

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



DIPLOMSKA NALOGA

VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE TEHNIČNO UPRAVLJANJE NEPREMIČNIN

Ljubljana, 2019

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 525.28:528.715:629.735(043.2)

Avtor: Marko Zaviršek

Mentor: doc. dr. Polona Pavlovčič Prešeren

Somentor: asist. dr. Dejan Grigillo

Naslov: Ocena višinske točnosti DMR iz posnetkov iz letalnika

Tip dokumenta: diplomska naloga – visokošolski študij

Obseg in oprema: 41 str., 22 pregl., 38 slik

Ključne besede: brezpilotni letalnik, hitra statična metoda GNSS, digitalni model reliefa, ocena višinske točnosti DMR

Izvleček

V diplomski nalogi smo ocenili višinsko točnost DMR, izdelanega iz fotografij, zajetih z letalnikom DJI Phantom 4 Pro. V prvem delu diplomske naloge smo opisali določitev oslonilnih točk s hitro statično metodo izmere GNSS, zajem detajlnih točk z elektronskim tahimetrom in zajem fotografij z letalnikom. V drugem delu diplomske naloge smo predstavili postopek obdelave fotografij in ocenili višinsko točnost izdelanih DMR. Ugotovili smo, da je povprečno višinsko odstopanje izdelanega DMR pod 1 cm, višinska točnost DMR pa približno 2 cm.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 525.28:528.715:629.735(043.2)

Author: Marko Zaviršek

Supervisor: Assist. Prof. Polona Pavlovčič Prešeren, Ph. D.

Co-advisor: Assist. Dejan Grigillo, Ph. Sc.

Title: The evaluation of height accuracy on the basis of the recordings from the drone

Document type: Graduation Thesis

Notes: 41 p., 22 tab., 38 fig.

Keywords: drone, rapid static method GNSS, digital terrain model, evaluation of DTM height accuracy

Abstract

In the bachelor's thesis, we evaluated the height accuracy of digital terrain model (DTM), made of photographs recorded by the drone DJI Phantom 4 Pro. In the first part of the thesis, we described the determination of ground control points with the rapid static method GNSS measurement, recording of the detailed points with an electric tachometer, and the recording images by drone. In the second part of the thesis, we presented the procedure of processing of the images. We evaluated the height accuracy of the produced DTMs. We have found that the mean height error of the produced DTM is below 1 cm and the DTM accuracy is approximately 2 cm.

»Ta stran je namenoma prazna«

ZAHVALA

Za pomoč in nasvete pri izdelavi diplomske naloge se zahvaljujem mentorici doc. dr. Poloni Pavlovčič Prešeren in somentorju asist. dr. Dejanu Grigillu.

Zahvaljujem se tudi asist. dr. Klemenu Kozmusu Trajkovskemu za pomoč pri izvedbi terenskih meritev.

Zahvalil bi se tudi svojim domačim, ki so me podpirali in spodbujali v času študija.

Hvala tudi sošolcem, s katerim sem preživel študijska leta.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA.....	I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	V
ZAHVALA.....	VII
KAZALO PREGLEDNIC.....	X
KAZALO SLIK.....	XI
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI.....	XIII
1. UVOD.....	1
2. IZVEDBA TERENSKIH MERITEV IN UPORABLJENA OPREMA.....	2
2.1 TESTNO OBMOČJE.....	2
2.2 AEROFOTOGRAFIRANJE.....	3
2.3 OPIS DJI PHANTOM 4 PRO.....	3
2.4 UPORABLJEN INSTRUMENTARIJ.....	5
3. PROGRAMSKA OPREMA IN OBDELAVA PODATKOV.....	6
3.1 MOBILNA APLIKACIJA PIX4D CAPTURE.....	6
3.2 HITRA STATIČNA METODA.....	6
3.2.1 OBDELAVA HITRE STATIČNE METODE.....	7
3.3 AGISOFT PHOTOSCAN PRO.....	9
3.3.1 UVOZ ZAJETIH FOTOGRAFIJ.....	9
3.3.2 IZDELAVA REDKEGA OBLAKA TOČK.....	10
3.3.3 MERJENJE OSLONILNIH IN KONTROLNIH TOČK NA FOTOGRAFIJAH....	14
3.3.4 IZDELAVA GOSTEGA OBLAKA TOČK.....	15
3.3.5 IZDELAVA DIGITALNEGA MODELA RELIEFA.....	19
4. REZULTATI IN ANALIZA PRIMERJAV VIŠIN TOČK.....	20
4.1 PRIMERJAVA VIŠIN TOČK S PROGRAMOM InOViT _o R_SI.....	20
5. ZAKLJUČEK.....	40
VIRI.....	41

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Sestava fotogramtričnih blokov iz fotografij z letalnika DJI Phantom 4 Pro.....	3
Preglednica 2: Prikaz parametrov načrta leta v Pix4D Capture aplikaciji.....	6
Preglednica 3: Koordinate točk v slovenski realizaciji koordinatnega sistema ETRS89, v D96/TM....	8
Preglednica 4: Število uvoženih fotografij.....	10
Preglednica 5: Število točk redkega oblaka točk.....	10
Preglednica 6: Koordinate oslonilnih točk pridobljene s hitro statično metodo.....	14
Preglednica 7: Koordinate kontrolnih točk pridobljene s hitro statično metodo.....	14
Preglednica 8: RMSE oslonilnih točk.....	15
Preglednica 9: Število točk gostega oblaka točk.....	15
Preglednica 10: Rezultati statistične analize višinske točnosti za 40p.....	20
Preglednica 11: Rezultati robustne statistike točnosti izdelanega DMR za 40p.....	21
Preglednica 12: Rezultati statistične analize višinske točnosti za 40pv.....	24
Preglednica 13: Rezultati robustne statistike točnosti izdelanega DMR za 40pv.....	25
Preglednica 14: Rezultati statistične analize višinske točnosti za 80p.....	26
Preglednica 15: Rezultati robustne statistike točnosti izdelanega DMR za 80p.....	27
Preglednica 16: Rezultati statistične analize višinske točnosti za 80pv.....	29
Preglednica 17: Rezultati robustne statistike točnosti izdelanega DMR za 80pv.....	30
Preglednica 18: Rezultati statistične analize višinske točnosti za 40p80v.....	32
Preglednica 19: Rezultati robustne statistike točnosti izdelanega DMR za 40p80v.....	33
Preglednica 20: Rezultati statistične analize višinske točnosti za 40pv80pv.....	35
Preglednica 21: Rezultati robustne statistike točnosti izdelanega DMR za 40pv80pv.....	36
Preglednica 22: Glavne ocene višinske točnosti izdelanega DMR.....	38

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz testnega območja.....	2
Slika 2: Letalnik DJI Phantom 4 Pro.....	4
Slika 3: GNSS antena Leica Viva GS15 (levo) in GNSS sprejemnik Javad Triumph-LS (desno).....	5
Slika 4: Elektronski tahimeter Leica TPS1200.....	5
Slika 5: Grafični prikaz razporeditve oslonilnih (rdeč krog) in kontrolnih (bel krog) točk.....	7
Slika 6: Prikaz baznih vektorjev med referenčnim stojiščem in novimi točkami.....	8
Slika 7: Potek izdelave DMR s programom Agisoft Photoscan Pro.....	9
Slika 8: Prikaz izdelanega redkega oblaka točk za 40p.....	11
Slika 9: Prikaz izdelanega redkega oblaka točk za 40pv.....	11
Slika 10: Prikaz izdelanega redkega oblaka točk za 80p.....	12
Slika 11: Prikaz izdelanega redkega oblaka točk za 80pv.....	12
Slika 12: Prikaz izdelanega redkega oblaka točk za 40p80v.....	13
Slika 13: Prikaz izdelanega redkega oblaka točk za 40pv80pv.....	13
Slika 14: Prikaz izdelanega gostega oblaka točk za 40p.....	16
Slika 15: Prikaz izdelanega gostega oblaka točk za 40pv.....	16
Slika 16: Prikaz izdelanega gostega oblaka točk za 80p.....	17
Slika 17: Prikaz izdelanega gostega oblaka točk za 80pv.....	17
Slika 18: Prikaz izdelanega gostega oblaka točk za 40p80v.....	18
Slika 19: Prikaz izdelanega gostega oblaka točk za 40pv80pv.....	18
Slika 20: Prikaz izdelanega DMR za primer fotogrametričnega bloka 40pv80pv.....	19
Slika 21: Histogram porazdelitve višinskih razlik za 40p.....	21
Slika 22: Prikaz kvantilov višinskih razlik za 40p.....	22
Slika 23: Prikaz razporeditve terensko določenih točk in višinskih razlik med detajlnimi točkami in točkami, interpoliranimi iz izdelanega DMR za 40p.....	23
Slika 24: Histogram porazdelitve višinskih razlik za 40pv.....	24
Slika 25: Prikaz kvantilov višinskih razlik za 40pv.....	25
Slika 26: Prikaz razporeditve terensko določenih točk in višinskih razlik med detajlnimi točkami in točkami, interpoliranimi iz izdelanega DMR za 40pv.....	26
Slika 27: Histogram porazdelitve višinskih razlik za 80p.....	27
Slika 28: Prikaz kvantilov višinskih razlik za 80p.....	28

Slika 29: Prikaz razporeditve terensko določenih točk in višinskih razlik med detajlnimi točkami in točkami, interpoliranimi iz izdelanega DMR za 80p.....	29
Slika 30: Histogram porazdelitve višinskih razlik za 80pv.....	30
Slika 31: Prikaz kvantilov višinskih razlik za 80pv.....	31
Slika 32: Prikaz razporeditve terensko določenih točk in višinskih razlik med detajlnimi točkami in točkami, interpoliranimi iz izdelanega DMR za 80pv.....	32
Slika 33: Histogram porazdelitve višinskih razlik za 40p80v.....	33
Slika 34: Prikaz kvantilov višinskih razlik za 40p80v.....	34
Slika 35: Prikaz razporeditve terensko določenih točk in višinskih razlik med detajlnimi točkami in točkami, interpoliranimi iz izdelanega DMR za 40p80v.....	35
Slika 36: Histogram porazdelitve višinskih razlik za 40pv80pv.....	36
Slika 37: Prikaz kvantilov višinskih razlik za 40pv80pv.....	37
Slika 38: Prikaz razporeditve terensko določenih točk in višinskih razlik med detajlnimi točkami in točkami, interpoliranimi iz izdelanega DMR za 40pv80pv.....	38

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

D96/TM	geodetski datum 1996/Transverzalna Mercatorjeva projekcija
DMR	digitalni model reliefa
DTM	angl. Digital terrain model
ETRS 89	angl. European Terrestrial Reference System 1989
GLONASS	rus. Globalnaya Navigatsionnaya Sputnukuvaya Sistema
GNSS	globalni navigacijski satelitski sistem (angl. Global Navigational Sattalite System)
GPS	globalni sistem pozicioniranja (angl. Global Positioning System)
NMAD	angl. Normalised Median Absolute Deviation
RMSE	angl. Root Mean Square Error
SfM	struktura iz gibanja (angl. Structure from Motion)
SIGNAL	Slovenija-Geodezija-Navigacija-Lokacija
TIFF	angl. Tagged Image File Format
VRS	navidezna referenčna postaja
WGS 84	angl. World Geodetic System 1984

»Ta stran je namenoma prazna«

1. UVOD

V zadnjem obdobju je v porastu uporaba daljinsko vodenih letalnikov (krajše letalnikov), ki jih lahko srečamo v vsakdanjem življenju. Vidimo jih na zabavah, športnih dogodkih, med različnimi reševanji, uporabljajo pa se celo za prenašanje paketov. Vzrok za porast uporabe je v vedno večji zmogljivosti, uporabnosti in cenovni dostopnosti letalnikov. Letalnike v geodeziji uporabljamo za fotografiranje, izračun volumnov, izdelavo trirazsežnih modelov, ortofotov itd. Nekateri proizvajalci geodetske opreme, kot sta recimo Leica Aibot X6 Hexacopter ali Trimble ZX5, ponujajo svoje letalnike, vendar večinoma zahtevajo večji finančni vložek. Zato smo se v diplomski nalogi odločili za uporabo priljubljenega in cenovno ugodnega letalnika DJI Phantom 4 Pro, ki v celotnem paketu združuje letalnik in fotoaparatus.

Diplomska naloga obravnava vzpostavitev geodetske mreže točk s koordinatami v slovenski realizaciji koordinatnega sistema ETRS89, ki smo jih uporabili kot oslonilne in kontrolne točke v postopku orientacije fotografij, iz katerih je bil izdelan digitalni model reliefa (DMR). V diplomski nalogi smo opisali postopek zajema aerofotografij z letalnikom, določitev detajlnih točk terena z metodami GNSS in klasične terestrične izmere, obdelavo fotografij in analizo višinske točnosti izdelanega digitalnega modela reliefa. Višinsko točno DMR smo ocenili s primerjavo višin detajlnih točk, izmerjenih na terenu, in višin, interpoliranih iz DMR.

Diplomska naloga je sestavljena iz dveh delov. Prvi del je sestavljen iz predstavitve delovišča, opisa terenskega dela, uporabljenega instrumentarija in letalnika ter načina pridobivanja podatkov. Drugi del opisuje postopek obdelave fotografij, vmesne in končne izdelke, pridobljene z obdelavo fotografij, postopek primerjave višin detajlnih točk iz terenske izmere in interpoliranih višin iz izdelanega DMR s programom InOViTOr_SI, predstavitev rezultatov primerjav višin in analizo rezultatov.

2. IZVEDBA TERENSKIH MERITEV IN UPORABLJENA OPREMA

Terenske meritve smo izvedli 4. aprila 2018. Na območje smo enakomerno razporedili 15 tarč. Položaje smo jim določili z obdelavo hitre statične izmere GNSS. Zajem aeroposnetkov smo opravili z letalnikom DJI Phantom 4 Pro. Detajlne točke terena smo določili z elektronskim tahimetrom Leica TPS 1200.

2.1 TESTNO OBMOČJE

Za testno območje diplomske naloge smo izbrali območje ob naselju Pristava pri Višnji Gori v občini Ivančna Gorica. Območje obsega površino približno enega ara, ki je na sliki 1 označena z rdečim okvirjem. Območje leži na terasi pobočja Grmade na nadmorski višini 580 metrov in je prekrito s travnikom in njivo.



Slika 1: Prikaz testnega območja

2.2 AEROFOTOGRAFIRANJE

Na terenu smo zajeli 266 fotografij, ki smo jih kasneje pregledali in razvrstili glede na višino in smer leta. Prečni in vzdolžni preklop fotografij sta bila pri vseh šestih primerih enaka, in sicer 70 %. Prostorska ločljivost fotografij pri letih na 40 m višine znaša 1,09 cm, pri letih na 80 m pa 2,18 cm. V preglednici 1 je prikazana razvrstitev fotografij v šest fotogrametričnih blokov glede na višino in smer leta, iz katerih smo izdelali šest različnih DMR-jev.

Preglednica 1: Sestava fotogrametričnih blokov iz fotografij z letalnika DJI Phantom 4 Pro

Primer	Višina leta	Smer leta	Št. zajetih fotografij	Preklop fotografij prečni	Preklop fotografij vzdolžni
40p	40 m	Prečno	103	70 %	70 %
40pv	40 m	Prečno in vzdolžno	185	70 %	70 %
80p	80 m	Prečno	32	70 %	70 %
80pv	80 m	Prečno in vzdolžno	65	70 %	70 %
40p80v	40 m in 80 m	Prečno in vzdolžno	136	70 %	70 %
40pv80pv	40 m in 80 m	Prečno in vzdolžno	266	70 %	70 %

2.3 OPIS DJI PHANTOM 4 PRO

Phantom 4 Pro (slika 2) je izdelek kitajskega podjetja DJI (<https://www.dji.com/si>). Pri uporabnikih je priljubljen zaradi preprostega upravljanja, zato je primeren za začetnike kot tudi za bolj izkušene upravljalce. Vključuje integriran fotoaparatus in funkcije, ki jih omogoča mobilna aplikacija. Te so:

- letenje z dotikom na zemljevid (TapFly), kjer se dotaknemo lokacije na zaslonu telefona in letalnik poleti v želeno smer;
- vizualno sledenje objektom (ActiveTrack), kjer letalnik sledi premikajoči se osebi ali objektu, ki ga označimo na zaslonu;
- kroženje okoli točke (Point of Interest), kjer letalnik kroži v določenem radiju z določeno hitrostjo okoli označenega objekta;
- vračanje na vzletno točko (Return to Home), kjer se letalnik s pritiskom na gumb na zaslonu vrne na vzletno točko.

