

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გიორგი სულაბერიძე

საყრდენი გეოდეზიური ქსელის შექმნის მეთოდების დამუშავება და კვლევა,
ჰიდროტექნიკური ნაგებობების დეფორმაციებზე დაკვირვების მიზნით

სადოქტორო პროგრამა: საინჟინრო გეოდეზია

შიფრი: 0719.1.2

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ა კ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

ქ. თბილისი

2024 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
სამთო-გეოლოგიური ფაკულტეტი
საინჟინრო გეოდეზიისა და გეოინფორმატიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი გიორგი ჭიაურელი

რეცენზენტები: *ახოკინიჭრელი პნიტეხთი ს. ივანე*

ჯაფარიანი დიმიტრი დ. ხვანჭავაძე

დაცვა შედგება 2024 წლის 4 ივლისს, 12:00 საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამთო-გეოლოგიური
ფაკულტეტის სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის
სხდომაზე, კორპუსი III, აუდიტორია 239

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი,
ასოცირებული პროფესორი

დ. თევზაძე

შესავალი

ქვეყნის ეკონომიკური აღორძინების და კეთილდღეობის მიზნით, პრიორიტეტებად უნდა დაისახოს მეცნიერულ-ტექნიკური პროგრესის დაჩქარება, წარმოების აღორძინება და მისი ეფექტური ზრდა, ინფრასტრუქტურის განვითარება და სხვა. რაც თავისმხრივ დაკავშირებულია ახალი, სამრეწველო და სამოქალაქო ობიექტებისა თუ ინფრასტრუქტურული პროექტების განხორციელებასთან.

ჩვენი ქვეყანა არის მზარდი ეკონომიკის მქონე. ჰიდროტექნიკური და სხვა ინფრასტრუქტურული პროექტების განვითარება, აგრეთვე ენერგეტიკული უზრუნველყოფა მისი დამოუკიდებლობის გარანტიაა. რაშიც მნიშვნელოვანი წილი აქვს ჰიდროენერგეტიკულ პოტენციალს, რომლითაც მდიდარია საქართველო.

აღნიშნული ტიპის პროექტების წარმატებით შესრულება კი მიღწევადია მეცნიერებისა და ტექნოლოგიების სხვადასხვა დარგების ოპტიმალური კომბინაციით, ეს მოითხოვს ისეთი გეოდეზიური სამუშაოების ახლებურად გააზრებას, როგორცაა საყრდენი გეოდეზიური ქსელების უზრუნველყოფა თანამგზავრული ტექნოლოგიების გამოყენებით. გარკვეულწილად, ყოველივე ეს დაკავშირებულია ახალი, სამრეწველო და სამოქალაქო ობიექტებისა თუ ინფრასტრუქტურული პროექტების განხორციელებასთან.

სამეცნიერო თემის აქტუალურობა: საინჟინრო ნაგებობების გეომეტრიული უზრუნველყოფა ხორციელდება გეოდეზიური მეთოდების გამოყენებით, კერძოდ, საყრდენ გეოდეზიურ ქსელებზე დაყრდნობით.

მეცნიერულ-ტექნიკურმა პროგრესმა, აგრეთვე თანამგზავრული ტექნოლოგიების აღმასვლამ, საშუალება მოგვცა გადაგვეხედა საყრდენი გეოდეზიური ქსელის შექმნის ტრადიციული მიდგომებისათვის და გვეძებნა გზები არსებული სირთულეების მოსაგვარებლად. თანამედროვე თანამგზავრული ტექნოლოგიების გამოყენებით მიღებული გეოდეზიური განაზომების ცდომილებები, ატარებს რთულ ხასიათს და შესაძლებელია გამოვლინდეს ექსპერიმენტული გამოკვლევების საფუძველზე. შესაბამისად, მნიშვნელოვანია გაზომვების წარმოების სწორი მეთოდის შემუშავება და განაზომების

დასამუშავებლად ოპტიმალური პარამეტრების შერჩევა.

საყრდენი გეოდეზიური ქსელი იქმნება მშენებლობის საწყის ეტაპზე და წარმოადგენს საფუძველთა საფუძველს ყველა შემდგომი დაკვალვითი, აგეგმითი თუ სამონიტორინგო სამუშაოების საწარმოებლად. თანამგზავრული ტექნოლოგიების გამოყენება, გეოდეზიური სამუშაოების საწარმოებლად, უზრუნველყოფს ავტომატიზაციის მაღალ ხარისხს, ეკონომიურად მომგებიანია და სამუშაო დროის ნაკლებ დანახარჯებს მოითხოვს.

კვლევის მიზანი მგდომარეობდა, თანამგზავრული ტექნოლოგიების გამოყენებითა და საყრდენი გეოდეზიური ქსელების უზრუნველყოფის მიზნით, განაზომების წარმოების პროგრამის მეთოდის შემუშავებაში.

ენგურის თაღოვანი კაშხლის სამონიტორინგო ქსელის გამოსავალ/საყრდენ პუნქტებზე, საველე განაზომების რამოდენიმე ციკლის ჩატარება და შემდგომ მათი კამერალური დამუშავება. აგრეთვე მოხდეს მიღებული შედეგების შედარებითი ანალიზი, იგივე ქსელზე კუთხურ-ხაზოვანი გაზომვებით მიღებულ და გაწონასწორებულ შედეგებთან.

შეფასდეს თანამგზავრული ტექნოლოგიებით საინჟინრო საყრდენ ქსელებზე გაზომვების პერსპექტივები.

სამეცნიერო სიახლე: შემუშავდა თანამგზავრული ტექნოლოგიების გამოყენებით გეოდეზიური გაზომვების შესრულების მეთოდი, აგრეთვე შევარჩიეთ გეოდეზიური განაზომების დამუშავების ოპტიმალური პარამეტრები, საყრდენი გეოდეზიური ქსელების უზრუნველყოფისთვის. შემუშავებული მეთოდის საფუძველზე შესაძლებელია განვახორციელოთ გეოდეზიური საყრდენი ქსელის (ერთმანეთისგან კილომეტრებით დაშორებული) პუნქტების კოორდინატების განსაზღვრა, პოლიგონომეტრიული სვლების ან ტრიანგულაციის ქსელების აგებისა და მათზე კუთხურ-ხაზოვანი გაზომვების გარეშე.

GNSS განაზომებით, საყრდენი ქსელების უზრუნველყოფა საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ იგივე შედეგი (სიზუსტე) მაქსიმალურად შემჭიდროვებულ ვადებში. რაც თავისმხრივ გულისხმობს, როგორც ადამიანური რესურსების დაზოგვას, აგრეთვე ეკონომიკური ეფექტიანობის გაზრდას.

ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა: ნაშრომში მიღებული კვლევის შედეგები, პირველ რიგში, განკუთვნილია შესაბამისი კვალიფიკაციის ინჟინრებისთვის, რომლებიც მუშაობენ გეოდეზიისა და მარკშეიდერიის მიმართულებით, კერძოდ, საყრდენი ქსელების დაპროექტება, აგება და ექსპლუატაცია. აგრეთვე შეიძლება თვალსაჩინო ინსტრუქციის მნიშვნელობა შეიძინოს ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მონიტორინგის სამსახურის სპეციალისტებისთვის.

შემუშავებული მეთოდის საფუძველზე, შესაძლებელია განვსაზღვროთ საყრდენი გეოდეზიური ქსელის პუნქტების კოორდინატები მაღალი სიზუსტით, როგორც პროექტირების ეტაპზე, ასევე უშუალოდ მშენებლობის/რეაბილიტაციის და შემდგომ მონიტორინგის (უსაფრთხო ექსპლუატაცია) პროცესში.

აღნიშნული მეთოდის გამოყენებით ჩავატარეთ რიონჰესის სადერევაციო გვირაბის ღერძის ფაქტობრივი მდებარეობის დადგენა და ზედაპირზე დაკვალვა.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა: სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს შესავალს, ლიტერატურის მიმოხილვას, სამ ძირითად თავს, რვა ქვეთავს, დასკვნას, გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხასა და დანართებს. ლიტერატურის ნუსხაში მითითებულია 40 დასახელების ნაშრომი ქართულ, ინგლისურ და რუსულ ენებზე. ნაშრომი წარმოდგენილია 161 ნაბეჭდ გვერდზე, რომელიც მოიცავს 42 ნახაზს, 12 ცხრილსა და 2 დანართს.

თავი I გეოდეზიური ქსელები

გეოდეზიური ქსელი ჰქვია დედამიწის ზედაპირზე დამაგრებულ წერტილთა სისტემას, რომელთა მდებარეობა განსაზღვრულია კოორდინატთა ერთიან სისტემაში. ცალცალკე შეიძლება გამოვყოთ გეგმური და სასიმალო ქსელები.

დანიშნულების მიხედვით არის გლობალური ქსელები, რომლებიც ფარავს მთელ დედამიწას; ნაციონალური (ანუ სახელმწიფო) გეოდეზიური ქსელები, რომლებიც ფარავს კონკრეტული სახელმწიფოს ტერიტორიას; გახშირების ქსელები, რომლებიც იქმნება ტოპოგრაფიული აგეგმვის საფუძვლად, ადგილობრივი გეოდეზიური ქსელები, რომლებიც გამოიყენება სხვადასხვა ამოცანის გადასაწყვეტად ადგილობრივ კოორდინატთა სისტემაში.

