

Ing. BRANKO MAKAROVIČ, Institut za geod. i fotog. FAGG — Ljubljana

PRIMERI GEODETSKIH MERENJA POMERANJA I DEFORMACIJA OBJEKATA I PRIMENA FOTOGRAMETRIJE U INŽINJERSTVU*

UVOD

Cilj ovog članka je da prikaže više značajnih praktičnih radova i neke osnove razvojne delatnosti u zadnjim godinama na Geodetskom odseku FAGG — Univerziteta, Instituta za Geodeziju i fotogrametriju (IGF) i Zavoda za ispitivanje materijala i konstrukcije (ZRMK) u Ljubljani. Materijal će radi različitog značaja biti obrađen u dva dela.

I PRIMERI GEODETSKIH MERENJA, POMERANJA I DEFORMACIJA

Osnovna zamisao, koja nas je vodila kod projektiranja odgovarajućih sistema za opažanje i metode rada, bila je da se postigne potrebna tačnost najkraćim i najekonomičnijim postupkom. Obzirom na potrebnu tačnost opažanja pokazalo se da investitori nemaju jasne predstave i često potavljaju neosnovane zahteve. Za interpolaciju vektorske slike pomeranja značajna je relativna tačnost $\Delta p : p$, gdje je p pomeranje tačke objekta. Za tačke, gdje nastaju veća pomeranja, dozvoljena su takođe veća odstupanja; to omogućuje uprošćenje opažanja. Uopšte treba težiti za tim da je $\Delta p : p \leq 1 : 10$. Teži su slučajevi gde nastaju mala pomeranja, pa se može dogoditi da greške opažanja imaju veći iznos nego li sama pomeranja. Stepenn potrebne tačnosti određuje značaj objekta i nastupajuće sile koje prouzrokuju pomeranja ili deformacije. Razumljivo je, da sa zahtevima ne možemo ići iznad krajnjih granica moguće tačnosti $1 : 250000$. Ovaj razlomak pokazuje odnos između greške pomeranja i opažane daljine ($p : d$).

Geodetski način određivanja prostornih deformacija i pomeranja je sa odgovarajućom analizom tačnosti obrađen u drugom referatu**, zato

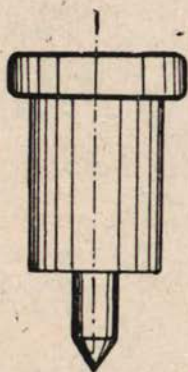
* Referat na Savetovanju o primenjenoj geodeziji Sarajevo 23.—25. III 1961.

** Makarovič: Metoda simultanog određivanja pomeranja tačaka za opažanje i signalnih tačaka kod određivanja deformacija geodetskim metodama.

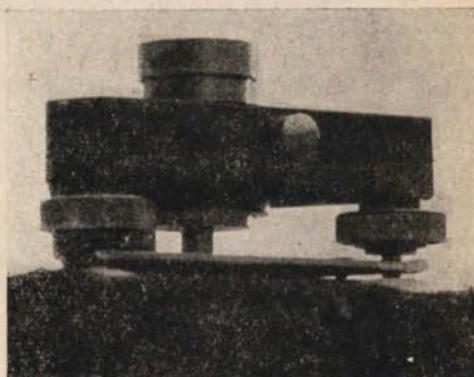
neće biti predmet ovog izlaganja. Isto tako neće se obrađivati sleganje objekata i okolnih površina s uobičajenim periodičnim niveliranjem karakterističnih tačaka.

Težište ovog izlaganja je određivanje bočnih pomeranja objekata na osnovu paralaktičnih metoda, koja je našla svoju primenu naročito kod objekata duž komunikacija.

Zahtevi za opažanje pomeranja i deformacija javljaju se pretežno onda, kada na objektu nastanu određene anomalije — najčešće pukotine. Zato je rok vrlo kratak a neugodna posledica toga je nedovoljna stabilnost stubova za opažanja. Ukoliko ta nestabilnost nije eliminirana radnim postupkom, treba je ustanoviti i uzeti u obzir pri računanju. Među raspoloživim instrumentima najbolje se pokazao teodolit Zeiss Theo 010. Teškoća je bila u tačnom centriranju instrumenta na stabilnim stubovima za opažanje. Fabrici VEBC Zeiss-Jena predložili smo izradu odgovarajućeg uređaja za centriranje. Za nekoliko meseci dostavljena nam je skica sa potrebnim merama, tako da smo mogli u sopstvenoj radionici (IGF) izraditi odgovarajući centrirni valjak (sl. 1), koji se postavlja u tronožac instrumenta. U glavi stuba ugrađena je metalna ploča sa malom rupicom u sredini (1—5 mm). Način kako se vrši centriranje vidi se iz sl. 2. Zagarantovana je tačnost od 0,1 mm.



Sl. 1

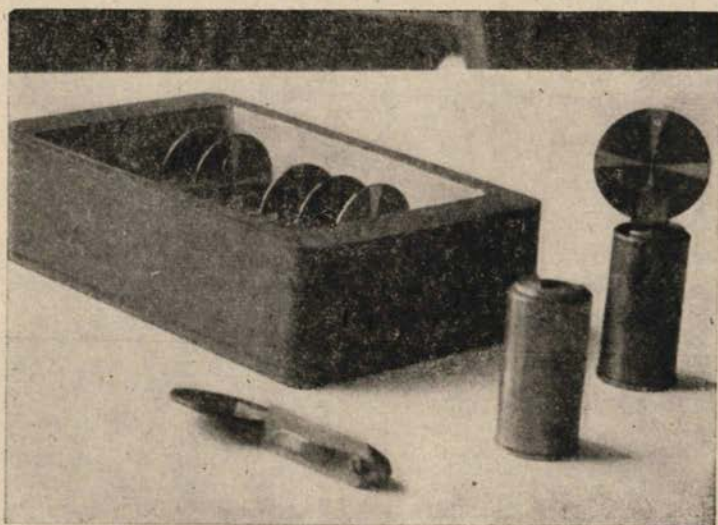


Sl. 2

Posebna pažnja bila je posvećena preciznim signalnim značkama. Kod toga se postavlja zahtev, da one moraju biti ravne (ne gravirane) i nepromenljive pod uticajem atmosferskih prilika za razdoblje od 10—15 godina. Nakon dužeg ispitivanja u IGF pokazalo se da je najzgodniji oblik kako ga prikazuje sl. 3. Kod ugrađivanja ne možemo ih tačno orijentirati po simetrali svetlosnih snopova u horizontalnom odn vertikalnom smislu, osim toga se i opažanja ne vrše upravno na ravnine značaka. Zato se ne podudaraju simetrale svetlosnih snopova sa končanicom durbin, pa je potrebno da se postigne jednakost simetričnih likova belih polja značaka, koje deli končanica. Veličina značke iznosi 40 mm za rasto-

janja od 15 do 50 m. Nacrtna je bila značka u desetostrukoj veličini (40 sm), a zatim smo je fotografirali na film u desetostrukom smanjenju. Sa filmskog negativa prenesena je ova značka na elaksirane aluminijske kružne pločice posebnim fotokemiskim postupom. Nakon razvijanja ostao je na aluminijskoj podlozi tamno plavo-beli crtež, koji smo zaštitili providnim lakom.

Te značke se na nepristupačnim mestima neposredno ugrade u objekt. Na pristupačnim mestima izložene su uništenju. Kod ZRMK izrađena je serija prenosnih značaka. Na opažana mesta ugrade se odgovarajuća ležišta, koje možemo zatvarati poklopcem; svakom ležištu pripada određena prenosna značka. Zato su numerisane i značke i ležišta. Značke imaju prizmatičke nastavke sa perajama za tačno postavljanje u ležišta (sl. 3). Tačnost postavljanja znački je zagantovana sa 0,01—0,02 mm.



Sl. 3

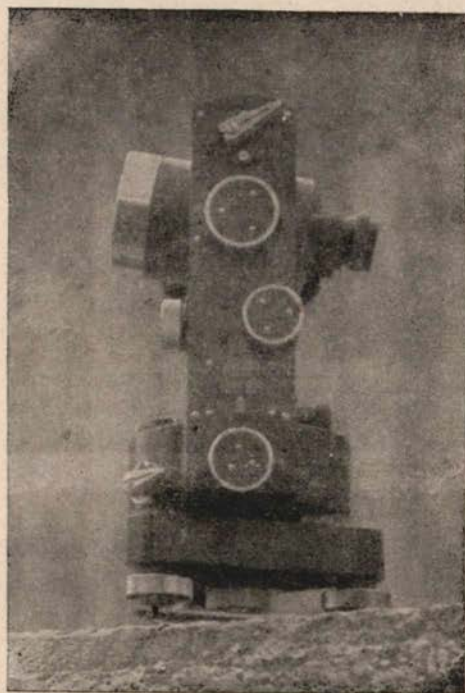
Stubovi za opažanje treba da pored stabilnosti omoguće još i ugodnost pri opažanju; zato njihova visina treba da iznosi 1,30—1,40 m. Operator treba da ima postolje postavljeno na kolcima oko stuba, tako da ne hoda neposredno po zemlji. Treba nastojati za takvim vremenskim rasporedom opažanja, da se između njih može pretpostaviti približno linearni tok pomeranja. Iz brojnih primera je poznato, da vremenski tok pomeranja nije linearan, već zavisi od delovanja sila, koje ih uzrokuju. Zato je u granicama mogućnosti potrebno prethodno proučiti delovanje tih sila, što je doduše svojstveno za svaki objekt, međutim ipak možemo izuzeti srednje slučajeve, za koje važe iste zakonitosti (na pr. povećano opterećenje, jesenske kiše i smrzavanje). Poznati su i takvi slučajevi gde su nastala pomeranja u određenim godišnjim dobima. Zato je umesno

rasporediti opažanja tako da su što češća u doba pomeranja, a između jedne i druge serije opažanja mogu intervali biti duži.

