

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო  
უნივერსიტეტის მიხეილ ნოდუას  
გეოფიზიკის ინსტიტუტის შრომები

ნ. ვარამაშვილი, თ. ჭელიძე, მ. დევიძე,  
ვ. ჩიხლაძე

გარეშე ფაქტორებით ტრიგერირებული მეწყრების  
ლაბორატორიული და მათემატიკური მოდელირება.  
საველე კვლევები



თბილისი  
2017

ISSN 1512-1135

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო  
უნივერსიტეტის მიხეილ ნოდია  
გეოფიზიკის ინსტიტუტის შრომები, ტ. LXVIII

**ნ. ვარამაშვილი, თ. ჭელიძე, მ. დევიძე, ვ. ჩიხლაძე**

გარეშე ფაქტორებით ტრიგერირებული მეწყრების  
ლაბორატორიული და მათემატიკური მოდელირება. საველე  
კვლევები

**Transactions of Mikheil Nodia Institute of Geophysics  
of Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, vol. LXVIII**

**N. Varamashvili, T. Chelidze, M. Devidze, V. Chikhladze**

**Laboratory and mathematical modeling of landslides triggered  
by external factors. Field research**

**Труды Института геофизики им. Михаила Нодиа  
Тбилисского Государственного Университета им. Иванэ  
Джавахишвили, том LXVIII**

**Н. Варамашвили, Т. Челидзе, М. Девидзе,  
В. Чихладзе**

**Лабораторное и математическое моделирование  
триггерированных внешними факторами оползней.  
Полевые исследования**

თბილისი  
Tbilisi-2017-Тбилиси

## სარედაქციო-საგამომცემლო საბჭო

აბაშიძე ვ. (მთავარი რედაქტორი), ადამია შ., ამირანაშვილი ა. (მდივანი), აჯიევი ა. (ყაზარდო-ბალყარეთის რესპუბლიკა, რუსეთი), ბენდერევი ა. (ბულგარეთი), ბოლაშვილი ნ., გამყრელიძე ე., გველესიანი ა., გვენცაძე თ., გოგიჩაიშვილი ა. (მექსიკა), დარახველიძე ლ. (მთავარი რედაქტორის მოადგილე), ელიზბარაშვილი ე., ვარამაშვილი ნ., ზაალიშვილი ვ. (რესპუბლიკა ჩრდილოეთ ოსეთი-ალანია, რუსეთი), თავართქილაძე კ., კვინიკაძე მ., კერესელიძე ზ., კორძაძე ა., მამმადლი ტ. (აზერბაიჯანი), მელიქაძე გ., მეტრეველი გ., მინდელი პ., პეტროსიანი ჰრ. (სომხეთი), პოვოლოცკაია ნ. (რუსეთი), ჟოვინსკი ე. (უკრაინა), სენიკი ი. (რუსეთი), ტატიშვილი მ., ქართველიშვილი კ., ქირია ჯ., ღლონტი ნ., ჩაგელიშვილი გ., ჭელიძე თ., ხარშილაძე ო., ხვედელიძე ზ.

## THE EDITORIAL AND PUBLISHING BOARD

*Abashidze V. (Editor-in-Chief), Adamia Sh., Adjiev A. (Kabardino-Balkar Republic, Russia), Amiranashvili A. (secretary), Benderev A. (Bulgaria), Bolashvili N., Chagelishvili G., Chelidze T., Darakhvelidze L. (Associate Editor), Elizbarashvili E., Gankrelidze I., Ghlonti N., Gogichaishvili A. (Mexico), Gvelesiani A., Gventsadze T., Kartvelishvili K., Kereselidze Z., Kharshiladze O., Khvedelidze Z., Kiria J., Kordzadze A., Mammadli T. (Azerbaijan), Kvinikadze M., Melikadze G., Metreveli G., Mindeli P., Petrosyan Hr. (Armenia), Povolotskaia N. (Russia), Senik I. (Russia), Tatishvili M., Tavartkiladze K., Varamashvili N., Zaalishvili V. (Republic of North Ossetia-Alania, Russia), Zhovinsky E. (Ukraine).*

## РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ СОВЕТ

Абашидзе В.Г. (главный редактор), Адамия Ш.А., Аджиев А.Х. (Кабардино-Балкарская Республика, Россия), Амиранашвили А.Г. (секретарь), Бендерев А.Д. (Болгария), Болашвили Н.Р., Варамашвили Н.Д., Гамкрелидзе И.П., Гвелесиани А.Г., Гвенцадзе Т.Г., Глonti Н.Я., Гогичаишвили А.Т. (Мексика), Дарахвелидзе Л.К. (заместитель главного редактора), Жовинский Э.Я. (Украина), Заалишвили В.Б. (Республика Северная Осетия-Алания, Россия), Картвелишвили К.З., Квиникадзе М.С., Кереселидзе З.А., Кириа Дж.К., Кордзадзе А.А., Маммадли Т. (Азербайджан), Меликадзе Г.И., Метревели Г.С., Миндели П.Ш., Петросян Г.М. (Армения), Поволоцкая Н.П. (Россия), Сеник И.А. (Россия), Таварткиладзе К.А., Татишвили М.Р., Харшиладзе О.А., Хведелидзе З.В., Чагелишвили Г.Д., Челидзе Т.Л., Элизбарашвили Э.Ш.

კრებული გამოდის 1936 წლიდან და მოიცავს გეოფიზიკის ყველა მიმართულებას. კრებულში იბეჭდება სამეცნიერო სტატიები, მონოგრაფიები, მიმოხილვები, მოკლე ინფორმაციები, დისკუსიები, წიგნების მიმოხილვები, განცხადებები სამ - ქართულ, ინგლისურ და რუსულ ენაზე. პუბლიკაციები უფასოა. კრებული არის საერთაშორისო რეფერირებადი, რეცენზირებადი და ციტირებადი გამოცემა; ჩართულია საერთაშორისო ელექტრონულ საბიბლიოთეკო მონაცემთა ბაზა *DSpace* - ში. მისი ინდექსირება ხდება *Google Scholar* და *Publish or Perish* - ში. გამოდის, როგორც წესი, წელიწადში ერთხელ, სტატიების დაგროვების მიხედვით. საჭიროების შემთხვევაში შესაძლებელია წელიწადში რამდენიმე კრებულის გამოცემა.

The Transactions include all branches of the Geophysics. It is published since 1936. Types of contributions are: research papers, monographs, reviews, short communications, discussions, book reviews, and announcements on any of three languages - Georgian, English, Russian. Publications are free of charge. Transactions are international referred, peer-reviewed and cited edition; they are included in the international electronic library data base *DSpace*, indexed in *Google Scholar* and *Publish or Perish*. The Transactions published in proportion to the accumulation of articles, usually once per annum. If necessary several publications per annum are possible.

Сборник охватывает все направления геофизики. Издается с 1936 года. В сборнике публикуются научные статьи, монографии, обзоры, краткие информации, дискуссии, обозрения книг, объявления на любом из трех языков – грузинский, английский, русский. Публикации бесплатные. Сборник является международным реферируемым, рецензируемым и цитируемым изданием; включен в международную электронную библиотечную базу данных *DSpace*. Индексируется в *Google Scholar* и *Publish or Perish*. Издается по мере накопления статей, обычно раз в год. При необходимости возможно несколько изданий в год.

#### სარედაქციო-საგამომცემლო საბჭოს მისამართი:

საქართველო, 0160, თბილისი, ალექსიძის ქ. 1, მ. ნოდიას სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი  
Tel.: 233-28-67; Fax: (99532) 2332867; e-mail: avtandilamiranashvili@gmail.com

#### Address of the Editorial and Publishing Board:

M. Nodia Institute of Geophysics, 1 Alexidze Str., 0160 Tbilisi, Georgia  
Tel.: 233-28-67; Fax: (99532) 2332867; e-mail: avtandilamiranashvili@gmail.com

#### Адрес редакционно-издательского совета:

Грузия, 0160, Тбилиси, ул. Алексидзе, 1. Институт геофизики им. М. З. Нодиа  
Тел: 233-28-67; Fax: (99532) 2332867; e-mail: avtandilamiranashvili@gmail.com

ელექტრონული ვერსიის მისამართი

The address of electronic version

Адрес электронной версии

<http://dspace.gela.org.ge/handle/123456789/254>



### ანოტაცია

წიგნში წარმოდგენილია გარეშე ფაქტორებით ტრიგერირებული მეწყერების ლაბორატორიული და მათემატიკური მოდელირების და სავსე კვლევების შედეგები, რომლებიც ტარდებოდა 2014-2017წწ. შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის პროექტის FR/258/9-160/13-ის ფარგლებში. აღნიშნული სამუშაოების ჩასატარებლად აწყოილი იქნა რამდენიმე ექსპერიმენტული დანადგარი. კერძოდ ზამბარა-ბლოკის და ბურიჯ-კნოპოვის ტიპის დანადგარები, მეწყერი მოვლენების პროცესში მიმდინარე არათანაბარი ხახუნის (სტიკ-სლიპის) მოვლენების შესასწავლად. აწყო დანადგარები, სადაც შესაძლებელია დახრის კუთხის ცვლილება და ექსპერიმენტების ჩატარება გარემოს ტენიანობის და გაწყლიანების ცვლილების პირობებში. ჩატარებული იქნა ასევე სავსე გეოფიზიკური კვლევები საქართველოს რამდენიმე მეწყერზე. ჩატარდა ლაბორატორიული სამუშაოები აკუსტიკური ემისიის საშუალებით მეწყერების კვლევაზე. ჩატარებულია სტიკ-სლიპის პროცესის მათემატიკური და რიცხვითი მოდელირების სამუშაოები. შემუშავდა მეწყერის მათემატიკური მოდელი, უსაფრთხოების კოეფიციენტის გამოთვლის მეთოდები. შეფასდა რამდენიმე მეწყერის უსაფრთხოების კოეფიციენტები. შეფასდა ტრიგერირების პირობები გარეშე პერიოდული ზემოქმედების და ტენიანობის ცვლილების შემთხვევებში.

განკუთვნილია მეცნიერ მუშაკებისა და ინჟინრებისთვის, ლექტორებისთვის, სტუდენტებისთვის, სამთავრობო და არასამთავრობო ორგანიზაციებისათვის, რომელთა საქმიანობა დაკავშირებულია დედამიწის ფიზიკის, ეკოლოგიის და სხვა პრობლემებთან.

**საკვანძო სიტყვები:**

UDC 550.3 + 624.131:543

### Summary

The book presents, laboratory and mathematical modeling and field research results, from external factors triggered landslides, which were carried out in 2014-2017 years, in the Shota Rustaveli National Science Foundation Project # FR/258/9-160/13 frame. For the carrying this works have been assembled several experimental equipment. The spring-block and Burrige-Knopoff type devices, for study stick-slip events by landslides. Were assembled devices, where it is possible to change the angle of tilt and experimentation environment moisture. Were also conducted field geophysical researchs on several Georgian landslides. Laboratory works was carried out by means of landslides research using acoustic emission. Conducted mathematical and numerical modeling research of stick-slip process. Has been developed a landslide mathematical model and the safety coefficient calculation methods. Were assessed safety coefficients for some landslides. Were assessed triggering conditions by external periodical forcing and humidity change.

It is intended for the scientific workers and engineers, lecturers, students, government and nongovernmental organizations, connected in their activity with the problems of solid earth physics, ecology, etc.

**Key words:**

УДК 550.3+ 624.131:543

### Аннотация

В книге представлены результаты полевых исследований, а также лабораторного и математического моделирования оползней, триггерированных внешними факторами, проведенных в 2014-2017 годах в рамках проекта FR/258/9-160/13 Национального научного фонда им. Шота Руставели. Для проведения указанных работ было собрано несколько экспериментальных установок. В частности были собраны установки по типу пружинно-блочного и Бурридж-Кнопова для изучения явлений неравномерного трения (стик-слип), происходящих в процессе оползневых явлений. Собрана установка на которой возможно менять угол наклона, а также проводить эксперименты в условиях изменения влажности среды и обводнения материала. Были проведены также полевые геофизические исследования на нескольких оползнях на территории Грузии. Проведены лабораторные работы по изучению оползней с (применением) регистрацией акустической эмиссии. Были проведены работы по математическому и численному моделированию процессов стик-слипа. Разработана математическая модель оползня, методы вычисления коэффициента безопасности. Произведена оценка коэффициента безопасности нескольких оползней. Была произведена оценка условий триггерирования в случае внешнего периодического воздействия и изменения влажности.

Предназначена для научных работников и инженеров, лекторов, студентов, правительственных и неправительственных организаций, связанных в своей деятельности с проблемами физики Земли, экологии и др.

**Ключевые слова:**

რედაქტორი პროფესორი ვ. აბაშიძე

Editor Professor V. Abashidze

Редактор Профессор В. Абашидзе

რეცენზენტები: აკად. ხარ. დოქტ. გ. ჯაში

აკად. ხარ. დოქტ. ი. ირემაშვილი

Reviewers: doct. of acad. degr. G. Jashi

doct. of acad. degr. I. Iremashvili

Рецензенты: докт. акад. степ. Г. Джаши

докт. акад. степ. И. Иремашвили

ISSN 1512-1135

## წინასიტყვაობა

აღნიშნული ნაშრომი განხორციელდა შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური ხელშეწყობით (გრანტი N FR/258/9-160/13 “გარეშე ფაქტორებით ტრიგერირებული მეწყრების ლაბორატორიული და მათემატიკური მოდელირება. სავლე კვლევები”). წინამდებარე პუბლიკაციაში გამოთქმული ნებისმიერი აზრი ეკუთვნის ავტორებს და შესაძლოა არ ასახავდეს შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის შეხედულებებს.

პროექტის შესრულების დროს მიღებული შუალედური შედეგები მოხსენებული იყო თსუ–ს მ. ნოდინას გეოფიზიკის ინსტიტუტის სამეცნიერო საბჭოს სხდომებზე, გეოფიზიკის ინსტიტუტის სემინარებზე, ოთხ საერთაშორისო კონფერენციაზე: პრატა, ჩეხეთი, 2015 წ., 22 ივნისი -2 ივლისი – 1 მოხსენება [137]; პერუჯა, იტალია 2016 წ., 14-15 სექტემბერი – 1 მოხსენება [138]; თბილისი, 2016 წ., 28–30 ნოემბერი – 1 მოხსენება [139]; დავოსი, შვეიცარია, 2017 წ., 14-17 მარტი – 1 მოხსენება [140].

გამოქვეყნებულია 5 სტატია [134, 135, 136, 163, 164], განხილვის პროცესშია - 1 [162]

პროექტის და ამ ნაშრომის შესრულებაში მონაწილეობა მიიღეს შემდეგმა პირებმა:

ძირითადი პერსონალი: დ. ტეფნაძე, წიგნის ქვეთავი 4.1, 4.2, 6.2, 6.3;

დამხმარე პერსონალი: ზ. ჭელიძე, წიგნის ქვეთავი 6.2, 6.3; ა. სურმავა, წიგნის ქვეთავი 7.4; ხ. ჩარგაზია, წიგნის ქვეთავი 2.5; დ. ამილახვარი, წიგნის ქვეთავი 5.2, 7.3; ლ. დვალი, წიგნის ქვეთავი 5.2, 7.3; ნ. ჯავახიშვილი, წიგნის ქვეთავი 5.4;

ავტორები მადლობას უხდებიან პროექტის ყველა მონაწილეს.

## შესავალი

მეწყრული და ღვარცოფული პროცესების ძლიერ ზეგავლენას პერიოდულად განიცდის ასეულობით დასახლებული პუნქტი, სასოფლო-სამეურნეო სავარგულები, გზები, ნავთობის და გაზსადენების ტრასები და სხვ. სტიქიის საშიშროების არეალში მოქცეულია თითქმის მთელი საქართველო. მიწისძვრები და მეწყრები რჩებიან ძირითად ბუნებრივ საშიშროებად ადამიანის სიცოცხლისა და ჯანმრთელობისათვის. მეწყერი ასევე ერთი მნიშვნელოვანი საშიშროებაა ადამიანის ცხოვრების, ეკონომიკისა და ინფრასტრუქტურისათვის. მეწყერი ხშირად ტრიგერირდება მიწისძვრიდან ან მცირე გარე ზემოქმედებისაგან [74,79,80,81]. მაგალითად, 1991-92 წლებში რაჭის მიწისძვრის დროს საქართველოში 20 ათასი მეწყერი გააქტიურდა და რამდენიმე ახალი წარმოიქმნა [131]. ბუნებრივია, რომ განსაკუთრებულად მძიმე ვითარებაა შექმნილი მთიან რეგიონებში, სადაც სტიქიის ექსტრემალური გააქტიურების პირობებში არცთუ იშვიათად საჭირო ხდება მოსახლეობის აყრა ისტორიულად დამკვიდრებული საცხოვრებელი ადგილებიდან. ყველაზე საგანგაშო კი ის არის, რომ ამ მოვლენებს ხშირად თან სდევს ადამიანთა მსხვერპლი. სტიქიის ექსტრემალური განვითარების შემთხვევაში ზარალი ასეულ მილიონებს აჭარბებს. საქართველოს შემთხვევაში წარმოდგენილი პროექტის პრაქტიკული მნიშვნელობა ძალზედ დიდია, ვინაიდან განხილვის პროცესში მყოფი რამდენიმე დიდი საინჟინრო პროექტის (კაშხლები, გაზის მიწისქვეშა საცავი და ა. შ.) რეალიზების შემდეგ, შესაძლებელია დედამიწის ქერქში არსებული დამაბულობების შეცვლა. იმის გათვალისწინებით, რომ საქართველო მდებარეობს სეისმურად აქტიურ რეგიონში, აუცილებელია იმის შესწავლა თუ რა შედეგები შეიძლება გამოიწვიონ მეწყრების/სეისმური პროცესის დინამიკაში (როგორცაა ტრიგერირება და სინქრონიზაცია) დამაბულობის ამ მცირე ცვლილებებმა. [63].

საჭიროა მეწყრული და ღვარცოფული პროცესების მომზადების და მიმდინარეობის საფუძვლიანი შესწავლა, რათა მოიძებნოს მათი საშიშროების და რისკის შემცირების გზები.

ფართომასშტაბიანი ექსპერიმენტები და სავლე დაკვირვებები გვიჩვენებს, რომ მეწყერმა შეიძლება გამოავლინოს ნელი და სტაბილური სრიალი, ეპიზოდური სტიკ-სლიპი ან უეცარი აჩქარება.

შემოთავაზებული სამუშაოს მიზანია განავითაროს საბაზისო კვლევები წარმოდგენილი მიმართულებით. მათ შეუძლიათ ნათელი მოკვინონ მეწყრების გენერაციის ფიზიკურ მექანიზმს, დაგვებმაროს მეწყრების და სეისმური პროცესის თეორიული მოდელის გაუმჯობესებაში და რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, შეიძლება დაგვებმაროს კრიტიკული მდგომარეობის მიახლოებისას მეწყერზე და სეისმურ პროცესზე მცირე გარეშე ზემოქმედების გავლენის მექანიზმის საფუძვლების გარკვევაში. ეს შედეგები დაგვებმარება შემდგომი სამუშაოების წარმართვაში: მეწყრების მონიტორინგის ოპტიმალური მეთოდების შემუშავებაში და მეწყერის საშიშროების შემცირების პრაქტიკული საშუალებების შემუშავებაში.

ზემოთქმულის გათვალისწინებით იყო წარდგენილი და შესრულდა პროექტი FR/258/9-160/13 „გარეშე ფაქტორებით ტრიგერირებული მეწყრების ლაბორატორიული და მათემატიკური მოდელირება. სავლე კვლევები“. პროექტის ფარგლებში პირველად იქნა დაყენებული შემდეგი მიზანი და ამოცანები.

პროექტის მიზანი: მოახდინოს მეწყერის გენერაციის ზოგადი დინამიკის მოდელირება და შეაფასოს, სუსტი გარეშე ზემოქმედების და გარემოს ფიზიკური

პარამეტრების გავლენის ხასიათი მეწყერების განაწილების და დინამიკურ მახასიათებლებზე და ჩატარდეს სავსე კვლევები რამდენიმე სახიფათო მეწყერზე.

პროექტის მიზნის მისაღწევად დაგეგმილი იყო შემდეგი კვლევა:

სტიკ-სლიპის ლაბორატორიულ და რიცხვით მოდელებზე ჩატარდეს ანალიზი, თუ რა პირობებში შეუძლია სუსტ გარეშე ზემოქმედებას მოახდინოს გავლენა (შეამციროს ან გაზარდოს), კრიტიკულ მდგომარეობასთან ახლოს მყოფ სისტემაში, ძლიერი მოვლენის მოხდენის ალბათობაზე, ლაბორატორიულ პირობებში გასრიალების აკუსტიკური და დეფორმაციული წინამორბედების შესწავლის საფუძველზე.

ჩვენ ასევე დაგვეგმეთ გარემოს გაწყლიანების, მტვრის ფრაქციების და რაოდენობის გავლენის შესწავლა კრიტიკულ მდგომარეობასთან ახლოს მყოფ სისტემაში ძლიერი მოვლენის დაწყების ალბათობაზე.

შედარებით ძლიერი დინამიკური მოვლენის (სრიალის) აკუსტიკური და დეფორმაციული წინამორბედის შესწავლა ლაბორატორიული პირობებში საქართველოში, გარემოს სხვადასხვა პირობებში (წვიმა, ტემპერატურა) სეისმურად გამოწვეული მეწყერების შესწავლა და სავსე და მოდელირებული მონაცემების შედარება.

აღნიშნული კვლევა ითვალისწინებდა შემდეგი ოთხი მთავარი ამოცანის გადაწყვეტას:

1. ტრიგერების და არამდგრადი ხახუნის (სტიკ-სლიპის) ლაბორატორიული მოდელირება. ტრიგერების და არამდგრადი ხახუნის (სტიკ-სლიპის) ლაბორატორიული მოწყობილობის, როგორც მეწყერის ტრიგერების და სეისმური პროცესის ხარისხობრივი ანალოგის გაუმჯობესება, ჩვეულებრივი და მასიური ქვედა ფილის შემთხვევაში; დანადგარის აწყობა ერთი მოსრიალე ფილისათვის და რამდენიმე, ერთმანეთზე ზამბარებით დამაგრებული (ბურიჯ-კნოპოვის მოდელი), მოსრიალე ფილისათვის. მეწყერების სეისმური ტრიგერების

მოდელირებისათვის კონტროლირებადი მექანიკური დატვირთვის გაუმჯობესება, ტენიანობის და ფილებს შორის გაწყლიანების ცვლა. ტრიგერების და სტიკ-სლიპის პროცესის შესწავლა ბაზალტის ფილებს შორის სხვადასხვა გარემო პირობებში, სხვადასხვა ფრაქციის და ტიპის მარცვლოვანი მასალისათვის, დახრილი და ჰორიზონტალური სრიალის შემთხვევაში. გათვალისწინებულია გარემოს ტემპერატურის, ტენიანობის და ფილებს შორის გაწყლიანების ცვლა.

2. მეწყერის მოდელირების ექსპერიმენტებში მოსრიალე ფილებში ფხვიერი მასალის (ქვიშა, თიხა, ქვიშის და თიხის ნარევი, მათ შორის მეწყერული სხეულიდან აღებული მასალა) გამოყენება. ფხვიერი მასალის გროვის დადება ბაზალტის დიდ ფილაზე, რომლის დახრაც შეიძლება შეიცვალოს. ფხვიერი მოსრიალე ფილის გაწყლიანების ცვლა. სისტემაზე მექანიკური ან ელექტრული ზემოქმედების მოდება. ფხვიერ მოსრიალე მასა შეიძლება გაიყოს რამდენიმე ფენად, სხვადასხვა ფენაში სხვადასხვა პირობებით. ექსპერიმენტების სერია ფხვიერ მოსრიალე ბლოკზე სხვადასხვა ნარევი/ტენიანობის პროპორციის გამოყენებით.

3. გომბორის და სხვა მეწყერულ ზონებში სავსე კვლევების ჩატარება. გეომორფოლოგიური მონაცემთა ბაზის შედგენა: სრიალის კუთხე, ქანების სახეობები, ეროზია, მოძრაობის ისტორია და ა.შ. მეწყერული მიდამოს გაწყლიანება, წყლის დონის სტრუქტურის და სხვა პარამეტრების დასადგენად გეოფიზიკური კვლევების ჩატარება. მეწყერის დასრიალების ფაქტორის შეფასება სხვადასხვა მეწყერული უბნებისათვის.

4. სტიკ-სლიპის მათემატიკური და რიცხვითი მოდელის შედგენა ერთი ზამბარა-ბლოკის სისტემის შემთხვევაში. ერთგანზომილებიანი ბურიჯ-კნოპოვის მოდელის

რიცხვითი მოდელირება სხვადასხვა რაოდენობის ბლოკების, ხახუნის და დრეკადი პარამეტრებისათვის; სტიკ-სლიპის შემთხვევების ზომების და დროითი განაწილების მახასიათებლებზე მოდებული სუსტი გარეშე დატვირთვის ზემოქმედების კვლევა. მეწყერის მოდელირება: მოძრაობის დინამიკის მოდელირება, სხვადასხვა დახრის კუთხეებისათვის, სხვადასხვა ტენიანობისათვის, სხვადასხვა შედგენილობისათვის.

პროექტის შედეგების სამეცნიერო ინტერესი იმაში მდგომარეობს, რომ ახალი ცოდნა იქნას მიღებული ცოცვის ზედაპირზე, მეწყერის გენერაციის სტატისტიკური და დინამიკური თავისებურებების შესწავლა, ისევე როგორც მასზე გარეშე ზემოქმედების შეფასება. წარმოდგენილ პროექტში უნდა აეწყოს BB (ბაზალტი-ბაზალტი) ტიპის ზამბარა-ბლოკის დანადგარი, დრეკადად შეერთებული ბლოკების სისტემა, ფხვიერი მოსრიალე მასა, სადაც შესაძლებელი იქნება დახრის კუთხის, გაწევის ძალის, გარემოს ტემპერატურის და ტენიანობის ცვლა.

ამგვარად, შეიძლება დავასკვნათ, რომ მეწყერების დინამიკის კვლევა ისევე როგორც მცირე გარეშე ზემოქმედებით გამოწვეული ცვლილებების ბუნება რჩება ერთ-ერთ მნიშვნელოვან საკითხად გეოფიზიკაში და გეომორფოლოგიაში. განსაკუთრებული ინტერესის საგანია ის, თუ სუსტ ბუნებრივ ან კონტროლირებად ანთროპოგენულ ზემოქმედებას როგორ შეუძლია შეცვალოს (გაზარდოს/შეამციროს) დიდი მასების ამოძრავების ალბათობა.

მეწყერმა მოდელირების ლაბორატორიული ექსპერიმენტები შეიძლება ჩატარდეს ერთი ზამბარა-ბლოკის მოდელზე და მრავალი ბლოკის მოდელზე (ბურიჯ-კნოპოვის მოდელი). მეწყერების კვლევა ასევე დაკავშირებულია სტიკ-სლიპის მოდელთან [73,117]. ამგვარად, სეისმური მოვლენების და მეწყერების შესასწავლი ლაბორატორიული მოდელები ერთმანეთს ჰგავს და შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც მეწყერის და ასევე სეისმური პროცესის შესასწავლად. იგივე შეიძლება ითქვას მათემატიკურ და რიცხვით მოდელებზე. ამგვარად, სტიკ-სლიპის შესწავლა დაგვეხმარება არა მხოლოდ მეწყერის, არამედ სეისმური პროცესის შესწავლაშიც.

## თავი 1 მეწყერები: მიმოხილვა

### 1.1 პრობლემის აქტუალობა. მეწყერი როგორც გეოფიზიკური საშიშროება

ჩვენ შეგვიძლია განვსაზღვროთ მეწყერი, როგორც გრავიტაციის მიზეზით გამოწვეული, ქანების, ნამტვრევების ან გრუნტის მოძრაობა. მეწყერების უმეტესობა ძალიან მცირეა. დიდმა მეწყერებმა შეიძლება გავლენა მოახდინოს ადგილობრივი წყლების დინებებზე და ადგილობრივ დასახლებებზე. დიდმა ჩამოქცევებმა შეიძლება გამოიწვიოს კატასტროფები და შეცვალოს გეომორფოლოგიური გარემო რამდენიმე კვადრატულ კილომეტრზე მიდამოში. ზოგიერთი მეწყერი ვითარდება ძალიან ნელა, და სპეციალური აპარატურაა საჭირო რათა გავიგოთ, რომ ისინი, ფაქტობრივად, მოძრავი არიან. სხვა შეიძლება მოძრაობდეს 100 კმ / სთ-ზე სწრაფად. ზოგიერთი მათგანი იწყება ცოცვით, შეუმჩნეველი მოძრაობით, შემდეგ მოულოდნელად აჩქარდება და გადაიზრდება კატასტროფულ ნარჩენების ზვაში. ზოგიერთი მეწყერი მოძრაობს სითხის მსგავსად. დანარჩენები მარცვლოვანი ნაკადების მსგავსად. ბევრი მეწყერი წყვეტს მოძრაობას უზარმაზარ ტერიტორიებზე დაზიანების მიყენების გარეშე; სხვა შედის ზღვაში და ზიანს აყენებს ასობით კილომეტრის მოშორებით.

წარმოდგენილი პროექტის საბოლოო მიზანი არის მეწყერის მომზადების პროცესის დინამიკის ყოვლისმომცველი გამოკვლევა. კერძოდ, ლაბორატორიული ცდებით და რიცხვითი მოდელირებით, ჩვენ გვინდა შევაფასოთ გარეშე სუსტი ზემოქმედების ან გავლენის (ანუ, ტენიანობის, სეისმური რყევის, ტემპერატურის და სხვა პარამეტრების ცვლილებით) ეფექტი მეწყერის და სეისმური პროცესის მოხდენის ალბათობაზე. დედამიწის ზედაპირი არის დინამიური, არა სტატიკური და რელიეფი იცვლება დროში ამინდის და ზედაპირული პროცესების: ეროზიის, დანალექის გადატანის და დალექვის, გამო. ამ ცვლილებებმა შეიძლება მნიშვნელოვანი ზიანი მიაყენოს სამოქალაქო საინჟინრო პროექტებს. მეწყერი მნიშვნელოვანი ბუნებრივი გეომორფული პროცესია, რომელიც აყალიბებს მთიან ტერიტორიებს და ახდენს ნალექების გადანაწილებას [59].

ფართომასშტაბიანი ექსპერიმენტები და სავლე დაკვირვებები გვიჩვენებს, რომ მეწყერმა შეიძლება გამოავლინოს ნელი და სტაბილური სრიალი, ეპიზოდური სტიკ-სლიპი ან უეცარი აჩქარება. მიწისძვრები და მეწყერები რჩებიან ძირითად ბუნებრივ საშიშროებად ადამიანის სიცოცხლისა და ჯანმრთელობისათვის. მეწყერი ასევე ერთი მნიშვნელოვანი საშიშროებაა ადამიანის ცხოვრების, ეკონომიკისა და ინფრასტრუქტურისათვის. მეწყერი ხშირად ტრიგერირდება მიწისძვრიდან ან მცირე გარე ზემოქმედებისაგან [74,79,80]. ამიტომ მიწისძვრის მახასიათებლების, სტატისტიკის დინამიკის გაგება, რათა გავიგოთ მეწყერების ფიზიკური ბუნება და შევამციროთ მათი რისკი, მნიშვნელოვანი სამეცნიერო და პრაქტიკული პრობლემაა.



## პრობლემის აღწერა

მეწყერი ითვლება ერთ-ერთ ყველაზე დამანგრეველ ბუნებრივ პროცესად; ის აზიანებს და ხშირად მთლიანად ანადგურებს ადამიანთა დასახლებებს და გავლენას ახდენს ეკონომიკურ საქმიანობაზე, განსაკუთრებით მთაში. ცნობილია, რომ დედამიწის მოსახლეობის 10%-ზე მეტი ცხოვრობს მთებში ან მთისწინა რეგიონებში [60]. მეწყერი ძალზედ გავრცელებულია კავკასიაში. წარსულში ან ახლახან მომხდარი ყველაზე გიგანტური მეწყერები დაკავშირებულია მიწისძვრებთან და ვულკანურ ამოფრქვევებთან, თუმცა ძლიერმა ნალექმა და ადამიანის საქმიანობამ ასევე შეიძლება გამოიწვიოს მასების მოძრაობები, რასაც მიაქვს ნიადაგი და დანალექი მთის ფერდობებიდან და ახდენს უარყოფით ზეგავლენას უზარმაზარ მთიან ტერიტორიებზე [21,143,11,44,2,1].



ნახ.1.1. 1988 წლის მეწყერი (ფოტო გადაღებულია 2003). მთიანი აჭარა, სხალთას ხეობა

ნახ.1.2. დაახლოებით 110 წლის მეწყერი/მთიანი აჭარა, მდინარე სხალთას ხეობა)

ბევრია შემთხვევა როდესაც მთის მოსახლეობა აქტიურად სახლდება არა მარტო უძველესი მეწყერების შემონატანებზე და რელიეფზე, არამედ საკმაოდ ბოლო პერიოდებისებზეც. ამ მკაფიო მაგალითებია აჭარის მთიან რეგიონში. 1988 წლის 15 აპრილს მთის ფერდობიდან ფხვიერი ნალექების დიდი მასების უეცარმა ჩამოსვლამ ჩაკეტა მდინარის კალაპოტი. რამდენიმე წუთში, მეორე მეწყერმა დაფარა მდინარის სხვა ნაწილი და დამარხა სოფელ წაბლანას ნაწილი მოსახლეობასთან ერთად მოტანილი თიხებით და ნამტვრევებით. მასა მოწყდა მთის ფერდობიდან 1800 მ სიმაღლეზე, ჩამოსვლის სიმაღლე დაახლოებით 400 მ, ხოლო მოძრაობის მანძილმა გადააჭარბა 3 კმ. მდინარე ჩაიკეტა დაახლოებით 15-20 მ სიმაღლის კაშხლით. საბედნიეროდ, კაშხალის ეროზია მიმდინარეობდა ნელი ტემპით, ამიტომ არ მოხდა

კატასტროფული წყალდიდობა. სულ მეწყერის მოცულობამ (შედგებოდა ძირითადად შერეული ქვის ფრაგმენტებიდან, ნამსხვრევებიდან და თიხისაგან) შეადგინა დაახლოებით 104 მილიონი კუბური მეტრი. დაახლოებით მოცულობის ნახევარი შეერია მდინარეში და ჩაირეცხა. ნაწილი შემდეგ იქნა ამოღებული მდინარიდან, სახლების ამოღებისას.

მეწყერული კატასტროფების ადამიანთა მსხვერპლის სტატისტიკა და შეფასება ერთმანეთს არ შეესაბამება, ერებს შორის ეკონომიკური განსხვავების და ბევრ სახელმწიფოში მონაცემების შეგროვების გაუმჯობესებული ტენდენციების გამო. გარდა ამისა, სტიქიის სტატისტიკაში, მეწყერის მსხვერპლი და დაზიანებები, ხშირად შერწყმულია მასთან დაკავშირებულ სხვა საშიშროებებთან. ბევრი პუბლიკაცია იმის თაობაზე, რომ კრიტიკულ მდგომარეობასთან ახლოს მყოფი დედამიწის ლითოსფეროს უბანი მგრძნობიარე არის გარეშე შედარებით სუსტი გავლენის მიმართ, რაც შეიძლება გამოიხატოს სეისმურობის აქტივირებაში [118, 119, 124, 106, 8, 9].

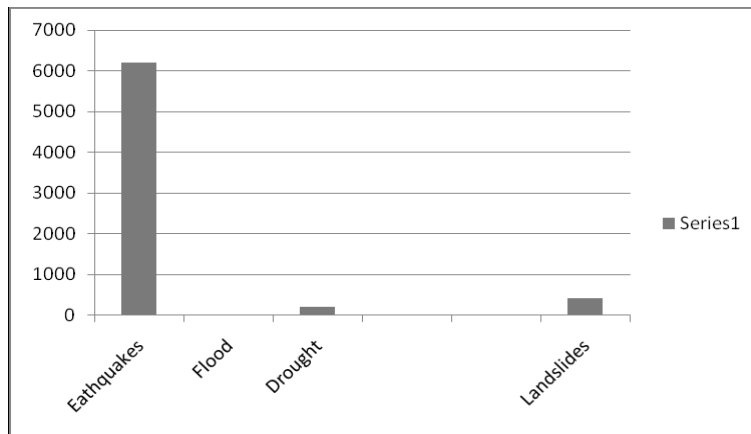
. ტრიგერირების, სინქრონიზაციის და ა.შ. ფაქტები, სეისმურ პროცესზე სუსტი ზემოქმედების ეფექტები კარგ შესაბამისობაშია სუსტი პერიოდული და შემთხვევითი გავლენის მიმართ რთული ბუნებრივი და საინჟინრო სისტემების არაწრფივ მგრძნობიარობასთან [124, 102, 88, 89, 90, 91]. შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ სუსტ ზემოქმედებაზე ასეთმა მგრძნობიარე დამოკიდებულებამ შეიძლება გზა გაგვიხსნას სეისმური რისკის შემცირებისაკენ ან სულაც სახიფათო რთული სეისმური პროცესის კონტროლისაკენ. იგივე შეიძლება ითქვას მეწყერულ ტერიტორიებზე. ეს ადგილები ხშირად არის კრიტიკულ

მდგომარეობასთან ახლოს, როცა შედარებით სუსტ გარე ზემოქმედებას (მაგალითად, მიწისძვრის ტალღას) შეუძლია გააქტიუროს მასის გადაადგილება (მეწყერი). პრაქტიკულად ყველა სახის მეწყერი ასოცირდება სხვადასხვა პარამეტრების და მაგნიტუდის მიწისძვრასთან [79, 80, 74]. გარდა დიდი რაოდენობით ახალი მეწყერის გამოწვევისა, მიწისძვრას ასევე შეუძლია მოახდინოს ნელი მეწყერის გააქტიურება. [64]. ბევრი უძლიერესი ქვათაცვენა, ზვავი და მოვარდნები, მათ შორის დიდი ადამიანური დანაკარგებით, გამოწვეული იყო სეისმური ბიძგით [144, 145, 146, 79, 80]. მეწყერი ხდება სხვადასხვა სხვადასხვა გეომექანიკური და გეოლოგიური პარამეტრების პირობებში,

გამოწვეული სხვადასხვა დატვირთვით და ტრიგერირების პროცესებით. ისინი ხშირად დაკავშირებული სხვა მნიშვნელოვან ბუნებრივ კატასტროფებთან, როგორცაა მიწისძვრა, წყალდიდობა და ვულკანური ამოფრქვევები.

შემოთავაზებული კვლევებს აქვს დიდი სამეცნიერო და პრაქტიკული მნიშვნელობა [63, 147, 148, 125, 20, 15]. საქართველოს შემთხვევაში პროექტის პრაქტიკული მნიშვნელობის ასევე აშკარაა. 2011 წლის ზაფხულის ტრაგიკული მოვლენების, მეწყერის და წყალდიდობის, შედეგად რიკოთის უღელტეხილზე დაიღუპა ექვსი ადამიანი. ასეთი უბედურებით ხასიათდება იმავე წლის ზაფხულში საქართველოში. ბევრ სხვა კატასტროფები მოხდა მცხეთა-მთიანეთის, კახეთისა და შიდა ქართლის რეგიონებში. ზოგადად, მეწყერი მიწისძვრის შემდეგ საქართველოში ეკონომიკური

დანაკარგების ყველაზე დიდი წყაროა - მასზე მოდის 1988-2007 წლების სართო დანაკარგების 7-8%. საქართველოში 200 000 ადამიანზე მეტი ცხოვრობს მეწყერსაშიშ ზონებში [131].



ნახ.1.3. კატასტროფების შემთხვევები და ეკონომიკური დანაკარგები საქართველოში 1988-2007 წლებში მილიონ ამერიკულ დოლარებში

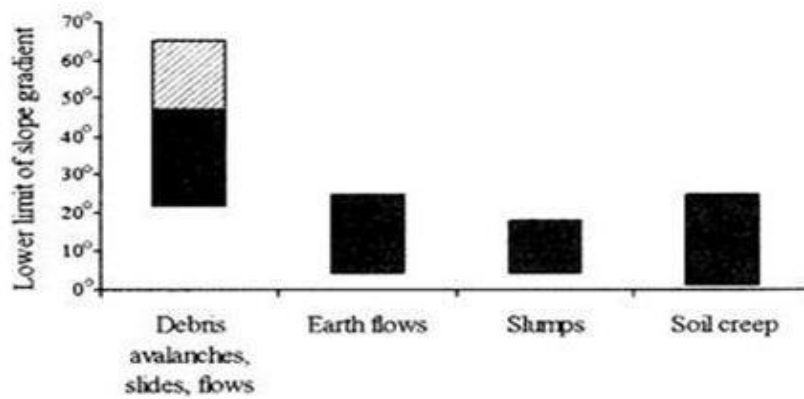
საქართველოს შემთხვევაში წარმოდგენილი სამუშაოების პრაქტიკული მნიშვნელობა ძალზედ დიდია, ვინაიდან განხილვის პროცესში მყოფი რამდენიმე დიდი საინჟინრო პროექტის (კაშხლები, გაზის მიწისქვეშა საცავი და ა. შ.) რეალიზების შემდეგ, შესაძლებელია დედამიწის ქერქში არსებული დამაბულობების შეცვლა. იმის გათვალისწინებით, რომ საქართველო მდებარეობს სეისმურად აქტიურ რეგიონში, აუცილებელია იმის შესწავლა თუ რა შედეგები შეიძლება გამოიწვიონ მეწყერების/სეისმური პროცესის დინამიკაში (როგორცაა ტრიგერირება და სინქრონიზაცია) დამაბულობის ამ მცირე ცვლილებებმა [63].

შემოთავაზებული სამუშაოს მიზანია განავითაროს საბაზისო კვლევები წარმოდგენილი მიმართულებით. მათ შეუძლიათ ნათელი მოჰფინონ მეწყერების გენერაციის ფიზიკურ მექანიზმს, დაგვეხმაროს მეწყერების და სეისმური პროცესის თეორიული მოდელის გაუმჯობესებაში და რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, შეიძლება დაგვეხმაროს კრიტიკული მდგომარეობის მიახლოებისას მეწყერზე და სეისმურ პროცესზე მცირე გარეშე ზემოქმედების გავლენის მექანიზმის საფუძვლების გარკვევაში. ეს შედეგები დაგვეხმარება შემდგომი სამუშაოების წარმართვაში: მეწყერების მონიტორინგის ოპტიმალური მეთოდების შემუშავებაში და მეწყერის საშიშროების შემცირების პრაქტიკული საშუალებების შემუშავებაში.

### ზოგადი საფუძვლები

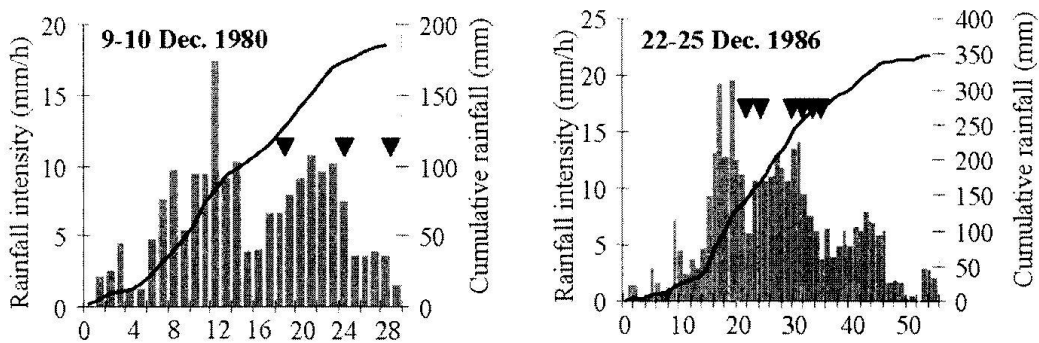
ფერდობზე მასების მოძრაობის კლასიფიცირების მრავალი გზაა [143,44] და შეიძლება შემდეგნაირად დავყოთ კატეგორიებად: მეწყერების გამომწვევი ბუნებრივი ფაქტორები: გეომორფოლოგიური ფაქტორები; ჰიდროლოგიური ფაქტორები; სეისმურობა; ვულკანური აქტიურობა; გეომორფოლოგიური ფაქტორები. მიუხედავად

იმისა, რომ ფერდობის დახრის გრადიენტი მნიშვნელოვანადაა დაკავშირებული მეწყერის ინიცირებასთან (ნახ.1.4), გარემოს სხვა დინამიური ფაქტორებიც თამაშობენ მნიშვნელოვან როლს.



ნახ.1.4. სხვადასხვა ტიპის მეწყერების დახრის გრადიენტის ქვედა ზღვარი მსოფლიოს სხვადასხვა ადგილიდან. დაშტრიხული ნაწილი წარმოადგენს მხოლოდ ერთ ტერიტორიას ინდოეთში.

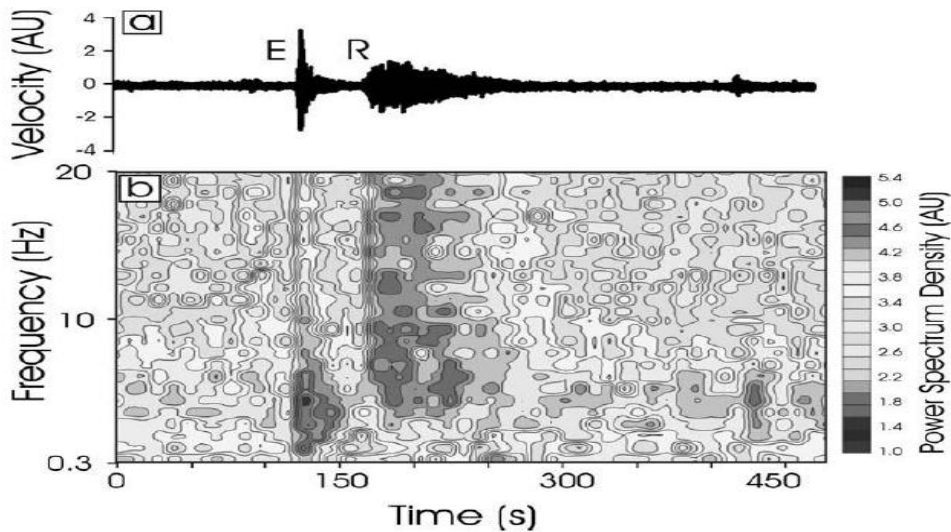
ჰიდროლოგიური ფაქტორები. ფერდობის ჰიდროლოგია ახდენს ძირითადი კონტროლს მეწყერის ინიცირებაზე. ნალექის და თოვლის დაგროვების (და დნობის) სივრცითი მოდელი მჰიდროდაა დაკავშირებული მეწყერის ინიცირებასთან [29,30,122,84]. რიცხვითი მოდელირება აჩვენებს, რომ ძლიერი წვიმების დროს მომხდარი მეწყერების რაოდენობა და მეწყერების ტრიგერირებაში წვიმების ფარდობითი მნიშვნელობა დამოკიდებულია საშუალო და მაქსიმალურ საათობრივ ინტენსივობაზე, რომელიც ასევე მოქმედებს მეწყერის მოხდენაზე (ნახ.1.5)



ნახ.1.5. ძლიერი წვიმის მახასიათებლების გავლენა მეწყერების მოხდენაზე და დროში განაწილებაზე: მოდელირებულია წყალშემკრებიდან, ვანკუვერის კუნძულიდან, ბრიტანეთის კოლუმბიიდან. სქელი ხაზი ჯამური ნალექია; სამკუთხედები წარმოადგენენ წყალშემკრებში მოდელირებული მეწყერების დროში განაწილებას [Dhakal and Sidle, 2003].

სეისმურობა. მიწისძვრით გამოწვეული მეწყერი ნაკლებად გასაგებია ვიდრე წვიმით გამოწვეული მეწყერი, რადგან წვიმის წვლილი მეწყერის მოვლენაში უფრო იოლად განისაზღვრება, ვიდრე მიწისძვრის დროს მიწის მოძრაობის წვლილი. ამჟამად, მიწისძვრით გამოწვეულ მეწყერთან დაკავშირებული რამდენიმე საუკეთესო ინფორმაცია არის მიღებული მეწყერების მოხდენის რეტროსპექტული ანალიზით სხვადასხვა მაგნიტუდის და პარამეტრების მიწისძვრების მოხდენის პერიოდის განმავლობაში [74,79,80,131]. რაჭის (1991) მიწისძვრით გამოწვეული მსხვერპლის უმეტესობა გამოწვეული იყო მიწისძვრით ინდუცირებული მეწყერით, რომელმაც მთლიანად დაფარა სოფელი ხახიეთი.

ვულკანური აქტივობა. ვულკანური ამოფრქვევები მტკიცედ დაკავშირებული ტექტონიკური ფილების საზღვრებთან. კალდერას კოლაფსთან დაკავშირებულ პროცესებს შეუძლია გამოიწვიოს მეწყერი ან თუნდაც ლაპარი ვულკანის ფერდობზე [69]. ფალასპერლა და სხ. [57] მიხედვით 2002 წლის 30 დეკემბერს კოლაფსის ჩაწერა მხოლოდ მეწყერების სახით მოხდა. სეისმური მონიტორინგის მუდმივ სადგურები კრატერთან ახლოს (<2 კმ) იძლეოდნენ ინფორმაციას 2002-2003 წლების ლავის ამოფრქვევების შესახებ. მეწყრებს, ქვათაცვენას და ნამსხვრევები ნაკადებს აქვთ ტიპიური სეისმური ხელწერა, რაც საშუალებას იძლევა გამოირჩეს ეს სიგნალები მიწისძვრებისა და აფეთქებების რყევებისაგან. მაგალითად, ქვათაცვენის ეპიზოდის წინამორბედი აფეთქების დროის სერიები და შესაბამისი სპექტროგრამა ნაჩვენებია ნახ. 1.6-ზე.



ნახ.1.6. (ა) სეისმოგრამა და (ბ) ვერტიკალური კომპონენტის ჩანაწერების დროითი სერიის შედარებითი სპექტროგრამა, 27 აგვისტო 2004. აფეთქების რყევა (E) ცოტა ხნით წინ უსწრებს ქვათაცვენის ეპიზოდს (Falsaperla et al. 2006)

მიწისძვრით გამოწვეული ყველაზე დამანგრეველი მეწყერი მოხდა პერუში 1970 წელს. 1970 წლის 31 მისს პერუს სანაპიროდან 25 კმ მანძილზე ოკეანეში მოხდა ძლიერი მიწისძვრა. მიწისძვრის ბიძგებმა ეპიცენტრიდან 130კმ დაშორებით, სამხრეთ ამერიკის

ერთ-ერთ უმაღლეს მწვერვალზე ჰუასკარანზე მოარყია ქანები და ყინული. ამან გამოიწვია გიგანტური მეწყერი, რომლის სიჩქარე და ზომები იზრდებოდა და მიაღწია 200კმ/სთ. მან ქვებით, ტალახით და ყინულით ამოავსო მთისწინა ხეობა, ნაწილობრივ გაანადგურა ქალაქი რანრაპირჩა, მთიდან 12 კმ დაშორებით. მეწყერის ნაწილი გადავიდა ქედის მეორე მხარეს და გაანადგურ სოფელი იუნგაი. მხოლოდ რამდენიმე მოსახლემ მოახერხა გაქცევა. თვითმხილველები აღწერენ მეწყერი, როგორც ოკეანის უზარმაზარ ტალღა, გამაყრუებელი გრგვინვით და ქუხილით მოძრაობდა. მიწისძვრამ ასევე გამოიწვია ბევრი სხვა პატარა მეწყერი რეგიონში, რომლებმაც გამოიწვიეს ათასობით შენობის განადგურება და უამრავი მსხვერპლი. საბოლოო რიცხვი იყო 67 000 დაღუპული ადამიანი და 800 000 უსახლკარო. საქართველოს შემთხვევაში მეწყერების და სეისმურობის დინამიკაზე გარემოს ფიზიკური მახასიათებლების და გარეშე ზემოქმედების კვლევის მნიშვნელობა ცხადია, რადგანაც ქვეყანა მდებარეობს მთა-გორიან და სეისმურად აქტიურ რეგიონში. გარდა ამისა, რამდენიმე დიდი საინჟინრო პროექტი (კაშხლები, მიწისქვეშა გაზსაცავი, გეოთერმული საბადოები, და ა.შ.) რომლებიც უკვე აშენებულია ან გახილვის სტადიაშია, როდესაც განხორციელდება, ფოროვანი წნევის ცვლილებების შედეგად, დედამიწის ქერქში შეიძლება შეცვალოს დამაბულობის გადანაწილების დინამიკა. ამგვარად, განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია გეომორფოლოგიური/სეისმური პროცესის დინამიკაში ხელოვნური (ტექტონიკურთან შედარებით მცირე) დამაბულობების ვარიაციებით, ისევე როგორც მცირე ბუნებრივი ზემოქმედებისას, გამოწვეული შესაძლო ცვლილებების მექანიზმის გაგება. მეწყერის და მიწისძვრის ურთიერთქმედების და მცირე გარეშე ზემოქმედების დინამიკის

წარმოდგენილ კვლევებს, რომლებიც დაფუძნებულია რიცხვითი და ლაბორატორიული მოდელირების შედეგების ანალიზზე, აქვს მნიშვნელოვანი პრაქტიკული და ფუნდამენტური სამეცნიერო მნიშვნელობა.

აღმოსავლეთ საქართველოში მდ. დურუჯის აუზი არის კლასიკური მაგალითი, რომელიც გვიჩვენებს ღვარცოფების და მათი კატასტროფული შედეგების ინტენსივობას: ბოლო 115 წლის განმავლობაში იყო დიდი ღვარცოფების 31 შემთხვევა; გამოწვეულმა ზარალმა მიაღწია 200 მილიონ აშშ დოლარს. უახლესი ფართომასშტაბიანი გეომორფოლოგიური კატასტროფები მოხდა 2014 წლის 17 მაისს დარიალის ხეობაში (ღვარცოფი რუსეთ საქართველოს საზღვართან ახლოს) და 2015 წლის 13 ივნისს თბილისში კატასტროფული წყალდიდობა/ღვარცოფი. თბილისში 2015 წლის 13 ივნისის მოვლენამ მოახდინა სტიქიური უბედურებების კასკადირება: ანომალური წყალმოვარდნა/ღვარცოფი - ზოოპარკის დანგრევა - ველური ცხოველების დახოცვა. დაიღუპა 20 ადამიანი, ეკონომიკური ზარალი აღწევს ასეულობით მილიონ აშშ დოლარს.

### **მეწყერი, როგორც გეოფიზიკური საშიშროება**

მეწყერების კვლევის ძირითადი მოტივაცია არის საშიშროების პრევენცია და რისკის შემცირება (ნახ. 1.1). მეწყერების უმეტესობა მცირეა და მათი დამანგრეველი



პოტენციალი შეზღუდულია. თუმცა, დიდი მეწყერი შეიძლება იყოს ძალიან კატასტროფული. მეწყერებმა ზოგჯერ შეიძლება დიდი წვლილი შეიტანონ კატასტროფების მსხვერპლთა მთლიან რაოდენობაში. ჩინეთში, სიჩუანის პროვინციაში, 1786 წელს მოხდა ძლიერი მიწისძვრა. გამოწვეულმა მეწყერმა ადგილობრივი მდინარე დააგუბა 10 დღის განმავლობაში. შემდეგ გაირღვა კაშხალი. შედეგად დაიტბორა დაბლობი 1400 კმ მანძილზე და დაიხრჩო 100 000 ადამიანი. ვაიონტის ტრაგედია (ჩრდილოეთი იტალია, 1963) იყო კაშხალზე წყლის გადმოსვლის შედეგი, რაც გამოიწვია წყალსაცავში უზარმაზარი მეწყრის ჩავარდნამ. ყველა მეწყერიდან საშუალო გათვლებით წელიწადში საშუალოდ ნორვეგიაში კვდება 5-7 ადამიანი, იტალიაში 18, აშშ-ში 25-50, ნეპალში 186, იაპონიაში 170 და ჩინეთში 140-150 [129]. საბედნიეროდ, ეს არ არის ძალიან მძიმე მსხვერპლი სხვა ბუნებრივი კატასტროფებთან ან ავტოკატასტროფებთან შედარებით. თუმცა, მეწყრის უარყოფითი შედეგები არ შემოიფარგლება მხოლოდ მსხვერპლით, არამედ მოიცავს სახლების და ინფრასტრუქტურის განადგურებას, დაზიანების ზონაში პროდუქციის დაკარგვას, ადგილობრივი წყლის რესურსების არაპროგნოზირებად ცვლილებებს და სახნავი ან საცხოვრებელი მიწის ნაკვეთების შემცირებას.



ნახ.1.7. მსხვერპლის გარდა, მეწყერი ხშირად ანგრევს რკინიგზას და საავტომობილო გზებს და ანადგურებს ინფრასტრუქტურას. (ა) უზარმაზარმა ლოდმა დაანგრია რკინიგზა (ვარეზე, იტალია). ეს არის დიდი მეწყრის ნაწილი. (ბ)კალიფორნიის სოფელი La Conchita ხშირად ზარალდება გამანადგურებელი მეწყერებით. (გ) მცირე მეწყერი კორტენოვაში (ჩრდილოეთ იტალია). (Fabio Vittorio De Blasio, 2011)

## 1.2 მეწყერების ფიზიკური ასპექტები. მეწყერების ტიპები

მიუხედავად იმისა, რომ მეწყერი, ფაქტობრივად, კომპლექსური მოვლენაა, მათი ქცევის გაგება პრინციპში მოითხოვს მექანიკის რამდენიმე ძირითადი კანონის ცოდნას. მათი ქცევა აშკარად რთული და არაპროგნოზირებადია უფრო ფიზიკური პირობების და ნივთიერებების მახასიათებლების, ვიდრე ძირითადი კანონების, არცოდნის გამო. მეწყერების მოძრაობა, შესაბამისად, შეიძლება აღიწეროს ხახუნის, კოჰეზიის და გრავიტაციის ცნობილი კანონების საშუალებით [56].

არსებობს რამდენიმე მიზეზი, რის გამოც მეწყერის ფიზიკური აღწერა სასურველია:

1. მეორე, ადამიანები რაც უფრო მიუახლოვდებიან საშიშროების ზონებს, მით უფრო გაიზრდება მეწყერის და სხვა მასათა მოძრაობების, დამჯრის, ენერჯის და ტრაექტორიის პროგნოზირების პრაქტიკული საჭიროება. პროგნოზირების კარგმა მოდელებმა შეიძლება გადაარჩინოს ადამიანების სიცოცხლე და ქონება.
2. მეწყერის აღწერისათვის საჭიროა ფიზიკის და მათემატიკის ნაწილები: სითხის მექანიკა, დრეკადობის თეორია, რომლებიც უნივერსიტეტის სტანდარტულ კურსებში შედის. სხვა კურსები, მაგ. მარცვლოვანი გარემოს მექანიკა და რეოლოგია, ხშირად გამოტოვებულია ძირითად კურსებში.