გლობალური გეოდეზიური ქსელები კოსმოსური გეოდეზიის მეთოდებით იქმნება დედამიწის თანამგზავრების გამოყენებით.

სახელმწიფო გეოდეზიური ქსელები იქმნება მისი პუნქტების ურთიერთ-მდებარეობის განსაზღვრისათვის.

სახელმწიფო სასიმალო ქსელები იქმნება მისი პუნქტების ნიშნულების მაღალი სიზუსტით განსაზღვრისათვის კვაზიგეოიდის ზედაპირის მიმართ.

გეგმური გეოდეზიური ქსელის პუნქტების განლაგება ხდება შემალლებულ წერტილებში; სასიმალო ქსელის რეპერებს კი რაც შეიძლება დაბალ ადგილებში ამაგრებენ.

გეგმური გეოდეზიური ქსელების შექმნის ძირითადი მეთოდებია: ტრიანგულაცია, პოლიგონომეტრია და ტრილატერაცია. ამა თუ იმ მეთოდის შერჩევა ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში განისაზღვრება ქსელის აგების მოთხოვნილი სიზუსტით და ეკონომიკური ფაქტორებით.

სასიმალო გეოდეზიური ქსელი განკუთვნილია საინჟინრო გეოდეზიური კვლევების ჩასატარებლად, ასევე სამშენებლო მოედანზე დაკვალვითი სამუშაოების წარმოებისათვის, შენობა-ნაგებობების, ჯდომებსა და დეფორმაციებზე დაკვირვებების, პროექტების რეალიზაციისთვის.

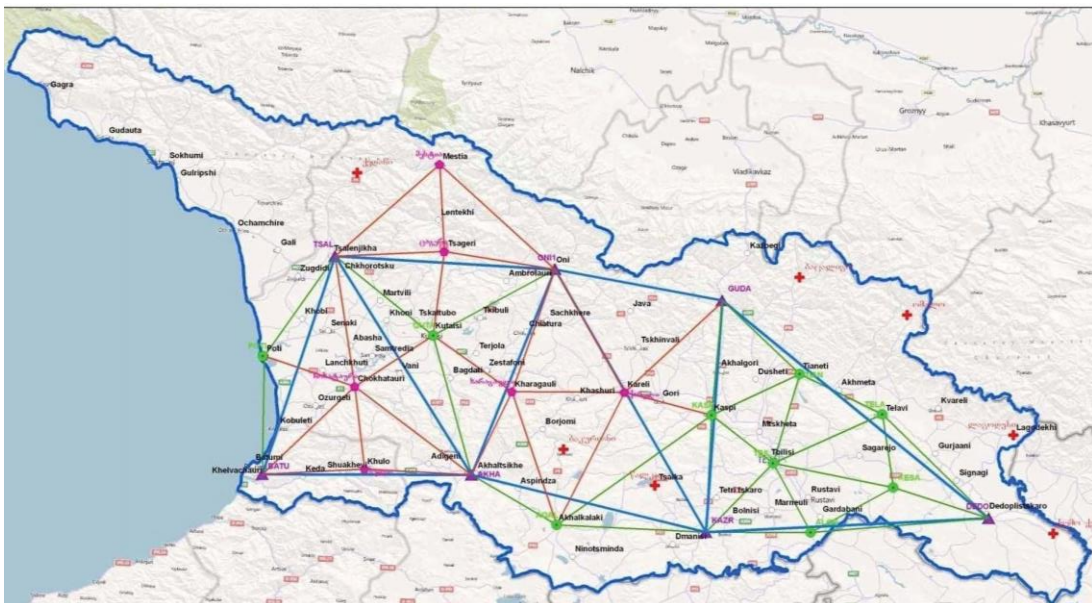
გეოდეზიური ქსელის აგება თანამგზავრული მეთოდით. ადგილმდებარეობის განსაზღვრის გლობალური თანამგზავრული სისტემა შეიმუშავეს სამხედროებმა სხვადასხვა ტიპის სახმელეთო და საზღვაო

ტრანსპორტის ნავიგაციური უზრუნველყოფისათვის. სატელიტური სისტემების განვითარება, ტექნიკის სრულყოფა და კოორდინატების განსაზღვრის სიზუსტის გაზრდა იყო საფუძველი გეოდეზიური განაზომების ახალი (თანამგზავრული გეოდეზიის) მეთოდის ფორმირებისა.

თანამგზავრულ მეთოდში წერტილების კოორდინატების განსაზღვრა, ასევე კოორდინატების ნაზრდები გამოყენებულია როგორც თანამგზავრის ცნობილი კოორდინატები. თანამგზავრები ბრუნავენ დედამიწის გარშემო, ორბიტებზე, განსაზღვრული ტრაექტორიით და მათი კოორდინატების განსაზღვრა შესაძლებელია ნებისმიერ დროს.

თანამგზავრული ნავიგაციური სისტემები შედგება სამი სეგმენტისაგან: კოსმოსური სეგმენტი, მიწისზედა მართვის სეგმენტი და სამომხმარებლო მართვის სეგმენტი.

თანამგზავრული გეოდეზიური ქსელები საქართველოში, 2010-2011 წლებში სამთავრობო სექტორის ძალისხმევით და შვედეთის საერთაშორისო განვითარებისა და თანამშრომლობის სააგენტოს (SIDA) ხელშეწყობით საფუძველი ჩაეყარა და სრულად ამუშავდა მაღალი კლასის მუდმივმოქმედი სადგურების ქსელი Geo-CORS (ნახ.1).



ნახაზი 1 - მუდმივმოქმედი საბაზისო სადგურების ქსელი Geo-CORS

ამ ეტაპზე Geo-CORS-ის სადგურები სიგნალს იღებენ ამერიკული (GPS), რუსული (GLONASS) და ევროკავშირის (GALILEO) თანამგზავრული ნავიგაციური სისტემებიდან. 2024 წლის იანვრის მდგომარეობით საქართველოს ტერიტორიაზე

ფუნქციონირებს 30 სადგური. აქედან 7 სადგური არის A კლასის ხოლო დანარჩენი არის B კლასის.

Geo-CORS-ი საშუალებას იძლევა ვიმუშაოთ ე.წ. საბაზისო სადგურის გარეშე, რეალური დროის რეჟიმში და რაც მთავარია საქართველოს მთელ ტერიტორიაზე ნებისმიერი წერტილის კოორდინატები განისაზღვროს მაღალისი ზუსტით.

თავი 2. გეოდეზიური ქსელების გაწონასწორება

წინასწარი გამოთვლები გეოდეზიურ ქსელებში. გამოთვლების მიზანია გეოდეზიურ ქსელში გაზომილი სიდიდეების, როგორც რეფერენც ელიფსოიდზე ისე მათი სიბრტყეზე რედუცირება, გაზომვების ანალიზი და მათი კონტროლი პირობითი განტოლებების თავისუფალი წევრების გამოყენებით, რომელთა შედარება ხდება დასაშვებ სიდიდეებთან, ხოლო გადახრების აღმოჩენის შემთხვევაში, შეცდომები უნდა აღმოიფხვრას გაწონასწორების სამუშაოების დაწყებამდე.

წინასწარი ანგარიში, პირველ ეტაპზე ითვალისწინებს გეოდეზიური ქსელის მუშა სქემის შედგენას, გამოთვლების კონტროლს, სამკუთხედების წინასწარ ანგარიშს და მათი სფერული სიჭარბის გამოთვლას, ცენტრებისა და რედუქციის შესწორების გამოთვლას, ცენტრებზე დაყვანილ ქსელში გაზომილი ელემენტების ცხრილების, ასევე გამოსავალი პუნქტების კოორდინატებისა და სიმაღლეების ცხრილების, ლაპლასის პუნქტებზე შვეული ხაზების, ნორმალების და გადახრის ცხრილების, ლაპლასის აზიმუტების და საბაზისო გვერდების სიგრძეების ცხრილების, გეოდეზიური პუნქტების ნორმალური და გეოდეზიური სიმაღლეების ცხრილების შედგენას.

გაზომილი სიდიდეების დედამიწის ზედაპირიდან რეფერენც ელიფსოიდის ზედაპირზე რედუცირების პრობლემა უნდა გავიგოთ, როგორც გეოდეზიური ამოცანების ერთობლიობა, რომელებიც მოიცავს სხვადასხვა შესწორებების გამოთვლებს და რომლებიც თავისმხრივ დაკავშირებულია დედამიწის ზედაპირზე გაზომილი სიდიდეების რეფერენც ელიფსოიდის ზედაპირზე დატანასთან.

გეოდეზიურ ქსელებში, გაზომილი სიდიდეების ელიფსოიდიდან სიბრტყეზე რედუცირების პრობლემა შეიძლება განიხილებოდეს როგორც

ფიზიკური სივრციდან დაკვირვებების გარდაქმნა განსაზღვრულ მათემატიკურ სივრცეში, რომელშიც უნდა განხორციელდეს ქსელის გაწონასწორება ან გამოთვლა, კორელატური და პარამეტრული მეთოდებით.

გეოდეზიური ქსელების კორელატების მეთოდით გაწონასწორებისას ვწერთ ჭარბი რაოდენობის პირობით განტოლებებს და ჭარბი გამოსავალი მონაცემების რაოდენობის პირობით განტოლებებს.