U slučaju klizanja potrebna je stalna kontrola, a isto tako i u svim drugim kritičnim slučajevima.

Pokazalo se da je vrlo korisno saradivati sa seizmološkom službom, jer usled zemljotresa nastupaju skokovi u pomeranjima.

Tačnost opažanja zavisi u velikoj meri od spoljnih prilika; unutrašnja tačnost savremenih instrumenata je srazmerno velika. Isto tako su i lične greške izvežbanih operatora neznatne. Glavni izvori grešaka su atmosferske pojave — naročito posledice sunčanog zračenja. Noćna opažanja omogućuju osetno tačnije rezultate, isto tako je i opažanje znatno brže.



Sl. 4

Neugodne smetnje za vreme opažanja mogu prouzrokovati nedovoljna stabilnost stubova za opažanje. To se naročito događa prilikom smrzavanja i otapljanja gornjih slojeva zemlje, na taj način može doći do uvijanja i pomeranja stubova. Nastale pogreške mogu se sigurno ukloniti prikladnom metodom merenja.

Opazanja se mogu početi tek kada se osuši gips kojim je utvrđen teodolit na stubu, jer za vreme sušenja nastaju osetna pomeranja instrumenta. Između merenja je (radi kasnijih studiranja i eventualnih redukcija) potrebno registrirati temperaturu.

Opazanja teodolitom Theo 010 (sl. 4) pokazala su se vrlo pogodna u pogledu tačnosti i praktičnosti. U praktičnom pogledu ima prednost radi malih dimenzija i težine, zamene vizirne naprave kolimatorom i mogućnost rada sa rukavicama. Kod povoljnih vanjskih prilika najveće razlike između opazanja na istu tačku iznosile su do 2".

Radi eventualnih grešaka horizontalnog kruga i optičkog mikrometra preporučuje se da se opazanja vrše uvek na istim mestima. Na taj način će te greške biti sadržane u svim sledećim opazanjima, te će se eliminirati kod računanja razlika pravaca, ili uglova. Između sukcesivnih opazanja menjaju se pravci najčešće za sekundu, u retkim slučajevima za minutne iznose. Zato je umesno očitavati stepene, minute i sekunde samo za prvi polugirus, u sledećim pak samo sekunde odn. još minute ako se menjaju. Na taj način možemo unekoliko ubrzati opazanja.

Tačnost u određivanju dužina između stanice i signalnih značaka, ne utiče bitno na tačnost određivanja pomeranja, zato se zadovoljavamo njihovim približnim određivanjem (npr. tahimetrijski).

Paralaktična metoda određivanja bočnih pomeranja

Za objekte na komunikacijama značajno je, da nastupaju pretežno jednostrana pomeranja npr. kod podpornih zidova bočna i vertikalna, a kod mostova pak pretežno vertikalna pomeranja.



Sl. 5

U većini slučajeva se za određivanje pomeranja, neki će biti kasnije detaljno obrađeni, najboljom pokazala paralaktična metoda. Njen je princip u sledećem:

Stub za opazanje A treba postaviti približno u produžetku glavne ravnine objekta (sl. 5). Rastojanje između stuba i objekta neka bude što manje, ali stub mora biti sigurno izvan zone pomeranja. Na suprotnoj strani objekta treba potražiti na većoj udaljenosti stabilno mesto za ugrađivanje osnovne kontrolne značke K_A . Radi kontrole i dvostrukog nezavisnog određivanja pomeranja preporuča se da se u odnosu na objekat postavi približno simetrično još jedan stub za opazanje B, a također i pripadajuća kontrolna značka K_B .

Eventualnu nestabilnost stuba za opazanje treba uzimati u obzir. Na tačnost opazanja utiče praktično samo poprečna komponenta pomeranja stuba ili netačnog centriranja instrumenta. To se može odrediti na taj način da se postavi u blizini stuba — u produžetku pravca na osnovnu kontrolnu tačku K - još i pomoćna kontrolna tačka k .

Određivanje bočnih pomeranja zasniva se na računu razlika paralaktičnih uglova za tačke objekta između periodičnih opazanja. Iz tih

razlika i približnih dužina od stanice određujemo iznos bočnih pomeranja po jednačini:

$$p_i = \frac{\Delta \alpha_i}{\varrho} d_i$$

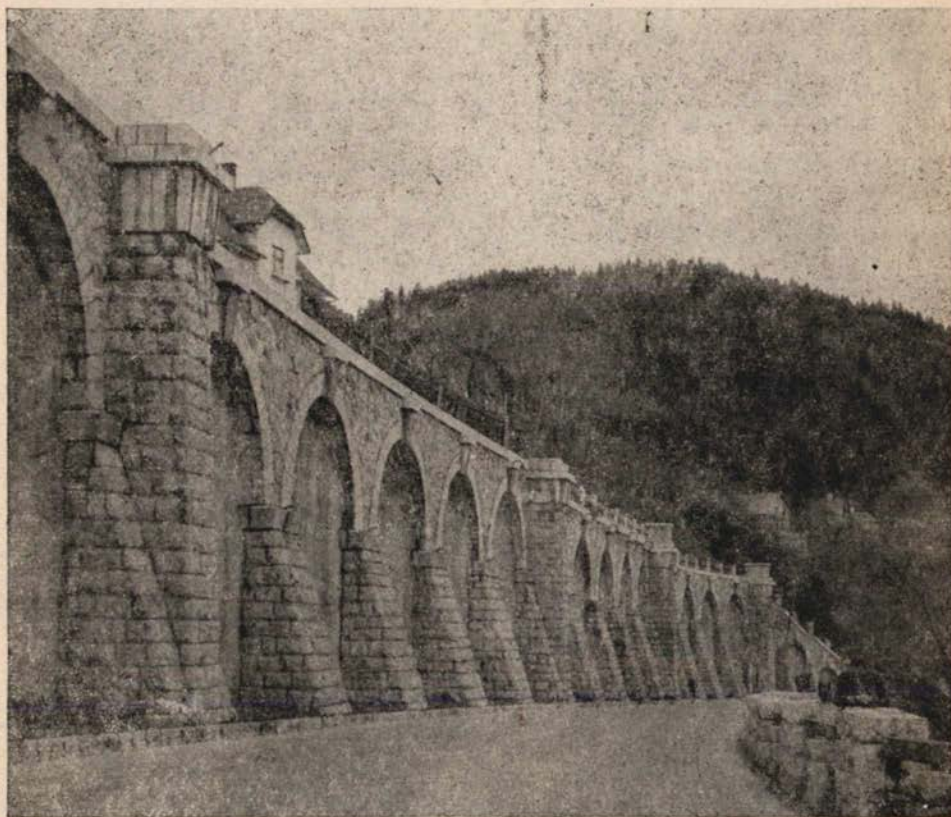
Račun možemo izvršiti sa dovoljnom tačnošću pomoću logaritmičkog računala. Ova pomeranja — razumljivo — nanašaju se uspravno na opažani pravac.

U daljnjem izlaganju biće prikazano nekoliko primera određivanja pomeranja paralaktičnom metodom.

1. Podporni zid u Kranju.

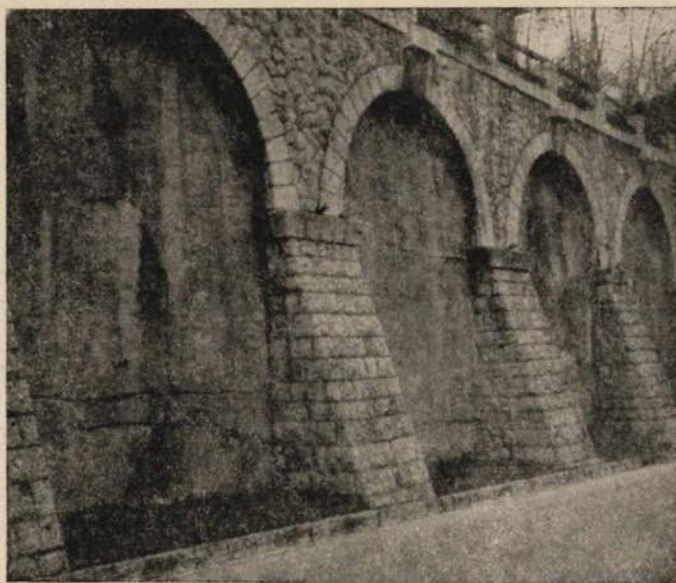
Slika 6 prikazuje objekt sa istočne strane. Zid je utemeljen na konglomeratnoj podlozi. U toku tridesetak godina otvorile su se poprečne pukotine do 5 cm široke sl. 7.

Po mišljenju geomehaničara pukotine su nastale radi pretpostavljenog sleganja kolnika zajedno s temeljima zida.