Sistem vključuje sprejemnik GNSS (GPS in GLONASS) za navigacijo in senzorje za zaznavo ovir. Z uporabo navigacije GNSS lahko dosežemo, da lebdi natančneje in se premika bolje, sploh v primeru ovir pri sprejemu signala GNSS. S pomočjo aplikacije lahko v živo sledimo položaju letalnika in kontrolerja. Senzorji so nameščeni spredaj in zadaj, na levi, desni in spodnji strani letalnika ter omogočajo samodejno zaznavanje in izmikanje oviram med letom. Za stabilen fotoaparatus med letom skrbi triosni stabilizator, ki uravnava fotoaparatus pri kakršnem koli nagibu letalnika.

Lastnosti letalnika DJI Phantom 4 Pro (vir: DJI, 2018):

- premer: 350 mm,
- masa: 1388 g,
- najvišja hitrost: 72 km/h,
- najvišja hitrost vzpenjanja: 6 m/s,
- najvišja hitrost spuščanja: 4 m/s,
- čas letenja: do 30 min,
- domet upravljanja: do 3,5 km brez ovir,
- navigacijski sistem: GPS in GLONASS,
- stabilizator fotoaparata: 3-osni,
- fotoaparatus: 1" CMOS Efektivni piksli: 20 M točk,
- največja ločljivost slike: 5472×3078 pri razmerju 16 : 9.



Slika 2: Letalnik DJI Phantom 4 Pro (vir: DJI, 2018)

2.4 UPORABLJEN INSTRUMENTARIJ

Pri izmeri GNSS oslonilnih in kontrolnih točk smo uporabili:

- tri sprejemnike GNSS Leica Viva GS15 (slika 3 levo) in
- sprejemnik GNSS Javad Triumph-LS (slika 3 desno).



Slika 3: GNSS antena Leica Viva GS15 (levo) (vir: Geoservis, 2018) in GNSS sprejemnik Javad Triumph-LS (desno) (vir: Javad, 2018)

Za izmero detajlnih točk terena smo uporabili:

- elektronski tahimeter Leica TPS1200 (slika 4) in
- prizmo Leica GRZ4 360°.



Slika 4: Elektronski tahimeter Leica TPS1200 (vir: Manualsdir, 2006)

3. PROGRAMSKA OPREMA IN OBDELAVA PODATKOV

3.1 MOBILNA APLIKACIJA PIX4D CAPTURE

Pix4D Capture je mobilna aplikacija podjetja Pix4D SA, namenjena načrtovanju leta in samodejnemu zajemanju fotografij z letalnikom. Aplikacija omogoča pet načinov letenja, ki jih izberemo glede na različne namene. To so: poligon, enojna mreža, dvojna mreža, kroženje okoli objekta in ročno upravljanje letalnika. V obravnavanem primeru smo izbrali načrt leta z enojno mrežo. Nato smo določili območje za prelet, ki je bilo nekoliko večje od testnega območja. Aplikacija samodejno določi pot letalnika znotraj območja glede na določeno velikost območja. Določili smo še ostale parametre leta, ki so prikazani v preglednici 2.

Preglednica 2: Prikaz parametrov načrta leta v aplikaciji Pix4D Capture

Višina leta	40 m/80 m
Kot kamere	90°
Preklop fotografij	70 %

Po določitvi območja in parametrov leta je aplikacija opravila še varnostni pregled povezave z letalnikom, kalibracijo letalnikovega kompasa in preverila, ali je na voljo zadostno število satelitov GNSS in kakšen je spomin na pomnilniški kartici. Med letom lahko v aplikaciji v realnem času spremljamo lokacijo letalnika. Aplikacija prikazuje podatke iz telemetrije, kot so višina leta, hitrost letalnika in oddaljenost letalnika od operaterja.

3.2 HITRA STATIČNA METODA IZMERE GNSS

Za določitev oslonilnih točk smo uporabili hitro statično metodo izmere GNSS. Poleg statične metode je najbolj kakovostna metoda geodetske izmere GNSS. Pri opazovanjih potrebujemo najmanj dva sprejemnika GNSS in eno točko z znanimi koordinatami. V obravnavanem primeru smo kot dano točko uporabili virtualno referenčno točko (VRS), ki nam jo je vzpostavilo državno omrežje stalno delujočih postaj GNSS, v obravnavanem primeru državno omrežje SIGNAL. Z naknadno obdelavo opazovanj kot rezultat najprej dobimo bazne vektorje med referenčno točko in novimi točkami in nato koordinate novih točk v koordinatnem sistemu GNSS.

Najprej smo na terenu približno enakomerno razdelili 15 točk (slika 5), ki smo jih stabilizirali s kovinskimi čepi. Na točke smo postavili stativ s sprejemniki GNSS, ki smo jih centrirali z optičnim grezilom in horizontirali z dozno in cevno libelo. Meritev na vsaki točki je trajala približno 30 minut.



Slika 5: Grafični prikaz razporeditve oslonilnih (rdeč krog) in kontrolnih (bel krog) točk.

3.2.1 OBDELAVA HITRE STATIČNE METODE

Za obdelavo hitre statične metode GNSS smo uporabili program Leica Infinity. Obdelava hitre statične metode v obravnavanem primeru temelji na radialni izmeri, kjer smo za dano točko uporabili postajo VRS. Za obdelavo smo minimalen višinski kot nastavili na 15°, uporabili smo absolutno kalibracijo anten NGS, ki smo jih pridobili s spletne strani NGS (<https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>) in precizne efemeride, ki smo jih dobili iz centra CODE (<http://ftp.aiub.unibe.ch/>). Za model troposferske refrakcije smo uporabili VMF with GPT2.

Po izvedeni obdelavi smo dobili bazne vektorje (slika 6) med referenčnim stojiščem in novimi točkami ter nato koordinate točk v koordinatnem sistemu ETRS89, ki smo jih kasneje s programom SiTraNet (<http://sitranet.si/>) pretvorili v ciljni koordinatni sistem D96/TM. Koordinate točk so podane v preglednici 3.

Preglednica 3: Koordinate točk v slovenski realizaciji koordinatnega sistema ETRS89, v D96/TM

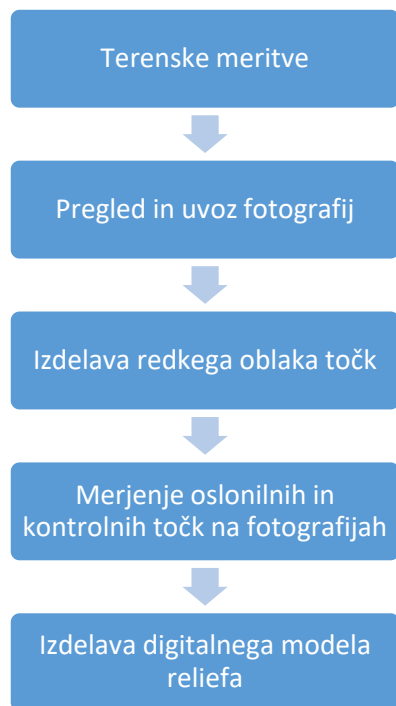
Št. točke	e [m]	n [m]	h [m]
KRS1	480.352,023	89.773,353	582,927
KRS21	480.352,099	89.785,349	580,126
KRS22	480.342,416	89.780,878	582,114
KRS31	480.340,045	89.807,652	577,569
KRS32	480.339,398	89.798,047	578,888
OSR1	480.366,451	89.766,879	583,711
OSR2	480.366,049	89.782,248	581,224
OSR3	480.360,630	89.796,746	577,324
OSR4	480.352,171	89.810,451	575,924
OSR12	480.343,529	89.767,584	583,584
OSR13	480.325,790	89.767,814	584,095
OSR23	480.324,628	89.780,970	582,357
OSR31	480.367,695	89.812,096	573,926
KRS12	480.334,248	89.774,576	583,081
OSR33	480.321,603	89.806,977	579,602
OSR23	480.324,622	89.780,958	582,348



Slika 6: Prikaz baznih vektorjev med referenčnim stojiščem in novimi točkami

3.3 AGISOFT PHOTOSCAN PRO

Za obdelavo fotografij smo uporabili program Agisoft PhotoScan Pro ruskega proizvajalca Agisoft LLC (<https://www.agisoft.com/>). Program, namenjen fotogrametrični obdelavi slik, omogoča avtomatsko generiranje oblaka točk, 3D modela objektov, ortofota, plastnic in digitalnega modela reliefa ter vsebuje še druge funkcije, kot so na primer: georeferenciranje, merjenje razdalj, površin in volumnov. Na sliki 7 je prikazan postopek izdelave DMR, ki je končni izdelek v programu Agisoft Photoscan Pro.



Slika 7: Potek izdelave DMR s programom Agisoft Photoscan Pro.

3.3.1 UVOZ ZAJETIH FOTOGRAFIJ

Da bi skrajšali čas obdelave in izboljšali kakovost končnega izdelka, smo od 266 zajetih fotografij odstranili 16 neuporabnih fotografij, saj niso bile izostrene. Fotografije smo sestavili v 6 različnih fotogrametričnih blokov in z njihovo obdelavo izdelali DMR-je. V Agisoft Photoscan Pro smo glede na višino in smer leta uvozili različno število fotografij, ki jih navajamo v preglednici 4.

Preglednica 4: Število uvoženih fotografij.

Primer	Št. uvoženih fotografij
40p	103
40pv	185
80p	32
80pv	65
40p80v	136
40pv80pv	250

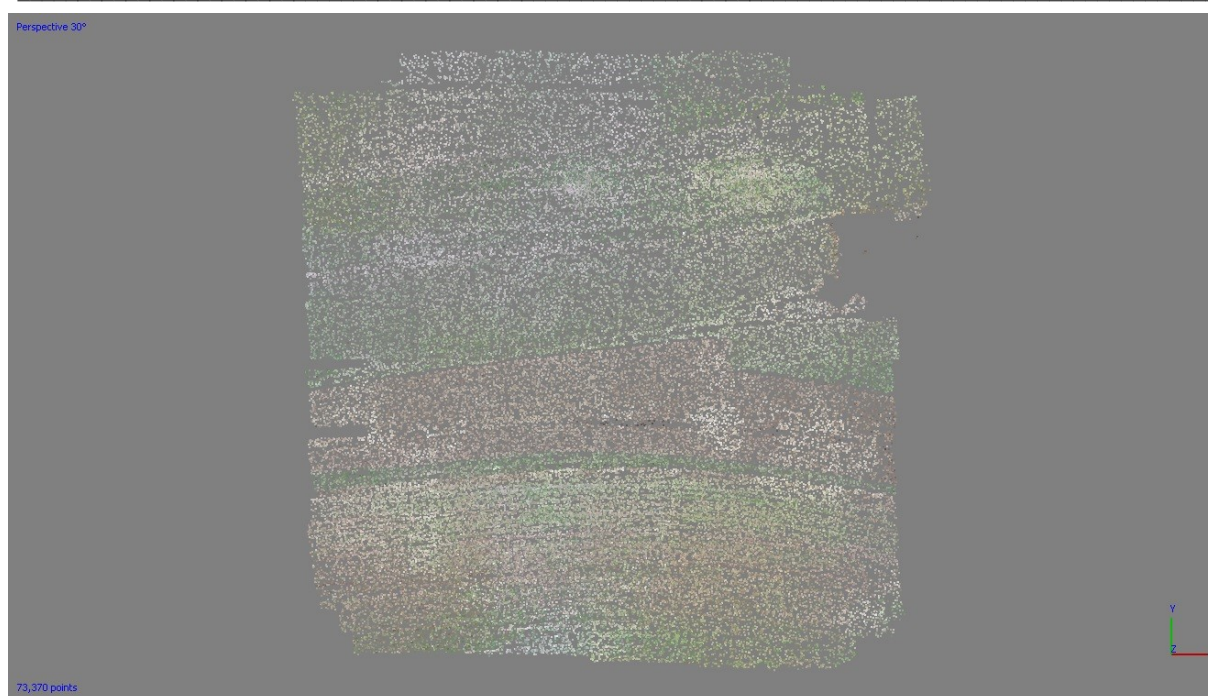
GNSS na letalniku zapiše položaje fotoaparata v prostoru v koordinatnem sistemu WGS 84, zato smo jih pretvorili v koordinatni sistem D96/TM, v katerem so koordinate pridobljene s hitro statično metodo.

3.3.2 IZDELAVA REDKEGA OBLAKA TOČK

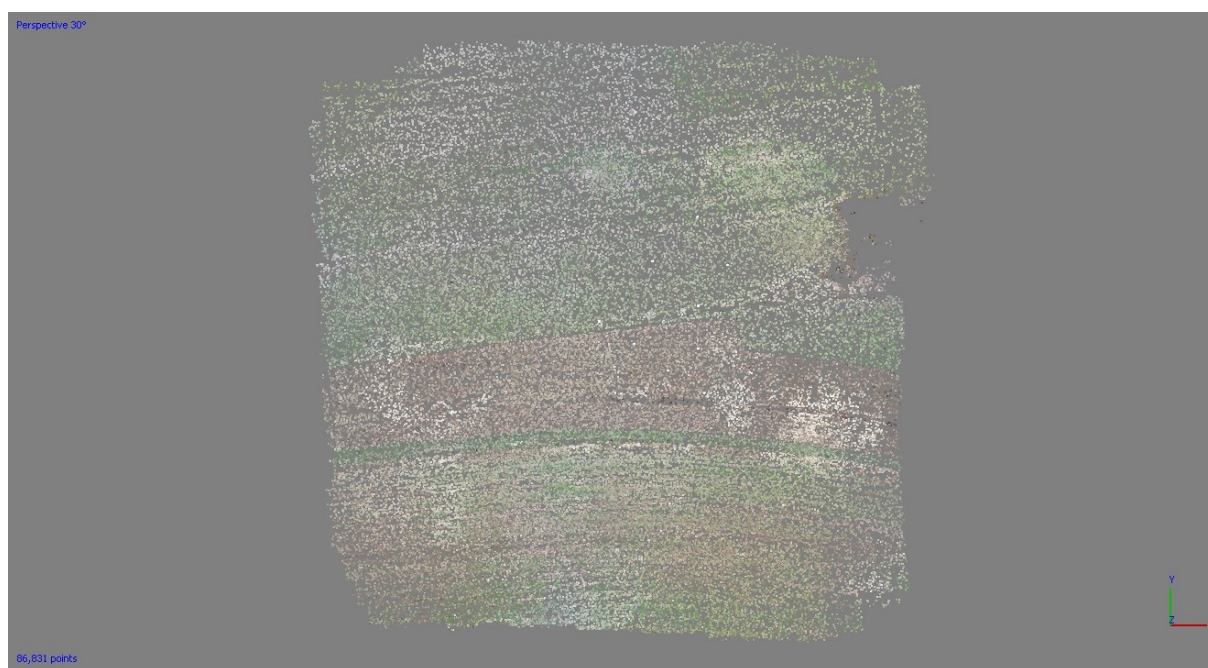
Prvi (in nujen) korak pri izdelavi digitalnega modela reliefa je izdelava redkega oblaka točk (slike od 8 do 13). Program s postopkom SfM (ang. structure from motion) poišče identične točke na fotografijah. Glede na najdene identične točke se izračunajo parametri notranje in zunanje orientacije fotoaparata. Nato program na podlagi identičnih točk izdela 3D redek oblak točk. Preglednica 5 prikazuje število točk v redkem oblaku točk.

Preglednica 5: Število točk redkega oblaka točk.