გეოდეზიურ ქსელში, რომელშიც არის მხოლოდ ერთი გამოსავალი პუნქტი და გაზომილია საჭირო რაოდენობის ბაზისები, აზიმუტები, თარაზული მიმართულებები ან გვერდების სიგრძეები (ნულთავისუფალი გეოდეზიური ქსელი), შეიძლება წარმოიშვას შემდეგი პირობები და დაიწეროს შესაბამისი განტოლებები: ფიგურის განტოლება, ჰორიზონტის, პოლუსის, ბაზისის და დირექციული კუთხის განტოლებები.

გაწონასწორება და სიზუსტის შეფასება, რომელიც ემყარება იმ ვარაუდს, რომ გაზომვების შემთხვევითი შეცდომები ჯამდება ფუნქციურ მოდელებში.

გაწონასწორებული ელემენტის საშუალო კვადრატული შეცდომა ტოლია

$$m_F = \mu \sqrt{\frac{1}{P_F}}$$

სადაც P_F არის შესაფასებელი ელემენტის შებრუნებული წონა, ხოლო μ - ერთეული წონის საშუალო კვადრატული შეცდომა, რომელიც გამოითვლება ფორმულით

$$\mu = \sqrt{\frac{pv^2}{r}}$$

სადაც v - გაწონასწორებიდან გაზომილი ელემენტების შესწორებებია. p - მათი წონები; r - ჭარბი განაზომების რაოდენობა.

გეოდეზიური ქსელების გაწონასწორება პარამეტრული მეთოდით გაწონასწორებისას თავიდან ხდება სამკუთხედების გადაწყვეტა: ტრიანგულაციაში გვერდების სიგრძეების გამოსათვლელად, ხოლო ტრილატერაციაში-კუთხეების სიდიდის გამოსათვლელად. რაც შეიძლება, მაღალი სიზუსტით საზღვრავენ პუნქტების კოორდინატებს. მიღებული კოორდინატებით გამოითვლება გვერდების სიგრძეები და დირექციული კუთხეები. შემდეგ ეტაპზე შეადგენენ შესწორებების

განტოლებებს ყველა უშუალოდ გაზომილ სიდიდეებისათვის: მიმართულებისათვის, გაზომილი აზიმუტებისათვის, (დირექციული კუთხისათვის), გაზომილი მანძილებისათვის პუნქტებს შორის. ყოველი გაზომილი ელემენტის წონა გამოითვლება საერთო შემთხვევაში ფორმულით $P = c/m^2$, შესწორებების განტოლებებიდან გადავდივართ ნორმალურ განტოლებათა სისტემაზე, რომელთა გადაწყვეტით მიიღებენ განსასაზღვრავი კოორდინატების შესწორებებს. შემდეგ გამოთვლიან პუნქტების გაწონასწორებულ კოორდინატებს და მათი გამოყენებით ასწორებენ გაზომილ სიდიდეებს გამოთვლილი შესწორებებით, ბოლოს ახდენენ გაწონასწორებული ელემენტების სიზუსტის შეფასებას.

ქსელის გაწონასწორებისას ელემენტების სიზუსტის შეფასება კორექტირების მეთოდის ერთ-ერთი ამოცანაა და გულისხმობს გაზომვების სიზუსტის შეფასებას, როგორც გაწონასწორებამდე ასევე გაწონასწორების შემდეგ.

ერთეული წონის საშუალო კვდრატული შეცდომა გამოითვლება ფორმულით

$$\mu = \sqrt{\frac{[pv^2]}{r}}$$

სადაც v -გაზომილი ელემენტების შესწორებებია გაწონასწორებებიდან; r -ქსელში ჭარბი განაზომების რაოდენობაა.

თავი 3. ლოკალური საყრდენი გეოდეზიური ქსელების უზრუნველყოფის მეთოდის კვლევა თანამგზავრული ტექნოლოგიებით

საკვლევი ობიექტის ზოგადი დახასიათება. ენგურის თაღოვანი კაშხალი და ჰესის ძირითადი ნაგებობები უნიკალურია ინჟინრული გადაწყვეტით და ტექნიკური პარამეტრების მთელი კომპლექსით, რომელთაც მსოფლიო ჰიდროტექნიკური მშენებლობის პრაქტიკაში ანალოგი არ აქვთ.

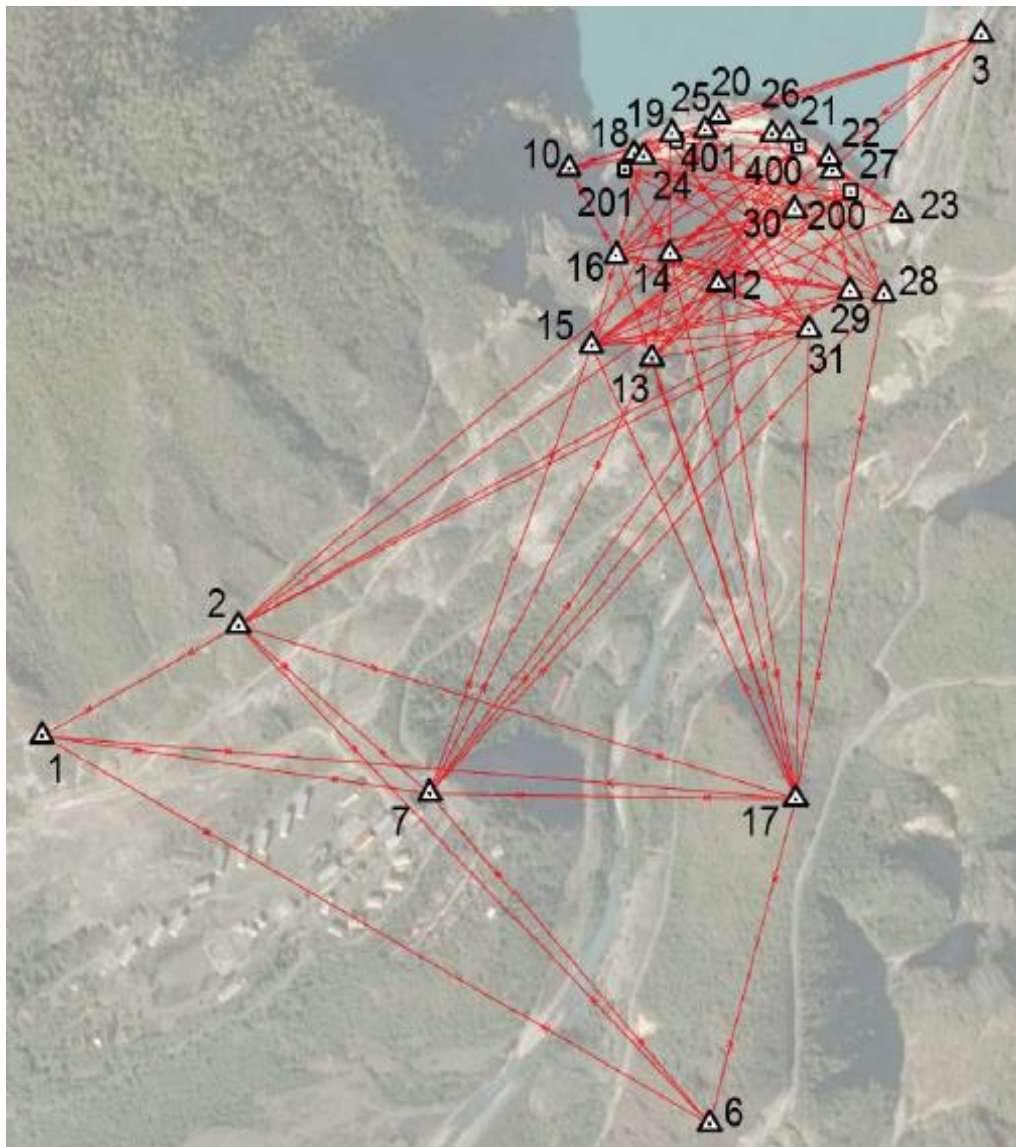
ენგურჰესის თაღოვანი კაშხალი წარმოადგენს ორმაგი სიმრუდის გარსს, რომელიც ორივე მხარეს ნაპირებზე ეყრდნობა 26.5მ სიმაღლის გრავიტაციულ ბურჯებს. კაშხლის სიმაღლეა 271.5მ, სიგრძე ძირში 60მ, ხოლო თხემზე 728მ. დღესდღეობით იგი თაღოვან კაშხალთა შორის ერთერთი ყველაზე მაღალია

მსოფლიოში. მისი სისქე ძირში პერიმეტრალურ ნაკერზე 60 მ, ცენტრალურ ნაწილში 90მ, ხოლო თხემზე სისქე 10 მეტრის ტოლია. კაშხლის ტანში ჩასხმულია $4 \cdot 10^6$ მ³ ბეტონი და ამ კაშხალმა შექმნა ჯვარის წყალსაცავი, რომლის მოცულობა $1,1 \cdot 10^9$ მ³ უდრის.

სამონიტორინგო ქსელის აუცილებლობის შესახებ. ყოველი მაღლივი კაშხალი წარმოადგენს რთულ ჰიდროტექნიკურ ნაგებობას, რომელიც ერწყმის კონკრეტულ გარემო პირობებს. მიუხედავად იმისა, რომ მსგავსი ნაგებობების დაპროექტებისა და მშენებლობისას ითვალისწინებენ მასივის სტრუქტურას, სამთო ქანების ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებს, მათ ცვლილებებს დროის განმავლობაში, რეგიონის სეისმურობას, მაქსიმალურ დატვირთვას და სხვა გარემოებებს - რათქმუნდა კლიმატური პირობებისა და მეტწილად წყლის დონის სეზონური ცვლილებების ზემოქმედებით გამოწვეული ცვალებადობები როგორც ნაგებობაში, ისე სამთო ქანების მასივში, გავლენას ახდენენ თაღოვანი კაშხლის ტანისა და ფუძის მდგრადობაზე. რაც აქტუალურს ხდის ზემოთ განხილული ტიპის ობიექტების, მდგრადობის შესასწავლად, მრავალპროფილიანი (მათ შორის კვლევებს გეოდეზიური მეთოდებით) მონიტორინგის ჩატარებას.