Sl. 6

Po kruni ugroženog odseka zida raspoređene su signalne značke, a u temelju reperi. Bočna pomeranja zida opažana su paralaktičnom meto-



Sl. 7

dom (sl. 8), dok vertikalna pomeranja repera preciznim nivelmanom. U toku dvogodišnjeg opažanja pokazalo se da su temelji absolutno stabilni; nastupaju samo manja bočna pomeranja na kruni zida. Godišnje se tačke pomere do 4 mm i to u kasnoj jeseni i zimi, dok leti zid miruje. Izuzetno Opažanja su se vršila mesečno. Pored geodetskih merenja vrši ZRMK je bilo manje pomeranje zida pri zemljotresu sa epicentrom pod Stolom. takođe talna merenja pukotina.



Sl. 8

Tačnost pomeranja može se oceniti nezavisnim određivanjem sa dve stanice A i B. Tačnost je prosečno iznosila od 0,2—0,3 mm. Poprečna daljina iznosila je 45 m. Opažanja nisu se vršila po principu merenja paralaktičnih uglova samo zato jer je ta metoda spora; pošto su stubovi za opažanja stabilni, opažanja su vršena girusnom metodom (u 4 girusa).

2. Nadvožnjak kod Žalca u Savinjskoj dolini.

Na raskršću autoputa sa železničkom prugom pod uglom prib. 15° je statički neobičan putni nadvožnjak sl. 9 na kojem su nastale puko-

tine. Usled nesimetričnog rasporeda zemaljske mase a takođe i nesimetričnog dinamičnog opterećenja pojavilo se pitanje eventualne rotacije

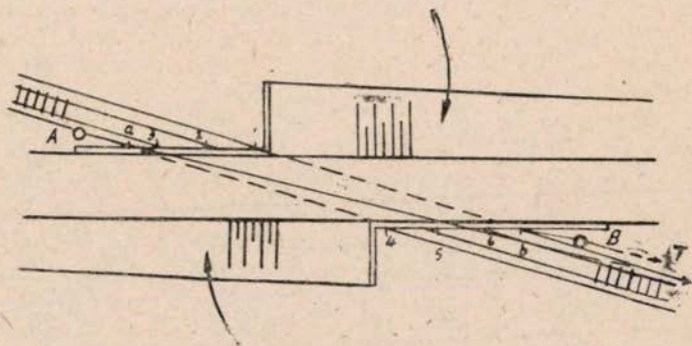


Sl. 9

krutog tijela tj. dotičnog objekta (sl. 10).* Usled nastalih pukotina bilo je potrebno ustanoviti relativna pomeranja između tačaka na portalima.

Primenjen je bio sledeći način određivanja pomeranja:

Tačke A i B predstavljaju stanice za opažanja. T je neka udaljena fiksna tačka, koja služi kao osnovni kontrolni smer. Tačke sa kojih se



Sl. 10

* U originalu »pojaviło opraaanje morebitnega togega vrtenja objekta«; togo vrtenje = rotacija krutog tijela oko neke osi u prostoru bez promjene dimenzija. Gore slobodni prevod (op. ur.).

vrši opažanje A i B nalaze se približno u produžetku oba pročelja (portala) tunela, ali tako da su, sem signalnih značaka pripadajućih otvora, još vidljive tačke a i b na krajevima tunela i razumljivo, osnovna tačka T. Sa tačke A se opažaju paralaktički uglovi za sve tačke severnog otvora (pročelja), i tačke a i b, dok sa tačke B južni otvor (pročelje i tačke a i b).

Tačke A i B su neposredno uz železničku prugu zato se pomeraju više od 3 mm na mesec. Relativno pomeranje stanica prema objektu sadržano je prividnim pomeranjima stanice. Relativno pomeranje između tačaka na ulaznim (portalima) kao i rotacije krutog objekta određujemo iz razlika prividnih pomeranja opažanih tačaka (p'), zato se eliminišu pomeranja stanica. Prividno pomeranje neke tačke dobijamo iz poznate nam elementarne jednačine:

$$p'_i = \frac{\Delta \alpha_i}{\varrho} d_i$$

Indeks neka označava pripadajuću tačku. To prividno pomeranje sastoji se iz dve komponente: s-tvarnog pomeranja p_i i pomeranja stanice,

$$P_{A(B)} \text{ t. j. : } p'_i = p_i \pm P_{A(B)}$$

Relativna pomeranja odnose se na tačku upoređivanja u našem primeru na tačku a (odn. b). Relativno pomeranje je dakle:

$$\Delta p_i = (P_{A(B)} + p_{a(b)}) - (P_{A(B)} + p_i) = p_{a(b)} - p_i$$

nezavisno od pomeranja stanice.

Rotacija krutog objekta može se odrediti iz razlike pomeranja tačke a i b i udaljenosti između njih ab :

$$\gamma_{(A)} = \frac{p'_a - p'_b}{ab} \cdot \varrho = \frac{\varrho}{ab} [(P_A + p_a) - (P_A + p_b)] = \frac{p_a - p_b}{ab}$$

Analognu jednačinu dobijemo isto i za stanicu B. Takođe i u tom slučaju je određivanje pomeranja nezavisno od pomeranja stanice. Treba paziti da ne nastupi pomeranje u vremenu kada se vrše opažanja. Zato se opažanja rasporede tako da se mogu završiti u međuvremenu kada nema železničkog prometa.

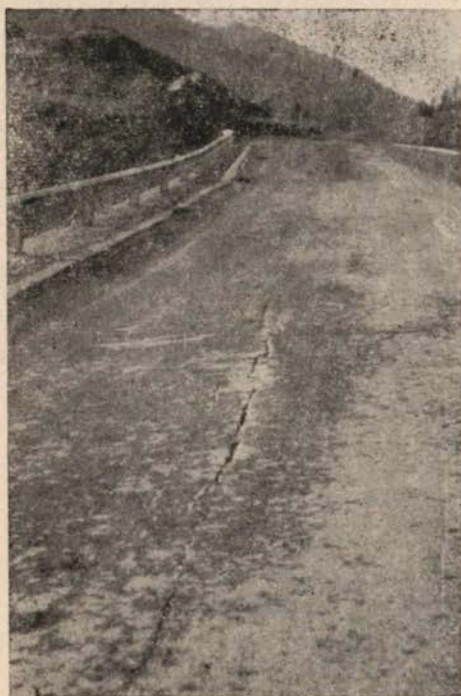
Dosadnja opažanja su pokazala, da nema rotacije krutog tijela objekta, dok su relativna pomeranja minimalna — uglavnom posledica variranja temperature. Takođe merenja pukotina pokazala su istu vrednost. Opažanja krutih pomeranja objekta uporedno samom sebi nisu bila predviđena jer takva pomeranja nisu moguća a nisu ni opasna za objekat. Vertikalna pomeranja kontrolirana su preciznim nivelmanom.

3. Putni podporni zid na Trojanama.

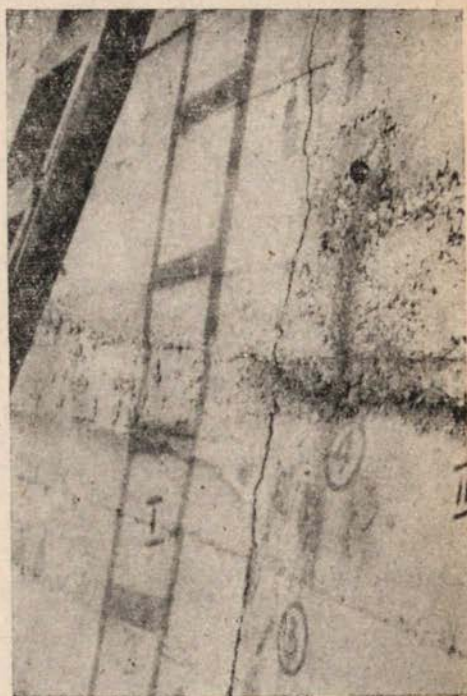
Taj slučaj je posebno važan za značaj geodetskog određivanja pomeranja, a obzirom na kronološki tok događaja zanimljiv.

Trasa novog autoputa prolazi na tom odseku preko strmog škrljastog pokosa; po izjavama geologa to je staro klizište. Stara cesta je prelazila

3—6 m pod novom. Dodatno opterećenje sa nasipom i intenzivne jesenje kiše, koje su raskvasile nasip i pokos, uzrokovala je prvo uzdužne pukotine na cestovnom tijelu (sl. 11) i vertikalnu pukotinu na podpornom zidu. Ova je bila otvorena s donje strane a sužavala se prema gore (sl. 12).