### მეწყერების ტიპები

**მეწყერის გეომეტრიული მახასიათებლები** [56].

ფიგურა 1.8 იმეორებს მეწყერის იდეალიზებულ სქემას [143]. მოძრაობა იწყება შესუსტების ზონიდან დაგროვების ზონისაკენ. მეწყერის *გვირგვინი* განსაზღვრავს დამრული მასის უმაღლესი ნაწილების მიმდებარე რეგიონს. *სკარპი* არის ციცაბო ვარდნამეწყერის ზედაპირსა და მიდამოს რელიეფს შორის. შინაგანი წანაცვლების გამო რამდენიმე უმნიშვნელო ვარდნა (სკარპი) განსაზღვრავს მთავარ მეწყერულ სხეულს. რღვევის ზედაპირი განსაზღვრავს მეწყერის ფუძეს, სადაც მოხდა გასრიალება. ტერფის მასალა მოტანილია დაგროვების ზონაში, რღვევის ზედაპირის საზღვრების გარეთ. მეწყერის მონატანი მთავრდება წვერით, რომელიც არის საზღვარი (როგორც წესი მოღუნული) დაგროვებულ მასალასა და ხელშეუხებელ რელიეფს შორის.

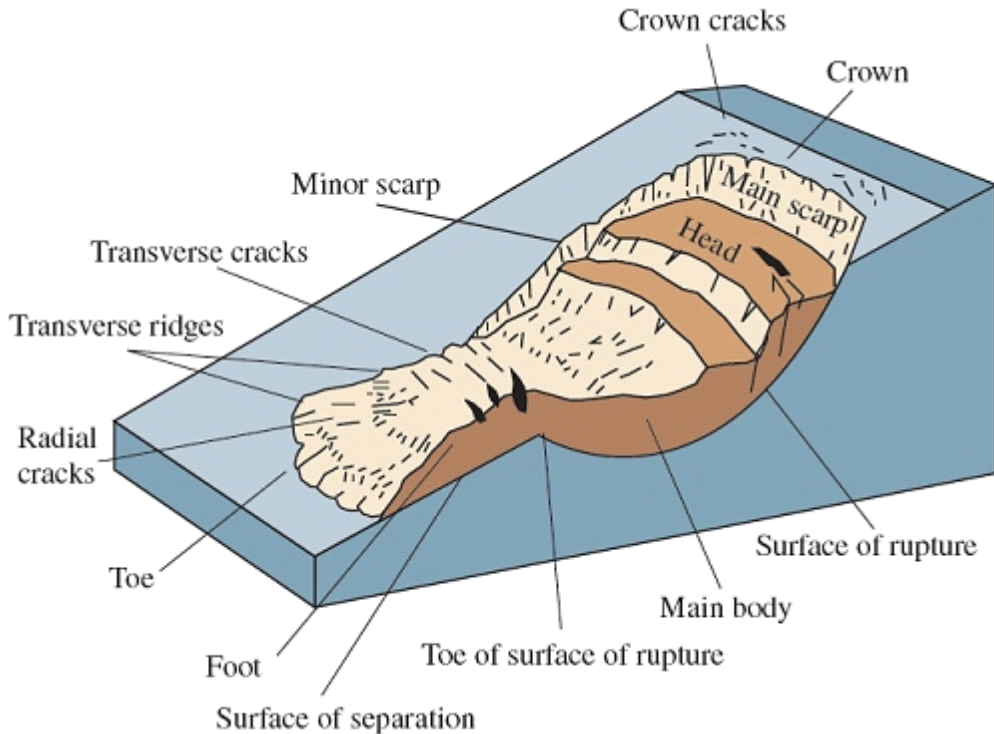
#### **ვარდნა**

ვარდნა არის მასალის მოძრაობა მყარი კედლის თავიდან ან კლდიდან. როგორც წესი, ვარდნა შეიცავს შეზღუდული რაოდენობის მასალას, ჩვეულებრივ ქვებს. რელიეფთან კონტაქტი ხდება ტრაექტორიის ბოლო ნაწილში, სადაც ხდება მასალის დამსხვრევა.

#### **გადაყირავება**

გადაყირავება არის ვერტიკალური ფილის ტრიალი ფუძესთან განლაგებული მობრუნების წერტილის გარშემო. გადაყირავება არის ტიპიური კომპაქტური ვერტიკალური ფილებისათვის (როგორც წესი, მაგრამ არა აუცილებლად ქვის) რომლებიც განლაგებულია რბილ, არაკონსოლიდირებულ რელიეფზე. მოძრაობა

შეიძლება ძალიან ნელი ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში, ფილის კატასტროფული დაცემის კულმინაციით.



ნახ.1.8. მეწყრის ძირითადი გეომეტრიული ელემენტები ( Varnes 1978)

### გადატანითი სრიალი

სრიალი განისაზღვრება, როგორც მასალის მოძრაობა წანაცვლების ზედაპირის გასწვრივ. გადატანითი სრიალისათვის ეს ზედაპირზე ბრტყელია. წანაცვლების ზედაპირის იდენტურობა ინახება და ეს განასხვავებს სრიალს ნაკადისაგან.

### ბრუნვითი სრიალი

ბრუნვით სრიალში, გამოყოფილი ზედაპირი დაახლოებით წრიული, კოვზის მსგავსია. გადატანითი სრიალისაგან განსხვავებით, სადაც ბრტყელი ზედაპირი ხშირად წარმოიქმნება შესუსტების ზონიდან, ბრუნვითი სრიალის წრიული ფორმა წარმოიქმნება თავად მეწყრის დამპრისაგან და მიიღება ძვრის ძაბვების გეომეტრიული განაწილებიდან.

### ნაკადი

ნაკადი არის მეწყერი, რომელშიც ინდივიდუალური ნაწილაკები მოძრავ მასაში მოძრაობენ განცალკევებულად. აქ შეიძლება ჩართული იყოს ნებისმიერი მასალა და აქედან გამომდინარე შეიძლება იყოს დამტვრეული ქვა, სხვადასხვა ზომების ნაშალი ნარჩენები. ნაკადი მისი ფიზიკური გაგებით განისაზღვრება, როგორც მასალის უწყვეტი, შეუქცევადი დეფორმაცია, რომელიც მიმდინარეობს მოდებული დაძაბულობის საპასუხოდ. ნაკადი ამგვარად ხასიათდება სითხის მსგავსი მოძრაობით.

სრიალი შეიძლება გადაიზარდოს ნაკადში თუ ენერგია და/ან დამგრა საკმარისია მასალის გარდასაქმნელად.

### **განივი გავრცელება**

იგი შედგება ქვების და ნიადაგის გვერდითი მოძრაობისაგან, ხშირად დიდი გაფართოებით. ქვების გავრცელების შემთხვევაში, სიჩქარე ხშირად მცირეა (ერთი მეათედი მმ-დან 10 სმ-მდე წელიწადში) და ზოგადად გამოწვეულია კლდოვანი ფილების ქვეშ სიღრმული პლასტიკური მასალით. ნიადაგის გავრცელება შეიძლება იყოს ძალიან სწრაფი, რამდენიმე მეტრი წამში.

### **კომპლექსური**

ეს ზოგადი სახელი გამოიყენება, როდესაც მეწყერი იცვლება ქვევას გავრცელები დროს.

## **1.3 გრავიტაციული მასათა მოძრაობის ფიზიკური კლასიფიკაცია. ფერდობის მდგრადობა**

მოსახერხებელია გრავიტაციული მასების ნაკადების კლასიფიკაცია შემოვიტანოთ უპირატესი ფიზიკური ქვევის და ფიზიკური აღწერილობის საფუძველზე, რომელიც უფრო შესაბამისი ჩანს. კლასები ქვემოთაა ჩამოთვლილი [56].

### **რეოლოგიური ნაკადები (კოჰეზიური)**

ტალახის ღვარცოფი არის ერთგვარი მეწყერი, სადაც დიდი რაოდენობით თიხით მდიდარი ნიადაგი შერეულია წყალთან და ეშვება ქვემოთ ფერდობზე, ხშირად მდინარის კალაპოტის გასწვრივ. ნაკადის ასეთი ტიპი განსახიერებს რეოლოგიურ ნაკადს. რეოლოგიური ნაკადი იდეალურად გამოისახება, როგორც კომპლექსური თვისებების მქონე სითხე. მისი ფიზიკური აღწერა უნდა ეფუძნებოდეს სითხის მექანიკას, არა-ნიუტონის სითხის ტერმინებით განსაზღვრული რეოლოგიური თვისებებით. რეოლოგიური ნაკადის ძირითადი შემადგენელი ნაწილები წარმოადგენენ წვრილი ნაწილაკები (განსაკუთრებით თიხის ან ლამი), რომლებიც, როდესაც შეერევიან წყალს, ნაკადს ანიჭებენ შეკრული ქვევის თვისებებს. ბუნებაში რეოლოგიური ნაკადები ჩვეულებრივ შეიცავს ქვიშას, ხრეშს და ლოდებს, რამაც რეოლოგიურ ქვევას შესაძლოა მიანიჭოს ხახუნის კომპონენტი. შემადგენლობასაგან დამოკიდებულებით, რეოლოგიურ ნაკადებს შეიძლება ეწოდოს ღვარცოფები (თუ შემადგენლობას აქვს ზომების გარკვეული სპექტრი), ტალახის ღვარცოფები (თუ ძირითადად შედგება წვრილი ნაწილაკებისაგან). წყალი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ღვარცოფების მექანიკური ქვევაზე, ცვლის რეოლოგიას და ამცირებს ეფექტურ ძვრის ძალა და სიბლანტეს.

### **მარცვლოვანი ნაკადები (ხახუნით)**

მარცვლოვანი ნაკადები არის მარცვლოვანი მასალის სწრაფი მოძრაობა, სადაც ხახუნი დინამიკაში მნიშვნელოვან როლს თამაშობს. მარცვლოვანი ნაკადის მცირემასშტაბიანი ანალოგი არის დახრილ ზედაპირზე ქვიშის მოძრაობა. თუმცა,

ქვიშის ფართომასშტაბიანი ზვავი ძალიან იშვიათია. ბუნებაში, ფართომასშტაბიანი მარცვლოვანი ნაკადები ჩვეულებრივ ვითარდება მთლიანი (დაუმტვრეველი) ქანების ფილისაგან. ძალიან ენერგიების ზემოქმედება, შინაგანი დეფორმაცია და მტვრევა განსაზღვრავს კლდოვანი მასის სწრაფ დაშლას.

### **ქვათაცვენა და გადაყირავება**

ქვათაცვენა გამოიხატება სიმძიმის ძალის მოქმედებით ბლოკების ცვენაში, რომელიც თავისუფალი ვარდნის ფაზა წარმოადგენს გზის მნიშვნელოვან ნაწილს. ქვათაცვენა არსებითად აღიწერება მყარი სხეულის მოძრაობით, მაგრამ რელიეფის გავლენა შეიძლება გაცილებით რთული პრობლემა იყოს. ბლოკი შეიძლება აირეკლოს მყარი ქანისაგან, ერთმანეთს შეეჯახოს და გაგორდეს რბილ გრუნტზე. ნიადაგის დეფორმაცია მოიცავს კოჰეზიურ და ხახუნის მდგენელებს შორის რთულს ურთიერთქმედებას. როგორც წესი, ეს პროცესი აღწერილია დრეკადობის და გორვის ხახუნის ემპირიული კოეფიციენტების ტერმინებში, მაგრამ ამ დონის აღწერა უგულებელყოფს ბლოკის და რელიეფის ურთიერთქმედების სირთულეს. თუმცა, მყარი სხეულის დინამიკა დრეკადობის კოეფიციენტებთან ერთად აღწერს პროცესსპირველ მიახლოებაში. ამ კლასში შედის გადაყირავებულის ვარდნები, სადაც სუბვერტკალური ფილა დიდი სიჩქარით ტრიალებს ფუძესთან ბრუნვის წერტილის გარშემო. მიწასთან შეჯახების შემდეგ, ფილები შეიძლება ნაწილობრივ დაიმსხვრეს დიდი ჰორიზონტული მოძრაობის გარეშე.

### **ნელი მეწყერები და ცოცვა**

გარკვეული სლაიდები (სრიალი) გადაადგილება ძალიან ნელა და ხშირად მათი ყოფნა გამოვლინდება მხოლოდ ნაპრალებით და ჩამოვარდნილი ბლოკებით. ნელი მეწყერების ქცევა ხშირად გაუგებარია. ნელი მეწყერები შეიძლება გვიჩვენებენ ქანების ქვეშ თიხის ფენების არსებობას, ზოგჯერ შეიძლება დაკავშირებული იყოს რღვევასთან შესუსტებულ სიბრტყეში. ისინი ხშირად გამოწვეულია კარსტული მოვლენებით ან გაყინვა-დათბობით.

### **ფერდობის მდგრადობა**

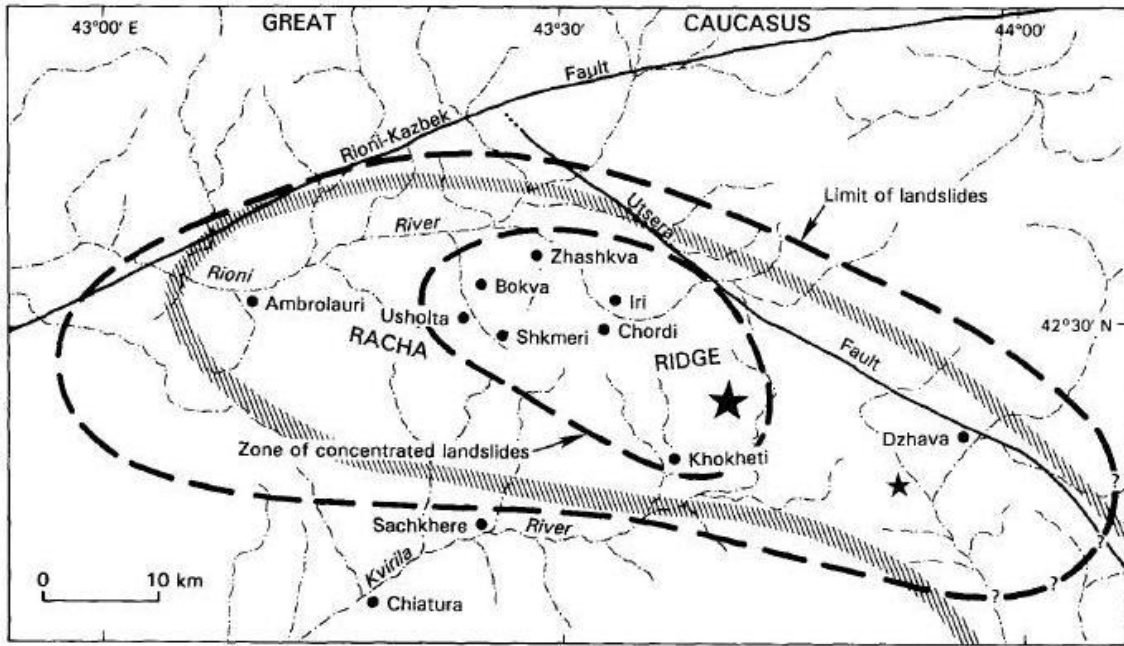
გრავიტაციას აქვს ტენდენცია გაასწოროს ფერდობები, თუ არ იქნებოდა ქანების და ნიადაგის კოჰეზია და ხახუნის ძალები. თუმცა, სტაბილურობის პირობებში შეიძლება შეიცვალოს წონასწორობის დროებითი რეგულირების ან გარე შემფოთებების გამო. ამ შემთხვევაში შეიძლება მოხდეს მეწყერის ტრიგერირება.

#### **ფერდობის სტაბილურობა დამოკიდებულია რამდენიმე ფაქტორზე:**

1. რა სახის მასალაა ჩართული პროცესებში. მაგალითად, ვულკანური მასალა შეიძლება გახდეს ძალიან არასტაბილური და ინტენსიური ნალექების შემდეგ გახდეს ღვარცოფების და ლაჰარის წყარო. ამის საპირისპიროდ, მყარი და კომპაქტური კლდე ჩვეულებრივ ძალიან სტაბილურია.

2. მასალის გეომეტრია. ფერდობის მიმართულებით დაქანებული ქანების ფენები განსაკუთრებით არასტაბილურია. დახრის კუთხე კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი პარამეტრია.
3. მასების განაწილება ფერდობის გასწვრივ. ფედობის ზედა ნაწილის დატვირთვას შეიძლება დიდი გავლენა ჰქონდეს სტაბილურობაზე. გარდა ამისა, მიწის მოჭრა ფერდობის ქვედა ნაწილში ხელს უწყობს მოცურებას.
4. წყალი ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი არასტაბილურობის ფაქტორია. ის ამცირებს კოჰეზიას ნიადაგში და ზრდის მარცვლოვანი გარემოს წონას და წყლის ფოროვან წნევას. ფერდობში წყლის გაჟონვის სიჩქარეს შეიძლება ასევე გადამწყვეტი მნიშვნელობა ჰქონდეს. ზოგიერთი ფერდობი შეიძლება არასტაბილური გახდეს თუ თუნდაც მცირე რაოდენობის წყალი სწარაფად შეაღწევს; სხვები უფრო მგრძობიარე არიან დიდი ხნის განმავლობაში მოსული ნალექების შემთხვევაში. ჰონოლულუსთან ახლოს არის ზედაპირული (7-10 მ) მეწყერი, რომელიც პერიოდულად აქტიურდება დიდი რაოდენობით ნალექების მოსვლის შემდეგ. რეგისტრირებული გადაადგილება არ აღემატება რამდენიმე სანტიმეტრს. უფრო დრამატული არის სწრაფი ნაკადები, რომლებსაც ადგილი აქვს მსოფლიოს მრავალ რეგიონში, სადაც ქანები დაფარულია ნიადაგის სქელი ფენით (თბილისი, ვერეს ხეობა, 2015წელი).
5. გარე იმპულსური ძალები, როგორცაა მიწისძვრა, ტალღები და ვულკანის ამოფრქვევა. საქართველოში ათასობით მეწყერის თითქმის ნახევარი შეიძლება კლასიფიცირდეს როგორც სეისმურად გამოწვეული. 1991 წლის 29 აპრილს რაჭაში მოხდა 7.0 მაგნიტუდის მიწისძვრა. 114 ადამიანი დაიღუპა. ბევრი მეწყერის ტრიგერირება მოხდა 2500 კვადრატული კილომეტრის ეპიცენტრალურ ტერიტორიაზე, რამაც გამოიწვია ბევრი სტრუქტურული დაზიანება და ადამიანების დაღუპვა (მთლიანი მსხვერპლის ნახევარი მეწყერების შედეგია). მიწისძვრამ, ეპიცენტრალურ ზონაში, გამოიწვია ექვსი ფართო სახის მეწყერი, სოფელ ხახიეთის მოვლენის ჩათვლით. მიწისძვრით ტრიგერირებულმა ძალიან დიდი ნამსხვერვეების ზვავმა მიწისძვრის 114 მსხვერპლიდან გამოიწვია 50 დაღუპვა. ზვავმა ხახიეთისწყლის ხეობა, დაანგრია სოფელი ხახიეთი, დაიღუპა მისი დაახლოებით 50 მოსახლე და ჩამოყალიბდა დაახლოებით 100მ სიმაღლის ბუნებრივი კაშხალი. შეიქმნა 1X2 კვადრატული კილომეტრის ფართობის ტბა. კაშხალი დაირღვა რამდენიმე საათში [22].
6. მცენარეულმა საფარმა შეიძლება გავლენა მოახდინოს სტაბილურობაზე, მექანიკური კოჰეზიის და წყლის აორთქლების მეშვეობით.





ნახ.1.9. ეპიცენტრული ტერიტორიის რუკა. დიდი ვარსკვლავი არის მთავარი მიწისძვრის ეპიცენტრი, პატარა ვარსკვლავი აფთერშოკი; გარე სქელი წყვეტილი ხაზი არის მიწისძვრით ტრიგერირებული მეწყრების საზღვარი; შიდა სქელი წყვეტილი გამოყოფს მეწყრების კონცენტრირებულ აქტიურობას; უწყვეტი ხაზები არის ძირითადი რღვევები; წყვეტილ-წერტილოვანი ხაზები არიან ძირითადი ნაკადები და მდინარეები.

#### 1.4 უსაფრთხოების ფაქტორის (FS) გამოთვლა

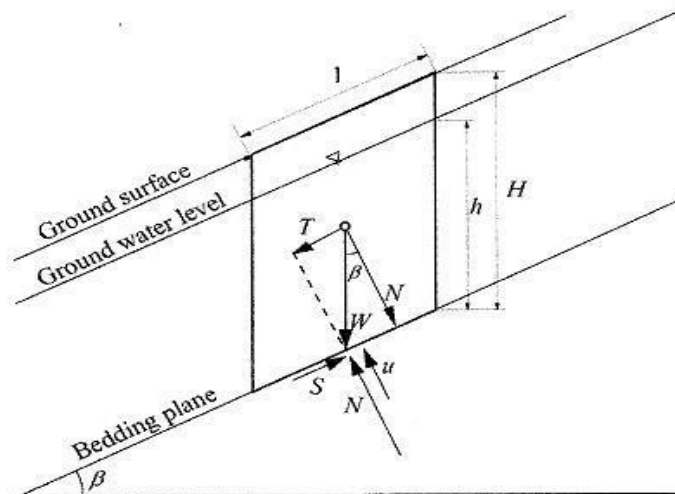
მეწყერი იძვრება როდესაც ძვრის სიმტკიცე ნიადაგის ფენაში მცირეა მასზე მოდებულ ძვრის დაძაბულობაზე. სიმარტივისათვის განიხილება უსასრულო ფერდობი სადაც წარმოდგენილია მეწყერის ინიცირების მექანიზმი (ნახ.1.10). ნიადაგის მასებზე დატვირთვის ზემოქმედება იწვევს ტანგენციალური (T) და ნორმალური (N) ძალების ზრდას სრიალის ზედაპირის გასწვრივ. წინაღობის ძალები (S) განისაზღვრება ნიადაგის ძვრის სიმტკიცით. ამგვარად, S შეიძლება გამოვითვალოთ კულონის კანონით, რომელიც ერთეული სიგრძის ნიადაგისათვის გამოისახება შემდეგნაირად

$$S = c + (W \cos \beta - u) \tan \varphi \quad (1.1)$$

ამგვარად, შენახვის ფაქტორი (FS) შეიძლება განისაზღვროს როგორც წინაღობის ძალის (S) ფარდობა ჩამომსრიალებელ ძალასთან (T) რომელიც მოდებულია პოტენციურ სასრიალო მასაზე:

$$FS = \frac{S}{T} = \frac{c}{W \sin \beta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} - \frac{U \tan \varphi}{W \tan \beta} \quad (1.2)$$

ჩამოსრიალება ხდება მაშინ როდესაც წინაღობის ძალა (S) ნაკლები გახდება ჩამომსრიალებელ ძალაზე (T), ე.ი. როცა  $FS < 1$



ნახ.1.10. მეწყრის მოდელზე მოქმედი ძალები

საველე სამუშაოებისათვის სასრული დახრის შეთხვევაში უსაფრთხოების ფაქტორი შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით:

$$FS = \frac{c' + hg \cos^2 \theta (\rho_r - \rho_w m) \tan \varphi}{\rho_r hg \sin \theta \cos \theta} \quad (1.3)$$

სადაც

$c'$  არის (ეფექტური) კოჰეზია

$h$  არის პოტენციური გასრიალების სისქე

$g$  თავისუფალი ვარდნის აჩქარება

$\theta$  პოტენციური მეწყრის ზედაპირის დაცემის კუთხე

$\rho_r$  ქანების სიმკვრივე პოტენციურ მეწყერში

$\rho_w$  წყლის სიმკვრივე

$m$  მოსრიალე მასის სველი ნაწილის სისქე,  $m = 1$  სრულად გაჟღენთილი მეწყერული მასა და  $m = 0$  სრულიად მშრალი მეწყერული მასა

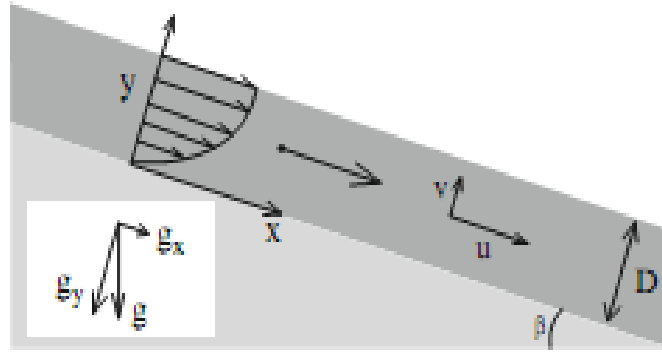
$\varphi$  არის შინაგანი ხახუნის კუთხე  $\tan \varphi = \mu$  (ხახუნის სიბრტყე)

$FS > 1$  — სტაბილური;  $FS < 1$  — არასტაბილური;  $FS = 1$  — კრიტიკული

### 1.5 ნავიე სტოქსის განტოლება. არა-ნიუტონის სითხეები - ღვარცოფი

სითხის მოძრაობის ორნაირი, ეილერის და ლაგრანჟის ფორმით, აღწერა არის შესაძლებელი. სითხის (მეწყრის) მათემატიკური მოდელი შეიძლება გაკეთდეს ნავიე-სტოქსის განტოლებათა სისტემის ბაზაზე. მეწყრის ევოლუციის აღსაწერად უფრო ხშირად მისაღებია ლაგრანჟის ფორმა, რადგან აქ სასაზღვრო პირობების ცვლილების

გათვალისწინება უფრო ეფექტურადაა შესაძლებელი.



ნახ.1.11. სითხის დინების ილუსტრაცია დახრილ არხში [56].

ნავიე-სტოქსის განტოლების გამოყენებისათვის განვიხილოთ მუდმივი  $\beta$  დახრის კუთხის მქონე არხი. ნავიე-სტოქსის განტოლებები,  $x$  და  $y$  მიმართულებების გასწვრივ, ჩაიწერება:

$$\rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = \rho g \sin \beta + \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1.4)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = \rho g \cos \beta + \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial y} \quad (1.5)$$

Z მდგენელის განტოლება ამ შემთხვევაში უმნიშვნელოა. განტოლებათა სისტემა მარტივდება შემდეგი სახით.

- 1) სიჩქარეებიდან  $u$  მხოლოდ  $x$ -ის გასწვრივ განსხვავდება ნულისაგან,
- 2) სტაციონალური ამოცანის შემთხვევაში  $u$  დროზე არაა დამოკიდებული,
- 3) ჩამოყალიბების დროს ღვარცოფის სისქე არაა დამოკიდებული  $x$  კოორდინატზე, შესაბამისად  $u$  და  $P$  არაა დამოკიდებული  $x$ -ზე.

ამ მნიშვნელოვანი გამარტივებების შემდეგ NS განტოლება ღებულობს სახეს

$$0 = \rho g \sin \beta + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1.6)$$

$$0 = \rho g \cos \beta - \frac{\partial P}{\partial y} \quad (1.7)$$

(4) განტოლების ინტეგრება გვაძლევს სიმაღლესთან ერთად წნევის ცვლილების განტოლებას

$$P = P(D) + \rho g \cos \beta (D - y) \quad (1.8)$$

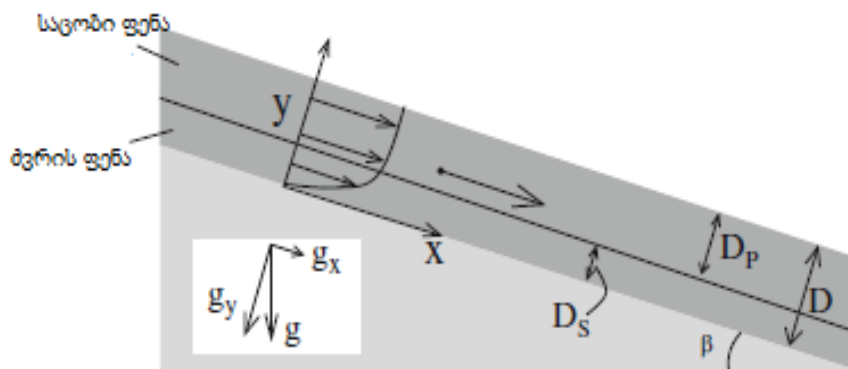
სადაც  $P(D)$  არის წნევა ზედა საზღვარზე, რომელიც სუბაერიულ შემთხვევაში ემთხვევა ატმოსფერულ წნევას.

(3) განტოლების ორმაგი ინტეგრებით ვღებულობთ

$$u(y) = \frac{\rho g \sin \beta}{\mu} \left( D y - \frac{1}{2} y^2 \right) \quad (1.9)$$

განტოლება გვიჩვენებს, რომ ნაკადის სიჩქარეს დერძის გასწვრივ აქვს პარაბოლური პროფილი, ხოლო მაქსიმუმს აღწევს ზედა წერტილში

$$u(D) = \frac{\rho g \sin \beta}{2\mu} D^2 \quad (1.10)$$



ნახ.1.12. მეწყრული სხეულის დინების ილუსტრაცია დახრილ არხში [56].

### ღვარცოფი

განვიხილოთ სისქის ტალახის ფენის სტაციონალური დინება დახრილ სიბრტყეზე (ნახ.1.12). განტოლებები ასე ჩაიწერება

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \left( -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right) + g \sin \beta \quad (1.11)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - g \cos \beta \quad (1.12)$$

სადაც დახრილი სიბრტყის პარალელური სიჩქარე  $u(y)$  დამოკიდებულია ფენის სისქეზე. საბოლოოდ ვღებულობთ გამოსახულებას

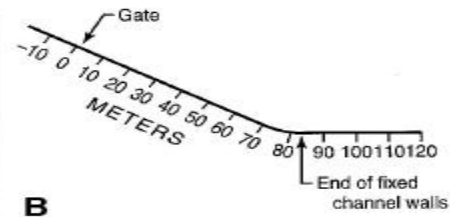
$$u(y) = \frac{\rho g \sin \beta}{\mu} \left[ D_s y - \frac{y^2}{2} \right] \quad (\text{თუ } y < D_s) \quad (1.13)$$

$$u(y) = u_{max} \quad (\text{თუ } y \geq D_s) \quad (1.14)$$

სადაც 
$$D_s = D - \frac{\tau_y}{\rho g \sin \beta} \quad (1.15)$$

ხოლო 
$$u_{max} = \frac{\tau_y}{\mu} \left[ D - \frac{3}{2} \frac{\tau_y}{\rho g \sin \beta} \right] \quad (1.16)$$

$u_{max}$  არის საცობის ფენის მაქსიმალური სიჩქარე.



ნახ.1.13. შერთებული შტატების გეოლოგიური სამსახური (USGS), ღვარცოფული არხი [Iverson et al., 1992]. (ა) მიმდინარე ექსპერიმენტის ფოტო, (ბ) ვერტიკალური ჭრილის სქემა.

ღვარცოფული ნაკადები შეიძლება წარმოიშვას ცალკეული ცალკეული ფერდობების ჩამოშლით ან მრავალრიცხოვანი მცირე ჩამოქცევებით, რომლებიც ერთდებიან ქვემოთ დინების მიმართულებით. ცალკეულ შემთხვევებში, ჩამოქცევა შეიძლება მოხდეს მცირე მოცულობებით, მარცვალ-მარცვალ. ყველა დონის ჩამოშლა, მცირე მარცვლებიდან უზარმაზარ მეწყრებამდე, პირველ რიგში გამოწვეულია მარცვლებს შორის ხახუნის ძალით.

ღვარცოფებში შემადგენელი ნაწილაკები სანტიმეტრიდან მეტრამდე ზომებისაა, ნაკადები ხანდახან ათეულობით მეტრი წამში სიჩქარისაა და ათეულობით კილომეტრზე ვრცელდება. რადგანაც ხდება ნაკადების შენელება, ნსწილკებისაგან ხდება დეპოზიტების დაგროვება, რომელთა სისქე შეიძლება იყოს ათეული 100

მეტრამდე სიღრმის და კილომეტრების სიგრძის. ეს ნაკადები შეიძლება შეიცავდეს ( $10^6 - 10^{10}$ ) შ და მეტ მასალას, ხშირად დიდი რაოდენობით წყალს.

გეოლოგიური ნივთიერებების მასშტაბები და რეოლოგიური სირთულე, თავისუფალი ზედაპირის მქონე ნაკადის აღწერის მათემატიკურ ამოცანასთან ერთობლიობაში, გეოფიზიკური მასების დინების მოდელირებას და გამოთვლებს მნიშვნელოვან ამოცანად აქცევს.

მოდელირებას აქ აქვს საწყისები მეცნიერების ორ სხვადასხვა ტრადიციაში. პირველი არის სავაჯ-ჰუტერის პიონერული მოდელირება [157]. მათ მოდელირება დაიწყო, კულონის ძირითად აღწერაზე დაფუძნებული მშრალი მარცვლოვანი მასალის, მასის და მომენტების ბალანსის კანონებიდან. ტიპიური ნაკადის პროპორციების გამოყენებით, ნაკადებს სიგრძე სიღრმეზე ბევრად მეტი აქვთ, სავაჯმა და ჰუტერმა განავითარეს დახრილ ზედაპირზე მარცვლოვანი ნაკადის „თხელი ფენის“ მოდელი. მოგვიანებით ეს სამუშაო განივრცო ორ გსნზომილებამდე [158], და უფრო ზოგადი ტოპოგრაფიის ზედაპირზე ნაკადამდე [108,110].

მეორე მიდგომა გადმოცემულია სითხე-ნაწილაკების ნაკადის მათემატიკურ ნაშრომში. ეს ე.წ. „ორფაზიანი“ ან „ორსითხიანი“ მოდელი დაფუძნებულია შემადგენელი სითხის და მყარი სხეულის მასის და იმპულსის კანონების გასაშუალებაზე. ურთიერთქმედების პირობების მოდელირება ხდება ორიდან ერთ-ერთი გზით: ან ხდება დაშვება, რომ ნაკადს აქვს განსაზღვრული თვისებები და ნაწილაკების მოძრაობა განისაზღვრება შესაბამისად (მაგალითად, ნაწილაკების მოძრაობა პოტენციალურ ნაკადში), ან ექსპერიმენტული შედეგების საფუძველზე ხდება ურთიერთქმედების ფენომენოლოგიური ეფექტების შემოთავაზება [5,71,72].



## თავი 2. სტიკ-სლიპის (არათანაბარი ხახუნის) მოდელები: პერიოდული ზემოქმედების მოდება

სეისმური პროცესის და ასევე მასათა მოძრაობის თანამედროვე კონცეფცია ძირითადად ეყრდნობა არამდგრადი ხახუნის მოდელს [25], რომელიც ვითარდება უკვე არსებულ ტექტონიკურ რღვევაზე ან სრიალის ზედაპირზე.

დიტრიხ-რუინას განტოლება ძვრის დამაბულობისათვის აღწერს, ექსპერიმენტების საფუძველზე მიღებულ, სრიალის პრაქტიკულად ყველა მახასიათებელს: გვიჩვენებს, რომ ხახუნის ძალა არ არის მუდმივი სიდიდე და განიცდის დროში რთულ ევოლუციას. განტოლებას არაწრფივი სახე აქვს, შესაბამისად, სრიალის პროცესი უნდა იყოს ძალიან მგრძნობიარე სუსტი გარეგანი ზემოქმედებისადმი, უნდა იყოს ჰისტერეზისის ეფექტი და ა.შ. ბუნებრივია, რომ ხახუნის არამდგრადობები აღძრავს რხევებს, მათ შორის აკუსტიკურ ემისიას. როგორც მოსალოდნელია, აკუსტიკური ემისია აღიმგრება სრიალის დროს და არ არის უძრაობის ფაზაში. ჩვენ ვთვლით, რომ აკუსტიკურმა გაზომვებმა შეიძლება გამოავლინონ ხახუნის მექანიზმის დეტალები, რომლებიც პირდაპირი გაზომვებით არ დაიკვირვება.

დამატებითი ზემოქმედება, რომელიც შეიძლება ბევრად მცირე იყოს ძირითად გამწვევ ძალაზე სტიკ-სლიპის პროცესში შეიძლება გამოიწვიოს ტრიგერირება და სინქრონიზაცია, რაც ნიშნავს, რომ ეს მოვლენები ობიექტების არაწრფივი ურთიერთქმედების შედეგია. ხდება სრიალის სიჩქარის და მდგომარეობის განტოლების განზოგადების და ანალიზის მცდელობა.

ხახუნის მოდელი (ცხრილი 1) განვითარდა ამონტონის კანონიდან, სადაც ძვრის დამაბულობა  $\tau$  ნორმალური დამაბულობის  $\sigma_n$  პროპორციულია, ხახუნი მუდმივი  $\mu$  კოეფიციენტით. კულონმა კოჰეზიური კონტაქტის გამოსათვლელად შემოიტანა დამატებითი  $c$  წევრი. ჰუბერტმა და რუბეიმ შემოგვთავაზეს ფოროვანი წნევის  $P_p$  ახსნა. ფუნდამენტური პროგრესი განხორციელდა დიტრიხის ექსპერიმენტებით და რუინას თეორიული ანალიზით, რომელიც გვიჩვენებს, რომ ხახუნის ძალა დამოკიდებულია სიჩქარე-მდგომარეობაზე (ცხრილში  $V$  არის მყისი და  $V_0$  - საწყისი სიჩქარე,  $\Theta$  არის მდგომარეობის პარამეტრი და  $L$  არის მახასიათებელი მანძილი) [97].

**ცხრილი 1.**

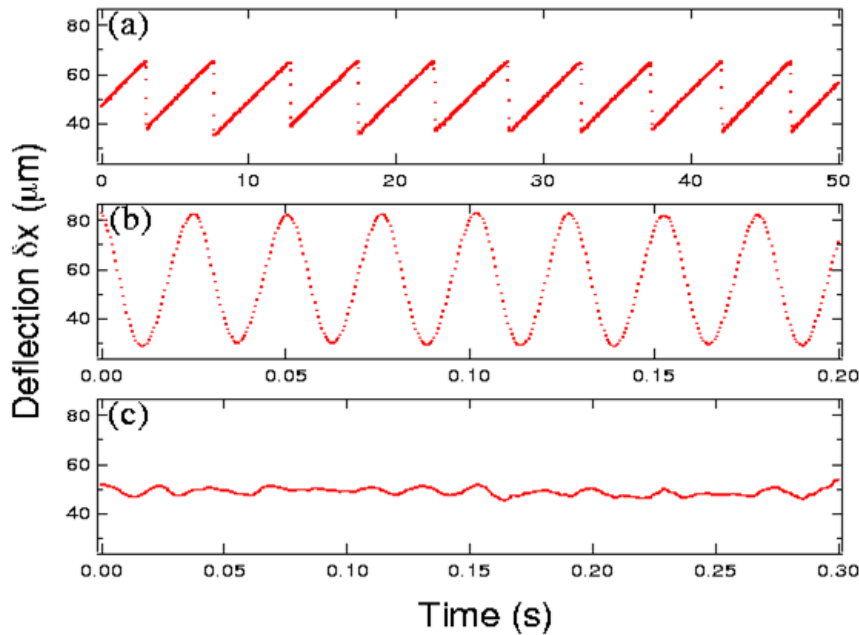
დროს	<b>Amonton, 1699</b>	$\tau = \sigma_n \mu$
ისარი	<b>Coulomb, 1773</b>	$\tau = c + \sigma_n \mu$
↓	<b>Hubbert and Rubbey, 1959</b>	$\tau = c + \mu(\sigma_n - P_p) = c + \sigma_n \mu_{eff}$
	<b>Dietrich, 1972, Ruina, 1983</b>	$\tau = [\sigma_n \mu + a \ln(V/V_0) + b \ln(V_0 \Theta / L)] \sigma_{eff};$ $d\Theta/dt = 1 - (V\Theta/L)$

ცხრილში წარმოდგენილი ბოლო ფენომენოლოგიური გამოსახულება ძვრის დამაბულობისათვის აღწერს, ექსპერიმენტების საფუძველზე მიღებულ, სრიალის პრაქტიკულად ყველა მახასიათებელს: გვიჩვენებს, რომ ხახუნის ძალა არ არის მუდმივი სიდიდე და განიცდის დროში რთულ ევოლუციას. განტოლებას არაწრფივი სახე აქვს, შესაბამისად, სრიალის პროცესი უნდა იყოს ძალიან მგრძობიარე სუსტი გარეგანი ზემოქმედებისადმი, უნდა იყოს ჰისტერეზისის ეფექტი და ა.შ.

გეოფიზიკოსებს ბევრი დაკვირვება დაუგროვდათ სეისმურ და ზოგადად გეოფიზიკური მოვლენების რეჟიმზე მცირე გარე ზემოქმედების მნიშვნელოვან გავლენაზე, კერძოდ ბირთვული აფეთქებების, ძლიერი მიწისძვრების [159], სამთო საქმიანობის და წყალსაცავები დატვირთვის [63], თოვლის დნობის, ძლიერი ელექტრული იმპულსების და მიმოქცევების [119].

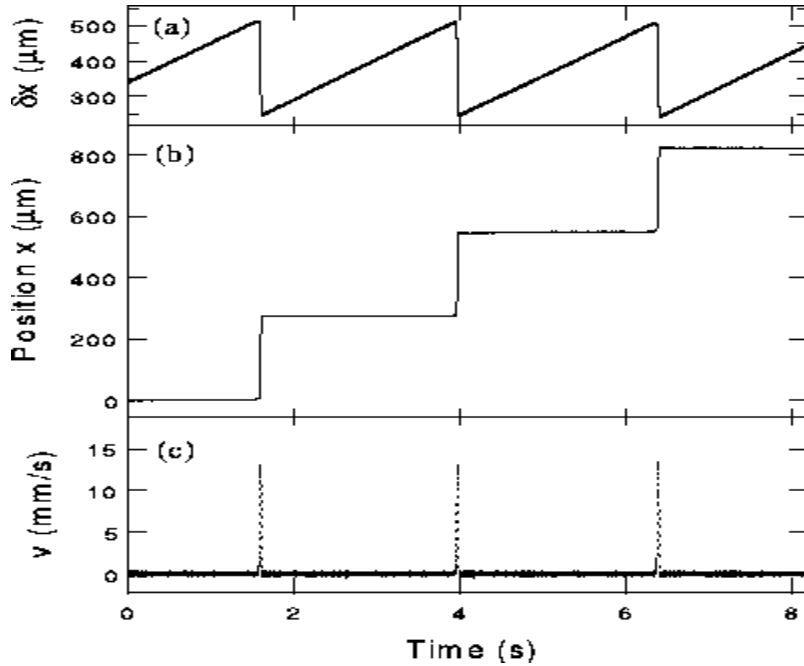
## 2.1 ძირითადი ექსპერიმენტული მონაცემები

პირობებზე (ზამბარის სიხისტე  $k$ , გაწევის სიჩქარე  $V$ , ნორმალური დამაბულობა  $\sigma_n$ , სრიალის ზედაპირის მდგომარეობა  $\theta$ ) დამოკიდებულებით, წანაცვლების ჩანაწერიდან ჩანს სამი ძირითადი ტიპის ხახუნი - სტიკ-სლიპი (არათანაბარი ხახუნი), ინერციული რეჟიმი და სტაბილური რეჟიმი, შესაბამისად a, b და c ნახ.2.1-ზე.



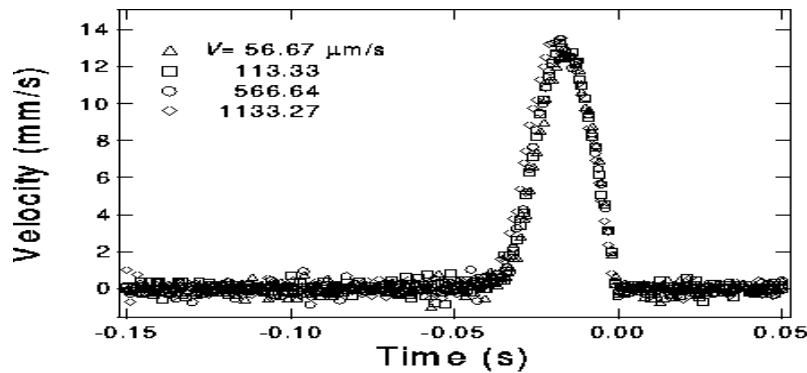
ნახ.2.1. ხახუნის რეჟიმები: (a) სტიკ-სლიპი, (b) ინერციული რეჟიმი და (c) სტაბილური რეჟიმი

ნახ.2.2. გვიჩვენებს  $\delta x$  ზამბარის წაგრძელებას,  $x$  ზედა ფილის პოზიციას და მის მყის სიჩქარეს.



ნახ.2.2. ზამბარის წაგრძელება  $\Delta x$ , ზედა ფილის პოზიცია  $x$  და მყისი სიჩქარე  $V$  სტიკ-სლიპის მოძრაობის დროს (Nasuno, 1997)

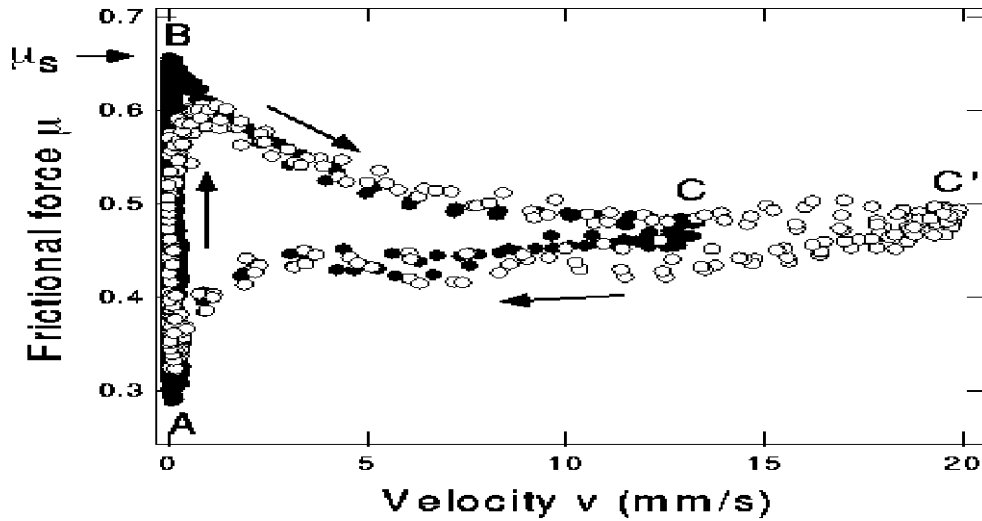
სტიკ-სლიპის რეჟიმი შედარებით მცირე სიჩქარეებზე და მცირე სიხისტეებზე დაიკვირვება. უფრო დიდ  $V$  სიჩქარეებზე ხდება გადასვლა ინერციული პერიოდული ოსცილაციების რეჟიმში. უფრო მაღალი სიჩქარეებისათვის ჩვენ გვაქვს სტაბილური სრიალი ფლუქტუაციებით. ერთეული სრილის შემთხვევა დეტალურად გამოიკვლია ნასუნომ და სხ., (1998): ტანგენციალური ძალის მოდების შემდეგ სრილის სიჩქარე მკვეთრად იზრდება და შემდეგ მცირდება - ნახ.2.2.



ნახ.2.3. სხვადასხვა გაწევის სიჩქარეებისათვის ( $V = 56.67; 113.33; 566.64$  და  $1133.27$  მმ/წმ) სრილის პერიოდში სრილის სიჩქარის ევოლუცია (Nasuno et al,1997): .

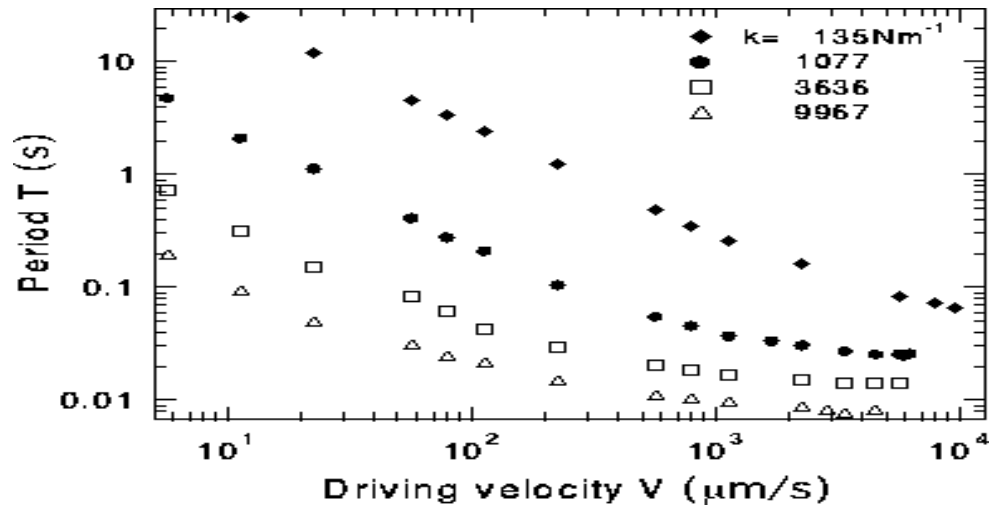
მყისიერი ხახუნის ძალა  $\mu(t)$  სრილის განმავლობაში განიცდის ჰისტერეზისს (ნახ.4): უძრაობის პერიოდში  $\mu$  იზრდება სტატიკურ ზღურბლამდე  $\mu_s = F_s/Mg$  და შემდეგ იწყება

სრიალი. სრილის განმავლობაში  $\mu$  მცირდება მის კინეტიკურ მნიშვნელობამდე. ამის შემდეგ, შემცირების ეტაპზე ეცემა საწყის  $\mu$  მნიშვნელობამდე [97,98].



ნახ.2.4. სრილის პერიოდში ხახუნის ძალის  $\mu$  შედარება სრილის სიჩქარესთან (Nasuno, 1998).

ბუნებრივი სტიკ-სლიპის პერიოდში სრილის პარამეტრების (წანაცვლება, მდგომარეობა და სიჩქარე) ცვლილება წარმოდგენილია ნახ.2.5 - ზე; ცხადია, რომ ეს არის რელაქსაციური პროცესი დამაბულობის დაგროვების დიდი პერიოდით და აკუსტიკური ემისიის მომენტში, დამაბულობის მკვეთრი ვარდნით. ბუნებრივი სტიკ-სლიპის პერიოდი მცირდება გაწევის  $v$  სიჩქარის და ზამზარის  $k$  სიხისტის ზრდასთან ერთად.

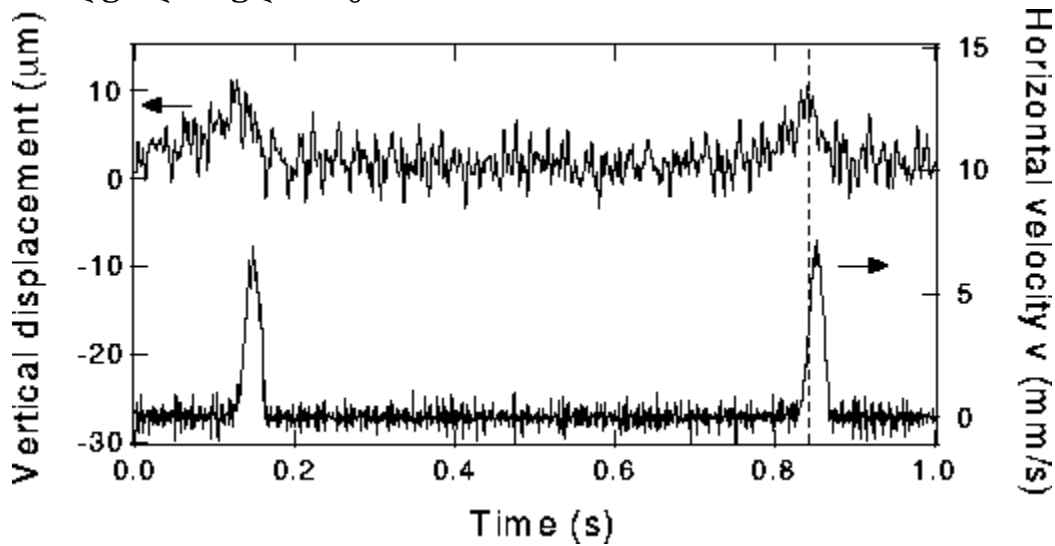


ნახ.2.5. სრილის განმეორებადობის  $T$  პერიოდის დამოკიდებულება  $V$  სიჩქარეზე და  $k$  სიხისტეზე (Nasuno, 1998)

## 2.2 სტიკ-სლიპის ფიზიკა/მექანიკა

ზედაპირის ფიზიკიდან კარგადაა ცნობილი, რომ ხახუნის (ადგეზია) ძალა  $F_f$  არის ძირითადად ელექტრომაგნიტური ბუნების მოლეკულათაშორისი და ზედაპირთაშორისი ძალების შედეგი: i. წმინდა ელექტროსტატიკური (კულონის) ძალები, ii. პოლარიზაცია დიპოლური მომენტების ინდუცირების შედეგად და iii. კვანტურ-მექანიკური ძალები. ხახუნი იწვევს ენერჯის გადაცემას და გაბზევას. მოძრაობის კინეტიკური ენერჯია გარდაიქმნება სითბურ ენერჯიად. სრიალის დროს არასტაბილურობას ადგილი აქვს, როდესაც ხახუნი სისტემას აძლევს მეტ ენერჯიას, ვიდრე შეიძლება გაიზნეს სტაციონალური პროცესის დროს.

უნდა აღინიშნოს, რომ სრიალის გასწვრივ ლატერალურ მოძრაობას ყოველთვის უსწრებს მცირე ვერტიკალური მოძრაობები, რომლებიც აუცილებელია ხორკლების გადასალახად (ნახ.2.6); მისი სიდიდე დამოკიდებულია ზედაპირის ხორკლიანობაზე და ნორმალურ დაძაბულობაზე.



ნახ.2.6. ზედა ფილის ვერტიკალური წანაცვლების  $D_v$  და ტანგენციალური სიჩქარის  $V_t$  დროზე დამოკიდებულება (Nasuno, 1998)

როგორც ჩანს, პერკოლაციის თეორიას, კერძოდ შემხები ფრაქტალური ზედაპირების ტანგენციალური წანაცვლების პერკოლაციური მოდელით შეიძლება აიხსნას ხახუნის კოეფიციენტის სტატიკურიდან კინეტიკურისაკენ გადასვლა, მოხახუნე ფრაქტალური ზედაპირების საკონტაქტო წერტილების კრიტიკული რაოდენობის მიღწევას. ეს დაშვება დასტურდება გასრიალების წინამორბედი მცირე ვერტიკალური წანაცვლების ექსპერიმენტული მონაცემებით (ნახ.6), საიდანაც ჩანს, რომ საკონტაქტო წერტილების რაოდენობა  $n$  მცირდება კრიტიკულ  $n_c$  მნიშვნელობამდე, რაც შესაძლებელს ხდის მაკროსკოპულ ტანგენციალურ წანაცვლებას. რღვევის პერკოლაციური მოდელის [36] მსგავსი მათემატიკური ფორმალიზმი შეიძლება დამუშავდეს სრიალის პროცესისათვის.

## 2.3 დიტრიბ-რუნას განტოლება (ხახუნის ძალის სიჩქარეზე და ლოდინის დროზე დამოკიდებულება)

ამონტონ-კულონის კანონის მიხედვით, ჩვეულებრივ მდგომარეობაში კინეტიკური ხახუნის ძალა  $F_{kin}$  არაა დამოკიდებული სრიალის სიჩქარეზე. როდესაც ერთი ფილა სრიალებს მეორეზე, გამყოფ ზედაპირზე ხდება ფაქტიური კონტაქტების მრავალჯერადი ფორმირება და გაწყვეტა.

როდესაც ფაქტიური კონტაქტი ფორმირდება ის ფიქსირდება ლოკალურად. დროთა განმავლობაში წერტილის გარშემო იზრდება დრეკადობის ენერგია და საბოლოოდ კონტაქტი ტყდება და ხდება ლოკალური გასრიალება. წერტილის გარშემო დაგროვილი ენერგია თავისუფლდება და განიბნევა. წარმოიშვება კინეტიკური ხახუნის ძალა. სისტემა იმეორებს სტიკ-სლიპის ლოკალურ მოძრაობა, თუნდაც ის მთლიანობაში სტაციონალურად მოძრაობდეს. სიჩქარის მასშტაბი, რომელიც განსაზღვრავს კინეტიკური ხახუნის ძალას, არის ლოკალური სრიალის სიჩქარე, რომელიც ბევრად დიდია მოძრავი ფილის სრიალის სიჩქარეზე. შედეგად, ჯამური კინეტიკური ხახუნის ძალა არაა დამოკიდებულიცვეულებრივ მდგომარეობაში ფილის სრიალის სიჩქარეზე.

თუმცა ბევრი მყარი სხეულისათვის კინეტიკური ხახუნის ძალა დამოკიდებულია სიჩქარეზე. მაგალითად, ქანებს შორის კინეტიკური ხახუნი ლოგარითმულადაა დამოკიდებული სიჩქარეზე. სიჩქარეზე დამოკიდებულება არაა ძალიან მნიშვნელოვანი და ჩვეულებრივ მდგომარეობაში დიდ როლს არ თამაშობს, მაგრამ გარკვეულ შემთხვევებში ძალიან მნიშვნელოვანია. ცნობილია ასევე, რომ მაქსიმალური სტატიკური ხახუნის ძალა ლოდინის დროსთან ერთად ლოგარითმულად იზრდება. ეს გამოწვეულია კონტაქტის ფაქტიური ფართობის ლოგარითმული ზრდით, რაც არის ფაქტიური საკონტაქტო წერტილების პლასტიკური დეფორმაციის შედეგი.

ლოდინის დროზე სტატიკური ხახუნის ძალის დამოკიდებულებას მჭიდრო კავშირი აქვს კინეტიკური ხახუნის ძალის სიჩქარეზე დამოკიდებულებასთან. როგორც აღნიშნული იყო, როდესაც ერთი მყარი სხეული მუდმივი სიჩქარით სრიალებს მეორეზე, ლოკალური სტიკ-სლიპის მოძრაობა ხდება რეალურ საკონტაქტო წერტილებზე და ხდება მათი მრავალჯერადი გადაწყობა. როდესაც კონტაქტი ფორმირდება ლოდინის დრო იზრდება უძრაობის პერიოდში და ამის შემდეგ იზრდება ამ კონტაქტებზე სტატიკური ხახუნის ძალა. რეალური საკონტაქტო წერტილების მიწებების საშუალო დრო, რასაც ჩვენ კონტაქტის დროს ვეძახით, სრიალის სიჩქარის უკუპროპორციულია. აქედან გამომდინარე, ხახუნის კინეტიკური ძალა მცირდება ლოგარითმულად სრიალის სიჩქარესთან დამოკიდებულებით.