ენგურის თაღოვანი კაშხლის სამონიტორინგო ქსელი შედგება ორი ძირითადი, გეგმური და სასიმაღლო ქსელებისგან, რომლებიც თავისმხრივ განვითარებას იწყებენ კაშხლის მიმდებარე ტერიტორიიდან და მთავრდება მიწისქვეშ, კაშხლის შტოლნებში, გვირაბებში და გალერეებში. ამ ქსელზე კაშხლის დეფორმაციული პროცესების კვლევა გეოდეზიური მეთოდების გამოყენებით, თითქმის 50 წელია უწყვეტად ტარდება. საკვლევო თემატიკიდან გამომდინარე ჩვენთვის აქტუალურია გეგმური ქსელის ის ნაწილი, რომელიც არის ზედაპირზე ანუ ტრიანგულაციის ქსელი.

გეგმური სამონიტორინგო (ტრიანგულაცია) ქსელი წარმოდგენილია 26 პუნქტით, მათ შორის ორი ახლად ჩასმული პუნქტი (ნახ.2). ქსელის პუნქტები განლაგებულია მდინარე ენგურის კანიონის ორივე ნაპირზე, გარდა მესამე პუნქტისა ყველა არის კაშხლის ქვედა ბიეფში, ძირითადად სხვადასხვა სიმაღლეზე ისე, რომ ზოგიერთ პუნქტებს შორის სიმაღლეთა სხვაობა 200მ აღემატება.



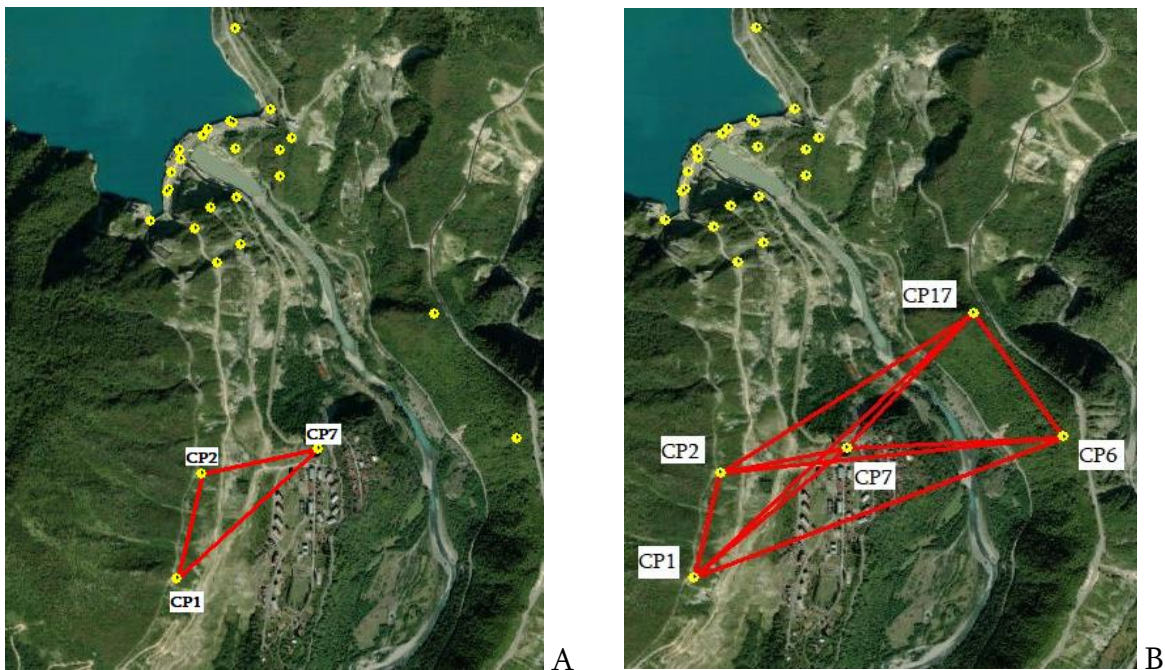
ნახაზი 2 - ენგურის თაღოვანი კაშხლის ტრიანგულაციის (გეგმური) ქსელის სქემა 2018 წლის მდგომარეობით

ქსელის პუნქტების უმრავლესობა ჩამაგრებულია 2000 წელს ჩატარებული სამონიტორინგო ქსელის რეკონსტრუქციის დროს. ყველა მათგანი წარმოადგენს მილის ტიპის, იძულებითი ცენტრირების, თერმომედეგ კონსტრუქციას ანუ საშუალებას იძლევა მოხდეს ინსტრუმენტებისა და დამხმარე ხელსაწყოების ავტომატური დაცენტრა 0.03მმ სიზუსტით, რაც გამორიცხავს ცენტრირებისა და რედუქციის შესწორებების განსაზღვრის აუცილებლობას.

იქედან გამომდინარე, რომ ასეთი მაღალი სიზუსტის და ისტორიის მქონე სხვა გეოდეზიური ქსელი საქართველოში (სამწუხაროდ) არ გვაქვს, კვლევის ობიექტად შევარჩიეთ ენგურჰესის საყრდენი სადებფორმაციო ქსელის გამოსავალი პუნქტები. თუ გავითვალისწინებთ, რომ ჩვენი გაზომვების მეთოდი

არატრადიციულია და საქართველოში პირველად ტარდება, მიღებული შედეგები საჭიროებს, უკვე არსებულ და პრაქტიკაში მიღებული მეთოდების შედეგებთან შედარებას. სწორედ აღნიშნული ქსელი შესაძლებლობას გვაძლევს, შევადაროთ უკვე მრავალგზის წარმოებული გაზომვების შედეგები, ჩვენს მიერ ჩატარებულ გაზომვების შედეგებთან.

ჩვენს მიერ განხორციელებული გაზომვების პირველი ეტაპი, რომელიც საცდელ ხასიათს ატარებდა შევასრულეთ, ენგურჯესის თაღოვანი კაშხლის გეგმური სადეფორმაციო საყრდენი ქსელის სამ გამოსავალ CP1, CP2 და CP7 პუნქტზე (ნახ.3A).



ნახაზი 3 - ენგურჯესის კაშხლის გეგმური სადეფორმაციო საყრდენი ქსელი ჩვენი მიზანი იყო, ერთდროულად მომხდარიყო გაზომვები, შესაბამისად სამივე პუნქტზე დავაყენეთ GNSS მიმღებები. კვლევისთვის გამოვიყენეთ ორი „Leica GS08“ და „Leica GS14“ მიმღებები. გაზომვები ვაწარმოეთ სტატიკურ რეჟიმში, საბაზისო GPS-ის გამოყენების გარეშე.

გაზომვების ჩატარების ხანგრძლივობის დროდ, შევარჩიეთ 90 წუთი. სამივე GNSS მიმღები ჩავრთეთ ერთდროულად და გაზომვების დაწყებიდან 90 წუთში გამოვრთეთ სამივე. განაზომების დამუშავებისთვის და წინასწარი შედეგების მისაღებად გამოვიყენეთ, საქართველოში არსებული მუდმივმოქმედი საბაზისო სადგურების, Geo-CORS-ის ქსელის წალენჯიხის A ტიპის სადგური.

პირველ ეტაპზე, სამივე პუნქტზე, გაზომვების შედეგების დამუშავების დროს, მიღებული მონაცემების საფუძველზე, ქსელის პუნქტების გაწონასწორების სიდიდეები მოცემულია პირველ ცხრილში.

ცხრილი 1

გაზომვების პირველი ეტაპზე GNSS განაზომების გაწონასწორებული სიდიდეები.

პუნქტის ID	სკმ ΔX მმ	სკმ ΔY მმ	სკმ ΔZ მმ
CP1	1.27	1.99	1.38
CP2	1.07	1.55	1.17
CP7	0.68	0.70	0.80

90 წუთიანი განაზომების დამუშავებისას კვლევებმა დაგვანახა, რომ სრულყოფილი სურათის შესაქმნელად, დადგა აუცილებლობა:

- საკვლევი ობიექტის გაფართოება, რაც გულისხმობს დამატებით ორი საყრდენი პუნქტის ჩართვას კვლევაში, შესაბამისად უკვე სრულად გვექნება ენგურჰესის კაშხლის გეგმური სადეფორმაციო საყრდენი ქსელის ყველა პუნქტი. რომელიც შედგება ხუთი პუნქტისგან (ნახ.3 B);
- გაგვეზარდა გაზომვების ხანგრძლივობა, აქედან გამომდინარე მიზნად დავისახეთ, მრავალსაათიანი (3-6 საათი) გაზომვების უწყვეტად ჩატარება ორ ეტაპად, 12 საათიანი ინტერვალით.

პირველისგან განსხვავებით, გაზომვების მეორე ეტაპზე გამოვიყენეთ ხუთი GNSS მიმღები, რათა ხუთივე პუნქტზე ერთდროულად გვეწარმოებინა გაზომვები. გამოვიყენეთ “Leica”-ს ფირმის, ორი GS14 და სამი GS08 მოდელის GNSS მიმღებები. უნდა აღინიშნოს, რომ როგორც პირველი საველე კვლევის დროს, ასევე მეორე საველე კვლევის დროს არ გამოგვიყენებია საბაზისო GPS სადგური.

