

Mogućnosti kombinovanja digitalnih podataka terenskog snimanja objekta graditeljskog kulturnog nasleđa u kontekstu njegove obnove

Magdalena Dragović, član ETRAN-a, Zoran Stević, član ETRAN-a, Dragan Knežević i Milesa Srećković, član ETRAN-a

Apstrakt—Srednjevekovna crkva manastira Savinac, datovana u 13. vek, je predmet potencijalne obnove i konzervacije, kao kulturno dobro Srbije od velikog značaja. Predmet istraživanja – jednobrodna crkva sa kulom na ulazu je u veoma ruiniranom stanju, bez delova zidova i kompletne krovne konstrukcije. Rad ukazuje na mogućnosti kombinovanja dva tipa digitalnih podataka (prikupljenih na terenu tokom 2018. god), u procesu kvalitativne ocene stanja građevine, sa stanovišta nivoa oštećenosti, na osnovu podataka prikupljenih na terenu (tokom istraživanja u 2018. god.). To su podaci dobijeni metodama terestričkog laserskog skeniranja (TLS) i termovizijskog snimanja (delova zidova).

Ključne reči— graditeljska kulturna baština; srednjevekovna crkva; terestričko lasersko skeniranje; termovizija; geometrijski model.

I. UVOD

Značajan broj objekata srednjevekovne graditeljske baštine Srbije, koji su uvršteni u listu kulturnih dobara nadležnih institucija za zaštitu i revitalizaciju spomenika kulture, u eri digitalizacije, ima potrebu za odgovarajućom dokumentacijom, kao bitan osnov za njihovu obnovu. U postupcima zaštite, konzervacije i obnove ruiniranih objekata kulturne baštine, a specifično u kvalitativnoj oceni postojećeg stanja, podaci dobijeni neinvazivnim metodama daljinske detekcije terestričkog laserskog skeniranja (TLS) i termovizije su od posebnog značaja. Kombinovanjem dvojako prikupljenih podataka, mogu se postaviti zadaci, koji odgovaraju na pitanja: stanja elemenata konstrukcije, bilo da su očigledni i „skriveni” (stepeništa unutar masivnih zidova, ili manji prostori - riznice), teksture i vrste građevinskog materijala [1], slojeva i debljina različitih materijala, nivoa oštećenosti objekta, prisustvo biljnih i drugih naslaga na zidovima, prisustvo vlage [2] i sl. Prikupljanje podataka o objektu (ili „sceni”), u formi 3D oblaka tačaka, koji sadrži precizne

prostorne koordinate svake tačke, kao i podatke o teksturi i boji, je prihvaćeni metod, kada su potrebni precizni podaci o zatečenom stanju [3], ili u definisanim vremenskim okvirima [4,5] (deformacija oblika objekta, ili terena kroz vreme). Podaci prikupljeni TLS metodom omogućavaju kreiranje i rekonstrukciju 3D geometrijskog modela objekta – punog [3], ili površinskog [6], na koji se mogu mapirati podaci termovizijskog snimanja [7]. Još jedan od mogućih zadataka istraživanja, može se vezati za istorijski kontekst građenja objekta: detekcija elemenata konstrukcije građenih u fazama intervencija [8], koji se direktnim vizuelnim putem ne mogu sagledati.

Polazeći od ovakvih postavki vršeno je istraživanje na objektu srpske graditeljske srednjevekovne kulturne baštine, zubom vremena urušenoj crkvi manastira Savinac, sa ciljem kvalitativne analize postojećih delova objekta nađenih *in situ* i njegove potencijalne obnove.

II. OBJEKAT ISTRAŽIVANJA I OPIS

Crkva manastira Savinac (datuje se u 13. vek) je srednjevekovni objekat (crkvište) - kulturno dobro od velikog značaja za Srpsko kulturno nasleđe [9]. Nalazi se u blizini Novog Sada, u selu Stari Ledinci, na uzvišenju koje mu daje istaknut položaj u odnosu na okolinu. Objekat je veoma ruiniran zubom vremena, ali se osnovne karakteristike arhitektonskog koncepta mogu jasno uočiti. Crkva je jednobrodna sa visokom kulom na ulazu i masivnom polukružnom apsidom u oltarskom delu. Bočno od ulaza, na uglovima glavnog broda, se nalaze masivni kontrafori (koji su u kasnijoj fazi dozidani). Crkva je ozidana lomljenim neotesanim kamenom u tehnici *trpanca* [9].