ეს მექანიზმი, სრიალის დიდი სიჩქარეებისათვის, ამცირებს ხახუნის კინეტიკურ ძალას. მაგრამ, კინეტიკური ხახუნის ძალის სიჩქარეზე დამოკიდებულების ნიშანი დამოკიდებულია მდგომარეობაზე. არსებობს ფაქტორები, რომლებიც იწვევენ სიჩქარის ზრდასთან ერთად კინეტიკური ხახუნის ლოგარითმულ ზრდას. ეს არის სითბური აქტივაციის პროცესი. როდესაც ორი მყარი სხეული სრიალებს ერთმანეთზე, ხდება რეალური კონტაქტების ფორმირება და მსხვრევა. თერმული ფლუქტუაციის მცირე

ტემპერატურა, მცირე სიჩქარის შემთხვევაში ხელს უწყობს ფაქტიური კონტაქტების მსხვრევას და ამცირებს კინეტიკურ ხახუნის ძალას. მაღალი სრიალის სიჩქარის შემთხვევაში თერმული ფლუქტუაცია არაეფექტურია, რადგან მაღალი სიჩქარე ამტვრევს რეალურ კონტაქტებს ძალით და კინეტიკური ხახუნის ძლა იზრდება.

ხახუნის ძალის ასეთი ქცევა კარგად აღიწერება ძირითადი კანონით, რომელიც შემოთავაზებული დიტრიხის და რუინას მიერ. მას ასეთი სახე აქვს:

$$\mu = \mu_0 + A \ln \left( 1 + \frac{V}{V_0} \right) + B \ln \left( 1 + \frac{\theta}{\theta_0} \right) \quad (2.1)$$

აქ  $\mu$  არის ხახუნის კოეფიციენტი,  $V$  სრიალის სიჩქარე და  $\theta$  მდგომარეობის მუდმივა.  $A, B, \mu_0, V_0$  და  $\theta_0$  გარკვეული მუდმივებია. განტოლების ლოგარითმული ფუნქციის ცვლადში დამატებულია 1, რათა ავიცილოთ ფუნქციის განშლადობა. ჩვენ განვიხილავთ შემთხვევას, როდესაც ეს შეიძლება უგულვებელვყოთ. მდგომარეობის ფუნქციის  $\theta$  დროში ევოლუცია მოცემულია შემდეგნაირად

$$\frac{d\theta}{dt} = 1 - \frac{\theta V}{D_c} \quad (2.2)$$

სადაც  $D_c$  არის მუდმივა სიგრძის განზომილებით. წარმოდგენილი განტოლების ამონახსნს შემდეგი სახე აქვს

$$\theta(t) = \int_0^1 \exp \left\{ -\frac{x(t) - x(t')}{D_c} \right\} dt' \quad (2.3)$$

სადაც დროის ათვლა იწყება მყარი სხეულების კონტაქტის დაწყებიდან. როგორც ზედა განტოლებიდან ჩანს,  $\theta(t)$  არის კონტაქტის ასაკი და  $D_c$  არის მეხსიერების მანძილი. სისტემიდან იშლება ინფორმაცია, როდესაც  $x(t) - x(t')$  გადააჭარბებს  $D_c$ -ს.

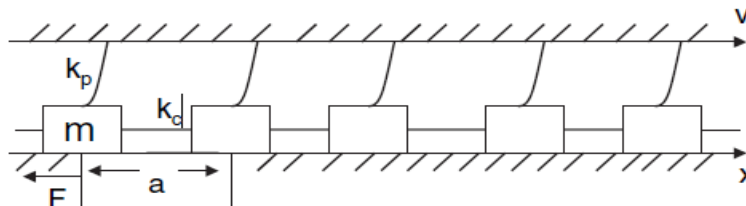
სტაციონალური სრიალის შემთხვევაში მდგომარეობის მუდმივა არ უნდა შეიცვალოს. ჩვენ მივიღებთ  $\theta = \frac{D_c}{V}$ . ამას თუ ჩავსვავთ (5) განტოლებაში, მივიღებთ ხახუნის კოეფიციენტის დროზე დამოკიდებულების გამოსახულებას

$$\mu = const. + (A - B) \ln(V) \quad (2.4)$$

$(A - B)$  - ს ნიშანი განსაზღვრავს კინეტიკური ხახუნის ძალის სიჩქარეზე დამოკიდებულების ნიშანს. როდესაც  $(A - B) > 0$  ხახუნის ძალას აქვს სიჩქარის ზრდის ქცევა, როდესაც  $(A - B) < 0$  ადგილი აქვს სიჩქარის შემცირების ქცევას.

## 2.4 ბურიჯ-კნოპოვის მოდელი

ცნობილია, რომ ბურიჯის და კნოპოვის მიერ შემოთავაზებული მოდელით, რომელიც არის ზამბარა-ბლოკის სახეობა, შეიძლება გავიმეოროთ გუტენბერგ-რიხტერის კანონი [27,92]. მოდელი ნაჩვენებია ნახ.2.7-ზე.



ნახ.2.7. ბურიჯ-კნოპოვის მოდელის სქემატური წარმოდგენა

ზედა ფილა მოძრაობს მუდმივი  $v$  სიჩქარით. ბლოკი, რომლის მასაა  $m$ , წრფივი  $kp$  სიხისტის მქონე ზამბარით შეერთებულია ზედა ფილასთან. ბლოკები ერთმანეთთან ასევე შეერთებულია წრფივი  $kc$  სიხისტის მქონე ზამბარებით. ხახუნის ძალა მოქმედებს ქვედა ბლოკსა და თითოეულ ბლოკს შორის. ბუნებრივი კატასტროფების მოდელირებისათვის აუცილებელი პირობაა სიჩქარის შემცირების ქცევა. მოდელის მოძრაობის განტოლებას აქვს შემდეგი სახე

$$m\dot{x}_i = k_p(vt - x_i) + k_c(x_{i+1} + x_{i-1} - 2x_i) - \phi(\dot{x}_i) \quad (2.5)$$

აქ  $x_i$  არის  $i$ -ური ბლოკის კოორდინატი. განზომილებისგარეშე განტოლების მისაღებად უნდა საჭიროა დროის ერთეულის  $\sqrt{\frac{m}{k_p}}$  და სიგრძის ერთეულის  $\phi_{stat}^{max}/k_p$  შემოღება, სადაც  $\phi_{stat}^{max}$  სტატიკური ხახუნის ძალის მაქსიმუმია, და გავზომოთ დრო და სიგრძე ამ ერთეულებში. მაშინ მოძრაობის ნორმალიზებულ განტოლებას ექნება სახე

$$\ddot{x}_i = (vt - x_i) + l^2(x_{i+1} + x_{i-1} - 2x_i) - \phi(\dot{x}_i) \quad (2.6)$$

სადაც  $l = \sqrt{\frac{k_c}{k_p}}$  არის სიხისტის უგანზომილებო პარამეტრი და  $x_i, t, v$  და  $\phi(\dot{x}_i)$  არიან ნორმალიზებული უგანზომილებო სიდიდეები. მიწისძვრების და ასევე ხშირად მეწყრების შემთხვევაში დატვირთვის სიჩქარე ძალიან მცირეა კატასტროფის სიჩქარესთან შედარებით. ამიტომ ჩვენ ვიღებთ ზღვარს  $v \rightarrow 0$ . კარლსონის და სხ., მიხედვით  $\phi(\dot{x}_i)$ -ს აქვს სახე

$$\phi(\dot{x}_i) = \frac{1-\sigma}{1+2a\dot{x}_i/(1-\sigma)} \quad (2.7)$$

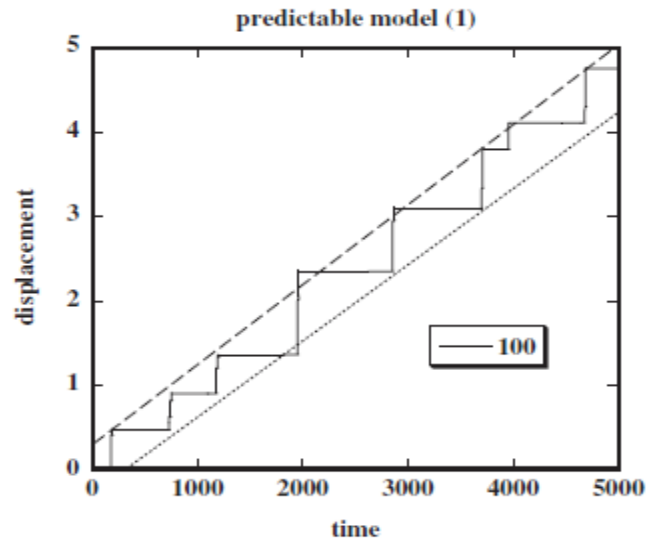
$\dot{x}_i > 0$  - თვის, და სტატიკური ხახუნის ძალის მაქსიმუმი დატვირთვის მიმართულებით არის ერთეული და საპირისპირო მიმართულებით  $-\infty$ . ეს ნიშნავს, რომ არცერთი ბლოკი არ მოძრაობს დატვირთვის საწინააღმდეგო მიმართულებით.  $\sigma$  არის განსხვავება სტატიკური ხახუნის მაქსიმალურ ძალასა და სიჩქარის ნულოვან ზღვარში კინეტიკურ ხახუნის ძალას შორის.  $a$  არის კინეტიკური ხახუნის ძალის სიჩქარის შემცირების ქცევის ზომა. გამოთვლებისას გამოყენებული იყო  $l = \sqrt{60}$ ,  $a = 1$ ,  $\sigma = 0.01$  and  $\alpha = 4$ .

## 2.5 რიცხვითი მოდელირების შედეგები

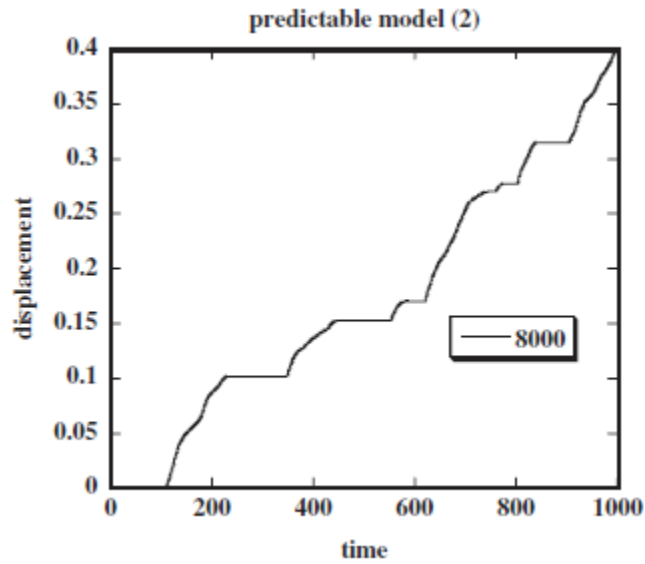
ნახ.2.8-ზე წარმოდგენილია 100 ბლოკისაგან შედგენილი სისტემის სიმძიმის ცენტრის წანაცვლება, როგორც დროის ფუნქცია. დაიკვირვება სტიკ-სლიპის მოძრაობა. უწყვეტი და წყვეტილი წრფეები გავლებულია წანაცვლება-დროის დამოკიდებულების გრაფიკის ზედა და ქვედა კუთხეებზე, შესაბამისად. თუ ქვედა კუთხეები წრფეზეა, შეგვიძლია მოვლენის მოხდენის დროის წინასწარმეტყველება, ამიტომ სისტემას (წყვეტილს) ჰქვია დროის პროგნოზული. მეორეს მხრივ, თუ ზედა კუთხეები მოთავსებულია წრფეზე შეგვიძლია ვიწინასწარმეტყველოთ მოვლენის სიდიდე, შესაბამისად სისტემას ჰქვია სიდიდის პროგნოზული. როგორც ნახაზიდან ჩანს სისტემა ავლენს დროის და სიდიდის პროგნოზირების ქცევას გარკვეული დროის ინტერვალში, მაგრამ არ შეუძლია ხანგრძლივი დროის შემთხვევაში. ნახ.2.9-ზე წარმოდგენილია 8000 ბლოკისგან შედგენილი სისტემის წანაცვლება. ამ სისტემა უკვე შეუძლებელია



პროგნოზირებადობის მოძებნა. მოდელის პროგნოზირებადობა დამოკიდებულია მოდელის ზომაზე.



ნახ.2.8. 100 ბლოკისაგან შემდგარი სისტემის სიმძიმის ცენტრის წანაცვლება, როგორც დროის ფუნქცია [92].



ნახ.2.9. 8000 ბლოკისაგან შემდგარი სისტემის სიმძიმის ცენტრის წანაცვლება, როგორც დროის ფუნქცია [92].

## თავი 3 ძიების ელექტრული მეთოდები

ძიების ელექტრული მეთოდი (ელექტროძიება) საძიებო გეოფიზიკის ერთ-ერთი ძირითადი დარგია, რომელიც ემყარება ელექტრული და ელექტრომაგნიტური ველების განაწილების შესწავლას. ეს ველები მიწის წიაღში და მის ზედაპირზე არსებობს დედამიწაში და კოსმოსში მიმდინარე ფიზიკურ-ქიმიური პროცესების შედეგად ან იქმნება ხელოვნურად. ელექტრული მეთოდები შეიძლება ორ ტიპად დავყოთ იმის მიხედვით, თუ რა წყარო გამოიყენება, ბუნებრივი თუ ხელოვნური. პირველ მათგანს ბუნებრივი ელექტრული ველის (ბევ) მეთოდებს უწოდებენ, ხოლო მეორეს - წინააღმდეგობის მეთოდებს.

### 3.1 ბუნებრივი ელექტრული ველის (ბევ) მეთოდი

შეიძლება გამოიყოს ბევ-ის რამდენიმე ძირითადი მექანიზმი, ესენია: ა) **ელექტროფილტრაციული პოტენციალები** და ბ) **დიფუზურ-ადსორბციული და ელექტროქიმიური პოტენციალები**.

ზოგად შემთხვევაში ბუნებრივი ველი შეიძლება გამოწვეულ იქნას მრავალი მიზეზით - დიფუზიით, ადსორბციით, ფილტრაციით, ჟანგვა-აღდგენით და ა. შ. აქ განვიხილავთ დიფუზიურ-ადსორბციულ და ჟანგვა-აღდგენით პოტენციალებს.

**ქანების დიფუზიურ-ადსორბციული აქტიურობა:** თუ ერთი და იმავე შედგენილობის, მაგრამ სხვადასხვა კონცენტრაციის ორ ხსნარს შორის კონტაქტს დავამყარებთ, მათ შორის დაიწყება იონების გაცვლა - იონები კონცენტრირებული ხსნარიდან გადადიან განზავებულში. ჩვეულებრივად ერთ-ერთ იონს, უმეტეს შემთხვევაში კათიონს, მეტი სიჩქარე აქვს. ამიტომ სწრაფი კათიონები ასწრებენ საწინააღმდეგო ნიშნის იონებს განზავებულ ხსნარში შესვლას, განზავებული ხსნარი მდიდრდება კათიონებით და დადებითად იმუხტება. განზავებული ხსნარი ყოველთვის იღებს უფრო სწრაფი იონის ნიშანს. თავის მხრივ, მუხტების გაყოფის შედეგად შექმნილი ევექტრული ველი ამუხრუჭებს სწრაფ იონებს. ელექტრული ველისა და კონცენტრაციის გრადიენტის ერთობლივი გავლენა განსაზღვრავს წონასწორულ დიფუზიურ პოტენციალს.

კონცენტრაციულ (დიფუზიურ) პოტენციალთა სხვაობა ორ წერტილს შორის, რომლებშიც კონცენტრაციები შესაბამისად  $n_1$  და  $n_2$  უდრის:

$$\Delta V_d = k_j \ln \frac{n_2}{n_1}$$

ან, ვინაიდან ხსნარის კონცენტრაცია უკუპროპორციულია მისი წინააღმდეგობისა

$$\Delta V_d = k_d \ln \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

თუ ამ ორ ხსნარს შორის მოვათავსებთ ქანის ნიმუშს, ეს პოტენციალთა სხვაობა შეიცვლება, ვინაიდან ქანებს ახასიათებს გარკვეული ადსორბციის უნარი ამა თუ იმ იონების მიმართ. ამ შემთხვევაში ჩვენ საქმე გვაქვს დიფუზიურ-ადსორბციულ პოტენციალთა სხვაობასთან  $\Delta U_{da}$ .

$$\Delta U_{da} = k_{da} \lg \frac{n_2}{n_1} \approx k_{da} \lg \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

დიფუზიურ-ადსორბციული პოტენციალის გარდა, არსებობს კიდევ ე.წ. ელექტროქიმიური ანუ ჟანგვა-აღდგენითი პოტენციალები, რომლებიც ძირითადად მადნებს უკავშირდება.

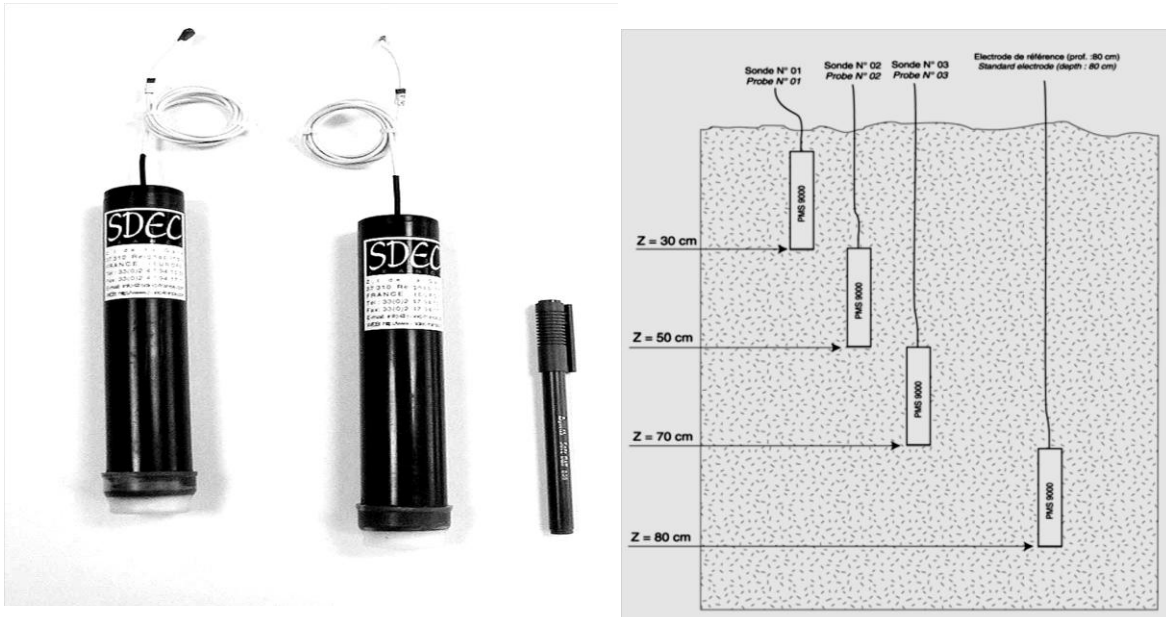
ელექტრონული და იონური გამტარების საზღვარზე წარმოიქმნება ელექტროდული პოტენციალები. ამ პოტენციალის გაზომვა შეიძლება მხოლოდ სტანდარტული (წყალბადის) ელექტროდის მიმართ, რომლის პოტენციალს პირობითად ნულის ტოლად მიიჩნევენ. ლითონისა და მისივე იონების შემცველი ხსნარის საზღვარზე იონების ადსორბციისა და დესორბციის შედეგად წარმოიქმნება წონასწორული ელექტროდული პოტენციალი

წონასწორული პოტენციალი შეიძლება გამოწვეული იქნეს სხვადასხვა მექანიზმით: ლითონის წონასწორული (შექცევადი) პოტენციალი პირველი ან მეორე სახისაა. პირველი სახის პოტენციალი დაკავშირებულია მეტალის იონის (კათიონის) გადასვლასთან ხსნარში და ამავე კათიონის მიერთებასთან მეტალის ზედაპირზე. ხოლო მეორე სახის წონასწორული პოტენციალი იქმნება მაშინ, როცა ადსორბცია-დესორბციის შექცევად პროცესს განიცდის მოცემული მეტალის მარილის ხსნარის ანიონი. იგი განისაზღვრება ანიონის აქტივობით.

### 3.2 საველე გაზომვები და დამუშავების მეთოდები

ბევრ-ის აპარატურა ძალზე მარტივია (ნახ.3.1). ძირითადი ნაწილებია არაპოლარიზებადი ელექტროდები, კაბელი და მაღალი წინაღობის მილივოლტმეტრი ან ნებისმიერი ელექტროსადიებო პოტენციომეტრი. არაპოლარიზებადი ელექტროდი წარმოადგენს მეტალის ღეროს, რომელიც ჩაძირულია მისივე მარილის გაჯერებულ წყალხსნარში (მაგ.: Cu და CuSO<sub>4</sub> წყვილი). წყალხსნარი ისხმება ფოროვან ჭურჭელში, რომელიც იფლობა ნიადაგში.

ძირითადად გამოიყენება ორი მეთოდიკა: 1) გრადიენტული, როდესაც



ნახ.3.1. ბუნებრივი ელექტრული ველის არაპოლარიზებადი ელექტროდები

ელექტროდების დაშორება მუდმივია, ხოლო მთელი დანადგარი პროფილის გასწვრივ გადაადგილდება. რომელიმე პუნქტში გაზომვის დამთავრების შემდეგ უკანა ელექტროდი მიწდება წინა ელექტროდის ადგილზე, ხოლო წინა ელექტროდი გადადის პროფილის მიმართულებით მუდმივი ბიჯით  $l$ . იმისათვის, რათა პოლარობა არ შეგვეშალოს, ხელსაწყოს უარყოფითი კლემა ყოველთვის უერთდება უკანა ელექტროდს, ხოლო დადებითი წინა ელექტროდს; 2) მუდმივი ბაზის მეთოდი, როდესაც ერთი ელექტროდი უძრავია, ხოლო მეორე გადაადგილდება პროფილის გასწვრივ. ამ კონფიგურაციაში უარყოფითი კლემა ყოველთვის უერთდება უძრავ დამიწებას, ხოლო დადებითი - მოძრავ ელექტროდს. ამ მეთოდით კვლევა შესაძლოა წყალსაცავებშიც.

ბევ-ის გაზომვებისას რამდენიმე დამამახინჯებელი ფაქტორი უნდა იყოს მიღებული მხვედელობაში. ინდუსტრიულ რეგიონებში ძლიერია მოხეტიალე დენების გავლენა დამიწებული მექანიზმებიდან, მაღალი ძაბვის ხაზებიდან, ელექტრორკინიფიციდან. მოხეტიალე დენების სიხშირე 50-60 ჰერცია, ხოლო ამპლიტუდა შესაძლოა აღწევდეს ათეულ და ასეულ მილივოლტს-კილომეტრზე. გავლენის შემცირება შესაძლოა შესაბამისი ფილტრების გამოყენებით.

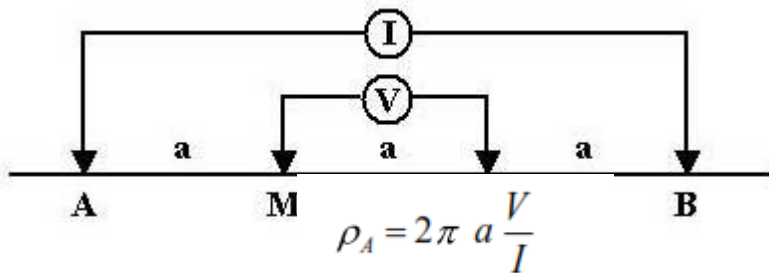
გარდა ინდუსტრიული წარმოშობის დენებისა, დედამიწაში ცირკულირებს აგრეთვე იონოსფეროს დენებით ინდუცირებული ე.წ. ტელურული დენები, რომელთა წამყვანი პერიოდები 20-30 წამის ფარგლებშია. მათი გამორიცხვა შესაძლოა რამდენიმე პერიოდის შემცველ ინტერვალში (რამდენიმე წუთი) აღებული ანათვლების გასაშუალებით.

### 3.3 წინააღმდეგობის მეთოდი

წინააღმდეგობის მეთოდში გამოიყენება ხელოვნური დენის წყარო. დენი მკვებავი ელექტროდების საშუალებით აღწევს გრუნტში და მის მიერ აღძრული პოტენციალთა სხვაობა იზომება მიმღები ელექტროდების საშუალებით დღიურ ზედაპირზე. დედამიწის წიაღში არსებული წინააღმდეგობის არაერთგვაროვნებები ამახინჯებენ პოტენციალთა განაწილებას ერთგვაროვან გარემოსთან შედარებით. სწორედ ამ ერთგვაროვანი ველისაგან გადახრას (ანომალიას) იყენებენ სიღრმეში არსებული არაერთგვაროვნებების - ფენების, ჩანართების - აღმოჩენისათვის.

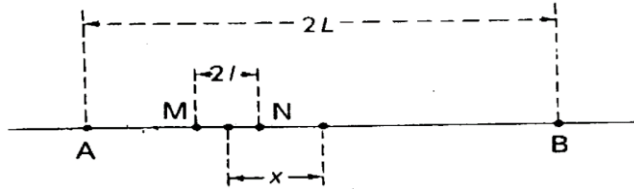
თუ გარემო ერთგვაროვანია, წინააღმდეგობის მეთოდი გვაძლევს მის ჭეშმარიტ გამტარობას, რომელიც არ იქნება დამოკიდებული ელექტროდების კონფიგურაციაზე და ელექტროდების პოზიციაზე დედამიწის ზედაპირზე, ვინაიდან ჭეშმარიტი გამტარობა მუდმივი სიდიდეა. არაერთგვაროვან გარემოში კი  $\Delta V$ , და მაშასადამე წინააღმდეგობა  $\rho$  დამოკიდებული უნდა იყოს ელექტროდების კონფიგურაციასა და მდებარეობაზე, ვინაიდან მეორადი ველები ამახინჯებს პირველადი ველის განაწილებას. ამიტომ არაერთგვაროვან გარემოში გაზომილ  $\rho$ -ს სიდიდეს უწოდებენ მოჩვენებით წინააღმდეგობას (apparent resistivity) და აღნიშნავენ  $\rho_a$ . დანადგარის კოეფიციენტი არაერთგვაროვან გარემოსათვის  $K$  დამოკიდებულია ელექტროდების კონფიგურაციაზე. ელექტროდიებაში ამოცანის სახეობის მიხედვით სხვადასხვა კონფიგურაცია გამოიყენება.

1. **ვენერის** დანადგარში ოთხივე ელექტროდი თანაბარი  $a$  მანძილით არის დაშორებული ერთმანეთისაგან.



გაზომვები ტარდება ან  $a$ -ს გაზრდით ცენტრალური წერტილის მიმართ (სიღრმითი ზონდირება) ან დანადგარის პროფილის გასწვრივ გადაადგილებით უცვლელი  $a$ -ს მნიშვნელობით (პროფილირება).

2. გრადიენტული დანადგარის შემთხვევაში მიმღები ელექტროდების (MN) დაშორება  $2l$  გაცილებით ნაკლებია მკვებავი ელექტროდების (AB) დაშორებაზე  $2L$ . ჩვეულებრივ, პრაქტიკაში მიმღები ელექტროდების დაშორება  $l$  ნაკლები უნდა იყოს  $0.1L$ -ზე, ხოლო მათი გადაადგილება AB-ს ცენტრალურ ნაწილში ხორციელდება იმ პირობით, რომ  $(L - x) > 3l$ , სადაც  $x$  არის MN-ის ცენტრის დაშორება AB-ს

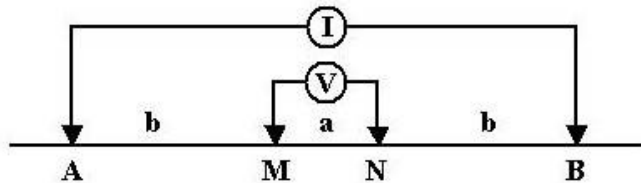


ცენტრალური წერტილისაგან. სხვანაირად, მკვებავი ელექტროდისა და უახლოესი მიმღები ელექტროდის დაშორება უნდა აღემატებოდეს  $2l$ .

$$\rho_a = \frac{\pi (L^2 - x^2)^2 \Delta V}{I L^2 + x^2 2l}$$

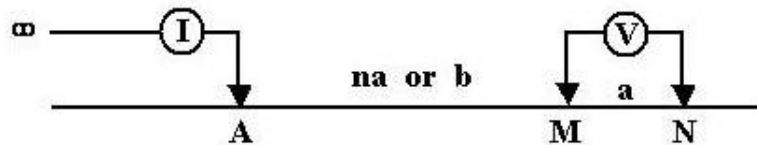
გრადიენტული დანადგარი ძალზე მოსახერხებელია წინააღმდეგობის ლატერალური (ჰორიზონტალური) ცვლილებების აღმოსაჩენად.

3. **შლომბერჯეს** მეთოდიკის გამოყენებისას მიმღები MN ელექტროდები ფიქსირებულია დანადგარის ცენტრში, ხოლო მკვებავი AB ელექტროდების გაშლა ნაბიჯ-ნაბიჯ იზრდება. ამგვარ დანადგარს იყენებენ ვერტიკალური ელექტრული ზონდირების მეთოდში, რათა შესწავლილ იქნას წინააღმდეგობის ცვლილება სიღრმის მიხედვით: ცხადია, რაც მეტია AB ელექტროდების გაშლა, მით უფრო დიდ სიღრმეში აღწევს ელექტრული დენი



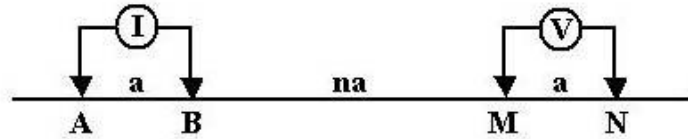
$$\rho_A = \frac{V}{I} \pi \frac{b(b+a)}{a} \approx \frac{V}{I} \pi \frac{b^2}{a} \quad \text{if } a \ll b$$

4. ერთ პოლუსიან დიპოლურ დანადგარში ერთ-ერთი მკვებავი ელექტროდი ისე შორს არის გატანილი დანარჩენი სამი ელექტროდისაგან, რომ მისი პოტენციალი MN ელექტროდებზე პრაქტიკულად ნულია. მიმღებ ელექტროდებს შორის მანძილი  $a$  გაცილებით ნაკლებია უახლოეს მკვებავ ელექტროდიდან დაშორებაზე  $L$ .



$$\rho_A = 2\pi \frac{b(a+b)}{a} \frac{V}{I}$$

5. **დიპოლ-დიპოლური** დანადგარი. ამ შემთხვევაში მიმღები ელექტროდები განლაგებულია მკვებავ ელექტროდებს გარეთ. როგორც MN ისე AB დაშორება უდრის  $a$ , ხოლო მკვებავი ელექტროდების MN-ისაგან დაშორება  $na$  გაცილებით მეტია  $a$ -ზე. ეს ნიშნავს, რომ ელექტროდების თითოეული წყვილი შეიძლება განვიხილოთ როგორც ელექტრული დიპოლი მხარით  $a$ .



$$\rho_A = \frac{V}{I} \pi a n(n+1)(n+2).$$

დიპოლ-დიპოლური სქემა ძალზე ფართოდ გამოიყენება თანამედროვე საძიებო დანადგარებში, ვინაიდან იგი აადვილებს როგორც გაზომვების ავტომატიზაციას, ისე კომპიუტერულ ინტერპრეტაციას.

ელექტროდიების ძირითადი ამოცანაა განსხვავებული წინაღობის მქონე ფორმაციების კარტირება. სხვადასხვა ფორმაციებს შეიძლება ყოფილიყო ვერტიკალური ან ჰორიზონტური საზღვრები. ვერტიკალური გამყოფი ზედაპირების აღმოსაჩენად მიმართავენ ელექტროპროფილირების (electrical profiling or trenching) ხოლო ჰორიზონტული გამყოფი ზედაპირების დასადგენად - ვერტიკალურ ელექტრულ ზონდირებას (vertical electric sounding, VES, or drilling).

### 3.4 ვერტიკალური ელექტრული ზონდირება (ვეზ). ელექტრული პროფილი

როდესაც საცდელ უბანზე განვითარებულია ჰორიზონტურად ფენობრივი სტრუქტურა, ცხადია, იმისათვის, რათა ეს ფენები გამოიყოს, საჭიროა წინაღობის ვერტიკალური განაწილების შესწავლა.

ვეზ-ის მეთოდი ეყრდნობა იმ ფაქტს, რომ რაც უფრო დიდია მკვებავი ელექტროდების (AB) გაშლა, მით უფრო ღრმად აღწევს დენი, და მით უფრო ღრმა ფენებზე ვიღებთ ინფორმაციას მიმღებ ელექტროდებზე პოტენციალის გაზომვისას.

#### ქანების ელექტრული თვისებები

გეოფიზიკური მეთოდების გამოყენების ერთ-ერთი ფუნდამენტური მოთხოვნა არის შესასწავლი ობიექტის ფიზიკური თვისებების კონტრასტულობა ძირითადი გარემოს მიმართ. წინაღობის მეთოდით ელექტროდიებისათვის, რომელსაც მიეკუთვნება

ვერტიკალური ელექტრული ზონდირება (ვეზ)- ეს ნიშნავს, რომ შესასწავლი ობიექტი შესამჩნევად უნდა განსხვავდებოდეს იმ გარემოს წინააღმდეგობისაგან რომელშიც იმყოფება. ქანების კუთრი ელექტრული წინააღმდეგობა წარმოადგენს პარამეტრს, რომელიც ახასიათებს, ელექტრული ველის აღმზრის შემთხვევაში, ნივთიერების მიერ დენის გატარების შესაძლებლობას. ქანების კუთრი ელექტრული წინააღმდეგობა იზომება ომი-მეტრებში.

გეოფიზიკაში მიღებულია ქანების განხილვა როგორც 3 ფაზიანი გარემოსი, ანუ მყარი მინერალური ჩონჩხის, და გაზით და სითხით შევსებული ნაპრალების ან ფორების კომბინაცია. მიუხედავად იმისა თუ რამდენად მყარი და მკვრივი ჩანს ქანი, მასში არის ან ფორები ან ბზარები ან ორივე ერთად. სწორედ ეს ფორები და ნაპრალები, რომლებიც შევსებული არიან ნესტით, წარმოადგენენ ელექტრული დენის გამტარს.

კუთრი ელექტრული წინააღმდეგობა ძირითადად დამოკიდებულია შემდგომ ფაქტორებზე:

1. ქანების წარმომქნელი მინერალების კუთრი წინააღმდეგობა.
2. ფორიანობა და ნაპრალიანობა.
3. ტენიანობა
4. ფორების სითხის კუთრი ელექტრული წინააღმდეგობა (პირდაპირ კავშირშია მიწისქვეშა წყლების მარილიანობასთან და ტემპერატურასთან).
5. თიხის შემცველობა.

განვიხილოთ ეს ფაქტორები დაწვრილებით.

ქანების მაფორმირებელი მინერალების კუთრი ელექტრული წინააღმდეგობას, როგორც წესი, მცირე წვლილი აქვს ქანების კუთრი ელექტრული წინააღმდეგობაზე. ამ ფაქტის მიზეზი კი მდგომარეობს იმაში, რომ ქანების უმეტესობა წარმოადგენს დიელექტრიკს.

რაც მეტია წყალი ქანების ფორებში და რაც ნაკლებია კუთრი ელექტრული წინააღმდეგობა წყლისა - მით ნაკლებია ქანების კუთრი ელექტრული წინააღმდეგობა. მაგალითად მშრალ ქვიშას უფრო მაღალი კუთრი ელექტრული წინააღმდეგობა ექნება ვიდრე დატენიანებულს. ამასთან, ქანის კუთრი ელექტრული წინააღმდეგობა არ შეიძლება იყოს ქანების შემავსებელი წყლის კუთრი ელექტრული წინააღმდეგობაზე უფრო დაბალი.

ქანში არსებული წყლის ხვედრითი ელექტრული წინააღმდეგობა, დამოკიდებულია ძირითადად მარილიანობაზე და ტემპერატურაზე. რაც მეტია მარილიანობა მით ნაკლებია კუთრი ელექტრული წინააღმდეგობა. ტემპერატურასთან კიდევ უფრო მარტივადაა საქმე: წყალი გამტარია - ყინული იზოლატორი.

ცალკე საკითხია თიხა, მისი კუთრი ელექტრული წინააღმდეგობა ძალიან დაბალია ( წყლისაზეც კი). მაგალითად კუთრი ელექტრული წინააღმდეგობა წყლისა შეიძლება 25-30 ომი.მ, ხოლო ა იურული პერიოდის თიხის წინააღმდეგობა 10-15 ომი.მ. ამის მიზეზი თიხაში არსებული რთული კაპილარული პროცესებია. რაც მეტია თიხის შემცველობა ქანში მით ნაკლებია კუთრი ელექტრული წინააღმდეგობა.



**კუთრი ელექტროული წინაღობის ცხრილი ზოგიერთი ქანისათვის**

ქანების დასახელება	კუთრი ელექტროული წინაღობა (ომი.მ)		
	მინიმალური	ტიპიური	მაქსიმალური
თიხა	5	10	15
თიხნარი	10	30	50
ქვიშნარი	30	50	80
წყლით გაჟღენთილი ქვიშა	50	80	200
წყლით სუსტად გაჟღენთილი ქვიშა	100	150	500
მშარი ქვიშა	200	500	10000
სუსტად დაბზარული კარბონატული კლდოვანი ქანები	500	1000	5000
სუსტად დაბზარული ინტრუზიური ქანები	1000	2000	10000
ნაყარი	30	50	500
მუდმივი გამყინვარების ქანები	500		80000
მინერალური გამტარი ქანები (ძირითადად სულფატები)	0,001		1-5

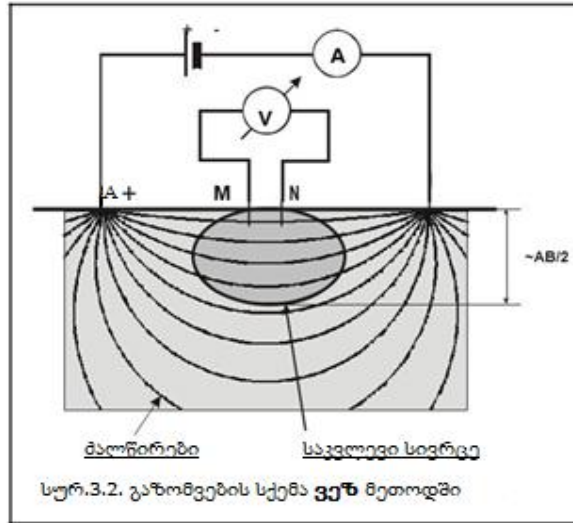
როგორც ვხედავთ მოცემული მაგალითებიდან კუთრი ელექტროული წინაღობა სხვადასხვა ქანებისთვის განსხვავებულია.

-პირველი ომ.მ დან რამდენიმე ათეულ ათას ომ.მ-მდე, რაც გეოფიზიკოსებს აძლევს საშუალებას დარწმუნებით განსაზღვრონ ქანები და გადაჭრან სხვადასხვა პრობლემები:

- გრუნტის წყლების მოძიება და დაზვერვა,
- კარბონატულ ქანებში კარსტების განვითარების ზონების ძიება,
- დანალექი ქანების დაყოფა თიხის შემცველობის მიხედვით.
- და სხვა მრავალი.

**ვერტიკალური ელექტროული ზონდირების ფიზიკური საფუძვლები**

ვეზ-ის მეთოდის იდეა ძალიან მარტივია. მიწის ზედაპირზე ხდება ელექტროსაძიებო ხელსაწყოთა გამართვა, რომელიც, როგორც წესი შედგება ორი მკვებავი და ორი მიმღები ელექტროდისგან. ელექტროდების როლში გამოყენებულია მეტალის ღეროები, რომლებიც ერჭობიან მიწაში. მკვებავი ელექტროდები აღინიშნება A და B ხოლო მიმღებს M და N ასოებით.



მკვება ელექტროდებთან ვაერთებთ დენის წყაროს. მიწაში აღიძვრება ელექტრული ველი, შესაბამისად ელექტრული დენი). დენის ძალას  $AB$  ( $I_{AB}$ ) წრედში ზომავენ ამპერმეტრის საშუალებით. მიმღებ  $M$  და  $N$  ელექტროდებზე წარმოქმნილ პოტენციალების სხვაობას ( $\Delta U_{MN}$ ) ზომავენ ვოლტმეტრის საშუალებით.

გაზომვის შედეგებით, მიწაში დენის შეღწევადობის სიღრმეზე, შეგვიძლია ვიმსჯელოთ ქანების ელექტრული მახასიათებლების შესახებ. დენის შეღწევის სიღრმე ძირითადად დამოკიდებულია მკვება ელექტროდებს შორის მანძილზე. შედეგების მიხედვით გამოვთვლით წარმოსახვითი ელექტრული წინაღობას, რომელიც აღინიშნება  $\rho_A$  და იზომება ომი.მ :  $AB$

$$\rho_A = K \frac{\Delta U_{min}}{I_{AB}}$$

სადაც  $K$ - გეომეტრიული კოეფიციენტი ( რომელიც დამოკიდებულია  $A$ ,  $B$ ,  $M$  და  $N$  ელექტროდების დაშორებაზე)  $\Delta U_{MN}$  - მიმღებ ელექტროდებზე პოტენციალთა სხვაობა,  $I_{AB}$  დენის ძალაა მკვება ხაზში.

წარმოსახვითი ელექტრული წინაღობა ახასიათებს საკვლევ ტერიტორიაზე ქანების კუთრი ელექტრული წინაღობის ინტეგრალურ მნიშვნელობას. საკვლევ ტერიტორია განლაგებულია მოწყობილობის დაყენების ცენტრის ქვეშ და ვრცელდება სიღრმეში დანადგარის გაშლის სიგრძის ნახევარზე დაახლოებით ( $AB/2$ ) (ნახ.3.2).

თუ შესასწავლი გარემო ერთგვაროვანია კუთრი ელექტრული წინაღობა ტოლია  $\rho_{გარემო}$ , მაშინ წარმოსახვითი ელექტრული წინაღობის მნიშვნელობა  $\rho_A$  იდენტური იქნება  $\rho_{გარემო}$ :  $k$  გარემო

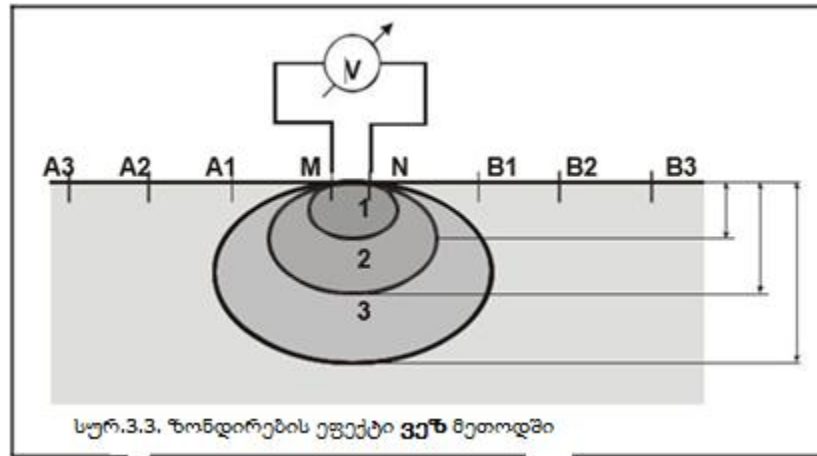
$$\rho_A = \rho_{env}$$

თუ შესასწავლი გარემო არაერთგვაროვანია მაშინ:  $\rho_{min} < \rho_A < \rho_{max}$

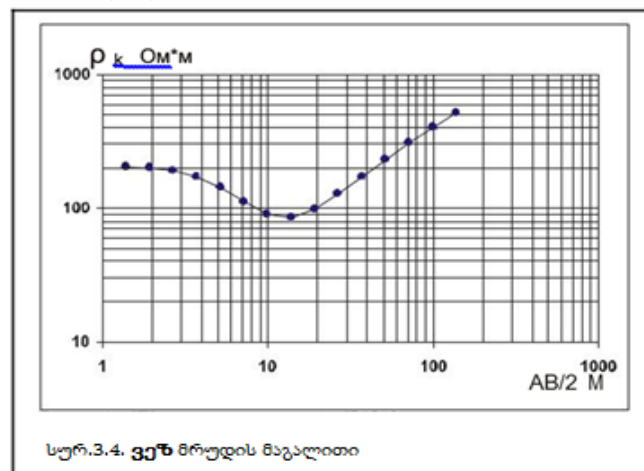
### ზონდირების ეფექტი

ზონდირების შესასრულებლად სრულდება გაზომვების სერია, ნელნელა ზრდიან მკვებავი ხაზის ( $AB$ ) ზომებს. რაც უფრო დიდია  $AB/2$  სიდიდე (სურ.3.2.) მით ღრმად

<<ჩადის დენი მიწაში>> და მით უფრო მეტი სიღრმის შესწავლის საშუალებას გვაძლევს. ამასთან ერთად კვლევის ყოველი შემდგომი არე მთლიანად მოიცავს წინას.



AB/2-ს არჩევენ შესასწავლი სიღრმის საჭიროების მიხედვით (სურ.3.3). როგორც წესი მინიმალური AB/2 იღებენ 1-1.5 მეტრს. მაქსიმალური AB/2 იშვიათად იღებენ პირველ კილომეტრებზე მეტს. ამგვარად B<sub>3</sub> მეთოდს იყენებენ არაუმეტეს რამდენიმე ასეული მეტრის სიღრმის შესასწავლად.



აღწერილი გაზომვების შედეგად ვიღებთ, ცნობილი AB/2 სიდიდეებისათვის, წარმოსახვითი ელექტრული წინააღობების ერთობლიობას. ელექტროდაზვერვაში AB/2 პარამეტრს ეწოდება კვების ხაზის გაშლა. შედეგების მოსახერხებელად წარმოდგენისთვის აგებენ  $\rho_A$ -ს (ომი.მ) გაშლაზე (მ) დამოკიდებულების გრაფიკს. ასეთ გრაფიკს ეწოდება ზონდირების მრუდი ან ვეზ მრუდი.

ზონდირების მრუდის აგება ხდება არა ჩვეულებრივ ( ხაზოვან) მაშტაბზე, არამედ ბილოგარითმულ ფორმებში. ზონდირების მრუდი თვისობრივად ასახავს ქანების კუთრი ელექტრული წინააღობის სიღრმესთან ერთად - გრაფიკის მარცხენა ნაწილი პასუხობს ზედაპირული ფენებს, რაც უფრო მარჯვნივ გადავდივართ მით სიღრმეში ჩავდივართ. მოცემულ შემთხვევაში სურათზე გამოსახულია 3 ფენიანი ზონდირების მრუდი.

## ელექტრული პროფილირება

იმ შემთხვევაში, თუ გეოლოგიურ სტრუქტურაში წარმოდგენილია ვერტიკალური გამყოფი საზღვრები, მიზანშეწონილია ელექტრული პროფილების გამოყენება. ეს მეთოდი საშუალებას გვაძლევს წინაღობის ლატერალური (ჰორიზონტალური) ვარიაციების დაფიქსირებისა.

გრადიენტის მეთოდში მკვებავი ელექტროდები დიდი მანძილით არის დაშორებული ერთმანეთისაგან, ხოლო მცირედით დაშორებულ მიმღებ ელექტროდებს გადაადგილებენ A და B შორის. პროფილის დამთავრების შემდეგ დანადგარი გადაადგილდება პარალელურ პროფილზე და ა.შ., ვიდრე მთელი ფართი არ დაიფარება პროფილებით.

მიზანშეწონილია პროფილების განლაგება სტრუქტურის (ვთქვათ, რღვევის) მართობულად, რათა შეიძლებოდეს ანომალიის გადევნება პარალელურ პროფილებზე.

## თავი 4 მონაცემების დამუშავების წრფივი და არაწრფივი მეთოდები

### 4.1 ფურიეს გარდაქმნა(სიმძლავრის სპექტრი)

ზოგადად ფურიეს გარდაქმნა არის პროცედურა, რომელიც რაიმე  $h_i(t)$  სიდიდის უწყვეტი ან დისკრეტული მასივის ახალ  $A_i(f)$  მასივში გადაყვანას აწარმოებს(აქ  $f$  – აუცილებლად სიხშირე არ არის). ფურიეს გარდაქმნა წრფივი ოპერაციაა, ანუ ჯამის ფურიეს გარდაქმნა უდრის შესაკრებთა ფურიეს გარდაქმნათა ჯამს.

$$\begin{aligned} A(f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)e^{2\pi ift} dt, \\ h(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} A(f)e^{-2\pi ift} df, \end{aligned} \quad (4.1)$$

ფურიეს ანალიზის შედეგებს ხშირად სიმძლავრის სიხშირეზე დამოკიდებულების სპექტრის სახით წარმოადგენენ, სიგნალის საერთო სიმძლავრე დროის და სიხშირის მიხედვით ერთნაირია და ასე გამოისახება:

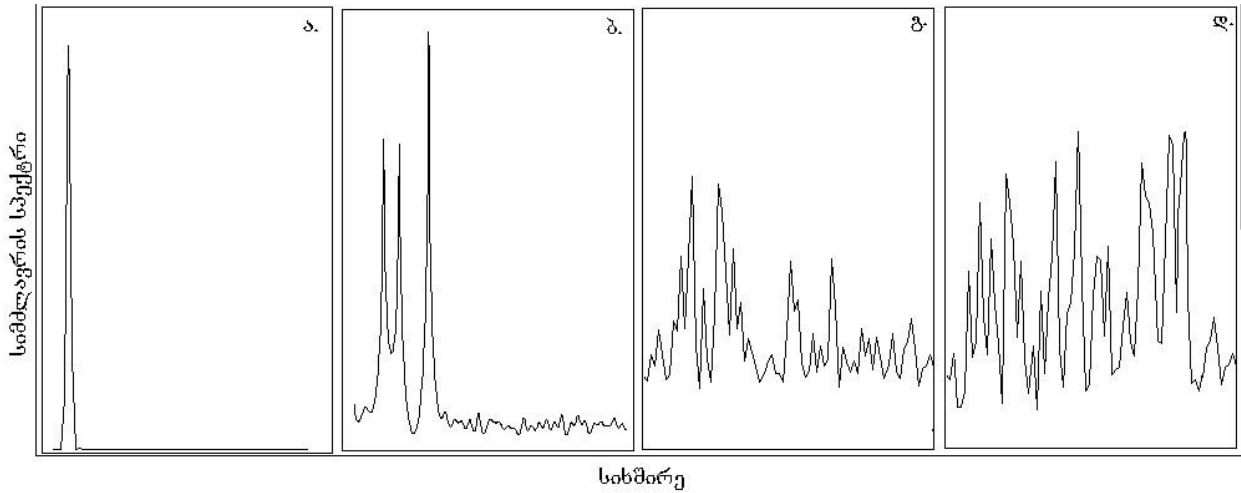
$$P = \int_{-\infty}^{\infty} |h(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |A(f)|^2 df \quad (4.2)$$

როგორც წესი იკვლევენ როგორია სპექტრის სიმძლავრე რაიმე სიხშირულ დიაპაზონში და ითვლება სიდიდე:

$$P_n(f) = 2|A(f)|^2 \quad (4.3)$$

რომელიც მოსახერხებელია სპექტრის კომპონენტების განაწილების გრაფიკული წარმოდგენისათვის. ქვედა სურათზე მოცემულია ტიპური სიმძლავრის სპექტრები პერიოდული, კვაზიპერიოდული და აპერიოდული სიგნალებისათვის. პერიოდული პროცესისათვის სიმძლავრის სპექტრი კონცენტრირებულია ვიწრო განცალკევებულ პიკში, კვაზიპერიოდული პროცესისათვის გამოიყოფა დიდი პიკი ძირითად სიხშირეებზე და მცირე პიკები სხვა სიხშირეებზე, ხოლო შემთხვევითი პროცესისათვის სიმძლავრის სპექტრს გამოყოფილი პიკები არ გააჩნია. პრაქტიკაში ჩვეულებრივ სარგებლობენ ფურიეს სწრაფი გარდაქმნით, რაც გამოთვლების დროს გაცილებით ამცირებს:

$$h_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{-2\pi i kn/N} \quad (4.4)$$



სურ.4.1. ტიპური სიმძლავრის სპექტრი (ა) პერიოდული, (ბ) კვაზიპერიოდული, (გ) ქაოსური და (დ) შემთხვევითი პროცესებისათვის;

### 4.2 ავტოკორელაცია

ფიზიკურად ავტოკორელაციის ფუნქცია წარმოადგენს დროითი სერიის წევრებს შორის წრფივი დამოკიდებულების ზომას [88]. იგი გვაძლევს გასაშუალებულ სურათს იმისა თუ როგორ იცვლება წრფივი ურთიერთდამოკიდებულება მონაცემთა მასივის ერთმანეთისაგან სულ უფრო დაშორებულ მეზობელ წევრებს შორის. რაიმე  $u$  და  $h$

ფუნქციებს შორის წრფივი კორელაცია ასე გამოისახება:  $C(u, h) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t + \tau)h(t)dt$ .

შესაბამისად თავისთავთან კორელაცია ე.ი. ავტოკორელაცია გამოსახვდება როგორც

$C = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t + \tau)u(t)dt$ . პრაქტიკული გამოთვლებისთვის კი უფრო მოსახერხებელია

ავტოკორელაციის ფუნქციის შემდეგი სახე:

$$C(t, \tau) = \frac{\sum_{i=1}^N [u_i(t + \tau) - \bar{u}(t)][u_i(t) - \bar{u}(t)]}{\sum_{i=1}^N [u(t)_i - \bar{u}(t)]^2} \quad (4.5)$$

სადაც  $u$  -თი აღნიშნულია ექსპერიმენტული ანათვლები, ხოლო  $\tau$  დროითი ბიჯია.

### 4.3 ჰარსტის კომპონენტა

მონაცემთა მასივში შეიძლება ადგილი ჰქონდეს შორეულ ანუ გრძელვადიან კორელაციებსაც, რაც ნიშნავს რომ დროითი სერიის წევრები შეიცავენ ინფორმაციას მათგან მნიშვნელოვნად დაშორებულ წევრებზე. გრძელვადიანი კორელაციის შეფასების საშუალებას გვაძლევს ჰარსტის კომპონენტი(H).

$$H = E + 1 - D$$

სადაც E არის ევკლიდური სივრცის განზომილება, ხოლო D არის ფრაქტალური განზომილება [88].

თუ  $H=0.5$  - ადგილი აქვს შემთხვევით პროცესს;

თუ  $H>0.5$  - ადგილი აქვს პერსისტენტულ პროცესს;

თუ  $H<0.5$  - ადგილი აქვს ანტიპერსისტენტულ პროცესს;

#### 4.4 ლიაპუნოვის ექსპონენტები

კიდევ ერთი მეთოდი რომლითაც შეისწავლიან ფაზურ სივრცეში ფაზური წერტილების ევოლუციას არის ლიაპუნოვის ექსპონენტების სპექტრის გამოთვლა. მეთოდის იდეა მდგომარეობს რთული პროცესებისათვის დამახასიათებელი, საწყის პირობებზე ძლიერი დამოკიდებულებით გამოწვეული, ფაზური ტრაექტორიების სწრაფი დამორიშორების რაოდენობრივ შეფასებაში. სწორედ ამ დამორიშორების დამახასიათებელი გასაშუალოებული ექსპონენტა წარმოადგენს ლიაპუნოვის ექსპონენტას.

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \log |f'(x_i)| \quad (4.6)$$

ლიაპუნოვის ექსპონენტა იძლევა მთელ ფაზურ სივრცეზე გასაშუალოებული ტრაექტორიების დამორიშორების საშუალო სისწრაფეს იტერაციის (დროის) ერთეულში. მისი ერთეულია ბიტი/წმ ან ბიტი იტერაციის ერთეულზე.

რეალური პროცესების განხილვისას როგორც წესი უცნობია სისტემის აღმწერი არაწრფივ განტოლებათა სისტემები, სწორედ ამიტომ ბოლო პერიოდში არაერთი მეთოდი იქნა შემუშავებული, რომლიც ლიაპუნოვის ექსპონენტების ექსპერიმენტული მონაცემების დროითი სერიიდან გამოთვლის საშუალებას იძლევა. ერთერთი მათგანს წარმოადგენს სანო-სავადას მეთოდი:

$$\lambda_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n\tau} \sum_{j=1}^n \ln \left\| A_j \vec{e}_i^j \right\| \quad (4.7)$$

ქვედა ცხრილში მოცემულია ამ ალგორითმით გამოთვლილი სხვადასხვა ატრაქტორის ლიაპუნოვის ექსპონენტების მნიშვნელობები(ბიტი/წმ):

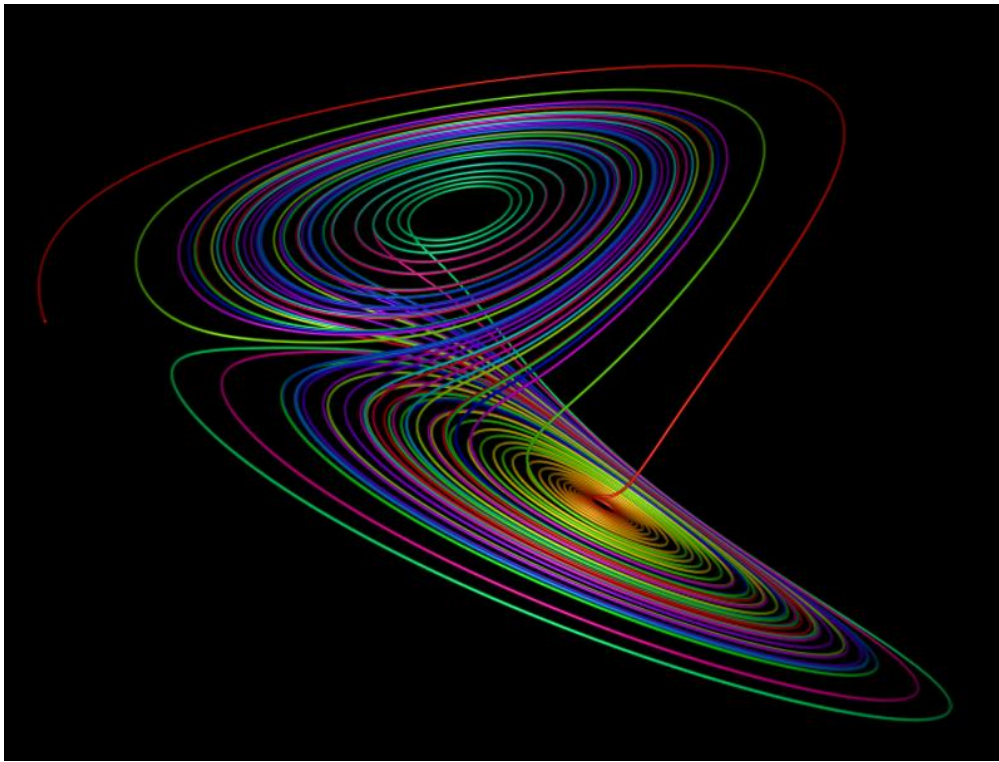
სისტემა	ლიაპუნოვის ექსპონენტები
ჰენონის ასახვა (a = 1.4, b = 0.3)	0.408 ± 0.003, -1.58 ± 0.02
ლორენცის განტოლებები (R = 40, σ = 16, b = 4)	1.37 ± 0.08, -0.02 ± 0.09, -15.2 ± 2.1
რიოსლერის განტოლებები (a = b = 0.2, c = 5.7)	0.073 ± 0.004, 0.003 ± 0.0002, -4.700 ± 0.002
მაკკეი-გლასის განტოლებები (a = 0.2, b = 0.1, c = 10, T = 30)	0.0074 ± 0.0007, 0.0038 ± 0.0007, -0.0015 ± 0.0008, -0.017 ± 0.003, 0.042 ± 0.010

#### 4.5 ლორენცის ატრაქტორი

ამინდის პროგნოზირების სირთულის საკითხის შესწავლისას, ედვარდ ლორენცმა ატმოსფეროს სითბური კონვექციის შესასწავლად გამოიყენა სამი ურთიერთდაკავშირებული არაწრფივი დიფერენციალური განტოლების სისტემისაგან შედგენილი მოდელი:

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= PrY - PrX, \\ \frac{dY}{dt} &= -XZ + rX - Y, \\ \frac{dZ}{dt} &= XY - bZ,\end{aligned}\tag{4.8}$$

ლორენცის ატრაქტორი დღემდე რჩება განსაკუთრებული ყურადღების ცენტრში, რაც იმიტომ განპირობებულია რომ ფაქტიურად მისი სისტემის განხილვით დაიწყო დეტერმინირებული ქაოსის ისტორია.

