosaika oziroma tridimenzionalnega modela zahteva več fotografij. Še posebej pri okroglih predmetih, kot so posode, moramo paziti, da smo vedno obrnjeni pravokotno na površino, ki jo želimo zajeti na posamezni fotografiji (avtor: M. Zupan, povzeto po priročniku Agisoft Metashape 1.7).

Figure 7. Planar view of photographing vertical surfaces. Left: When photographing, we face perpendicular to the surface and move parallel to it. We should not stand in one place and turn around, because this will cause the orthomosaic to be distorted. We have to be careful to take enough photos between the two adjacent surfaces. Middle: For small cross-sections and other vertical surfaces, just a few photos are enough. However, it is still important to stand facing perpendicular to the surface and move parallel to it. Right: Photographing objects for the purposes of an orthomosaic or a three-dimensional model requires more photos. Particularly with round objects, such as ceramic vessels, we have to be careful that we are always facing perpendicular to the surface that we want to capture in each photo (author: M. Zupan).

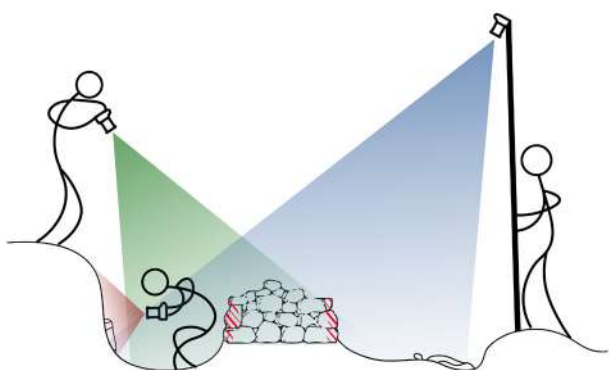
Fotografiranje predmetov

Postopek fotografiranja predmetov *in situ* ali po odstranitvi je enak fotografiranju površin, vendar pogosto zahteva nekaj dodatne priprave. Pazimo, da v objektiv zajamemo čim manj okolice in da je površina predmeta izostrena. Prav tako poskrbimo za ustrezno osvetlitev. Na terenu je bolje fotografirati predmet v senci, da se izognemo presvetlim ali pretemnim površinam, ki podrobnosti na predmetu naredijo neprepoznavne tako na fotografiji kot kasneje na ortomosaiku (slika 13).

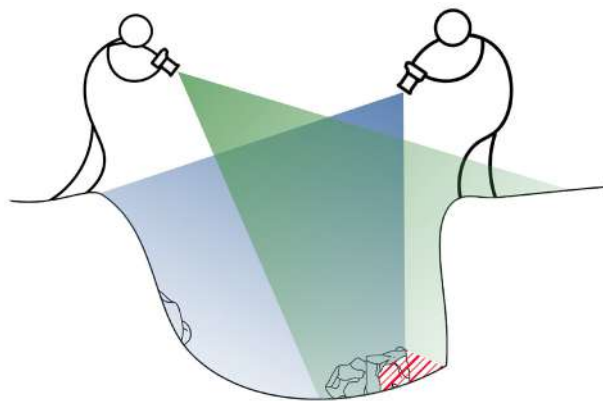


Slika 8. Stranski prikaz fotografiranja horizontalnih površin. Priporočljiv naklon fotoaparata je okoli 70° , pri čemer si lahko pomagamo tako, da vedno zajamemo površino še tik pred našimi stopali, kot prikazuje slika. Naklon po potrebi zvišamo za položne površine ali znižamo za bolj razgibana območja z veliko pozitivnimi (zidovi, nasipi, groblje) ali negativnimi elementi (jame, jarki). Med fotografiranjem pazimo na zadostno medsebojno prekrivanje – dobro vodilo je »en velik korak, ena fotografija« (avtor: M. Zupan).

Figure 8. Side view of photographing horizontal surfaces. When photographing, an angle of around 70° is recommended, which can usually be achieved by capturing the surface just in front of our feet as seen in the picture above. If necessary, we increase the angle for flatter areas or decrease it for more rugged terrain with many positive (walls, ramparts, cairns) or negative features (pits, ditches). We ensure that there is enough overlap between the photos – a useful rule of thumb is: “one step, one photo” (author: M. Zupan).



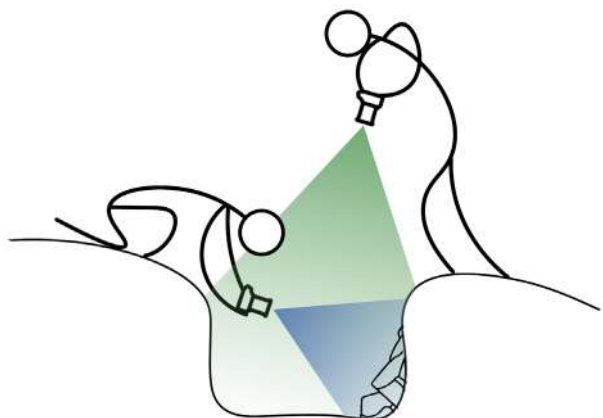
Slika 9. Stranski prikaz fotografiranja razgibanih površin. Da bi na fotografiji zajeli večjo površino naenkrat, lahko uporabimo fotografsko palico (modra) ali stojimo na višini (zeleni). V primeru vertikalnih površin (rdeča) se držimo pravil pod sliko 7. Če vertikalnih površin ne fotografiramo posebej, bo njihova površina na ortomozaiku popačena, kot bi se zgodilo z lici zidov na sliki (črtasto rdeča). Fotografirati jih moramo na enak način kot presek (rdeča) (avtor: M. Zupan).