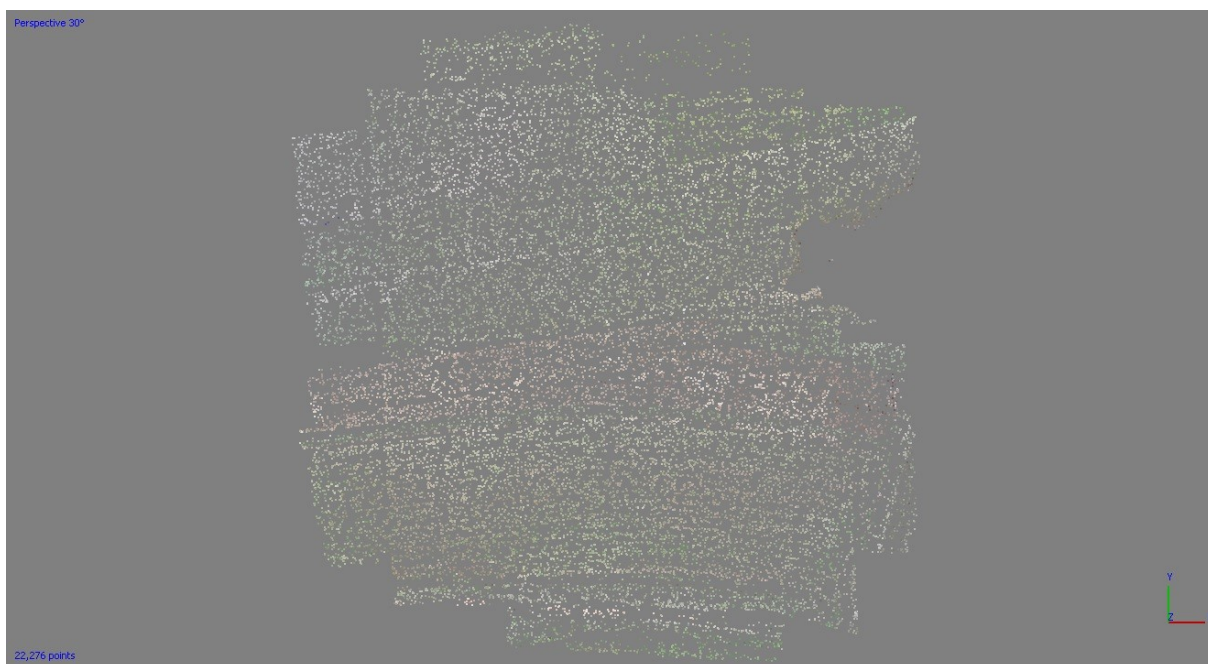
Primer	Št. točk redkega oblaka točk
40p	73.370
40pv	86.831
80p	22.276
80pv	25.377
40p80v	84.088
40pv80pv	103.010



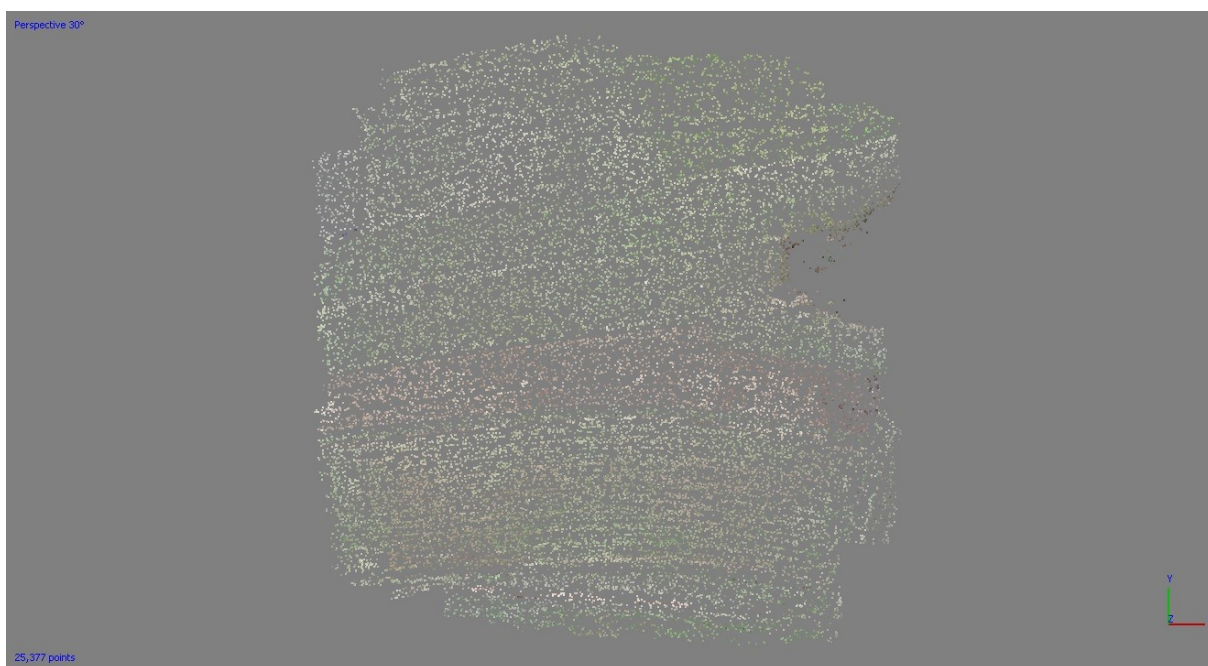
Slika 8: Prikaz izdelanega redkega oblaka točk za 40p.



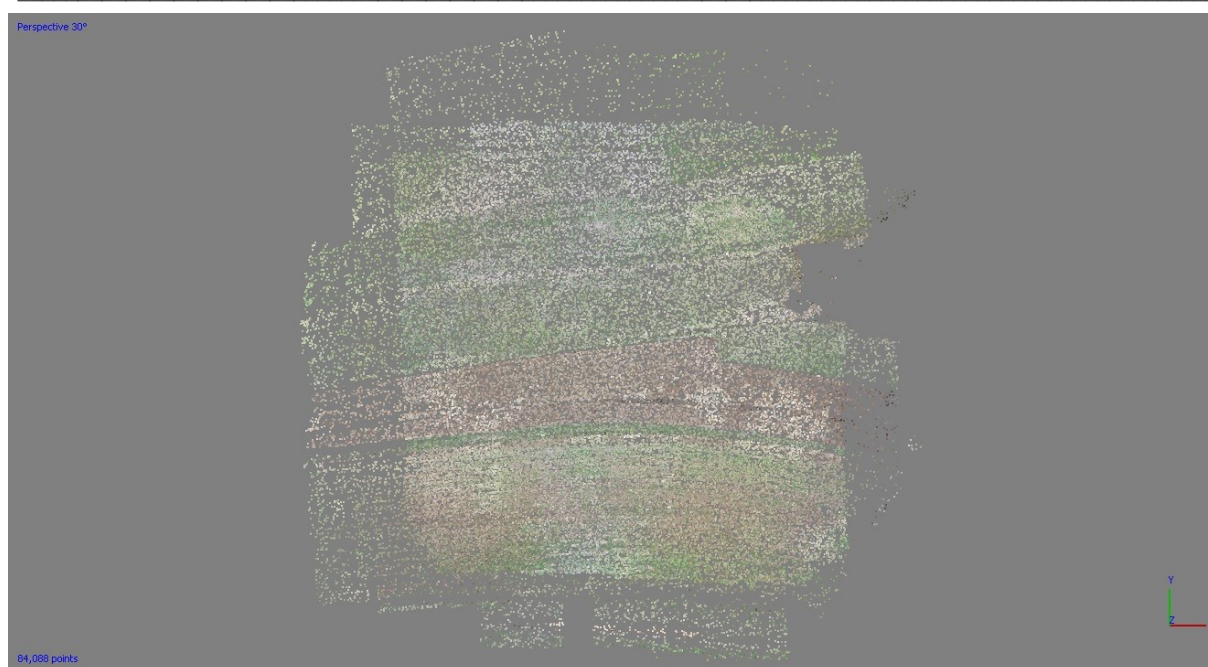
Slika 9: Prikaz izdelanega redkega oblaka točk za 40pv.



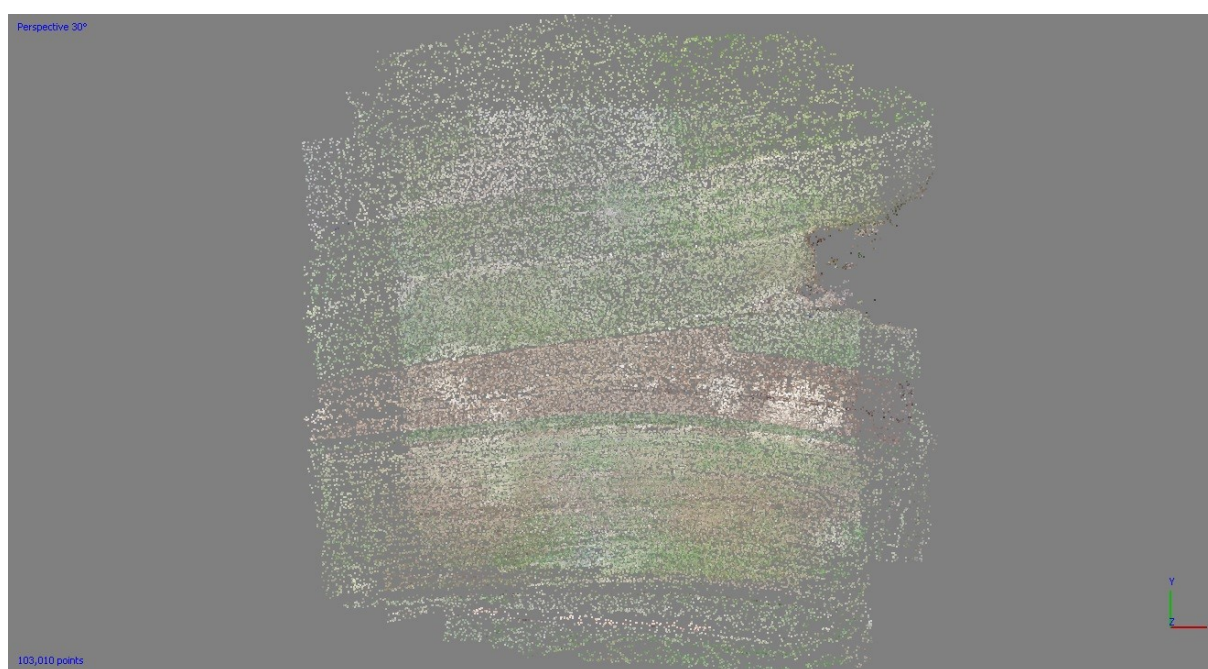
Slika 10: Prikaz izdelanega redkega oblaka točk za 80p.



Slika 11: Prikaz izdelanega redkega oblaka točk za 80pv.



Slika 12: Prikaz izdelanega redkega oblaka točk za 40p80v.



Slika 13: Prikaz izdelanega redkega oblaka točk za 40pv80pv.

3.3.3 MERJENJE OSLONILNIH IN KONTROLNIH TOČK NA FOTOGRAFIJAH

Za oslonilne in kontrolne točke smo uporabili točke, določene s hitro statično metodo GNSS (preglednici 6 in 7). Deset točk smo uporabili kot oslonilne točke. V program smo najprej uvozili točke v zapisu .txt, nato pa na vseh fotografijah, kjer so vidne tarče, z zastavico določili položaj določene točke. Na podlagi izmerjenih oslonilnih točk na fotografijah je program preračunal zunanjo orientacijo fotografij in redek oblak v državni koordinatni sistem D96/TM. Obenem se je izboljšal tudi izračun notranje orientacije fotoaparata. Šest točk smo uporabili kot kontrolne točke, ki so služile za kontrolo kakovosti orientacije modela. Po transformaciji podatkov v državni koordinatni sistem D96/TM smo pridobili oceno kakovosti meritev v obliki korenov srednjih kvadratov pogreškov RMSE (ang. root mean square error), kar prikazujemo v preglednici 8.

Preglednica 6: Koordinate oslonilnih točk, pridobljene s hitro statično metodo.

OSLONILNE TOČKE	e [m]	n [m]	h [m]
KRS22	480.342,416	89.780,878	582,114
OSR1	480.366,451	89.766,879	583,711
OSR2	480.366,049	89.782,248	581,224
OSR4	480.352,171	89.810,451	575,924
OSR12	480.343,529	89.767,584	583,584
OSR13	480.325,79	89.767,814	584,095
OSR31	480.367,695	89.812,096	573,926
KRS12	480.334,248	89.774,576	583,081
OSR33	480.321,603	89.806,977	579,602
OSR23	480.324,622	89.780,958	582,348

Preglednica 7: Koordinate kontrolnih točk, pridobljene s hitro statično metodo.

KONTROLNE TOČKE	e [m]	n [m]	h [m]
KRS1	480.352,023	89.773,353	582,927
KRS12	480.334,248	89.774,576	583,081
KRS21	480.352,099	89.785,349	580,126
KRS31	480.340,045	89.807,652	577,569
KRS32	480.339,398	89.798,047	578,888
OSR3	480.360,630	89.796,746	577,324

Preglednica 8: RMSE oslonilnih in kontrolnih točk.

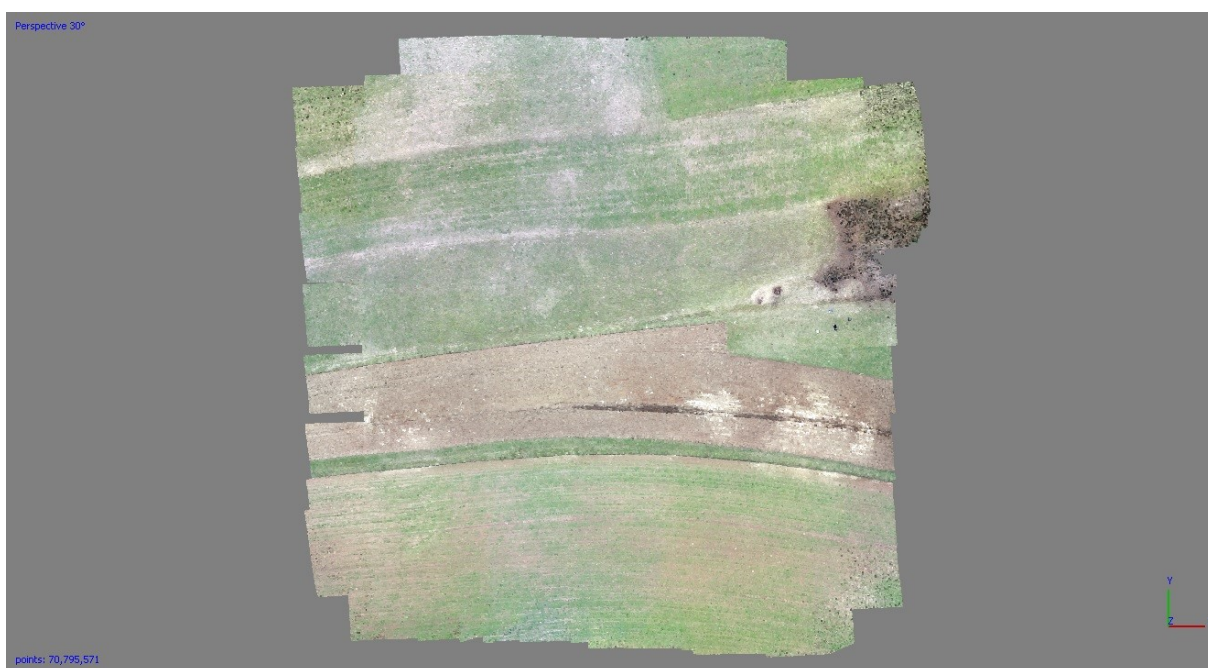
	RMSE oslonilnih točk [m]	RMSE kontrolnih točk [m]
40p	0,021	0,032
40pv	0,021	0,027
80p	0,018	0,027
80pv	0,018	0,026
40p80v	0,020	0,028
40pv80pv	0,021	0,027

3.3.4 IZDELAVA GOSTEGA OBLAKA TOČK

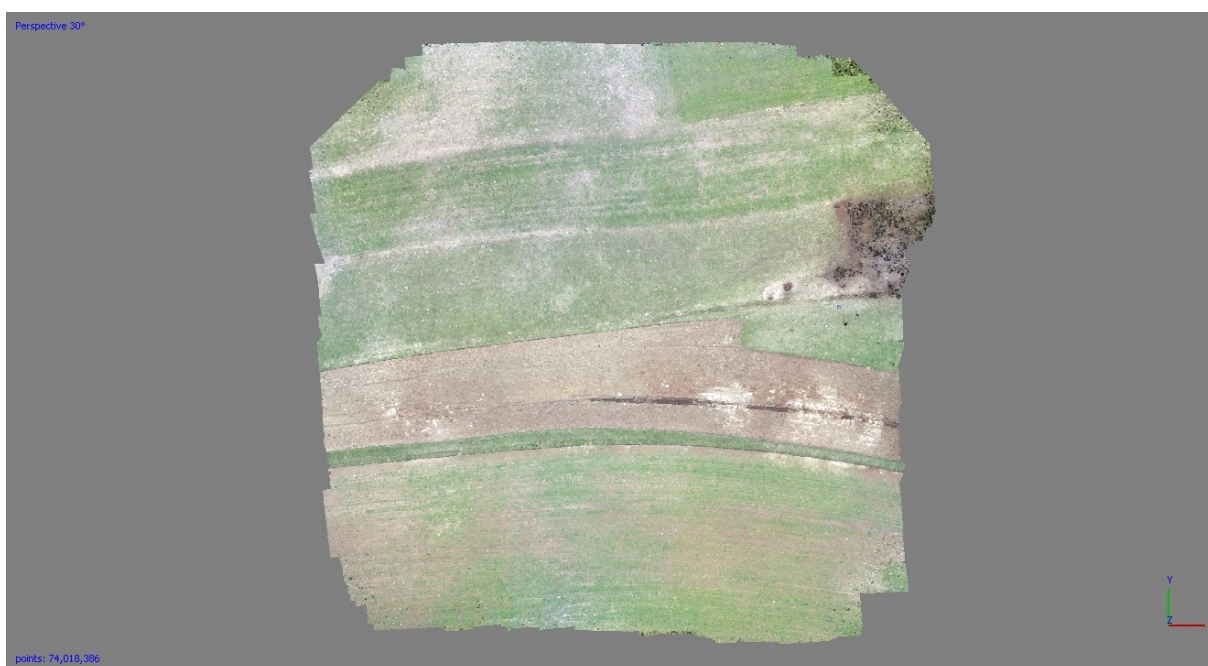
Za izdelavo gostega oblaka točk program z metodo gostega slikovnega ujemanja na fotografijah poišče veliko število identičnih točk. Nato na podlagi prostorskih presekov slikovnih žarkov identičnih točk izračuna gost oblak točk. Uporabljeni računalnik je zaradi zahtevnosti postopka potreboval od trideset minut pri primeru z najmanj uvoženimi fotografijami do dveh ur pri primeru z največ uvoženimi fotografijami. Izdelani gosti oblaki točk so prikazani na slikah od 14 do 19 in vsebujejo število točk, prikazanih v preglednici 9.