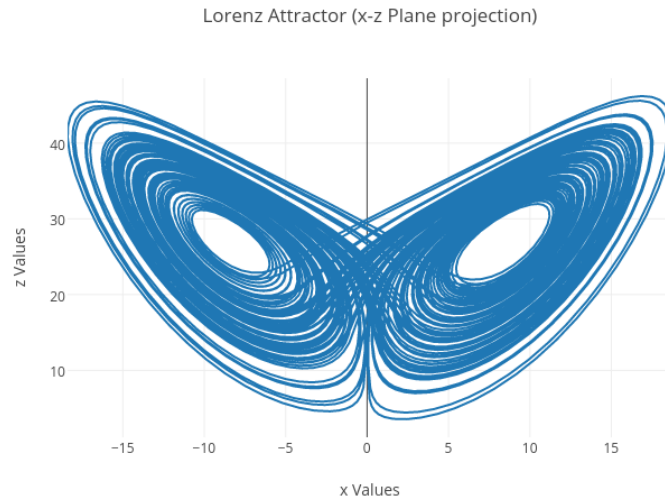


ნახ.4.2. ლორენცის ატრაქტორი

ფაზური ტრაექტორიები სპირალურად ეხვევიან ორ ერთმანეთის მიმართ დახრილ ფრთაზე ისე რომ ერთმანეთს არსად არ გადაკვეთენ. ერთმანეთთან ახლოს მყოფი ორი ფაზური წერტილი სწრაფად სცილდება ერთმანეთს და შეიძლება ატრაქტორის



სხვადასხვა ფრთაზეც კი აღმოჩნდნენ. რაც კარგად ჩანს ქვემოთ მოყვანილ  $X - Z$  პროექციაზე:



ნახ.4.3. ლორენცის ატრაქტორის (X-Z) პროექცია

ლორენცის ატრაქტორის პეპელას მსგავსმა სტრუქტურამ წარმოქმნა ტერმინი პეპლის ეფექტი, რაც საწყის პირობებზე ძლიერი დამოკიდებულების სინონიმს წარმოადგენს. მიუხედავად იმისა, რომ დღესდღეისობით ლორენცის მოდელი ატმოსფერული პროცესების დინამიკის არარეალისტურ აპროქსიმაციად მიიჩნევა, მისი მნიშვნელობა დაბალგანზომილებიანი დინამიკური პროცესების შესწავლისათვის კვლავ ძალზედ მნიშვნელოვანია.

#### 4.6 ექსპერიმენტული მონაცემების ზოგიერთი მახასიათებლის გამოთვლა

მეწყერის გენერაციის, ისევე როგორც ლაბორატორიული ექსპერიმენტების შედეგების დამუშავებისათვის და დინამიკური მახასიათებლების გასაგებად ვიყენებთ თანამედროვე წრფივ და არაწრფივ მეთოდებს. კერძოდ: სპექტრალური ანალიზი, ვეივლეტის და ჰილბერტის გარდაქმნა, დროით სერიებში ხმაურის მოცილება(არაწრფივი ხმაურის შემცირება), სამიზნე პროცესის მეხსიერების შემოწმება (გრძელ დიაპაზონიანი კორელაციის შემოწმება, ტრენდმოცილებული ფლუქტუაციები და მულტიფრაქტალური ტრენდმოცილებული ფლუქტუაციებია ანალიზი), გაზომილი მონაცემებიდან რეკონსტრუირებული ფაზური სივრცის სტრუქტურების თვისებრივი და რაოდენობითი შეფასება (კორელაციის და ინფორმაციის განზომილების გამოთვლა, რეკურენტული დიაგრამები და რეკურენტული რაოდენობითი ანალიზი), ფაზური ტრაექტორიის ევოლუციის შეფასება (ლიაპუნოვის ექსპონენტების გამოთვლა).

ა)

	channel A	channel D	channel E	channel F
average	1.466338	0.319353	0.575033	-18.4028
min	0.75998	-8.48797	-19.0697	-44.1491
max	2.244231	9.995727	19.68319	9.675253
median	1.465786	0.311317	0.122085	-18.0381
mode	1.46838	0.33726	0.091564	-17.504
stdev	0.035324	0.20391	0.575034	6.143446
var	0.001248	0.04158	0.330669	37.74282

ბ)

	channel A	channel B	channel D	channel E	channel F
average	1.451504	1.130842	0.428644	-0.14851	26.76812
min	0.940361	0.525247	-6.28892	-13.4324	-58.1431
max	1.875229	1.591991	7.93096	14.53119	-1.61763
median	1.452204	1.131272	0.418141	-0.12209	-26.111
mode	1.452204	1.134019	0.445611	0.091564	-25.769
stdev	0.038772	0.042304	0.428643	-0.14851	6.501625
var	0.001503	0.00179	0.031136	0.215707	42.27114

გ)

	channel A	Channel B	channel C	channel D	channel E	channel F
average	1.445767	1.194422	0.349703	-0.11599	-0.01819	-0.04204
min	0.591503	1.10365	-0.03815	-0.87291	-0.0257	-0.07237
max	1.972592	1.269686	0.740142	0.628739	-0.00586	-0.00586
median	1.445794	1.194604	0.33726	-0.12209	-0.01819	-0.04123
mode	1.445794	1.200098	0.33726	-0.33573	-0.01871	-0.04072
stdev	0.0557	0.02401	0.083513	0.301818	0.002029	0.007346
var	0.003102	0.000576	0.006974	0.091094	4.12E-06	5.40E-05

ნახ.4.4. ბურიჯ-კნოპოვის ექსპერიმენტის სტატისტიკური მახასიათებლები ა) ერთი ბლოკის, ბ) ორი ბლოკის და გ) სამი ბლოკის შემთხვევაში.

ნახ.4.4-ზე წარმოდგენილია ბურიჯ-კნოპოვის ექსპერიმენტების შედეგების სტატისტიკური მახასიათებლები. A არხი წარმოადგენს პირველი აქსელერომეტრის მონაცემებს (პირველი ფილა მოძრაობის მიმართულებით), B - მეორე აქსელერომეტრის მონაცემებს, C - მესამე აქსელერომეტრის მონაცემებს, D - პირველი პიეზოგადამწოდის მონაცემებს (პიეზოგადამწოდი მოძრაობის დასაწყისთან), E - მეორე პიეზოგადამწოდის მონაცემებს, F - ძალის გამზომის მონაცემებს.

		პირველი ბლოკი	მეორე ბლოკი	მესამე ბლოკი	პიეზო1	პიეზო2	გაწ.ძალა
Hurst	1ბლოკი	0.62679			0.663532	0.369584	1.15591
Hurst	2ბლოკი	0.657643	0.639595		0.463633	0.280913	1.13694
Hurst	3ბლოკი	0.528234	0.499949	0.645382	0.450611	0.284033	1.0824

ნახ.4.5. ჰარსტის კოეფიციენტები ბურიჯ-კნოპოვის ექსპერიმენტების მონაცემებისათვის

საინტერესო შედეგები გვაქვს ჰარსტის კოეფიციენტების გამოთვლის შემთხვევაში. ნახ.4.5-ზე მოცემულია ჰარსტის ექსპონენტები. შედეგები გვიჩვენებს საინტერესო დინამიკას სამი ბლოკიდან ერთი ბლოკისაკენ. ყველა კომპონენტისათვის დაიკვირვება ტენდენცია ანტიპერსისტენტული მდგომარეობიდან პერსისტენტულისაკენ.

## თავი 5 ლაბორატორიული დანადგარები

ლაბორატორიული ექსპერიმენტების ჩასატარებლად იყო შექმნილი რამოდენიმე დანადგარი ბაზალტის ფილაზე ნიმუშების ჰორიზონტალური გადაადგილების შესასწავლად, დანადგარი დახრის ცვლადი კუთხის მქონე ბაზალტის ფილაზე ნიმუშების გადაადგილების შესასწავლად და დანადგარი დახრის ცვლადი კუთხის მქონე დახრილ ზედაპირზე ფხვიერი მასალების გადაადგილების შესასწავლად.

### 5.1 დანადგარი ბაზალტის ფილაზე ნიმუშების ჰორიზონტალური გადაადგილების შესასწავლად (ბურიჯ-კნოპოვის დანადგარი)

განვიხილოთ დანადგარი ბაზალტის ფილაზე ნიმუშების ჰორიზონტალური გადაადგილების შესასწავლად. იგი წარმოადგენს კუთხოვანი ფოლადის პროფილისგან შეკრულ სივრცულ კონსტრუქციას, რომელიც დამონტაჟებულია მყარი ფიზიკური ლაბორატორიული მაგიდის ზედაპირზე. კონსტრუქციის შიგნით თავისებურ, მერქან-ბურბუშელის ფილისა და 5 სანტიმეტრის სისქის პოროლონისგან შექმნილ შუასადებზეა მოთავსებული ბაზალტის ბრტყელ-პარალელური ფილა, რომლის ზომებია 140 x 30 სანტიმეტრზე, ხოლო სისქე 20 მილიმეტრია. ბაზალტის ფილა დამზადებულია მარნეულის საბადოების მცირე ფოროვან მასალისგან. მასზე სეისმოგადამწოდებლების დასამაგრებლად ბაზალტის ფხვნილის შესავსებიანი ეპოქსიდის წებოთი მიწებებულია ხუთი თითბერის ქანჩი M 8 x 1 ხრახნით. სამი მათგანი სიმეტრიულად არის განლაგებული ზედა მხარის ერთ ბოლოში, ხოლო დანარჩენი ორი იქვე, ფილის გვერდით ვიწრო მხარეზე.



ნახ.5.1. დანადგარი ბაზალტის ფილაზე ნიმუშების ჰორიზონტალური გადაადგილების შესასწავლად.

ფილის თავზე დამონტაჟებულია დურალუმინის მიმმართველი საქაჩი ურიკის გადასაადგილებლად. ურიკას გააჩნია დიდი რაოდენობის პრეციზიული ბურთულსაკისარი, რის გამოც იგი თავისუფლად და პრაქტიკულად უხმოდ გადაადგილდება მიმმართველში

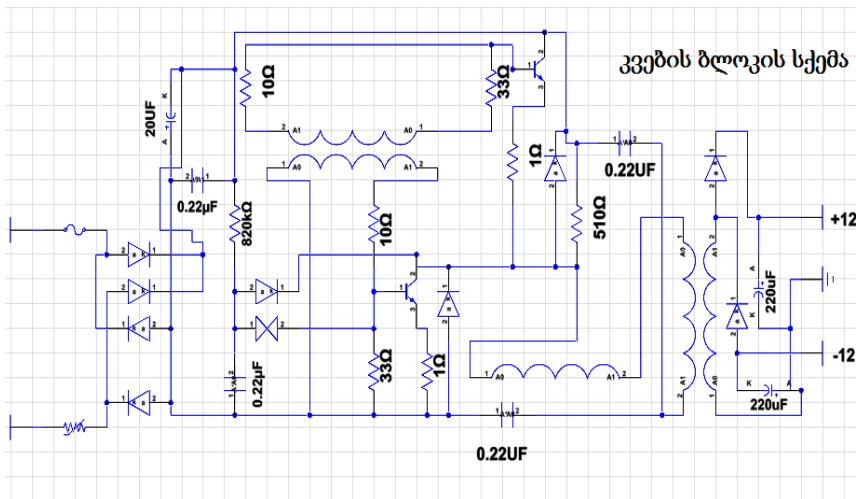
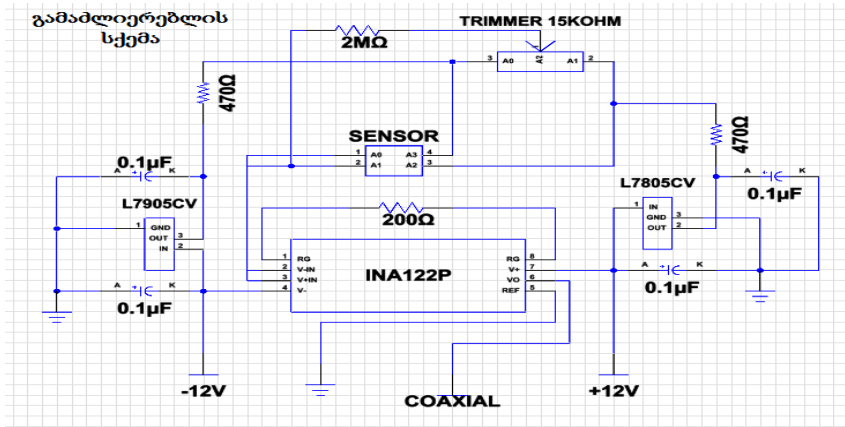


სურ.5.2. საქაჩი ურიკა ჩამიკიდული ნიმუშებით.

## 5.2 გაწვევის ძალის გამზომი მოწყობილობა

რედუქტორიდან საქაჩი ძალის პარალელურობის და ჰორიზონტალურობის უზრუნველსაყოფად, დამონტაჟებულია გასწვრივი განაჭრებიანი სპეციალური ფერმა, რომელზედაც დამაგრებულია ორი ბურთულსაკისრიანი ტექსტოლიტის ჭოჭუნაქი. ექსპერიმენტის საჭიროებებიდან გამომდინარე, შესაძლებელია ჭოჭუნაქების გადაადგილება და ახალ ადგილას სწრაფი და საიმედო ფიქსირება. საქაჩი მოწყობილობა, ხმაურის და ვიბრაციის თავიდან ასაცილებლად, ცალკე სადგამზეა დამონტაჟებული და დამატებითი სამსაფეხურიანი კბილანა რედუქტორით აღჭურვილ საავიაციო ელექტროძრავა-რედუქტორს წარმოადგენს. გაქაჩვის სიჩქარი რეგულირება და სტაბილობა T $\theta$ C-14 ტიპის კვების სტაბილიზირებული წყაროთი მიიღწევა. დანადგარზე აგრეთვე ელექტრონული კვარცის სასწორის ბაზაზე შექმნილი ელექტრონული დინამომეტრებია დამონტაჟებული. ორიგინალური ელექტრონული დინამომეტრის შესაქმნელად იყო გამოყენებული სამრეწველო ელექტრონული სასწორის სენსორი - გარდაქმნელი, რომელიც მექანიკურ დატვირთვას გარდაქმნის მის პროპორციულ მუდმივ ელექტრულ დაძაბულობად. ვინაიდან გამოსავალი ძაბვის სიდიდე ძალიან მცირეა, პიკოსკოპით მისი რეგოსტრაციისთვის საჭირო გახდა წეფივი გამაძლიერებლის შექმნა. გამაძლიერებელი შეიქმნა სპეციალიზირებული INA 122P ტიპის მიკროსქემის ბაზაზე. გამაძლიერებელი მოთავსებულია ეკრანირებულ

კორპუსში. იქვე იყო განლაგებული სენსორის კვებისთვის საჭირო ორი სპეციალიზირებული L7905CV და L7805CV ტიპის ძაბვის გარდაქმნელი, რომლებიც კვების ბლოკიდან მიღებულ სტაბილიზირებულ +12 და -12 ვოლტ ძაბვას გარდაქმნიდნ ასევე სტაბილიზირებულ +5 და -5 ვოლტ ძაბვაში. ქვემოთ მოყვანილია გამაძლიერებლის და კვების წყაროს სქემები [136,163].



ნახ.5.3. ციფრული დინამომეტრის გამაძლიერებლის და კვების ბლოკის სქემა

ერთერთი დინამომეტრი საქაჩი ურიკის წინ არის დამონტაჟებული და არეგისტრირებს იმ ძალას, რომელიც საქიროა მოვდოთ ერთი ან რამოდენიმე მცირე ზომის ბაზალტის ფილა მოდებული ურიკის გადასაადგილებლად. მეორე დამონტაჟებულია საქაჩი ბაწარის ვერტიკალურ მონაკვეთზე დიდი ფილის ზედაპირზე მცირე ზომის ბაზალტის ფილების გადასაადგილებლად.

### 5.3 დანადგარი დახრის ცვლადი კუთხის მქონე ბაზალტის ფილაზე ნიმუშების გადაადგილების შესასწავლად (ტრიგერირების დანადგარი)

განვიხილოთ დანადგარი დახრის ცვლადი კუთხის მქონე ბაზალტის ფილაზე ნიმუშების გადაადგილების შესასწავლად. დანადგარი განკუთვნილია სხვადასხვა



ფილებზე და სხვადასხვა მასალებით სტიკ-სლიპის მოვლენის შესასწავლად. კონსტრუქცია წარმოადგენს კუთხოვან ფოლადისაგან დამზადებულ ლითობის კონსტრუქციას, რომლის ერთი მხარე სახსართ არის დამაგრებული მაგიდაზე დამაგრებულ ჩარჩოზე, ხოლო მეორეზე ამწე კვანძია მოთავსებული. მოძრავი ჩარჩო გათვალისწინებულია ორი ზომის - 30 და 40 სანტიმეტრის სიგანის ბაზალტის ფილების დასამაგრებლად. მათი დასაშვები სიგრძე 140 სანტიმეტრამდეა, ხოლო სისქე 25 მილიმეტრი და მეტი [135].



ნახ.5.4. დანადგარი დახრის ცვლადი კუთხის მქონე ბაზალტის ფილაზე ნიმუშების გადაადგილების შესასწავლად.

ასაწევი მოწყობილობა განკუთვნილია დახრის სხვადასხვა კუთხის დროს როგორც სტაციონარულ, ასევე დინამიურ რეჟიმში ექსპერიმენტების ჩასატარებლად.



ნახ.5.5. ლაზერული მანძილმზომი და დახრილმზომი. გრუნტის და მასალების ტენიანობის გამზომი.

დინამიური რეჟიმის გამოყენებისას დახრის კუთხის 0-დან 47°-დე უწყვეტი ცვლა სხვადასხვა სიჩქარით ხდება. მართვა ხელით ხორციელდება. დახრილობის კუთხის კონტროლი ხდებოდა ორიგინალური ლაზერული მანძილმზომ/დახრილმზომით Leica DISTO™ D8. მას შეუძლია მანძილების უკონტაქტო გაზომვა 0,050-დან 200 მეტრ მანძილამდე  $\pm 1$ მმ სიზუსტით, ფართობების და მოცულობების გამოთვლა, გაზომვების შედეგების დამახსოვრება (BLUETOOTH®), დახრილობის კუთხის გაზომვა -  $0.1^\circ / +0.2^\circ$  სიზუსტით. დანადგარზე დაყენებული ფილა აღჭურვილია სექსმოგადამწოდების დასამაგრებელი განკუთვნილი სამაგრი წერტილებით - ორ-ორი სიმეტრიულად კუთხეებში ვიწრო მხარეებთან ოთხ-ოთხი სანტიმეტრი, ბოლოებიდან, ორი სიმეტრიულად ცენტრში (სამ-სამი სანტიმეტრი გვერდიდან) და აგრეთვე ზედა მხრიდან.



ნახ.5.6. სამაგრი წერტილები ბაზალტის ფილაზე (მარცხენაზე დამაგრებულია დაბალსიხშირული სეისმომომღებები)

#### **5.4 დანადგარი დახრის ცვლადი კუთხის მქონე დახრილ ზედაპირზე ფხვიერი მასალების გადაადგილების შესასწავლად (მეწყრის მოდელირების დანადგარი).**

განვიხილოთ დანადგარი დახრის ცვლადი კუთხის მქონე დახრილ ზედაპირზე ფხვიერი მასალების გადაადგილების შესასწავლად [135,136]. იგი წარმოადგენს ფოლადის კარკასს, რომელზედაც დამონტაჟებულია მოსაბრუნებელი მაგიდა, რომელსაც შეუძლია იბრუნოს ჰორიზონტალური ღერძის გასწვრივ და ხელით მოქმედებაში მოსაყვანი დახრის შეცვლის მექანიზმი. მექანიზმი საშუალებას იძლევა მდორედ (წყნარად, ნელა) სამუშაო მაგიდის დახრილობა ჰორიზონტისადმი  $0^\circ$ -დან  $80^\circ$ -დე კუთხით მდორედ (წყნარად, ნელა) ვცვალოთ, და აგრეთვე ვიმუშაოდ დახრის ნებისმიერ დაფიქსირებული კუთხით. აგიდის ტვირთამწეობა 100 კგ-ს აღემატება. მაგიდის ზედა მხარეზე ერთიდან ოთხ ღარამდე შეიძლება იყოს დამონტაჟებული. ღარები გამჭურვალე პლასტმასიდან არის დამზადებული, მათ გლუვი ძირი და



კედლები აქვთ. ღარის გაბარიტები - სიგრძე დაახლოებით 125 სმ, შიდა სიგანე 230 მმ, ხოლო სიმაღლე - 90 მმ.

ექსპერიმენტების ჩატარებისას გამოიყენებოდა რიგი სამრეწველო და ორიგინალური ხელსაწყო-მოწყობილობისა - ბაზალტის ფილებში რხევების აღძვრისთვის გამოიყენებოდა CB-5, CB-20, ЦПЗД-56 ტიპის მოდიფიცირებული დაბალსიხშირიანი ვერტიკალური სეისმომომღებები. მათი კვება ხორციელდებოდა FG-100 DDS Function Generator ან სპეციალური ფორმის სიგნალების მქონე Г6-34 ტიპის გენერატორით, რომელიც უზრუნველყოფდა 0,001 ჰც-დან 1 მჰც სიხშირულ დიაპაზონში ხერხისებრი, სინუსოიდალური და სამკუთხა სიგნალების გამომუშავებას.



ნახ.5.7. დანადგარი დახრის ცვლადი კუთხის მქონე დახრილ ზედაპირზე ფხვიერი მასალების გადაადგილების შესასწავლად.

## 5.5 ექსპერიმენტული შედეგების რეგისტრაციის სისტემები

ინფორმაციის მიმღებების როლში გამოიყენებოდა მათი გაჩენის ადგილიდან დრეკადი მექანიკური ტალღების ელექტრულ სიგნალში აკუსტიკური ემისიის გარდაქმნელები, კერძოდ П111-0,1-П31MC ტიპის პიეზოგადამწოდები, MXR9500G/M ტიპის სამღერძიანი აქსელერომეტრები, CB-5, CB-20, ЦПЗД-56 ტიპის დაბალსიხშირული სეისმომომღებები, აგრეთვე ელექტრონული დინამომეტრები. ყველა შეერთება ეკრანირებული მავთულით იყო შესრულებული.

ბუნებრივია, მიღებული სიგნალების რეგისტრაციისთვის, შენახვისა და დამუშავებისთვის გამოიყენებოდა როგორც ერთარხიანი, ასევე სამარხიანი ელექტრონული გამაძლიერებლები, აგრეთვე Picoscope 3000 Series და Picoscope 4000 Series სისტემები, რომელიც საშუალებას იძლევა შესაძლებლობას სრულად გამოვიყენოთ თანამედროვე პერსონალური კომპიუტერების დიდი შესაძლებლობები გაძლიერების, გაზომვების, სიგნალის რეგისტრაციის და დამუშავების საკითხებში

როგორც უნივერსალური მაღალსიხუსტიანი მრავალარხიანი მულტიმეტრი და აგრეთვე ინფორმაციის შესანახად. კერძოდ გამოიყენებოდა 4-ხ არხიანი, USB-ოსცილოგრაფი მისადგმელი PicoScope® 3405A, მისი ძირითადი პარამეტრებია:

გატარების ზოლი 100 მჰც

250 მეგა გამორჩევა წამში,

16 მეგა გამორჩევა /არხზე, 8 ბიტი

დროის ბაზისი 1 ნწმ - 200 წმ/დან

ვერტიკალური გადახრა 10 მვ - 4 ვ/დან

შესავალი ძაბვა 100 ვ

AC და DC შესავალები

კომპიუტერთან USB მიერთება

picoscope 3200 -ს გააჩნია მაღალსიხუსტიანი USB 2.0 ინტერფეისი.

გატარების ზოლი (-3 დბ) 100 მჰც

წაზრდის დრო 5.8 ნწმ 3.5 ნწმ 1.75 ნწმ

გარჩევის უნარი 8 ბიტი

შესავალი არხები - 4

შესავალების მახასიათებლები -  $1 \pm 1\%$  მΩ, პარალელურად 14 პვ  $\pm 1$  პვ

შესავალები - AC/DC

მგრძნობიარობა შესავალი - 10 მვ/დანაყოფზე 4 ვ/დანაყოფზე (10 ვერტიკალური ქვედანაყოფი)

შესავალი დიაპაზონები  $\pm 50$  მვ-დან  $\pm 20$  ვ-დე 9 დიაპაზონში

გადაწევის ანალოგური დიაპაზონი (პოზიციის ვერტიკალური კორექტირება)

$\pm 250$  მვ (50 მვ, 100 მვ, დიაპაზონები 200 მვ-ზე)

$\pm 2.5$  ვ (500 მვ, 1 ვ, 2-ვოლტიანი დიაპაზონები)

$\pm 20$  ვ (5 ვ, 10 , 20--ვოლტიანი დიაპაზონები)

DC- სიზუსტე - სრული მასშტაბის  $\pm 3\%$

დაცვა გადამეტებულ ძაბვისგან -  $\pm 100$  ვ (DC + AC- პიკი)

დისკრეტირების მაქსიმალური დრო (რეალური დრო) 1 გიგაგამორჩევა/წმ (1 არხი), 500

მეგაგამორჩევა/წმ (2 არხი), 250 მეგაგამორჩევა/წმ (3 ან 4 არხი)

დისკრეტირების მაქსიმალური ეფექტური სიხშირე (განმეორადი სიგნალები)

2.5 გიგაგამორჩევა/წმ, 5 გიგაგამორჩევა/წმ, 10 გიგაგამორჩევა/წმ

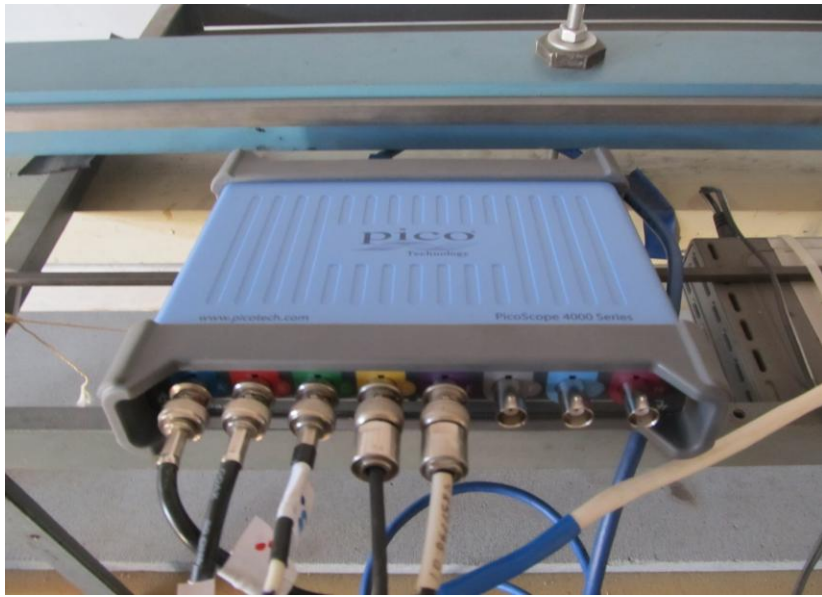
დისკრეტირების სიხშირე (USB გადაცემის უნარი)  $\geq 10$  მეგაგამორჩევა/წმ

ბოფერული მეხსიერება 32 მეგაგამორჩევა

ტალღის ფორმის ბუფერი 1 - 10,000 სეგმენტამდე

დროის ბაზის სიზუსტე  $\pm 50$  გვერდი წუთში

ჯვარედინა ხარვეზები - 400:1 - ზე უკეთესი მთლიან გამტარობამდე



ნახ.5.8. რვა არხიანი PicoScope 4824

და აგრეთვე უფრო სრულყოფილი PicoScope 4824, რომელიც წარმოადგენს რვა არხიან USB ოსცილოგრაფს სიგნალების ნებისმიერი ფორმის ჩაშენებული გენერატორით. ოსცილოგრაფის გატარების ზოლი 20 მჰც-ია, დისკრედიტაციის სიჩქარე 60 მეგა გამორჩევა წამში დროის რეალურ მასშტაბში, ჩაშენებული მეხსიერების მოცულობაა 256 მეგა გამორჩევა და დერტიკალური გარჩევიუს უნარი 12 ბიტია. Picoscope 4824 გააჩნია 8 ანალოგური არხი და მაღალი გარჩევის უნარი, რაც საშუალებას იძლევა ერთდროულად შეასრულოს როგორც სიმძლავრის, ვიბრაციების, ულტრაბგერების, აუდიო და ვიდეოსიგნალების ანალიზი, ასევე პრეციზიული გაზომვები. PicoScope 4824 ძირითადი თავისებურობაა სიგნალების ნებისმიერი ფორმის ჩაშენებული გენერატორი 14 ბიტიანი ვერტიკალური გარჩევის უნარით, მაღალსიჩქარიანი USB 3.0 ინტერფეისი, დისპლეის გაყოფის ფუნქცია სიგნალების ფორმის გამარტივებული შედარებითი ანალიზისათვის, 256 მეგა გამორჩევის მოცულობის ჩაშენებული სეგმენტირებული (10000 სეგმენტი) მეხსიერების ბუფერი, სინუსური და იმპულსური ფორმის სიგნალების დამახინჯების დაბალი დონე. პიკოსოპი აღჭურვილია აგრეთვე მიმდევრობითი шины-ს დეკოდირების ფუნქციით და ტრიგერის გაფართოებული ფუნქციებით. მისი პროგრამული უზრუნველყოფა შეთავსებადია ყველაზე გავრცელებულ ოპერაციულ სისტემებთან და უზრუნველყოფს სხვადასხვა გრაფიკულ, ტექსტურ და ბინარულ ფორმატებში გამოსახულ მონაცემების ექსპორტირებას, ამის გარდა მისაწდომია რედაქტირების და ახალი ფორმის სიგნალების შექმნის ფუნქცია სიგნალების ნებისმიერი ფორმის გენერატორის ჩაშენებული გრაფიკული რედაქტორის გამოყენებით.

პორტატული PicoScope 4824 USB ოსცილოგრაფის თავისებურობანია:  
გატარების ზოლი 20 მჰც x 8 არხზე  
გამორჩევის სიჩქარე: 80 მეგა გამორჩევა წამში (რეალური დროის მასშტაბში)

მეხსიერების მოცულობა - 256 მეგა გამორჩევა  
 ვერტიკალური გარჩევის უნარი 12 ბიტი  
 1 მჰც ზოლიანი სიგნალების ნებისმიერი ფორმის ჩაშენებული გენერატორი  
 ტრიგერის გაფართოებული ფუნქციები  
 ვერტიკალური გარჩევის უნარის 16 ბიტამდე პროგრამული გაზრდა  
 საბაზო და დამატებითი მათემატიკური ფუნქციები  
 მუშაობა სიგნალის საყრდენ ფორმებთან  
 მომატებულ ძაბვისგან დაცვა  
 მაღალ სიჩქარიანი ინტერფეისი  
 სპექტრალური ანალიზატორი  
 მონაცემთა მიმდევრობითი шины-ს დეკოდირება  
 სიგნალის პარამეტრების ავტომატური გაზომვა  
 PASS/FAIL ტესტირება

მეწყერებზე ნიადაგის ტენიანობის და ლაბორატორულ ცდების დროს ფხვიერი მასალის ტენიანობის დასადგენად ვიყენებდით უნივერსალურ ხელსაწყოს MultiWet-Master, რომელიც განკუთვნილია მასალების ტენიანობის გასაზომად, მოქმედებს წინაღობისა და ტევადობის გაზომვის პრინციპით. ტევადობის გაზომვისას ტენიანობა, რომელიც დამოკიდებულია გასაზომი მასალის დიელექტრიკულ შეღწევადობაზე, განისაზღვრება ხელსაწყოს ქვედა მხარეს განლაგებული ელექტროგამტარი რეზინის ორი კონტაქტის მეშვეობით, ხოლო მასალის ხვედრითი ტენიანობა პროცენტებში გამოითვლება ხელსაწყოს მეხსიერებაში შენახული შესაბამისი მასალის მახასიათებლების მეშვეობით. მეთოდი, დაფუძნებული წინაღობის გაზომვაზე, გულისხმობს მასალის გამტარებლობის განსაზღვრას ტენიანობაზე დამოკიდულობაში საზომი კონტაქტების გასაზომ მასალასთან კონტაქტის ხარჯზე, შედეგების შედარება მეხსიერებაში შენახულ კონკრეტული მასალების მახასიათებლებთან და მასალის ხვედრითი ტენიანობის პროცენტებში გამოთვლას. ხელსაწყო განკუთვნილია გაზომვის შესაბამისი მეთოდების გამოყენებით მერქანში და საშენ მასალებში ტენის შემცველობის განსაზღვრისთვის. ხელსაწყო გვერდზე განლაგებული გადასაშლელი სენსორი განსაზღვრავს გარემოს ტემპერატურას და ჰაერის ხვედრით ტენიანობას და ამ მონაცემების საფუძველზე გამოითვლის ნამის წერტილის ტემპერატურას.

მასალის სიღრმული ზონდირებისათვის გამოიყენება რამოდენიმე სახის სპეციალური ელექტროდი:

1. მრგვალი კვეთის (იზოლაციის გარეშე, დიამეტრი 2 მმ) ჩასადგმელი ელექტროდი საშენ და საიზოლაციო მასალებში ტენიანობის გასაზომად
2. მრგვალი კვეთის (იზოლაციით, დიამეტრი 4 მმ) ჩასადგმელი ელექტროდი - კედლების და გადახურვების დეტალების დახურულ სიბრტყეებში ტენიანობის გასაზომად
3. ჯაგრისებრი ჩასადგმელი ელექტროდი ერთგვაროვან საშენ მასალაში ტენიანობის გასაზომად. კონტაქტი მიიღწევა ჯაგრისის ზედა გვერდითი მხარის მეშვეობით

4. ბრტყელი ჩასადგმელი ელექტროდი (იზოლირებული, ბრტყელი, 1 მმ სისქის) ტენიანობის მიზანმიმართული გაზომვისათვის მრავალფენა კონსტრუქციების დაფარულ სიბრტყეებში

ტექნიკური მახასიათებლები

მიკროკლიმატის პირობების გაზომვა სათავსოში	
გაზომვების დიაპაზონი / სიზუსტე - გარემოს ტემპერატურა	-10°C დან 60°C / ± 2°C
გაზომვების დიაპაზონი / სიზუსტე - ჰაერის ხვედრითი ტენიანობის გაზომვის სიზუსტე	20% დან 90% rH / ±3%
ნამის წერტილის ინდიკაცია	-20°C დან 60°C
ჰაერის ხვედრითი ტენიანობის მგძნობიარობა	±1%
ნამის წერტილის მგძნობიარობა	1°C
მეთოდი, დაფუძნებული წინაღობის გაზომვაზე	
გაზომვის პრინციპები	ჩაშენებული ელექტროდების მეშვეობითმასალების ტენიანობის გაზომვა; მერქანის 3 ჯგუფი; საშენ მასალათა 19 ჯგუფი; „Index“-ს მაჩვენებლის რაჟიმი; თვითდიაგნოსტიკის ფუნქცია
გაზომვების დიაპაზონი / სიზუსტე	მერქანი: 0...30% / ±1%, 30...60% / ±2%, 60...90% / ±4%; სხვა მასალები ±0,5%
მეთოდი, დაფუძნებული ტევადობის გაზომვაზე	
გაზომვის პრინციპები	ტევადობის გაზომვა ჩაშენებული რეზინის ელექტროდების მეშვეობით
გაზომვების დიაპაზონი / სიზუსტე	რბილი მერქანი: 0%...52% / ±2% (6%...30%); მტკიცე მერქანი: 0%...32% / ±2% (6%...30%)
სამუშაო ტემპერატურა	0°C დან 40°C
შენახვის ტემპერატურა	-20°C დან 70°C
ელექტროკვება	9ვ ან ბლოკი 6LR22
წონა	185 გ.

## 5.6 საველე გეოფიზიკური კვლევების სისტემები



ნახ.5.9. დედამიწის წინაღობის გამზომი **16GL-N**.

მეწყერული პროცესების შესწავლისას საველე პირობებში გამოიყენებოდა **PASI-ს ფორმის** (იტალია) დედამიწის წინაღობის გამზომი **16GL-N**. მისი განმასხვავებელი თავისებურობანი:

- მაღალი გარჩევის უნარით (16 ბიტი და მცურავი წერტილი)
- მაღალი მგრძობიარება (მინიმალური წასაკითხი ძაბვა: 610mV)
- ხელსაწყო მუშაობს მრავალპროცესორული სისტემის საფუძველზე
- იძლევა საშუალებას ერთდროულად წსვიკითხვით დენის და ძაბვის მნიშვნელობები.
- პოტენციალის დინამიური თვითკომპენსაცია
- მოწოდებული ძაბვის ავტომატური ადაპტაცია გასაზომ პარამეტრებთან
- მაქსიმალური გასარჩევი ძაბვა - 1280 ვოლტი
- მაქსიმალური მოწოდებული დენი 1 ამპერი
- გამოყენება ძაბვა 16 ბიტზე და მიმდინარე გარჩევის უნარით, რომლისთვისაც გამოიყენება მასშტაბი
- მეხსიერება 18000 გაზომვის შედეგზე, გადატვირთვის გარეშე • მარტივად შესასწავლი მენიუ
- მომხმარებლის მიერ უზრუნველყოფილი პარამეტრების საფუძველზე ენერგიული ტალღის შექმნა
- მონაცემების გადაცემა USB-ს მეშვეობით

- ავტონომური მუშაობის ხანგრძლივობა არა ნაკლები 50 საათისა
  - დაბალი სიხშირეების ხმაურის ავტომატური ფილტრაცია
  - ქსელის 50/60Hz ძაბვის ხმაურის ფილტრაცია
  - მიღებული მნიშვნელობების საშუალო რიცხვი და დაგროვება ხმაურის ჩახშობით
  - ავტომატური კალიბრება ყოველ ჩართვაზე
  - გამოყენებადია ნებისმიერ ელექტროდთან, რომლებიც აკმაყოფილებს შესასვლელ მახასიათებლებს
  - მსუბუქი კომპაქტური კონსტრუქცია წყალგაუმტარ კორპუსში
- ხელსაწყო შესაძლებლობებშია შეასრულოს გაზომვები და დაიმახსოვროს მონაცემები 16 ბიტანი გარჩევის უნარით
- მონაცემები მუშავდება ხელსაწყოში მცურავი წერტილის რეჟიმში
- მიღებული მნიშვნელობები შეიძლება იყოს გამოყვანილი ეკრანზე და გადაცემული პერსონალურ კომპიუტერზე შემდგომი დამუშავებისთვის. ხელსაწყო შეიცავს მრავალპროცესორულ სისტემას, რომელსაც შეუძლია ავტონომურად მოახდინოს ენერგეტიკული ტალღის გენერირება იმ პარამეტრების საფუძველზე, რომლებიც უზრუნველყოფილია მომხმ



## თავი 6. მეწყერის ლაბორატორიული მოდელებების და მონიტორინგის აკუსტიკური სისტემა

### 6.1 აკუსტიკური ემისია მეწყერის გააქტიურების დროს. პრობლემის აღწერა

ტრადიციული თვალსაზრისით მეწყერი შეიძლება მოხდეს ძალიან ციკაბო ფერდობებზე, მაღალმთიან რეგიონებში, როგორცაა საქართველო, რაც ზუსტად არ ასახავს ამ პრობლემის ბუნებას. გასაკვირია ის ფაქტი, რომ მეწყერი შეიძლება მოხდეს პრაქტიკულად მსოფლიოს ნებისმიერ წერტილში. რა თქმა უნდა მთიანი რეგიონები ამ მხრივ უფრო დიდი საფრთხის წინაშე დგანან. მეწყერების ასეთი ფართო გეოგრაფიული გავრცელების მიზეზი მათი გამშვები მექანიზმების მრავალფეროვნებაშია: ჭარბი ნალექი, მიწისძვრები, ვულკანები, ტყის ხანძრები და ადამიანის გარკვეული სახიფათო საქმიანობა არის ზოგიერთი ძირითადი მიზეზი, რომელმაც შეიძლება გამოიწვიოს მეწყერი. ამიტომ, მეწყერის თვისებების, სტატიკის და დინამიკის გაგება, რათა გამოვლინდეს მისი ფიზიკური ბუნება, მეწყერის პროგნოზირებისათვის ან მასების მოძრაობის რისკის შემცირებისათვის, წარმოადგენს მნიშვნელოვან სამეცნიერო და პრაქტიკულ პრობლემას.

### პრობლემის აღწერა

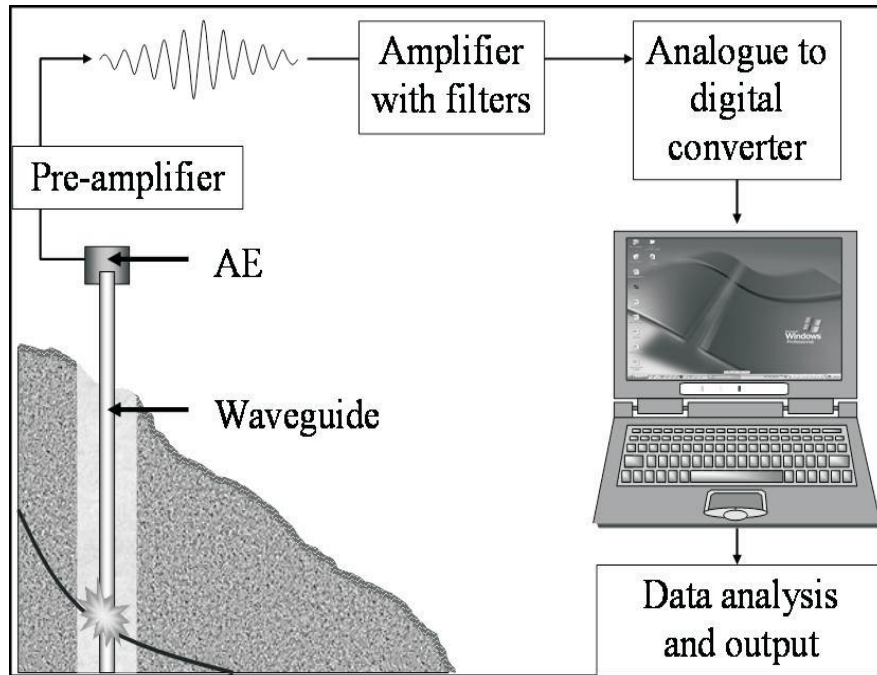
ფერდობებზე მასების მოძრაობების მონიტორინგის ტრადიციული მეთოდებში შედის ზედაპირის და ზედაპირთან ახლო ფენის დაკვირვების აპარატურა. თუმცა, ბევრ ამ მეთოდს არ ყოფნის მგრძობიარობა რღვევის წინა სუსტი დეფორმაციების აღმოსაჩენად. 40 წელზე მეტია ტარდება კვლევები ნიადაგის მოძრაობის მონიტორინგისათვის აკუსტიკური ემისიის (აე) გამოსაყენებლად. საინტერესო სამუშაოები ჩატარდა მიერ ჭელიძის და სხ. [41] მიერ. ყველაზე მნიშვნელოვანი წვლილი აე-ს სავსე დაკვირვებების თვალსაზრისით კორნერის [83,161] და დიქსონი [160] მიერ.

მეწყერულ სხეულში სრიალის დროს გენერირებული აე-ს რეგისტრაცია აღმოჩენა არ არის ადვილი ამოცანა. როდესაც აკუსტიკური იმპულსი ვრცელდება ნიადაგში, მისი ამპლიტუდა მცირდება, რადგანაც ნიადაგი მარცვლოვანი გარემოა და ენერგია იკარგება მეორეზე გადასვლის. დანაკარგების შესამცირებლად აკუსტიკური ენერგია წყაროდან (სრიალის ზედაპირიდან) სენსორამდის (რომელიც, როგორც წესი მიწის ზედაპირზეა) გადააქვს ტალღამტარს, რაც სტანდარტულ პრაქტიკად იქცა აე-ს კვლევის დროს.

დიქსონმა [160] გამოიყენა ორი ტიპის, პასიური და აქტიური ტალღამტარი. პასიურ ტალღამტარს არ გააჩნია აე-ს დამატებითი წყაროები. შედარებისთვის, აქტიური ტალღამტარი იყენებს აკუსტიკური ტალღების მიმართ მაღალმგრძობიარე მასალას, რომელიც მოთავსებულია ტალღამტარის გარშემო. დასრიალების დროს ხდება



ტალღამტარის დეფორმაცია, ხოლო აკუსტიკური ემისია აღიძვრება ტალღამტარის გარშემო ჩაყრილ მასალაში.



ნახ.6.1. აკუსტიკური ემისიის მონიტორინგის სისტემის კომპონენტები (Dixon et al., 2003)

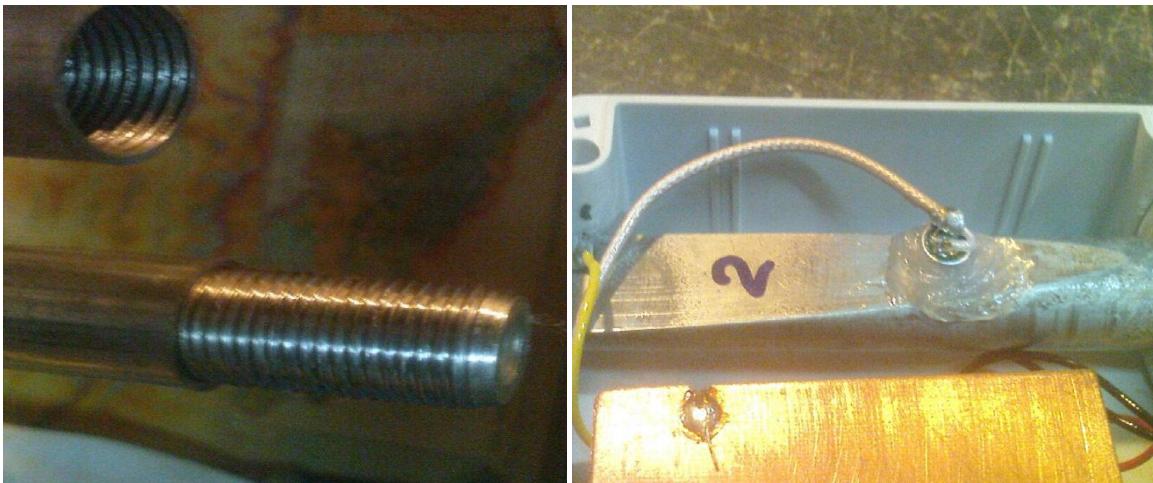
ნახ.6.1-ზე ნაჩვენებია ტიპური აე აპარატურული სისტემის სქემატური წარმოდგენა. აქტიურ ტალღამტარში (ღორღის ნაყარში) აღძრული აეფოლადის ტალღამტარით მიდის პიეზოელექტრულ სენსორამდის, რომელიც მოთავსებულია ლითონის ტალღამტარის თავზე. შემდეგ აკუსტიკური სიგნალი ძლიერდებაწინასწარი გამამლიერებლის და გამამლიერებლის მიერ. საბოლოოდ აე გარდაიქმნება ციფრულ სიგნალად შემდგომი ანალიზისათვის.

## 6.2 მეწყერის მზადების ფაზის აკუსტიკური ფონის შესწავლა

ზონდი წარმოადგენს უჯანგავი ფოლადის სექლეკედლიან მილს, რომლის სიგრძე შეიძლება შერჩეული იქნას შესასწავლი ჭრილის სიღრმის მიხედვით, საბაზო გადამწოდზე შესაბამისი რაოდენობის სექციების დახრახნვით. ზონდის სექციები 1.5მ-ის სიგრძისაა, ასე რომ შესაძლებელია მათი რაოდენობის ცვლილებით სხვადასხვა სიგრძის ზონდის მიღება.



მილის დიამეტრი 20მმ-ს შეადგენს, ხოლო კედლის სისქე 2.0მმ-ის ტოლია. ზედაპირული აკუსტიკური ტალღების კარგვის გარეშე გადმოცემისთვის სექციების შემაერთებელი ხრახნები მაქსიმალური სიზუსტით არის შესრულებული, ეს მჭიდრო კონტაქტს განაპირობებს, რაც უზრუნველყოფს სექციებს შორის აკუსტიკური ტალღის ენერჯის კარგვების გარეშე გადაცემას.



საბაზო გადამწოდის ზედა ნაწილი შესრულებულია ღერძის მიმართ დახრით გაჭრილი ცილინდრის ფორმით, მიღებული სწორი ზედაპირი კონტაქტური აკუსტიკური სენსორის დამაგრების საშუალებას იძლევა. სენსორი უშუალო აკუსტიკურ კონტაქტშია ზედაპირთან. სხვადასხვა სენსორების პარამეტრების ლაბორატორიაში შესწავლის შემდგომ მივედით დასკვნამდე, რომ აკუსტიკური ტალღების ჩვენთვის საინტერესო დიაპაზონს, 5.0-25.0კჰც, საკმაოდ კარგად აღიქვამს კონდენსატორული კაფსულა-მიკროფონი, რომელიც მგრძნობიარე მემბრანის მხრით ზონდის საბაზო გადამწოდის ზედაპირზეა დაწებებული.

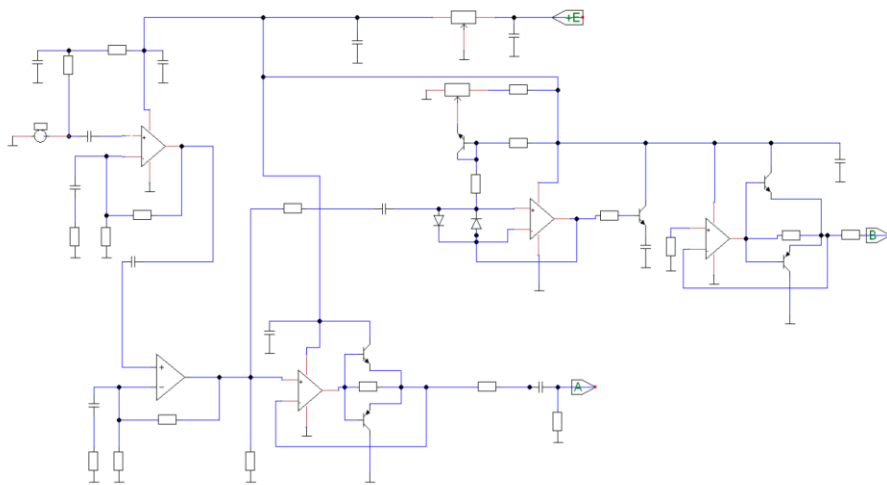


ზონდის ზედა ნაწილში განთავსებული კაფსულა-მიკროფონი, გამამლიერებლის, ფილტრის და ინტეგრატორის სქემები, ანუ მთელი ელექტრონული მოდული, მოთავსებულია ჰერმეტიკულ ყუთში, რომელიც იცავს მათ გარემოს გავლენისგან. ამავდროულად ზონდის ტანთან ჰერმეტიზაცია შესრულებულია რბილი რეზინის შალითით, რათა არ მოხდეს ზონდის ზედაპირის დემპფირება და შესაბამისად გადაცემული აკუსტიკური ტალღების ამპლიტუდის კარგვა.



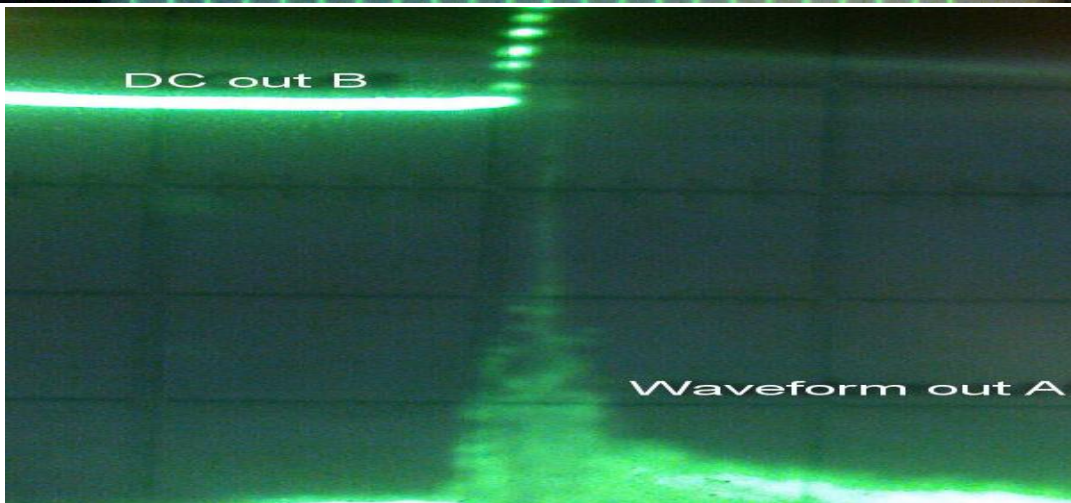
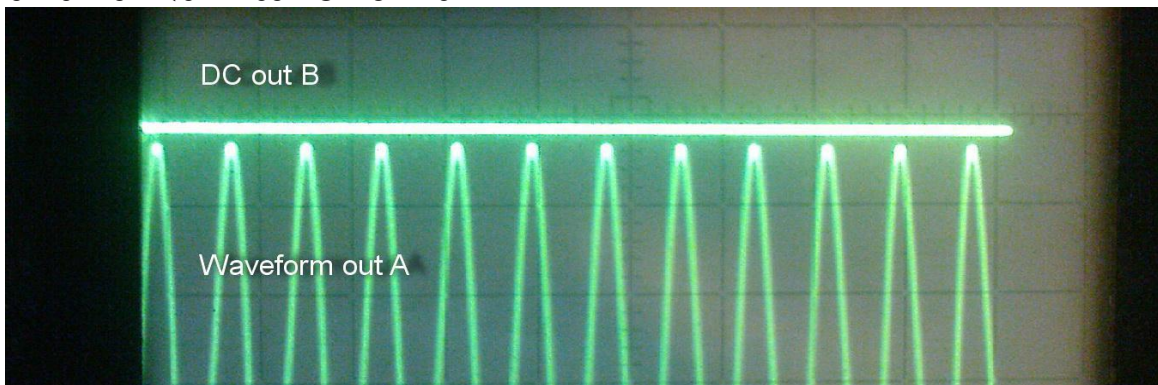
ელექტრონული სქემა შეიცავს მცირეხმაურიან გამამლიერებელს, სიგნალის Waveform გამოსასვლელ ბუფერულ გამამლიერებელს, პრეცეზიულ პიკდეტექტორ-ინტეგრატორს და დატალოგერის DC Voltage გამოსასვლელს B. სიგნალის პიკური ამპლიტუდური მნიშვნელობის დეტექტირების შემდგომ გამოყენებული ინტეგრატორი იმახსოვრებს შემოსული სიგნალის მაქსიმალურ დონეს წუთში 5%-იანი შემცირების სიზუსტით, რაც საშუალებას იძლევა წუთში თითო ანათვალის დატალოგერზე დაფიქსირებით მივიღოთ საკმაოდ ზუსტი ინფორმაცია აკუსტიკური ხმაურის დონის ცვლილებების შესახებ.





ნახ.6.2. ელექტრული მიკროფონის (აკუსტიკური სენსორის) გამამდიერებლის სქემა

სიგნალის გამოსასვლელი A საშუალებას იძლევა მაღალი ხარისხის ანალოგური გარდამქმნელის გამოყენების შემთხვევაში უწყვეტად ჩავიწეროთ აკუსტიკური შემფოთებების ფორმა დროის რეალურ მასშტაბში. გამოსასვლელი A შეიძლება მივაწოდოთ USB ჩამწერ ოსცილოგრაფულ მოდულს, რომლის შესასვლელი ADC ანალოგურ-ციფრული მოდული გათვლილია 100კჰც-მდე სიხშირის სპექტრის მქონე სიგნალები რეგისტრაციაზე.