Slika 10. Stranski prikaz fotografiranja večjega izkopnega polja. Presek na desni nas v tem primeru ne zanima, zato je dovolj, če pod naklonom fotografiramo z roba izkopnega polja (zeleni in modri). Med fotografiranjem moramo biti pozorni na t. i. slepe površine (črtasto rdeča), ki jih med prvotnim fotografiranjem nismo zajeli. Najbolje jih je predvideti vnaprej in na koncu posneti dodatne fotografije, saj bomo v nasprotnem primeru na ortomozaiku imeli praznine, ki jih zaradi narave arheoloških izkopavanj ni mogoče reševati za nazaj. V primeru fotografiranja predmetov v laboratoriju takšnih težav nimamo, saj se lahko običajno vrnemo in posnamemo več fotografij (avtor: M. Zupan).

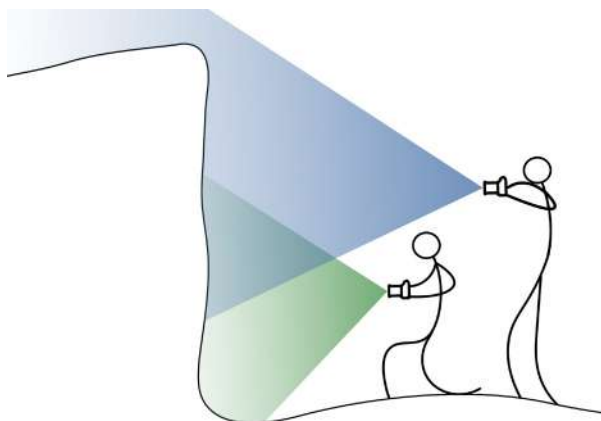
Figure 10. Side view of photographing a large excavation field. In this case, we are not interested in the cross-section on the right, so it suffices to photograph from the edge of the excavation field (green and blue). While photographing, we must pay attention to the “blind spots” (dashed red) that we did not capture during the initial photography. It is best to anticipate them in advance and capture additional photos at the end. Otherwise, the orthomosaic will have voids, which cannot be fixed in any of the later stages because of the nature of archaeological excavations. In the case of photographing objects in a laboratory, issues like that do not arise since we can usually come back and capture additional photos (author: M. Zupan).

Figure 9. Side view of photographing rugged surfaces. In order to capture a larger area in each photo, we can use a monopod (blue) or stand on elevated terrain (green). In the case of vertical surfaces (red), we follow the rules under Figure 7. If we do not capture the vertical surfaces separately, they will be distorted in the orthomosaic, as would happen with the faces of the wall (dashed red). We have to photograph both of them the same way as we did the left cross-section (red) (author: M. Zupan).



Slika 11. Stranski prikaz fotografiranja manjšega izkopnega polja. Fotografije lahko v takšnih primerih razdelimo na vertikalne oziroma pod zelo visokim kotom (zelena) in horizontalne (modra), ki so namenjene fotografiranju preseka (v tem primeru nas zanima le desni). Pazimo, da med vertikalnimi in horizontalnimi fotografijami zajamemo serijo vmesnih, ki jih bodo povezale (glej princip slike 7: levo) (avtor: M. Zupan).

Figure 11. Side view of photographing a small excavation field. In such cases, we can divide the photos into two groups: vertical or photos captured at a very high angle (green) and horizontal (blue), which we use to capture a cross-section (in this case, we need only the right one). We need to be careful to take a series of photos between vertical and horizontal ones that will connect them (author: M. Zupan).



Slika 12. Stranski prikaz fotografiranja visokega preseka.

Visok presek po višini razdelimo v več nivojev in ga fotografiramo v povezanih linijah (po principu na slikah 6 in 7). Pazimo na zadostno medsebojno prekrivanje tako v navpični kot vodoravni smeri (avtor: M. Zupan).

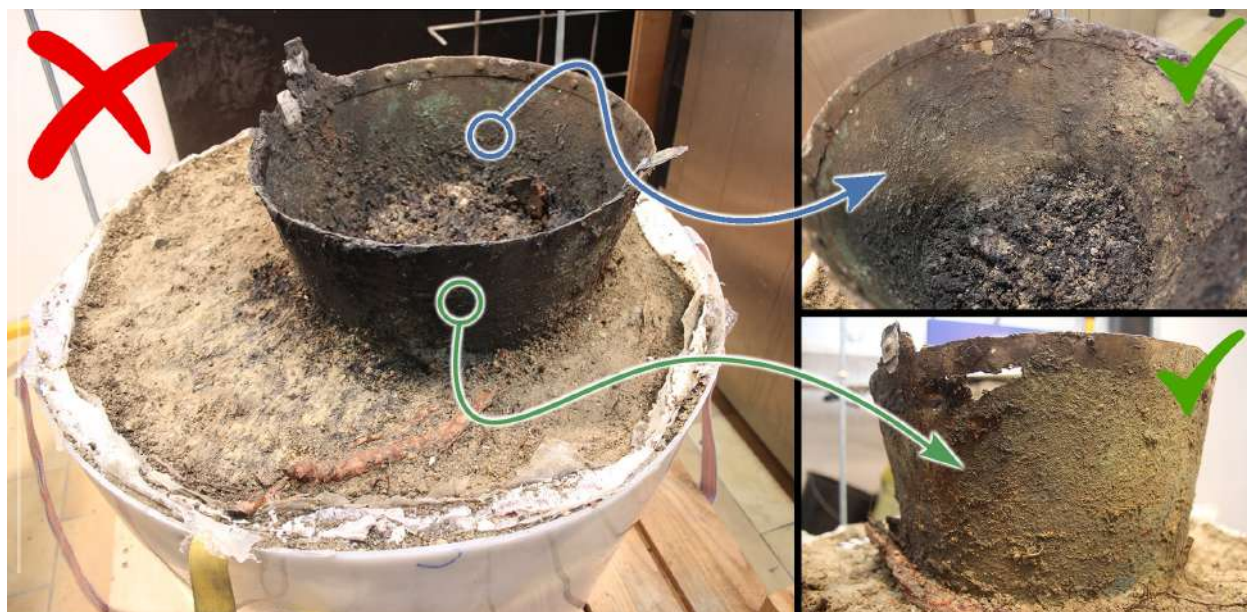
Figure 12. Side view of photographing a high cross-section.