Preglednica 9: Število točk gostega oblaka točk.

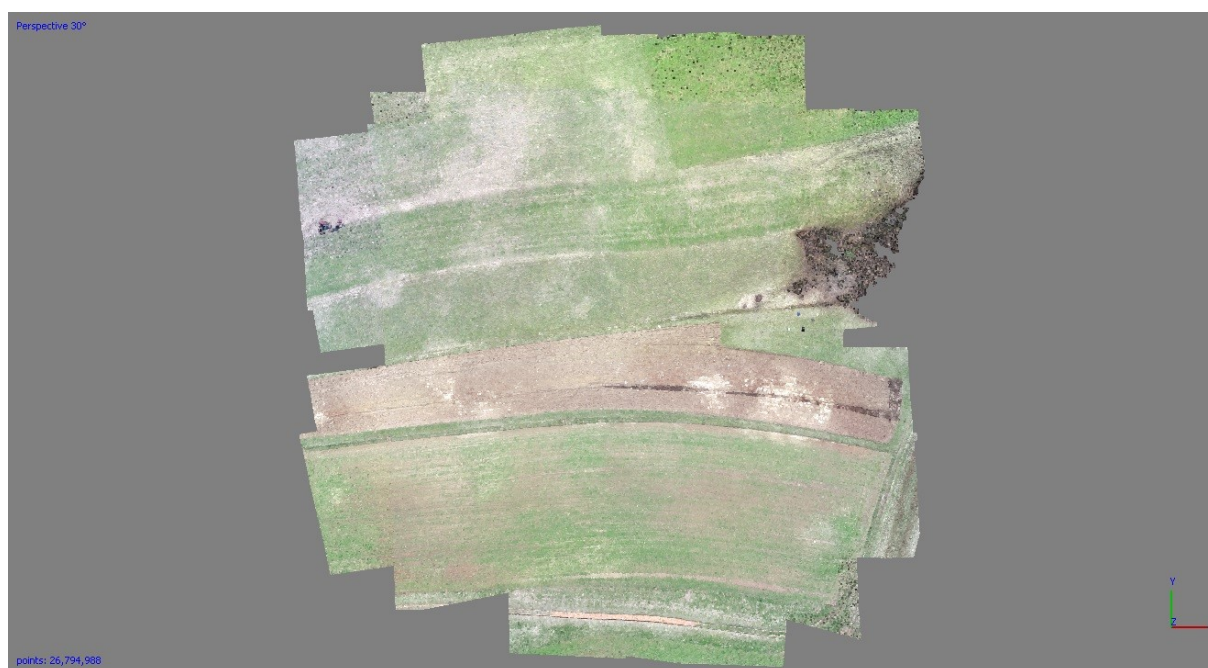
Primer	Št. točk gostega oblaka točk
40p	70.795.571
40pv	74.018.386
80p	26.794.988
80pv	30.082.985
40p80v	63.789.061
40pv80pv	69.385.106



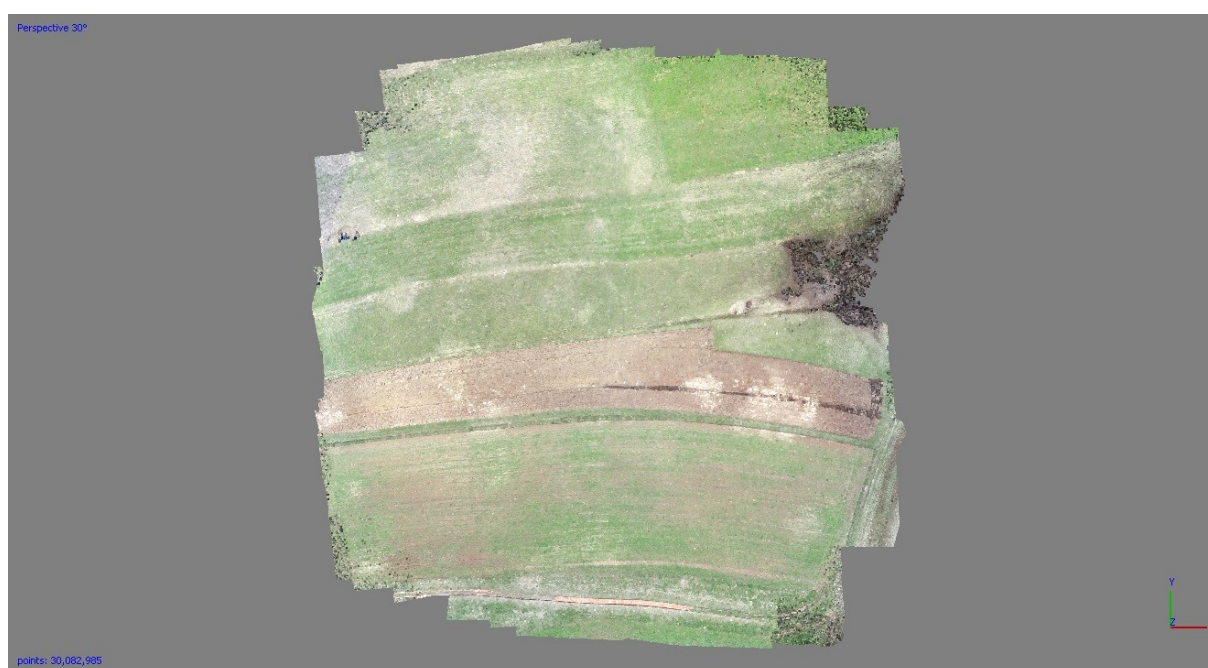
Slika 14: Prikaz izdelanega gostega oblaka točk za 40p.



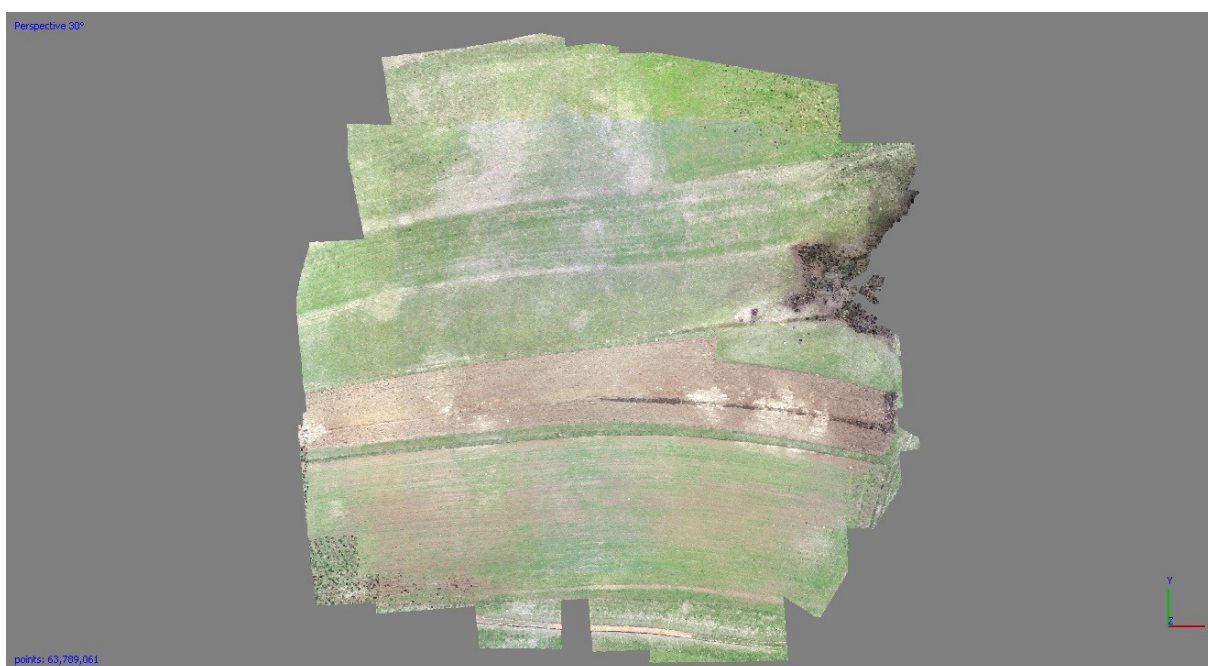
Slika 15: Prikaz izdelanega gostega oblaka točk za 40pv.



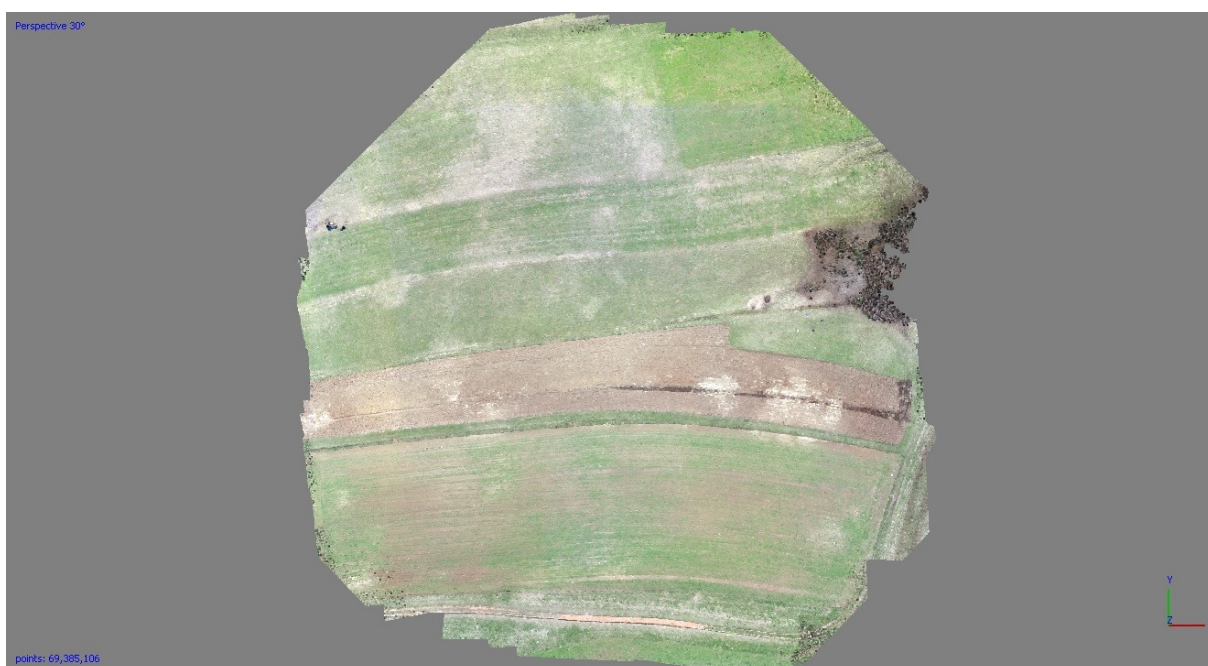
Slika 16: Prikaz izdelanega gostega oblaka točk za 80p.



Slika 17: Prikaz izdelanega gostega oblaka točk za 80pv.



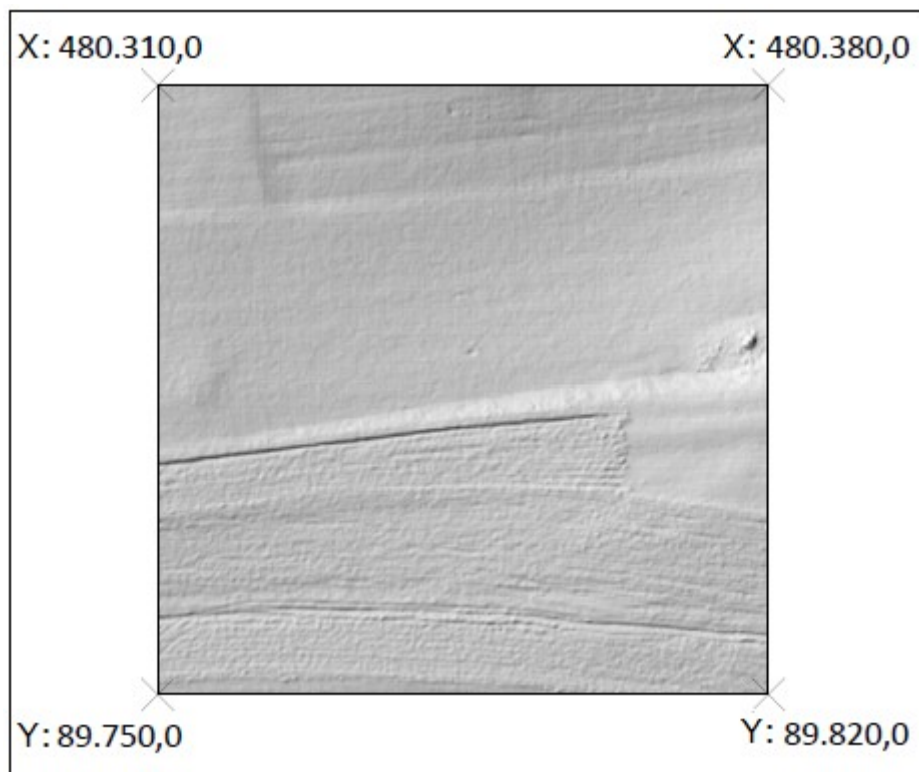
Slika 18: Prikaz izdelanega gostega oblaka točk za 40p80v.



Slika 19: Prikaz izdelanega gostega oblaka točk za 40pv80pv.

3.3.5 IZDELAVA DIGITALNEGA MODELA RELIEFA

Na podlagi gostega oblaka točk smo interpolirali DMR v obliki celične mreže s prostorsko ločljivostjo 5 cm. Nato smo DMR izvozili v zapisu .TIFF, kjer smo pri vseh primerih določili enake robne točke območja. Obrezani del DMR je prikazan na sliki 20.



Slika 20: Prikaz izdelanega DMR za primer fotogrametričnega bloka 40pv80pv.