Sl. 11



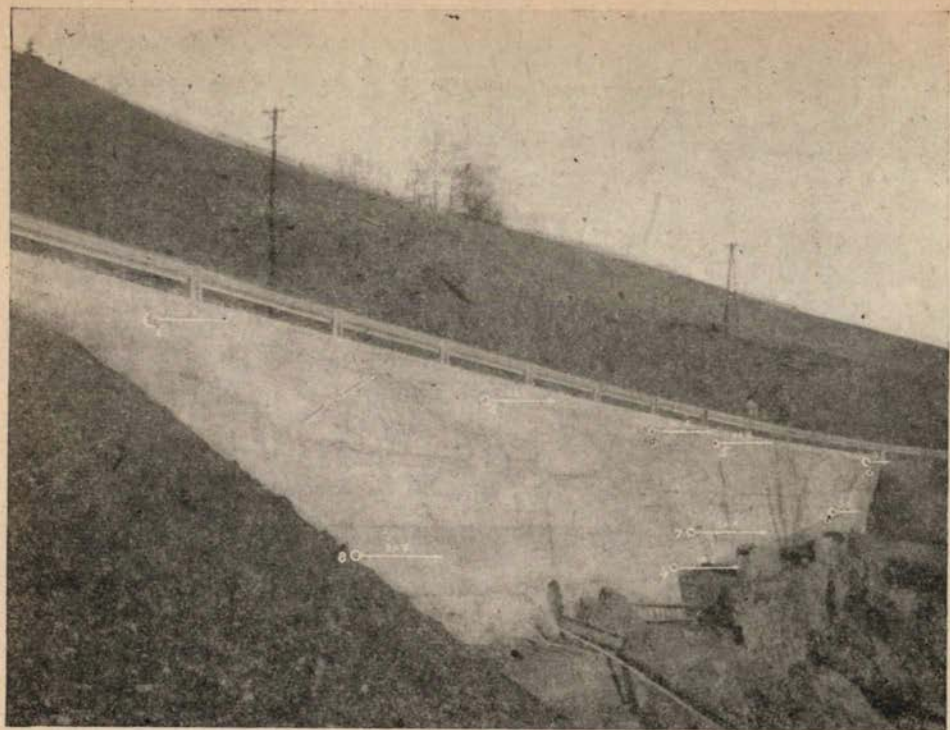
Sl. 12

Merenja sa fleksometrom su pokazala postepena širenja pukotine. To je dovelo do pretpostavke, da je bočni pritisak nasipa najjači uz samu zukotinu. Geodetska merenja su pokazala sasvim drugu sliku. Pukotina je bila posledica sekundarnih gibanja objekta.

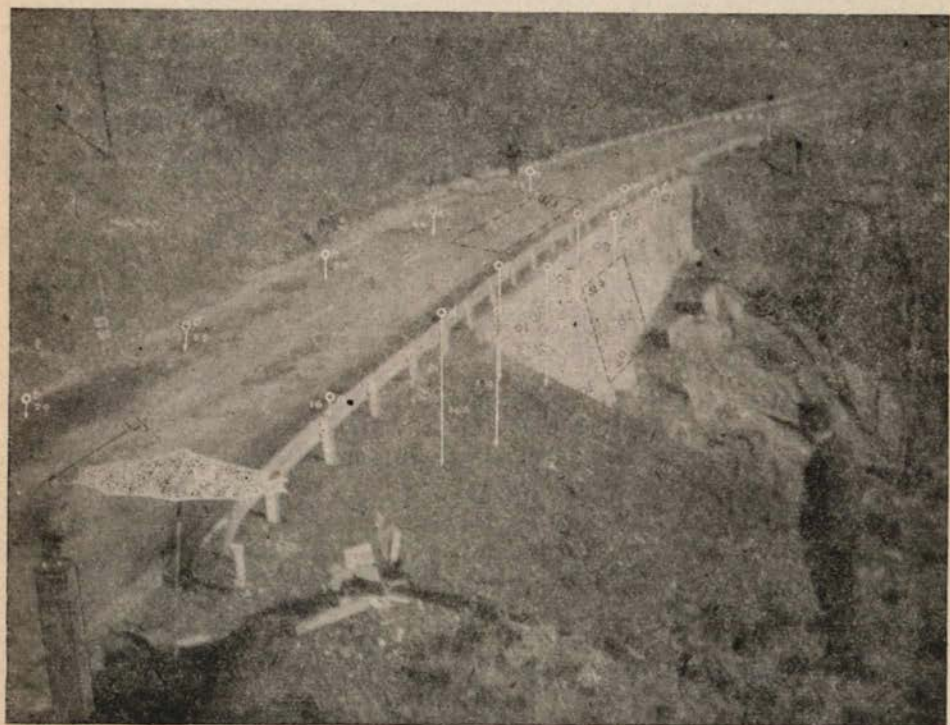
Opažanja bočnih pomeranja zida vršila su se paralaktičnom metodom sa stubova A i B, dok su se vertikalna pomeranja zida i puta određivala preciznim nivelmanom. Osnovne kontrolne značke a i b ugrađene su u suprotno ležeće stubove za opažanje jer nije bilo drugih prikladnih položaja. U iste stubove uzidani su kontrolni reperi z aprecizni nivelman. Stubovi su izvan zone pomeranja na stabilnom tlu.

U podporni zid je na početku bilo uzidano 6 signalnih značaka; kasnije kada se je pojavila još jedna pukotina ugrađene su još tri dodatne (sl. 13). U gornji rub zida zazidana su bila 4 repera, u cestovno tijelo pak 10.

Kod tih merenja prvi put smo upotrebili nove precizne signalne značke i Zeiss-ov valjak za centriranje. Rastojanja od stubova do signal-



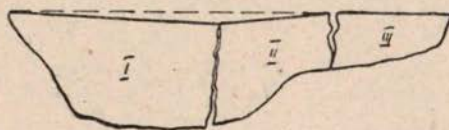
Sl. 13



Sl. 14

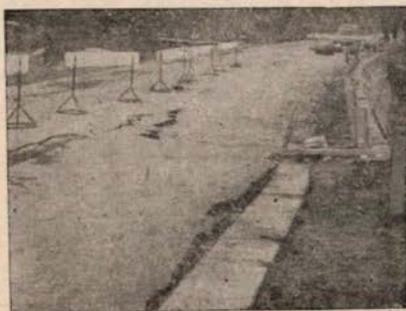
nih značaka izmerili smo tahimetrijski. Objekat smo fotografirali i na uvećanim slikama označili položaje značaka i repera (sl. 13 i 14).

Bočna pomeranja se mogu izračunati odmah nakon opažanja, jednostavno logaritmarom. Za brzi i pregledni prikaz vektorske slike pomeranja (bočnih i vertikalnih) najugodnije je upotrebiti spomenute povećane slike. Prema njima se naprave odgovarajuće oleate pomeranja. Za svako sledeće opažanje napravimo novu oleatu pomeranja i spajamo ih u svesku. Takav način omogućava brz i pregledan prikaz rezultata opažanja. Upotrebom fotopovećanja često možemo da izbegnemo klasičnu metodu snimanja i crtanja objekta; pored toga ima fotografija još i dokumentarnu vrednost.

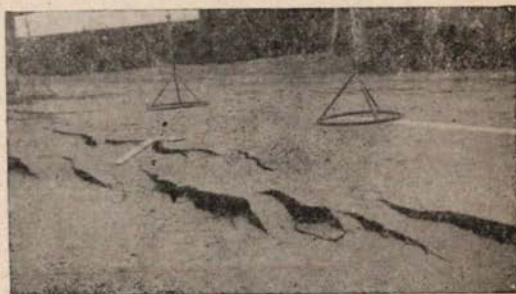


Sl. 15

Već iz rezultata prvih opažanja vidi se prvobitno kruto pomicanje objekta po pokosu na niže. Istočna (desna) strana zida ima stabilnu osnovu temelja, zato su pomeranja tačke 6 i 9 srazmerno mala. Nastale napetosti u zidu su prvo uzrokovale jednu a kasnije drugu pukotinu. Sa primarnim gibanjem zida se može označiti kruto pomicanje i rotacija zida kao celine, sa sekundarnim pak relativna pomeranja tri bloka (sl. 15) (I, II, III) koje stvaraju pukotine. Iz sl. 16a, 16b, 17, 18 i 19



Sl. 16a



Sl. 16b

vidljiv je kronološki postupak događaja. Nakon nove kiše pukotine su se povećale na cestovnom tijelu (16a i 16b), na zidu je nastala i druga pukotina (sl. 17). Sledilo je uređenje privremenog kolovoza sl. 18 i zatim rasterećenje zida sl. 19.

Po mišljenju geomehaničara, da je klizanje možda ponovo u gibanju, razmestili smo u školjku klizanja nad cestom i na ivici privremenog

kolovoza dvanaest tačaka u tri poprečna profila. Stabilizacija i signalizacija tih tačaka vidi se iz sl. 19a. Ove su bile opažane i računane po

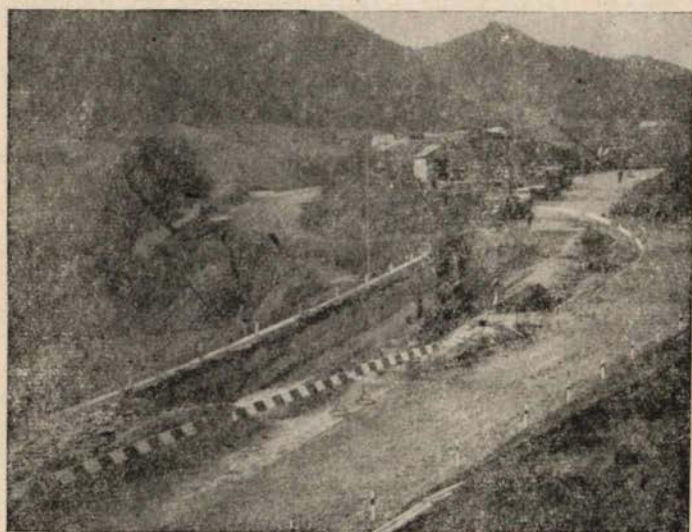


Sl. 17



Sl. 18

diferencijalnim jednačinama za presecanje napred. Ali pri tome nije ustanovljeno pomeranje klizišta.



Sl. 19

Geodetska kontrolna merenja vršili smo više meseci nakon razterećenja, sve do početka gradnje čeličnog mosta koji će služiti za premošćenje kritičnog odseka.