We divide a high cross-section into two or more levels, photographing each level in a line (according to Figures 6 and 7). We need to make sure that there is enough vertical and horizontal overlap between the photos (author: M. Zupan).



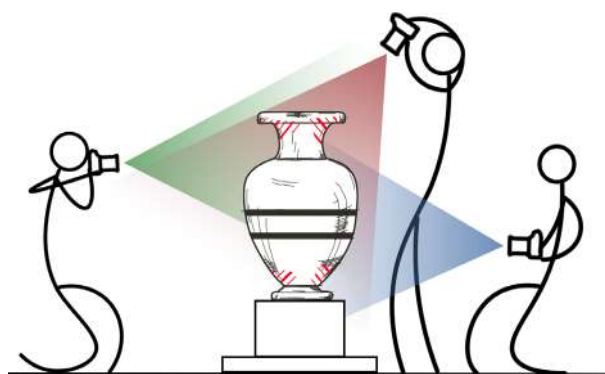
Slika 13. Razlika med fotografiranjem istega lončka na soncu (levo) in v senci (desno). Zatemnjeni deli tudi z naknadnimi popravki fotografij ne bodo ustvarili kvalitetnega ortomozaika (foto: M. Zupan).

Figure 13. The difference between photographing the same ceramic pot in the sun (left) and in the shade (right). Dark areas will not result in quality orthomosaic creation, even with subsequent photo corrections (photo: M. Zupan).



Slika 14. Primeri fotografij posode, kjer lahko zaradi nezadostne osvetlitve, neizostrenosti nekaterih površin in zajetja okolice naredimo slabe, skoraj neuporabne fotografije (levo). Največkrat je pravilen pristop fotografiranje notranjosti in zunanosti posode posebej (desno zgoraj in spodaj) (foto: M. Zupan).

Figure 14. Photo examples of a vessel where, due to insufficient lighting, blurred areas and capturing the background, we get almost useless photos of poor quality (left). In the majority of such cases, the correct approach is to capture the interior and exterior of the vessel separately (right, top and bottom) (photo: M. Zupan).



Slika 15. Stranski prikaz fotografiranja predmeta po odstranitvi. Velikost in razgibana oblika zahtevata, da fotografiramo v več nivojih (zelena, modra) in pod naklonom (rdeča), da zajamemo tudi zgornje površine predmeta. V tem primeru bomo morali narediti še serijo fotografij spodnjega dela ustja (črtasto rdeča, zgoraj) in najverjetneje tudi trupa (črtasto rdeča, spodaj), kjer bomo obrnjeni navzgor, pravokotno na površino posode (avtor: M. Zupan).

Figure 15. Side view of photographing an object after it was excavated. The size and dynamic shape require us to photograph in two levels (green, blue) and at an angle (red) to capture the upper surfaces of the object as well. In this case, we will have to take a series of photos of the lower part of the rim (dashed red, top) and most likely also the lower part of the belly (dashed red, bottom), where we will capture the photos facing upwards, perpendicular to the surface of the object (author: M. Zupan).

V notranjih prostorih predmet osvetlimo z razpršeno svetlobo in izberemo eno od dveh metod: 1) Predmet osvetlimo z vseh strani in se med fotografiranjem premikamo okoli njega, pri tem pa pazimo, da nanj ne mečemo sence z lastnim telesom. 2) Predmet postavimo na vrtljivo stojalo in ga obračamo, medtem ko fotografiramo na mestu, od koder naj prihaja tudi vir svetlobe. Pri tej metodi je pomembno zagotoviti enobarvno ozadje,⁸ sicer lahko računalniški program zmedemo do te mere, da ortomozaika ne bo mogoče izdelati.

⁸ Zadostuje že bela stena, najboljša pa je živo zeleno ozadje ali podlaga (ang. *green screen*). V računalniškem programu celotno ozadje izbrišemo, da na ortomozaiku ostane le predmet, kar je najlažje storiti, ko predmet zelo jasno izstopa od barve ozadja.



Slika 16. Delovni posnetek pred fotografiranjem za ortomozaiik preseka kamnite groblje. Šest od desetih uporabljenih fototočk je vidnih na fotografiji in obkroženih z rdečo (foto: M. Zupan, arhiv NMS in ZRC SAZU).

Figure 16. A photo of the cross-section of a cairn before photographing for the purposes of an orthomosaic. Six of the ten photo markers used can be seen in the photo and are circled red (photo: M. Zupan, archives of NMS and ZRC SAZU).