4. REZULTATI IN ANALIZA IZRAČUNA VIŠINSKE TOČNOSTI IZDELANIH DMR

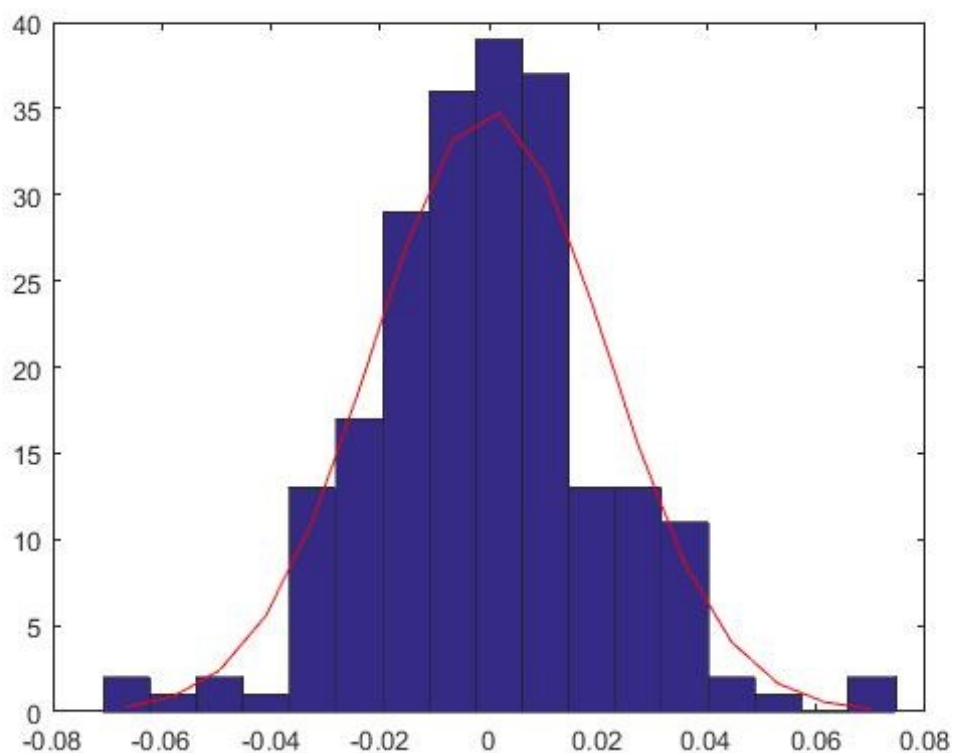
Višine izmerjenih detajlnih točk terena, ki so bile določene na terenu z uporabo instrumenta Leica TPS1200, smo primerjali z višinami točk, interpoliranih iz izdelanih digitalnih modelov reliefa s programom InOViTOr_SI (avtor D. Grigillo) in z njim izračunali oceno višinske točnosti DMR. Vzorec točk za primerjavo z DMR je vključeval 219 detajlnih točk. Kot rezultat smo s programom dobili statistično analizo višinske točnosti DMR-jev (preglednice 10, 12, 14, 16, 18 in 20), ki vsebuje oceno srednje vrednosti razlik v višinah μ , standardni odklon vzorca s , koren srednjega kvadratnega pogreška RMSE (ang. root mean square error) in intervale zaupanja za srednje vrednosti in standardne odklone.

4.1 PRIMERJAVA VIŠIN TOČK S PROGRAMOM InOViTOr_SI

Preden smo primerjali višine detajlnih točk terena z DMR, smo morali vsem detajlnim točkam terena, posnetim z elektronskim tahimetrom, odšteti 46,409 m, da smo geoidne višine pretvorili v elipsoidne. Popravljenе višine detajlnih točk terena smo nato skupaj z DMR uvozili v program InOViTOr_SI. Program je rezultate izpisal v datoteko v zapisu ASCII (.txt) in kreiral histograme porazdelitev višinskih razlik (slike 21, 24, 27, 30, 33 in 36), kvantile višinskih razlik (slike 22, 25, 28, 31, 34 in 37) in slike s prikazom višinskih razlik med višinami detajlnih točk in višinami, interpoliranimi iz izdelanih DMR (slike 23, 26, 29, 32, 35 in 38). Ker so opazovanja vsebovala grobe pogreške, smo izračunali tudi robustno oceno točnosti izdelanih DMR na testnem območju (preglednice 11, 13, 15, 17, 19 in 21), ki jo podajamo z mediano in normalizirano mediano absolutnih vrednosti višinskih razlik (NMAD).

Preglednica 10: Rezultati statistične analize višinske točnosti za 40p.

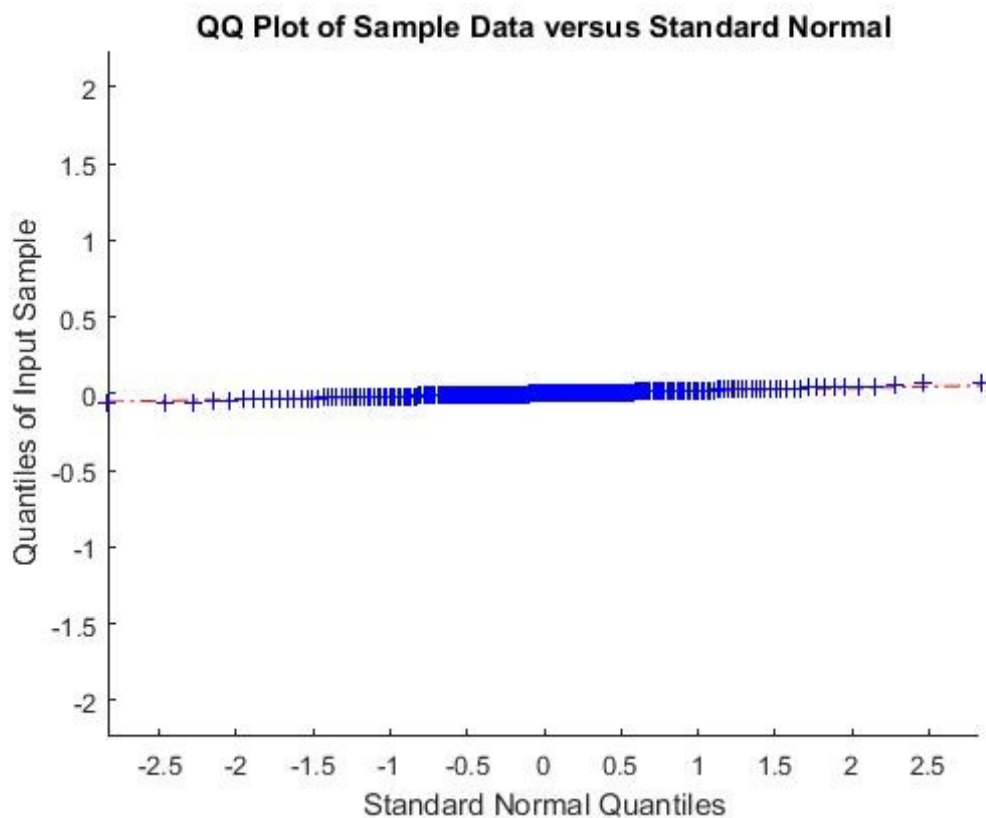
40p	
STATISTIČNE KOLIČINE	VREDNOST
Št. iteracij	1
Št. grobih pogreškov	4
μ	0,000 m
s	0,021 m
RMSE	0,021 m
95 % interval zaupanja za μ	$[-0,003 \text{ m} < \mu < 0,003 \text{ m}]$
95 % interval zaupanja za σ	$[0,018 \text{ m} < \sigma < 0,021 \text{ m}]$



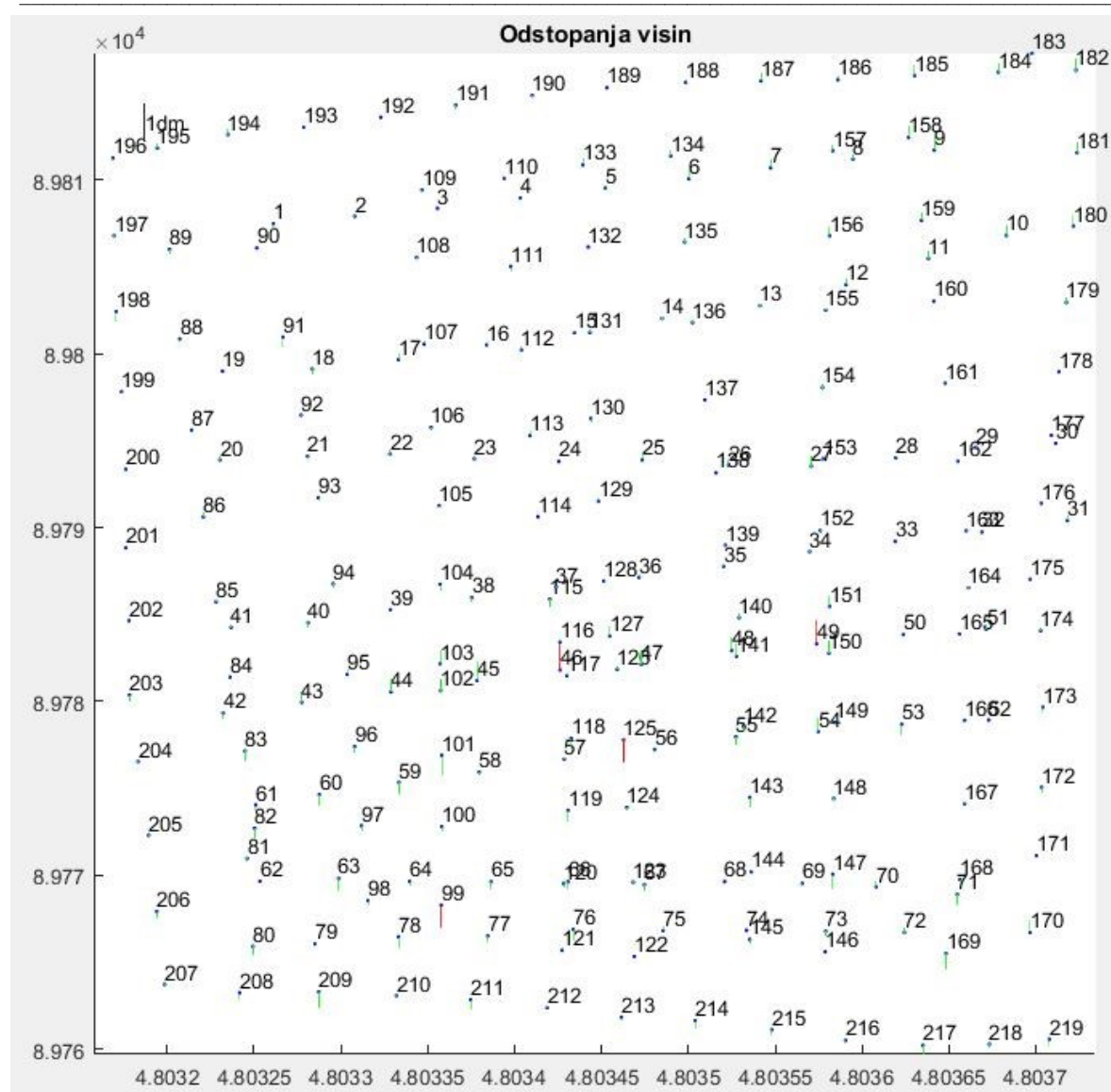
Slika 21: Histogram porazdelitve višinskih razlik za 40p.

Preglednica 11: Rezultati robustne statistike točnosti izdelanega DMR za 40p.

40p	
STATISTIČNE KOLIČINE	VREDNOST
Mediana	0,000 m
NMAD	0,019 m
$Q_{[h]}(0,95)$	0,019 m
$Q_{[h]}(0,683)$	0,040 m



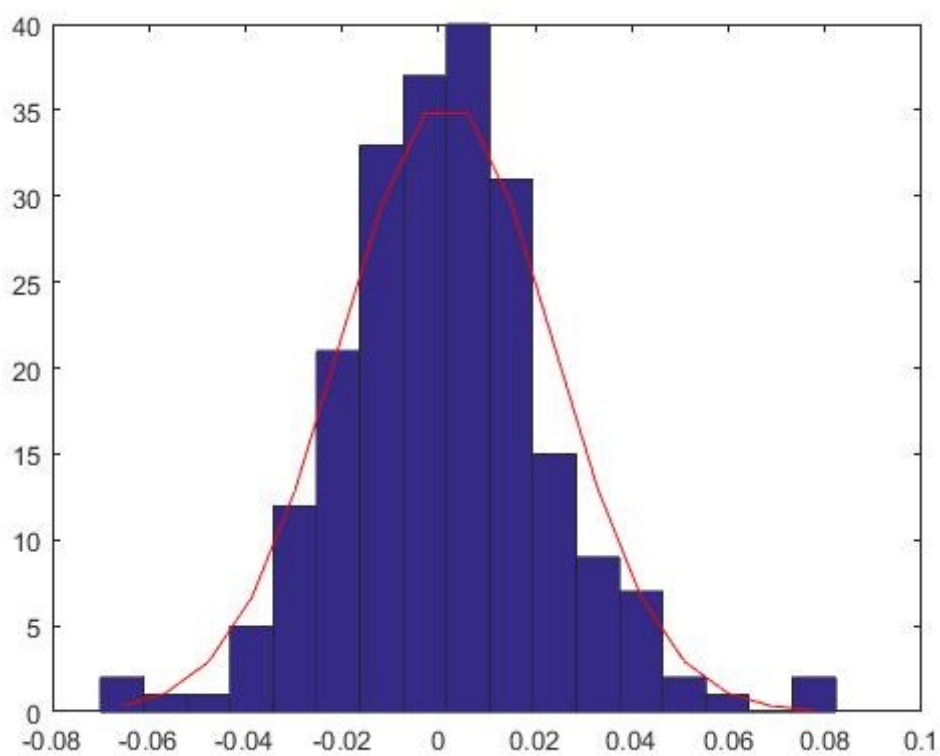
Slika 22: Prikaz kvantilov višinskih razlik za 40p.



Slika 23: Prikaz razporeditve terensko določenih točk in višinskih razlik med detajlnimi točkami in točkami, interpoliranimi iz izdelanega DMR za 40p.

Preglednica 12: Rezultati statistične analize višinske točnosti za 40pv.

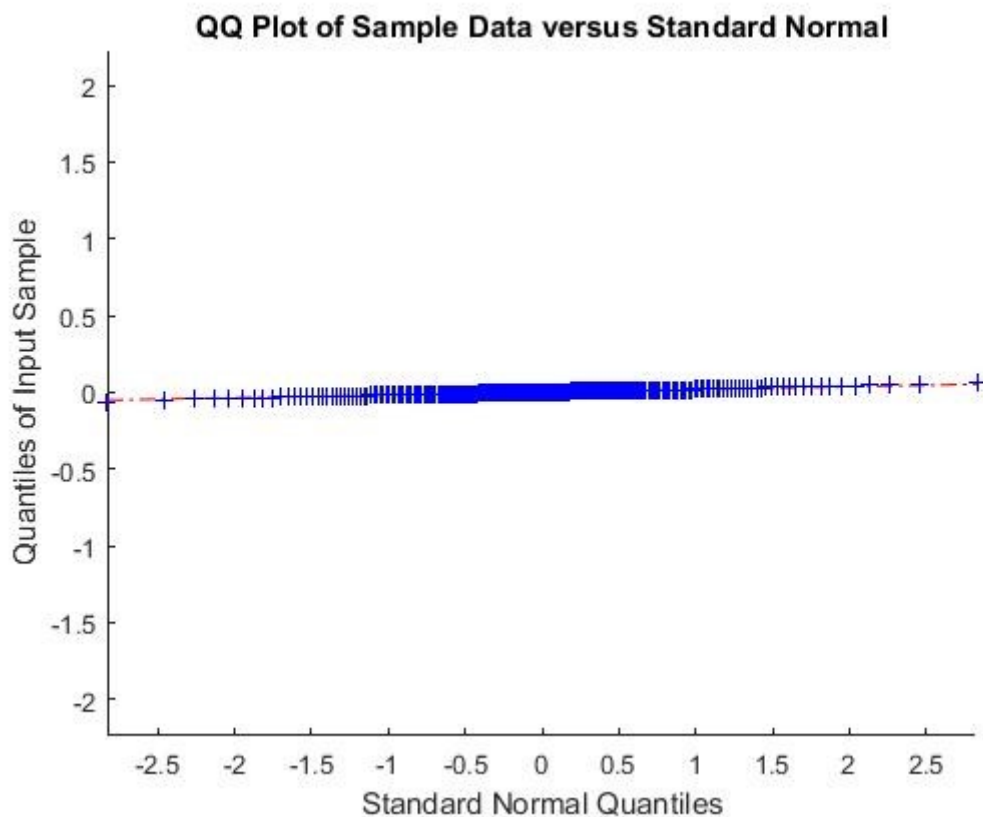
40pv	
STATISTIČNE KOLIČINE	VREDNOST
Št. iteracij	1
Št. grobih pogreškov	4
μ	0,001 m
s	0,021 m
RMSE	0,021 m
9 5% interval zaupanja za μ	$[-0,002 \text{ m} < \mu < 0,004 \text{ m}]$
95 % interval zaupanja za σ	$[0,019 \text{ m} < \sigma < 0,023 \text{ m}]$