Sl. 19a

Metoda paralaktičkog određivanja pomeranja se u tim i drugim brojnim primerima pokazala vanredno prikladna. Odlikuje se u prilagođavanju terenskim prilikama, brzini, jednostavnosti i tačnosti. Tačnost je iznosila 0,2 mm, u izuzetnim slučajevima tačnost je dotizala do 0,3 mm (na rastojanju od 50 m). Tome je najviše doprinela tačnost pri centrisanju teodolita, precizne signalne značke i povoljne atmosfere prilike za vreme opažanja.

Merenje deformacija horizontalnih nosača i mostova kod probnih i postupnih opterećenja

Zadnjih godina izvršili su IGF i ZRMK brojna merenja vertikalnih deformacija novih i rekonstruiranih starih mostova i raznih nosača u industriji, kod probnih ili postepenih opterećenja.

Kod probnih opterećenja nosnih konstrukcija pričvrstili smo u temelje i karakteristične tačke vertikalna merila sa polu santimentarskom podelom ili posebne transverzalne razmernike. Na svaku od tih podela odn. razmernika bio je usmeren stabilno postavljen teodolit. Pred opterećenjem konstrukcije smo uravnali teodolit na početak podele. Pri opterećenju možemo odjednom očitati pomeranja svih razmernika. Stabilnost teodolita za vreme ispitivanja proveravali smo pomoću libele. Dostignuta je tačnost od 0,2—0,3 mm za udaljenost do 35 m.

U slučajevima gde je konstrukcija dostupna i ne zahteva se očitavanje svih tačaka odjednom, treba upotrebiti precizni nivelman. Ako su nosači visoko nad terenom, moguće je nivelirati sa visećom letvom, npr. na čeličnoj žici ili duguljastoj metalnoj cevi. Na gornjem kraju ima

žica odn. cev prikladno izrađeno obesište, dok na tačkama za opažanje su odgovarajuća ležišta. Viseću letvu prenosimo od tačke do tačke i niveliramo na uobičajeni način. Umesto letve možemo upotrebiti kraće razmernike veće tačnosti sa utegom. Na tačnost dobijenih vertikalnih deformacija ne utiču eventualna horizontalna pomeranja, kao što je to slučaj kod trinožometričnog određivanja vertikalnih deformacija.

Deformaciju nosača možemo određivati isto na jednostavan fotogrametrični način, detaljnije će biti to obrađeno u II delu.

Kod ZRMK izrađeni su u zadnjoj godini i ispitani prototipi naprava za merenje sa napetom žicom (2) i naprava za hidrostatičko niveliranje (3). U razvoju je još i naprava za centriranje sa koordinometrom.

Princip merenja vertikalnih pomeranja sa napetom žicom je sledeći:

Preko objekta nategnemo invarnu žicu na pogodnoj visini. Žica je razapeta između vretena, koja se nalaze na nepokretnoj osnovi i dovoljno je opterećena na krajevima. Napeta žica je nepokretni deo naprave. Pribor za merenje predstavlja vizirni otvor sa lupom, odgovarajućim nosačem, indeksom i razmernikom. Taj pokretni deo može se uravnavati zavrtnjem tako, da postavimo indeks tačno simetrično sa žicom. Nato očitamo položaj indeksa na podeli, koja je utvrđena za objekat.

Pokretni deo naprave za merenje pričvrstimo na mesta za merenje konstrukcije. Možemo je pričvrstiti na zid, ogradu, stativ itd.

Opazanje preko malog vizurnog otvora sa lupom omogućava eliminisanje paralakse koja nastaje radi različite udaljenosti žice i indeksa.

Razlike između čitanja na razmerniku kod različitih opterećenja objekata predstavlja tražena pomeranja.

Laboratorijska probna merenja vršena su kod raspona 10 i 20 m uz silu zatezanja 10 kg. Tačnost je ustanovljena pomoću fleksometra, koji je bio vezan sa pokretnim delom naprave. Da bi se donekle približili prilikama u naravi, namerno su prouzrokovana njihanja žice sa amplitudom do ± 3 mm. Za 20 metarski raspon iznosila je srednja greška jednog čitanja $\pm 0,08$ mm, dok za 10 metara raspona $\pm 0,06$ mm. Kod većih raspona treba računati sa odgovarajuće većim pogreškama.

Prototip je praktično bio upotrebljen kod merenja ugiba mosta na Dravi u Vuhredu, gde je raspon iznosio 45 m. Duvao je slab vetar. Najveće odstupanje od rezultata dobijenih hidrostatičkim niveliranjem iznosilo je 0,2 mm.

Ta naprava u principu nije namenjena za merenje po vetrovitom vremenu (sl. 19e).

Hidrostatično niveliranje važno je kod prenosa visina na velike udaljenosti, gdje ne postoje fiksne tačke — npr. na velikim vodenim površinama, kod objekata sa velikim brojem pregrada, gde nema mesta za uobičajeno niveliranje, za određivanje deformacija kod metoda opterećenja itd.

Prototip te naprave namenjen je za merenje deformacija i pomeranja. Za određivanje vertikalnih pomeranja neke tačke potrebne su dve cevi za merenje, od kojih je jedna na tački za opažanje, druga pak na stabilnoj osnovi izvan zone pomeranja. Obe su međusobno povezane

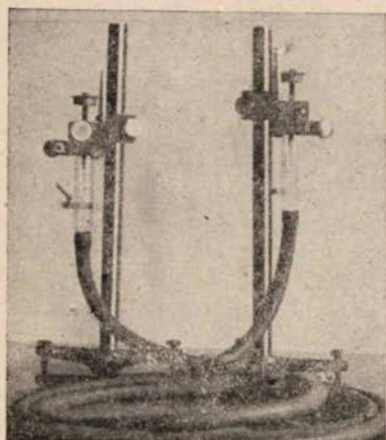
gumenim crevom, koje je ispunjeno tekućinom (dest. voda). Nastalo pomeranje se izračunava po jednačini:

$$d_h = (a_2 - a_1) - (b_2 - b_1)$$

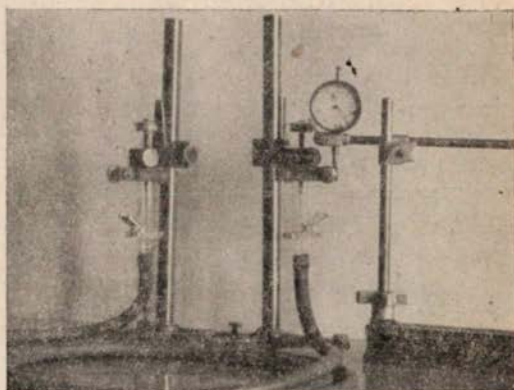
gde je

- a_1 očitavanje na tački koja se pomera (pre pomeranja);
- a_2 očitavanje na tački koja se pomera (po pomeranju);
- b_1 očitavanje na tački koja se ne pomera (pre pomeranja), i
- b_2 očitavanje na tački koja se ne pomera (po pomeranju).

Kod punjenja creva sa tečnošću treba upotrebiti princip natega. Iz cevi mora biti apsolutno istisnut vazduh, tako da se voda pretače nesmetano iz cevke u cevku. Merenja nisu moguća, ako postoje u cevi vazdušni mehurići, jer se nivoi ne izravnavaju na istim visinama. Kada se obe razine u cevkaama osetljivo njišu to je znak da je vazduh istisnut iz creva.



Sl. 19b



Sl. 19c

Merenja treba vršiti pri, što je moguće stalnijoj temperaturi, a gumenom crevo mora mirovati. Pred očitavanjem preporučuje se da se pritiskom na crevo dignu nivo u obe cevi, da se meniskusi uravnavaju pod istim uslovima.

Princip čitanja temelji se na mikrometarskom spuštanju oštrog indeksa na nivo vode. Pri dodiru indeks naglo pritegne vodenu površinu. Opažanje ovog dodira najugodnije je sa donje strane meniska, gde se usled totalnog odraza zrakova pojavi na nivou tamna tačka.

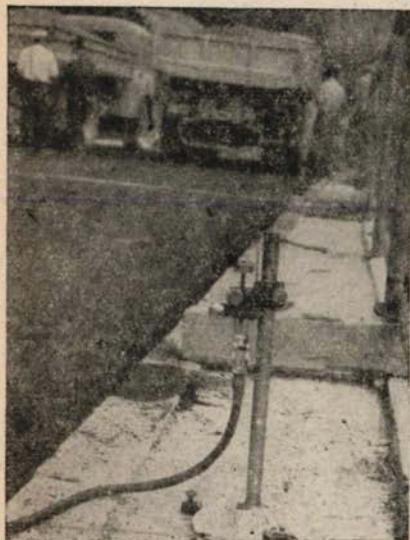
Pre izrade naprave bio je izvršen niz laboratorijskih proba. Uglavnom bile su proučavane dimenzije i oblici staklenih cevi, gumenih creva, tekućina za punjenje i način očitavanja.

Najprikladnije staklene cevi pokazale su se sa unutarnjim promenom 18 mm, a dužine 80 mm. Kod tanjih cevi je oblik meniska manje

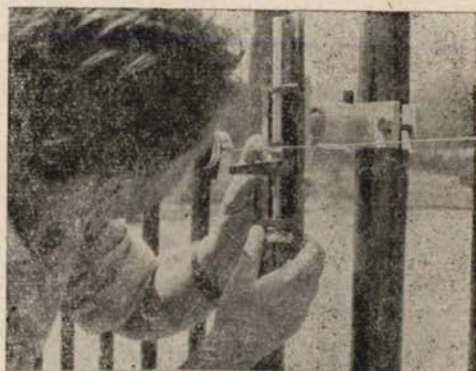
prikladan za očitavanje nivoa, dok se kod širih sporije umiruje razina vode.