U toku 2018. god., obavljeno je *terestričko lasersko skeniranje* (TLS) objekta crkve i termovizijsko snimanje delova njenih zidova, sa uporednom foto-dokumentacijom. U prvoj fazi su prikupljeni podaci metodom TLS, korišćenjem laserskog skenera marke *Faro Focus 3D*. Sprovedena je registracija skenova u integralni oblak tačaka u software-u *ReCap*. Inicijalno, ovaj softver je omogućio detaljni vizuelni uvid u karakteristike objekta i njegova oštećenja (zahvaljujući integrisanoj foto-kameri samog skenera), interaktivnim korišćenjem mogućnosti da se na svakom stajalištu skenera „uključiti” fotorealističan prikaz vidnog polja. Dalji postupak je zahtevao promenu grafičkog alata, pa je oblak tačaka uvezen u softver AutoCAD (sl.1).

Magdalena Dragović – Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: dim@grf.bg.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0003-0813-9595>)

Zoran Stević – Elektrotehnički fakultet i Tehnički fakultet - Bor, Univerzitet u Beogradu, Bul. kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: zstevic@live.com), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0002-1867-9360>)

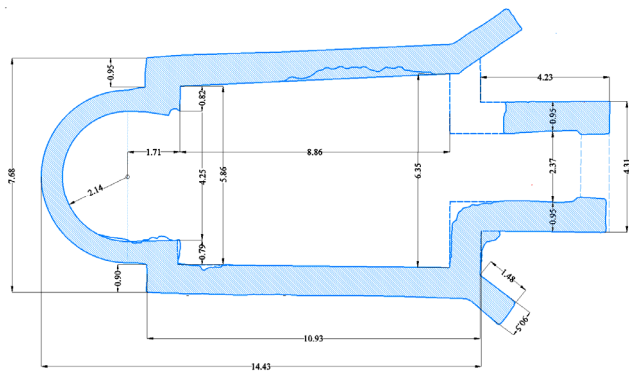
Dragan Knežević – Vojno tehnički institut, Ratka Resanovića 1, Beograd, Srbija, (e-mail: dragan.knezevic@vti.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0003-0624-5474>)

Milesa Srećković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: esreckov@etf.rs)



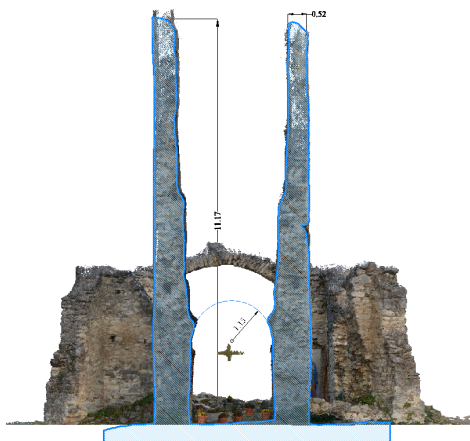
Sl. 1. Oblak tačaka objekta crkve manastira Savinac, u softveru AutoCAD.

Potom je izvršena ekstrakcija geometrije objekta (osnova i preseki) i njegovo dimenzionisanje (sl.2). Na osnovu rezultata merenja, objekat je ukupne dužine oko 20m i širine 8,4m. Kula je visine oko 12m, a bočni urušeni zidovi, koji oivičavaju brod, su visine oko 5m. Na pojedinim delovima glavnog prostora (južni deo broda), zid je potpuno urušen. U delu apside postoje naznake zidova pri podu.



Sl. 2. Osnova crkve - horizontalni presek na visini ~0,5m od poda.

Zidovi naosa su konstantne debljine oko 105cm, dok se zidovi kule od najnižih delova, debljine 95cm, sužavaju sa porastom visine ka vrhu, gde debljina iznosi oko 50cm (sl. 3). Ulaz u kulu je kroz polukružni ozidani luk, na koji se, iza ulaznog zida, verovatno nastavljao poluoblíčasti svod.