GNSS მიმღების ტექნიკური მონაცემების წყალობით, შევძელით გაზომვები გვეწარმოებინა სრული ექვსი საათის განმავლობაში, რამაც კვლევის პროცესისთვის დამატებითი მონაცემების შეგროვების შესაძლებლობა მოგვცა.

საველე კვლევის მეორე ეტაპზე, GNSS მიმღებების დამაგრება მოხდა ენგურჰესის კაშხლის გეგმური სადეფორმაციო საყრდენი ქსელის ყველა პუნქტზე, ეს პუნქტებია: CP1, CP2, CP6, CP7 და CP17 (ნახ.3B). ერთდროულად მოხდა ხუთივე GNSS მიმღების 16:27 საათზე ჩართვა, გაზომვები მიმდინარეობდა ექვსი საათის

განმავლობაში და 22:27 საათზე მოხდა ყველა GNSS მიმღების ერთდროულად გათიშვა.

ანალოგიური პრინციპით ვაწარმოეთ გაზომვები უკვე თორმეტი საათის შემდეგ. ერთდროულად მოხდა ხუთივე GNSS მიმღების 04:27 საათზე ჩართვა, გაზომვები მიმდინარეობდა ექვსი საათის განმავლობაში და 10:27 საათზე ყველა GNSS მიმღების ერთდროულად გავთიშეთ.

GPS-ის და GLONASS-ის თანამგზავრები, თავისი ორბიტალური ტრაექტორიიდან გამომდინარე იცლებიან ყოველ თორმეტ საათში ანუ თანამგზავრების ერთი ჯგუფი დღე-ღამის პირველ ნახევარში არის ხელმისაწვდომი, ხოლო მეორე ჯგუფი, დღე-ღამის მეორე ნახევარში. სწორედ ეს იყო მიზეზი, მეორე ექვს საათიანი გაზომვების ჩატარებისა 12 საათიანი ინტერვალით.

საველე კვლევის მეორე ეტაპზე, გამომდინარე იქიდან, რომ არ გვინდოდა შედეგი დამოკიდებული ყოფილიყო მხოლოდ ერთი, უახლოეს A ტიპის პუნქტის გამართულ მუშაობაზე. გადაწყვიტეთ, საკვლევი ობიექტიდან სხვადასხვა მანძილით დაშორებული და განხვავებულ სიმაღლეებზე მდებარე B ტიპის (მუდმივმოქმედი საბაზისო სადგურების ქსელის, Geo-CORS-ის ქუთაისის, მესტიის და ფოთის სადგურები) პუნქტების გამოყენება განაზომების გაწონასწორებაში. ჩვენი მიზანია კვლევის პირობები მაქსიმალურად მივამსგავსოთ რეალურ გარემოს, რათა შესაძლებელი იყოს ნებისმიერი სირთულის და მოცულობის პროექტის უზრუნველყოფა (რასაც ემსახურება ჩვენი კვლევა).

დასამუშავებლად და გასაწონასწორებლად ჩვენს მიერ გამოყენებულ იქნა ქუთაისის პუნქტი რომელიც მდებარეობს 170 მეტრზე, მესტიის პუნქტი რომელიც მდებარეობს 1434 მეტრზე და ფოთის პუნქტი რომელიც მდებარეობს 37 მეტრზე. ენგურჰესის თაღოვანი კაშხლის სადეფორმაციო ქსელის გამოსავალი პუნქტების ნიშნულები კი იცვლება დაახლოებით 429 მეტრიდან, 560 მეტრამდე. ასეთ მკვეთრ სიმაღლეთა ცვლილებას, Geo-CORS-ის პუნქტების სადეფორმაციო ქსელის მიმართ, მითუმეტეს ასეთ მანძილზე, უარყოფითი გავლენა უნდა ჰქონოდა განაზომების სიზუსტეზე. დამუშავების შედეგად, ყველა პუნქტზე მივიღეთ დეტალური მონაცემები თითოეული Geo-CORS-ის სადგურიდან, რაც საშუალებას გვაძლევს

შევაფასოთ გაზომვების ხარისხი და შევარჩიოთ ჩვენთვის სასურველი პარამეტრები კონკრეტული ამოცანის გადასაჭრელად.

თანამგზავრული ტექნოლოგიებით მიღებულ განაზომების სიზუსტეზე, გავლენას ახდენს სხვადასხვა ფაქტორი, სადაც განსაკუთრებული როლი ენიჭება თანამგზავრების ცის თაღს, სიზუსტის შემცირების ფაქტორს (DOP) და გაზომვების ჩატარების დროის ხანგრძლივობას. სწორედ ამიტომ, დავიწყეთ, ჩამოთვლილი ფაქტორებისთვის ოპტიმალური პარამეტრების შერჩევა.

სიზუსტის შემცირების ფაქტორი. გეოდეზიური განაზომების შედეგების სიზუსტის შეფასება, წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე მნიშვნელოვან ეტაპს საიმედო გეოდეზიური მონაცემების მისაღებად.

თანამგზავრული განაზომების სიზუსტეზე გავლენა აქვს რამოდენიმე ფაქტორს, ერთ-ერთი მათგანია სიზუსტის შემცირების ფაქტორი (DOP). რომელიც თავისმხრივ იყოფა სხვადასხვა კომპონენტებად, რომელთაგანაც განაზომების საბოლოო სიზუსტის განსაზღვრის მაჩვენებელია სიზუსტის შემცირების გეომეტრიული ფაქტორი - GDOP რომელიც განსაზღვრავს მთლიანი განაზომების სიზუსტის შემცირების ფაქტორს და გამოითვლება ფორმულით:

$$GDOP = \sqrt{PDOP^2 + TDOP^2}.$$

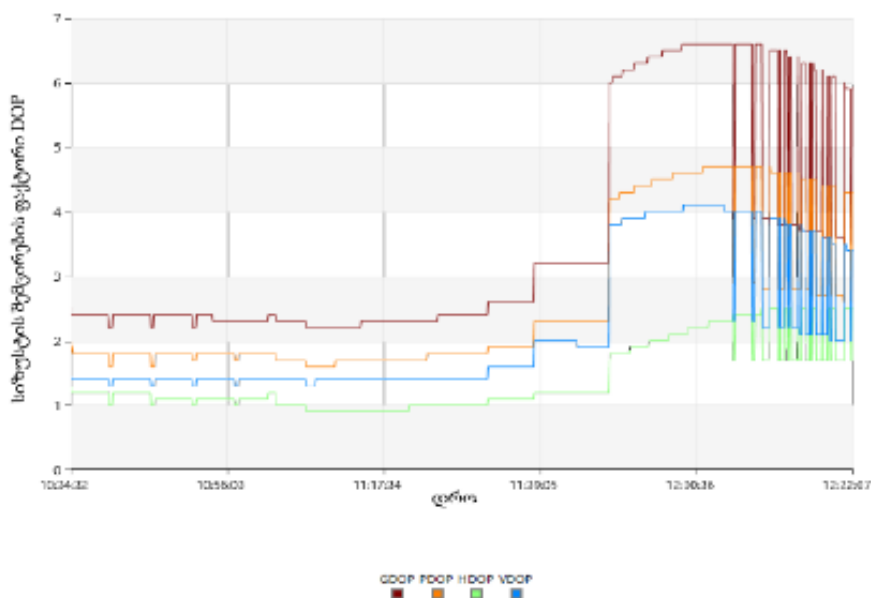
სიზუსტის შემცირების ფაქტორის მნიშვნელობების მიხედვით, ფასდება განაზომების სიზუსტე. ცხრილი 2-ის მიხედვით, თუ სიზუსტის შემცირების ფაქტორის მნიშვნელობა ტოლია ან ნაკლებია 1-ზე განაზომების შედეგების სიზუსტე ითვლება იდეალურად, როცა სიზუსტის შემცირების ფაქტორის მნიშვნელობა არის 2-3- მდე განაზომების შედეგების სიზუსტე ითვლება რომ არის ძლიან კარგი, 4-6- მდე კარგი და 7-8-მდე საშუალო 9- დან 20- მდე ცუდი, 21-დან 50- მდე ძალიან ცუდი.

წინასწარი გაზომვების დროს, CP1 პუნქტის “DOP”-ის მნიშვნელობებმა, გაზომვების დაწყებიდან დაახლოებით 50 წუთის შემდეგ, მკვეთრად დაიწყო გაუარესება (ნახ.4). აქედან გამომდინარე გადავწყვიტეთ, განაზომების დამუშავებაში არ მიეღო მონაწილეობა, განაზომების იმ ნაწილს საიდანაც “DOP”-ის მნიშვნელობა სამს გასცდა.