Kod određivanja optimalne debljine gumenih cevi za dužine do 50 m pokazalo se da je najzgodniji unutarnji promer 9 mm. Između raznih tekućina najbolje je zadovoljila destilirana voda. Već opisani način čitanja bio je ispitivan na sledeći način (sl. 19c):

Cevi su bile postavljene na stabilnu osnovu. Pomična cev je bila čvrsto povezana sa nastavkom merne ure. Pomoću nje su bili izmereni veštačko prouzrokovana pomeranja cevi na 0,01 mm tačno. Ista pomeranja su bila izmerena na hidrostatički način mikro zavrtnjima u ce-



Sl. 19d



Sl. 19e

vima. Srednja pogreška opažanja određena je iz brojnih opažanja i iznosila je 0,08 mm. Dužina gumenog creva bila je 20 m, temperatura je bila konstantna. Kod iste dužine creva, ali pri različitim temperaturama za pojedine odseke cevi ($t = 17^{\circ}$) bila je dostignuta tačnost opažanja 0,10 mm.

Taj način merenja deformacija bio je primenjen na mostu u Vuhredu (sl. 19d) gde je apsolutno opravdao očekivanja.

II SLUČAJEVI PRIMENE FOTOGRAMETRIJE U INŽENJERSTVU

Sa intenzivnim sveopštim privrednim i tehničkim razvojem dobija fotogrametrija sve veću ulogu u inženjerstvu. Naročito do izražaja dolazi kod proučavanja oblika površine i deformacija. Veliku ugodnost pruža kod istraživanja u građevinarstvu; tačnost zadovoljava mnogim namenama. Fotogrametrički postupci omogućuju uštedu u vremenu i

naporu, opažanja se mogu obnoviti bilo kada, pored toga slike pružaju dopunske informacije.

U daljnjem izlaganju biće izloženi primeri upotrebe fotogrametričkih metoda rada, sa kojima smo se dosada bavili. Druge brojne mogućnosti upotrebe fotogrametrije nećemo na ovom mestu prikazati, jer ih za sada nemožemo podkrepiti sopstvenim iskustvom.

1. Fotogrametričke metode merenja deformacija.

Dobra strana ovog načina je da opažanja vršimo na snimcima i te upoređujemo sa drugim opažanjima. Rezultate dobijamo u kancelariji; celi postupak možemo reproducirati u svakom trenutku. Nije neophodna signalizacija opažanih tačaka, možemo da opažamo sve dobro vidljive tačke. Merenja se uproste kod objekata sa ravnim površinama kao što su npr. razni nosači, okviri, omotači itd.

Razlikujemo dve osnovne metode:

1. Metoda jedne slike,
2. Stereometoda.

Za obe upotrebljavamo sitnozrnaste fotoosetljive ploče i razvijaače. Za metodu jedne slike napravimo u intervalima po jednu fotografiju istog objekta. Pomeranja dobijamo iz razlika između uzastopnih snimaka. Os snimanja pri fotografiranju treba da bude približno upravna na ravninu objekta. Prvu fotografiju napravimo kod stanja nedeformiranog objekta, a sledeće u različitim fazama opterećenja.

Kod restitucije upoređujemo prvu fotografiju sa svim sledećim. Merenja koordinata snimka i paralaksa možemo vršiti pomoću stereokomparatora ili na univerzalnom stereoinstrumentu.

Paralakse merimo sa postavljanjem prostorne markice na tačke stereomodela. Pri merenju deformacija horizontalnih nosača zaokrenemo snimke u okvirima za 90° . Deformirana linija pojavljuje se kao prostorna (dubinska) kriva linija. Na nju postavljamo mernu markicu. Tačke, koje određuju pravu za upoređivanje, odnosno ravninu na koju se odnose deformacije (na pr. na krajevima nosača) moraju biti vidljive. Iz opažanih paralaksa zatim određujemo deformaciju.

Prednosti metode jedne slike jesu:

1. Dovoljna je jedna kamera,
2. Orijehtacija negativa u instrumentu je jednostavna,
3. Određivanje pomeranja u ravnini, paralelno sa slikovnom ravninom jednostavna je, brza i tačna.

Nedostaci te metode su:

1. Odrediti možemo pomeranje u ravnini, paralelno ravnini slike,
2. Spoljnja orijentacija kamere mora ostati nepromenjena za vreme snimanja.

Ove nedostatke možemo odstraniti projektivnom transformacijom koordinata.

Za stereometodu upotrebljavamo dve kamere sa istim optičkim karakteristikama. Snimanje vršimo sa prikladne udaljenosti od objekta, gdje je kod toga spoljna orijentacija kamera poznata. Najčešći je normalni slučaj stereofotogrametrije, gdje su ose snimanja horizontalne i upravne na bazu. Za ovu namenu služe posebne stereokamere, koje su utvrđene na krajevima posebne baze tako, da su ose snimanja paralelne i upravne na bazu. Možemo upotrebiti odvojene kamere, gdje ćemo bazu prilagoditi zahtevanoj tačnosti restitucije i udaljenosti od objekta.

Radi uprošćenja restitucije usmerimo ose snimanja što upravnije na glavnu ravninu objekta. Deformaciju možemo odrediti upoređivanjem stereomodela nedeformiranog i deformiranog objekta. Restituciju tih modela možemo izvršiti analitički na osnovu izmerenih koordinata modela, ili optično-mehanički pomoću univerzalnog stereoinstrumenta. U drugom slučaju vrše se merenja neposredno na rekonstruiranom optičkom modelu; potrebna rastojanja i pravce određujemo iz prostornih koordinata tačaka modela.

Prednosti stereometode:

1. Deformacije možemo odrediti za proizvoljne pravce;
2. Kod simultanog snimanja obema kamerama može se meriti deformacija i objekata koji se pomeraju;
3. Svetlosni uslovi na obema fotografijama stereopara su ista, što utiče povoljno na tačnost restitucije.

Nedostaci stereometode:

1. Zahteva skup pribor i instrumente;
2. Spoljna orijentacija kamera mora biti poznata sa velikom tačnošću (ukoliko ne upotrebimo vežne tačke);
3. Opažanja sadrže instrumentalne greške (kod optično-mehaničnog načina restitucije).

Za određivanje pomeranja u ravnini ili u više paralelnih ravnina prikladnija je metoda jedne slike, dok stereometoda je zgodnija za određivanje prostorskih pomeranja.

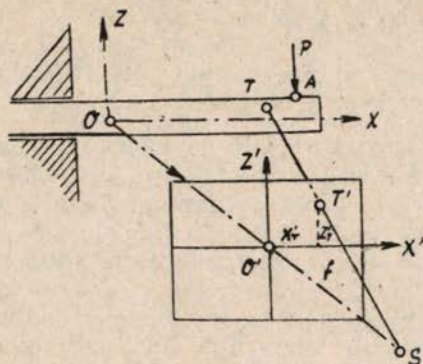
Radi stabilnosti fotokamere kod uzastopnih snimaka na pr. kod postepenih opterećenja nosača, preporučava se upotreba fototeodolita.

Tačnost određivanja pomeranja zavisi od raznih činioca; glavni su razmera i kvalitet snimka, savesnost kod restitucije, a posebno kod stereometode i jednake karakteristike obeju kamera, te razmera baze ($B : Y$).

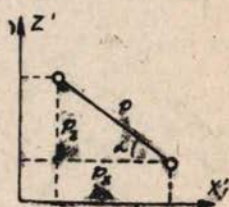
Metoda jedne slike

a) Os snimanja upravna je na glavnu ravninu objekta. Horizontalni nosač na koga deluje sila P u tački A (sl. 20) deformira se u ravnini XZ . Na udaljenosti Y nalazi se kamera za snimanje sa perspektivnim centrom S . Os nimanja SO' upravna je na ravan XZ ; sa tim je ravan snimka $X'Z'$ paralelna sa ravinom XZ .

Tačka T na nedeformiranom nosaču prikazaće se kao tačka T' na fotografiji. Po deformaciji nosača napravi se druga fotografija i to bez promene u orijentaciji kamere. Pomaknuta tačka T prikazaće se na



Sl. 20



Sl. 21

fotografiji kao T'. Nastalo pomeranje T' \bar{T}' nazivamo defleksijskom paralaksom. Rastavimo ga u komponente, paralelno sa koordinatnim osama p_x i p_z (sl. 21). Iz sličnosti trouglova (sl. 20) sledi, da je pomeranje u smeru X:

$$D_x = \frac{Y}{f} p_x$$

i u smeru Z:

$$D_z = \frac{Y}{f} p_z$$

Rezultirajuće pomeranje je dakle $D = D_x + D_y$

$$D = (D_x^2 + D_z^2)^{1/2} = \frac{Y}{f} p$$

gdje je $p^2 = p_x^2 + p_z^2$. Proporcija $\frac{Y}{f}$ je razmjera snimka M.

Prema tome je $D = Mp$.

Proporcija Y/f je razmjera snimka M.

Paralaksu možemo izmeriti stereometrom, stereokomparatorom ili pak na univerzalnom stereoinstrumentu. Snimke okrećemo tako da je p_x , p_z ili rezultanta p orijentirana u pravcu X ose. Tako vidimo prostorni model objekta u određenoj razmeri. Svi nedeformirani delovi objekta nalaze se u istoj ravnini, a deformirani delovi objekta izlaze iz te ravnine unutra i napolje. Pri ovom je moguće meriti paralakse p_x ili p_z , odnosno neposredno p.