Sl. 3. Presek kroz kulu objekta sa oblakom tačaka u pozadini.

Dimenzije i oblik izdvojenih kontura preseka, ukazuju na nepreciznost gradnje objekta (uslovljeno i vrstom materijala), kao i na mogućnost da je teren vremenom slegao. Oštećenja zidova posredno utiču na (ne)preciznost rekonstrukcije objekta.

Druga faza prikupljanja podataka se odnosi na termovizijsko snimanje delova zidova crkve i ima obim od 30 termografskih snimaka. U uslovima sunčanog dana¹, snimanje je izvršeno termo-kamerom *FLIR E6*, karakteristika prikazanih u tabeli I.

Tabela I – Karakteristike kamere FLIR E6

IC rezolucija slike	160x120 pixel
Prostorna rezolucija	5,2 mrad
Spektralni opseg	7,5-13 μm
Frekvencija slike	9Hz
Temperaturni opseg	-20°C do +250 °C
Termalna osetljivost	<0,06 °C
Temperaturna tačnost	$\pm 2^\circ$ ili 2%

III. METODOLOGIJA

Prepoznavanje oblasti od interesa (urušenih delova zidova) izvedeno je poređenjem 2D termovizijskih snimaka (uporednim fotografijama) i 3D oblaka tačaka, dok je provera pravilnosti gradnje postojećeg dela objekta, u kasnijoj fazi izvršena geometrijskim modelovanjem delova zidova (pretpostavljeno na osnovu postojećeg stanja).

A. Metodologija – termovizijsko snimanje

U traženju mogućnosti kvalitetnog prikaza promena na površinama objekta koji se posmatra, termovizijska tehnika je prilagodljiva, u smislu geometrijske supozicije, za oblast istraživanja svojstava na površini zida i delom u slojevima njegove dubine. Preciznim poređenjem parova kadrova (termalne i digitalne kamere), mogu se jasno prepoznati elementi slike (otvori u zidovima, urušeni delovi, ili razlike materijala). Termovizijski snimak omogućava prepoznavanje oblika na osnovu kontrasta ukupne energije, koja je izračena iz scene koja se analizira. Ovakvi snimci daju drugačije informacije o površinskoj strukturi materijala u poredjenju sa snimcima u drugim delovima elektromagnetnog spektra (u radu su korišćeni uporedni snimci u vidljivom i dugotalasnom infracrnom delu spektra). Promene ispod površinskog sloja materijala koji sa posmatra, uočavaju se usled različitih promena temperature i emisivnosti (koja takodje zavisi od temperature). Tako se mogu uočiti oblasti vlage, instalacija, grejnih tela, ili dimnjaka.

Sve promene, koje se prate bez uvođenja kontrolisanih izvora toplotnog zračenja u scenu, često se označavaju kao *pasivna termografija*. Prisutnost drugih materijala, ili otvora iza primarnog sloja, koji se vidi, može se odrediti tehnikama *impulsne termografije*. Kod objekata posebne važnosti, kakvi su objekti kulturne baštine, vodi se računa da ne dođe do

¹ Snimanje je izvedeno popodne, između 16:30 i 17:00 u novembru 2018.

oštećenja njegovih površina, pa se radije primenjuje kontinualno zagrevanje sa malim priraštajima temperature (npr. desetak stepeni za nekoliko sati), usled čega dolazi do izdvajanja teksture objekata, slično kao u slučaju primene impulsne termografije. Postupci koji podrazumevaju uvođenje spoljašnjih kontrolisanih izvora toplote, obično se označavaju kao *aktivna termografija*.

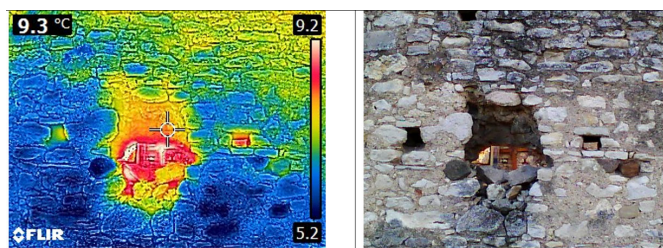
U ovom radu je korišćena pasivna termografija, kod uzorkovanja i „kvazi“ aktivna, jer su spoljašnje površine zidova crkve posmatrane u različitim delovima dana (različito zagrevanje površina objekta tokom dnevnog izlaganja Suncu određenih delova zidova objekta) pod istim geometrijskim odnosima (objekata). Temperaturni kontrast se u tom slučaju definiše:

$$K' = (E_t - E_b) / (E_t + E_b) \dots\dots\dots (1)$$

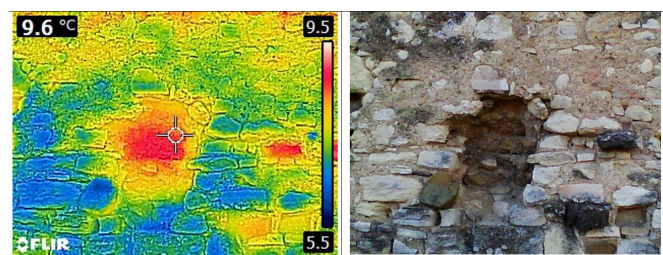
gde je K' efektivni pojava kontrast, a E_t ukupna iradijansa segmenata scene koja se posmatra i E_b ukupne iradijanse neposredne okoline posmatranog segmenata scene (lokalne pozadine). Kada se scena kratkotrajno zagreje spoljašnjim temperaturnim izvorom usled različitog provođenja toplote kroz materijal, kontrastna scena se menja i pokazuje strukturu ispod površine u izvesnom stepenu.

IV. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Imajući na umu da se termovizijski snimci mogu mapirati na geometrijski model objekta [7], za prikaz u radu su izabrana dva termovizijska snimka za čije je snimanje položaj kamere bio paralelan sa površinom snimanog zida. Na taj način su dva karakteristična oštećenja zida broda crkve prikazana nalik ortogonalnoj projekciji. Oba se razvijaju po dubini zidane mase: oštećenje po celoj dubini zida (sl. 4) i oštećenje zida do izvesne dubine (sl. 5). S' obzirom na različit format slika, fotografije su skalirane, tako da prikazuju približno istu oblast, kao i termovizijski snimci.



Sl. 4. Severni zid (spolja) sa oštećenjem po celoj dubini.



Sl. 5. Severni zid (spolja) sa delimičnim oštećenjem po dubini.

A. Analiza termovizijskih podataka

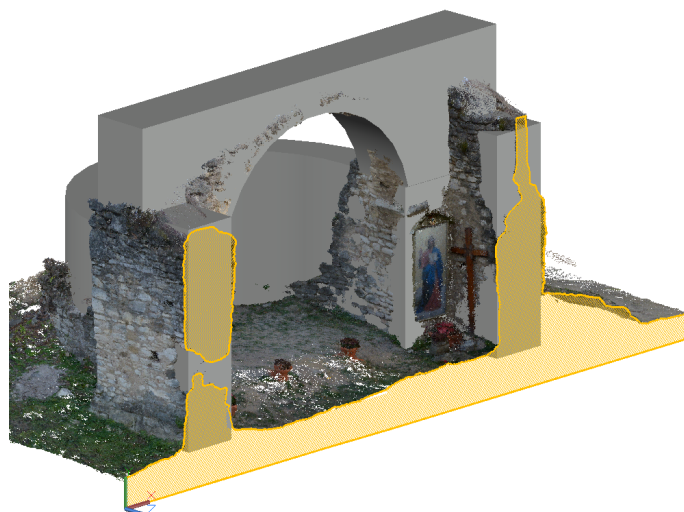
Na termografskoj slici su izdvojene zone od interesa, koje ukazuju na oštećenja, ili deformacije. Deformacije predstavljaju izobličenja primarne geometrijske strukture, koje prepoznajemo kao defekte ili odvajanje (urušavanje, pukotine i sl.) materijala. U izdvojenim zonama se uočavaju i refleksije koje zavise od nekoliko različitih faktora iz scene (koje takođe degradiraju scenu) i neujednačenih svojstava posmatranih površina. Toplotni kontrast se koristi kao kvantitativni parametar, gde je temperatura izdvojene površine procenjena na osnovu prosečne površinske temperature znatno dalje od mesta izdvajanja na površini približno iste strukture.