Posebej pozorni moramo biti pri fotografiranju posod ter drugih okroglih in votlih predmetov. Zaobljenost površin poveča število fotografij, ko upoštevamo, da moramo biti ves čas obrnjeni pravokotno na podlago (glej sliko 7: desno in 13). Odprte votle posode lahko fotografiramo v eni seriji (slika 14: levo), vendar to pogosto povzroča težave z izostritvijo in kontrastom (včasih lahko to rešimo z nastavitvami fotoaparata), zato priporočamo ločeno fotografiranje notranjosti in zunanosti posode (slika 14: desno).

Visoko odsevne površine fotografiramo osvetljene z razpršeno svetlobo, pomagamo pa si lahko tudi z nastavitvami na fotoaparatu (npr. majhen ISO in zaslonka). Če imamo takšen primer na terenu, počakamo na oblake ali poskrbimo za ustrezno senco nad visoko odsevnim predmetom.

Osnovni koraki izdelave ortomozaiika: primer kamnite groblje

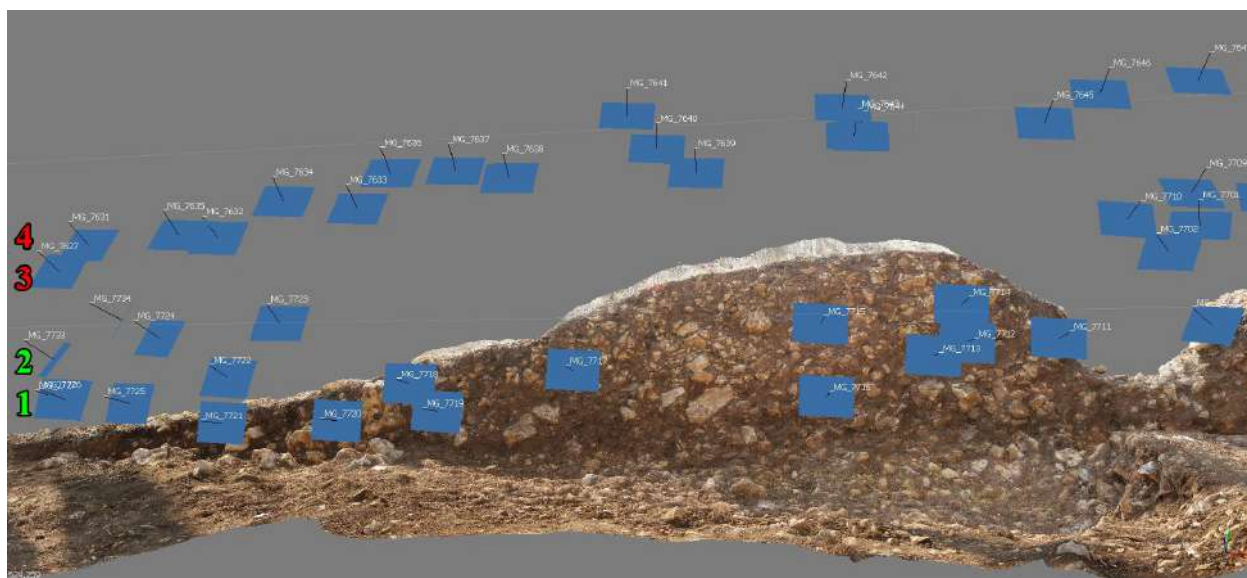
V nadaljevanju predstavljamo osnovne korake zajetja podatkov in izdelave ortomozaiika v programu Agisoft Metashape. Postopek izdelave bo nekoliko drugačen, če uporabljamo druge programe, vendar je princip enak. Naš cilj je, da bralec na našem primeru razume splošen postopek izdelave ortomozaiika, kar bo prispevalo tudi k boljšemu zajemanju podatkov.

Za primer vzemimo ortomozaiik okoli 12 m dolgega in 1,5 m visokega preseka kamnite groblje z bližine arheološkega najdišča Gradišče nad Knežakom⁹ (slika 16). Pri fotografiranju smo upoštevali navodila na slikah 6–12. Uporabili smo 10 fototočk, ki smo jih položili na tla pred grobljo in ne na sam presek, zato da jih lahko kasneje izrežemo iz ortomozaiika. Brez težav bi uporabili manj fototočk, vendar smo tako programu olajšali sestavljanje fotografij – v seriji fotografij lažje in hitreje prepozna isto izstopajočo fototočko kot npr. posamezen kamen.

Naslednji korak je bilo merjenje koordinat fototočk s teodolitom, takoj zatem pa fotografiranje območja ortomozaiika. S 117 fotografijami smo zajeli celoten presek groblje in vključili preostanek izkopnega polja, če bi kadar koli v poterski fazi potrebovali njegov ortomozaiik. Presek groblje je bil usmerjen stran od sonca, medtem ko smo druge težave z dolgimi sencami ustrezno reševali (glej premikanje na sliki 6: levo) oziroma se jim pri drevesih in groblji nismo mogli izogniti (slika 16).