Ako diferenciramo jednačinu (1) po obema promenljivima dobijemo

$$dD = \frac{1}{f} (Y_{dp} - p dY)$$

gde je praktički $p \, dY \leq Y \, dp$ pa možemo napisati:

$$dD = \frac{Y}{f} dp = M \, dp.$$

Sa tačno 3—5 puta merenom paralaksom možemo usvojiti za $dp = 5 \, \mu$.

Uticaoj distorzije objektiva usled stabilnosti spoljne orijentacije i malih pomeranja objekta praktično je beznačajna.

b) Osa snimanja nije upravna na glavnu ravninu objekta. Predpostavimo, da spoljna orijentacija nije obnovljena između uzastopnih snimaka. Usled projektivnosti između ravnine snimka i glavne ravnine objekta moguće je redresiranje snimaka. Za određivanje projektivnih odnosa dveju ravnina moramo znati pravilni položaj za najmanje četiri zajedničke tačke. Te tačke izaberemo tako da stvaraju što veći lik, po mogućnosti kvadrat ili pravougaonik; nikako ne smeju ležati tri tačke na istoj pravoj ili blizu nje. Neka se nalaze na stabilnom delu objekta tako, da služe kao tačke za upoređivanje. Nije obavezno, da se nalaze neposredno u glavnoj ravnini objekta, mogu biti u paralelnoj ravnini ispred objekta. Rastojanja između njih moramo tačno odmeriti — u slučaju pravougaonika samo dve stranice (sl. 22).



Sl. 22

Usvojimo levu donju tačku (a) kao koordinatni početak koordinatnog sistema u ravnini. Ako smo sa rasporedom veznih tačaka (a, b, c i d) udovoljili pravougaoniku, važi:

$$X_a = X_d = 0; \quad X_b = X_c; \quad Y_a = Y_b = 0; \quad Y_d = Y_c$$

U tom slučaju odmerimo samo rastojanja cd i da .

Na snimku je objekat i pravougaonik perspektivno deformiran. Usvojimo koordinatni sistem snimka sa koordinatnim početkom u a' i pozitivni smer ose X' kroz b' , pa očitamo na stereokomparatoru koordinate veznih tačaka i tačaka objekta na snimku za koje želimo odrediti pomeranja (1, 2, . . . n).

Redresiranje ne vršimo na optičko mehanički način, jer je premalo tačan, nego ćemo koristiti analitički način sa projektivnim transformiranjem koordinata po jednačini:

$$X = \frac{a_1 x' + b_1 y' + c_1}{a_0 x' + b_0 y' + 1}; \quad Y = \frac{a_2 x' + b_2 y' + c_2}{a_0 x' + b_0 y' + 1}$$

Koeficijenti transformacije a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 , a_0 i b_0 zavise od iznosa i smera nagiba između ravnine snimka i ravnine odnosnog lika, te

žarišne daljine kamere (f). Njih određujemo uvrštenjem koordinata četiri-
 riju veznih tačaka u gornju jednačinu. Determinanta koeficijenata mora
 pri tome zadovoljiti uslov:

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_0 & b_0 & 1 \end{vmatrix} = 0$$

u suprotnom rešenje je neodređeno.

Kod kasnijih snimanja nakon opterećenja treba paziti na stabilnost
 veznog lika (a, b, c i d); nije potrebno da se obnovlja spoljna orijentacija
 kamere za snimanje, jer možemo odrediti, za svaki snimak posebno, odgo-
 varajuće koeficijente transformacije. Pomeranja opažanih tačaka dobi-
 jamo neposredno iz razlika projektivno transformiranih koordinata sni-
 maka nedeformisanog i deformisanog objekta.

Uticao distorzije objektiva za snimanje kompenzira se, ako je spolj-
 na orijentacija sledećih snimaka približno ista.

Stereometoda

Za normalni slučaj stereofotogrametrije vrede sledeće jednačine za
 računanje prostornih koordinata tačaka objekta:

$$X = \frac{x_1}{f} Y; \quad Y = \frac{b_f}{p}; \quad Z = \frac{z_1}{f} Y$$

Koordinatni početak (X, Y, Z) odnosi se na levi perspektivni centar, koor-
 dinatne snimka (X₁ i Z₁) na levi snimak stereopara

Kod stereoautografa rešavaju se te jednačine mehaničkim putem.

Za ocenu tačnosti diferenciramo jednačine za Y i Z.

1. Greška u Y pravcu:

$$dY = \frac{Y^2}{bf} dp$$

Pomoću te jednačine možemo izračunati potrebnu dužinu b za neku
 dužinu baze b za neku zahtevanu tačnost:

$$b = \frac{Y^2}{f} \frac{dp}{dy}$$

2. Greška u Z pravcu:

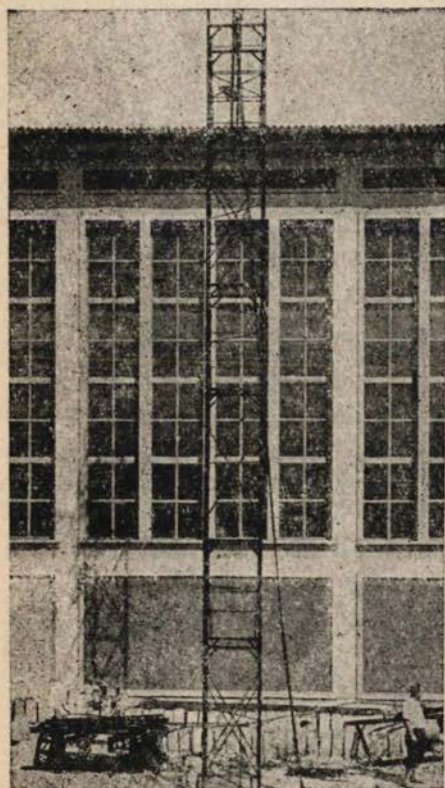
$$dZ = \frac{Z}{Y} dY + \frac{Y}{f} dZ$$

Za smer X dobijamo na analogni način ukoliko nas i ta komponenta
 pomeranja zanima.

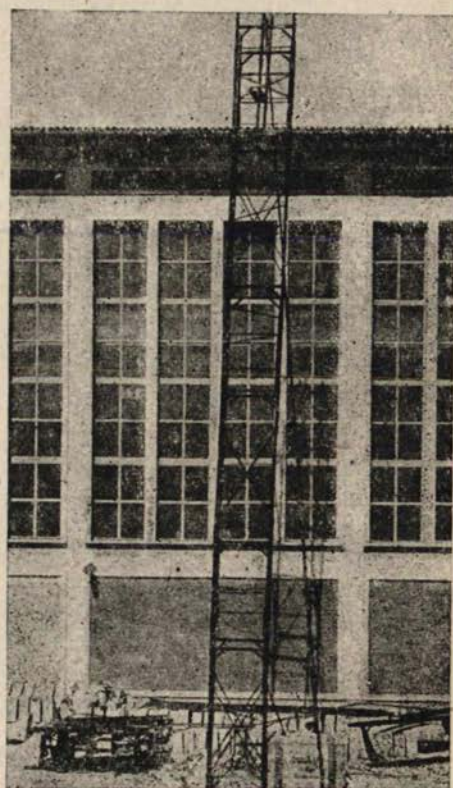
Kod restitucije postavljamo mernu markicu na tačke optičkog mo-
 dela. Markica je obično crna tačka. Na tamnim površinama obično je
 kontrast između markice i slike mala, zato nije moguće tačno postaviti
 markicu u prostoru. Da bi opažanja bila što tačnija dobro je da se sve

tačke na objektu, na koje se meri, označe posebnim znakovima u odgovarajućoj boji i to tako da se dobije što veći kontrast.

Svi predmeti između kamere i objekta moraju se odstraniti, da se objekat prikaže u celini. Rastojanje kamere od objekta neka bude toliko, da iskoristimo celo polje snimka za prikaz objekta. U slučaju kad je objekt prevelik, bolje je napraviti više snimaka za manje delove. Kod toga treba paziti da svi snimci sadrže fiksne tačke (na nedeformiranoj površini). Za određivanje rastojanja Y treba uzimati u obzir potrebnu tačnost.



Sl. 23



Sl. 24

Fototeodoliti imaju stabilnu unutrašnju orijentaciju. Omogućuju oštro preslikavanje za rastojanja veća od 15 m.

Osvetljenje objekta neka ne prouzrokuju oštre senke na njemu. Ukoliko se ne možemo osloboditi tih senki, treba ih umanjiti sa odgovarajućim fotografskim postupkom (na pr. dia-masku).

Priloženi slučaj (sl. 23 i 24) koji je bio izvršen kod ZRMK predstavlja jednoslikovno određivanje deformacije nosećeg stuba za temelje građevine.

Spoljna orijentacija kamere za snimanje ostala je kod uzastopnih snimaka stuba pod različitim opterećenjima nepromenjena. Deformacije su bile merene na stereokomparatoru C Zeiss-Jena.

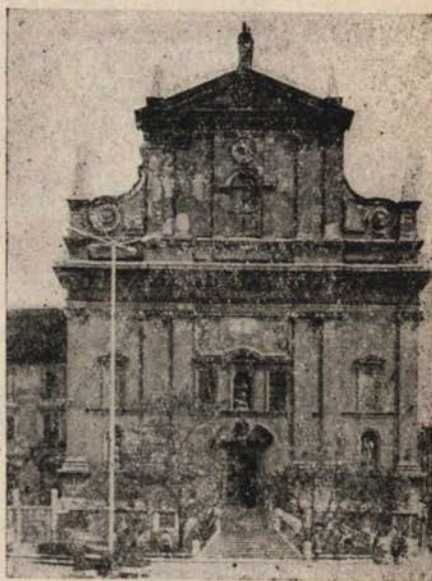
Rezultati su sasvim zadovoljili namenu.