სიზუსტის შემცირების ფაქტორის კრიტერიუმები

“DOP”- ის მნიშვნელობები	განაზომების სიზუსტე
≤1	იდეალური
1-2	ძალიან კარგი
2-5	კარგი
5-10	საშუალო
10-20	ცუდი
21-50	ძალიან ცუდი

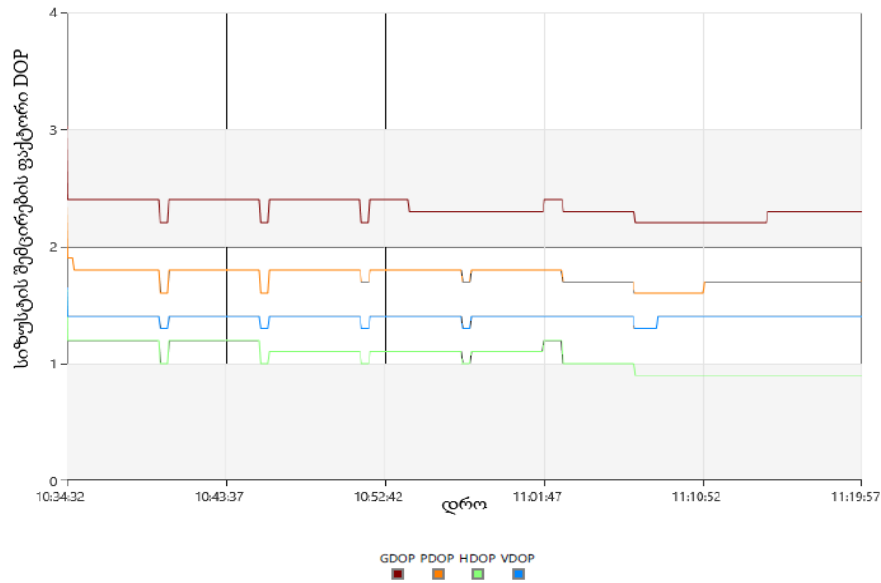
შესაბამისად მივიღეთ 50 წუთიანი განაზომები სიზუსტის შემცირების ფაქტორის ძალიან კარგი მნიშვნელობებით (ნახ.5). ეს მონაცემები ახლიდან გავაწონასწორეთ და შედეგები გაუარესდა.



ნახაზი 4 – CP1-ის სიზუსტის შემცირების ფაქტორი (დამუშავებამდე)

ცის თაღზე ხედვის კუთხის სიდიდე. როგორც უკვე ავლნიშნეთ, განაზომების 1,5 საათიანი ციკლი ჩავატარეთ სამ CP1, CP2 და CP7 პუნქტზე. აქედან CP1 და CP2 მდებარეობს მთის ფერდზე, რომელსაც დასავლეთიდან ესაზღვრება სალი კლდე, რომელიც ხელს უშლის მხედველობას. არახელსაყრელი რელიეფის პირობების გამო, ცის თაღის ხედვის კუთხე, GNSS მიმღებს, აქვს ძალიან მცირე. რის გამოც გადავწყვიტეთ მონაცემების დამუშავება ცის თაღის ხედვის რამოდენიმე გრადუსზე. კერძოდ 8°, 10°, 13°, 15° და 17°-ზე. გეოდეზიური განაზომების მონაცემების დამუშავების შემდეგ მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა, რომ 8° და 10° შედეგები იყო ერთნაირი სიზუსტის, ხოლო რაც უფრო იზრდებოდა გრადუსი 13°,

15° და 17° განაზომთა შედეგების სიზუსტის ხარისხი თანდათან იკლებდა შესაბამისად ყველაზე დაბალი ხარისხის სიზუსტე მივიღეთ 17°-ზე (ცხრ.3).



ნახაზი 5 - CP1-ის სიზუსტის შემცირების ფაქტორი (დამუშავების შემდეგ)

ცხრილი 3

CP1 პუნქტის მდებარეობის ცდომილება ცის ხედვის კუთხის მიხედვით

ხედვის კუთხე, გრადუსებში	პუნქტის მდებარეობის ცდომილება, მმ.	
	სიბრტყეზე (2D)	სივრცეში (3D)
8	0.14	0.27
10	0.14	0.27
13	0.15	0.28
15	0.15	0.29
17	0.15	0.31

უნდა აღინიშნოს, რომ ინსტრუქციის მიხედვით, რაც უფრო ფართოა GNSS მიმღების ცის თალის ხედვის არეალი, მით მაღალია გაზომვების შედეგები და იზრდება განაზომთა შედეგების სიზუსტეები. ჩვენი საკვლევო ობიექტის რელიეფიდან გამომდინარე და ჩატარებულმა კვლევებმა ნათლად აჩვენა შედეგების გაუარესება ცის თალის ხედვის კუთხის მატებასთან ერთად. მიუხედავად იმისა, რომ 8 და 10 გრადუსზე შედეგები იდენტური იყო, საბოლოო არჩევანი გავაკეთეთ ამ ორს შორის მეტად გაშლილ 10°-იან კუთხეზე.

განაზომების დამუშავების შედეგად გამოჩნდა, რომ ერთი და იგივე პუნქტს უმნიშვნელო განსხვავებები აქვს Geo-CORS-ის მუდმივმოქმედი სადგურების

ქსელის სხვადასხვა, A თუ B კლასის სადგურის დამუშავების მიმართ, ეს განპირობებული შეიძლება იყოს კონკრეტული მუდმივმოქმედი სადგურის ტექნიკური მონაცემებიდან გამომდინარე და ასევე კონკრეტული პუნქტის მდებარეობიდან გამომდინარე. ეს კარგად ჩანს CP1 და CP2 სადგურის შემთხვევაში. როგორც ზემოთ ავლინებთ, მათი ცუდი მდებარეობის გამო, თანამგზავრების ცის თაღს ფაქტობრივად ერთი მიმართულებით ხედავს.

პირველი და მეორე ექვს საათიანი განაზომების სესიების მონაცემების დამუშავების შედეგად, მიღებული მონაცემების მიხედვით გავაწონასწორეთ ორივე ქსელი ცალცალკე (ცხრილი 4 და 5).

ცხრილი 4

I ექვს საათიანი განაზომების გაწონასწორებული ქსელის შედეგები

პუნქტი	ქსელში პუნქტის მდებარეობის განსაზღვრის ს.კ.შ. მმ.				
	X	Y	Z	სიბრტყეზე (2D)	სივრცეში (3D)
CP1	0.42	0.42	0.96	0.59	1.13
CP2	0.36	0.31	0.85	0.48	0.97
CP6	0.35	0.27	0.77	0.44	0.89
CP7	0.34	0.26	0.75	0.43	0.86
CP17	0.32	0.24	0.68	0.40	0.79

ცხრილი 5

II ექვს საათიანი განაზომების გაწონასწორებული ქსელის შედეგები

პუნქტი	ქსელში პუნქტის მდებარეობის განსაზღვრის ს.კ.შ. მმ.				
	X	Y	Z	სიბრტყეზე (2D)	სივრცეში (3D)
CP1	0.37	0.35	0.84	0.51	0.98
CP2	0.33	0.30	0.79	0.45	0.91
CP6	0.30	0.25	0.67	0.39	0.78
CP7	0.27	0.23	0.62	0.35	0.71
CP17	0.26	0.22	0.58	0.34	0.67

შედეგებიდან ჩანს, რომ Z-ის მნიშვნელობა თითქმის ორჯერ აღემატება X და Y მნიშვნელობებს, შესაბამისად თუ შევადარებთ სიბრტყეზე პუნქტის მდებარეობის ცდომილებას, სივრცეში იგივე პუნქტის მდებარეობის ცდომილებასთან, აქაც თითქმის ორჯერ აღემატება სიბრტყეში მდებარეობის მნიშვნელობებს. ეს გამოწვეულია, Geo-CORS-ის მუდმივმოქმედი სადგურებით.

გამომდინარე კვლევის მიზნიდან, ორივე ციკლის შედეგები გაწონასწორდა, როგორც მთლიანობაში, ისე დაჭრილი, ანუ ერთ, ორ, სამ, ოთხ და ხუთ საათიან სეანსებად. გაწონასწორება მოვახდინეთ პროგრამული უზრუნველყოფის Leica Infiniy საშუალებით. პირველმა ექვს საათიანმა გაზომვებმა, შესაძლებლობა მოგვცა გვენახა თუ როგორ იცვლებოდა ქსელში პუნქტების მდებარეობის ცდომილებები, როგორც სიბრტყეზე, ასევე სივრცეში საათების მიხედვით (ცხრილი 6 და 7).

ცხრილი 6

პირველ ციკლში ქსელის პუნქტების მდებარეობის განსაზღვრის სკმ სიბრტყეზე

პუნქტი	საათების მიხედვით (2D) მმ.					
	1 საათი	2 საათი	3 საათი	4 საათი	5 საათი	6 საათი
CP1	1.34	0.78	0.76	0.85	0.64	0.59
CP2	1.25	0.64	0.62	0.72	0.51	0.48
CP6	1.00	0.58	0.56	0.64	0.48	0.44
CP7	0.95	0.57	0.54	0.61	0.46	0.43
CP17	0.92	0.54	0.51	0.57	0.43	0.40

ცხრილი 7

პირველ ციკლში ქსელის პუნქტების მდებარეობის განსაზღვრის სკმ სივრცეში

პუნქტი	საათების მიხედვით (3D) მმ.					
	1 საათი	2 საათი	3 საათი	4 საათი	5 საათი	6 საათი
CP1	2.57	1.45	1.47	1.65	1.19	1.13
CP2	2.42	1.19	1.25	1.45	1.04	0.97
CP6	1.95	1.04	1.05	1.21	0.95	0.89
CP7	1.85	1.04	1.03	1.19	0.91	0.86
CP17	1.75	0.95	0.97	1.09	0.83	0.79

როგორც პირველმა, ასევე მეორე ექვს საათიანმა გაზომვებმა, დაგვენახა თუ როგორ იცვლებოდა ქსელში პუნქტების მდებარეობის ცდომილებები, როგორც სიბრტყეზე, ასევე სივრცეში საათების მიხედვით (ცხრილი 8 და 9).