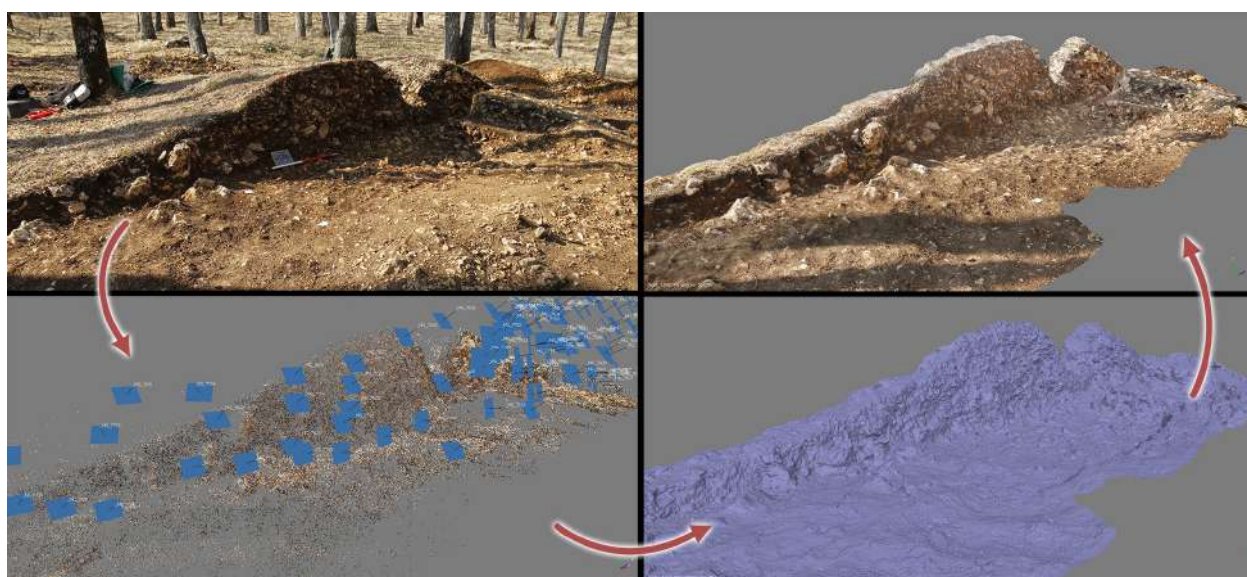
Zajete fotografije lahko razdelimo v štiri serije: v prvih dveh smo fotografirali izključno presek groblje in bili

⁹ Izkopavanja NMS in ZRC SAZU 2021, strokovno poročilo v delu. Več o najdišču v Laharnar, Lozić, Štular 2019, 263–271.



Slika 17. Prikaz lokacije in usmeritve fotografij (modri pravokotniki). Fotografiranje bi lahko razdelili na štiri serije: seriji 1 in 2 za presek groblje ter seriji 3 in 4 za njeno dno (avtor: M. Zupan).

Figure 17. Locations and orientations of the captured photos (blue rectangles). The whole process of photography can be divided into four series: the first two for the cross-section and the last two for its base (author: M. Zupan).



Slika 18. Delovni proces izdelave ortomozaika groblje v programu Agisoft Metashape 1.7. Dokumentarna fotografija (levo zgoraj), oblak točk z označenimi lokacijami in nakloni fotografiranja (levo spodaj), tridimenzionalni model groblje (desno spodaj) in tridimenzionalni model s teksturo (desno zgoraj) (avtor: M. Zupan).

Figure 18. The working process of creating an orthomosaic of the cairn with Agisoft Metashape 1.7 software. A documentary photo (top left), point cloud with marked locations and orientations of the captured photos (bottom left), three-dimensional model of the cairn (bottom right), and three-dimensional model with texture (top right) (author: M. Zupan).



Slika 19. Ortomozaik preseka kamnite groblje (avtor: M. Zupan).

Figure 19. An orthomosaic of the cross-section of the cairn (author: M. Zupan).



Slika 20. Ortomozaik tlorisa izkopnega polja (avtor: M. Zupan).

Figure 20. An orthomosaic of the excavation field (author: M. Zupan).

usmerjeni pravokotno nanj; pri tretji in četrti smo fotografirali pod naklonom ter zajeli presek in dno groblje (slika 17).

Vseh 117 fotografij in 10 meritev fototočk smo nato vnesli v Agisoft Metashape. V prvi fazi je »ortomozaik« le skupek digitalnih fotografij, torej milijonov in milijard slikovnih točk ali pikslov, ki ga računalniški program s postopkom struktura iz gibanja in različnimi parametri sestavi v tridimenzionalni oblak točk (slika 18: levo spodaj). Takšen oblak ima že približno obliko in barvo fotografirane groblje. Ko mu dodamo izmerjene koordinate vseh desetih fototočk, program sam prepozna fotografije s fototočkami,¹⁰ jim doda koordinate in oblak točk umešči v prostor. Naslednji korak je mreženje (ang. *meshing*) točk v oblaku, s čimer dobimo površino tridimenzionalnega modela (slika 18: desno spodaj), ki mu lahko dodamo teksturo (slika 18: desno zgoraj). Takšen model je osnova za ortomozaik preseka kamnite groblje in njen tloris, ki ju vidimo na slikah 19 in 20.

Izdelava 3D modela predmeta: primer depoja po odstranitvi

Postopek izdelave tridimenzionalnega modela predmeta ali ortomozaika je enak tistemu za izkopno polje ali presek, zato delovni proces predstavljamo le na sliki, na kateri je prikazan bronastodobni depo z najdišča Vodice v Dobropolju, Na Klanem¹¹ (slika 21). Pri fotografiranju predmetov bodimo pozorni na dodatne korake iz poglavja Fotografiranje predmetov (slike 13–15). Iz tridimenzionalnih modelov lahko z malo predznanja izdelamo kratko animacijo,¹² kar je odličen način za prezentacijo arheoloških najdb.