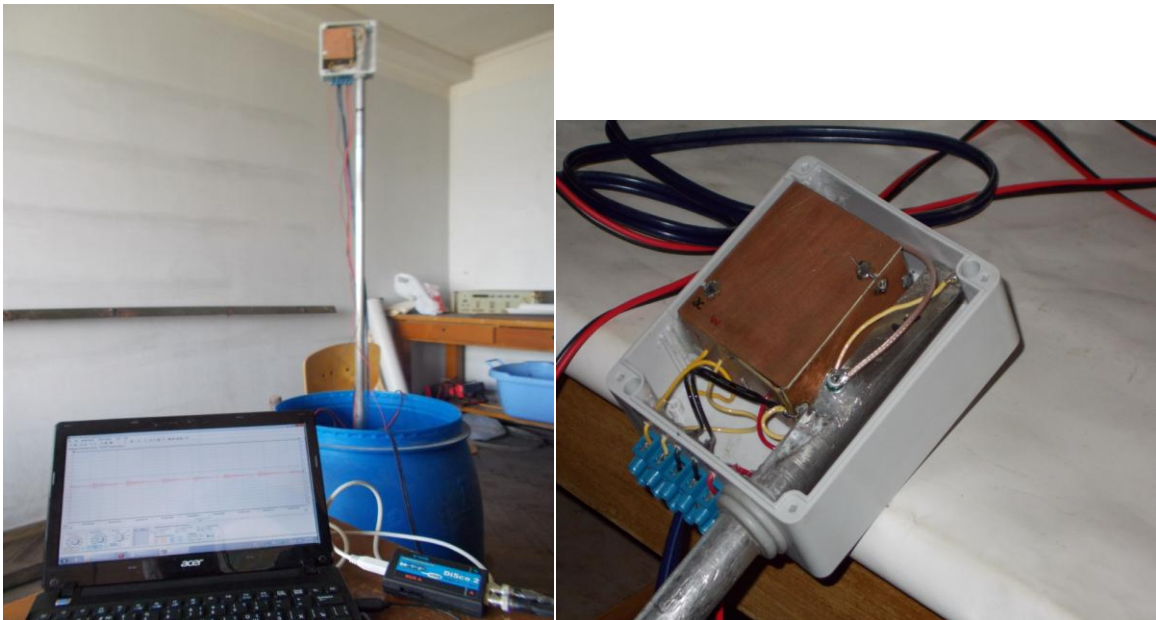


ნახ.6.3. მოცემულია რეალური ორსხვიანი ოსცილოგრამა, რომელშიც კარგად ჩანს ფონური მნიშვნელობის ხმაურის შემდგომ შემოსული აკუსტიკური შეშფოთების ტალღის ფორმა და დატალოგერის გამოსასვლელის მიერ პიკური მნიშვნელობის დაფიქსირება.

ლოგერის გამოსასვლელი პიკურ სიგნალს აფიქსირებს, რისთვისაც DC out-ზე მძვავს მკვეთრად იზრდება Waveform out-ის სიგნალის ფრონტის შესაბამისად.

### 6.3 ექსპერიმენტული ნაწილი

ჩვენი კვლევის მიზანი არის აკუსტიკური ემისიის ჩაწერის საშუალებით მეწყრის ნელი მოძრაობის (ცოცვის) რეგისტრაცია და მონიტორინგი [134,162]. ამ მიზნით ჩვენ ავაწყვეთ სპეციალური მოწყობილობა (ნახ.6.4). პლასტიკური კასრი ივსება მეწყერული ნიადაგით, ხოლო კასრის ცენტრში ცილინდრულად ჩაყრილია ღორღი. ცილინდრის დიამეტრი დაახლოებით არის 15 სმ და ხოლო ღორღის საშუალო დიამეტრი დაახლოებით 7 მმ. ღორღის ცენტრში განთავსებულია სქელკედლიანი ფოლადის მილი, რომელიც ხრეშში წარმოქმნილ აკუსტიკურ იმპულსებს გადასცემს აკუსტიკურ სენსორს. დანადგარში დეფორმაცია ხორციელდება მექანიკური დომკრატის დახმარებით.



ნახ.6.4. მეწყრის ცოცვის მოდელირება და თანმხლები აკუსტიკური ემისიის რეგისტრაცია USB ოსცილოსკოპის საშუალებით

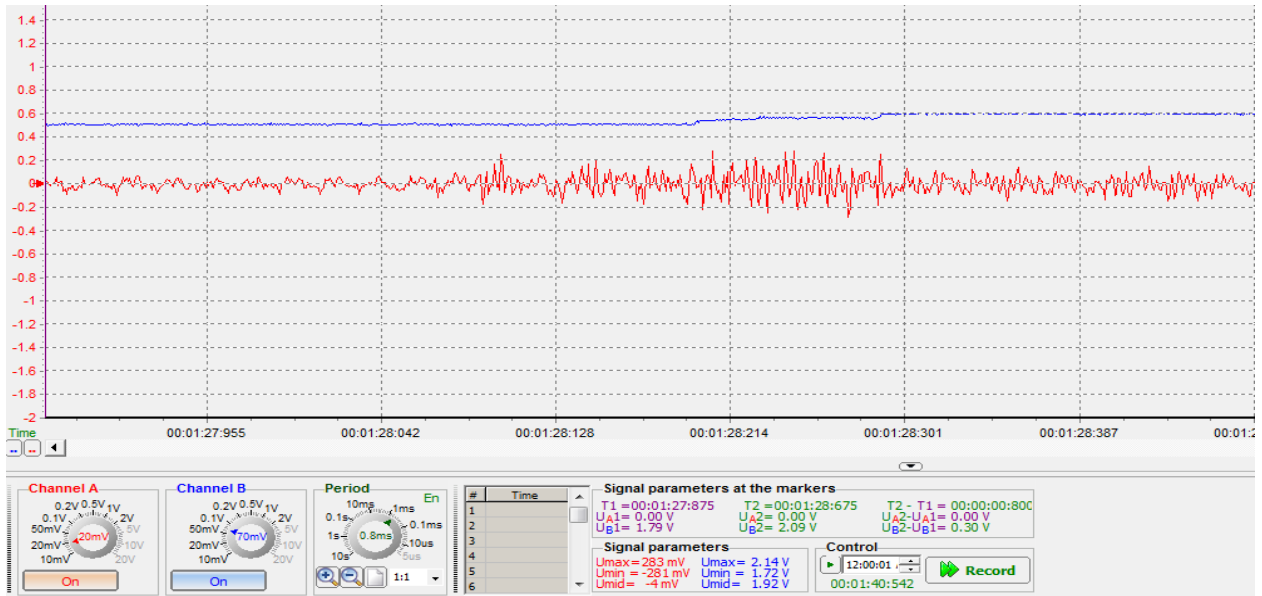
აკუსტიკური მონიტორინგის მიზანია მეწყრის გააქტიურებამდე, გეოლოგიური სხეულების წინასწარი გადაადგილების დროს, აღძრული აკუსტიკური სიგნალების

ჩაწერას. აკუსტიკური სენსორის გარშემო მოთავსებული ღორღის წანსცვლებისას აღძრული აკუსტიკური სიგნალის ჩაწერის მსგავსი ტექნიკა ადრე შემუშავებული იყო ლოუგბოროს (Loughborough) უნივერსიტეტის გუნდის მიერ, მაგრამ ეს მოითხოვს შედარებით ღრმა ჰაბურღილს ქვემოთ მოცურების ზედაპირამდის. ეს პროცედურა საკმაოდ ძვირია. ჩვენი მიზანი იყო აღნიშნული მეთოდის იაფი ვერსიის შემუშავება. იდეა არის იმაში, რომ გამოიყენოს სხვადასხვა სიღრმეზე განლაგებული ორი მგრძნობიარე აკუსტიკური ზონდი, ერთი ღრმად და მეორე ზედაპირთან ახლოს. პირველი ზონდი ძირითადია. ხოლო მეორის როლია ზედაპირული სიგნალების გამოყოფა, რომლებიც ამ შემთხვევაში განიხილება, როგორც ხმაური.

მეწყრული ნიადაგის მცირე გადაადგილების დროს აღძრული აკუსტიკური იმპულსების რეგისტრაცია ხდება აკუსტიკური სენსორის საშუალებით, რომელიც შეერთებულია USB ოსცილოსკოპთან (ნახ.6.4), რომლის საშუალებითაც დამუშავების სპეციალური კომპიუტერული პროგრამის გამოყენების შემდეგ ინფორმაცია იგზავნება კომპიუტერში.

#### 6.4 შედეგების ანალიზი

ექსპერიმენტული მოწყობილობა აღწერილია ზემოთ (ნახ.6.4). აკუსტიკური სენსორის და ოსცილოსკოპის საშუალებით ხდება აკუსტიკური ემისიის ტალღური ფორმის და ძაბვის პიკური ამპლიტუდური მნიშვნელობის (DC) უწყვეტი ჩაწერა. ერთი



ნახ.6.5. აკუსტიკური სიგნალის დონის (DC) და ტალღური ფორმის ჩანაწერი USB ოსცილოსკოპის გამოყენებით; x-ღერძი არის დრო წამებში, y-ღერძი არის აკუსტიკური სიგნალის ამპლიტუდა ვოლტებში.

ჩანაწერის ფრაგმენტები ნაჩვენებია ნახ.6.5-ზე. კუმშვის და ძვრის დეფორმაციის დროს აღძრული სიგნალი უმნიშვნელო იყო. თითოეული მცირე წანაცვლების რეგისტრაციისათვის საჭიროა მონაცემების ფაილის (~10<sup>5</sup> მონაცემი წამში) უფრო ღრმა დამუშავება და / ან ხრეშის სიმკვრივის გაზრდა. ღორღის სიმკვრივის გაზრდამ უნდა გამოიწვიოს მცირე წანაცვლების დროს აკუსტიკური იმპულსების რაოდენობის და დეტექტირების ეფექტურობის ზრდა. გრაფიკი 6.5 გვიჩვენებს შემთხვევას, როდესაც ექსპერიმენტული დანადგარიდან ხდება დამაბულობის სწრაფი მოხსნა [134,162].

ჩვენი ექსპერიმენტის ერთ-ერთი მიზანი იყო დანადგარის ოპტიმიზაცია, რათა მომხდარიყო მისი გამოყენება მეწყრულ მიდამოში. ამიტომ, ზოგიერთ ექსპერიმენტში ჩვენ ვიყენებდით მონაცემების დამგროვებელს (data logger) მონაცემების რეგისტრაციისათვის. მონაცემთა დამგროვებელს (data logger) შეუძლია ჩაიწეროს ძაბვის მხოლოდ მუდმივი მდგენელი (DC) 1 ჰც ჩაწერის სიხშირით. ჩვენ ვვარაუდობთ, რომ ამ მიმართულებით შეიძლება დამუშავდეს მეწყრის სრიალის დაწყების წინასწარი შეტყობინების აკუსტიკური სისტემა.



## თავი 7 მეწყრული პროცესების მოდელირების და ტრიგერირების კვლევები

### 7.1 სტიკ-სლიპის მოვლენის, ტრიგერირების და სინქრონიზაციის შესწავლა ჰორიზონტალურ დანადგარზე მექანიკური ვიბრაციის პირობებში

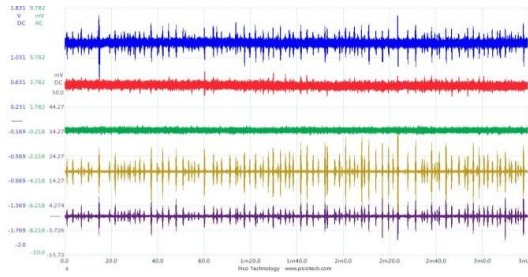
ჩვენს ლაბორატორიაში ტარდება რიცხვითი ექსპერიმენტები ბურიჯ-კნოპოვის მოდელის საფუძველზე. ამასთანავე, ჩვენს ლაბორატორიაში აეწყო ბურიჯ-კნოპოვის ლაბორატორიული მოდელი (ნახ.7.1). ექსპერიმენტები შეიძლება ჩატარდეს ერთიდან ოთხამდე მოსრიალე ფილისათვის. აქ წარმოდგენილია ექსპერიმენტები ერთი და სამი ბაზალტის ფილისათვის (ნახ.7.1). ექსპერიმენტების შედეგების რეგისტრაცია ხდებოდა აქსელერომეტრების და პიეზოსენსორების საშუალებით. ერთი ფილის შემთხვევაში მასზე მიმაგრებული იყო სამი აქსელერომეტრი და ხდებოდა აჩქარების  $x$ ,  $y$  და  $z$  კომპონენტების ჩაწერა. ფილის გაწვევის სიჩქარე იყო 1 მმ/წმ. (გაწვევის სიჩქარე ჩვენს ექსპერიმენტში შეგვიძლია ვცვალოთ 01 მმ/წმ - დან 1 მმ/წმ - მდე). ექსპერიმენტები ჩატარდა სამი ფილის შემთხვევაშიც. თითოეულ ფილაზე მიმაგრებული იყო ერთი აქსელერომეტრი, რომელიც ზომავდა აჩქარების  $x$  კომპონენტას. აჩქარების და აკუსტიკური ემისიის ჩანაწერები წარმოდგენილია ნახ.4-ზე. ჩაწერა ხდებოდა 8-არხიანი ოსცილოსკოპის (**PicoScope 4824**) საშუალებით. ექსპერიმენტებში გამოიყენებოდა სამღერძიანი **MXR9500G/M** აქსელერომეტრები და პიეზო სენსორები. თითოეული მოსრიალე ფილის მასა  $\approx 335$  გ, ზამბარების სიხისტეები  $k_c \approx 360 \frac{N}{m}$  და  $k_p \approx 155 \frac{N}{m}$ . გაწვევის სიჩქარე  $v \approx 1$  მმ/წმ.



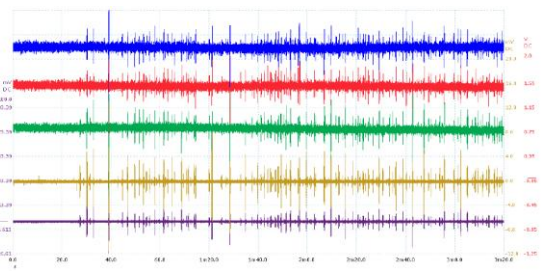
ნახ.7.1. ბურიჯ-კნოპოვი ერთ და სამფილიანი ექსპერიმენტები



ა)



ბ)



ნახ.7.2. ბურიჯ-კნოპოვის ექსპერიმენტების აჩქარებების და აკუსტიკური ემისიის ჩანაწერები: ა) ერთი ფილა და ბ) სამი ფილა  
1, 2, 3 - აჩქარებები; 3, 4 - აკუსტიკური ემისია.

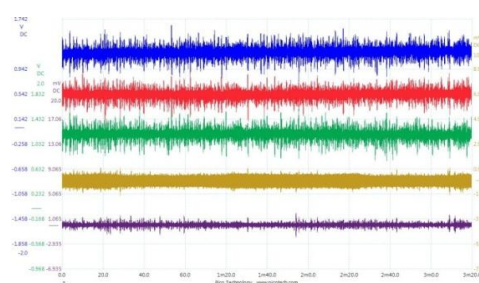
ჩატარდა ექსპერიმენტები ბურიჯ-კნოპოვის ლაბორატორიულ სისტემაზე ფილებს შორის სხვადასხვა მარცვლოვანი მასალის მოთავსებით, სეისმური და მეწყრული პროცესების მოდელირებისა და შესწავლისათვის (ნახ.7.3).



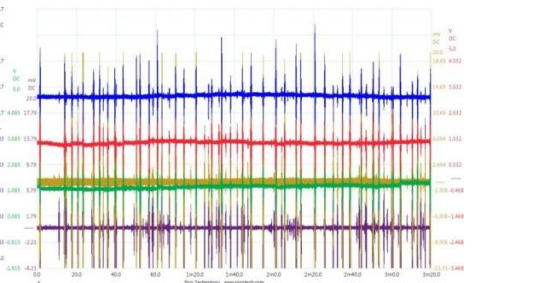
ნახ.7.3. ბურიჯ-კნოპოვის ექსპერიმენტები სუფთა ფილებით და ფილებს შორის ქვიშის ფენით

ზედა პლატფორმის მოძრაობის სიჩქარე იყო 1 მმ / წმ. ექსპერიმენტის მეთოდოლოგია. ჩანაწერები ნაჩვენებია ნახ.7.4-ზე.

ა)



ბ)

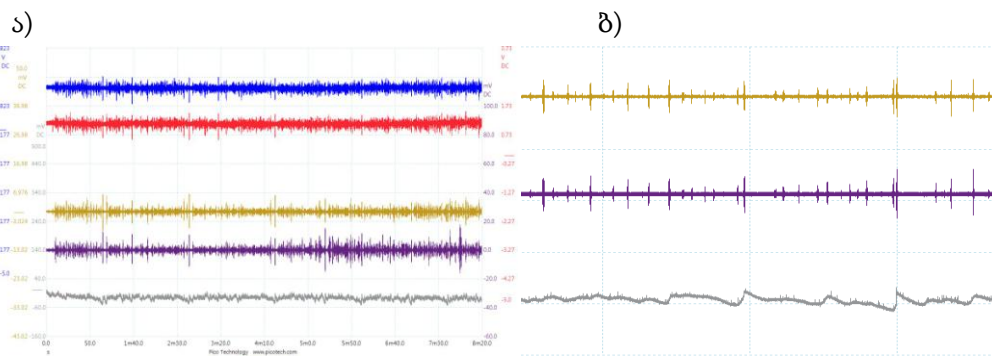


ნახ.7.4. ბურიჯ-კნოპოვის ექსპერიმენტების აჩქარებების და აკუსტიკური ემისიის ჩანაწერები სუფთა ფილებისათვის (ა) და ფილებს შორის ქვიშის ფენით (ბ).  
1, 2, 3 - აჩქარებები; 3, 4 - აკუსტიკური ემისია.

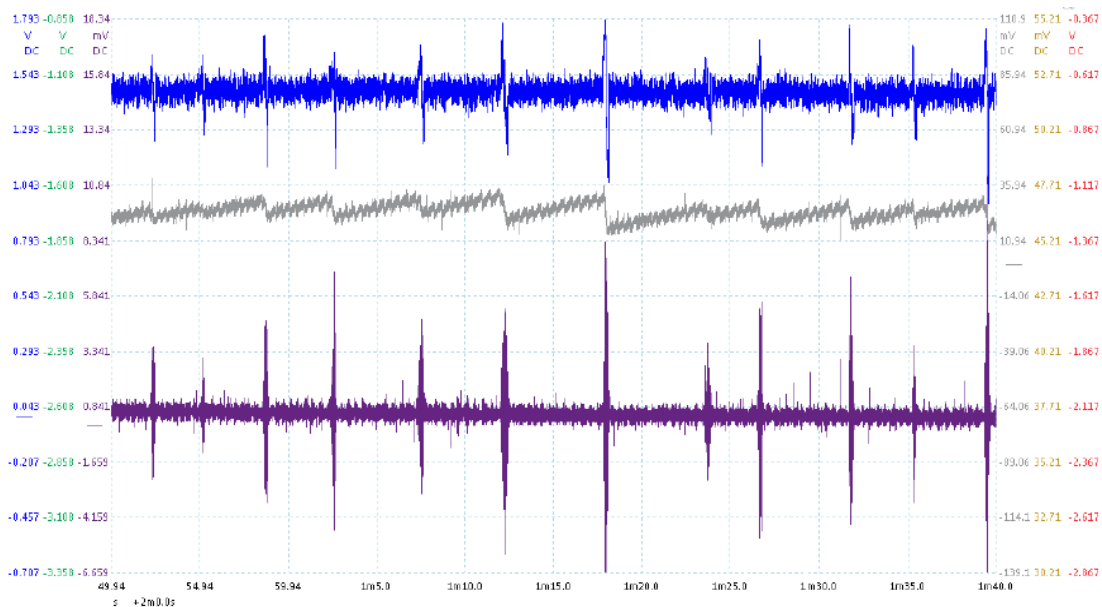
ექსპერიმენტების განვითარების შემდგომ ეტაპზე მოხდა გაწევის ძალის ციფრული რეგისტრაცია. ამისათვის მოვახდინეთ ციფრული დინამომეტრის გადაკეთება. ძალის გაზომვა იძლევა პროცესის ენერგეტიკული პარამეტრების შეფასების საშუალებას. გუტენბერგ-რიხტერის მრუდის აგების შესაძლებლობას და არსებულ მათემატიკურ მოდელებთან შედარების შესაძლებლობას [135,136,164].



ნახ.7.4. ბურიჯ-კნოპოვის ექსპერიმენტი ორი ფილის შემთხვევაში. ხდება ფილების აჩქარებების, აკუსტიკური ემისიის და გამწევი ძალის რეგისტრაცია.



ნახ.7.5. ბურიჯ-კნოპოვის ექსპერიმენტი: ა) აჩქარებების, აკუსტიკური ემისიის და გამწევი ძალის ჩანაწერები ორფილიანი მოდელის შემთხვევაში, ბ) აკუსტიკური ემისიის და გამწევი ძალის ჩანაწერების მცირე ფრაგმენტი 1, 2 - აჩქარებები, 3, 4 - აკუსტიკური ემისია, 5 - გამწევი ძალა



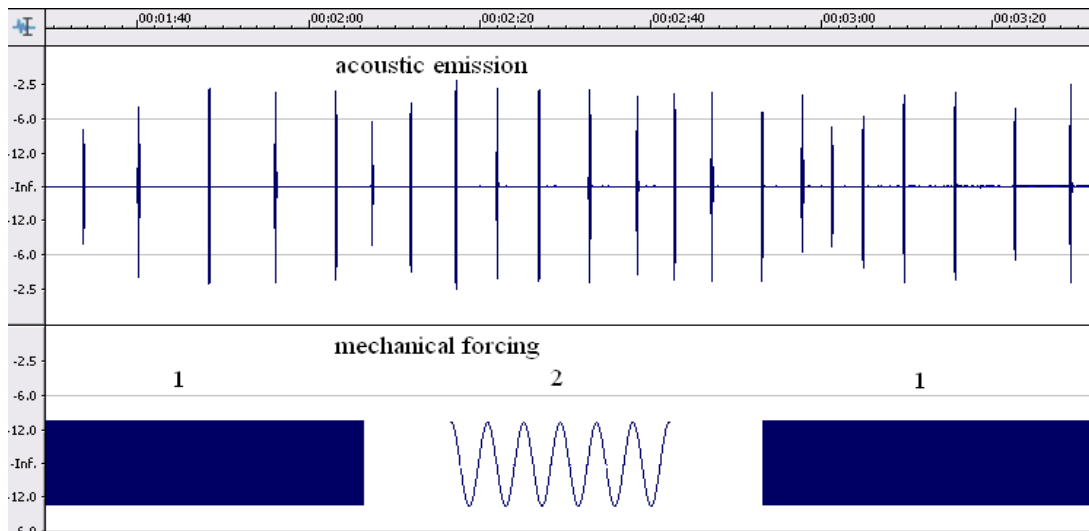
ნახ.7.6. ერთფილიანი BK-სისტემის ექსპერიმენტი: აქსელერომეტრის, აკუსტიკური ემისიის და ძალის ჩანაწერები

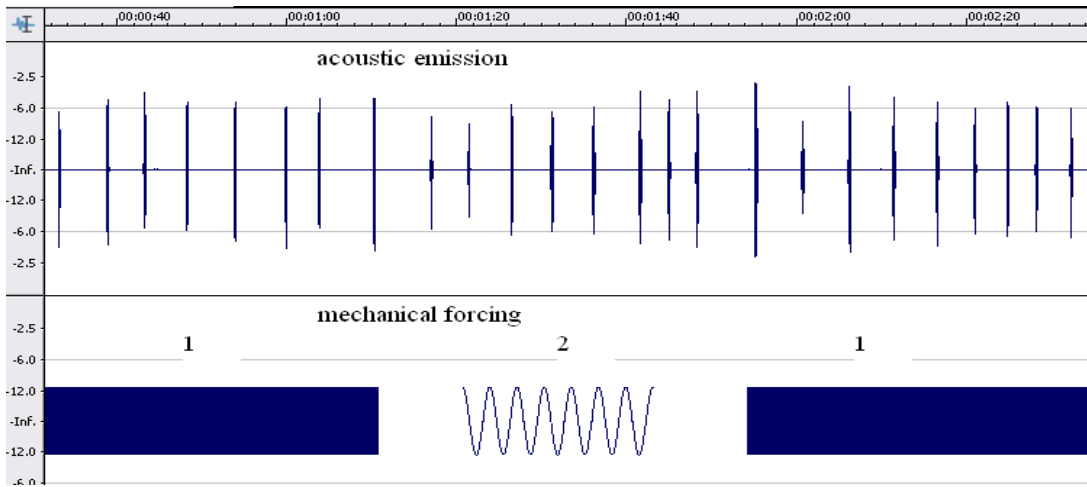
ნახაზზე წარმოდგენილია აჩქარების, გამწევი ძალის და აკუსტიკური ემისიის ჩანაწერები. ნახაზიდან ჩანს სინქრონიზაცია გამწევი ძალის ვარდნებსა, აჩქარებებსა და აკუსტიკურ ემისიას შორის. საწიროა გამწევი ძალის ვარდნების (stress drop) ამპლიტუდების და აჩქარებების და აკუსტიკური ემისიის ამპლიტუდებს შორის თანაფარდობის დადგენა.

სტიკ-სლიპის სინქრონიზაციის მოვლენის შესწავლა ზამბარა-მცოცის დანადგარზე

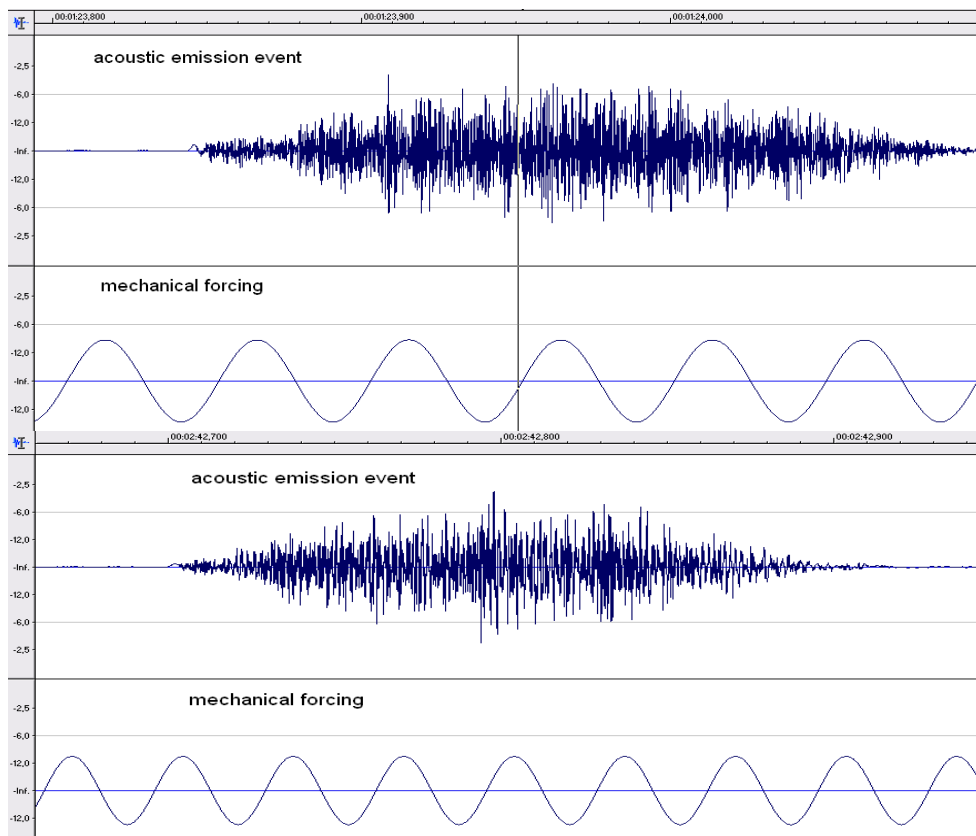
სტიკ-სლიპის პროცესში სინქრონიზაციის მოვლენის შესასწავლი ექსპერიმენტალური დანადგარი წარმოადგენს ორ ჰორიზონტალურ ბაზალტის ფილას. ნიმუშები იყო დახერხილი და უხეშად დამუშავებული. ზედაპირული ხორკლების ზომა იყო 0.1 – 0.2 მმ დიაპაზონში. ზედა (მოსრიალე) ფილაზე მოდებული მამოძრავებელი ძალა იყო 4 ნ რივის. სისტემა განიცდიდა პერიოდულ მექანიკურ ზემოქმედებას. მექანიკური ზემოქმედება გამწევ ძალაზე ბევრად მცირე იყო [40,132].

ექსპერიმენტები ტარდებოდა მექანიკური ზემოქმედების ორი რეჟიმისათვის: (i) როდესაც პერიოდული ზემოქმედება მოდებულია ზედაპირის მართობულად და (ii) როდესაც ზემოქმედება მოდებულია მოსრიალე ზედაპირის გასწვრივ;



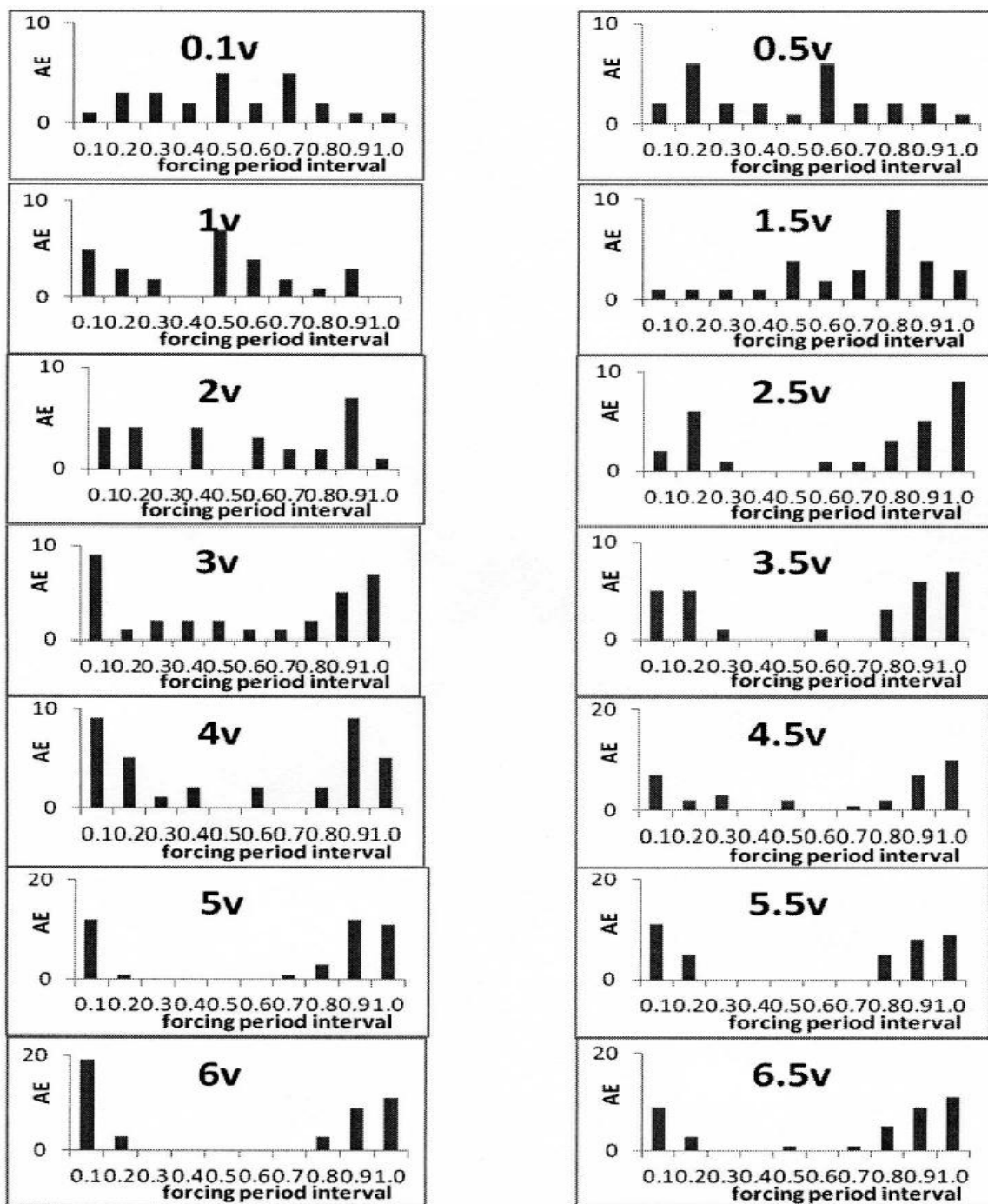


ნახ.7.7. სინქრონიზირებული სტიკ-სლიპის პერიოდში აკუსტიკური ემისიის იმპულსების (ზედა არხი) და მექანიკური ზემოქმედების (ქვედა არხი) სრული ჩანაწერი. 1 - ზემოქმედების (ფორსინგის) ჩანაწერი; 2 - ფორსინგის ჩანაწერის ნაწილი გამწვანებული სახით; მექანიკური ზემოქმედება შეესაბამება ვიბრატორზე მოდებულ 4 ვ ძაბვას: (ა) ნორმალური ზემოქმედება, (ბ) ტანგენციალური ზემოქმედება.



ნახ.7.8. აკუსტიკური ემისიის განმხოლოებული იმპულსი (ზედა არხი) და მექანიკური ზემოქმედება (ქვედა არხი) ნახ.7.7-ზე წარმოდგენილი ჩანაწერიდან. ამ შემთხვევაშიც ვიბრატორზე მოდებულია 4 ვ ძაბვა : (ა) ნორმალური ზემოქმედება, (ბ) ტანგენციალური ზემოქმედება.

ნახ.7.8-ზე გაფართოებული მასშტაბით, წარმოდგენილია ერთი აკუსტიკური იმპულსი და შესაბამისი ნორმალური და ტანგენციალური ზემოქმედება.

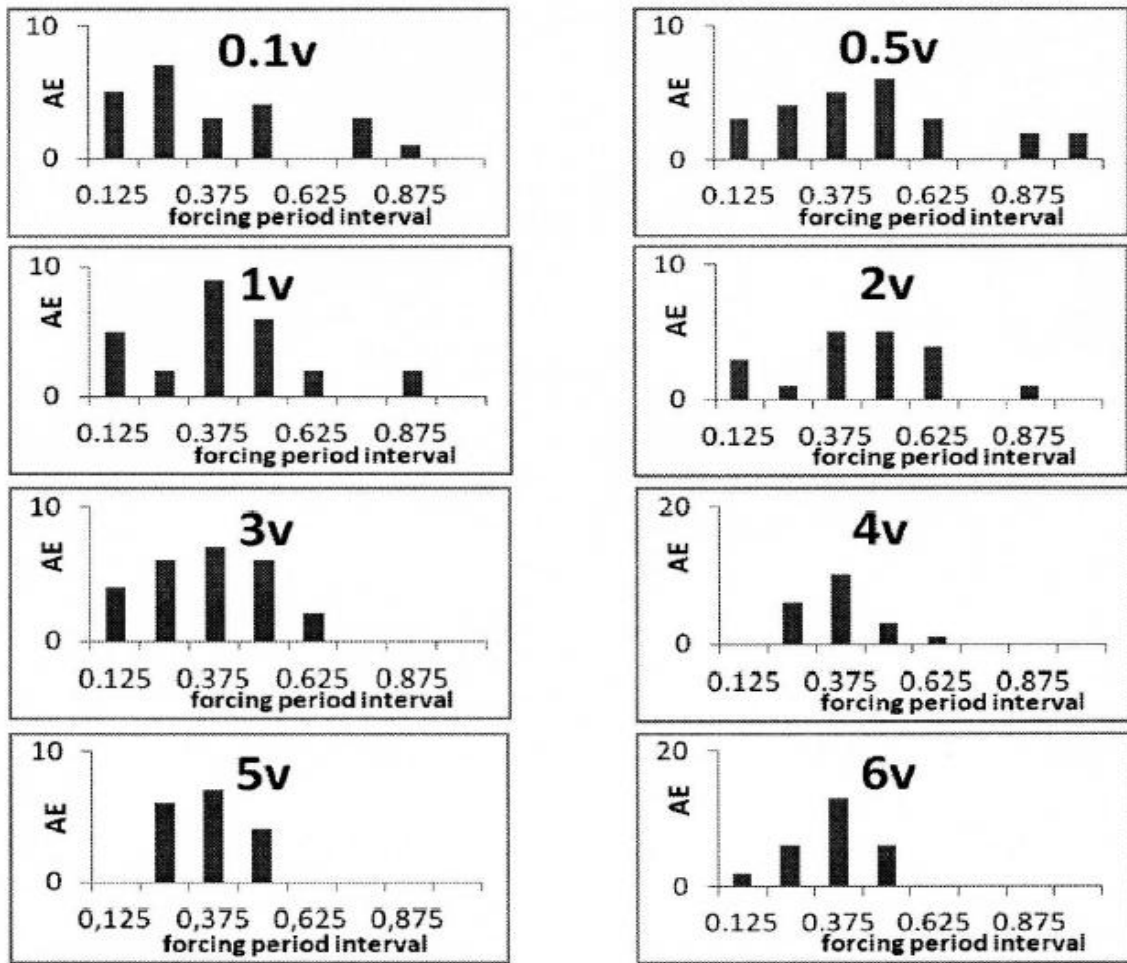


ნახ.7.9. აკუსტიკური ემისიის იმპულსების შემოსვლების განაწილება ფორსინგის პერიოდის ფაზებთან მიმართებაში (დეციმელებში) ნორმალური ზემოქმედების სხვადასხვა ინტენსივობებისათვის.



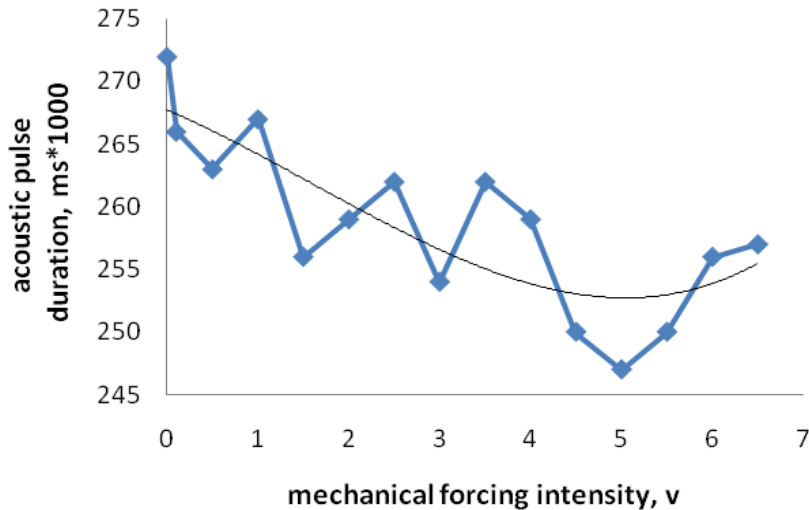
ნახ.7.9-ზე წარმოდგენილია ფორსინგის პერიოდის ფაზის მიმართ შემოსვლების განაწილება. მცირე ძაბვებზე (1 ვოლტამდე) შემოსვლები მეტ-ნაკლებად თანაბრად განაწილებული ფორსინგის პერიოდში. ძაბვის გაზრდა იწვევს შემოსვლების კონცენტრაციას ფორსინგის პერიოდის განსაზღვრულ ნაწილში, კერძოდ, ფორსინგის ფაზის პირველ და ბოლო დეციმელებში. ჩვენ შეგვიძლია ვივარაუდოთ, რომ ვიბრატორზე მოდებული ძაბვის ზრდა ხელს უწყობს აკუსტიკური იმპულსების შემოსვლების სინქრონიზაციას გარე ზემოქმედებასთან (ფორსინგთან).

ნახ.7.10-ზე წარმოდგენილია ტანგენციალური ფორსინგის პერიოდის ფაზის მიმართ შემოსვლების განაწილება. ფორსინგის ამპლიტუდის ზრდა, ამ შემთხვევაშიც, იწვევს ფაზურ სინქრონიზაციას.



ნახ.7.10. სხვადასვა ინტენსივობის ტანგენციალური ფორსინგის პერიოდის ფაზის მიმართ აკუსტიკური ემისიის იმპულსების განაწილება.

ასევე დადგინდა, რომ გარე ზემოქმედების (ფორსინგის) ამპლიტუდის ზრდა იწვევს იმპულსების ხანგრძლივობის (საშუალო) შემცირებას.



ნახ.7.11. სტიკ-სლიპის დროს გენერირებული აკუსტიკური იმპულსების საშუალო ხანგრძლივობა სხვადასხვა ნორმალური გარე ზემოქმედების (ფორსივის) პირობებში, ტრენდლაინით.

## 7.2 ტრიგერირების მოვლენის შესწავლა დახრილ დანადგარზე ელექტრული ველით ზემოქმედების პირობებში

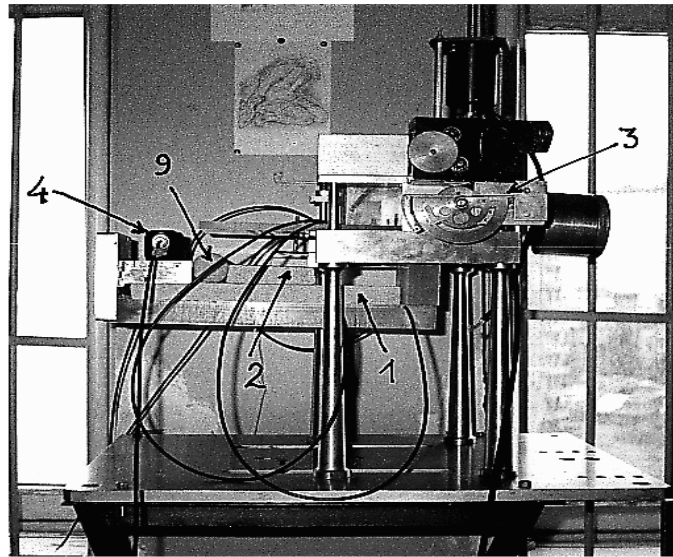
**მოწყობილობა სრიალის ინიცირებისათვის.**

ექსპერიმენტული მოწყობილობა ისე იყო კონსტრუირებული, რომ ადვილად შეიძლებოდა მექანიკური სისტემის კრიტიკულ მდგომარეობამდე მიყვანა, როდესაც რაიმე სუსტი იმპულსის საშუალებით (როგორცაა ელექტრული იმპულსი) უფრო ალბათური ხდება მექანიკური არამდგრადობის ინიცირება. ეს სისტემა შესდგება ქანისაგან გამოჭრილი ორი ფილისაგან: ზედა ქანს (ფილას) შეუძლია დამაგრებულ საყრდენ ნიმუშზე სრიალი თუკი ეს სისტემა კრიტიკულ კუთხემდე მიყვანილი. საყრდენის დახრა ექსპერიმენტში ანალოგიურია ბუნებრივ პირობებში ტექტონური დაძაბულობისა.

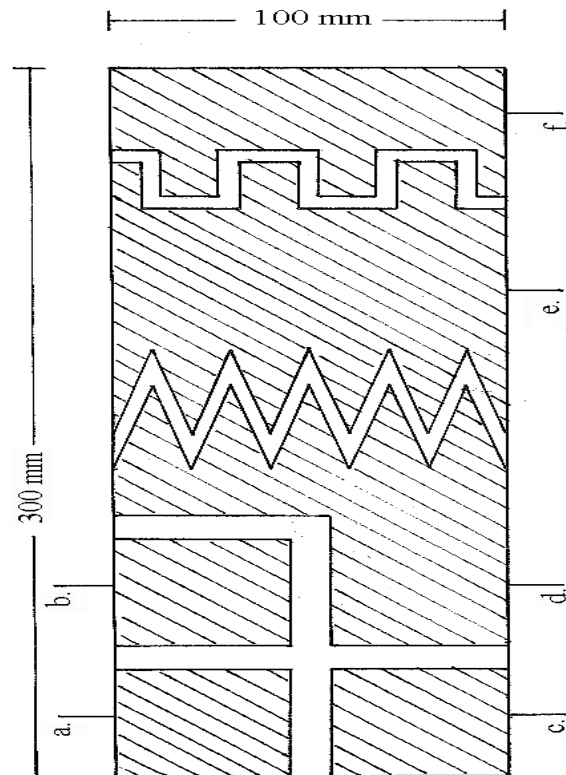
ეს მოწყობილობა შეიძლება გამოყენებულ იქნას ექსპერიმენტებისათვის სხვადასხვა პირობებში. მოწყობილობის ზოგადი სურათი მოცემულია ნახ.7.12-ზე.

### მექანიკური ნაწილი

უძრავი ნიმუშის დახრის კუთხის რეგულირება და დაფიქსირება ხდება ვერნიერის სისტემის საშუალებით, სიზუსტით. მეორე მნიშვნელოვანი დეტალია პიეზო-აკუსტიკური ემისიის სენსორი, რომელიც რეაგირებას ახდენს უძრავ ნიმუშზე ზედა ნიმუშის ელემენტარულ წანაცვლების შემთხვევებზე. ეს არის შედარებით დაბალი სიხშირის სენსორი (25–100 kHz), რომელიც საყრდენ (უძრავი) ნიმუშზე დამაგრებული იქნა სალოლის საშუალებით [38,39].



ნახ. 7.12. ექსპერიმენტული მოწყობილობა სრიალის ინიცირებისათვის:1-უძრავი ფილა, 2-მოდრავი ნიმუში, 3-დახრის კუთხის მარეგულირებელი, 4-პიეზო-აკუსტიკური ემისიის სენსორი



ნახ.7.13. ელექტროდების კონფიგურაცია, რომელიც მოთავსებულია უძრავი ფილის ქვეშ.



## ელექტრონული ნაწილი

ელექტრონული ნაწილი შესდგება ელექტრომაგნიტური (EM) იმპულსის გენერატორისაგან და აკუსტიკური სიგნალების გამამლიერებლისაგან. ექსპერიმენტებისათვის აუცილებელი იყო ისეთი სისტემის აწყობა, რომელიც მაღალი ინტენსიურობის ცვლად (AC) და მუდმივი (DC) ველების გენერირებას მოახდენდა. ამისთვის აგებულ იქნა “ A ” კლასის მაღალი ძაბვის წრფივი გამამლიერებელი. მას გააჩნია ორი გამოსავალი (AC) და (DC) ძაბვისათვის.

სტანდარტული გენერატორიდან სიგნალი, ამპლიტუდით 0.5-5V, მიწოდება გამამლიერებლის შესასვლელს, ხოლო გამოდის გარეთ ამპლიტუდით 1300 V-მდე. მაღალი ძაბვის იმპულსები ქანის ნიმუშებს ერთ-ერთ სერიაში მიეწოდება კომპლანარული ელექტროდების საშუალებით, რომლებიც მოთავსებულია საყრდენი ქანის ნიმუშის ქვეშ. ელექტროდები სხვადასხვა ფორმებისა (ნახ.7.13) და სხვადასხვა კომბინაციებით შეიძლება დავაკავშიროთ.

კიდევ ერთი გამამლიერებელი აიგო აკუსტიკური სიგნალების რეგისტრირებისათვის, რომლებიც გაცურების შემთხვევაში გამოსხივდება. ეს არის ორარხიანი დაბალი სიხშირის გამამლიერებელი; არხების გაძლიერების ხარისხის რეგულირება ცალ-ცალკეა შესაძლებელი. გამამლიერებლის გამოსავალი ძაბვა საკმარისია აკუსტიკური სიგნალების რეგისტრირებისათვის პერსონალური კომპიუტერის ხმის ბარათის საშუალებით. სქემაში ჩამონტაჟებულია გამოსასვლელის კონტროლი, რაც იცავს PC-ს შესავალს ძაბვის გადატვირთვისაგან და ასევე მიუთითებს დაბალი სიხშირის გამამლიერებლის გადატვირთვაზე.

## ნიმუშები

უძრავი და მცოცავი ბლოკები დამზადებული იყო ბაზალტისაგან, ლაბრადორიტისაგან, მინისა და გრანიტისაგან. მათი ზედაპირი იყო ან უხეშად დამუშავებული (ბაზალტი) ან შედარებით უფრო გლუვი (გრანიტი, ლაბრადორიტი და მინა) იყვნენ. მცოცავი ბლოკის სიგრძე იყო 10 სმ, სიგანე -10 სმ და სისქე 2 სმ., ხოლო უძრავი ნიმუშის ზომებია:30/10/2 სმ.

ძირითადი ექსპერიმენტები ჩატარებული იქნა ბაზალტის ნიმუშებზე თუმცა გამოცდილი იქნა სხვა ნიმუშებიც: გრანიტი, ლაბრადორი და მინა.

## კრიტიკული კუთხის გაზომვა

დახრილ სიბრტყეზე ექსპერიმენტების მთავარი მიზანი იყო გაგვეგო მართლაც შეეძლო თუ არა ელექტრომაგნიტურ იმპულსს ქანის ფილის გადაადგილება, რომელიც მოთავსებული იყო საყრდენ ნიმუშზე კრიტიკულზე ნაკლებ, მაგრამ კრიტიკულთან მიახლოებული დაცურების კუთხით.

განსაზღვრულ იქნა დაცურების ბუნებრივი კრიტიკული კუთხეები ქანების სხვადასხვა ნიმუშებისათვის.

## კომპლანარული ელექტროდები

აღმოჩნდა, რომ ელექტრომაგნიტური იმპულსების მოდება კომპლანარული ელექტროდებისადმი საყრდენი ნიმუშის ძირზე, დაცურების ინიცირებას ახდენს დაახლოებით 40 შემთხვევაში 600 ტესტიდან (ე. ი. დაცურების ინიცირების ალბათობა დაახლოებით არის 0.07). დაცურება აღინიშნება ან იმპულსის დროს, ან კიდევ მის შემდეგ. ეს ნიშნავს, რომ ნიმუშის პოლარიზაცია შეიძლება მნიშვნელოვანი იყოს გაცურების ინიცირებისათვის. რადგანაც იმპულსის გამორთვის შემდეგ დაცურების შეყოვნება ზოგჯერ მნიშვნელოვანი იყო (წამები).

დაცურების ინიცირებისათვის გამოყენებულ იქნა მაღალი ძაბვის მეორე წყაროც (იმპულსის გენერატორის გარდა), კერძოდ ელექტროგანმმუხტველი TESLA OPOCMO TVI 200. ამ შემთხვევაში გამოყენებული ძაბვა იყო 10 kV რიგის, იმპულსების სერია მიეყენა ნიმუშებს პირველ რეჟიმში და ამ შემთხვევაში დაცურების ინიცირების ალბათობა გაცილებით უფრო მაღალი იყო\_ დაახლოებით 0,2.

მეორე რეჟიმში ელექტროდები დამაგრებულ იქნა მცოცავი ნიმუშის ზედა წახნაგზე და საყრდენის ძირზე, ე. ი. ამ შემთხვევაში მოდებული ელექტრული ველი ორიენტირებული იყო დაცურების ზედაპირისადმი პერპენდიკულარული მიმართულებით.

300 იმპულსზე მეტი იქნა გამოყენებული 13 ექსპერიმენტალურ ტესტში (24 იმპულსი ერთ ტესტში) საყრდენის ისეთსავე დახრებისათვის, როგორც ეს პირველი რეჟიმის დროს იყო, მაგრამ დაცურების არც ერთი შემთხვევა არ იქნა რეგისტრირებული. დახრის  $a = 28.6^\circ$  კუთხეზეც კი, რომელიც გაცილებით უფრო დიდია, ვიდრე კრიტიკული სიდიდე  $a_c = 25 \pm 2.5^\circ$ , ნიმუში უძრავი რჩებოდა EM EM იმპულსის ზემოქმედების დროს. ეს იმას ნიშნავს, რომ როდესაც ელექტრომაგნიტური იმპულსი გამოიყენება მეორე რეჟიმში, (1.7)-ის თანახმა ის ზრდის ხახუნის ძალას (EM ველი ხელს უშლის დაცურებას).

## სტიკ-სლიპი

ჩვენს სტიკ-სლიპის ექსპერიმენტებში იცვლებოდა შემდეგი პარამეტრები: 1) ზამზარის სიხისტის კოეფიციენტი, 2) განხორციელებული პერიოდული ზემოქმედების სიხშირე, 3) ზემოქმედების ამპლიტუდა, 4) გამოყენებული ელექტრული ველის მიმართულება, 5) ცოცვის სიჩქარე, 6) ნორმალური (ნომინალური) დამაბულობა.

## თეორიული მიმოხილვა

გარკვეულ შემთხვევებში მცირე პერიოდულ იმპულსს შეუძლია მთელი სისტემის რელაქსაციის სინქრონიზირება იმპულსის პერიოდთან, თუკი რომელიმე ძალა რეგულარულად უბიძგებს სისტემას კრიტიკულ მდგომარეობასთან მიახლოებისკენ.

განვიხილოთ რელაქსაციის რაიმე პროცესი, სადაც  $U$ , ინტენსიურობა (ის შეიძლება დაკავშირებული იყოს ძაბვასთან, დამაბულობასთან და სხვა) იზრდება და ნელდება

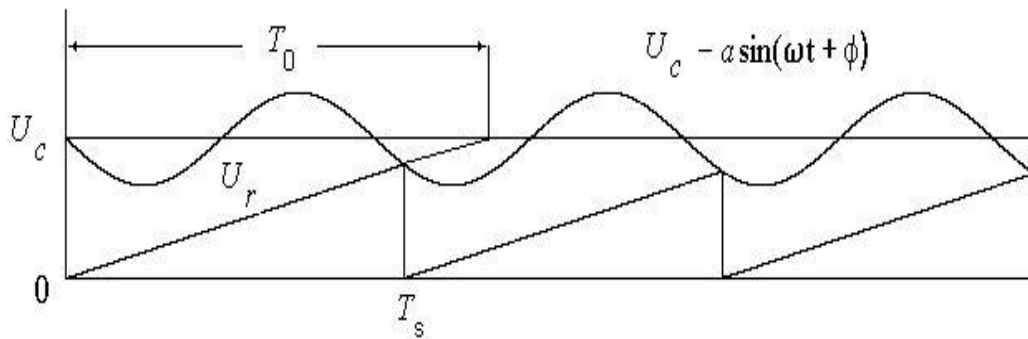
რამე  $U_c$  კრიტიკულ სიდიდეს უახლოვდება; როდესაც  $U_r = U_c$ , ინტენსიურობა მაშინვე თავდაპირველ სიდიდემდე ეცემა. მაშინ, შედარებით მცირე ამპლიტუდის  $U_s$  და ძალიან მცირე ხანგრძლივობის მასინქრონიზებელი იმპულსების გამოყენებამ შეიძლება შეცვალოს კრიტიკულობის პირობა:

$$U_r + U_s = U_c, \quad (7.1)$$

სინუსოიდური იმპულსის შემთხვევაში ეს პირობა ჩაიწერება შემდეგნაირად

$$U_r + a \sin(\omega t + \phi) = U_c \quad (7.2)$$

სადაც  $\omega$ ,  $a$  და  $\phi$  შესაბამისად არის: კუთხური სიხშირე, ფაზა და ამპლიტუდა პერიოდული იმპულსისათვის. ეს ნიშნავს, რომ ინტენსივობის ვარდნები ხდება მაშინ ნახ. 3. 18, როდესაც  $U_r$  სიდიდე გაუტოლდება  $U_c - a \sin(\omega t + \phi)$ . ნაჩვენებია (Blekhman, 1971), რომ სინქრონიზაცია შეიძლება გაჩნდეს იმ ობიექტების სუსტი ურთიერთქმედების დროსაც კი, რომლებსაც მნიშვნელოვნად განსხვავებული დამახასიათებელი სიხშირეები აქვთ, რაც გულისხმობს ობიექტების არაწრფივ ურთიერთქმედებას.



ნახ.7.14. რელაქსაციური პროცესის პერიოდული ზემოქმედებით სინქრონიზაციის სქემა, ბუნებრივი პერიოდი  $T_0$  იცვლება პერიოდით  $T_s$ .

როგორია ის ფიზიკური მექანიზმი, რომელსაც სინქრონიზაციამდე მივყავართ? მექანიკური ზემოქმედების შემთხვევაში სინქრონიზაცია დაკავშირებულია მიკროგაცურებების მექანიკურ გაშვებასთან ისეთ სისტემაში, რომელიც კრიტიკულ მდგომარეობასთან არის მიახლოებული და ამიტომ დამოკიდებულია გარეშე (მცირე) ზემოქმედებებზე.

ელექტრომაგნიტური ველის მიმართულების როლის ახსნა შემდეგნაირად არის შესაძლებელი. ელექტრომაგნიტურ იმპულსთან ჩვენი ადრინდელი ექსპერიმენტების მიხედვით, როდესაც ის მოდებული იქნა დახრილი საყრდენი-მცოცი ბლოკის სისტემისადმი, დაცურების (Slip) ინიცირება ელექტრომაგნიტური იმპულსის საშუალებით ხდება მხოლოდ მაშინ, როდესაც ელექტრომაგნიტური ველი დაცურების ზედაპირის პარალელურად არის მიმართული. როდესაც ველი დაცურების სიბრტყის პერპენდიკულარულია, ზედა ფილა მყარი რჩება ანუ უძრავია დაცურების

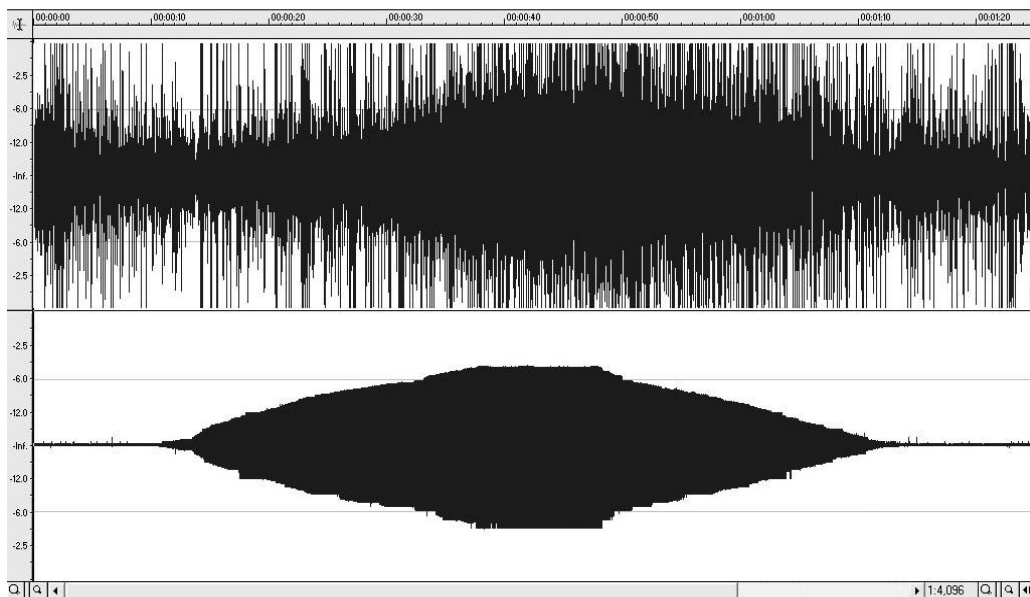
კრიტიკულზე უფრო დიდი კუთხის დროს. ეს ნიშნავს, რომ ბოლო შემთხვევაში ელექტრომაგნიტური ველი `აწებებს` ზედაპირებს და ხელს უშლის დაცურებას (Chelidze et al, 2002).