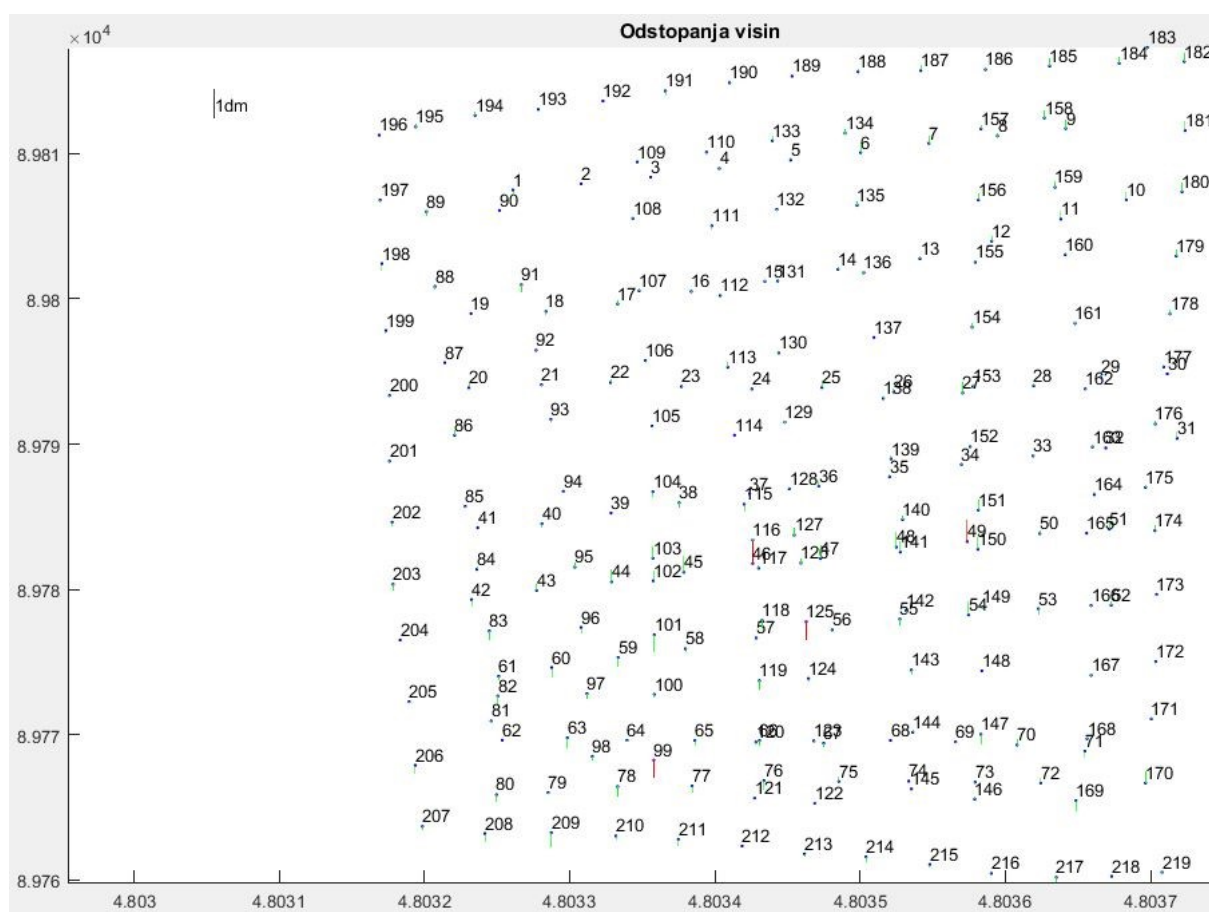
Slika 24: Histogram porazdelitve višinskih razlik za 40pv.

Preglednica 13: Rezultati robustne statistike točnosti izdelanega DMR za 40pv.

40pv	
STATISTIČNE KOLIČINE	VREDNOST
Mediana	0,001 m
NMAD	0,019 m
$Q_{[h]}(0,95)$	0,019 m
$Q_{[h]}(0,683)$	0,042 m



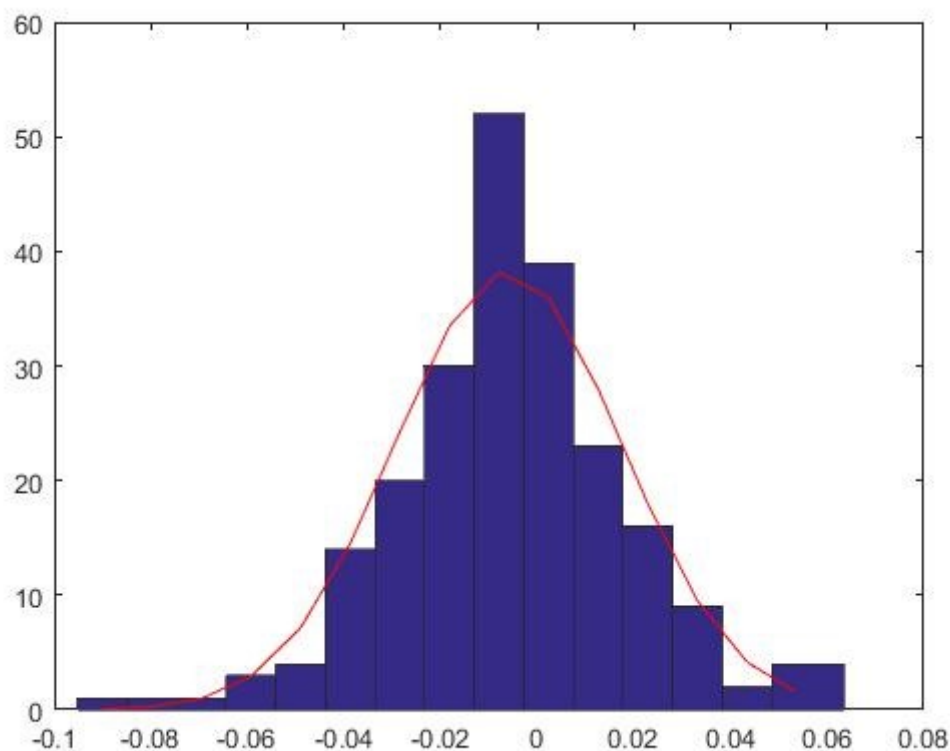
Slika 25: Prikaz kvantilov višinskih razlik za 40pv.



Slika 26: Prikaz razporeditve terensko določenih točk in višinskih razlik med detajlnimi točkami in točkami, interpoliranimi iz izdelanega DMR za 40pv.

Preglednica 14: Rezultati statistične analize višinske točnosti za 80p.

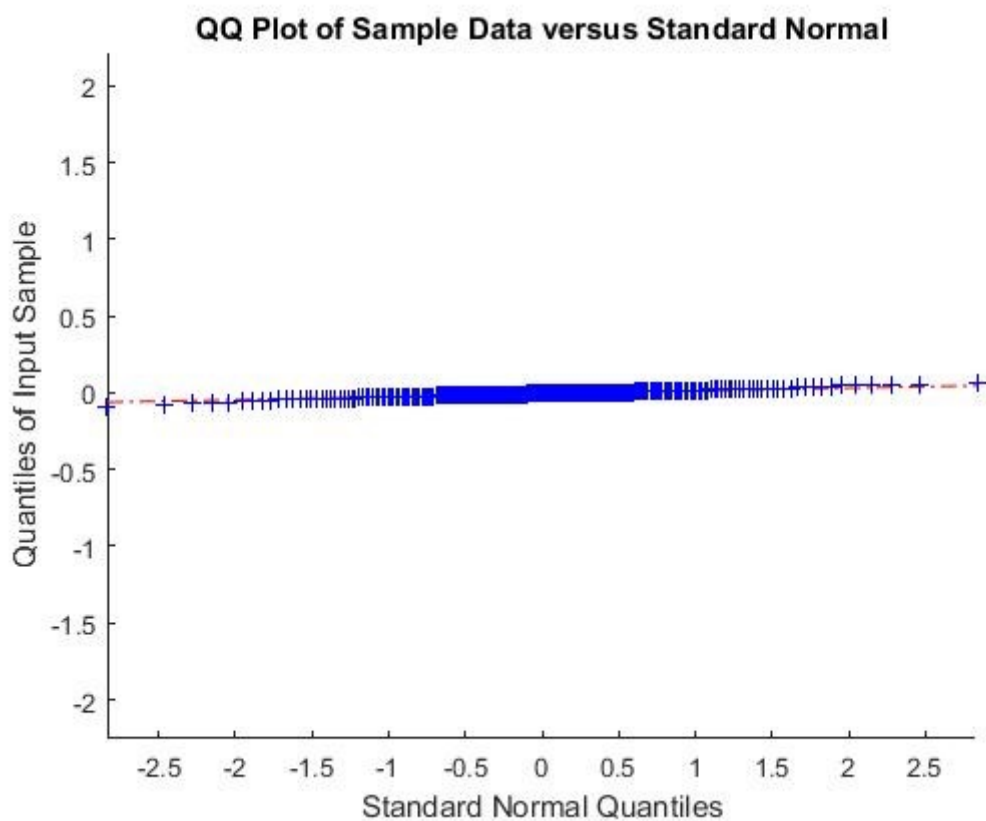
80p	
STATISTIČNE KOLIČINE	VREDNOST
Št. iteracij	1
Št. grobih pogreškov	2
μ	-0,005 m
s	0,022 m
RMSE	0,023 m
95 % interval zaupanja za μ	$[-0,008 \text{ m} < \mu < 0,002 \text{ m}]$
95 % interval zaupanja za σ	$[0,020 \text{ m} < \sigma < 0,025 \text{ m}]$



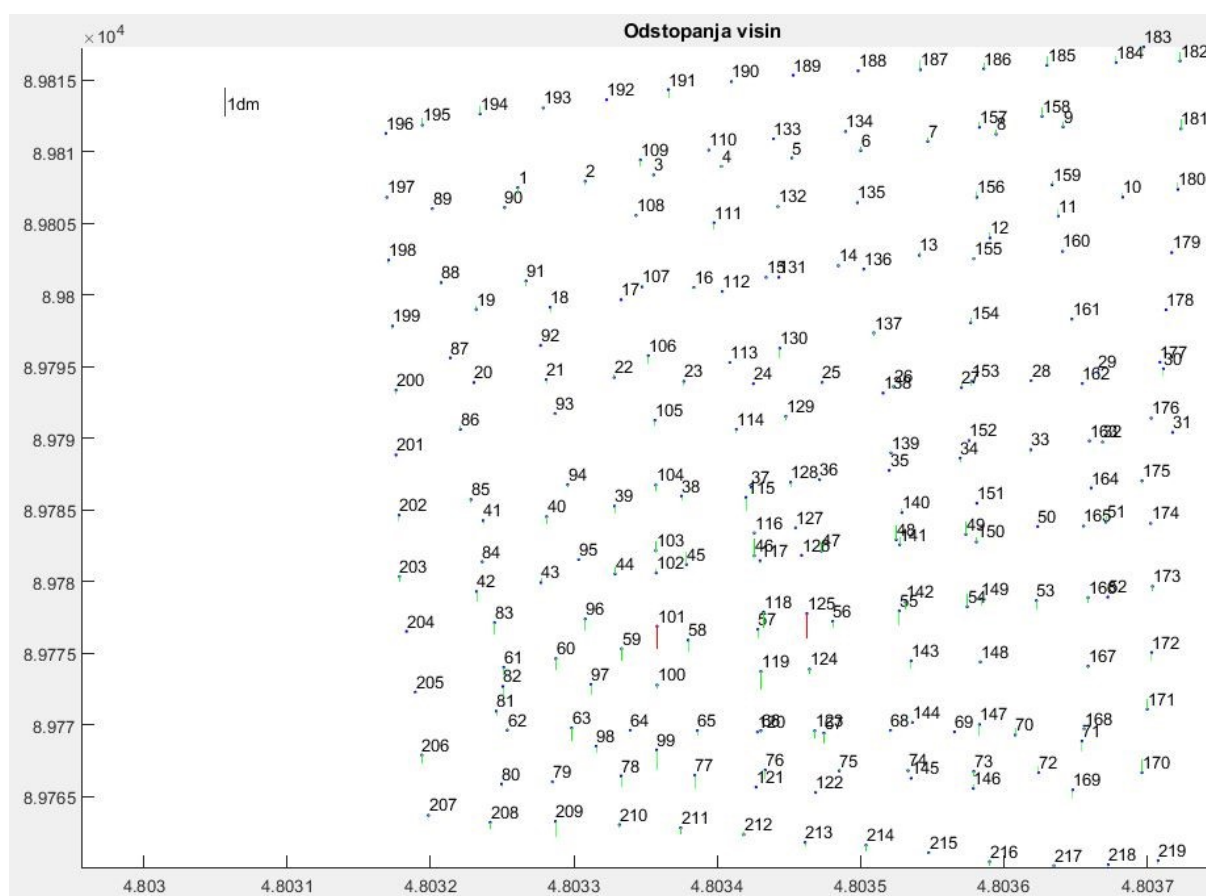
Slika 27: Histogram porazdelitve višinskih razlik za 80p.

Preglednica 15: Rezultati robustne statistike točnosti izdelanega DMR za 80p.

80p	
STATISTIČNE KOLIČINE	VREDNOST
Mediana	0,005 m
NMAD	0,019 m
$Q_{[h]}(0,95)$	0,023 m
$Q_{[h]}(0,683)$	0,049 m



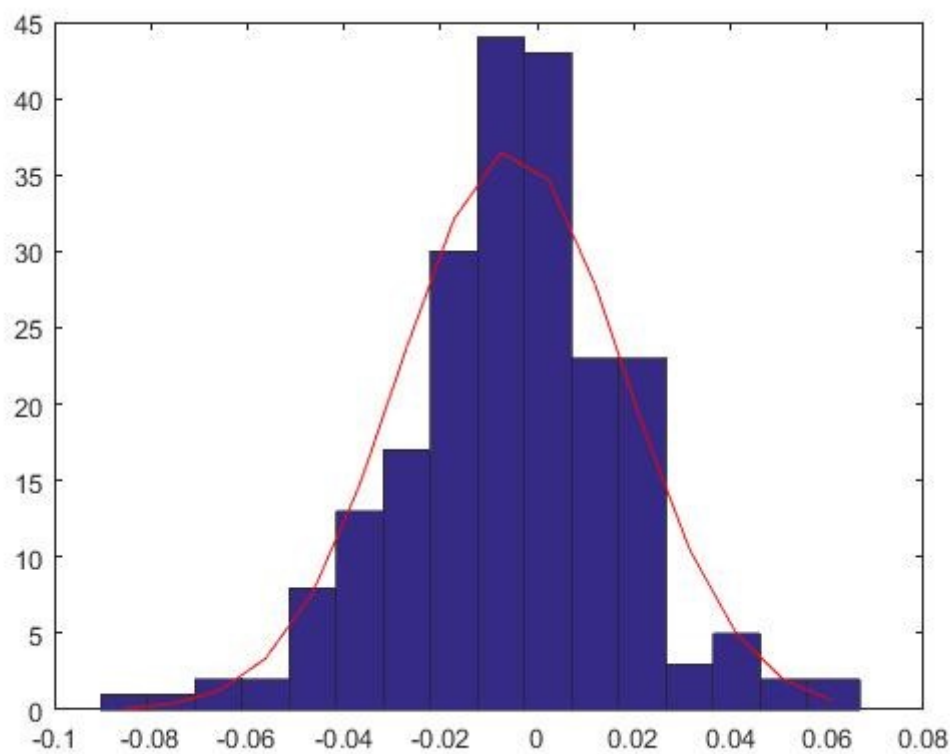
Slika 28: Prikaz kvantilov višinskih razlik za 80p.



Slika 29: Prikaz razporeditve terensko določenih točk in višinskih razlik med detajlnimi točkami in točkami, interpoliranimi iz izdelanega DMR za 80p.

Preglednica 16: Rezultati statistične analize višinske točnosti za 80pv.