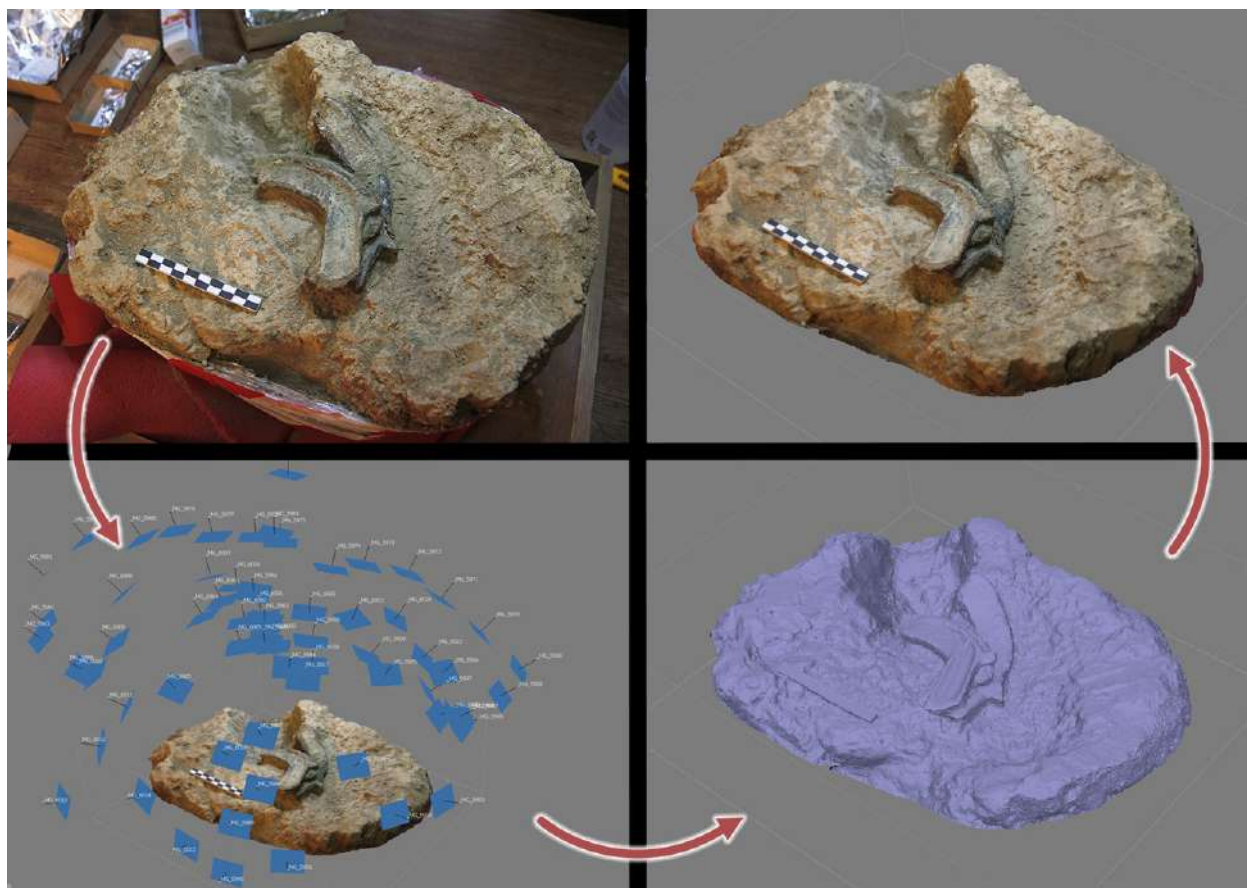
Potencialni problemi in rešitve

V nadaljevanju bomo predstavili nekatere probleme in njihove rešitve, s katerimi se lahko srečamo pri zajetju in obdelavi podatkov za ortomozaik. Pogoste so slepe

¹⁰ Agisoft Metashape ima lastne kodirane fototočke (glej sliko 4: sredina). Če uporabljamo druge fototočke, moramo koordinate in fototočke na fotografijah povezovati ročno.

¹¹ Turk 2021, 7–8; Bizjak 2022; Turk 2022.

¹² Agisoft Metashape ima že možnost izdelave preprostih animacij, za naprednejše pa je na voljo vrsta računalniških programov, kot je brezplačni program Blender.



Slika 21. Delovni proces izdelave tridimenzionalnega modela in ortomozaika predmetov po odstranitvi v programu Agisoft Metashape 1.7. Dokumentarna fotografija (levo zgoraj), oblak točk z označenimi lokacijami in nakloni fotografiranja (levo spodaj), tridimenzionalni model (desno spodaj) in tridimenzionalni model s teksturo (desno zgoraj) (avtor: M. Zupan).

Figure 21. The working process of creating a three-dimensional model and orthomosaic of objects after the excavations in Agisoft Metashape 1.7 software. A documentary photo (top left), point cloud with marked locations and orientations of the captured photos (bottom left), three-dimensional model of the cairn (bottom right), and three-dimensional model with texture (top right) (author: M. Zupan).

površine – površine, ki jih namerno ali nenamerno nismo fotografirali ter jih na tridimenzionalnih modelih in ortomozaikih prepoznamo kot prazna območja. Takšen primer imamo pri zgoraj omenjeni kamniti groblji s Knežaka, kjer smo ob preseku en del groblje pustili neizkopen (slika 22). Pri fotografiranju za ortomozaik preseka groblje nas neizkopen ostanek ni zanimal, zato smo ga med fotografiranjem deloma zajeli, ena stranica pa je ostala slepa površina (slika 22: desno). To smo predvideli vnaprej, tako da popravki niso bili potrebni, če pa bi želeli zapolniti prazno površino, bi morali zajeti dodatne

fotografije, še preden bi se izkopavanja nadaljevala in spremenila stanje na terenu. Fotografije bi preprosto dodali prejšnjim in izdelali nov, sedaj dopolnjen tridimenzionalni model.