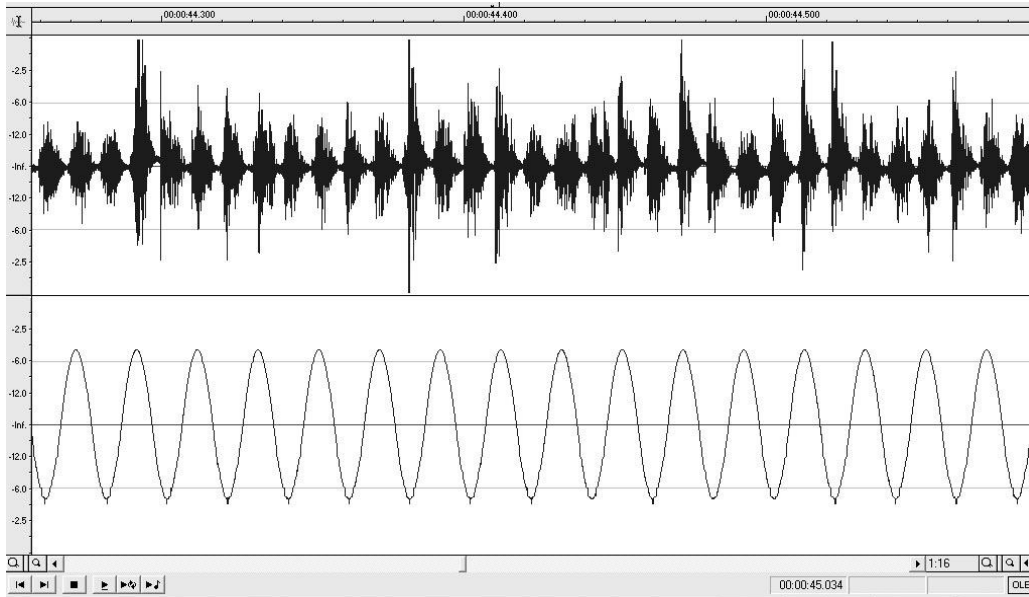
ზოგადად ზამბარა-მცოცი სისტემები ავლენენ არათანაბარი ხახუნის თვისებას მაშინ, როდესაც ცოცვის რომელიმე ფაზის განმავლობაში ხახუნის ძალის შემცირება ხდება; ამ თვისებას ეწოდება სიჩქარული შესუსტება. ჩვენ მიგვაჩნია, რომ განხილულ ექსპერიმენტებში ცოცვის არამყარი რეჟიმი (velocity weakening) ძირითადი გამწევი ძალითაა გამოწვეული, ცოცვის ზედაპირისადმი ნორმალურად მიმართული პერიოდული ელექტრული ძალა მიკროგაცურების სინქრონიზაციას იწვევს იმის გამო, რომ სისტემას ანიჭებს (პერიოდულ) ნეგატიურ უკუკავშირს (მომრავი ფილის დამუხრუწებას), რის გამოც ზამბარაში გროვდება დრეკადი ენერგია, რომელიც საბოლოოდ იწვევს უეცარ წანაცვლებას (slip). გაცურების ზედაპირის პარალელური ელექტრომაგნიტური იმპულსი არ იწვევს სიჩქარული შესუსტების ეფექტს, და შესაბამისად სინქრონიზაციას

### ფაზური სინქრონიზაცია

აქ ჩვენ ვაანალიზებთ ექსპერიმენტს, რომლის დროსაც მოდებული პერიოდული ელექტრომაგნიტური იმპულსის ინტენსივობა მონოტონურად იზრდებოდა ნულიდან 1000 ვოლტამდე, და შემდეგ ასეთნაირადვე მცირდებოდა 1000 ვოლტიდან ნულამდე (ნახ.7.15).

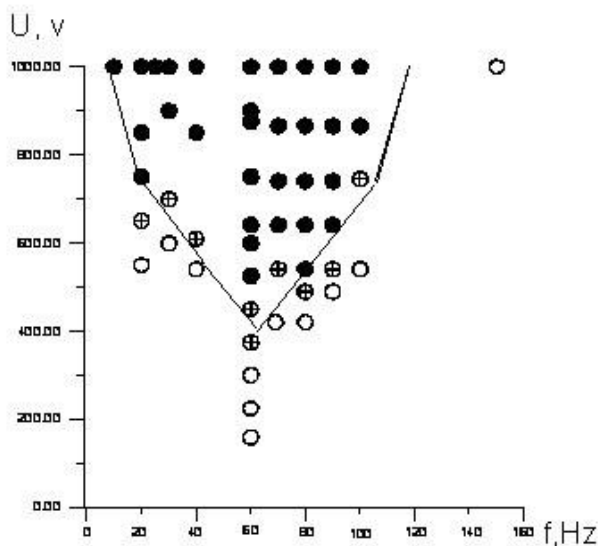
ა.





ნახ.7.15. ა, ბ AE-სიგნალის ჩანაწერი როდესაც ე.მ. იმპულსის ინტენსივობა იზრდება 0-დან 1000 V და პირიქით, ხოლო ქვედა შეესაბამება პერიოდულ ემ ზემოქმედებას ბ), ჩანაწერის შუა ნაწილი გაშლილი სახით.

აკუსტიკური სიგნალის ფაზების შესაფასებლად ყველაზე ადვილი მიდგომის მიზნით ჩვენ მოვახდინეთ wave -ფაილების ტალღის ფორმების გარდასახვა, რათა კარგად გამოვვეთილი პიკები მარკერებად გამოგვეყენებინა. ამ მიზნით, ხმაურის გამოკლების შემდეგ შერჩეულ იქნა აკუსტიკური იმპულსების მაქსიმუმები, ესე იგი ერთი მაქსიმუმი თითოეული იმპულსიდან. ასეთნაირად შედგენილ იქნა კატალოგი, რომელიც შეიცავს აკუსტიკური მაქსიმუმების დროებს და რადგანაც ჩვენი მონაცემები პიკების მიმდევრობად იქნა გარდასახული (შეიცავდა რა მკაფიო მარკერებს), ჩვენ გამოვიყენეთ ფაზათა სხვადასხვაობის განსაზღვრის მარტივი ტექნიკა (Pikovsky, et al., 2003).



ნახ.7.16. სტიკ-სლიპის სინქრონიზირებული ნაწილი (არნოლდის ენა). X-ღერძზე გადაზომილია გამოყენებული სიხშირე, Y ღერძზე მოდებული ძაბვის სიდიდეები. შევსებული წრეწირები შეესაბამება კარგ სინქრონიზაციას, ცარიელი წრეწირები - არასინქრონიზებულ მდგომარეობას, ხოლო ჯვრიანი წრეწირები - გარდამავალ სიტუაციას.

არსებობს ოპტიმალური სიხშირე (ჩვენს ექსპერიმენტში  $60\text{Hz}$ ), რომელზეც მიიღწევა სინქრონიზაცია მინიმალური ზემოქმედებით (აქ  $\sim 400\text{W}$ ). არნოლდის ენის საზღვრებზე სინქრონიზაცია ცვალებადია - სინქრონიზებული ინტერვალები ენაცვლება აფრასინქრონიზებულს. წინასწარი ექსპერიმენტები აჩვენებენ, რომ არნოლდის ენის ადგილმდებარეობა დამოკიდებულია ზამბარა-მცოცი სისტემის ფიზიკურ მახასიებლებზე, როგორცაა, მცოცი ფილის მასა, ზამბარის სიხისტე, ფილების ზედაპირების დამუშავების ხარისხზე და სხვა. მაგალითად, ელექტრომაგნიტური სინქრონიზაციის ეფექტი კარგად დამუშავებული მინის ფილებისათვის (მცოცავი ფილა იწონიდა  $\sim 10\text{g}$ ) დაკვირვებულ იქნა  $10\text{W}$  ინტენსივობის ზემოქმედებისას  $1000\text{Hz}$  სიხშირე.

ამ კვლევის ერთ-ერთი საინტერესო შედეგი ისაა, რომ რათა იპოვო არნოლდის ენის ოპტიმალური მასინქრონიზირებელი სიხშირე აუცილებელია გამოიკვლიო სიხშირეების ფართო დიაპაზონი. მიწისძვრების შემთხვევაში ოპტიმალური მასინქრონიზირებელი ძალა შესაძლოა დაკავშირებული იყოს მიმოქცევის სპექტრის ხანგრძლივ კომპონენტებთან, ნახევარწლიანი და ერთწლიანი პერიოდებით Crossley et al, 1999). ამით შეიძლება აიხსნას ბილერისა და ლოკნერის (2003) უარყოფითი დასკვნა სეისმურობის ძალიან სუსტი კორელაციის შესახებ დედამიწის მიმოქცევებთან ნახევარი დღე-ღამის და დღე-ღამის პერიოდებით.

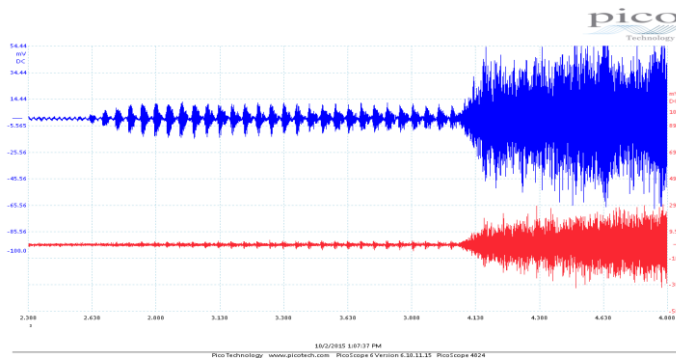
### **7.3 ტრიგერების მოვლენის შესწავლა დახრილ დანადგარებზე მექანიკური ვიბრაციით ზემოქმედების და გაწყლიანების ცვლის პირობებში**

გრავიტაციული ძალის ზეგავლენით ბურიჯ-კნოპოვის და ზამბარა-მცოცის მოდელის სტიკ-სლიპის და ტრიგერების მოვლენების შესასწავლად, აწყობილი იქნა ლაბორატორიული მოწყობილობა სადაც შესაძლებელია სრიალის სიბრტყის დახრის ცვლილება (ნახ.7.17). ეს მოწყობილობა გრავიტაციული ძალების გავლენით მეწყრის სტიკ-სლიპის პროცესის ტრიგერების შესწავლის საშუალებას იძლევა ბაზალტის მოსრიალე ფილებს შორის არსებულ სხვადასხვა პირობებში და მათი სხვადასხვა დახრისას. პროცესის შესასწავლად ხდებოდა სრიალის დროს აღძრული აკუსტიკური ემისიის რეგისტრაცია ბაზალტის მასიურ ფილაზე ზედა და ქვედა წერტილებში დამაგრებული პიეზო სენსორების საშუალებით. ტრიგერების პროცესის შესასწავლად ერთ-ერთ მოსრიალე ფილაზე მიმაგრებული იყო სეისმური ვიბრატორი, რომლის საშუალებითაც კრიტიკული დახრის კუთხეზე ვსაწავლობდით ტრიგერების პროცესს. მოსრიალე ბლოკი ჩერდებოდა რაღაც დროის განმავლობაში

უძრავ ფილაზე, რომელიც დახრილი იყო კრიტიკულზე ოდნავ ნაკლები კუთხით (არ ხდებოა ჩამოსრიალება). მატრიგერირებელი ზემოქმედება ხორციელდებოდა სეისმური ვიბრატორის საშუალებით, რომელიც მიმაგრებული იყო მოძრავ ან უძრავ ფილაზე. სეისმური ვიბრატორები უძრავ ფილაზე ნებისმიერი კონფიგურაციით 8 წერტილში შეგვიძლია მივამაგროთ. ინფორმაციის ჩაწერა ხდებოდა 8-არხიანი ოსცილოსკოპის საშუალებით. ხდებოდა დახრის კუთხის გაზომვა [135,136,162,164].

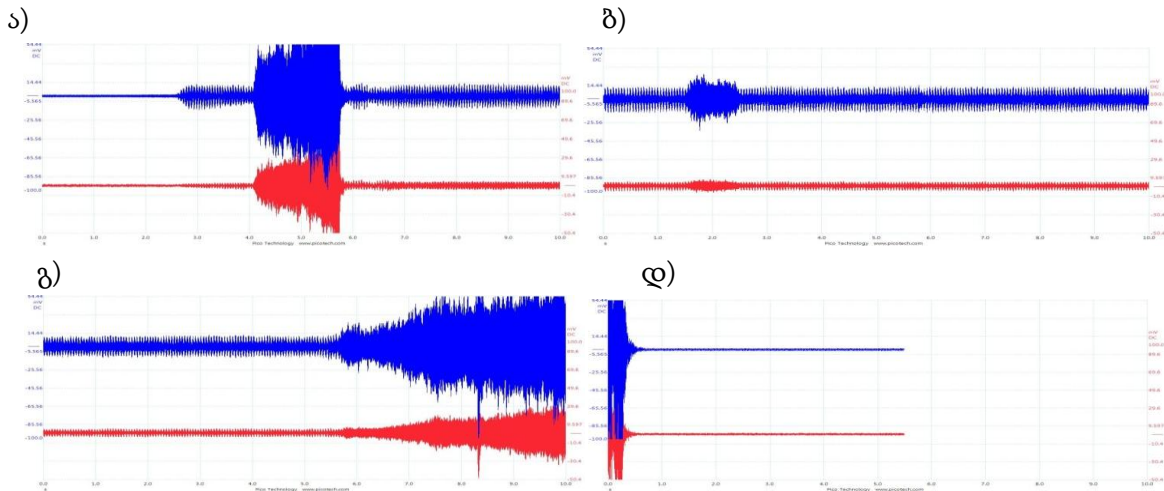


ნახ.7.17. ბურიჯ-კნოპოვის ექსპერიმენტების გრავიტაციული ძალის გავლენის პირობებში. ერთ-ერთ მოსრიალე ფილაზე მიმაგრებულია სეისმური ვიბრატორი.



ნახ.7.18. აკუსტიკური ემისიის ჩანაწერი ტრიგერირების შემთხვევაში დახრილ ლაბორატორიულ მოდელზე

გრავიტაციული ძალის გავლენით, ერთი და სამი ფილით, ჩატარებული ექსპერიმენტების შედეგები წარმოდგენილია ნახ.7.18-ზე. დასრიალების კრიტიკული კუთხე ერთ და სამ ფილიანი მოდელებისათვის განსხვავებულია. კრიტიკულ კუთხესთან ახლოს სტაბილურ მდგომარეობაში დასრიალების ტრიგერირება ხდება სეისმური ვიბრატორის საშუალებით. კერძოდ, სისტემა მიგვყავს და ვტოვებთ კრიტიკული კუთხესთან ახლოს 45 წუთის განმავლობაში. ამის შემდეგ, ფილაზე მიმაგრებულ სეისმურ ვიბრატორზე მოვდებთ 20 ჰც სიხშირის 1,6 ვ ძაბვას. შემდეგ ინფორმაცია იწერება 8-არხიანი ოსცილოსკოპის საშუალებით. როგორც ნახ.7.19-დან ჩანს დროს ექსპერიმენტის განმავლობაში რამდენიმე შუალედური გასრიალება მოხდა. ფილების დაცურების დაწყება გამოწვეულია სეისმური ვიბრატორის ზემოქმედებით. სეისმური ვიბრატორი თამაშობს ტრიგერის როლს სრიალის გამოწვევაში.

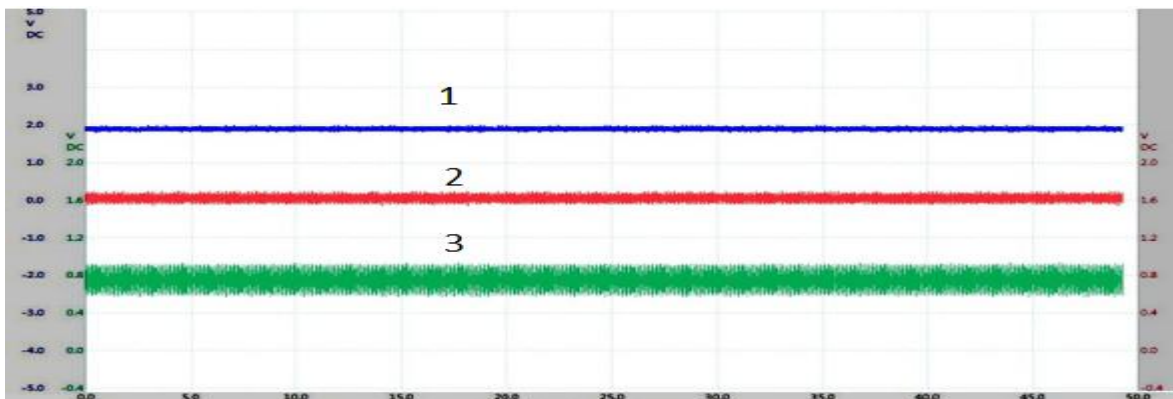


ნახ.7.19. ა) აკუსტიკური ემისიის ჩანაწერი ერთი ფილის მოდელისათვის, ბ), გ), დ) აკუსტიკური ემისიის ჩანაწერი სამფილიანი მოდელისათვის

განვახორციელეთ ექსპერიმენტების ერთი სერია დახრილ ფიქსირებულ დანადგარზე, ტრიგერირების წყაროს (ვიბრატორი) სხვადასხვა პოზიციისათვის. პერიოდული გარე ზემოქმედება მოდებული იყო ფიქსირებულ (უძრავ) ფილაზე. ზემოქმედებას ახდენენ სეისმური ვიბრატორები, რომლებიც მოთავსებულია უძრავი ფილის გარე ზედაპირის 6 სხვადასხვა წერტილში და უკანა ზედაპირის 2 სხვადასხვა წერტილში. ვიბრატორზე მოდებული სიგნალის სიხშირე იცვლებოდა 1, 2, 3, 4, 5 Hz სიდიდით. ვიბრატორზე მოდებული მაქსიმალური ძაბვა იყო ~ 8 V.

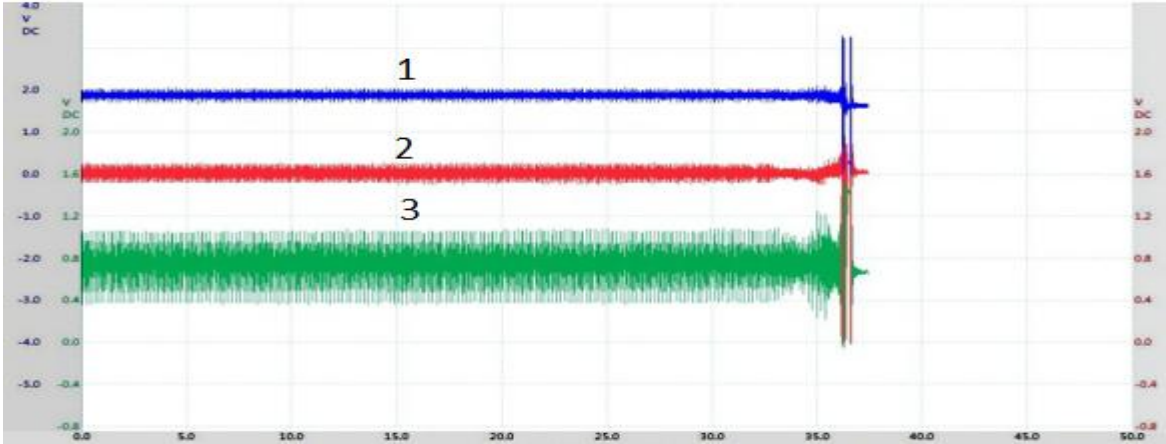
როდესაც სეისმური ვიბრატორი მოდებულია უძრავი ფილის ზედა ზედაპირზე (ფილის დახრის კუთხე 26.65°), მოძრავი ფილა იწყებს სრიალის 5 Hz სიხშირეზე, სეისმური ვიბრატორის ჩართვიდან რამდენიმე (1-2) წუთის შემდეგ. რაც უფრო დიდხანს არის უძრავ მდგომარეობაში ზედა ფილა, მით უფრო დიდი ხნის განმავლობაში არის საჭირო სეისმური ვიბრატორის ზემოქმედება მის დასასრიალებლად. როდესაც სეისმური ვიბრატორი მოსრიალე ფილიდან საკმაოდ შორს არის მოთავსებული, ტრიგერირების პერიოდი მკვეთრად მატულობს (5-10 წუთი). როდესაც სეისმური ვიბრატორი მიმაგრებულია უძრავი ფილის უკანა ზედაპირზე, რამდენიმე ათეული წუთიც არაა საკმარისი სრიალის ტრიგერირებისათვის.

a.





b.

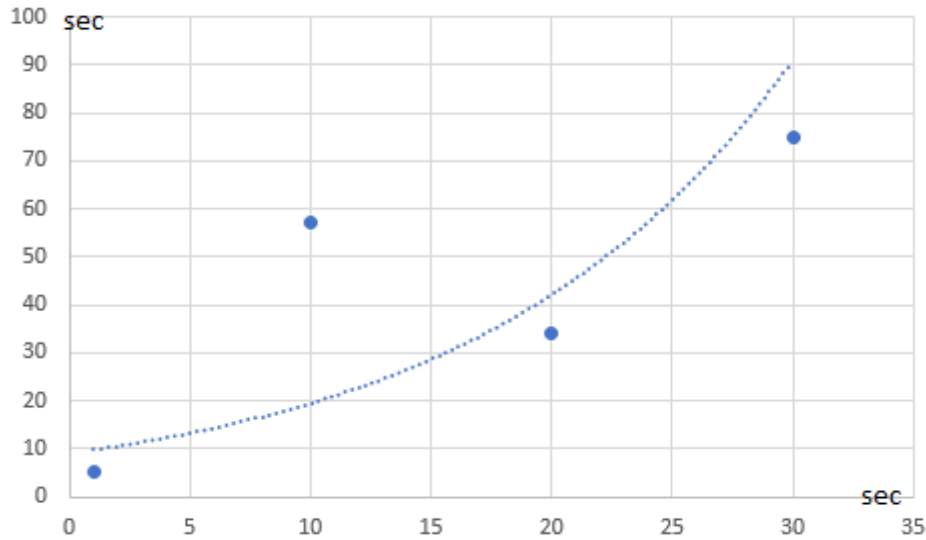


ნახ.7.20. აქსელერომეტრის 3 კომპონენტის ჩანაწერი (1 - მოძრაობის გასწვრივ, 2 – მოძრაობის პერპენდკულარულად, 3 – ვერტიკალური მდგენელი): a) სეისმური ვიბრატორი მოთავსებულია უძრავი ფილის უკანა ზედაპირზე (სრიალი არ გვაქვს), b) სეისმური ვიბრატორი მოთავსებულია უძრავი ფილის ზედა ზედაპირზე.

ჩვენ ასევე აღმოვაჩინეთ, რომ გარემოს (ოთახის)  $h$  ტენიანობის და შესაბამისად მოსრიალე ზედაპირების ტენიანობის ცვლილება, ცვლის სრიალის კრიტიკულ კუთხეს  $26.65^\circ$ -დან  $h \approx 28\%$  ტენიანობი დროს  $28.90^\circ$ -მდე  $h \approx 35\%$  ტენიანობის შემთხვევაში. ექსპერიმენტების შედეგები ფუნდამენტურად იგივე იყო, მაგრამ მნიშვნელოვნად შეიცვალა (გაიზარდა) სრიალის კრიტიკული კუთხე, შეიძლება წყლის ფენის დამატებითი ზედაპირული დაჭიმულობის გამო.

ნახ.7.20 გვიჩვენებს, რომ როდესაც ვიბრატორი მიმაგრებულია უძრავი ფილის ზედა და უკანა ზედაპირზე, მოსრიალე ფილაზე მიმაგრებული აქსელერომეტრი გვიჩვენებს სრიალის ინიცირებისათვის საჭირო შემფოთების სხვადასხვა ამპლიტუდას. როგორც ჩანს, ძლიერი შემფოთება მიმართა ზედა ზედაპირზე, იწვევს მოცურების და იგივე გავლენა, მიმართა უკანა ზედაპირზე არ იწვევს გამოიწვია. როგორც ვხედავთ, ზედა ზედაპირზე მოდებული ძლიერი შემფოთება იწვევს სრიალს, ხოლო უკანა ზედაპირზე მოდებული იგივენაირი ზემოქმედება არ იწვევს ტრიგერირებას.

და ბოლოს, ჩვენ ჩავატარეთ ექსპერიმენტების სერია  $28.90^\circ$  კუთხით (კრიტიკული დახრის კუთხესთან ახლოს) დახრილ უძრავ ფილაზე, სხვადასხვა ექსპოზიციის (პარკირების) დროისათვის (1, 10, 20, 30 წუთი). ექსპერიმენტების შედეგები (ნახ.7.21) გვიჩვენებს, რომ მოსრიალე ფილის ექსპოზიცია დროს ზრდა იწვევს ტრიგერირების დროის ზრდას, თუმცა ეფექტი არ არის კარგად გამოხატული. მომავალი ექსპერიმენტები, უფრო დიდი ექსპოზიციის დროით, აუცილებელია საიმედო შედეგების მისაღებად.



ნახ.7.21. უძრავი ფილის ლოდინის დროის (ჰორიზონტული ღერძი) შედარება ტრიგერირების (ვიბრაციის) ხანგრძლივობასთან, რომელიც აუცილებელია სრიალის ინიცირებისათვის (ვერტიკალური ღერძი). ექსპოზიციის ოთხი სხვადასხვა დრო. წყვეტილი მრუდი არის ექსპონენციალური ტრენდლაინი.

გარდა ამისა, აუცილებელია ისეთი ფაქტორების სისტემატური გავლენის შესწავლა, როგორებიცაა ტენიანობა, სრიალის ზედაპირის პირობები, ტრიგერირების სიგნალის ამპლიტუდა და ა.შ., რათა მივიღოთ მეწყრის მექანიკური ვიბრაციებით გააქტიურების მეტნაკლებად სრული სურათი.

ამ სამუშაოში ჩვენ ექსპერიმენტულად შევისწავლეთ ზამბარა-ბლოკის და ბურიჯ-კნოპოვის სტიკ-სლიპის დინამიკა ჰორიზონტალურ და დახრილ უძრავ ფილებზე. ჩვენ ვიკვლევდით არასტაბილურობების სრიალის თანმხლები აჩქარებების და აკუსტიკური ემისიის ჩაწერის საშუალებით. გარდა ამისა, ჩვენ ვახდენდით გარე პერიოდულ მექანიკურ დატვირთვას სეისმური ვიბრატორების საშუალებით, რომლებიც მიმაგრებული იყო უძრავ ფილაზე რამდენიმე ადგილას ცალკე ან ერთობლივად, რათა შეგვესწავლა ზემოქმედების გავლენა მოსრიალე ფილის მოძრაობაზე. მეწყრის მარტივ მოდელში ტრიგერირების ეფექტი დამოკიდებულია ზამბარის სიხისტეზე, დახრის კუთხეზე, ვიბრატორების რაოდენობაზე და ლოკაციაზე, ტრიგერირების სიგნალის ამპლიტუდაზე სრიალის ზედაპირის ტენიანობაზე. რაც უფრო დიდი მანძილია ვიბრატორსა და მოსრიალე ფილას შორის, მით უფრო მეტი დროა საჭირო ტრიგერირებისათვის. სეისმური ვიბრატორის უძრავი ფილის უკანა ზედაპირზე მოთავსების შემთხვევაში ტრიგერირებას საერთოს არა აქვს ადგილი. მოსრიალე ფილის უძრაობის დროის ზრდასთან ერთად იზრდება ტრიგერირების დრო. ვფიქრობთ, რომ სეისმური ვიბრატორის ზედა ზედაპირზე დამაგრების შემთხვევაში აღიძვრება ინტენსიური ზედაპირული ტალღები, რომელიც (როგორც მიწისძვრის შემთხვევაში) იწვევენ მოსრიალე ფილის შემფოთებას და ტრიგერირებას (სრიალს). სეისმური

ვიბრატორის უძრავი ფილის უკანა ზედაპირზე დამაგრების შემთხვევაში, მოსრიალე ფირფიტამდე შეშფოთებები მცირე ამპლიტუდით აღწევს და მათ არ შეუძლიათ გამოიწვიონ სრიალი. ჩვენ ვაჩვენებთ ასევე, რომ ტრიგერირების ეფექტი ასევე დამოკიდებულია მოსრიალე ფილაზე, ვიბრაციის ზემოქმედების მოდებამდე, ექსპოზიციის (პარკირების) დროზე: ეს ტესტი ახდენს მეწყრის გააქტიურების იმიტაციას სეისმური ტალღებით.

იმისათვის, რომ უკეთესად შევისწავლოთ ტრიგერირების ფიზიკური მექანიზმი ჩვენ გვჭირდება ტრიგერირების უფრო ძლიერი წყარო და ცდების განხორციელება სხვადასხვა ექსპერიმენტულ პირობებში.

### 7.4 მათემატიკური და რიცხვითი მოდელირება

სეისმური და ცოცვის (მეწყრული) პროცესის თანამედროვე კონცეფცია ძირითადად ეყრდნობა ხახუნის არასტაბილურობის მოდელს. ერთ-ერთ ასეთ ხახუნის ძალას, რომელშიც გათვალისწინებულია გადადგილების სიჩქარე და მგომარეობის პარამეტრები და აღწერს როგორც პერიოდულ და ასევე აპერიოდულ რხევებს, წარმოადგენს დიტრიბ-რუინას ხახუნის ძალა. დიტრიბ-რუინას განტოლება აღწერს მრავალი ექსპერიმენტიდან მიღებულ სრიალის თითქმის ყველა ძირითად მახასიათებლებს: იგი გვიჩვენებს, რომ ხახუნის ძალა არ არის მუდმივი და განიცდის რთულ ევოლუცია სრიალის პროცესის განმავლობაში.

$$\tau = \sigma_n [\mu_0 + a \ln \left( \frac{V}{V_0} \right) + b \ln(V\theta/D_0)] \quad (7.3)$$

$$d\theta/dt = 1 - \left( \frac{V\theta}{D_0} \right) \quad (7.4)$$

აქ  $\mu_0$  ხახუნის კოეფიციენტი,  $V$  და  $V_0$  საწყისი და მიმდინარე გაწევის სიჩქარეები,  $\theta$  მდგომარეობის მახასიათებელი ცვლადი,  $D_0$  სრიალის კრიტიკული მანძილი,  $a$  და  $b$  მუდმივებია.

პროცესის თვისებრივი ანალიზისათვის,  $\left| \frac{\theta V}{D_0} \right| \gg 1$  დაშვების პირობებში, სისტემის მოძრაობის განტოლება შეიძლება დავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\sigma_0 \left( \mu_0 + a \ln \dot{x} + b \ln \theta_0 - \frac{b}{D_0} x \right) = -kx + kx_0, \quad (7.5)$$

სადაც  $x$  არის წანაცვლება,  $x_0$  ზამბარის წაგრძელება,  $k$  ზამბარის სიხისტე.

შემდეგი საწყისი პირობებით  $x = 0$  და  $\dot{x} = \dot{x}_0$   $t=0$ -თვის, (7.5) განტოლების ინტეგრებით ვღებულობთ:

$$\dot{x} = \left[ \frac{1}{\dot{x}_0} - \frac{Ht}{a} \right]^{-1} \quad \text{სადაც } H = -\frac{k}{\sigma_0} + \frac{b}{D_0} \quad (7.6)$$

განტოლება (7.6)-დან გამომდინარეობს, რომ სრიალის სიჩქარე უეცრად იზრდება  $t_f = \frac{a}{H} \left( \frac{1}{x_0} \right)$  დროისათვის სრიალის სიჩქარე უეცრად იზრდება. ეს დრო ( $t_f$ ) არის სისტემის დესტაბილიზირების (მეწყრის დასრიალების) დრო.

გაკეთდა ასევე ბურიჯ-კნოპოვის ლაბორატორიული ექსპერიმენტის რიცხვითი მოდელი. ბურიჯ-კნოპოვის მოდელი შეიძლება ასევე აღიწეროს მოძრაობის ნორმალიზებული განტოლების საშუალებით:

$$\dot{x}_i = (vt - x_i) + l^2(x_{i+1} + x_{i-1} - 2x_i) - \phi(x_i), \quad (7.7)$$

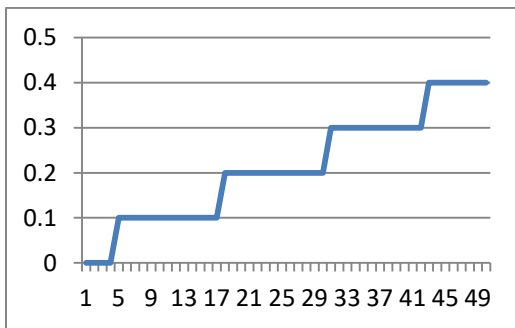
სადაც  $l = \sqrt{\frac{k_c}{k_p}}$ , უგანზომილები სიხისტის პარამეტრია,  $x_i, t, v$  და  $\phi(x_i)$

ნორმალიზებული უგანზომილებო სიდიდეებია. იმისათვის რათა მოდელში ჩანდეს დინამიკური არამდგრადობა, მნიშვნელოვანია რათა ხახუნის ძალას ჰქონდეს ხახუნის შემცირების ხასიათი, ე.ი. ბლოკის გასრიალებისას ხახუნი უნდა შემცირდეს. ხახუნის ძალის უმარტივესი ფორმის სახით ჩვენ აქ წარმოვადგენთ კარლსონის მიერ გამოყენებულ ფორმას:

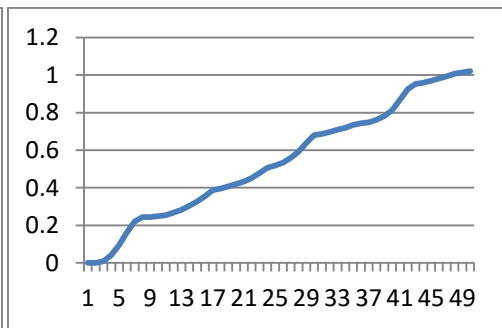
$$\phi(x_i) = \frac{1-\sigma}{1+\frac{2\alpha x_i}{1-\sigma}} \quad (7.8)$$

$l = \sqrt{60}$ ,  $a=1$ ,  $\sigma = 0.01$  და  $\alpha = 4$  მნიშვნელობებისათვის ჩატარებული რიცხვითი ექსპერიმენტებით, ერთფილიანი და ოთხფილიანი მოდელებისათვის, მიღებული შედეგები წარმოდგენილია ნახ. 7.22-ზე.

ა)



ბ)



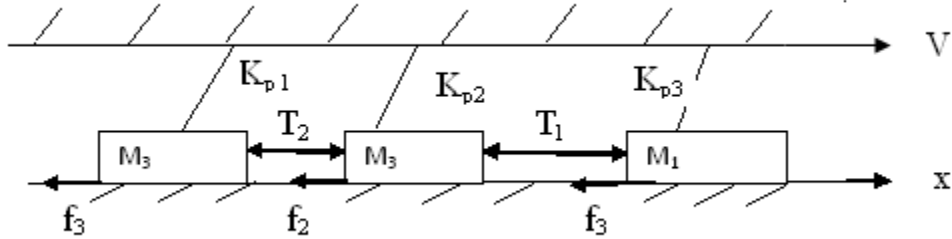
ნახ.7.22. ა) ერთბლოკიანი ბურიჯ-კნოპოვის რიცხვითი მოდელით გამოთვლილი გადაადგილების გრაფიკი (აბსცისაზე - დრო, ორდინატაზე - გადაადგილება), ბ) იგივე გამოთვლები ჩატარებული ოთხფილიანი ბურიჯ-კნოპოვის მოდელისათვის

მოდელი იძლევა საშუალებას ვცვალოთ მოსრიალე ფილების რაოდენობა, გაწევის სიჩქარე, ზამბარების სიხისტე. მოდელირების შედეგები დამოკიდებულია ყველა წარმოდგენილ პარამეტრზე. მოსრიალე ბლოკების რაოდენობის ზრდასთან ერთად იცვლება იცვლება სტიკ-სლიპის სურათი, რაც საკმაოდ კარგ თანხვედრაშია ექსპერიმენტების შედეგებთან.

**სტიკ-სლიპის მარტივი რიცხვითი მოდელი  
სამი მყარი ბლოკის შემთხვევაში**

**ამოცანის დასმა**

სამი მყარი ბლოკისაგან შემდგარი სისტემის „სტიკ-სლიპის“ მოძრაობის რიცხვითი მოდელირებისათვის, გამოვიყენოთ ბურიჯ-კნოპოვის მოდელი [1]. მოდელი სქემატურად ნაჩვენებია ნახ. 7.23.



ნახ 7.23. სამი ბლოკის სისტემის სტიკ-სლიპის მოძრაობის სქემა.

ნახ. 1-დან ჩანს, რომ ზედა ფილა მოძრაობს მუდმივი  $W$  სიჩქარით. ის დაკავშირებულია  $M_1$ ,  $M_2$  და  $M_3$  ბლოკებთან დრეკადობის  $R_1$ ,  $R_2$  და  $R_3$  -ძალების საშუალებით.  $K_{p1}$ ,  $K_{p2}$  და  $K_{p3}$  დრეკადობის მუდმივებია; ბლოკები ურთიერთქმედებენ ერთმანეთთან და ქვეფენილ ფილასთან დრეკადობის  $T_1$ ,  $T_2$  და ხახუნის  $F_1$ ,  $F_2$  და  $F_3$  ძალებით, შესაბამისად. მაშინ „სტიკ-სლიპის“ მოძრაობის განტოლებები სამი ბლოკის შემთხვევაში ჩაიწერება შემდეგი სახით

$$\begin{aligned}
 M_1 \frac{d^2 x_1}{d t^2} &= R_1 - T_1 - F_1, \\
 M_2 \frac{d^2 x_2}{d t^2} &= R_2 + T_1 - T_2 - F_2, \\
 M_3 \frac{d^2 x_3}{d t^2} &= R_3 + T_2 - F_3
 \end{aligned}
 \tag{7.9}$$

აქ  $t$  დროა;  $x_1$ ,  $x_2$  და  $x_3$   $M_1$ ,  $M_2$  და  $M_3$  ბლოკების მასათა ცენტრების წანაცვლებებია, Sesaba, isad/ დრეკადობის და ხახუნის ძალები თანახმად შეიძლება გამოისახოს შემდეგი სახით:  $R_1 = (W - \tau - x_1)$ ,  $R_2 = K_{p2}(W - \tau - x_2)$  და  $R_3 = K_{p3}(W - \tau - x_3)$ ;  $T_1 = K_{c,12}(x_1 - x_2)$  და  $T_2 = K_{c,23}(x_2 - x_3)$ .

(1) განტოლებათა სისტემიდან ვღებულობთ

$$\begin{aligned}\frac{d^2x_1}{dt^2} &= (W \tau x_1) \frac{K_{p,1}}{M_1} - \frac{K_{c,1,2}}{M_1} (x_1 - x_2) - \frac{F_1}{M_1}, \\ \frac{d^2x_2}{dt^2} &= (W \tau x_2) \frac{K_{p,2}}{M_2} + \frac{K_{c,1,2}}{M_1} (x_1 - x_2) - \frac{K_{c,2,3}}{M_2} (x_2 - x_3) - \frac{F_2}{M_2}, \\ \frac{d^2x_3}{dt^2} &= (W \tau x_3) \frac{K_{p,3}}{M_3} + \frac{K_{c,2,3}}{M_{31}} (x_1 - x_2) - \frac{F_3}{M_3}.\end{aligned}\quad (7.10)$$

დავუშვათ, რომ  $M_1 = M_2 = M_3 = M$ ,  $K_{p,1} = K_{p,2} = K_{p,3} = K_p$ ,  $K_{c,1,2} = K_{c,2,3} = K_c$ ,  $F_1 = F_2 = F_3 = F$  და გავყოთ განტოლების ორივე მხარე  $K_p/M$  მივიღებთ

$$\begin{aligned}\frac{d^2x_1}{dt^2} &= (Vt x_1) - L^2(x_1 - x_2) - f(x_1) \\ \frac{d^2x_2}{dt^2} &= (Vt x_2) + L^2(x_1 - x_2) - L^2(x_2 - x_3) - f(x_2) \\ \frac{d^2x_3}{dt^2} &= (Vt x_3) + L^2(x_2 - x_3) - f(x_3)\end{aligned}\quad (7.11)$$

სადაც  $t = \tau(M/K_p)^{1/2}$  არის განუზომადი დრო,  $V = t(M/K_p)^{1/2}$  სიჩქარის ანალოგი,  $f = F/K_p$ ,  $L^2 = K_c/K_p$ ,  $f(x_i) = F/K_p$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

ნორმალიზებული განტოლებათა სისტემა მიღებული იყო [1]. ხახუნის ძალის ანალოგის სიდიდე [1]-ის თანახმად გამოსახება შემდეგი ფორმულით  $f(x_i) = (1 - \sigma)/(1 + 2\alpha(dx_i/dt))/(1 - \sigma)$ . სადაც  $\sigma$  ცნობილი მუდმივი პარამეტრია.

მე-(3) განტოლებათა სისტემის ამოსახსნელად გამოიყენება შემდეგი პირობები  $x_i(0) = 0$ ;  $dx_i(t)/dt \geq 0$  (7.12)

ამრიგად ამოცანა მდგომარეობს (7.11) განტოლებათა სისტემის ამოხსნაში (7.12) საწყის პირობებში. აღებულია  $j = 0, 1, \dots, J$  რიცხვითი ბადა  $\Delta t$  დროითი ბიჯით. რიცხვით ბადაზე (3) განტოლებათა სისტემა აპროქსირებული შემდეგი სქემით:

$$\begin{aligned}\frac{Y_1^{j+1} - Y_1^j}{\Delta t} &= V(j+1/2) \Delta t - (L^2 + 1) x_1^j + L^2 x_2^j - (1 - f_0)/(1 + 2\alpha Y_1^j)/(1 - \sigma) \\ \frac{Y_2^{j+1} - Y_2^j}{\Delta t} &= V(j+1/2) \Delta t + L^2 x_1^{1+j} - (2L^2 + 1) x_2^j + L^2 x_3^j - (1 - f_0)/(1 + 2\alpha Y_2^j)/(1 - \sigma) \\ \frac{Y_3^{j+1} - Y_3^j}{\Delta t} &= V(j+1/2) \Delta t + L^2 x_2^{j+1} - (L^2 + 1) x_3^j - (1 - f_0)/(1 + 2\alpha Y_3^j)/(1 - \sigma) \\ x_i^0 &= 0, \quad Y_i^{j+1} = 0 \quad \text{if } Y_i^{j+1} < 0, \quad (i = 1, 2, 3) \\ \frac{x_1^{j+1} - x_1^j}{\Delta t} &= 0.5(Y_1^{j+1} + Y_1^j), \quad \frac{x_2^{j+1} - x_2^j}{\Delta t} = 0.5(Y_2^{j+1} + Y_2^j), \quad \frac{x_3^{j+1} - x_3^j}{\Delta t} = 0.5(Y_3^{j+1} + Y_3^j),\end{aligned}\quad (7.13)$$

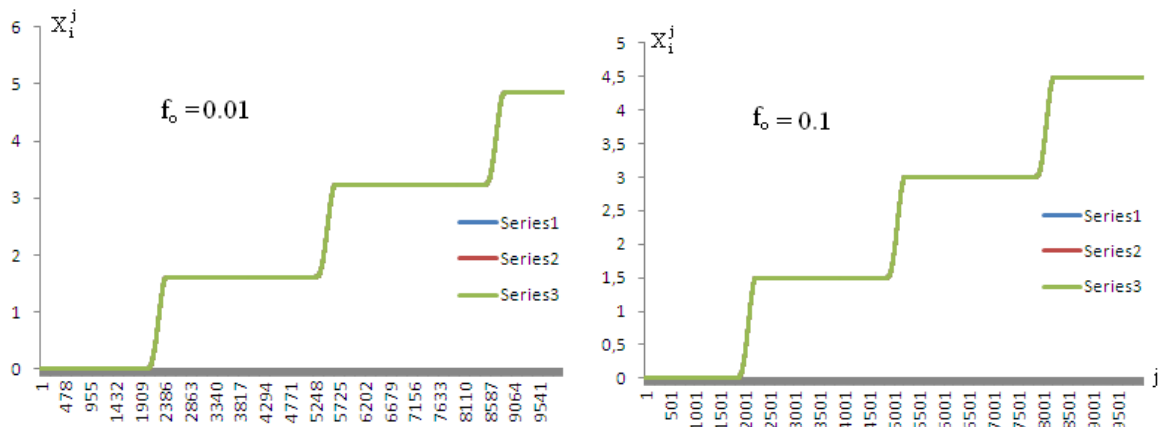
სადაც  $Y_i^j = (dx_i/dt)^j < 0$ ,  $(i = 1, 2, 3)$  არის წანაცვლებათა სიჩქარეები.

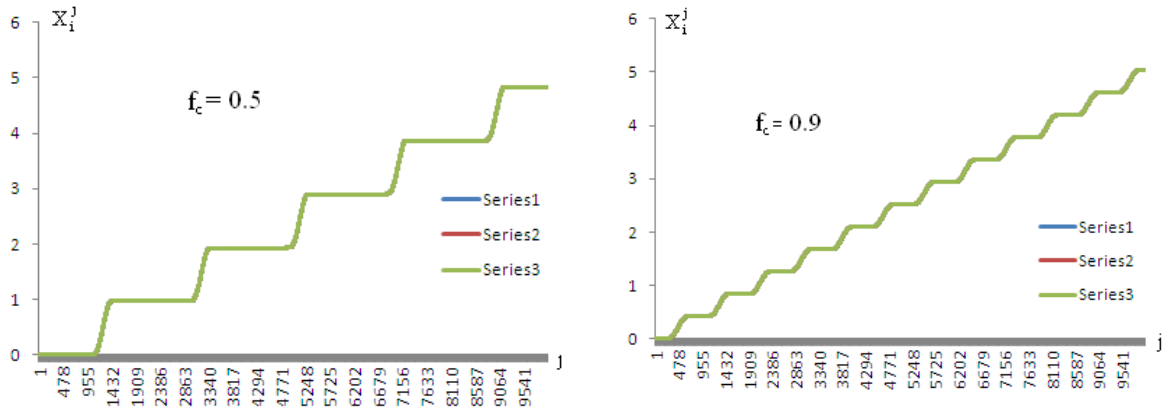
## 1. მოდელირების შედეგები

7.13 ალგებრული განტოლებათა სისტემის საშუალებით ჩატარებული იქნა რიცხვითი ექსპერიმენტები ამოცანაში. ექსპერიმენტის მიზანი იყო გამოვეყვლია სტიკ-სლიპის პროცესის დამოკიდებულება ბლოკებზე მოქმედი ძალებისაგან. ამისათვის გამოთვლები ტარდებოდა პარამეტრების სხვადასხვა დასაშვები მნიშვნელობებისათვის.

ექსპერიმენტი 1. შეისწავლება სტიკ-სლიპის დამოკიდებულება ხახუნის ძალაზე. ექსპერიმენტი ჩატარებულია მოდელის პარამეტრების შემდეგი მუდმივი მნიშვნელობებისათვის:  $V = 0.5$ ,  $\Delta t = 0.01$ ,  $\alpha = 2$ ,  $L^2 = 1$ . ხახუნის მახასიათებელი განუზომადი პარამეტრი იცვლება ინტერვალში  $0 \leq f_0 < 1$ . ხახუნის ძალა პროპორციულია  $(1 - f_0)$ . გამოთვლებით მიღებული შედეგები მოცემულია ნახ.1-ზე. ნახაზიდან ჩანს, რომ მუდმივი ძალის მოქმედებაფილებზე იწვევს სისტემის სტიკ-სლიპის მოძრაობას, რომლის თითოეული ბლოკი წაინაცვლებს ერთმანეთის ტოლი სიდიდით და ისინი მოძრაობენ, როგორც ერთიანი სისტემა. უძრაობის პერიოდების ხანგრძლივობა დამოკიდებულია ხახუნის ძალაზე. როცა  $f_0 = 0.01$  მაშინ პირველი წაცოცება ხდება დაახლოებით 1900 დროითი ბიჯის შემდეგ, ხოლო შემდგომი წაცოცებები კი დაახლოებით ყოველი 2300 დროითი ბიჯის შემდეგ. ხახუნის ძალის შემცირებას თან სდევს უძრაობის პერიოდების შემცირება და წაცოცება, უძრაობის მდგომარეობათა სიხშირის გაზრდა. ყველა რიცხვით ექსპერიმენტში პირველი წაცოცების დროითი პერიოდები აღემატება მომდევნო პერიოდებს, როცა პარამეტრი  $f_0$  უახლოვდება 1-ს, სტიკ-სლიპის სიხშირეები იზრდებიან სწრაფად და სისტემა მიისწრაფის წრფივი თანაბარი მოძრაობისაკენ.

რაც შეეხება ჯამურ წანაცვლებას მოდელირებული 10 000 ბიჯის განმავლობაში, არ განიცდის დიდ ვარიაციას და ის დაახლოებით 4.5 – 5 შორის არის.

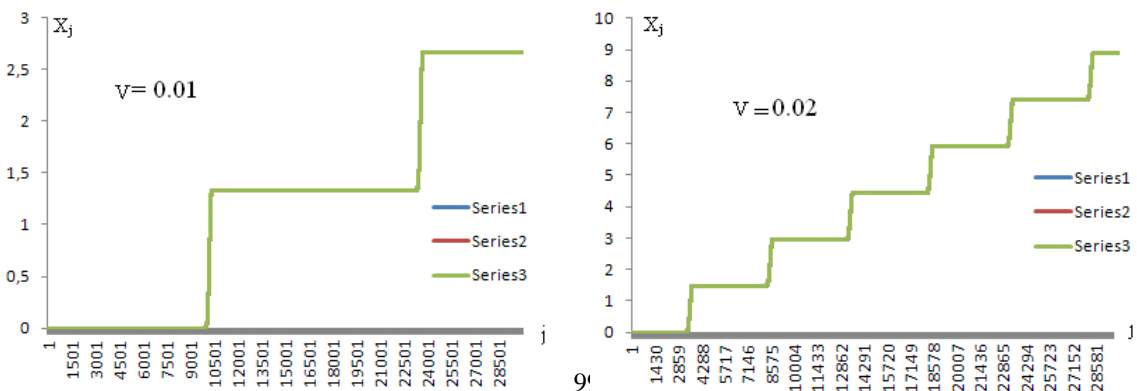




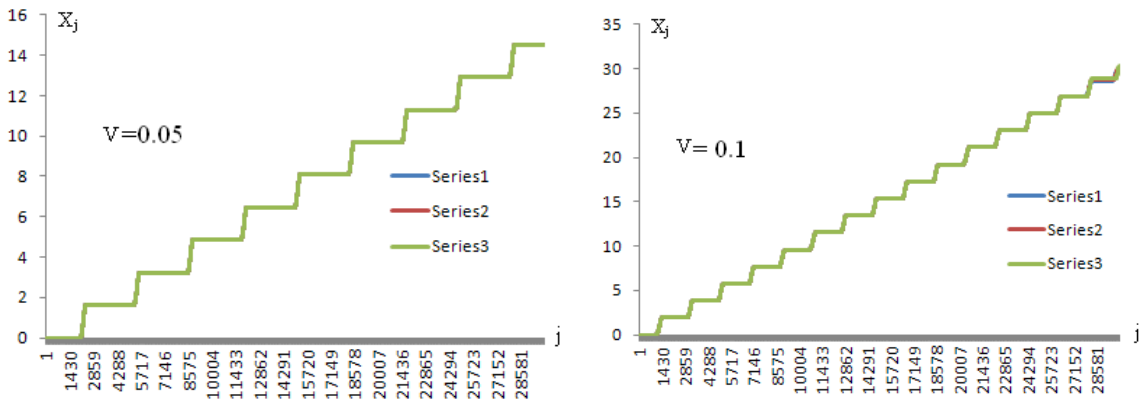
ნახ.7.24. ფილების წანაცვლების  $X_i^j$  დამოკიდებულება ხახუნის ძალის მახასიათებელ განუზომად პარამეტრზე  $f_c$ , როცა  $V=0.5$ ,  $\Delta t=0.01$ ,  $\alpha=2$ ,  $L^2=1$ .

**ექსპერიმენტი 2.** გაანალიზებულია სტიკ-სლიპის მოძრაობის დამოკიდებულება ზედა ფილის სიჩქარისაგან. ნახაზიდან ჩანს, რომ ზედა ფილის მოძრაობის სიჩქარის ზრდასთან ერთად მცირდება უძრავ მდგომარეობაში ყოფნის პერიოდები. როცა  $V = 0.01$ , მაშინ უძრავობის ხანგრძლივობა პირველი და შემდგომი წაცოცებების დაწყებამდე ტოლია დაახლოებით 10000j და 12000 j, შესაბამისად. ხოლო როდესაც  $V = 0.02$ ,  $0.05$  და  $0.1$  ეს პერიოდები ტოლია 3000 j, 1500 j, 1000 j და 5600 j, 3000 j და 2000 j, შესაბამისად. ზედა ფილის გადაადგილების სიჩქარის ზრდასთან ერთად მცირდება ბლოკების, როგორც ერთიანი სისტემის წაცოცების სიდიდეები: როცა  $V = 0.01, 0.02, 0.05$  და  $0.1$  მაშინ  $x_i=1.8, 1.5, 1.0$  და  $0.4$ .

მეორე ეფექტი, რომელიც დაკავშირებულია რომელიც დაკავშირებულია ფილაქნის მოძრაობის სიჩქარესთან არის ბლოკების მოძრაობის აჩქარების შემცირება. თუ  $V = 0.1$ - ის შემთხვევაში ბლოკების წაცოცება ხდება მკვეთრად დიდი სიჩქარით,  $V$ -ს ზრდასთან ერთად ისინი ხდებიან ნაკლებად მკვეთრი და ბლოკების გადაადგილება კი - სულ უფრო და უფრო შენელებული.







ნახ.7.25. ბლოკების წანაცვლების  $X_j^i$  დამოკიდებულება ფილის მოძრაობის სიჩქარეზე, როცა  $f_0 = 0.05$ ,  $\Delta t = 0.01$ ,  $\alpha = 2$ ,  $L^2 = 1$ .

### 7.5 ზამზარა-მცოცის მოდელში პერიოდული ზემოქმედების მნიშვნელობის შეფასება

**აბსტრაქტი.** სტატიაში შეისწავლებოდა სუსტი პერიოდული გარეშე ზემოქმედების პირობებში ზამზარა-ბლოკის ლაბორატორიული სისტემის სრიალის რეჟიმების ხასიათი. ჩვენს ექსპერიმენტებში სრიალის მოვლენის რეგისტრირება ხდება აკუსტიკური იმპულსებით, რომლებიც გენერირდება მოსრიალე ფილის გადაადგილებისას. გარდა გამწევი ძალისა ზედა ფილაზე მოდებულია სუსტი ცვლადი მექანიკური დატვირთვა.

დამატებითა ზემოქმედებამ, რომელიც შეიძლება გაცილებით ნაკლები იყოს მთავარ მამოძრავებელ ძალაზე, შეიძლება გამოიწვიოს სტიკ-სლიპის პროცესის ტრიგერირება და სინქრონიზაცია. გარეშე ზემოქმედების ზრდასთან ერთად დაიკვირვება სტიკ-სლიპის პროცესის დროს გენერირებული აკუსტიკური იმპულსების პირველი შემოსვლების ფაზური სინქრონიზაციის ზრდა. წარმოდგენილ ნაშრომში ჩვენი მიზანია ვაჩვენოთ, რომ სეისმური ვიბრატორის ზემოქმედებით გამოწვეული ძალის სიდიდე ბევრად მცირეა ფილის გამწევი ძალის სიდიდესთან შედარებით. გამოყენებული იქნა სეისმური ვიბრატორის ზემოქმედების ძალის პირდაპირი გამოთვლის მეთოდი. ასევე, ვიბრატორის ზემოქმედებით პიეზოგადამწოდზე წარმოებული აკუსტიკური წნევის საშუალებით ძალის გამოთვლის მეთოდი და ქანქარას საშუალებით ფილაზე ვიბრატორის ზემოქმედების შედარებითი ანალიზის მეთოდი.

## შესავალი

დამატებითი მექანიკური ან ელექტრომაგნიტური ზემოქმედება, რომელიც შეიძლება გაცილებით ნაკლები იყოს მთავარ მამოძრავებელ ძალაზე, სტიკ-სლიპის პროცესის დროს შეიძლება გამოიწვიოს ტრიგერირება და სინქრონიზაცია, რაც იმას ნიშნავს, რომ ეს მოვლენები დაკავშირებულია ობიექტების არაწრფივ ურთიერთქმედებასთან, კერძოდ, კრიტიკულ მდგომარეობასთან ახლოს მდგომი სისტემების არასტაბილურობის ინიცირებასთან [1, 2, 3, 4]. ადრე ანალოგიური სამუშაოები ძირითადად განიხილავდა გარეზე ზემოქმედების (ფორსინგის) ეფექტს ხახუნის კოეფიციენტზე [5].

ტრიგერირების და სინქრონიზაციის ეფექტის გაგება შეიძლება კონტროლირებადი ექსპერიმენტების საშუალებით. განვახორციელებთ ლაბორატორიული ექსპერიმენტები ზამბარა-ბლოკის სისტემაზე, გამწევი ძალაზე ბევრად სუსტი პერიოდული ფორსინგის პირობებში. ზემოთ აღწერილ ექსპერიმენტში შესწავლილი იქნა სუსტი მექანიკური ტანგენციალური და ნორმალური ფორსინგის ეფექტი სტიკ-სლიპის დინამიკაზე [6].

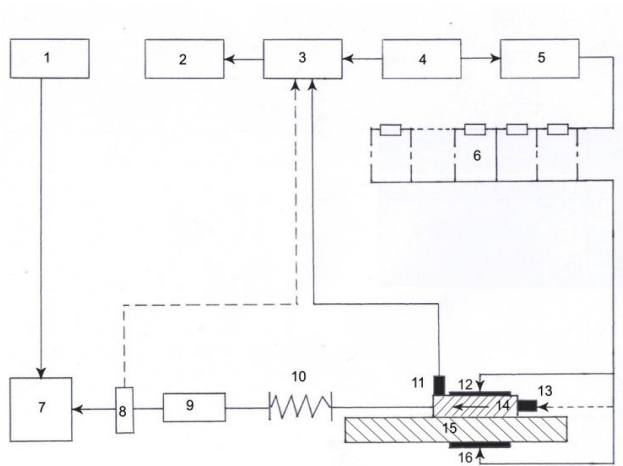
### 7.5.1. საექსპერიმენტო დანადგარი

ჩვენ შევისწავლეთ არამდგრადობების (მექანიკური) ტრიგერირება და სინქრონიზაცია ზამბარა-ბლოკის ექსპერიმენტულ სისტემაზე, მოვლენის თანმხლები აკუსტიკური ემისიის ჩაწერის საშუალებით [1, 2, 8, 9].