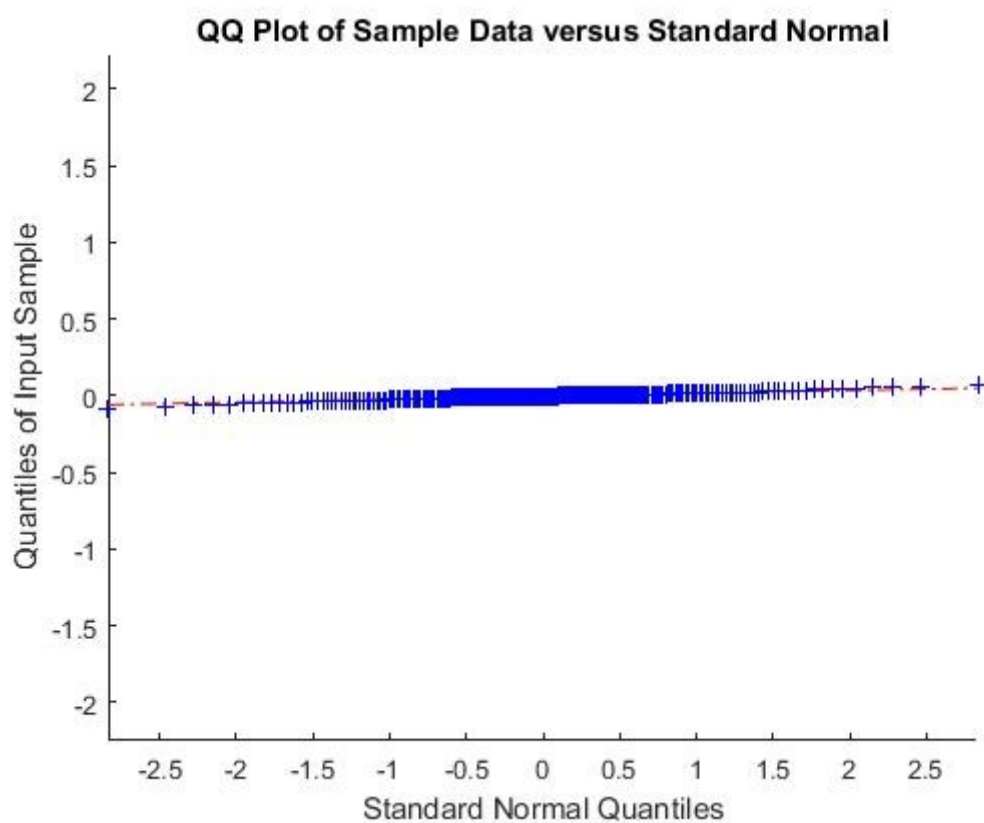
80pv	
STATISTIČNE KOLIČINE	VREDNOST
Št. iteracij	1
Št. grobih pogreškov	2
μ	-0,005 m
s	0,022 m
RMSE	0,023 m
95 % interval zaupanja za μ	$[-0,008 \text{ m} < \mu < 0,002 \text{ m}]$
95 % interval zaupanja za σ	$[0,020 \text{ m} < \sigma < 0,025 \text{ m}]$



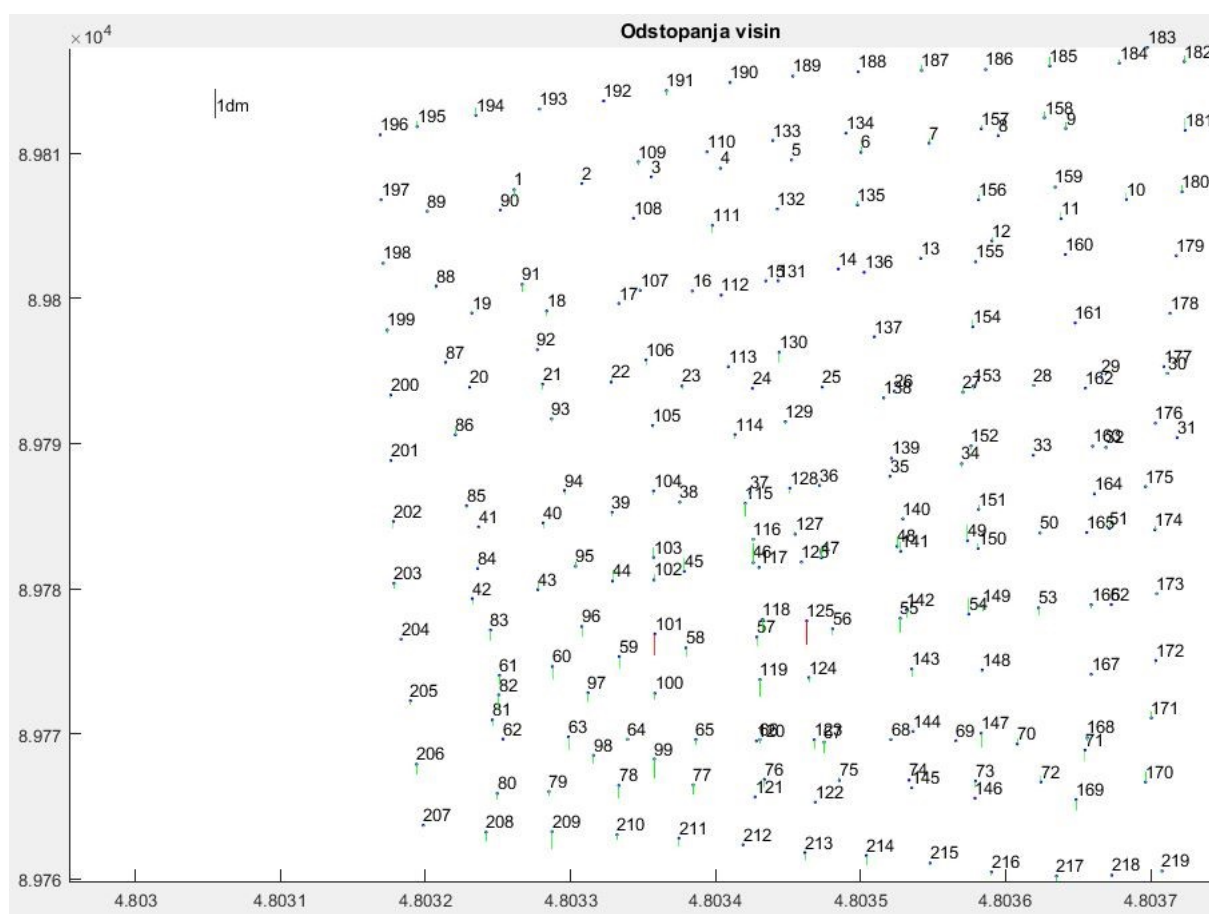
Slika 30: Histogram porazdelitve višinskih razlik za 80pv.

Preglednica 17: Rezultati robustne statistike točnosti izdelanega DMR za 80pv.

80pv	
STATISTIČNE KOLIČINE	VREDNOST
Mediana	-0,006 m
NMAD	0,019 m
$Q_{[h]}(0,95)$	0,022 m
$Q_{[h]}(0,683)$	0,049 m



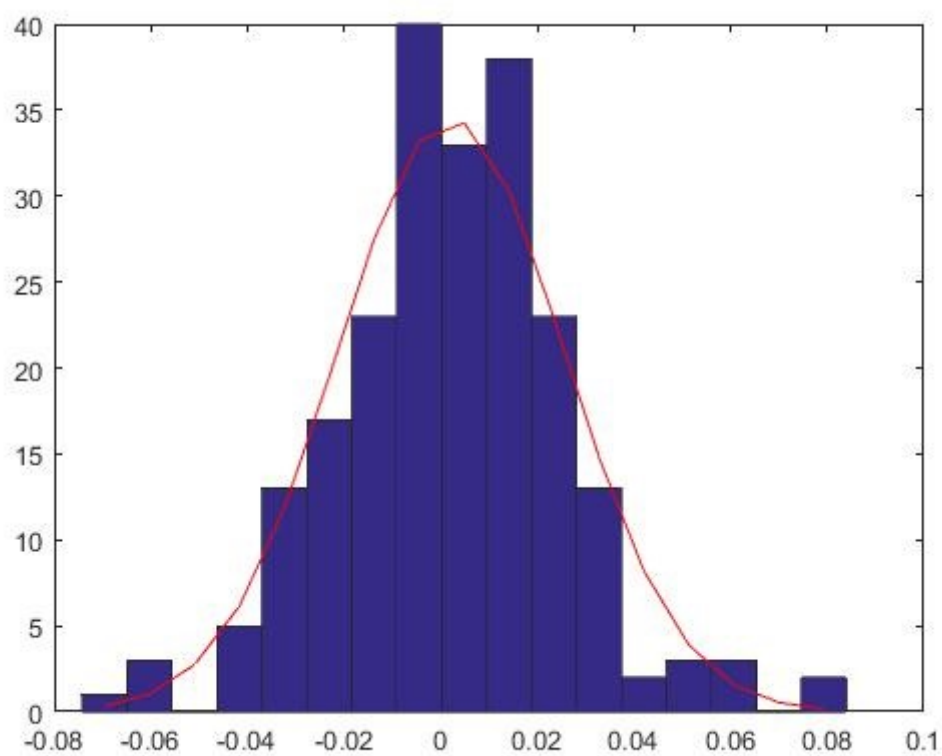
Slika 31: Prikaz kvantilov višinskih razlik za 80pv.



Slika 32: Prikaz razporeditve terensko določenih točk in višinskih razlik med detajlnimi točkami in točkami, interpoliranimi iz izdelanega DMR za 80pv.

Preglednica 18: Rezultati statistične analize višinske točnosti za 40p80v.

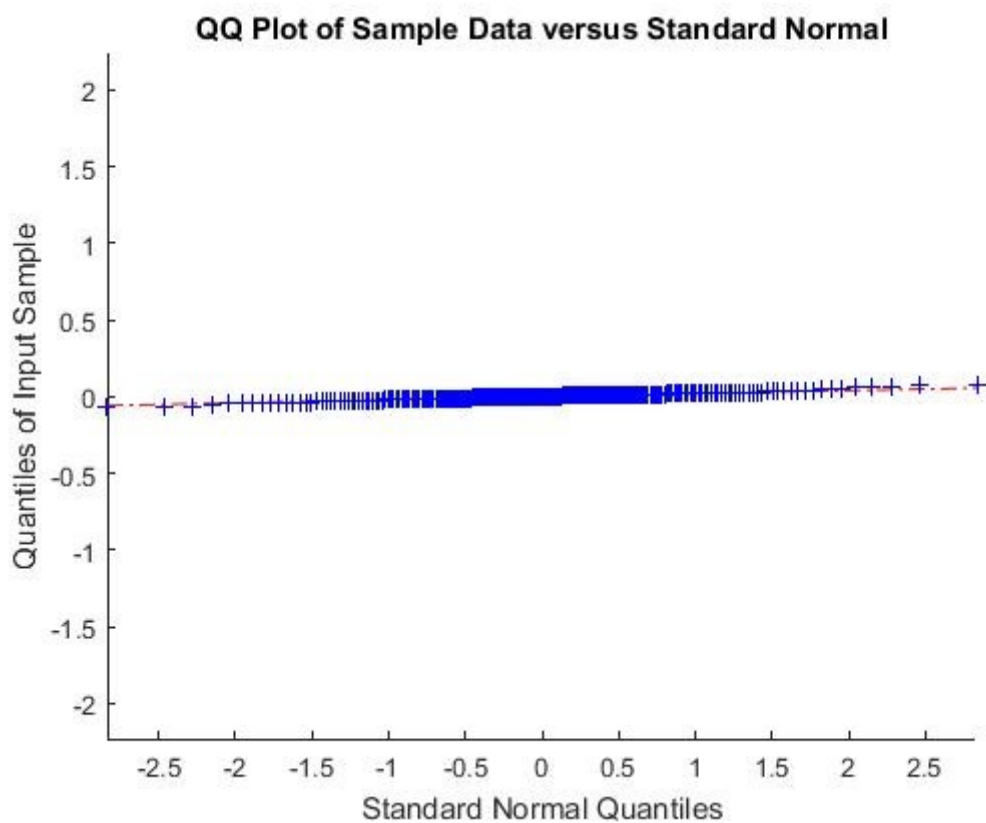
40p80v	
STATISTIČNE KOLIČINE	VREDNOST
Št. iteracij	1
Št. grobih pogreškov	3
μ	0,001 m
s	0,022 m
RMSE	0,022 m
95 % interval zaupanja za μ	$[-0,002 \text{ m} < \mu < 0,004 \text{ m}]$
95 % interval zaupanja za σ	$[0,021 \text{ m} < \sigma < 0,025 \text{ m}]$



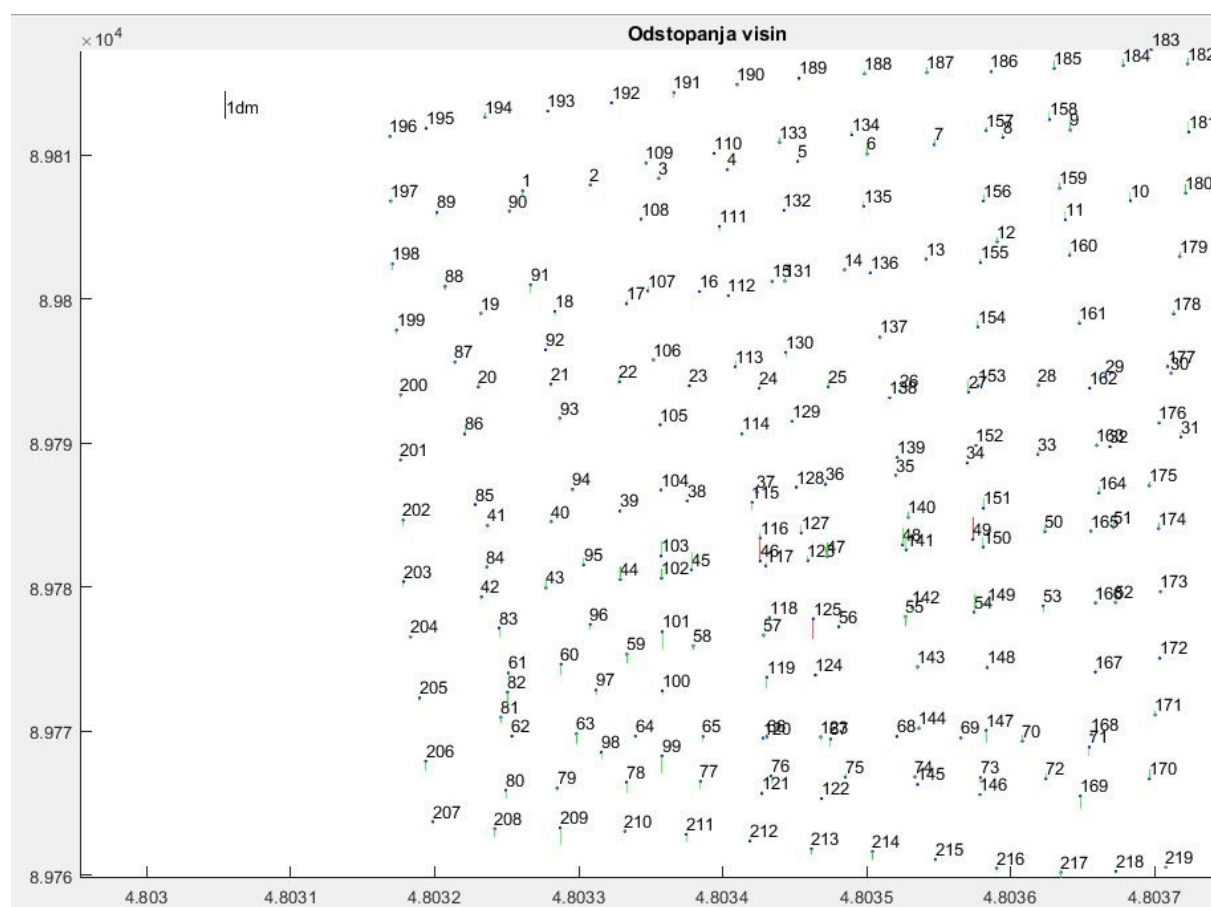
Slika 33: Histogram porazdelitve višinskih razlik za 40p80v.

Preglednica 19: Rezultati robustne statistike točnosti izdelanega DMR za 40p80v.