Naslednji problem, ki ga želimo izpostaviti, je ortomozaik s fototočkami, za katere iz kakršnega koli razloga nimamo koordinat. Obstaja nekaj možnih rešitev, da ortomozaik še vedno umestimo v prostor ali mu vsaj določimo pravo merilo, čeprav bo natančnost lahko precej manjša.



Slika 22. Ostanek kamnite groblje, ki ga namerno nismo zajeli na fotografije, zato je na tridimenzionalnem modelu slepa površina (sivo, desno spodaj) (avtor: M. Zupan).

Figure 22. The remains of the cairn, which we deliberately did not capture on the photos. On the three-dimensional model it is seen as a blind spot (grey area, bottom right) (author: M. Zupan).

Pravo merilo za takšen ortomozaik dobimo, če na njem poiščemo objekt točno znanih dimenzij ali te naknadno izmerimo (trasirka, zid ali specifičen kamen, arheološka najdba itd.), nato pa storimo enako kot pri ortomozaiku predmetov po odstranitvi iz originalne lege – dimenzije vnesemo v tridimenzionalni model¹³ in izdelani ortomozaiki bodo posledično v pravem merilu. Podobno lahko merilo določamo v GIS orodju, kot je QGIS, kamor na podlago v ustreznem koordinatnem sistemu postavimo že izdelan ortomozaik in ga ročno povečamo oziroma pomanjšamo na pravo velikost.¹⁴

¹³ Postopek je odvisen od programa, ki ga uporabljamo, npr. Agisoft Metashape ponuja vnos poljubne dolžine med izbranimi točkami in določitev odstopanja; podobno funkcijo z merilnim orodjem ima tudi MeshLab.

¹⁴ Obstaja več načinov, npr. ustvarimo točke in jim s koordinatami določimo medsebojne razdalje, nato temu prilagodimo ortomozaik. V programu QGIS je ena od opcij tudi vtičnik *Freehand raster georeferencer*.

V primeru, da imamo serijo ortomozaikov, brez koordinat pa je le eden, ga v prostor umestimo glede na druge ortomozaike, tako da se različni arheološki ostanki, stojišča ob izkopnem polju, skale, drevesa ali drugi nepremični elementi na ortomozaikih medsebojno prekrivajo. Uporabimo lahko QGIS-ov vtičnik *Freehand raster georeferencer*. Če nimamo drugih ortomozaikov, lahko naštetim nepremičnim elementom na ortomozaiku naknadno izmerimo koordinate (če je še mogoče) in jih dodamo na tridimenzionalni model.

Sklep

V članku smo želeli na jasen in razdelan način predstaviti uporabo ortomozaika pri arheološkem dokumentiranju izkopnega polja, preseka in predmeta. Pri zajetu podatkov gre za razmeroma preprost in hiter postopek, ki največkrat ne zahteva posebne opreme in znanja. Problematičen je lahko proces izdelave ortomozaika, za

katerega potrebujemo primerno programsko opremo, ki ni nujno brezplačna in zahteva uporabo povsem novega programa. Ker je ortomozaika nujno izdelovati sproti med terenskim delom, je hitrost obdelave podatkov ključna, vendar odvisna od zmogljivosti strojne opreme, ki kljub vse večji dostopnosti pomeni visok strošek. Vsaj začasno lahko ta problem zaobidemo, tako da ortomozaik sprva izdelamo v nizki kakovosti, kar močno skrajša čas in zmanjša zahtevnost procesiranja, po potrebi pa ga naknadno popravljamo in izboljšujemo. Na tem mestu bi radi poudarili, da je kvaliteta ortomozaika vedno pogojena s kvaliteto vhodnih podatkov (fotografije, meritve fototočk). V primeru, da s fotografijami ne zajamemo vseh površin, bodo deli ortomozaika manjkali. Popačeni bodo, ko fotografiramo pod napačnim naklonom. Če naredimo premalo fotografij ali se te medsebojno ne prekrivajo dovolj, bo ortomozaik nenatančen po obliki, merilu in teksturi ali pa ga sploh ne bomo mogli izdelati. Vsaka fotografija mora ustrezno zajeti svoj del območja, da bomo lahko z njimi uspešno sestavili celoten ortomozaik.

Ortomozaik območje arheoloških raziskav prikaže brez popačenja in v merilu, v sebi pa hrani podatke, s katerimi lahko v GIS okolju operiramo na najrazličnejše načine. Vsaki točki na ortomozaiku lahko izmerimo točno lokacijo v prostoru (dolžina, širina in višina), arheološkim ostankom izmerimo dimenzije ter jih povezujemo in primerjamo s starejšimi in novejšimi raziskavami, označujemo, spreminjamo in dopolnjujemo stratigrafske enote ter jim določamo točno lokacijo in mere v tridimenzionalnem prostoru, vse skupaj povezujemo s tabelami podatkov itd. Tudi tridimenzionalni modeli, iz katerih ortomozaiki nastanejo in so zaenkrat stranski produkt, imajo velik potencial v poterski obdelavi podatkov in predstavljanju arheološke dediščine.