ექსპერიმენტული დანადგარი წარმოადგენს ორი ჰორიზონტალურად ორიენტირებული უხეშად დამუშავებული ბაზალტის ფირფიტების სისტემას (ნახ. 3). მუდმივი, 4 ნიუტონის რიგის, გამწევი ძალა მოდებულია ზედა (მოსრიალე) ფილაზე; გარდა ამისა, სისტემაზე მოდებული იყო სხვადასხვა ამპლიტუდის სუსტი პერიოდული შემფოთება. მექანიკური ფორსინგი განხორციელდა "CB-5" და "CB-20" სეისმური ვიბრატორების საშუალებით, შესაბამისად ნორმალურად და ტანგენციალურად მიმართული ზემოქმედებისათვის. მექანიკური ვიბრაცია ინტენსივობა რეგულირდებოდა ვიბრატორზე მოდებული ძაბვის საშუალებით.

ზამბარა-ბლოკის მოდელში სრიალის დინამიკა დამოკიდებულია ზამბარის  $K$  სიხისტეზე და გაწევის  $V$  სიჩქარეზე (Boettcher და Marone, 2004). დაბალი სიჩქარეზე ეს პროცესი რელაქსაციური ხასიათისაა, შუალედური სიჩქარეზე პერიოდულია და მაღალ სიჩქარეზე შედარებით სტაბილურია, შემთხვევითი გადახრებით.

ჩვენ შევისწავლეთ არამდგრადობების (მექანიკური) ტრიგერირება და სინქრონიზაცია, ექსპერიმენტული ზამბარა-ბლოკის სისტემაზე, აკუსტიკური ემისიის ჩაწერის საშუალებით; უძრავი და მოძრავი ბაზალტის ფილები იყო დახერხილი და უხეშად დამუშავებული. ზედაპირზე შვერილების სიმაღლეები იყო 0.1-0.2 მმ არეში.



ნახ.7.26. ექსპერიმენტული ზამზარა-მცოცის მოდელის სქემატური წარმოდგენა: 1 - სტაბილიზირებული კვების ბლოკი, 2 - კომპიუტერი, 3 - გამამლიერებელი, 4 - ფორსინგის სიგნალის გენერატორი, 5 - ძაბვის გენერატორი, 6 - ძაბვის გამყოფი, 7 - გამწვევი მოწყობილობა, 8 - ტენსომეტრი, 9 - დინამომეტრი, 10 - ზამზარა, 11 - პიეზოელექტრული მიმღები, 12 - ელექტროდი, 13 - ვიბრატორი, 14 - მოსრიალე ბლოკი, 15 - ფიქსირებული ბლოკი, 16 - ელექტროდი.

ჩვენი კონკრეტული ამოცანებიდან გამომდინარე ექსპერიმენტები ჩატარდა, გარე ზემოქმედების (ფორსინგის) ზედაპირის პარალელურად (ტანგენციალური ფორსინგი) მოდების პირობებში.

ტანგენციალურად მოდებული ზემოქმედების პირობებში ჩვენ გამოვთვალეთ მექანიკური ფორსინგის მაქსიმალური მნიშვნელობა, რომელიც შეესაბამება მექანიკურ ვიბრატორზე მოდებულ მაქსიმალურ ძაბვას (ე.ი. როდესაც ვიბრატორზე მოდებულია 6 ვ ძაბვა). სეისმურ ვიბრატორს აქვს მუშა ელემენტი (მასა)  $m \approx 10$ გ, რომელიც

ოსცილირებს და ოსცილირების საკუთარი სიხშირე  $f = \sqrt{\frac{k}{m}} = 20$  ჰც, სადაც  $k$  არის

ვიბრატორის ზამზარის სიხისტე. გამოსახულებიდან ჩვენ მივიღებთ  $k = 400$  მ = 4 N/m.

მოდებულ მაქსიმალურ ძაბვაზე (6ვ) მერხევი ელემენტის მაქსიმალური გადახრა

$x_{max} \approx 10^{-3}$  m, შესაბამისად ფორსინგის მაქსიმალური მნიშვნელობა არის:

$$F_{max} = kx_{max} \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ N} \quad (7.14)$$

რადგანაც ფორსინგი პერიოდულია, მისი მისი მიმდინარე მნიშვნელობა არის:

$F = F_{max} \cos(2\pi\omega t)$ . ვიბრატორის ძალის ცვლილების მაქსიმალური სიჩქარე:

$$\left(\frac{dF}{dt}\right)_{max} = 2\pi\omega F_{max} \approx 0,75 \text{ N/s} \quad (7.15)$$

ხახუნის (გამწვევი) ძალა არის  $F_{fr} = Kl$ , სადაც  $K$  არის გამწვევი ზამზარის სიხისტე და  $l$

არის ზამზარის წაგრძელება. ჩვენს ექსპერიმენტებში გამწვევი ძალის ცვლილების

სიჩქარე იყო  $\frac{dF_{fr}}{dt} = (Kl)' = Kv$  სადაც  $v$  არის გაწევის სიჩქარე. ჩვენს ექსპერიმენტებში

$$v \approx 0,9 \text{ mm/s}, K \approx 250 \text{ N/m}, \text{ i.e. } \frac{dF_{fr}}{dt} \approx 0,22 \text{ N/s}.$$

პერიოდული (ვიბრატორის) ძალის სიჩქარის ფარდობა გამწევი ძალის სიჩქარესთან არის:

$$\frac{dF_{fr}/dt}{(dF/dt)_{\max}} \approx 0,3 \quad (7.16)$$

ფორსინგის სიჩქარე მეტია გაწევის ძალის სიჩქარეზე, ამგვარად სინქრონიზაცია შესაძლებელია [10].

### 7.5.2. ბგერის წნევის ტესტი

ხმის წნევა ან აკუსტიკური წნევა არის, ბგერითი ტალღებით გამოწვეული, ადგილობრივი წნევის გადახრა გარემოს (საშუალო, ან წონასწორობა) ატმოსფერული წნევიდან. ბგერის წნევის დონე (SPL) ან ბგერის დონე არის ეფექტური ბგერის წნევის ლოგარითმული საზომი ბგერისა ეტალონულ მნიშვნელობასთან შედარებით. ის იზომება დეციბელებში (dB) სტანდარტული ეტალონური დონის ზემოთ.

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{rms}^2}{P_{ref}^2} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right) \quad (7.17)$$

სადაც  $P_{ref}$  არის ეტალონური ბგერის წნევა და  $P_{rms}$  არის გაზომილი ბგერის წნევის საშუალო კვადრატული გადახრა.

ჩვეულებრივად გამოიყენება ეტალონური ბგერის წნევა  $P_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$ .

იმის გათვალისწინებით, რომ:

$$L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{P_{rms}}{20 \mu\text{Pa}} \right) \quad (7.18)$$

მივიღებთ:

$$P_{rms} = 10^{\frac{L_p}{20}} \cdot 20 \mu\text{Pa} \quad (7.19)$$

ძალა შეიძლება გამოვთვალოთ, როგორც:

$$F = P_{rms} S \quad (7.20)$$

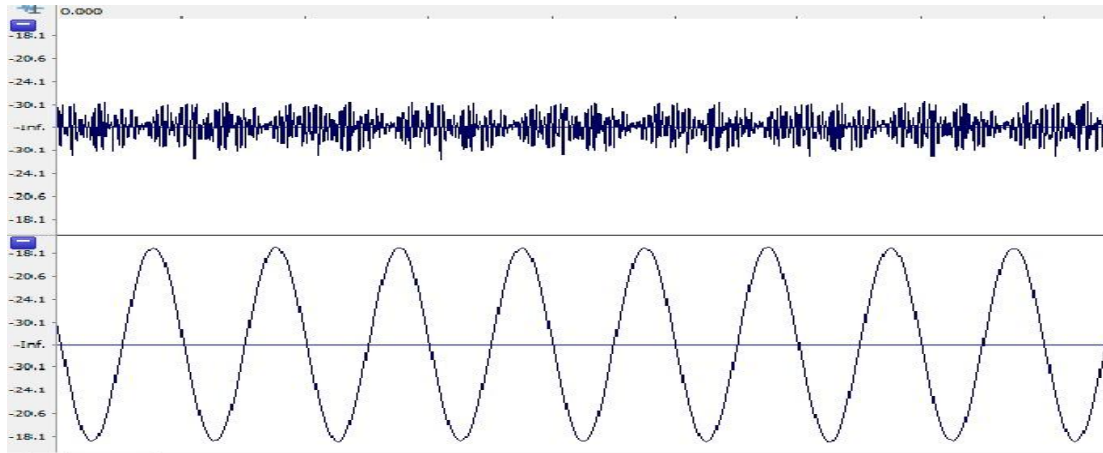
ნახ.2-ზე წარმოდგენილია პიეზო სენსორის საშუალებით ხმაურის ჩანაწერი და ვიბრატორის ფორსინგის ჩანაწერი. ვიბრატორი მოთავსებული იყო მოსრიალე ფილაზე (ნახ.4) და მოდებული იყო 2.5 ვ ძაბვა. როგორც ნახ.3-დან ჩანს პიეზო სენსორზე რეგისტრირებული ხმაურის სიდიდე დაახლოებით არის  $L_p = -30 \text{ dB}$ . ამ მონაცემებზე დაყრდნობით შეიძლება გამოვთვალოთ წნევი  $P_{rms}$  :

$$P_{rms} = 10^{\frac{L_p}{20}} \cdot 20 \mu\text{Pa} = 10^{\frac{-30}{20}} \cdot 20 \mu\text{Pa} \approx \frac{1}{15} \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \quad (7.21)$$

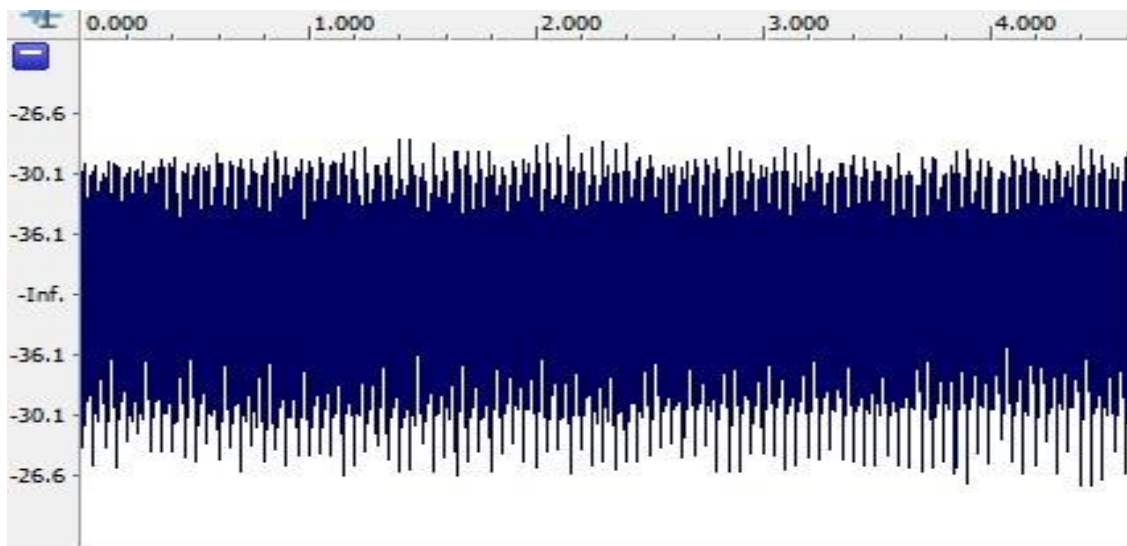
შესაბამისად გამოითვლება ძალა:

$$F = P_{rms} S \approx \frac{1}{15} \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \approx 10^{-8} \text{ N} \quad (7.22)$$

ამ გამოთვლებზე დაყრდნობით, ზედა ფილაზე ვიბრატორის ფორსინგის ეფექტი ძალიან სუსტია ( $10^{-8}N$ ) და ბევრად მცირეა გამწევ ძალასთან შედარებით, რომელიც არის დაახლოებით  $4N$ . კიდევ უფრო ნაკლები ფორსინგი არის მოდებული მოძრაობის მიმართულებით, რადგანაც ზედა ფილა ამ მიმართულებით რამდენჯერმე მცირეა ვიდრე ვერტიკალური მიმართულებით (ნახ.7.27).



ნახ.7.27. სეისმურ ვიბრატორზე მოდებული ძაბვის ჩანაწერი (ქვედა არხი) და პიეზიელექტრული გადამწოდის მიერ რეგისტრირებული ხმაური (ზედა არხი). Y-ღერძი გვიჩვენებს ინტენსივობის dB, X- ღერძი არის დრო (ფორსინგის პერიოდი არის 50 ms), y-ღერძი აკუსტიკური სიგნალის ინტენსივობა dB.

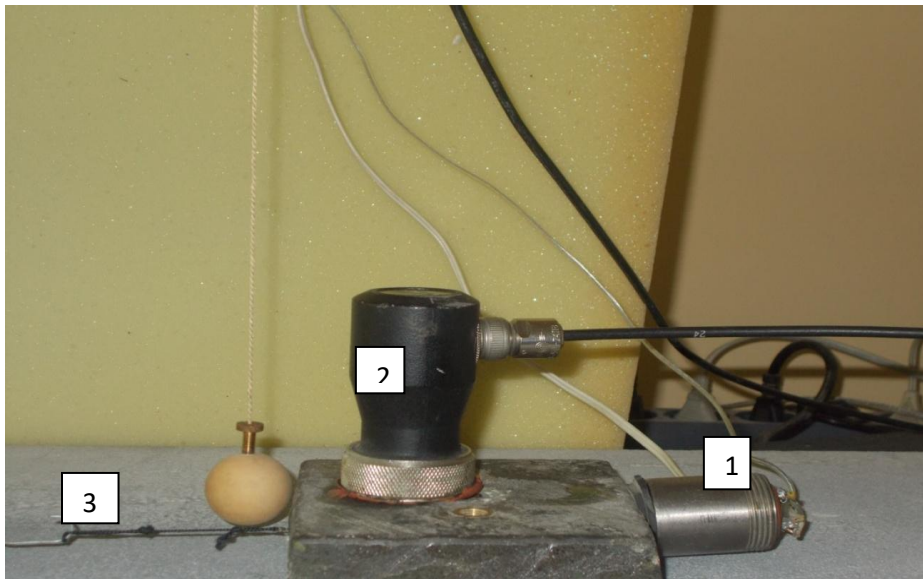


ნახ.7.28. ხმაურის გაფართოებული ჩანაწერი პიეზო სენსორზე სეისმური ვიბრატორის ზემოქმედების პირობებში, რომელზეც 2.5 V ძაბვაა მოდებული. Y- ღერძი გვიჩვენებს ინტენსივობის dB, X- ღერძი დრო წამებში, Y-ღერძი აკუსტიკური სიგნალის ინტენსივობის dB.

### 7.5.3. კალიბრება ქანქარით

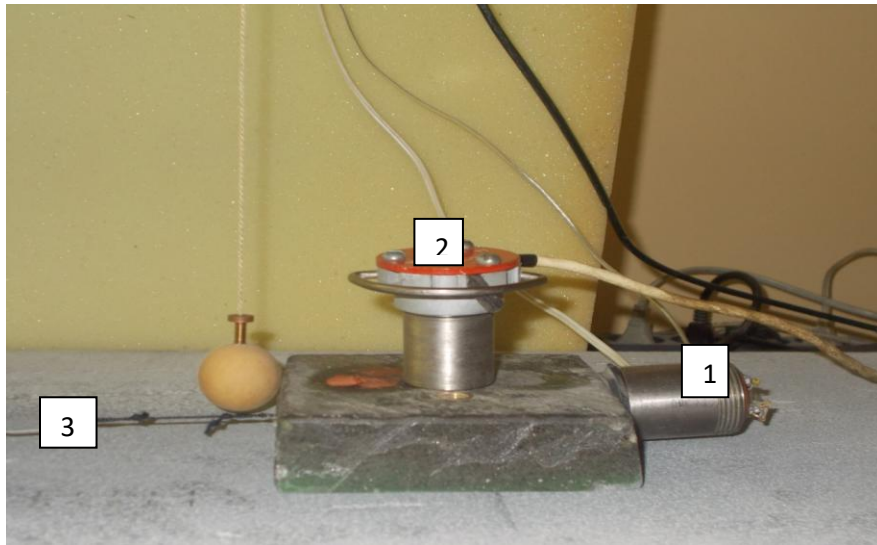
ზედა (მოძრავ) ფილაზე მოდებული სეისმური ვიბრატორის ფორსინგის ამპლიტუდის დასადგენად ჩატარდა შემდეგი ექსპერიმენტი. შეფასდა ზედა (მოძრავ) ფილასთან ქანქარას შეჯახების შედეგად წარმოებული ზემოქმედება. ქანქარას მასა  $m \approx 15$  გ, ქანქარას სიგრძე  $l \approx 50$  სმ. ნახ.3-ზე და ნახ.4-ზე წარმოდგენილია ექსპერიმენტები, როდესაც სიგნალის რეგისტრაცია წარმოებდა პიეზო სენსორით (ნახ.3) და სეისმური სენსორით (ნახ.4). ქანქარას შეჯახება ზედა დისკოსთან წარმოებდა სხვადასხვა დისტანციებზე: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 და 8 სმ. ჩვენი მიზანია, რომ გამოვთვალოთ ძალა რომლითაც ქანქარა მოქმედებს ფილაზე შეჯახების დროს. ამ ძალა სიდიდე იქნება სხვადასხვა შეჯახების სხვადასხვა დისტანციების დროს. აუცილებელია განხორციელდეს შემდეგი გაანგარიშებები:

1. საწყისი პოზიციიდან სხვადასხვა გადახრების დროს რა სიძალეს აღწევს ქანქარა
2. შესაბამისი პოტენციური ენერგია
3. ქანქარას სიჩქარე ფილასთან შეჯახების მომენტში
4. ზემოქმედების მომენტის სიდიდე (იმპულსი) რომელსაც ქანქარა გადასცემს ფილას (სრული იმპულსის დაახლოებით ნახევარი)
5. ბოლოს, შეჯახების ხანგრძლივობის ცოდნის შემთხვევაში, შესაძლებელია ძალის გამოთვლა



ნახ.7.29. სეისმური ვიბრატორი (1), რომელზეც მოდებულია 2.5 ვ ძაბვა, მიმაგრებულია მოსრიალე ფილაზე. აკუსტიკური სიგნალის რეგისტრირება ხდება პიეზოსენსორით (2). აკუსტიკური სიგნალის კალიბრება ხდება ქანქარას გამოყენებით (3).

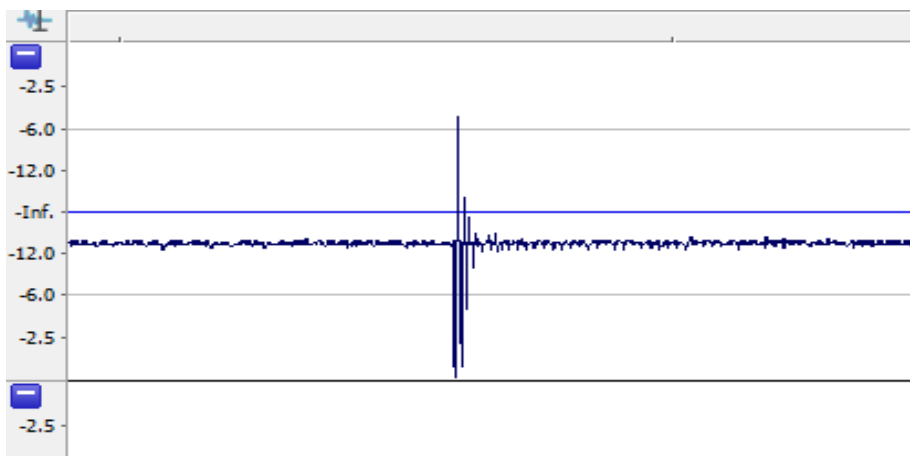




ნახ.7.30. სეისმური ვიბრატორი (1), რომელზეც მოდებულია 2.5 ვ ძაბვა, მიმაგრებულია მოსრიალე ფილაზე. აკუსტიკური სიგნალის რეგისტრირება ხდება სეისმური ვიბრატორით (2). აკუსტიკური სიგნალის კალიბრება ხდება ქანქარას გამოყენებით (3).

ნახ.7.31-ზე ნაჩვენებია USB ოსცილოსკოპის საშუალებით გაკეთებული ჩანაწერი, როდესაც ქანქარა გადახრილია 5 სანტიმეტრით. სეისმურ ვიბრატორზე მოდებულია 2.5 ვ ძაბვა. 5 სმ გადახრის დროს ქანქარა ადის  $h \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ მ}$  სიმაღლეზე, შესაბამისი პოტენციალური ენერგია  $E_p = mgh$ . ქანქარას სიჩქარე ფილასთან შეჯახებისას  $v = \sqrt{2gh} \approx 0.3 \text{ მ/წმ}$ , ქანქარას მიერ ფილისათვის გადაცემული იმპულსი  $p \approx 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ კგ. მ/წმ}$ .

ნახ.7.31-ს ანალიზიდან ვასკვნით, რომ ზამზარა-ფილის ურთიერთქმედების ხანგრძლივობა  $t \approx 0.025 \text{ წმ}$ . შესაბამისად, ზემოქმედების ძალა არის:  $F = \frac{p}{t} \approx 8 \cdot 10^{-2} \text{ ნ}$



ნახ.7.31. სეისმური სენსორის საშუალებით 5 სანტიმეტრზე გადახრილი ქანქარას ფილასთან შეჯახების დროს გენერირებული აკუსტიკური სიგნალის გაფართოებული ჩანაწერი, y-ღერძი გვიჩვენებს აკუსტიკური სიგნალის ინტენსივობას dB, x-ღერძი დრო.

ცხრილი 1. ქანქარის გადახრების და ფილაზე შესაბამის ფორსინგის მნიშვნელობების გრადაცია

გადახრასმ	1	2	3	4	5	6	7	8
სიმაღლე, მ	$2 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$18 \cdot 10^{-4}$	$32 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$12,8 \cdot 10^{-3}$
ქანქარის ფორსინგი, ნ	$2 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$11 \cdot 10^{-2}$	$13 \cdot 10^{-2}$	$15 \cdot 10^{-2}$

როგორც ნახ.7.31-დან ჩანს ქანქარას ფილასთან შეჯახების შედეგად აღძრული სიგნალი მკაფიოდ არის ჩაწერილი შესაბამის არხზე. ნაჩვენებია 5 სმ-ით გადახრილი ქანქარას შეჯახების შედეგად აღძრული იმპულსი. სეისმური ვიბრატორი ცოტა უფრო შორსაა ქანქარას შეჯახების წერტილიდან ვიდრე პიეზო სენსორი. პიეზოელექტრულ სენსორზე ქანქარას ფილასთან შეჯახებით აღძრული სიგნალი ბევრად უფრო ძლიერია, ვიდრე სეისმური ვიბრატორის ეფექტი. ქანქარას ზემოქმედების ამპლიტუდა დაახლოებით 50-ჯერ აღემატება ვიბრატორის ეფექტს. შეიძლება ითქვას, რომ სეისმური ვიბრატორის ფილაზე ზემოქმედების ძალა ბევრად ნაკლებია, ვიდრე ქანქარას ზემოქმედების ძალა - დაახლოებით  $10^{-3}$  ნ. სხვადასხვა მეთოდი გვაძლევს სხვადასხვა თანაფარდობას ფორსინგსა და გამწევი ძალას შორის  $10^{-3}$  და  $10^{-8}$  მდე. შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ მოძრავ ფილაზე ფორსინგის ძალის ინტენსივობა რამდენიმე რიგით ნაკლებია გამწევი ძალის ინტენსივობაზე.



## თავი 8. მეწყრების გეოფიზიკური კვლევები. საველე სამუშაოები

პროექტით გათვალისწინებულია მეწყრების გეოფიზიკური კვლევები. გეოფიზიკაში მეწყრების კვლევის დროს ერთ-ერთი მიღებული და საიმედო მეთოდია ელექტროსადიებო კვლევისათვის ჩვენ გამოვიყენეთ პროექტის პირველი ეტაპზე კაპიტალური ხარჯით შეძენილი ხელსაწყო **Earth Resistivity Meter 16GL-N** (ნახ.1 ა). ეს აპარატურა მუშაობს ვერტიკალური ელექტრული ზონდირების (VES) პრინციპით. ვერტიკალური ელექტრული ზონდირება გვიჩვენებს მიწისქვეშა ფენების განაწილებას ელექტრული წინააღობის მიხედვით და გვაძლევს საშუალებას დავადგინოთ ლითოლოგიური ჭრილი.

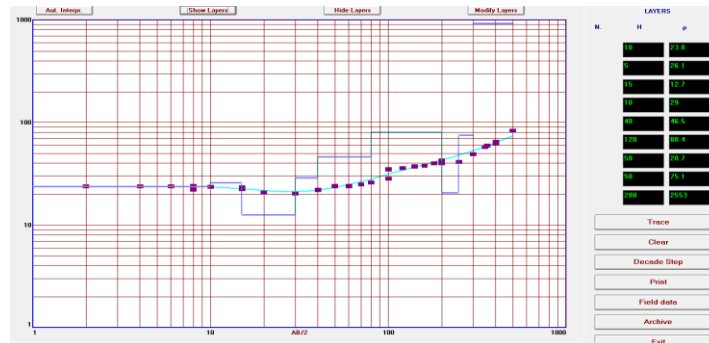
ა



ბ



გ)

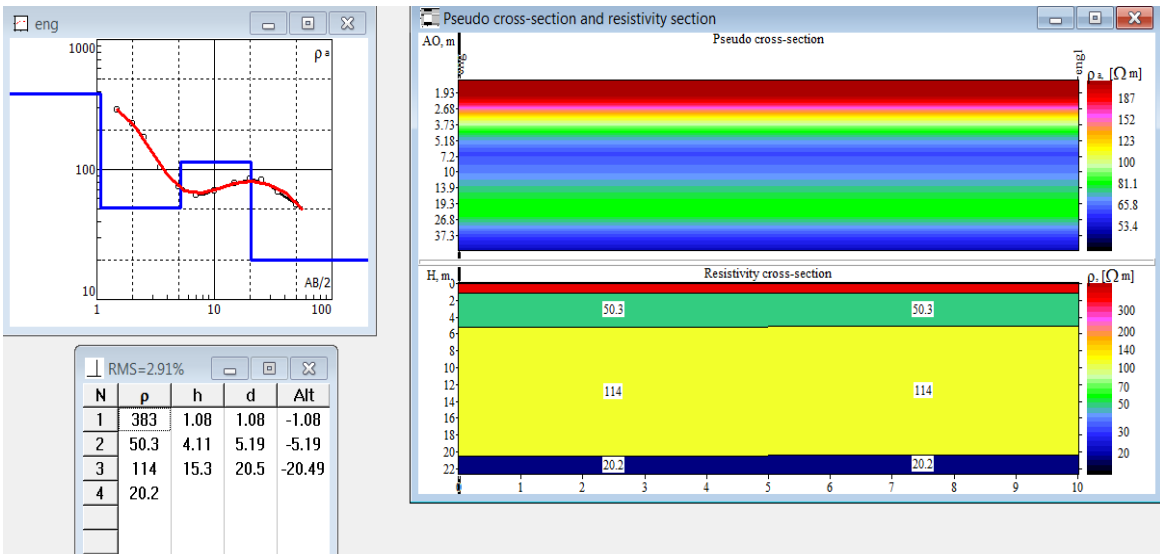


ნახ.8.1. ელექტროსადიებო აპარატურა (**Earth Resistivity Meter 16GL-N**) მეწყრის საველე კვლევებისათვის, ა) და ბ) გაზომვები მუხათგვერდის საავტომობილო გზის მიმდებარე მეწყერზე, გ) გაზომვის შედეგების დამუშავება ელექტროსადიებო აპარატურის სტანდარტული პროგრამით

### 8.1 ხოკოს მეწყრის კვლევა ვერტიკალური ელექტრული ზონდირების (ვეზ) და ბუნებრივი ველის მეთოდით

საანგარიშო პერიოდში ჩატარდა კომპლექსური გეოფიზიკური კვლევები ენგურის წყალსაცავთან მდებარე ხოკოს მეწყერზე. ჩვენ, ელექტროსადიებო აპარატურით (**Earth**

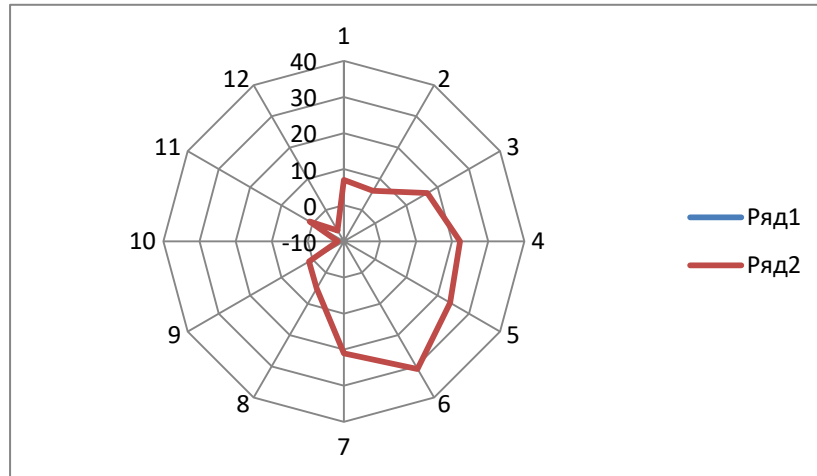
**Resistivity Meter 16GL-N**) მონაწილეობა მივიღეთ აღნიშნულ სამუშაოებში. ნახაზზე (ნახ.2) წარმოდგენილია აღნიშნული სამუშაოების მიმდინარეობა და მეწყრის ერთ-ერთ წერტილში სამელექტროდიანი მეთოდით გაზომილი ვერტიკალური ელექტრული ზონდირების შედეგები. გრაფიკიდან ჩანს, რომ სიღრმის ზრდასთან ერთად მცირდება წარმოსახვითი წინაღობა, იზრდება ფენების გაწყლიანება. მიღებული შედეგები გვამღევეს საშუალებას დავასკვნათ, რომ მეწყრული პროცესები ვითარდება ლოკალურ არეებში. პროცესში მონაწილე ფენების სისქე დიდი არაა (დაახლოებით 5-10 მეტრი). პროცესი აქტიურდება პერიოდულად, წვიმების პერიოდში.



ნახ.8.2. ხოკოს მეწყრზე მიმდინარე სამუშაოები და მეწყრის ერთ-ერთ წერტილში სამელექტროდიანი მეთოდით გაზომილი ვერტიკალური ელექტრული ზონდირების შედეგები

ბუნებრივი ელექტრული ველის გაზომვას. ბუნებრივი ელექტრული ველის გაზომვა ტარდებოდა ყველა წერტილში, სადაც ტარდებოდა ვერტიკალური ელექტრული ზონდირება. ჭრილი. ბუნებრივი ელექტრული ველის გაზომვები მიწისქვეშა წყლის ნაკადის არსებობის და მისი მიმართულების დადგენის საშუალებას იძლევა. ნახ.8.3-ზე წარმოდგენილია, მეწყრის იგივე წერტილში, არაპოლარიზებადი ელექტროდებით

ბუნებრივი ველის გაზომვის შედეგები. დიაგრამის არასიმეტრიულობიდან შეიძლება ვივარაუდოთ მიწისქვეშა წყლების მოძრაობის მიმართულება.



ნახ.8.3. ბუნებრივი ველის წრიული (30°-ანი კუთხით) ბრუნვით გაზომვის შედეგად მიღებული შედეგები

შესწავლილი იქნა ხუდონის ხევის მიდამოებში მდ. ენგურის მარცხენა სანაპიროს ფერდობის დღევანდელი მდგომარეობა და მეწყრული პროცესების ხასიათი აღნიშნულ მონაკვეთზე, ჩატარდა ფერდობების მდგრადობის შეფასება.

**ძირითადი შედეგები და დასკვნები:**

1.გეოლოგიურ-გეოფიზიკური კვლევების მიხედვით მეოთხეული დანალექების სიმძლავრე საკვლევ მონაკვეთზე 0-10 მეტრია (საშუალოდ დაახლოებით 5მ). ძირითად ქანებში გამოიყოფა 4 ფენა: დაახლოებით 10 მ სისქის ინტენსიურად გამოფიტული ზონა, დაახლოებით 20 მ სისქის გამოფიტული ზონა, დაახლოებით 15 მ სიმძლავრის განტვირთვის ზონა და შედარებით შენახული ქანების ზონა. გეოლოგიურ-გეოფიზიკური მონაცემების მიხედვით მეწყრულ მოძრაობებში მონაწილეობის მიღება შეუძლიათ მხოლოდ მეოთხეულ გრუნტებს, ხოლო ძირითადი ქანები, გამოფიტულ და განტვირთვის ქანებთან ერთად შედარებით მდგრადია.

2.გეოლოგიური კვლევის საფუძველზე ხოკოს მიდამოებში გამოიყო სამი პოტენციური მეწყრული უბანი: ჩრდილოეთის, სამხრეთის და ცენტრალური. გეოლოგიურ-გეოფიზიკური სამუშაოების მონაცემების მიხედვით ამჟამად მეწყრული პროცესები ვითარდება მხოლოდ ცენტრალური უბნის ზოგიერთ არეში. მეწყრულ პროცესებში მონაწილე ფენების სისქე შედარებით მცირეა (5-10 მ), ხოლო თავად პროცესები პერიოდულია - აქტიურდება სეზონური წვიმების პერიოდში. ჩრდილოეთის და სამხრეთის უბნები შედარებით მდგრად მდგომარეობაშია.

**8.2 გომბორის მეწყრის კვლევა ვეზ-ის მეთოდით და უსაფრთხოების ფაქტორის (FS)**

**შეფასება**

სამუშაოები ჩატარდა ასევე გომბორის მეწყერზე. აღნიშნულ მეწყერზე შლიუმბერჟეს მეთოდით ვახდენდით ვერტიკალურ ელექტრულ ზონდირებას. მოხდა მეწყერის რისკის ფაქტორის შეფასება.

მეწყერის რისკის შესაფასებლად არსებობს ე.წ. უსაფრთხოების ფაქტორი (factor of safety). უსაფრთხოების ფაქტორი წარმოადგენს თანაფარდობას ხახუნის ძალასა და ჩამომსრიალებელ ძალას შორის

$$F_s = \frac{\text{ხახუნის ძალა}}{\text{ჩამომსრიალებელი ძალა}} = \frac{S}{T}$$

როდესაც  $F_s > 1$  გარემო სტაბილური, ხოლო როდესაც  $F_s < 1$  გვაქვს არასტაბილური გარემო. კონკრეტული მეწყერისათვის უსაფრთხოების ფაქტორის გამოსათვლელად საჭიროა მეწყერული გარემოს სხვადასხვა გეოფიზიკური პარამეტრების შესწავლა.

მეწყერის დასრიალების ფაქტორის გამოსათვლელად გამოიყენება შემდეგი ფორმულა:

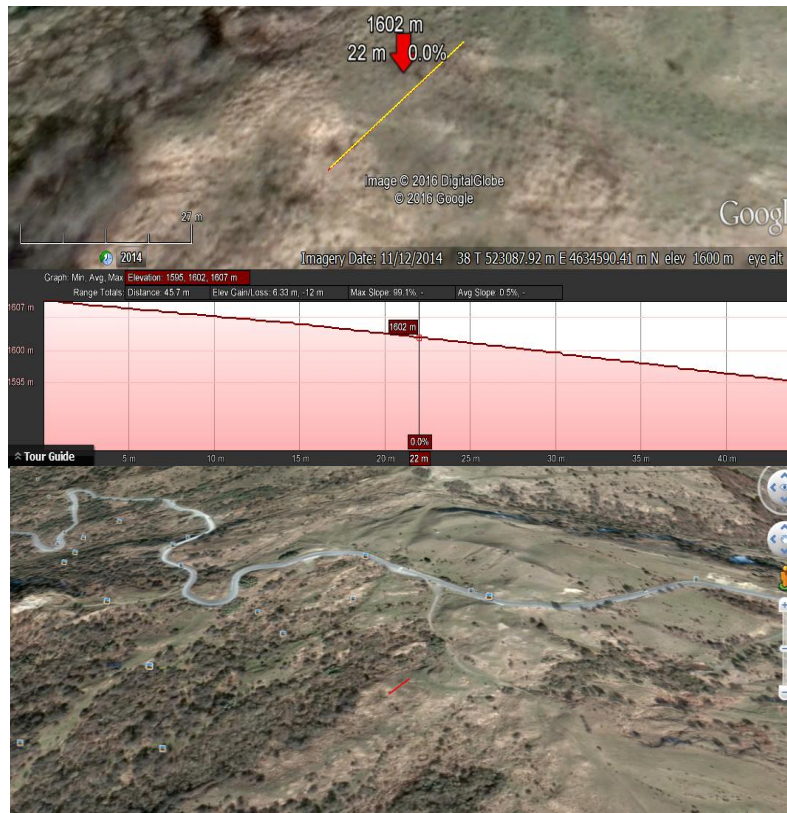
$$FS = \frac{c + hgc \cos^2 \theta (\rho_r - \rho_w m) \tan \phi}{\rho_r h g \sin \theta \cos \theta}$$

სადაც  $c$  არის კოჰეზია,  $h$  პოტენციალური დასასრიალებელი მასის სისქე,  $g$  თავისუფალი ვარდნის აჩქარება,  $\theta$  ზედაპირის დახრის კუთხე,  $\rho_r$  მეწყერის ქანების სიმკვრივე,  $\rho_w$  წყლის სიმკვრივე,  $m$  სრიალის ფენაში ტენიანი ფენის წილი,  $\phi$  შინაგანი ხახუნის კუთხე.

როდესაც  $FS > 1$  → მეწყერის მდგომარეობა სტაბილურია,

როდესაც  $FS < 1$  → მეწყერის მდგომარეობა არასტაბილურია,

როდესაც  $FS = 1$  → მეწყერის მდგომარეობა კრიტიკულია.





ნახ.8.4. მეწყრული უბანი და მისი დახრის კუთხე გომბორის უღელტეხილის მიდამოებში

მეწყრის დასრიალების ფაქტორის გამოსათვლელად გეოფიზიკური კვლევები ჩატარდა გომბორის უღელტეხილის მიდამოებში არსებულ მეწყერზე (ნახ.4 ). ელექტროდიების შედეგები მოცემულია ნახ.6-ზე. გეოფიზიკური კვლევების საფუძველზე დადგინდა დასრიალების ფაქტორის ( $FS$ ) გამოსათვლელ ფორმულაში მოცემული პარამეტრების მიახლოებითი მნიშვნელობები:  $c \approx 12000 \frac{\text{პმ}}{\text{მ.წმ}^2}$ ,  $h \approx 8\theta$ ,  $\rho_r \approx 2000 \frac{\text{პმ}}{\text{სმ}^3}$ ,  $\rho_w \approx 1000 \frac{\text{პმ}}{\text{სმ}^3}$ ,  $\theta \approx \phi \approx 15^\circ$ .

გამოთვლები ჩავატარეთ  $m$ -ის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის:

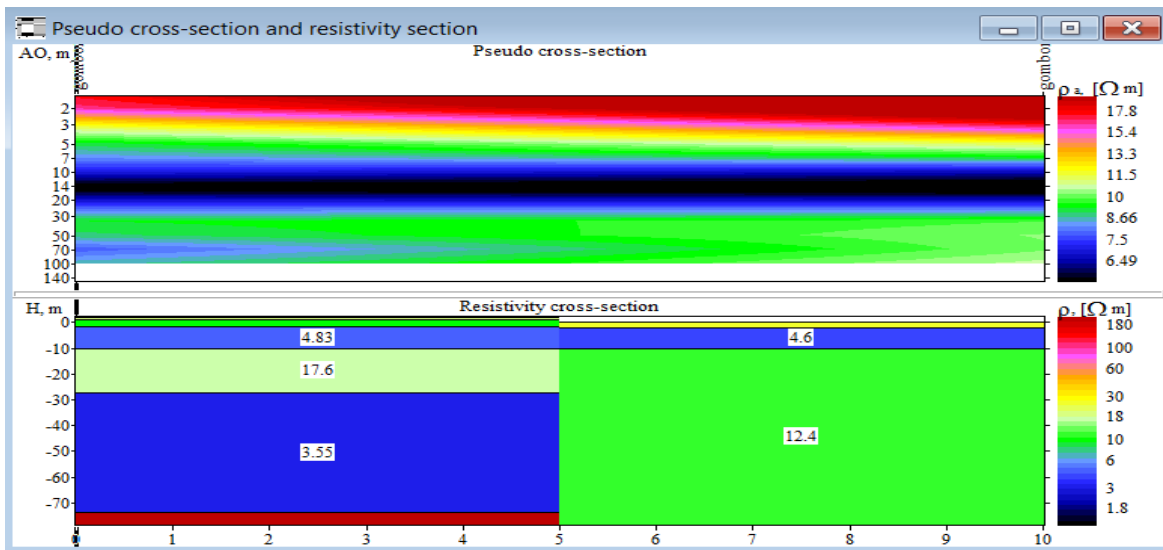
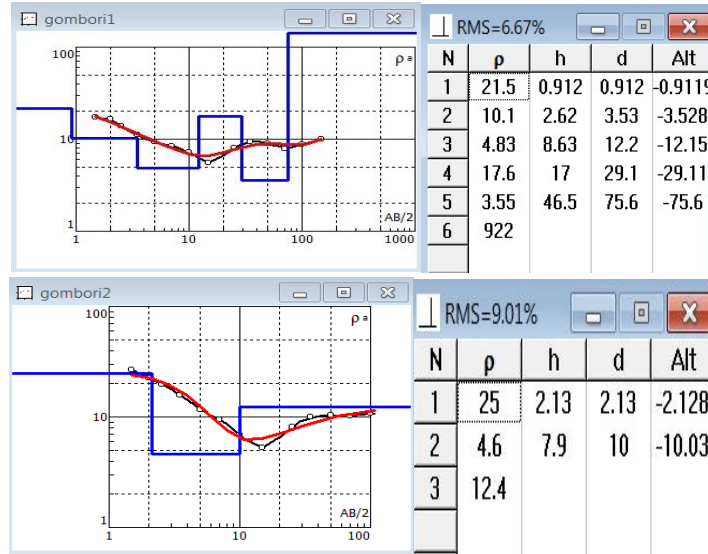
1.  $m=0.4 \rightarrow FS \approx 1.11 \rightarrow$  სტაბილური
2.  $m=0.5 \rightarrow FS \approx 1.06 \rightarrow$  სტაბილური
3.  $m=0.8 \rightarrow FS \approx 0.91 \rightarrow$  არასტაბილური
4.  $m=1.0 \rightarrow FS \approx 0.81 \rightarrow$  არასტაბილური

ჩვენი გაზომვებით  $m \approx 0.8$ , ამიტომ მდგომარეობა არასტაბილურია, თუმცა კრიტიკულთან ახლოს.

მიღებული შედეგები გვიჩვენებს არასტაბილურ მდგომარეობას დიდი ნალექის მოსვლის შემთხვევაში (ისევე როგორც მიწისძვრის შემთხვევაში) და შედარებით მდგრად მდგომარეობას მშრალ პერიოდში.



ნახ.8.5. ელექტროსადიებო სამუშაოები გომბორის მეწყერზე



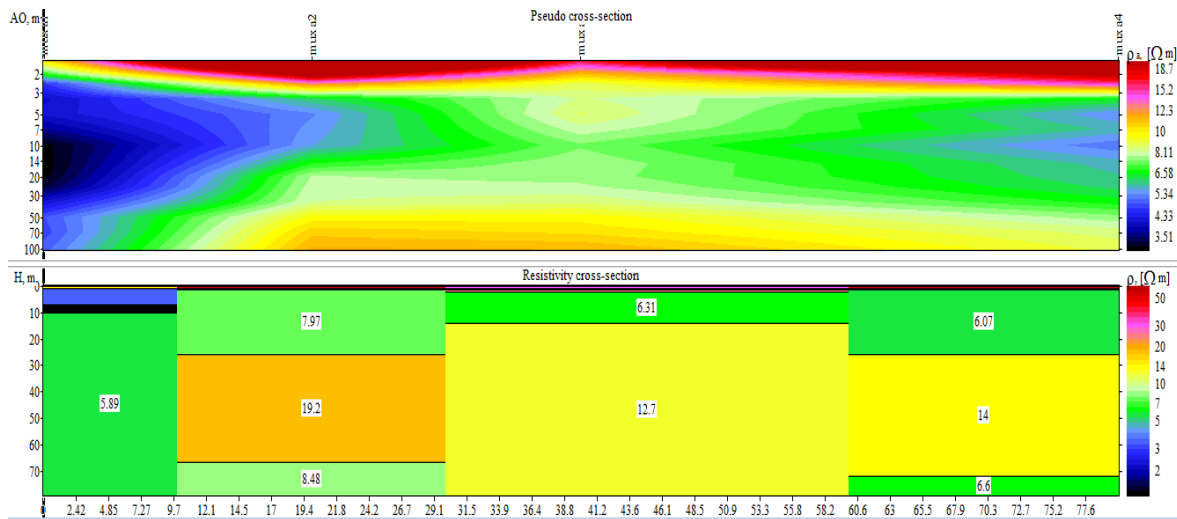
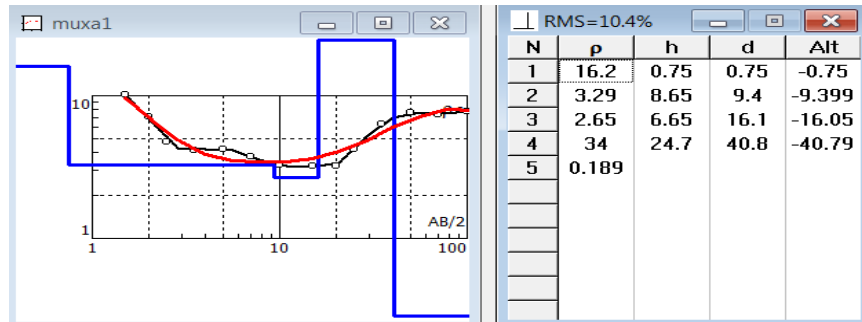
ნახ.8.6. გომბორის მეწყერზე მიმდინარე სამუშაოები და მეწყერის რამდენიმე წერტილში შლიუმბერჯის მეთოდით გაზომილი ვერტიკალური ელექტრული ზონდირების შედეგები

### 8.3 მუხათგვერდის მეწყერის კვლევა ვეზ-ის მეთოდით და ელექტრული ჭრილის აგება და დასრიალების ზედაპირის განსაზღვრა

ელექტროსამიებო სამუშაოები ჩავატარეთ ასევე მუხათგვერდის ერთ-ერთ მეწყერზე, რომელიც პოტენციურად ემუქრება მუხათგვერდის სასაფლაოსკენ მიმავალ გზას.



ნახ.8.7. ელექტროსადიებო სამუშაოები მუხათვერდის მეწყერზე



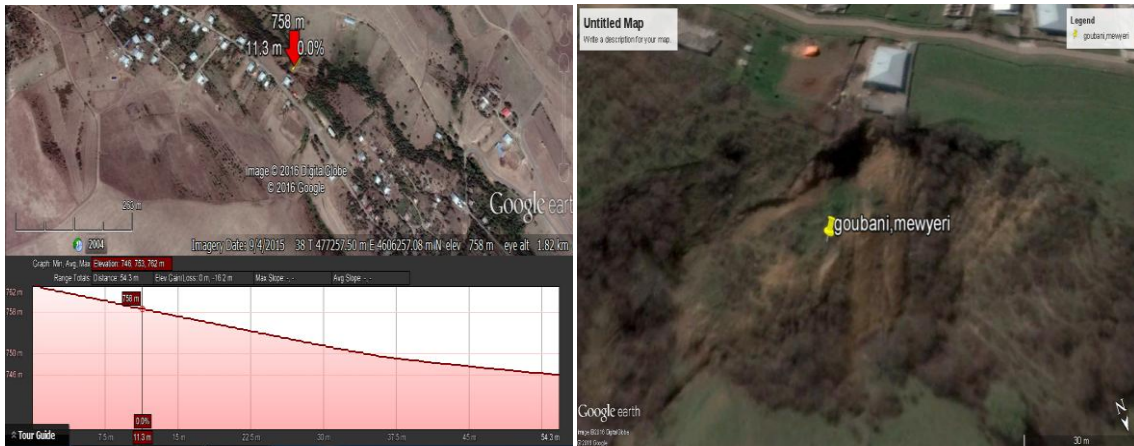
ნახ.8.8. ვერტიკალური ელექტრული ზონდირების შედეგი მუხათვერდის მეწყერზე

მუხათვერდის მეწყერი შედგება რამდენიმე ბლოკისაგან, რომელთაგან ზოგი აქტიურია (მომრავია), ზოგიც მდგრადია (უძრავია). გაზომვები ჩავატარეთ ყველა მომრავ და უძრავ ბლოკზე. პირველადი შედეგები წარმოდგენილია დანართში.

მიღებული მონაცემები ამჟამად მუშავდება და მიღებული შედეგების მიხედვით იგეგმება საჭირო გაზომვების ჩატარება.

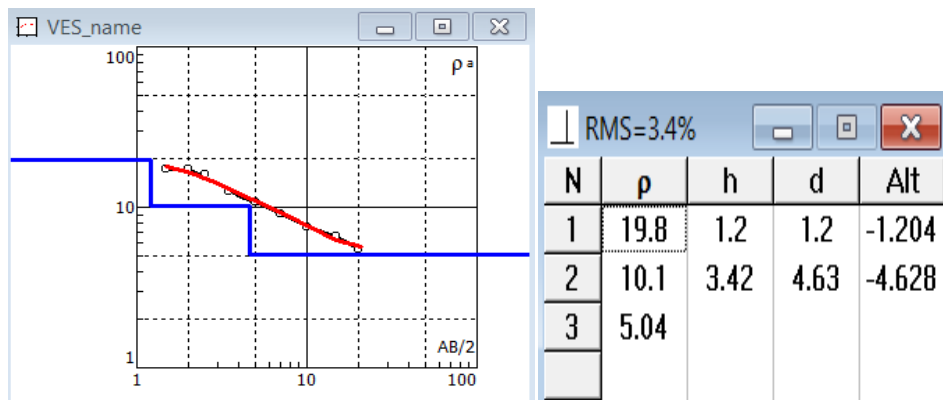
#### 8.4 ლოუზნის მეწყრის კვლევა ვეზ-ის მეთოდით და უსაფრთხოების ფაქტორის (FS) შეფასება

კვლევები ჩატარდა ასევე სოფელ ლოუზანში არსებულ მეწყერზე, რომელიც დიდ საფრთხეს უქმნის ერთ-ერთი მოსახლის სახლს. კვლევები ჩატარდა ვერტიკალური ელექტრული ზონდირების მეთოდით.



ნახ.8.9. ლოუზნის მეწყერი

წარმოდგენილ წერტილში ჩატარდა ვერტიკალური ელექტრული ზონდირების (ვეზ) სამუშაოები. კაბელის გამლა ( $AB/2$ ) იყო 20მ. რელიეფმა მეტი გამლის საშუალება არ მოგვცა. გამოიყო 2 ფენა წინააღობის შემცირების მიხედვით. h არის ფენის სისქე, ხოლო d მიწის ზედაპირიდან მანძილი ფენის საზღვრამდე. როგორც ჩანს წინააღობის შემცირება დაკავშირებულია გაწყლიანების ზრდასთან. მონაცემები დამუშავებულია ipi2win პროგრამის საშუალებით.



ნახ.8.10. ვერტიკალური ელექტრული ზონდირების შედეგი ლოუზნის მეწყერზე



## დასკვნა

წარმოდგენილი სამუშაოს საბოლოო მიზანი არის მეწყრის მომზადების პროცესის დინამიკის ყოვლისმომცველი გამოკვლევა. კერძოდ, ლაბორატორიული ცდებით და რიცხვითი მოდელირებით, ჩვენ გვინდა შევაფასოთ გარეშე სუსტი ზემოქმედების ან გავლენის (ანუ, ტენიანობის, სეისმური რყევის, ტემპერატურის და სხვა პარამეტრების ცვლილებით) ეფექტი მეწყრის და სეისმური პროცესის მოხდენის ალბათობაზე.

სხვადასხვა რიცხვითი ექსპერიმენტების და ლაბორატორიული კვლევების ანალიზის საფუძველზე წარმოდგენილი სეისმური პროცესის და მეწყრების ურთიერთქმედების და მცირე გარეშე ზემოქმედების დინამიკის კვლევები მნიშვნელოვანი პრაქტიკული და ფუნდამენტური სამეცნიერო ღირებულების საგანია.

აწყობილი იქნა დანადგარი სადაც შესაძლებელია არათანაბარი ხახუნის (სტიკ-სლიპის) პროცესის მოდელირების ექსპერიმენტების ჩატარება ზამბარა-მცოცის მოდელზე. სისტემა სედგება უძრავი და მოძრავი ბაზალტის ბლოკებისაგან. მოძრავ ბლოკს შეუძლია დაახლოებით 80 სმ მანძილზე გადაადგილება. შესაძლებელია გაწევის სიჩქარის ცვლა დიდ დიაპაზონში (0.1-1 მმ/წმ). შესაძლებელია აჩქარების და აკუსტიკური ემისიის რეგისტრაცია. გამწევი ძალის სიდიდის ჩაწერა. ასევე შესაძლებელია მატრიგერირებელი ზემოქმედების მოდება უძრავი ფილის რამდენიმე წერილში.

ასევე აწყობილი იქნა ბურიჯ-კნოპოვის ექსპერიმენტული დანადგარი. ბურიჯ-კნოპოვის დანადგარი წარმოადგენს რამდენიმე ბაზალტის მცირე ზომის ფილას, რომლებიც ერთმანეთთან შეერთებულია ზამბარებით. ეს ფილები შეიძლება ვასრიალოთ დიდი ზომის უძრავ ბაზალტის ფილაზე. თითოეული მცირე ზომის ფილა ზამბარით დაკავშირებულია ზედა პლატფორმასთან, რომელიც შეიძლება ავამოძრავოთ გარკვეული სიჩქარით და მასთან ერთად ავამოძრავოთ მცირე ზომის ფილები. ამ შემთხვევაშიც შესაძლებელი იყო აჩქარების და აკუსტიკური ემისიის რეგისტრაცია, გამწევი ძალის გაზომვა. ასევე შესაძლებელია მატრიგერირებელი ზემოქმედების მოდება უძრავი ფილის რამდენიმე წერტილში.

გაკეთდა დახრილი ექსპერიმენტული დანადგარი. აღნიშნულ დანადგარზე ასევე შესაძლებელია ექსპერიმენტების ჩატარება უძრავ ბაზალტის ფილაზე, მოსრიალე მცირე ბაზალტის ფილებით. შესაძლებელია დანადგარის დახრის კუთხის ცვლა 10°-დან 50°-მდე. ამ შემთხვევაშიც შესაძლებელია აჩქარებების და აკუსტიკური ემისიის რეგისტრაცია. ბაზალტის უძრავ ფილაზე შესაძლებელია მატრიგერირებელი ზემოქმედების მოდება ზედა ზედაპირის 6 წერტილში და უკანა ზედაპირის 2 წერტილში.

აწყობილი იქნა ასევე მეწყრის მოდელირების დახრილი დანადგარი. ამ დანადგარზე დახრის კუთხის ცვლილების დიაპაზონია 0°-დან 80°-მდე. დანადგარზე დამონტაჟებულია კიუვეტი, რომელშიც ვათავსებდით ქვიშას ან სხვადასხვა მეწყრულ მასალებს და ვიკვლევდით დასრიალების ტრიგერირების პირობებს. აღმოცნდა, რომ ზომიერი დასველების პირობებში კრიტიკული დასრიალების კუთხე იზრდება.

ჩვენი კვლევის ერთ-ერთი მიზანი არის აკუსტიკური ემისიის ჩაწერის საშუალებით მეწყრის ნელი მოძრაობის (ცოცვის) რეგისტრაცია და მონიტორინგი პირობების შემუშავება. ამ მიზნით ჩვენ ავაწყვეთ სპეციალური მოწყობილობა. პლასტიკური კასრი ივსება მეწყერული ნიადაგით, ხოლო კასრის ცენტრში ცილინდრულად

ჩაყრილია ღორღი. ღორღის ცენტრში განთავსებულია სქელკედლიანი ფოლადის მილი, რომელიც ხრეშში წარმოქმნილ აკუსტიკურ იმპულსებს გადასცემს აკუსტიკურ სენსორს. დანადგარში დეფორმაცია ხორციელდება მექანიკური დომკრატის დახმარებით. აკუსტიკური მონიტორინგის მიზანია მეწყრის გააქტიურებამდე, გეოლოგიური სხეულების წინასწარი გადაადგილების დროს, აღძრული აკუსტიკური სიგნალების ჩაწერა.

ერთ-ერთი საინტერესო შედეგი ჩვენი პროექტის ფარგლებში ჩასატარებელი სამუშაოების არის მეწყრის ტრიგერირება სხვადასხვა მცირე გარეშე ზემოქმედების და გარემოს პარამეტრების პირობებში. ასევე, მეწყრის მოდელირება ხდება სხვადასხვა ფრაქციის მარცვლოვანი მასალით მოსრიალე ზედაპირებს შორის. სეისმური პროცესის მოდელირებისათვის მსგავსი ექსპერიმენტები ჩატარებული აქვთ სხვადასხვა ავტორებს [48,49,50,18,97,98].

ჩატარდა ექსპერიმენტები სტანდარტულ ზამბარა-მცოცის სიტემაზე (ბაზალტის უძრავი და მოძრავი ფილებით) თანაბარი გაწევით და მცირე მექანიკური (ნორმალური და ტანგენციალური) პერიოდული ზემოქმედებით. განსაზღვრულ პირობებში სისტემა გვიჩვენებს მიკროგაცურებების შემთხვევების გარეშე მცირე პერიოდულ ზემოქმედებასთან სინქრონიზაციის ეფექტს.

ძლიერი ელექტრული იმპულსების სერია მოდებულ იქნა მექანიკურ სისტემაზე, რომელიც კრიტიკულ მდგომარეობამდე იყო მიყვანილი. ელექტრული ველი მოდებულ იქნა ან დაცურების ზედაპირის პარალელურად (პირველი მეთოდი) ან პერპენდიკულარულად (მეორე მეთოდი). აღმოჩნდა, რომ პირველ შემთხვევაში ელექტრული იმპულსი დაცურების ინიცირებას ახდენს ალბათობით  $P \approx 0.07$ ,  $\Delta V = 1300V$ , და  $P \approx 0.2$  ალბათობით  $\Delta V \approx 10kV$  ძაბვის მოდების დროს. მეორე შემთხვევაში ელექტრომაგნიტური იმპულსის გამოყენება მნიშვნელოვნად აფერხებს დაცურებას: ზედა ნიმუში უძრავი იყო კრიტიკულ კუთხეზე უფრო დიდი კუთხის დროსაც კი.

ნაპოვნია ასევე, რომ გარე ზემოქმედების (ფორსინგის) ამპლიტუდის ზრდა იწვევს იმპულსებს (საშუალო) ხანგრძლივობის შემცირებას.