2. Premer fasada arhitektonsko znamenitih objekata

Kod obnavljanja ili premeštanja arhitektonsko znamenitih objekata služe vrlo korisno fotogrametriški stereosnimci. Zato je potrebno osnovati fotogrametrijski arhiv za sve naše kulturne spomenike. Iz takvih arhiva bilo bi moguće dobiti željene podatke i mere svakog časa. Stereosnimci u koloru pružaju u svakom slučaju veće detalje nego obični crno-beli snimci.



Sl. 25



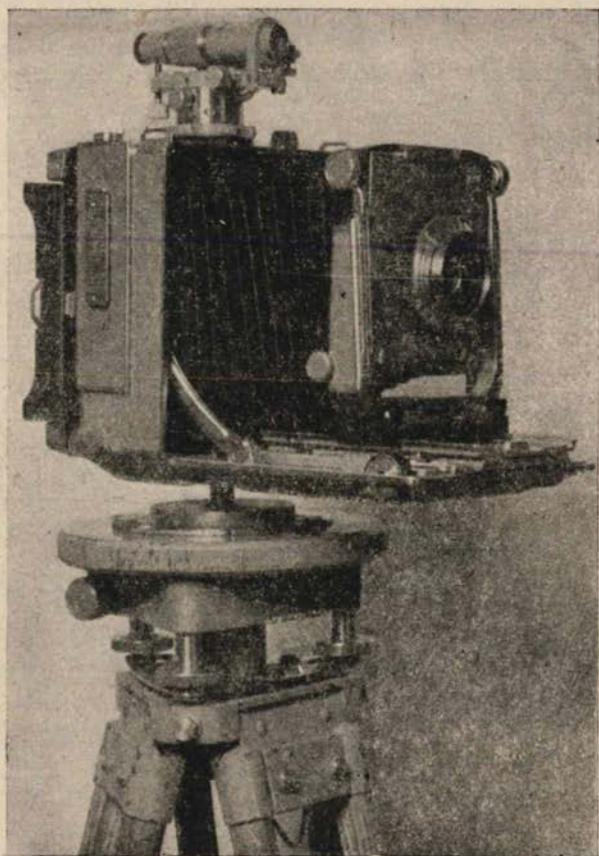
Sl. 26

Metoda koja će biti ovde obrađivana, je sem za arhitektonske spomenike važna takođe i za industrijske i druge objekte, kad se na pročeljima javljaju pukotine, koje proučavaju odgovarajuće ustanove (na pr. ZRMK). Postupak je sasvim analogan samo što moramo pre snimanja da označimo sve karakteristične tačke pukotina i mesta koja dolaze u obzir za opažanje, jasno ukoliko iste nisu na snimcima vidne same od sebe.

Geodetski otek FAGG izvršio je snimanja i restituciju nekih fasada u Ljubljani (4). Između tih su dva slučaja pokazana na sl. 25 i 26. Snimci su bili stereo parovi, ali restitucija se obavila po metodi jedne slike. Za snimanje je bila upotrebljena kamera »Linhoff« na kojoj smo utvrdili

mali nivelacijski instrument sa horizontalnim krugom (sl. 27). Tako je kamera predstavljala uprošćen fototeodolit. To je bilo potrebno za ostvarenje normalnog slučaja stereofotogrametrije.

Tačke preseka normala sa ravninama pročelja, koja prolazi preko odgovarajućih perspektivnih centara, bile su određene sa jednostavnom drvenom napravom (sl. 28). Sastoji se iz tri dašćice koje su jedna prema drugoj upravne. Duža dašćica ima utvrđenu vizurnu napravu. Kraći krak



Sl. 27

položili smo u blizini područja fasade i nato ga pomerili tako dok se nisu sekla oba nastavka vizirne naprave pri opažanju preko durbina na kameri. Zatim smo uzimali u obzir vertikalnu ekscentričnost durbina prema objektu koga snimamo i tu tačku signalizirali na pročelju, tako da se ona preslikala na snimku.

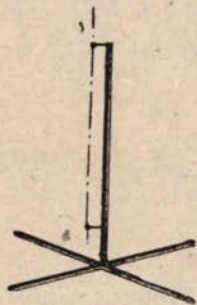
Prvo smo u tu svrhu pokušali upotrebiti kolimator na pravougaonoj podlozi, ali se pokazalo uravnanje kolimatora neracionalno.

Pri snimanju smo težili za tim da bi ravnina snimka bila što paralelnija sa ravninom fasade; objektiv je moguće pomerati tako da se uvek pojavi slika objekta u sredini izreza za sliku. U slučaju kada slikovna ravnina nije paralelna sa ravninom fasade, onda se snimak redresira, ili se jednostavno povećaju u razmeri 1:50 ili 1:100 i to na korektostof papir.

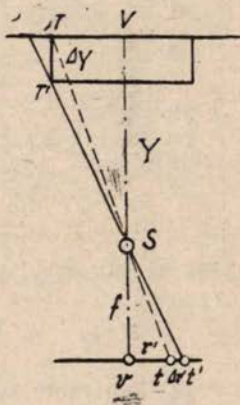
Dubinske razlike ΔY tačaka na fasadi, koje leže izvan glavne ravnine, odredili smo pomoću stereoskopskih merenja (sl. 29). Za ΔY važi pri normalnom slučaju stereofotogrametrije poznata elementarna jednačina:

$$\Delta Y = \frac{Y^2}{Bf} \cdot \Delta p,$$

gde je Δp merena razlika horizontalnih paralaksa za tačke T i T', Y udaljenost kamere od objekta, B baza snimanja i f žarišna daljina. " Δp " smo izmerili običnim stereometrom sa zrcalnim stereoskopom. Tačnost od 0,01 mm sasvim zadovoljava namenu.



Sl. 28



Sl. 29

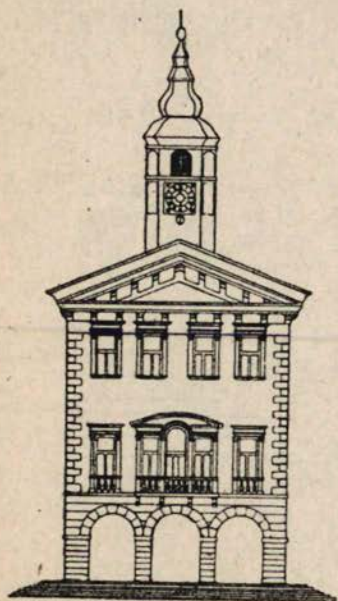
Tačke koje se nalaze izvan glavne ravnine fasade reducirali smo na tu ravninu. Za perspektivne redukcije tačaka usled dubinskih razlika, upotrebljavali smo poznatu jednačinu:

$$\Delta r = \frac{r'}{Y} \Delta Y$$

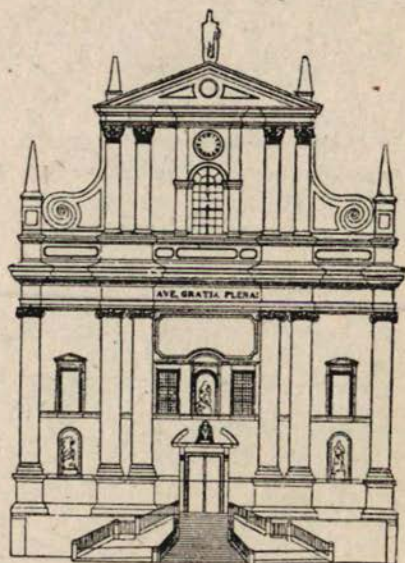
Ako uvrstimo u tu jednačinu gornji izraz za ΔY , bazu B i udaljenost Y u razmeri snimka ($m_p \cdot B = b$; $m_p \cdot Y = f$) dobićemo uprošćenu jednačinu:

$$\Delta r = \frac{r'}{b} \cdot \Delta p$$

Pomeranja Δr nanosili smo na radijalnim smerovima, koji izlaze iz glavne točke nimka. Korigirane tačke smo zatim na odgovarajući način povezali. Dobijeni nacrt smo zatim prekopirali na providni crtači papir. Mogli bi ga iztuširati neposredno na snimku a onda fotografiju hemiskim putem oslabiti. Slike 30 i 31 pretstavljaju umanjeni nacrt gornjih slika. na razmeru 1:300).



Sl. 30



Sl. 31

Fotorometrička metoda restitucije fasade pomoću jedne slike približno je 10 puta brža od neposrednog merenja na objektu, i to kada su takva merenja uopšte moguća.

Pored restitucije metodom jedne slike moguće je primeniti metodu preseka i steremetodu. Steremetoda ima prednost naročito kod prostorno razvedenih objekata.

LITERATURA:

1. Ing. B. Makarovič: »Metoda simultanega določevanja premikov opazovalnih in signalnih točk pri geodetskem določevanju premikov«
2. Ing. J. Batagelj: »Merenje ugibav s pomočjo napete žice« (poročilo ZRMK 1960)
3. Ing. J. Boštjančič: »Hidrostatsično niveliranje« (poročilo ZRMK 1960)
4. Ing. A. Grobelnik: »Izmera fasad po enoslikavni fotogrametrični metodi« (diplomsko delo 1960)