40p80v	
STATISTIČNE KOLIČINE	VREDNOST
Mediana	0,002 m
NMAD	0,020 m
$Q_{[h]}(0,95)$	0,021 m
$Q_{[h]}(0,683)$	0,050 m



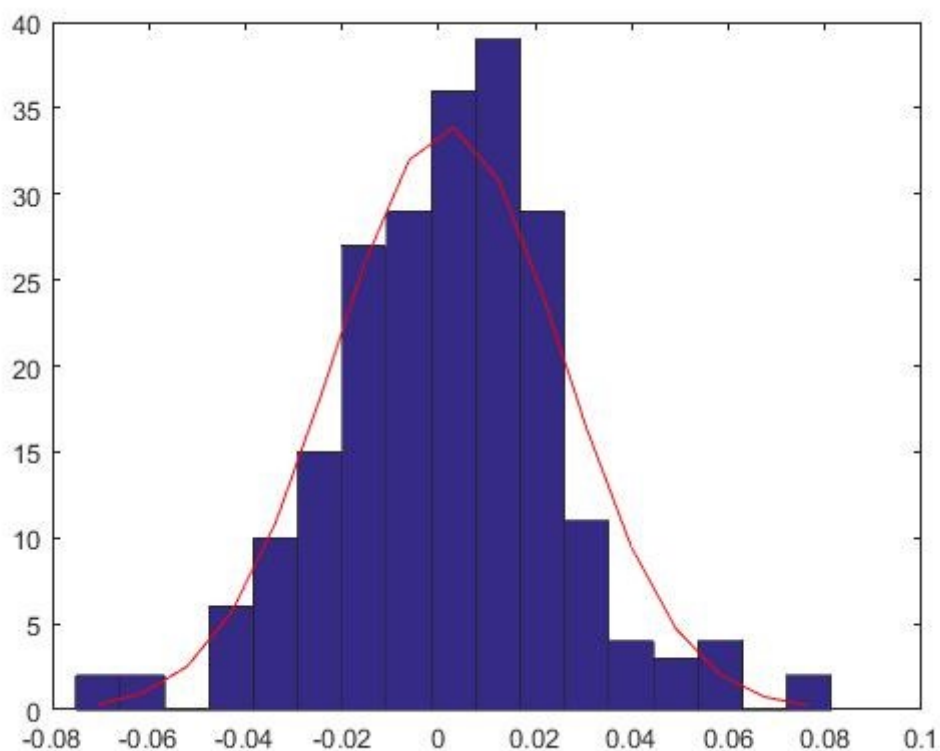
Slika 34: Prikaz kvantilov višinskih razlik za 40p80v.



Slika 35: Prikaz razporeditve terensko določenih točk in višinskih razlik med detajlnimi točkami in točkami, interpoliranimi iz izdelanega DMR za 40p80v.

Preglednica 20: Rezultati statistične analize višinske točnosti za 40pv80pv.

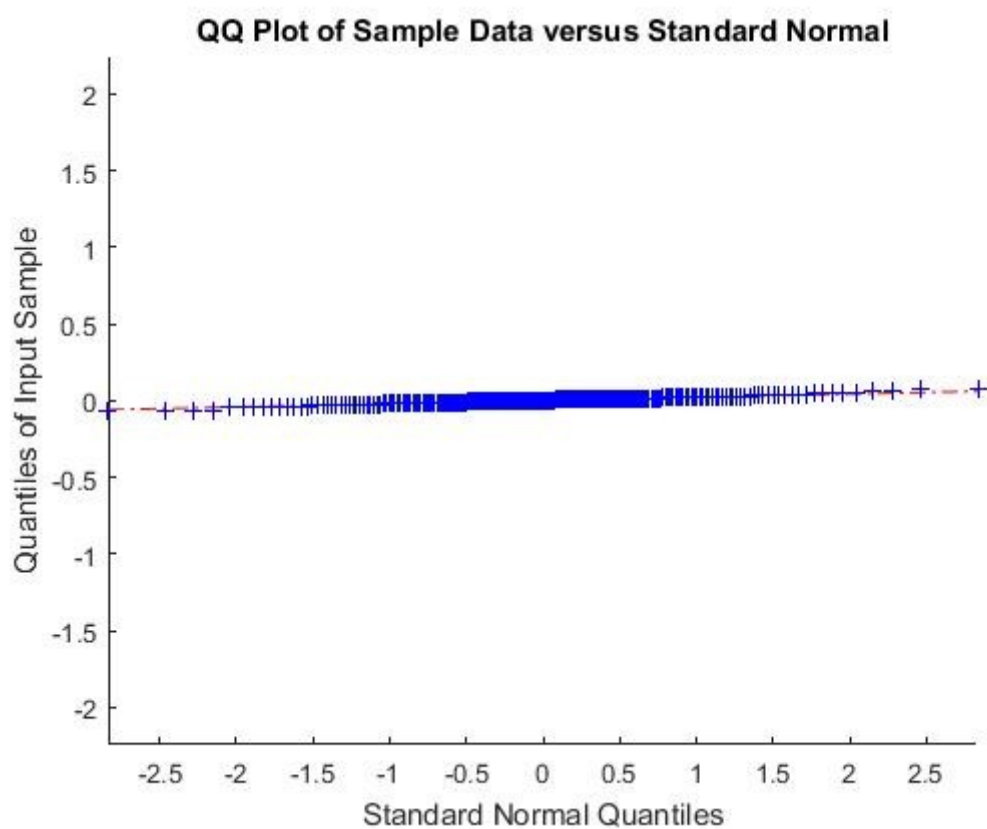
40pv80pv	
STATISTIČNE KOLIČINE	VREDNOST
Št. iteracij	1
Št. grobih pogreškov	3
μ	0,001 m
s	0,023 m
RMSE	0,023 m
95 % interval zaupanja za μ	$[-0,002 \text{ m} < \mu < 0,004 \text{ m}]$
95 % interval zaupanja za σ	$[0,021 \text{ m} < \sigma < 0,025 \text{ m}]$



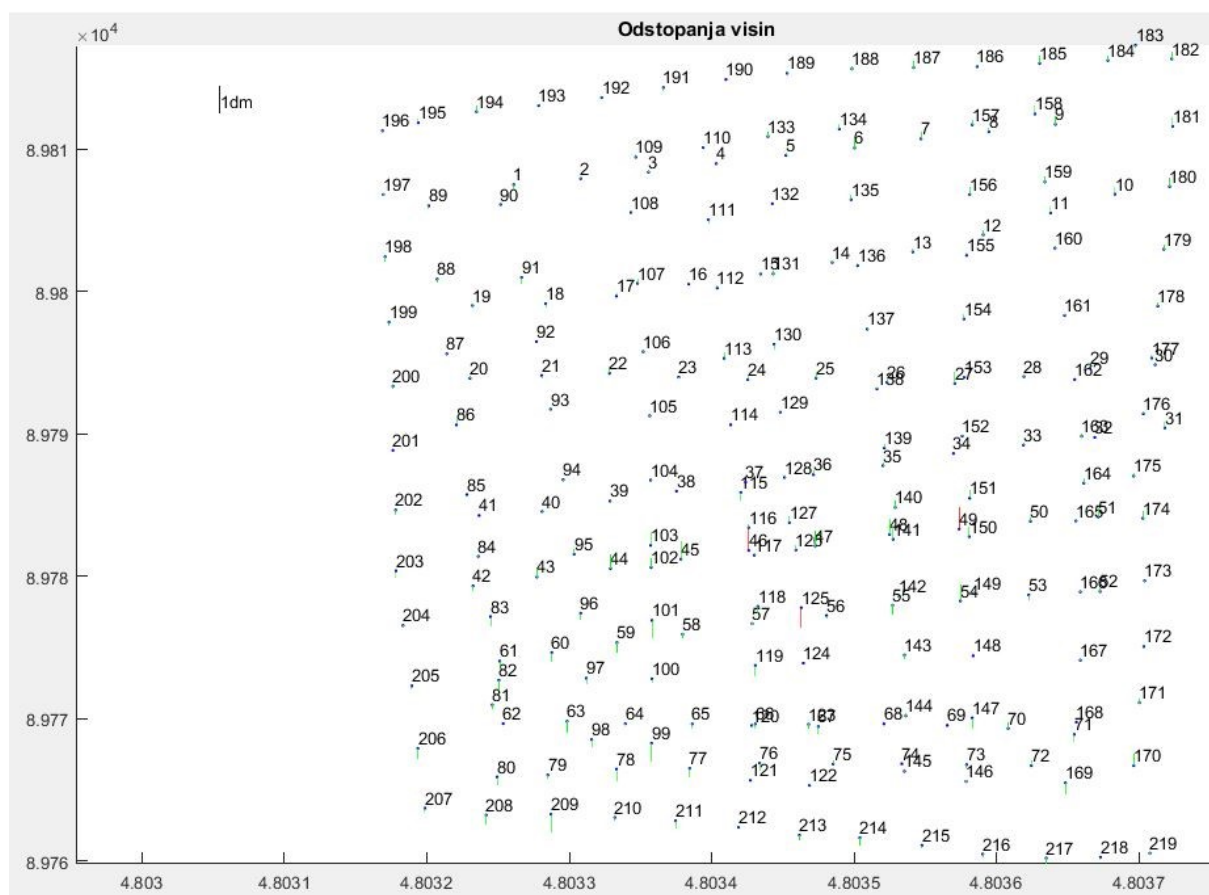
Slika 36: Histogram porazdelitve višinskih razlik za 40pv80pv.

Preglednica 21: Rezultati robustne statistike točnosti izdelanega DMR za 40pv80pv.

40pv80pv	
STATISTIČNE KOLIČINE	VREDNOST
Mediana	0,004 m
NMAD	0,021 m
$Q_{[h]}(0,95)$	0,022 m
$Q_{[h]}(0,683)$	0,048 m



Slika 37: Prikaz kvantilov višinskih razlik za 40pv80pv.



Slika 38: Prikaz razporeditve terensko določenih točk in višinskih razlik med detajlnimi točkami in točkami, interpoliranimi iz izdelanega DMR za 40pv80pv.

Preglednica 22: Glavne ocene višinske točnosti izdelanega DMR

Primer	μ	s	RMSE	Mediana	NMAD
40p	0 m	0,021 m	0,021 m	0 m	0,019 m
40pv	0,001 m	0,021 m	0,021 m	0,001 m	0,019 m
80p	-0,005 m	0,022 m	0,023 m	0,005 m	0,019 m
80pv	-0,005 m	0,022 m	0,023 m	-0,006 m	0,019 m
40p80v	0,001 m	0,022 m	0,022 m	0,002 m	0,020 m
40pv80pv	0,001 m	0,023 m	0,023 m	0,004 m	0,021 m

V preglednici 22 so zbrane glavne ocene višinske točnosti izdelanega DMR. Rezultati so zelo podobni, saj je med njimi le nekaj milimetraska razlika.

Najboljši rezultat glede na vse primerjane ocene višinske točnosti smo dobili pri primeru 40p, kjer je vrednost μ 0 m, standardna deviacija vzorca 0,021 m, mediana 0 m in NMAD 0,019 m. Menimo, da je to posledica relativno nizke višine leta (40 m). Na fotografijah so pri tej višini dobro vidni detajli terena in tarče, zato smo lahko lažje in bolj natančno izmerili oslonilne točke na fotografijah in dobili boljše rezultate.

Najslabši rezultat smo dobili pri primeru 80pv, kjer je vrednost μ $-0,005$ m, standardna deviacija vzorca $0,022$ m, mediana $-0,006$ m in NMAD $0,019$ m. Pri tem primeru je bila višina leta 80 m. Pri povečavi fotografije, ko smo merili oslonilne točke na fotografijah, se je poslabšala ločljivost in smo težje določili sredino tarče. Prav tako slabša ločljivost fotografij vpliva na manj kakovostno določitev identičnih točk na fotografijah, kar posledično pomeni slabše izdelane redke in goste oblake točk ter slabše izdelan DMR.

Pričakovali smo, da bodo razlike med rezultati večje pri primerih, kjer so fotografije zajete na 40 m višine, in pri primerih s fotografijami, zajetimi na višini 80 m. Prav tako smo pričakovali, da bomo pri primerih s fotografijami, zajetimi v prečni in vzdolžni smeri, zaradi terena, posnetega z več strani, dobili boljše rezultate kot pri primerih, ki imajo samo eno smer zajema, vendar iz dobljenih rezultatov ne moremo trditi, ali smer leta in kombinacija več smeri vplivata na natančnost.

5. ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo analizirali in ocenili točnost višin DMR, izdelanega iz aeroposnetkov, zajetih z letalnikom DJI Phantom 4 Pro. V prvem delu diplomske naloge smo predstavili način določitve devetih oslonilnih točk in šestih kontrolnih točk s hitro statično metodo in način zajema detajlnih točk s kombinirano metodo GNSS in terestrične metode izmere. Na ta način smo določili koordinate 219 detajlnih točk terena. Nato smo predstavili način zajema fotografij z letalnikom DJI Phantom 4 Pro, s katerim smo zajeli 266 fotografij na višini 40 m in 80 m, v smeri prečno in vzdolžno glede na teren. Fotografije smo razdelili v šest fotogrametričnih blokov, iz katerih smo izdelali šest digitalnih modelov reliefa. V drugem delu diplomske naloge smo opisali postopek obdelav fotografij, primerjali višine detajlnih točk, posnetih z elektronskim tahimetrom, z višinami, interpoliranimi iz izdelanih DMR. Na koncu smo predstavili dobljene rezultate statistične analize višinske točnosti z oceno srednje vrednosti razlik v višinah, s standardnim odklonom vzorca in korenom srednjega kvadratnega pogreška, ter robustne statistike točnosti izdelanega DMR z mediano, normalizirano mediano in kvantilom absolutnih vrednosti. Dobljene višinske točnosti DMR so zelo podobne. Najboljši rezultat smo dobili pri primeru 40p, najslabšega pa pri primeru 80pv. Ocenjujemo, da je pri primeru 80pv za slabo točnost kriva višina leta, saj so na zajetih fotografijah slabše vidni detajli slike in smo težje in manj natančno izmerili oslonilne točke na fotografijah. Glede na dobljene rezultate srednje vrednosti višinskih razlik in mediane lahko za obravnavane primere fotografiranja trdimo, da je izdelani DMR-ji odstopajo od pravih vrednosti do 1 cm. Glede na rezultate RMSE, in NMAD pa lahko zaključimo, da je višinska točnost približno 2 cm, kar je zadovoljivo za večino geodetskih storitev, kjer je zahtevana nekaj centimetrska natančnost določitve položaja.

V diplomski nalogi smo pokazali, da lahko tudi s cenovno ugodnim letalnikom dobimo zadovoljive rezultate za nadaljnjo uporabo v določenih geodetskih nalogah, ki so opredeljene z natančnostjo določitve koordinat na nekaj centimetrov.

Prednost uporabe letalnikov vidimo pri zajemu velikega števila točk, ki jih težko zajamemo s klasičnimi geodetskimi metodami. Prav tako lahko različni izdelki, kot sta ortofoto in DMR, služijo kot podlaga številnim geodetskim izdelkom, kot sta geodetski načrt ali zemljiško katastrski prikaz. S prikazi je namreč laikom lažje razložiti ali interpretirati terensko situacijo na izbranem območju.

VIRI

DJI. 2018. Lastnosti letalnika DJI Phantom 4 Pro

<https://www.dji.com/si/phantom-4-pro/info>

(Pridobljeno 16. 11. 2018.)

DJI. 2018. Phantom 4 Pro

<https://www.dji.com/phantom-4-pro>

(Pridobljeno 16. 11. 2018.)

Geoservis. 2018. Leica Viva GS15

<http://www.geoservis.si/produkti/35-leica-viva-gnss/22-leica-viva-gs15-gnss>

(Pridobljeno 16. 11. 2018.)

Javad. 2018. Javad Triumph-LS

<https://www.javad.com/jgnss/products/receivers/triumph-ls.html>

(Pridobljeno 16. 11. 2018.)

Manualsdir. 2006. Leica TPS 1200

<http://www.manualsdir.com/manuals/164878/leica-tps1200.html>

(Pridobljeno 16. 11. 2018.)

Šket, B. 2017. GNSS-izmera za oceno višinske točnosti digitalnega modela reliefa na območju nadvoza Dolgi most. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba B. Šket): str. 12–15

<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=96500> (Pridobljeno 24. 9. 2018.)

Turčič, M. 2017. Izdelava 3D modela gradu Smlednik iz posnetkov brezpilotnega letalnika. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Turčič).

<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=97610> (Pridobljeno 24. 9. 2018.)

Vendramin, A. 2018. Vpliv natančnosti koordinat oslonilnih točk na fotogrametrične izdelke. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Vendramin).

<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=103317> (Pridobljeno 24. 9. 2018.)