ცხრილი 8

მეორე ციკლში ქსელის პუნქტების მდებარეობის განსაზღვრის სკმ სიბრტყეზე

პუნქტი	საათების მიხედვით (2D) მმ.					
	1 საათი	2 საათი	3 საათი	4 საათი	5 საათი	6 საათი
CP1	0.68	0.47	0.44	0.44	0.49	0.51
CP2	0.62	0.44	0.40	0.40	0.42	0.45
CP6	0.50	0.37	0.35	0.35	0.37	0.39
CP7	0.44	0.33	0.32	0.32	0.33	0.35
CP17	0.38	0.29	0.29	0.29	0.30	0.34

შედეგებიდან გამომდინარე, ამოცანის მიხედვით, შეგვიძლია წინასწარ განვსაზღვროთ გაზომვების წარმოების პერიოდი, შედეგებზე დადებითი გავლენა

მოახდინა Geo-CORS-ის მუდმივმოქმედი სადგურების დამატებამ, მონაცემების დამუშავება არ იყო დამოკიდებული მხოლოდ ერთ პუნქტზე, რამაც გააუმჯობესა საბოლოო შედეგი.

ცხრილი 9

მეორე ციკლში ქსელის პუნქტების მდებარეობის განსაზღვრის სკმ სივრცეში

პუნქტი	საათების მიხედვით (3D) მმ.					
	1 საათი	2 საათი	3 საათი	4 საათი	5 საათი	6 საათი
CP1	1.17	0.84	0.80	0.80	0.89	0.98
CP2	1.17	0.81	0.75	0.75	0.83	0.91
CP6	1.04	0.70	0.68	0.68	0.74	0.78
CP7	0.88	0.63	0.61	0.61	0.67	0.71
CP17	0.77	0.55	0.54	0.54	0.61	0.67

შედეგების შესადარებლად და თანამგზავრული გაზომვებისთვის ოპტიმალური დროის შესარჩევად ავარჩიეთ ორი პუნქტის, CP1-ის და CP7-ის შედეგები. CP1 პუნქტს, რომელიც მდებარეობს ხეობის დასავლეთით, მთის კალთაზე და აქვს შეზღუდილი ცის თალის ხედვის კუთხე, ქონდა ყველაზე ცუდი შედეგი. ხოლო CP7-ს პირიქით, რომელსაც აქვს იდეალური ცის თალის ხედვის კუთხე, ქონდა კარგი შედეგი. ამ ორ პუნქტზე გაწონასწორებული განაზომების შედეგებზე დაყრდნობით აგებულია გრაფიკი (ნახ.6).



ნახაზი 6 - CP1 და CP7 პუნქტების გაწონასწორების შედეგები ორივე ციკლში

შედეგების შედარებით, გრაფიკზე კარგად ჩანს თუ როგორ მცირდება ცდომილებები ორივე ციკლში, გაზომვების დროის ზრდასთან ერთად. მიღებულ შედეგებზე დაყრდნობით შეგვიძლია ვამტკიცოდ, რომ საქართველოს პირობებში 2-3 საათიანი გაზომვებით, საბაზო სადგურის გარეშე და შემდგომ განაზომების Geo-CORS-ის ქსელის პუნქტების მიმართ დამუშავებით, მივიღოთ წერტილის მდებარეობის განსაზღვრის სიზუსტე სიბრტყეზე 0,5მმ ცდომილებით.

თუმცა, აღსანიშნავია, რომ პირველი და მეორე ციკლის სიზუსტეები განსხვავებულია. მიუხედავად იმისა, რომ მთლიანობაში შედეგები კარგია, ტენდენცია აშკარაა: მეორე ციკლის შედეგები დაახლოებით ორჯერ უფრო მაღალი სიზუსტისაა ვიდრე პირველის. ამ შემთხვევაში განმსაზღვრელია ის, თუ როდის და დღე-ღამის რა მონაკვეთში ჩატარდა სეანსი.

კვლევებმა გვიჩვენა, რომ კარგი ხარისხის განაზომების მისაღებად მიზანშეწონილია გაზომვები ვაწარმოოთ ღამით და გამთენიისას, 04:00-08:00 საათებში. სეანსის ოპტიმალური ხანგრძლივობა 2-3 საათი.

კუთხურხაზოვანი და თანამგზავრული განაზომებით მიღებული შედეგების შედარება. ბოლო რამოდენიმე წელია, ენგურჰესის კაშხლის გეგმური სადეფორმაციო საყრდენი ქსელის პუნქტები იზომება “Leica”-ს ფირმის ელექტრონული ტაქეომეტრით, რომელიც მიმართულებას ზომავს 0.5" სიზუსტით, ხოლო მანძილების გაზომვის სიზუსტე გამოისახება ფორმულით

$$a + b \times S \text{ km.} = 1.0\text{mm.} + 1.0 \times S\text{km}$$

შესაბამისად ენგურჰესის კაშხლის გეგმური სადეფორმაციო საყრდენი ქსელის პუნქტების მდებარეობის ცდომილება დაახლოებით ორ მილიმეტრამდეა (ცხრ.10).

ცხრილი 10

ელექტრონული ტაქეომეტრის განაზომებით ქსელის გაწონასწორებული შედეგები

პუნქტი	ქსელში პუნქტის მდებარეობის ს.კ.შ. მმ.		
	X	Y	სიბრტყეზე (2D)
CP1	0.83	0.91	1.23
CP2	0.91	0.99	1.34
CP6	1.11	0.99	1.49
CP7	1.34	1.19	1.79
CP17	1.10	1.06	1.53

თანამგზავრული მეთოდით მიღებული, როგორც პირველი ექვს საათიანი, ასევე მეორე ექვს საათიანი განაზომების, შედეგები ერთმანეთისაგან თითქმის არ განსხვავდებოდა, მაგრამ ჩვენი კვლევის საბოლოო მიზანს წარმოადგენდა, თანამგზავრული მეთოდებით მიღებული შედეგები შეგვედარებინა ტრადიციული მეთოდით წარმოებული გაზომვების შედეგებთან (ცხრ.11).

ცხრილი 11

ტრადიციული და თანამგზავრული მეთოდებით მიღებული განაზომებით, ქსელის გაწონასწორებული შედეგების შედარება

პუნქტი	ქსელში პუნქტის მდებარეობის ს.კ.შ. მმ.		
	ელექტრონული ტაქომეტრის განაზომები	GNSS განაზომების I ეტაპი	GNSS განაზომების II ეტაპი
CP1	1.23	0.59	0.51
CP2	1.34	0.48	0.45
CP6	1.49	0.44	0.39
CP7	1.79	0.43	0.35
CP17	1.53	0.40	0.34

შედარება საბოლოო დასკვნების შესაძლებლობას გვაძლევს, შესაძლებელი იქნებოდა თუ არა თანამგზავრული მეთოდის გამოყენება მაღალი სიზუსტის ქსელის შესაქმნელად?! რა სიზუსტეს მივაღწევდით და რაც მთავარია, საქართველოს რელიეფიდან გამომდინარე, Geo-CORS-ზე დაყრდნობით შევძლებდით თუ არა მაღალი სიზუსტის სანდო ქსელის შექმნას.

მეთორმეტე ცხრილში მოცემული შედეგები საშუალებას გვაძლევს დავამტკიცოთ, რომ თანამგზავრული განაზომები სამჯერ ზუსტია კლასიკურ მეთოდებთან შედარებით. თუმცა აქ ისიც უნდა ითქვას, რომ თანამგზავრული ტექნოლოგიებით სრულად ვერ ჩავანაცვლებთ კლასიკურ, კუთხურ-ხაზოვან მეთოდებს. მათი კომბინირებული გამოყენება კი ნამდვილად წინგადადგმული ნაბიჯია.

საყურადღებოა ის ფაქტი, რომ ვინაიდან საქართველოში გვქვს Geo-CORS-ის მუდმივმოქმედი საბაზო რეფერენსული სადგურების ქსელი და ყველა GNSS მიმღები ჩართულია ამ ქსელში, მაღალი სიზუსტის ახალი ქსელის შექმნისას

ელექტრონული ტაქეომეტრის განაზომებიც უნდა იყოს Geo-CORS-ის ქსელში ჩართული ანუ ყველა განაზომში უნდა შევიტანოთ Geo-CORS-ის შესწორება.

არსებულ და მიღებულ მონაცემებზე დაყრდნობით, ჩვენ შესაძლებლობა გვაქვს შევაჯამოთ კვლევის შედეგები და გამოვიტანოთ დასკვნები.