U ovom radu su prikazani izdvojeni kvantitativni rezultati, koji se odnose na dimenzionisanje promene na objektu i lokaciji promene. Na istim pozicijama su izdvojeni preseki kroz zidove objekta metodom ekstrakcije iz oblaka tačaka.

B. Analiza geometrije oštećenja izvedena iz oblaka tačaka

Da bi se dobile preciznije informacije o geometriji oštećenja po dubini zida, kreirani su vertikalni poprečni preseki kroz severni zid crkve, približno po osovini oštećenog dela površine. Za iscertavanje konture preseka na zadatim pozicijama na zidu je korišćen grafički alat – softver AutoCAD i plug in Cloud Works (softvera Leica Cyclon), u koji je uvezen postojeći oblak tačaka. Presek je kreiran kroz izdvojen sloj tačaka, iz oblaka tačaka, debljine 4cm. Opcija pomeranja ovog sloja napred-nazad otvara mogućnost da se kontura preseka sagledava (ili nacrtava) u neposrednoj okolini, kako bi se uočile granice oštećenja u izabranoj zoni zida.

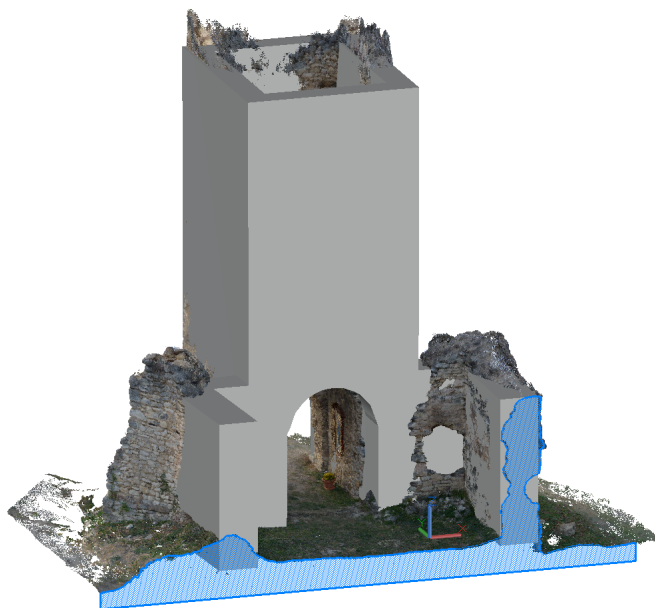
Na sl. 6 je prikazan presek kroz oštećen zid (odgovara termovizijskom snimku sl. 4). Sa idejom da se ustanovi odstupanje ozidanog dela objekta (postojeće stanje) od pravilne geometrije (idealno ravan zid, luk i krivina apside) dodatno je kreiran pravilan geometrijski model nižih delova zidova (polukružne apside i broda), prepoznatih u dokumentaciji postojećeg stanja.



Sl. 6 Poprečni presek broda crkve, na mestu oštećenja zida po celoj dubini.

dopunjen punim modelom zidova broda i oltara idealne geometrije.

Na sl.7 je prikazan poprečni presek kroz severni zid broda crkve sa delimičnim oštećenjem po dubini (odgovara termovizijskom snimku na sl. 5). Dodatno je modelovan deo kule i broda idealne geometrije, kako bi se uočila oštećenja i (ne)pravilnost postojećih zidova.



Sl. 7 Poprečni presek broda crkve, na mestu delimičnog oštećenja zida po dubini, dopunjen punim modelom zidova kule i broda, idealne geometrije.

V. ZAKLJUČAK

Autori su prikazali mogućnosti kombinovanja termovizijske tehnike, terestričkog laserskog skeniranja i geometrijskog modelovanja u proceni morfoloških karakteristika, značajnih za karakterizaciju mere oštećenja, ružiniranog srpskog srednjevekovnog objekta od velikog značaja za nacionalno kulturno nasleđe. Metode snimanja su beskontaktna, a uslovi scene u okviru koje se prate promene na objektu se mogu prilagoditi potrebama istraživanja, dok je tačnost određena performansama instrumenata (za termovizijsku kameru: osetljivost i prostorna rezolucija; za TLS-gustina oblaka tačaka i merna nesigurnost).