Novi načini fotogrametričnega zajetja podatkov so se izkazali kot uspešna tehnika arheološkega dokumentiranja. V celoti izboljšajo in nadomestijo nekatere ter dopolnjujejo ostale, že uveljavljene tehnike dokumentiranja. Ob takšni (pre)veliki količini podatkov je zagotovo še veliko neizkoriščenega potenciala in izzivov, ki zahtevajo rešitve, zato nas v prihodnosti nedvomno čaka veliko zanimivih novosti.

Literatura / References

- ABER, J. S., I. MARZOLFF, J. RIES 2010, *Small-Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications*. – Elsevier Science.
- BAGI, O. 2018, *The Applications of Photogrammetry and 3-D Visualisation During Archaeological Fieldwork* (Neobjavljeno diplomsko delo / Unpublished bachelor thesis, Univerza v Varšavi, Arheološki inštitut / University of Warsaw Institut of Archaeology). – Varšava.
- BENAVIDES LÓPEZ, J. A., G. ARANDA JIMÉNEZ, E. ALARCÓN GARCÍA, A. LOZANO MEDINA, J. A. ESQUIVEL GUERRERO 2016, 3D modelling in archaeology: The application of Structure from Motion methods to the study of the megalithic necropolis of Panoria (Granada, Spain). – *Journal of Archaeological Science Reports* 10, 495–506.
- BIZJAK, M. 2022, Mikroizkopavanje bronastodobnega depoja iz Vodice v Dobropolju. – *Zbornik 2022 – Konservator-restavrador: povzetki mednarodnega strokovnega srečanja 2022*, 76.
- BOOYSEN, R., R. GLOAGUEN, S. LORENZ, R. ZIMMERMANN, P. A. M. NEX 2021, Geological Remote Sensing. V / In: Alderton, D., Elias, S. A. (ur. / eds.), *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*. – Oxford, Academic Press.
- DENG, F., J. KANG, L. PENGLONG, F. WAN 2015, Automatic true orthophoto generation based on three-dimensional building model using multiview urban aerial images. – *Journal of Applied Remote Sensing* 9, 1–15.
- ELIAS, S., D. ALDERTON (ur. / eds.) 2020, *Encyclopedia of Geology*. – Amsterdam, Academic Press.
- KIMBALL, J. J. L. 2016, *3D Delineation. A modernisation of drawing methodology for field archaeology*. – Archaeopress, Oxford.
- LAHARNAR, B., E. LOZIĆ, B. ŠTULAR 2019, A structured Iron Age landscape in the hinterland of Knežak, Slovenia. V / In: Cowley, D. C., Fernández-Götz, M., Romankiewicz, T., Wendling, H. (ur. / eds.), *Rural Settlement. Relating buildings, landscape, and people in the European Iron Age*. – Leiden, Sidestone Press, 263–271.

MARÍN-BUZÓN, C., A. PÉREZ-ROMERO, J. L. LÓPEZ-CASTRO, I. BEN JERBANIA, F. MANZANO-AGUGLIARO 2021, Photogrammetry as a New Scientific Tool in Archaeology: Worldwide Research Trends. – *Sustainability* 13 (9), 1–27.

NETELER, M., H. MITASOVA 2002, Processing of Aerial Photos. V / In: Neteler, M., Mitasova, H. (ur. / eds.), *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. – Springer, New York.

NIELSEN, M. Ø. 2004, *True Orthophoto generation* (Neobjavljeno magistrsko delo / Unpublished master thesis, Tehnična univerza na Danskem / *Technical University of Denmark*). – Kongens Lyngby.

NOVAKOVIĆ, P., D. GROSMAN, R. MASARYK, M. NOVŠAK 2007, *Minimalni standardi izkopavalne dokumentacije: pregled stanja in predlogi standardov*. – Ljubljana, Ministrstvo za kulturo RS.

SAPIRSTEIN, P., S. MURRAY 2017, Establishing Best Practices for Photogrammetric Recording During Archaeological Fieldwork. – *Journal of Field Archaeology* 42 (4), 337–350.

ŠTULAR, B., E. LOZIĆ, S. EICHERT 2021, Airborne LiDAR-Derived Digital Elevation Model for Archaeology. – *Remote Sensing* 13 (9), 1–21.

TURK, P. 2021, Vodice v Dobropolju, Na Klanem – depo iz pozne bronaste dobe. – *Arheologija v letu 2021*, 7–8.

TURK, P. 2022, *Poročilo o opravljenih arheoloških raziskavah na Klanem nad Vodicami v Dobropolju* (Neobjavljeno poročilo / Unpublished report, Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije / Institute for the Protection of Cultural Heritage of Slovenia). – Ljubljana.

WESTOBY, M. J., J. BRASINGTON, N. F. GLASSER, M. J. HAMBREY, J. M. REYNOLDS 2012, 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. – *Geomorphology* 179, 300–314.

WOLF, P. R., B. A. DEWITT, B. E. WILKINSON 2014, *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*. – McGraw-Hill Education.

Spletna vira / Web sources

SPLET 1 / WEB 1: <https://www.e-prostor.gov.si/podrocja/drzavni-topografski-sistem/daljinsko-zaznavanje/> (10. 10. 2022).

SPLET 2 / WEB 2: <http://gis.arso.gov.si/atlasokolja> (10. 10. 2022).