დასკვნა

- ✓ თანამგზავრული ტექნოლოგიების გამოყენებით მაღალი სიზუსტის გეოდეზიური საყრდენი ქსელის შესაქმნელად, ჰიდროტექნიკური ნაგებობების დეფორმაციული პროცესების კვლევის მიზნით, აუცილებელია: ქსელის ყველა პუნქტზე გაზომვები შესრულდეს ერთდროულად, Geo-CORS-ის ქსელში ჩართული GNSS მიმღები მოწყობილობებით, სტატიკურ რეჟიმში, საბაზო სადგურის გარეშე.
- ✓ კვლევებმა გვიჩვენა, რომ კარგი ხარისხის განაზომების მისაღებად მიზანშეწონილია გაზომვები ვაწარმოოთ ღამით და გამთენიისას. სეანსის ოპტიმალური ხანგრძლივობა 2-3 საათი.
- ✓ ჩატარებული კვლევების საფუძველზე შეგვიძლია ვამტკიცოთ, რომ საქართველოს პირობებში, დამუშავების პარამეტრის - „ცის თაღის ხედვის კუთხის“ ოპტიმალური მნიშვნელობაა 10° გრადუსი.
- ✓ თანამგზავრული ტექნოლოგიების გამოყენებით, საქართველოს პირობებში გაზომვების ხანმოკლე სეანსით, სიბრტყეზე შესაძლებელია წერტილის მდებარეობის განსაზღვრა 0,51მმ ცდომილებით. ხოლო სივრცეში 0,97მმ ცდომილებით.
- ✓ თანამგზავრული ტექნოლოგიების გამოყენებით მიღებული განაზომების შედეგები სამჯერ ზუსტია, ვიდრე იგივე ქსელზე კლასიკური, კუთხურ-ხაზოვანი გაზომვებით მიღებული შედეგები. თუმცა აქ ისიც უნდა ითქვას, რომ თანამგზავრული ტექნოლოგიებით, სრულად ვერ ჩავანაცვლებთ კლასიკურ, კუთხურ-ხაზოვან მეთოდებს. მათი კომბინირებული გამოყენება კი ნამდვილად წინგადადგმული ნაბიჯია.
- ✓ საყურადღებოა ის ფაქტი, რომ ვინაიდან საქართველოში გვაქვს Geo-CORS-ის მუდმივმოქმედი საბაზო რეფერენსული სადგურების ქსელი და ყველა GNSS მიმღები ჩართულია ამ ქსელში, მაღალი სიზუსტის ახალი ქსელის შექმნისას ელექტრონული ტაქეომეტრის განაზომებიც უნდა იყოს Geo-CORS-ის ქსელში ჩართული ანუ ყველა განაზომში უნდა შევიტანოთ Geo-CORS-ის შესწორება.
- ✓ საქართველოს პირობებში, სიზუსტის შემცირების გეომეტრიული ფაქტორის ანალიზის შედეგად სასურველია გამოვიყენოთ GPS-ის და GLONASS-ის თანამგზავრული სისტემები ერთდროულად.

- ✓ რაც შეეხება უპირატესობებს, განხილული მეთოდი დაკავშირებულია გარემოს დაცვასთან და უსაფრთხოებასთან, სამუშაოებისა და ადამიანური რესურსების შემცირებასთან.
- ✓ ამრიგათ, შეგვიძლია ვამტკიცოთ, რომ GNSS სისტემების გამოყენებით, სრულად შესაძლებელია გეგმური საყრდენი ქსელების უზრუნველყოფა მაღალი სიზუსტით.

ნაშრომის აპრობაცია:

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი საკითხების განხილვა ხდებოდა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის, საინჟინრო გეოდეზიისა და გეოინფორმატიკის დეპარტამენტის სემინარებზე კოლოქვიუმების სახით. ადრეთვე გაშუქდა სტუ-ის VI საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე „გლობალიზაცია და ბიზნესის თანამედროვე გამოწვევები“, თბილისი 2022წ. და საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენციაზე „მეცნიერებისა და განათლების აქტუალური გამოწვევები“, ბერლინი 2024წ.

პუბლიკაციები:

Chiaureli G., Sulaberidze G., Nemsitsveridze G., Sanikidze M. “Selection of the Optimal Time for Satellite Measurements in Order to Provide Support Geodetic Networks on the Example of Georgia” Proceedings of IX International Scientific and Practical Conference, Berlin, Germany, 6-8 May 2024, 192-196pp. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/05/CURRENT-CHALLENGES-OF-SCIENCE-AND-EDUCATION-6-8.05.24.pdf>

სულაბერიძე გ.ფ., ჭიაურელი გ.გ., სადუნიშვილი მ.ა., პაპავა დ.გ., გელაშვილი მ.ა. „სამონიტორინგო გეგმური ქსელის საყრდენი პუნქტების განსაზღვრა თანამგზავრული ტექნოლოგიების გამოყენებით“, საქართველოს საინჟინრო სიახლენი, თბილისი, #1(97), თბილისი, 2023, გვ.22-26; <https://doi.org/10.36073/1512-0287>

სულაბერიძე გ.ფ. „სადერივაციო გვირაბის კუთხურ-ხაზოვანი გაზომვების უზრუნველყოფა თანამგზავრული ტექნოლოგიების გამოყენებით“, საქართველოს საინჟინრო სიახლენი, თბილისი, #1(97), თბილისი, 2023, გვ.27-29; <https://doi.org/10.36073/1512-0287>

მათიაშვილი ნ., ჭიაურელი გ., სულაბერიძე გ., ძაძამია კ. „თანამგზავრული რადიონავიგაციური სისტემებით გეოდეზიური ქსელის შექმნის ძირითადი პრინციპები“, საქართველოს ნავთობი და გაზი #35, თბილისი, 2022. გვ.113-117; <https://gtu.ge/mining/research/journals.php>

სულაბერიძე გ.ფ. „თანამგზავრული დაკვირვებების მეთოდის შემუშავება საყრდენი გეოდეზიური ქსელების უზრუნველყოფის მიზნით“, სტუ-ის VI საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „გლობალიზაცია და ბიზნესის თანამედროვე გამოწვევები“-ს მონოგრაფების სერიიდან, თბილისი, 2022, გვ.291-294;
<https://doi.org/10.36073/978-9941-28-893-7>

RESUME

Development and research of methods of creating a support geodetic network, in order to observe the deformations of hydrotechnical structures

Depending on the type of engineering structure and the types of measurements, there are different methods of conducting geodetic works, which requires from the performer, deep knowledge of the theory of creating a geodetic base, balancing measurement results and accuracy assessment, as well as some experience of surveying and tracking works. As we know, the geodetic works on the engineering object will go through the following stages: survey, design, tracking, construction control and deformation observations for their safe operation. At each subsequent stage, the accuracy of the support network should be higher than at the previous stage. This requires a special non-standard approach to the design of support geodetic networks, namely, the creation of local support networks. In the creation of engineering geodetic networks, the most important role is played by the accuracy of determining the mutual location of points.

The arrangement of the points of the planned geodetic network mostly takes place in relatively elevated points of the territory; Placement of rappers and benchmarks of the elevated network in the lowest possible places. In both planned and elevated networks periodically, every 25-30 years, points are reconnoitred and restored. Repeated measurements and mathematical processing are also performed in this type of networks. Especially in the Caucasus region, which is characterized by high seismic activity and frequent earthquakes. Therefore, the risks of breaking the geometric connection between the points of the support network are high.

The traditional methods of creation the planar support geodetic networks are: triangulation, polygonometry and trilateration. From here, the triangulation method is more common, the elements of which can be not only triangles, but also more complex figures: quadrilaterals and central systems. The advantage of this method is that there are many redundant measurements in the network, which allows us to conduct reliable control in the process of measurements, as well as high accuracy in determining the mutual location. The balancing of measurements is mainly done by methods of correlations or parameters. The

method of triangulation is very popular, both during the creation of state and local geodetic networks.

According to the instructions, the creation of the state support network is based on the following principle: first, a high-precision network must be created, and then it is increased by points with relatively small distances. Such a principle allows the required area to be covered with a sufficient number of points, which ultimately gives us the opportunity to carry out topo-geodetic planning, to implement such engineering tasks as provision of engineering geodetic points of the hydrotechnical structure's support network or other types of infrastructure projects.

Since 2010, a network of permanent base stations has been operating on the territory of Georgia, the backbone of which is seven A-class points, and as mentioned above, it is frequented by B-class points (30 points in total). However, no attempt has yet been made to increase the frequency of subclass clauses based on them.

Geo-CORS provides an opportunity to develop land, sea and air navigation geodetic systems, environmental protection and transport safety, to create and improve geo-information systems. Also, the production of land cadastre should move to a qualitatively new stage in the country. Using the Geo-CORS network, both engineering and land surveying works will be performed with maximum accuracy, accelerated methods and much cheaper equipment, which contributes to construction planning, agricultural development, and improvement of the activities of engineering-design and surveying companies.

Geo-CORS, which is a state geodetic network supported by satellite methods, is not counted by traditional methods. Therefore, the question arises why I should not use the same methods when creating local support networks.

Planned monitoring (triangulation) network of Enguri arch dam is represented by 26 points. The five furthest from the arch dam are anchor points for this monitoring network. Based on this network, the study of deformation processes of the dam using geodetic methods has been carried out continuously for many years. It can be called the most frequently measured network in Georgia.

During the field survey, we conducted six hours of full-scale measurements in two sessions, day and night, simultaneously at all anchor points of the arch dam's monitoring network. Since we made the mentioned measurements without a GPS base station, we used Geo-CORS Kutaisi, Mestia and Poti type B stations to process the received data and get the results.

The accuracy of satellite measurements is influenced by several factors: the reduction of accuracy factor (DOP) and the angle of view of the sky arch. The duration of the session is also important.

In the process of camera studies, the desired time and duration for measurements were selected, under the conditions of Georgia. Also, determination of the optimal values of the angle of view of the sky arch and the geometric factor of reduction of accuracy.

Studies in the paper show that accuracy increases as the length of the observation session increases. With properly selected time and duration, it is possible to have a mean square deviation of the location of grid points within 0.33 mm.