Mogućnost prikazivanja oštećenih delova ekstrakcijom preseka na 3D oblaku tačaka upotpunjuje informacije dobijene 2D termovizijskim snimcima, dajući dimenziju oštećenja po dubini posmatranog zida. Uvođenjem i trećeg elementa – punog geometrijskog modela u prostorni okvir scene (u oblak tačaka), koji daje prikaz idelane geometrije objekta, uočavaju se potrebne mere intervencija na oštećenim delovima objekta, kao i onima koji u potpunosti nedostaju.

Važno je istaći da bi celoviti 3D „termovizijski“ model objekta, zajedno sa već postojećim podacima TLS, bio od značaja za rekonstrukciju/obnovu crkve, koja prema uslovima konzervatora i istoričara arhitekture, nosi karakteristike stila i vremena gradnje.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije koje je pomoglo u finansiranju ovog istraživanja u okviru projekta pod brojevima 451-03-47/2023-01/200131 i 451-03-47/2023-01/200325

LITERATURA

- [1] S. Filippeschi, F. Leccese, “Infrared thermography to visualize the texture of historical building in Tuscany,” Proc. ART 05 - 8th Conf. on nondestructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of the cultural and environmental heritage, Lecce, Italy, Vol. CD-Rom, 15-19 May, 2005.
- [2] S. P. Radovanović, S. Ristić, M. Popović-Živanović, B. Jegdić, „Termografska dijagnostika objekata zaštite kulturne baštine”, *Tehnička dijagnostika*, 2, str. 33-40, 2011.
- [3] A. Čučaković, M. Dragović, M. Pejić, M., Srećković, J. Pandžić, “The possibilities of application of 3D digital models in cultural heritage objects' protection and revitalisation”, Proc. of The 5th Int. Sci. Conf. on Geometry and Graphics moNGeometrija 2016, Belgrade, Serbia, pp. 434-443, 23-26 June 2016.
- [4] J. Popović, J. Pandžić, M. Pejić, P. Vranić, B. Milovanović, A. Martinenko, “Quantifying tall structure tilting trend through TLS based 3D parametric modeling”, *Measurement*, 188, 2022.
- [5] M. Kinsley, C. Gerrard, J. Warburton, “Quantifying erosion of ‘at risk’ archeological sites using repeat terrestrial laser scanning,” *J. Archeol. Sci. Rep.*, no. 12, pp. 405-424, 2017.
- [6] D. Petković, D. Stojanović, B. Kosić, M. Radosavljević, Z. Stević, M. Dragović, “The visualization of the medieval site of the Savinac monastery”, Proc. of the 2nd Students’ Sci. Int. Conf. Multidisciplinary Approach to Contemporary Research, pp. 187-194, Belgrade, 24-25 November, 2018.
- [7] P. Bison, A. Bortolin, G. Cadelano, G. Ferrarini, K. Furlan, E. Grinzato, “Geometrical correction and photogrammetric approach in thermographic inspection of the buildings”, Proc. of 11th Int. Conf. on Quantitative Infrared Thermography, Naples, Italy, 11-14 June, 2012.
- [8] G. M. Cennamo, “The contribution of diagnostics in architectural survey – case study of combined thermography application”, Proc. of XI Int. forum of studies Vie dei Marcanti: Heritage, architecture, landesign, Aresa and Capri, pp. 1037-1043, 13-15 June, 2013.
- [9] *Spomeničko nasleđe Srbije: nepokretna kulturna dobra od velikog i izuzetnog značaja*, Republički zavod za zaštitu spomenika kulture, Beograd, 1998.

ABSTRACT

Serbian medieval monastery of Savinac, dated to 13thc, is the potential subject of restoration, as a cultural monument with national significance. Object of investigation is one naved church with high tower on the entrance which remains are significantly ruined walls of the nave and tower, without any roof construction. This research presents the possibility of combining the two digital types of data collected *in situ* (during the survey in 1918), in the qualitative evaluation process of monument’s damages, based on the survey data. These are data obtained by terrestrial laser scanning (TLS) and thermal imaging of the church walls.

The possibility of combining the survey data obtained by thermal imaging and terrestrial laser scanning for the purposes of restoration of a cultural heritage monument

Magdalena Dragović, Zoran Stević, Dragan Knežević i Milesa Srećković