მოსრიალე ფილაზე მოდებული გარე ზემოქმედების ამპლიტუდა რამდენიმე რიგით მცირეა გამწევ ძალაზე და ფორსინგის მთავარ გამწევ ძალასთან ფარდობა  $10^{-4} - 10^{-8}$  რიგისაა.

ჩვენ ვიკვლევდით არასტაბილურობების ტრიგერირებას სრიალის მოვლენის თანმხლები აჩქარებების და აკუსტიკური ემისიის ჩაწერის საშუალებით. წარმოდგენილი მარტივი მოდელით გამოვლენილი ტრიგერირების ეფექტი დამოკიდებულია ზამბარის სიხისტეზე, დახრის კუთხეზე, ვიბრატორების რაოდენობაზე და ლოკაციაზე, ტრიგერირების სიგნალის ამპლიტუდაზე, მოსრიალე ზედაპირების ტენიანობაზე. რაც უფრო დიდია დამორება ვიბრატორიდან მოსრიალე ფილამდე, მით უფრო მეტი დრო არის საჭირო სრიალის ტრიგერირებისათვის. ჩვენ ვაჩვენეთ ასევე, რომ ტრიგერირების ეფექტი ასევე დამოკიდებულია მოსრიალე ფილის ვიბრაციის ფორსინგის დაწყებამდე ექსპოზიციის (პარკინგის) დროზე: ეს ტესტი ახდენს სეისმური ტალღებით მაეწყრის გააქტიურების იმიტაციას.

იმისათვის, რომ უკეთ გავიგოთ ტრიგერირების ფიზიკური მექანიზმი გვჭირდება ტრიგერირების უფრო ძლიერი წყარო და ცდების განხორციელება სხვადასხვა ექსპერიმენტულ პირობებში.

ჩვენ ასევე ჩავატარეთ ბუნებრივი, მეწყრული ტერიტორიების შესწავლა ვერტიკალური ელექტრული ზონდირების მეთოდით და ასევე ბუნებრივი ველის

მეთოდით. შესწავლილი იქნა გომბორის მეწყერი, მუხათგვერდის მეწყერი, ღოუბნის მეწყერი და ხოკოს (ენგურჰესის ტერიტორია) მეწყერი. მოხდა მიღებული შედეგების დამუშავება, ელექტრული ჭრილების აგება, ლითოლოგიის შედგენა და უსაფრთხოების (FS) კოეფიციენტების გამოთვლა.

შესწავლილი იქნა მეწყრის მოძრაობის მათემატიკური მოდელი ნავიე-სტოქსის განტოლებათა სისტემის ბაზაზე. შესწავლილი იქნა ასევე ორფაზიანი (წყალ--მასალა) მეწყრული სხეულის (ღვარცოფის) რიცხვითი მოდელი. ეს მოდელირება თავისთავად საინტერესოა სამეცნიერო თვალსაზრისით, ხოლო მომავალში, მონიტორინგის სისტემის ამოქმედების შემთხვევაში მას ექნება დიდი გამოყენებით პოტენციალი მეწყრის მოძრაობის რეჟიმის საპროგნოზოდ.

საქართველოს მეწყრების სეისმური ინდუცირების გამოკვლევას, ისევე როგორც რღვევის და ცოცვის ზედაპირის დრეკად და ხახუნის თვისებებზე მიწისძვრების და მეწყრების გენერაციის სტატისტიკური და დინამიკური თვისებების დამოკიდებულების ახსნას აქვს ზოგადი სამეცნიერო და პრაქტიკული მნიშვნელობა. მიღებული შედეგები პრინციპულად ადასტურებენ მასათა მოძრაობის და სეისმურობის გაკონტროლების შესაძლებლობის პერსპექტივას, შედარებით სუსტი ხელოვნური (ძლიერი ელექტრომაგნიტური იმპულსი, მექანიკური ვიბრაცია) ან ბუნებრივი (მიწისძვრა, ძლიერი წვიმა, ჭექა-ქუხილი, გრიგალი, ...) ზემოქმედებების საშუალებით.

## Conclusion

The ultimate goal of the work is a comprehensive study of the landslide preparing process dynamics. In particular, with laboratory experiments and numerical modeling, we want to evaluate the effects of weak impact or influence (ie, moisture, seismic fluctuations, temperature and other parameters change) on landslides and seismic process probability.

Various numerical experiments and laboratory tests based on the analysis of the seismic process and the interaction between landslides and small external influence is an important practical and fundamental scientific value of the subject.

Was assembled the device where is possible carrying out stick-slip process modeling experiments on spring-slider model. The system consists of movable and immovable basalt blocks. Movable block may move about 80 cm distance. It is possible to change pulling velocity in the range of (0.1 -1 mm / sec). Is possible acceleration and acoustic emission registration and pulling force value recording. It is also possible imposing the triggering influence on several points of immovable plate.

Also was assembled Burrige-Knopoff experimental equipment. Burrige-Knopoff unit represents a some small plates of basalt, which are connected to each other with springs. These plates can slip on large basalt plate. Each of the small plate is connected with spring to the top platform, which can move with certain speed and pull also small plates. In this case, it is also possible registration the acceleration and acoustic emission and measure pulling force. It is also possible imposing triggering influence on several points of immovable plate.

Was made inclined experimental equipment. The device is also possible to conduct experiments on small basalt plates slidings on a immovable basalt plate. It is possible change the tilt angle from 10 ° to 50 °. In this case is also possible registration of the acceleration and acoustic emission . On immovable basalt plate is possible imposing triggering influence in the upper surface and a rear surface in 6 points and in 2 points accordingly.

Assembled was also inclined equipment for landslide modeling . The tilt angle change on this equipment is in the range from 0 ° to 80 °. On the device is mounted ditch, in which was placed sand or other landslide materials and investigated landslide slip triggering conditions. It turned out that by moderate wetting of materials increases critical slip angle.

One of the purposes of our research is the recording of slow movements (the beginning of slip) and the compilation of conditions for monitoring landslides using the acoustic emission record. For this purpose, we assembled a special installation. A plastic barrel is filled with a landslide material, a barrel is cylindrically filled with small stones in the center of the barrel, and in the center there is a thick-walled steel pipe that transmits an acoustic signal that has arisen in the small stones to the acoustic sensor. In the installation, the deformation is effected by means of a mechanical jack. The purpose of acoustic monitoring is to record acoustic signals that arise when geological structures are pre-moved before the landslide activation.

One of the interesting results of the work carried out within the framework of our project is the triggering of landslides in conditions of weak external influences and environmental parameters. Also interesting is landslide modeling by different fractions of granular material between the sliding surfaces. Seismic processess modeling similar to oure experiments carried out by the various authors [48,49,50,18,97,98].

Experiments were carried out on a standard spring-block system (on fixed and mobile basalt plates) with uniform pulling under a small mechanical (normal and tangential) periodic influence. Under certain conditions, the system shows the effect of synchronization of microslips with small external periodic forcing.

A series of electrical impulses applied to the mechanical system, which was brought to a critical position. The electric field was applied either parallel to the slip surface or in (first method) or perpendicular (second method). It turned out that in the first case, the electric pulses initiate slipping with probability  $P \approx 0.07$ ,  $\Delta V = 1300V$  and with  $P \approx 0.2$  probability in the case of

applying voltage  $\Delta V \approx 10kV$ . In the second case, the application of an electromagnetic pulse makes slipping very difficult: the upper plate remained stationary even at an angle considerably exceeding the critical angle.

It was also found that an increase in the amplitude of the external (forcing) causes an decrease in the pulse duration (on average). The amplitude of the forcing applied to the sliding plate is several orders of magnitude smaller than the pulling force and the ratio of the forcing to the pulling force is about  $10^{-4} - 10^{-8}$ .

We investigated the triggering of instability by recording the accelerations and acoustic emission accompanying the phenomenon of slip. The trigger effect detected by a simple model depends on the spring stiffness, the angle of inclination, the installation site and the number of vibrators, the amplitude of the trigger signal, and the humidity of the sliding surfaces. The greater the distance from the vibrator to the sliding plate, the more time is needed for triggering. We also showed that the trigger effect also depends on the exposure (parking) time of the sliding plate before the vibration forcing begins: this test imitates the activation of landslides by seismic waves.

In order to better understand the physical mechanism triggering, a more a more powerful source of triggering is required and experiments are performed under different experimental conditions.

We also conducted a study of natural landslide areas using vertical electric sounding and natural field method. Gombori, Mukhatgverdi, Goubani and Kokho (territory of Inguri hydroelectric power station) landslides were investigated. The processing of the results obtained, the construction of electrical sections, the compilation of lithology and the calculation of safety factors (FS) were carried out.

A mathematical model of the motion of a landslide was studied on the basis of Navier-Stokes system equations. A numerical model of the two-phase (water - material) body of the landslide (mudflow) was also studied. This modeling is interesting from the scientific point of view, but in the future, if the monitoring system will start, it will have great applied potential for predicting the regime of the landslide movement.

The study of seismic induction of landslides in Georgia, as well as the explanation of the dependence of the statistical and dynamic properties of the generation of landslides and earthquakes in dependence also on the properties of elasticity and friction of the surface of faults and slip, have a common scientific and practical significance.

The obtained results fundamentally confirm the prospect of the possibility of controlling the mass movement and seismicity, with the help of a relatively weak artificial (powerful electromagnetic pulse, mechanical vibrations) or natural (earthquakes, heavy rain, thunder, storm, ...) impacts.

## Заключение

Конечная цель представленной работы заключается в всеобъемлющем исследовании динамики процесса подготовки оползня. В частности, численным моделированием и лабораторными опытами мы хотим оценить эффект влияния слабых внешних воздействий или влияния (т.е. изменением влажности, сейсмических толчков, температуры и других параметров) на вероятность возникновения оползневых или сейсмических процессов.

Представленные полученные на основе анализа результатов различных цифровых экспериментов и лабораторных исследований взаимодействия сейсмических процессов и оползней и исследования динамики слабого внешнего воздействия являются предметом значительных практических и фундаментальных научных ценностей.

Была собрана установка которая дает возможность проведения экспериментов по моделированию процессов неравномерного трения (стик-слип) на пружинно-блочной модели. Система состоит из подвижных и неподвижных базальтовых блоков. Подвижный блок может перемещаться на расстояние до 80 см. Скорость протяжки можно менять в пределах 0.1 – 1.0 мм/сек. Имеется возможность регистрации величины и направления ускорения и акустической эмиссии, а также записи тягового усилия. Имеется также возможность приложения триггерующего воздействия в неесколькох точках неподвижной плиты.

Была также собрана экспериментальная установка Бурдж-Кнопова, которая представляет собой несколько небольших базальтовых плиток, соединенных между собой спиральными пружинами растяжения. Эти плитки можно протаскивать по поверхности неподвижной большой базальтовой плиты. Каждая из небольших плиток в свою очередь подсоединена пружиной к верхней тянущей платформе, которая может перемещаться с определенной скоростью и при этом приводить в движение цуг из малых базальтовых пластин. И в этом случае имеется возможность регистрации ускорения и акустической эмиссии, а также измерения тягового усилия. Имеется также возможность приложения триггерующего воздействия в нескольких точках неподвижной плиты.

Изготовлена также наклонная экспериментальная установка, на которой также возможно проведение экспериментов по проскальзыванию малых базальтовых плиток по неподвижной базальтовой плите. Угол наклона установки может меняться в пределах  $10^\circ$  -  $50^\circ$ . И в этом случае имеется возможность регистрации ускорения и акустической эмиссии. Имеется возможность приложения триггерующего воздействия в 6 точках с верхней стороны и в 2 точках с нижней стороны неподвижной плиты.

Была собрана также наклонная установка для моделирования оползней. Диапазон изменения угла наклона рабочего стола -  $0^\circ$  -  $80^\circ$ . Смонтированная на установке пластиковая кювета заполнялась песком или разным оползневым материалом, что давало возможность исследовать условия триггерирования для начала соскальзывания. Оказалось, что при определенном уровне смачивания критический угол соскальзывания растет.

Одной из целей наших исследований является регистрация медленных движений (начало скольжения) и составление условий мониторинга оползней с использованием записи акустической эмиссии. С этой целью нами была собрана специальная установка (рис.2). Пластиковая бочка заполняется оползневым материалом, в центре бочки цилиндрически засыпан щебень, а в центре находится толстостенная стальная труба, которая передает возникший в щебне акустический сигнал акустическому датчику. В установке деформация осуществляется с помощью механического домкрата. Цель акустического мониторинга заключается в записи акустических сигналов, возникающих при предварительном перемещении геологических структур еще до активации оползня.

Одним из интересных результатов работ, проведенных в рамках нашего проекта, является триггерирование оползней в условиях слабых внешних воздействий и параметров среды. Моделирование оползней происходило также при наличии зернистого материала разных

фракций между скользящими поверхностями. Подобные эксперименты были проведены при моделировании сейсмических процессов разными авторами [48,49,50,18,97,98].

Были проведены эксперименты на стандартной пружинно-блочной системе (на неподвижной и подвижных базальтовых плитах) при равномерной протяжке при малом механическом (нормальном и тангенциальном) периодическом воздействии. В определенных условиях система показывает без случаев микропроскальзывания эффект синхронизации с малыми периодическими воздействиями.

К механической системе, которая была доведена до критического положения, была приложена серия мощных электрических импульсов. Электрическое поле было приложено или параллельно поверхности соскальзывания (первый метод) или перпендикулярно (второй метод). Оказалось, что в первом случае электрические импульсы инициируют соскальзывание с вероятностью  $P \approx 0.07$ , при  $\Delta V = 1300V$ , а в случае прикладывания напряжения – с вероятностью  $P \approx 0.2$  при  $\Delta V \approx 10kV$ . Во втором случае применение электромагнитного импульса существенно затрудняет соскальзывание: верхний образец оставался неподвижным даже при угле, значительно превышающем критический угол.

Было найдено также, что рост амплитуды внешнего воздействия (форсинг) вызывает уменьшение продолжительности импульсов (в среднем). Амплитуда внешнего воздействия, приложенная к скользящей плите, на несколько порядков меньше силы тяги и соотношение величины форсинга к главной силе тяги составляет примерно  $10^{-4} - 10^{-8}$ .

Мы исследовали триггерирование нестабильности с помощью записи ускорений и акустической эмиссии, сопровождающих явление скольжения. Выявленный с помощью простой модели эффект триггерирования зависит от жесткости пружин, угла наклона, от места установки и количества вибраторов, амплитуды триггерирующего сигнала, влажности поверхностей скольжения. Чем больше расстояние от вибратора до скользящей пластины, тем больше времени необходимо для триггерирования. Мы показали также, что эффект триггерирования зависит и от времени экспозиции (паркинга) скользящей плиты до начала вибрационного форсинга: этот тест проводит имитацию активизации оползней сейсмическими волнами.

Для того, чтобы лучше понять физический механизм триггерирования, требуется более мощный источник триггерирования и осуществление опытов в различных экспериментальных условиях.

Мы провели также изучение природных оползневых территорий методами вертикального электрического зондирования и естественного поля. Были исследованы Гомборский, Мухатгвердский, Гоубанский и Хокский (территория Ингури ГЭС) оползни. Была проведена обработка полученных результатов, построение электрических разрезов, составление литологии и вычисление коэффициентов безопасности (FS).

Была изучена математическая модель движения оползня на основе системы уравнений Навье-Стокса. Была также изучена численная модель двухфазного (вода-материал) оползневого тела (сея). Это моделирование интересно само по себе с научной точки зрения, но в будущем, в случае начала функционирования системы мониторинга, оно будет иметь большой прикладной потенциал для прогнозирования режима движения оползня.

Исследование сейсмического индуцирования оползней в Грузии, также, как и объяснение зависимости статистических и динамических свойств генерации оползней и землетрясений в зависимости также и от свойств упругости и трения поверхности разломов и скольжения, имеют общее научное и практическое значение.

Полученные результаты принципиально подтверждают перспективу возможности контролирования движения масс и сейсмичности, с помощью сравнительно слабого искусственного (мощный электромагнитный импульс, механическая вибрация) или природного (землетрясения, ливневые осадки, гроза, ураганы, ...) воздействия.



## ლიტერატურა

1. Alexander, D., (1998) Natural Disasters, London: UCL Press
2. Allen P., (1997) Earth surface processes. Blackwell Science, Oxford
3. Amaral, L. A. N. and K. B. Lauritsen (1996). Energy avalanches in a rice-pile model. *Physica A* 231(4), 608–614
4. Ampuero, J.-P., and A. M. Rubin (2008), Earthquake nucleation on rate state faults—Aging and slip laws, *J. Geophys. Res.*, 113, B01302, doi:10.1029/2007JB005082
5. Anderson, M.G., and Holcombe E. (2013) Community-Based Landslide Risk Reduction. The world bank, Washington DC , 2013
6. Atlas of Natural Hazards & Risks of Georgia, Tbilisi, Georgia, 2012.
8. Bak, P., Tang, C ., Weisenfeld, K. (1987) Self-organized criticality. *Phys. Rev A* , 38, pp. 364-374, 1987.
9. Bak, P. and Tang, C . (1989) Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *J. Geophys. Res.*, 94, pp. 15,635-15,637, 1989.
10. Bassingthwaigh, J. B., Raymond, G.M. (1994) Evaluating re-scaled range analysis for time series. *Ann. Biom ed. Eng.* 22. pp. 432 - 444, 1994.
11. Barsh, D., Cain, N. (1984) The Nature of Mountain Geomorphology. *Mountain Research and Development* 4 (4):287–298, 1984
13. Beeler, N.M., and D.A. Lockner (2003), Why earthquakes correlate weakly with the solid Earth tides: Effects of periodic stress on the rate and probability of earthquake occurrence, *J. Geophys. Res.* B108, 2391-2405
14. Ben-David, O ., M. Rubinstein, S.M., and Fineberg, J. (2010) Slip-Stick: The Evolution of Frictional Strength, *Nature* 463,76-79, 2010
15. Bettinelli, P., J.-P. Avouac, M. Flouzat, L. Bollinger, G. Ramillien, S. Rajaure, and S. Sapkota (2008), Seasonal variations of seismicity and geodetic strain in the Himalaya induced by surface hydrology, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 266, 332–344
16. Bhandari, R. K. (1988), Some lessons in the investigation and field monitoring of landslides, in *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, vol. 3, edited by C. Bonnard, pp. 1435 – 1457, A. A. Balkema, Brookfield, Vt.
17. Bhandari, R.K., and Kotuwegoda, W.P.P.K., (1996), Consideration of landslide geometry and runout in a landslide inventory, in *Senneset, Kaare, ed., Landslides, International Symposium, 7th, Trondheim, June 17-21, Proceedings: Rotterdam, Balkema, v. 3, p. 1859-1864.*
18. Boettcher, M.S., and C. Marone (2004), Effects of normal stress variation on the strength and stability of creeping faults, *J. Geophys. Res.* 109 (B3), DOI:10.1029/2003JB002824.
19. Bogucki, D. J. (1976), Debris slides in the Mt. Le Conte area, Great Smoky Mountains National Park, USA, *Geograf Ann.*, 58A, 179-191
20. Bollinger, L., Perrier, F., Avouac, J.-P., et al. (2007), Seasonal modulation of seismicity in the Himalaya of Nepal *Geophys. Res. Letters*, Vol. 34, L08304, 2007.
21. Bolt, B.A., W.L. Horn, G.A. Macdonald; Scott., R.F. (1975) *Geological hazards: Earthquakes, tsunamis, volcanoes, avalanches, landslides, floods.* Springer Verlag, New York, 1975
22. Borissoff, B.A., and Roghozhin, E.A., *Russian Acad. Sci. J. Earthquake Prediction*, 1, 115-125, 1992
23. Bouchut, F., Fernandez-Nieto, E. H., Mangeney, A., Narbona-Reina, G. (2017), A two-phase solid-fluid model for dense granular flows including dilatancy effects: comparison with submarine granular collapse experiments, powder and grains, A.A. Baklema Publishers
24. Bouchut, F., Fernandez-Nieto, E. H., Mangeney, A., and Narbona-Reina, G. (2016), A two-phase two-layer model for fluidized granular flows with dilatancy effects, *J. FLUID MECH.*, 801
25. Brace, W.E., and I.D. Byerlee (1966), Stick-slip as a mechanism for earthquakes, *Science* 153, 990-992.

26. Bureau, L., T. Baumberger, and C. Caroli (2000), Shear response of a frictional influence to a normal load modulation, *Phys. Rev. E* 62, 6810-6820.
27. Burridge, R., and L. Knopoff (1967), Model and theoretical seismicity, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 57, 341 – 371
28. Bykov, V. G., In: Teisseyre R, Takeo M, Majewski E (eds) Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Chap. 18, 241-255, 2006.
29. Campbell, A. P., (1966), Measurement of movement of an earthflow, *Soil Water*, 2(3), 23-24.
30. Campbell, R. H. (1975), Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California, U.S. Geol. Surv. Prof Pap. 851, 51 pp..
31. Carlson JM, Langer JS. (1989) Mechanical model of an earthquake fault. *Phys Rev A Gen Phys.* 1989 Dec 1; 40(11):6470–6484.
32. Carlson JM, Langer JS, Shaw BE, Tang C. (1991), Intrinsic properties of a Burridge-Knopoff model of an earthquake fault. *Phys Rev A.* 1991 Jul 15; 44(2):884–897.
33. Carlson, J.M., J.S. Langer, B.E. Shaw (1994) Dynamics of earthquake faults. *Rev. Mod. Phys.* 66, 657.
34. Chau KT (1995) Landslides modeled as bifurcations of creeping slopes with nonlinear friction law. *Int J Solids Struct* 32:3451–3464.
35. Chau KT (1999) Onset of natural terrain landslides modeled by linear stability analysis of creeping slopes with a two-state variable friction law. *Int J Numer Anal Methods* 23:1835–1855.
36. Chelidze, T., Kolesnikov, Yu., Matcharashvili, T. (2005), Seismological criticality concept and percolation model of fracture, *Geophys. J. Int.* 164. 125-136.
37. Chelidze T., and T. Matcharashvili (2007), Complexity of seismic process, measuring and applications - A review, *Tectonophysics* 431, 49-61.
38. Chelidze, T., N. Varamashvili, M. Devidze, Z. Chelidze, V. Chikhladze, and T. Matcharashvili (2002), Laboratory study of electromagnetic initiation of slip, *Ann. Geophys.* 45, 587-599.
39. Chelidze, T., N. Varamashvili, M. Devidze, Z. Chelidze, V. Chikhladze, and T. Matcharashvili (2004), Electromagnetic initiation of slip laboratory model, *Acta Geophysica polonica.* Vol.52, #1
40. Chelidze, T., Varamashvili, N., In: Valerio de Rubeis., Czechowski, Z., Teisseyre, R. (eds), Synchronization and Triggering: from Fracture To Earthquake processes, 23-35, 2010
41. Chelidze, T., Varamashvili, N., Chelidze, Z., (2012), Acoustic Early Warning Telemetric System of Catastrophic Debris Flows in Mountainous Areas, *Journal of Georgian Geophysical Society*, v. 15
42. Chen, K., P. Bak, S.P. O bukhov (1991), Self-organized criticality in a crack-propagation model of earthquakes. *Phys. Rev. A* 43, 625.
43. Crozier, M. J., Eyles R. J., Marx S. L., McConchie J. A. and Owen R. C. (1980), Distribution of landslips in the Wairarapa hill country, *N. Z. J. Geol. Geophys.*, 23, 575-586.
44. Cruden, D.M., Varnes, D.J., Turner AK, Schuster RL (eds) (1996), Landslides – investigation and mitigation, National Research Council, Washington, D.C., Transportation Research Board, Specification Report 247, pp. 36–75.
45. Dalton, F. and Corcoran D. (2001), Self-organized criticality in a sheared granular stick-slip system. *Phys. Rev. E* 63, 061312.
46. Davis, R. O., Smith N. R., and Salt G. (1990), Pore fluid frictional heating and stability of creeping landslides, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 14, 427 – 443.
47. De, R. and G. Ananthakrisna, (2004), Power laws, precursors and predictability during failure, *Europhys. Lett.* 66, 715.
48. Dieterich JH (1979) Modeling of rock friction—1. Experimental results and constitutive equations. *J Geophys Res* 84:2161–2168

49. Dieterich, J. H. (1992), Earthquake nucleation on faults with rate-and state-dependent strength. *Tectonophysics*, 211, 115– 134.
50. Dieterich, J. H., Schubert G, Kanamori H. (eds), *Earthquake seismology*. Elsevier, 107-131, 2009.
51. Durville, J. L. (1992), Study of mechanisms and modeling of large slope movements, *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 45, 25 – 42.
52. Eisbacher, G. H. (1979), Cliff collapse and rock avalanches in the Mackenzie Mountains, Northwestern Canada, *Can. Geotech. J.*, 16, 309 – 334.
53. Eisbacher, G. H. and Clague, J. J. (1984), Destructive mass movements in high mountains: hazard and management, *Geol. Survey of Canada, Paper 84–16*, 230.
54. Erickson, B., Birnir, B., Lavallee, D., Center for Complex and Nonlinear Science, UC Santa Barbara, 2010, <http://escholarship.org/uc/item/3r5811tp>.
55. Erickson, B., Birnir, B., and Lavallee, D. (2008), A model for aperiodicity in earthquakes, *Nonlinear Proc. Geoph.*, 15, 1–12.
56. Fabio Vittorio De Blasio. (2011), *Introduction to the Physics of Landslides*, Springer
57. Falsaperla, S., Neri, M., Pecora, E., and Spampinato, S., (2006) Multidisciplinary study of flank instability phenomena at Stromboli volcano, Italy. *Geophys Res Lett.*, DOI:10.1029/2006GL025940.
58. Feder, H. J. S. and J. Feder (1991). Self-organized criticality in a stick-slip process. *Phys. Rev. Lett.* 66(20), 2669–2672.
59. Fookes, P., Lee, E., and Griffiths, J. (2007), *Engineering Geomorphology, Theory and Practice*. RC Press.
60. Gerrard, A.J. (1990), *Mountain environments*. Belhaven Press, London. No. of pages: 317. ISBN 1-85293-049-7
61. Goltz, C. (1998), *Fractal and chaotic properties of earthquakes*, Springer, Berlin, p.189.
62. Gombert J, Bodin P, Savage W, Jackson ME (1995) Landslide faults and tectonic faults, Analogs?—the slumgullion earthflow, Colorado. *Geology* 23:41–44.
63. Grasso, J. and Sornette, D. (1998), Testing Self-organized Criticality by Induced Seismicity, *J. Geophys. Res.* 103, (B12), 29,965–29,987.
64. Harp, E. L. and Jibson, R. W. (1996), Landslides triggered by the 1994 Northridge, California earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 1, part B, S319–S332.
65. Helmstetter, A., D. Sornette, D., Grasso, J.R., Andersen, J.V., S. Gluzm, S., and Pisarenko, V., *J. of Geophys. Res.*, 109, B02409, doi:10.1029/2002JB002160, 2004
66. Hirata, T., (1999), 1/f Fluctuation and a Many-Body Disk Model of Slip Phenomena *J. Phys. Soc. Jpn.* 68, 3195.
67. Hiura, H. and Fukuoka, H. (1993) Fractal structure of spatial distribution of landslides in Hokkaido island, Japan. In: Novosad, S. and Wagner, P. (eds). *Proceedings of the 7th International Conference and Fields Workshop on Landslides in Czech and Slovak Republics*, 28 August-15 September 1993, Balkema, 29-34.
68. Huang, N. E., Wu, Z., A (2008), review on Hilbert-Huang transform : Method and its applications to geophysical studies, *Rev. Geophys.*, 46, RG2006, doi:10.1029/2007RG000228.
69. Hurlimann, M., E. Turon, and J. Marti (1999b), Large landslides triggered by caldera collapse events in Tenerife, Canary Islands, *Phys. Chem. Earth A*, 24(10), 921–924.
70. Israelachvili, J.N. (1992), Adhesion forces between surfaces in liquids and condensable vapours. *Surf. Sci. Rpt.* 14, 109.
71. Iverson, R. M. (2000), Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, v.36, n.7, pp. 1897-1910.
72. Iverson, R. M. (2005), Regulation of landslide motion by dilatancy and pore pressure feedback. *J. Geophys. Res.* 110, F02015.
73. Iverson, R. M., and Schaeffer, D. G., American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, abstract #T22B-07.

74. Jibson, R.W., Prentice, C.S., Borissoff, A., Rogozhin, A., Langer, C.J., 1994. Some observations of landslides triggered by the 29 April 1991 Racha earthquake, Republic of Georgia. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 84, 963–973.
75. Kanamori, H., Brodsky, E. (2004), The physics of earthquakes. *Reports on Progress in Physics*, v.67, 8, 1429-1496.
76. Kantelhardt, J. W.; Zschiegner, S. A.; Koscielny-Bunde, E.; Bunde, A.; Havlin, S. & Stanley, H. E. (2002). A Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. *Physica A* , Vol. 316, pp. 87-114.
77. Kantz H., Schreiber, T. (1997), *Nonlinear time series analysis*, Cambridge, Unt. Press, NY.
78. Kawamura, H. (2006), Spatiotemporal correlations of earthquakes, in *Lecture Notes in Physics*, vol. 705, *Modelling Critical and Catastrophic Phenomena in Geoscience*, edited by P. pp. 223–257
79. Keefer, D.K. (1984 a), Landslides caused by earthquake. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95, 406-421.
80. Keefer, D. K. (1984 b), Rock avalanches caused by earthquakes: source characteristics, *Science*, 223, 1288–1290.
81. Keefer, D.K.(2002), Investigating landslides caused by earthquakes - A historical review *Surveys in Geophysics. Surv. Of Geophys.*, 23, 473-510.
82. Khazai, B. and Sitar, N. (2003), Evaluation of factors controlling ...*Eng. Geol.*, 71, 79–95, 2003.
83. Korner, J. H. (1976), The reach and velocity of catastrophic landslides and flowing snow avalanches, *Rock Mech.*, 8, 225 – 236.
84. Li, T., and M. Li (1985), A preliminary study on landslide triggered by heavy rainfall, *Int. Symp. on Erosion, Debris Flow, and Disaster Prevention*, pp. 317-320, Sept. 3-5, Tsukuba, Japan.
85. Linker, M., Dieterich, J. H., (1992), Effects of variable normal stress on rock friction: Observations and constitutive equations. *J. Geophys. Res.* 97, 4923.
86. Lomnitz-Adler, J., L. Knopoff, G. Martinez-Mekler, (1992), Avalanches and epidemic models of fracturing in earthquakes. *Phys. Rev. A* 45, 2211, 1992.
87. Lursmanashvili, O ., Paatashvili, T., Gheonjian, L., de Rubeis. V., Czechowski, Z., Teisseyre, R. (eds), (2010), *Synchronization and Triggering: from Fracture To Earthquake processes*, 305-323.
88. Matcharashvili, T., Chelidze, T. (2000), complexity in natural structures and dynamics, Tbilisi, (in Georgian)
89. Matcharashvili, T., Chelidze, T., de Rubeis, V., Czechowski, Z., Teisseyre, R. (eds), (2010), *Synchronization and Triggering: from Fracture To Earthquake processes*, 3-23.
90. Matcharashvili, T., Chelidze, T., and Javakhishvili, Z. (2000), Nonlinear analysis of magnitude and interevent time interval sequences for earthquakes of the Caucasian region, *Nonlin. Proc. Geophys.*, 7, 9–19.
91. Matcharashvili, T., Chelidze, T., Peinke, J., (2008), Increase of order in seismic processes around large reservoir induced by water level periodic variation. *Nonlinear Dynamics*, 51, 3, pp. 399-407.
92. Matsukawa, H., Saito, T., (2007), Friction, Stick-Slip Motion and Earthquake, *Lect. Notes Phys.* 705, 169–189.
93. Matsushita, K. , H. Matsukawa and N. Sasaki, (2005), *Solid State Commun.* 136, 51.
94. Matsuzaki, M., and H. Takayasu (1991), Fractal features of the earthquake phenomenon and a simple mechanical model, *J. Geophys. Res.*, 96, 19,925.
95. Mora, P. and Place, D. (1994), Simulation of the Stick-Slip Instability, *Pure Appl. Geophys.*, 143, 61–87.
96. Nagel, S.R., (1992), Instabilities in a sandpile. *Rev. of Mod. Phys.* 64, 32.
97. Nasuno, S., A. Kudrolli and J.P. Gollub, (1997), Friction in Granular Layers: Hysteresis and Precursors. *Phys. Rev. Lett.* 79, 949.
98. Nasuno, S., Kudrolli, A., Bak, A., and Gollub, J.P., (1998), Time-resolved studies of stick-slip friction in sheared granular layers. *Phys.Rev.E.*,58, 2161.

99. Ocakoğlu, F., Gökçeoğlu, C. and Ercanoğlu, M. (2002), Dynamics of a complex mass movement triggered by heavy rainfall: A case study from NW Turkey. *Geomorphology*, 42 (3-4), 329-341.
100. Ochiai, H., H. Yanase, and S. Matsuura (1985), Measurements of earthquake motion and pore water pressure at the Yui landslide area, Proc. 4th Int. Conf. and Field Workshop on Landslides, pp. 203-208, Tokyo, Japan.
101. O'Loughlin, C. L., and A. J. Pearce (1976), Influence of Cenozoic geology on mass movement and sediment yield response to forest removal, North Westland, New Zealand. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 14,41-46.
102. Peinke, J. Matcharashvili, T. Chelidze, T. Gogiashvili, J. Nawroth, A. Lursmanashvili, O. Javakhishvili, Z. (2006) Influence of periodic variations in water level on regional seismic activity around a large reservoir, *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, Volume 156, Issues 1-2, Pages 130-142.
103. Pelletier, J.D., Malamud, B.D., Blodgett, T.B. & Turcotte, D.L. (1997) Scale-invariance of soil moisture variability and its implications for the frequency-size distribution of landslides, *Engineering Geology*, 48, 255-268.
104. Peng, C .K., Havlin, S., Stanley, H.E., Goldberger, A.L.(1995) Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos*, 5, 1, pp. 82 – 87.
105. Perfettini, H., Schmittbuhl, J., Rice, J.R., CPersson, B.N. J., (2000), *Sliding Friction, Physical Principles and Applications*, 2nd edn., Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2000.
106. Pikovsky, A., Rosenblum , M. G., Kurth, J. (2003), *Synchronization*, Cambridge Unt. Press, Cambridge, 411.
107. Pitman, E., Long Le. (2005), A two-fluid model for avalanche and debris flows, *Phil. Trans. R. Soc. A*
108. Pudasaini Shiva P., Hutter K. (2006), *Avalanche dynamics: dynamics of rapid flows of dense granular avalanches*, Springer
109. Pudasaini Shiva P., Fischer J-T. (2016), A new two-phase erosion-deposition model for mass flows, EGU, Vienna, Austria
110. Pudasaini Shiva P. (2012), A general two-phase debris flow model, *JGR*, v. 117
111. Rabinowitz, E., *Proc. Phys. Soc. (London)*, 71, 668-675, 1958
112. Richardson, E. & Marone, C., 1999. Effect of normal stress vibrations on frictional healing, *J. geophys. Res.*, 104(B12), 28 859–28 878.
113. Rouai, M. and Jaaidi, E.B. (2003), Scaling properties of landslides in the Rif mountains of Morocco. *Engineering Geology*, 68, 353-359.
114. Ruina, A.L. (1983), Slip Instability and State Variable Friction Laws. *J. Geophys. Res.* 88, 10359, 1983.
115. Rundle, J.B., Klein, W., Gross, S.J., and Tiampo, K.F. (2000a), Dynamics of seismicity patterns in systems of earthquake faults. In *Geocomplexity and the Physics of Earthquakes*. *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 120 (eds. by J.B. Rundle, D.L. Turcotte, and W. Klein), pp. 127–146 (AGU, Washington, D. C.).
116. Shaw, B.E. (1983, 1994), Complexity in a spatially uniform continuum fault model. *Geophys. Res. Lett.* 21.
117. Schaeffer, D.G., and Iverson, R.M. (2008), Steady and intermittent slipping in a model of landslide motion regulated by pore-pressure feedback. *J. Appl. Math.*, 69, No. 3, 769–786.
- Scholz, C .H.(1990), *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, Cambridge Univ. Press, p. 438.
118. Scholz, C .H., Cowie, P. E. (1990a), Determination of total strain from faulting using slope measurements *Nature* 346, 837 – 839, 1990a.
119. Scholz, C .H. (1998), Earthquakes and friction laws. *Nature*, 391, 37-42.
120. Siegert, S., Friedrich, R., Peinke, J. (1998), Analysis of data sets of stochastic systems *Phys. Lett.A*, 243, 275-280.

121. Sprott, J. C. (2006), *Chaos and Time-Series Analysis* Oxford University Press, New York.
122. Starkel, L. (1976), in *Geomorphology and Climate*, Edited by E. Derbyshire, 203-246, John Wiley & Sons, New York.
123. Stesky, R.M. (1978), Mechanisms of high temperature frictional sliding in Westerly granite, *Can. J. Earth. Sci.*, 15, 361-375.
124. Strogatz, S. (2000), *Nonlinear Dynamics and Chaos*, West. Press.
125. Stroup, D. F., Bohnenstiehl, D. R., et al. (2007), Pulse of the seafloor: Tidal triggering of microearthquakes at 9° 50' N East Pacific Rise. *Geophys. Res. Letters*, Vol. 34, L15301.
126. Svalova V.B. (1992), Mechanical-mathematical models of the formation and evolution of sedimentary basins. *Sci. de la Terre, Ser. Inf. Nancy*, V. 31. P. 201–208.
127. Svalova V.B., “Sergeevskie chtenia”, 2009, 323-326, (in Russian).
128. Szkutnik, J., Kawecka-Magiera, K., Kulakovski, K., (2004), *Transient Processes in Tribology: Proceedings of the 30th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. G. Dalmaz, (Ed.) Elsevier.
129. Sydle, R.C., and Ochiai, H., (2004), *Water resources monograph 18*, AGU, Washington, pp. 312, 2006 Symposium on Tribology. G. Dalmaz, (Ed.) Elsevier.
130. Tse, S., and J. R. Rice (1986), Crustal Earthquake Instability in Relation to the Depth Variation of Frictional Slip Properties, *J. Geophys. Res.*, 91(9), 452–9,472
131. Tsereteli, E., et al. (2011), Natural catastrophic event’s risks in Georgia’s mountain areas and problems of reduction. Tbilisi.
132. Varamashvili, N., Chelidze, T., Lursmanashvili, O. (2008), Phase synchronization of slips by periodical (tangential and normal) mechanical forcing in the spring-slider model. *Acta Geophysica*, 56, 357-371, 2008, DOI: 10.2478/s11600-008-0006-1.
133. Varamashvili, N., Chelidze, T., Chelidze, Z., Chikhladze, V., Tefnadze, D., (2013), Acoustic pulses detecting methods in granular media, *Journal of Georgian Geophysical Society*, v. 16
134. Varamashvili, N., Chelidze, Z., Chelidze, T., (2014), Acoustic pulses generated by landslide activation: laboratory modeling, *Journal of Georgian Geophysical Society*, v. 17
135. Varamashvili, N., Chelidze, T., Devidze, M., Chelidze, Z., Chikhladze, V., Surmava, A., Chargazia, Kh., Tefnadze, D., (2015), Mass-movement and seismic processes study using Burridge-Knopoff laboratory and mathematical models, *Journal of Georgian Geophysical Society*, v. 18
136. Varamashvili, N., Chelidze, T., Amilakhvari, D., Dvali, L., (2016), Laboratory modeling of landslide and seismic processes triggering, *Journal of Georgian Geophysical Society*, v. 19
137. Varamashvili, N., Devidze, M., Chelidze, T., (2015), Laboratory models of seismic and mass-movement process triggering, 26<sup>th</sup> IUGG General Assembly, <http://www.iugg2015prague.com/>
138. Chelidze, Z., Varamashvili, N., Chelidze, T., Chikhladze, V., Cost-effective technology of mass-movement EWS: testing on laboratory models, Workshop: “European Landslide Hazard Maps: Fostering European Harmonization of Slope Movement Hazard Assessment at various spatial scales, CNR-IRPI/Perugia, Italy, 15 – 16 Sept. 2016
139. Varamashvili, N., Chelidze, T., Devidze, M., Chikhladze, V., Surmava, A., Amilakhvari, D., Dvali, L., Seismic process and landslide mechanical triggering, *Caucasus Mountain Forum*, თბილისი, 2016 წ., 28-30 ნოემბერი, <http://caucasus-mt.net/events/sub-page/24>
140. Varamashvili, N., Chelidze, T., Chikhladze, V., Chelidze, Z., Seismic and mass-movement processes stimulation modeling, *Schatzalp Workshop on Induced Seismicity*, დავოსი, შვეიცარია, 2017 წ., 14-17 მარტი, <http://www.seismo.ethz.ch/en/research-and-teaching/schatzalp-workshop/>
141. Varga P, Grafarend E (1996). Distribution of the lunisolar tidal elastic stress tensor components within the Earth’s mantle, *Phys. Earth Planetary Int.*, 93 (3-4): 285-297.

142. Vargas, C .A., Basurto, E., Guzmán-Vargas, L., Angulo-Brown, F. (2008), Sliding size distribution in a simple spring-block system with asperities. *Physica A*, 387, 13, 3137-3144, 2008.
143. Varnes, D.J., Schuster RL, Krizek RJ (eds) (1978), *Landslides – analysis and control*, National Academic Sciences, Washington, D.C ., Transportation Research Board Specification Report 176, pp. 11–33.
144. Voight, B., and Pariseau, W.G. (1978), *Rockslides and Avalanches, I. Natural phenomena*, Dev. Geotech. Eng. V. 144, edited by B.Voight, pp. 1-67, Elsevier, New York.
145. Voight, B. (1988b), Materials science laws applied to time forecast of slope failure, in *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, vol. 3, edited by C. Bonnard, pp. 1471 – 1472, A. A. Balkema, Brookfield, Vt.
146. Voight, B. A. (1989), A relation to describe rate-dependent material failure, *Science*, 243, 200 – 203.
147. Voisin, C. (2002), Dynamic triggering of earthquakes: The nonlinear slipdependent friction case, *J. Geophys. Res.*, 107(B12), 2356, doi:10.1029/ 2001JB001121.
148. Voisin, C., F. Cotton, and S. Di Carli (2004), A unified model for dynamic and static stress triggering of aftershocks, antishocks, remote seismicity, creep events, and multisegmented rupture, *J. Geophys. Res.*, 109, B06304, doi:10.1029/2003JB002886.
149. Vikulin, A. V., In: Teisseyre R, Takeo M, Majewski E (eds), (2006), *Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Chap. 20, 273-291.
150. Wright, C. & Mella, A., 1963. Modifications to the soil pattern of south-central Chile resulting from seismic and associated phenomena during the period May to August 1960, *Bull. seism. SOC. Am.*, 53, 1367-1402.
151. Xia, J., Gould, H., Klein, W., Runde, J.B., *Phys. Rev. E* 77, 031132, 2008.
152. Xia, J., H. Gould, W. Klein and J.B. Rundle, *Phys. Rev. Lett.* 95, 248501, 2005.
153. Yeend, W.E. (1973), Slow-sliding slumps, Grand Mesa, Colorado: *The Mountain Geologist*, v. 10, p. 25–28.
154. Yokoi, Y., Carr, J.R. & Watters, R.J. 1996. Analysis of landslide block development process using its fractal character. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology* 37(1), 29-38.
155. Young D, Zürn W (1979) Tidal triggering of earthquakes in the Swabian Jura? *J Geophys* 45:171–182.
156. Zon-Yee Yang and Yen-Hung Lee, (2006), The fractal characteristics of landslides induced by earthquakes and rainfall in central Taiwan IAEG, Paper Number 48.
157. Savage, S. B. & Hutter, K. 1989 The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *J. Fluid Mech.* 199, 177–215
158. Hutter, K., Siegel, M., Savage, S. B. & Nohguchi, Y. 1993 Two-dimensional spreading of a granular avalanche down an inclined plane. I. Theory. *Acta Mech.* 100, 37–68.
159. J. R. Rice and J.-c. Gu, "Earthquake Aftereffects and Triggered Seismic Phenomena", *Pure and Applied Geophysics*, 121, 1983, pp. 187-219.
160. Dixon, N. Hill, R. & Kavanagh, J. 2003. Acoustic emission monitoring of slope instability: Development of an active wave guide system. *Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering Journal*, 156, 2, 83-95.
161. Koerner, R.M. McCabe, W.M. & Lord, A.E. 1981. Acoustic emission behaviour and monitoring of soils. In *Acoustic Emission in Geotechnical Practice*, ASTM STP 750.
162. Varamashvili N., Chelidze T., Devidze M., Chikhladze V., Chelidze Z., (2017), Laboratory and mathematical modeling of natural catastrophe, *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, (in review)
163. ნ. ვარამაშვილი, თ. ჭელიძე, ზ. ჭელიძე, (2014), აკუსტიკური ემისია მეწყრის გააქტიურების დროს, გეოფიზიკის აქტუალური პრობლემები (საერთაშორისო კონფერენცია), თბილისი



164. დ. ამილახვარი, ლ. დვალი, (2016), მასების მოძრაობის და სეისმური პროცესის ლაბორატორიული მოდელირება, ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მიხეილ ნოდუას სახელობის გეოფიზიკის ინსტიტუტის შრომების კრებული, ტ. LXVI

წინასიტყვაობა. ....	3
შესავალი. ....	6
თავი 1 მეწყრები: მიმოხილვა . ....	9
.	
1.1 პრობლემის აქტუალობა. მეწყერი როგორც გეოფიზიკური საშიშროება . ....	9
1.2 მეწყრების ფიზიკური ასპექტები. მეწყრების ტიპები. ....	17
1.3 გრავიტაციული მასათა მოძრაობის ფიზიკური კლასიფიკაცია. ფერდობის მდგრადობა . ....	19
1.4 უსაფრთხოების ფაქტორის (FS) გამოთვლა. ....	22
1.5 ნავიე-სტოქსის განტოლება. არა-ნიუტონის სითხეები - ღვარცოფი . ....	23
თავი 2 სტიკ-სლიპის (არათანაბარი ხახუნის) მოდელები: პერიოდული ზემოქმედების მოდება. ....	28
2.1 ძირითადი ექსპერიმენტული მონაცემები . ....	29
2.2 სტიკ-სლიპის ფიზიკა/მექანიკა . ....	32
2.3 დიტრიხ-რუინას განტოლება . ....	33
2.4 ბურიჯ-კნოპოვის მოდელი . ....	34
2.5 რიცხვითი მოდელების შედეგები . ....	35
თავი 3 ძიების ელექტრული მეთოდები. ....	37
3.1 ბუნებრივი ელექტრული ველის (ბევ) მეთოდი . ....	37
3.2 საველე გაზომვები და დამუშავების მეთოდები. ....	38
3.3 წინააღმდეგობის მეთოდი . ....	40
3.4 ვერტიკალური ელექტრული ზონდირება (ვეზ). ელექტრული პროფილირება .	42
თავი 4 მონაცემების დამუშავების წრფივი და არაწრფივი მეთოდები . ....	48
4.1 ფურიეს გარდაქმნა(სიმძლავრის სპექტრი) . ....	48
4.2 ავტოკორელაცია. ....	49
4.3 ჰარსტის კომპონენტა. ....	49
4.4 ლიაპუნოვის ექსპონენტები. ....	50
4.5 ლორენცის ატრაქტორი. ....	51
4.6 ექსპერიმენტული მონაცემების ზოგიერთი მახასიათებლის გამოთვლა	52
თავი 5 ლაბორატორიული დანადგარები. ....	55
5.1 დანადგარი ბაზალტის ფილაზე ნიმუშების ჰორიზონტალური გადაადგილების შესასწავლად (ბურიჯ-კნოპოვის დანადგარი). ....	55
5.2 გაწვევის ძალის გამზომი მოწყობილობა. ....	56
5.3 დანადგარი დახრის ცვლადი კუთხის მქონე ბაზალტის ფილაზე ნიმუშების გადაადგილების შესასწავლად (ტრიგერირების დანადგარი) . ....	57

5.4 დანადგარი დახრის ცვლადი კუთხის მქონე დახრილ ზედაპირზე ფხვიერი მასალების გადაადგილების შესასწავლად (მეწყრის მოდელირების დანადგარი). . . . .	59
5.5 ექსპერიმენტული შედეგების რეგისტრაციის სისტემები. . . . .	60
5.6 საველე გეოფიზიკური კვლევების სისტემები. . . . .	65
თავი 6 მეწყრის ლაბორატორიული მოდელირების და მონიტორინგის აკუსტიკური სისტემა . . . . .	67
6.1 აკუსტიკური ემისია მეწყრის გააქტიურების დროს. პრობლემის აღწერა. . . . .	67
6.2 მეწყრის მზადების ფაზის აკუსტიკური ფონის შესწავლა. . . . .	68
6.3 ექსპერიმენტული ნაწილი . . . . .	72
6.4 შედეგების ანალიზი. . . . .	73
თავი 7 მეწყრული პროცესების მოდელირების და ტრიგერირების კვლევები. . . . .	75
7.1 სტიკ-სლიპის მოვლენის, ტრიგერირების და სინქრონიზაციის შესწავლა ჰორიზონტალურ დანადგარზე მექანიკური ვიბრაციის პირობებში. . . . .	75
7.2 ტრიგერირების მოვლენის შესწავლა დახრილ დანადგარზე ელექტრული ველით ზემოქმედების პირობებში. . . . .	82
7.3 ტრიგერირების მოვლენის შესწავლა დახრილ დანადგარებზე მექანიკური ვიბრაციით ზემოქმედების და გაწყლიანების ცვლის პირობებში. . . . .	89
7.4 მათემატიკური და რიცხვითი მოდელირება . . . . .	94
7.5 ზამბარა-მცოცის მოდელში პერიოდული ზემოქმედების მნიშვნელობის შეფასება . . . . .	100
7.5.1 საექსპერიმენტო დანადგარი. . . . .	101
7.5.2 ბერის წნევის ტესტი. . . . .	103
7.5.3 კალიბრება ქანქარით. . . . .	105
თავი 8 მეწყრების გეოფიზიკური კვლევები. საველე სამუშაოები. . . . .	108
8.1 ხოკოს მეწყრის კვლევა ვერტიკალური ელექტრული ზონდირების (ვეზ) და ბუნებრივი ველის მეთოდით . . . . .	108
8.2 გომბორის მეწყრის კვლევა ვეზ-ის მეთოდით და უსაფრთხოების ფაქტორის (FS) შეფასება. . . . .	110
8.3 მუხათგვერდის მეწყრის კვლევა ვეზ-ის მეთოდით და ელექტრული ჭრილის აგება და დასრიალების ზედაპირის განსაზღვრა . . . . .	113
8.4 ლოუბნის მეწყრის კვლევა ვეზ-ის მეთოდით და უსაფრთხოების ფაქტორის (FS) შეფასება. . . . .	115
დასკვნა. . . . .	116
ლიტერატურა. . . . .	123

## Table of Content

<b>Preface</b> .....	3
<b>Introduction.</b> .....	6
<b>Chapter 1</b> Landslides: review .....	9
1.1 Topicality of the problem. Landslides as a Geophysical Hazard .....	9
1.2 Physical Aspects of Landslides. Landslides types .....	17
1.3A Physical Classification of Gravity Mass Movements. Slope stability .....	19
1.4 Factor of Safety (FS) calculation .....	22
1.5 Navier-Stokes equation. Non-Newtonian fluids, debris-flows. ....	23
<b>Chapter 2</b> Stick-slip models: imposing of periodic influence. ....	28
2.1 Basic experimental data. ....	29
2.2 Physics/mechanics of stick-slip. ....	32
2.3 Dieterich-Ruina equation .....	33
2.4 Burridge-Knopoff model. ....	34
2.5 Numerical modelling results .....	35
<b>Chapter 3</b> Electrical survey methods. ....	37
3.1 The method of the natural electric field. ....	37
3.2 Field measurements and data processing methods. ....	38
3.3 Electrical resistivity methods. ....	40
3.4 Vertical electrical sounding (VES). Electrical profiling. ....	42
<b>Chapter 4</b> Linear and nonlinear methods of data processing .....	48
4.1 The Fourier transform (power spectrum). ....	48
4.2 Autocorrelation .....	49
4.3 Hurst exponent .....	49
4.4 Lyapunov exponents .....	50
4.5 Lorentz attractor .....	51
4.6 Calculation of some characteristics of experimental data .....	52
<b>Chapter 5</b> Laboratory setups .....	55
5.1 Equipment for studying the horizontal movement of samples on a basalt plate (Burridge-Knopoff installation) .....	55
5.2 Device for pulling force measuring .....	56
5.3 Equipment for studying the movement of samples on a basalt plate with a variable angle of inclination (Setting for triggering) .....	57
5.4 An installation for studying the movement of bulk solids over an inclined surface	

with a variable angle of inclination (equipment for Landslide Modeling) . . . . .	59
5.5 Systems for experimental data registration . . . . .	60
5.6 Systems for field geophysical research . . . . .	65
<b>Chapter 6</b> An acoustic system for laboratory modeling and monitoring of landslides . . . . .	67
6.1 Acoustic emission by landslides activation. Description of the problem . . . . .	67
6.2 Study of the acoustic background in the landslide preparation phase . . . . .	68
6.3 Experimental modeling. . . . .	72
6.4 Analysis of the results. . . . .	73
<b>Chapter 7</b> Studies of modeling and triggering of the landslide processes . . . . .	75
7.1 The study of stick-slip phenomena, triggering and synchronization on a horizontal installation in conditions of mechanical vibrations . . . . .	75
7.2 The study of the phenomena of triggering on an inclined installation under the conditions of an electric field . . . . .	82
7.3 The study of the phenomena of triggering on an inclined installation under conditions of mechanical vibration and different conditions of watering. . . . .	89
7.4 Mathematical and numerical modeling . . . . .	94
7.5 Estimation of the value of the periodic vibration on the spring-slider model . . . . .	100
7.5.1 Experimental device . . . . .	101
7.5.2 Sound pressure test . . . . .	103
7.5.3 Calibration with Pendulum . . . . .	105
<b>Chapter 8</b> Geophysical survey of landslides. Field works . . . . .	108
8.1 The study of the Hoko landslide by vertical electric sounding (VES) and natural field methods . . . . .	108
8.2 A study of the Gombor landslide by the VES method and an assessment of the safety factor (FS) . . . . .	110
8.3 The study of the Mukhatgverdi landslide by the VES method, the construction of an electrical profiling and the determination of a slip surface . . . . .	113
8.4 The study of the Goubani landslide by the VES method and the safety factor assessment (FS) . . . . .	115
Conclusion . . . . .	119
References. . . . .	123

## Оглавление

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>Введение</b> .....	6
<b>Глава 1 Оползни: обзор</b> .....	9
1.1 Актуальность проблемы. Оползень как геофизическая опасность .....	9
1.2 Физические аспекты оползней. Типы оползней .....	17
1.3 Физическая классификация движения гравитационных масс. Стабильность склона ..	19
1.4 Вычисление фактора безопасности (FS) .....	22
1.5 Уравнение Навье-Стокса. Не-Ньютоновские жидкости – сели .....	23
<b>Глава 2 Модели стик-слипа (неравномерного трения): приложение периодического воздействия</b> .....	28
2.1 Основные экспериментальные данные .....	29
2.2 Физика/механика стик-слипа .....	32
2.3. Уравнение Дитриха-Руина .....	33
2.4 Модель Буриджа-Кнопова .....	34
2.5 Результаты цифрового моделирования .....	35
<b>Глава 3 Методы электроразведки</b> .....	37
3.1 Метод естественного электрического поля (ЕЭП) .....	37
3.2 Полевые измерения и методы обработки данных .....	38
3.3 Метод сопротивления .....	40
3.4 Вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ). Электрическое профилирование ..	42
<b>Глава 4 Линейные и нелинейные методы обработки данных</b> .....	48
4.1 Преобразование Фурье (спектр мощности) .....	48
4.2 Автокорреляция .....	49
4.3 Компонента Харста .....	49
4.4 Экспоненты Ляпунова .....	50
4.5 Атрактор Лоренца .....	51
4.6 Вычисление некоторых характеристик экспериментальных данных .....	52
<b>Глава 5 Лабораторные установки</b> .....	55
5.1 Установка для изучения горизонтального перемещения образцов по базальтовой плите (Установка Буриджа-Кнопова) .....	55
5.2 Устройство для измерения силы тяги .....	56
5.3 Установка для изучения перемещения образцов по базальтовой плите с переменным углом наклона (Установка для триггерирования) .....	57
5.4 Установка для изучения перемещения сыпучих масс по наклонной поверхности с переменным углом наклона (Установка для моделирования оползней)	59
5.5 Системы для регистрации экспериментальных данных .....	60
5.6 Системы для полевых геофизических исследований .....	65

<b>Глава 6</b> Акустическая система для лабораторного моделирования и мониторинга оползней. ....	67
6.1 Акустическая эмиссия при активизации оползней. Описание проблемы. ....	67
6.2 Изучение акустического фона в фазе подготовки оползня. ....	68
6.3 Экспериментальная часть. ....	72
6.4 Анализ результатов. ....	73
<b>Глава 7</b> Исследования моделирования и триггерирования оползневых процессов. ....	75
7.1 Изучение явлений стик-слипа, триггерирования и синхронизации на горизонтальной установке в условиях механических вибраций. ....	75
7.2 Изучение явлений триггерирования на наклонной установке в условиях воздействия электрического поля. ....	82
7.3 Изучение явлений триггерирования на наклонных установках в условиях воздействия механических вибраций и при разных условиях обводнения. ....	89
7.4 Математическое и численное моделирование. ....	94
7.5 Оценка величины периодического воздействия в модели пружина-блок	100
7.5.1 Экспериментальная установка. ....	101
7.5.2 Тест звукового давления. ....	103
7.5.3 Калибровка маятником. ....	105
<b>Глава 8</b> Геофизическое исследование оползней. Полевые работы. ....	108
8.1 Исследование оползня Хоко методами вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и естественного поля. ....	108
8.2 Исследование Гомборского оползня методом ВЭЗ и оценка фактора безопасности (FS).. ....	110
8.3 Исследование Мухатгвердского оползня методом ВЭЗ, построение электрического разреза и установление поверхности соскальзывания. ....	113
8.4 Исследование Гоубанского оползня методом ВЭЗ и оценка фактора безопасности (FS).. ....	115
<b>Заключение.</b> ....	121
<b>Литература</b> ....	123



ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო  
უნივერსიტეტი

IVANE JAVAKHISHVILI TBILISI STATE UNIVERSITY

ТБИЛИССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. И. ДЖАВАХИШВИЛИ

მიხეილ ნოდიას სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტის შრომები, ტ. LXVI, 2016

Transactions of Mikheil Nodia Institute of Geophysics, vol. LXVI, 2016

Труды Института геофизики им. Михаила Нодиа, т. LXVI, 2016

ISSN 1512-1135

<http://dspace.gela.org.ge/handle/123456789/254>

თბილისი - Tbilisi - Тбилиси

2017