



Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје
Градежен факултет – Скопје
Школа за докторски студии
Студиска програма по Градежништво
Подпрограма Геотехника



МОДЕЛИРАЊЕ НА ХИДРОМЕХАНИЧКОТО ОДНЕСУВАЊЕ НА НЕЗАСИТЕНИ ПОЧВИ И НЕСТАБИЛНОСТ НА КОСИНИ ПРЕДИЗВИКАНА ОД ВРНЕЖИ

докторска дисертација

Кандидат,
м-р Сусинов Бојан

Ментор,
Проф. д-р Јосиф Јосифовски

Скопје, мај 2021 година

ПОДАТОЦИ И ИНФОРМАЦИИ ЗА КАНДИДАТОТ

Име и презиме	Бојан Сусинов
Датум и место на раѓање	04.10.1987 год., Штип, Македонија
Назив на завршени студии, студиска програма и година на завршување	Прв циклус на студии на Градежен факултет во Скопје, геотехника, 2009 година Втор циклус на студии на Градежен факултет во Скопје, геотехника, 2013 година

ИНФОРМАЦИИ ЗА ДОКТОРСКИОТ ТРУД

Назив на студии, студиска програма	Трет циклус на студии на Градежен факултет во Скопје, студиска програма по градежништво, подпрограма геотехника
Наслов на трудот на македонски и англиски јазик	Моделирање на хидромеханичкото однесување на незаситени почви и нестабилност на косини предизвикана од врнежи Hydromechanical modelling of unsaturated soil and rainfall induced slope instability
Факултет на кој е пријавен трудот	Градежен факултет во Скопје
Датум на пријава на трудот	25.5.2017 год.
Комисија за оценка на подобност на трудот и кандидатот	Проф. д-р Милорад Јовановски Вонр. проф. д-р Јосиф Јосифовски Доц. д-р Јован Папиќ
Комисија за одбрана на трудот	Проф. д-р Љупчо Димитриевски Проф. д-р Јосиф Јосифовски Вонр. проф. д-р Јован Папиќ Проф. д-р Влатко Шешов Вонр. проф. д-р Војкан Јовичиќ
Ментор	Проф. д-р Јосиф Јосифовски

БЛАГОДАРНОСТ

Најпрво би сакал да му се заблагодарам на мојот ментор проф. д-р Јосиф Јосифовски кој ме водеше низ процесот на истражување и ми даде можност да работам во една нова и актуелна област на истражување.

Сакам да му се заблагодарам на проф. д-р Милорад Јовановски со чија помош и залагање ги започнав студиите на трет циклус, како и на членовите на комисијата за оценка на трудот кои несебично ми даваа поддршка и сугестии за поквалитетно истражување.

Благодарност до членовите и соработниците на Катедрата за геотехника при Градежниот факултет во Скопје со чија финансиска помош, поддршка и конструктивни сугестии ги исполнивме целите на истражувањето. Овде морам да го издвојам целокупниот ангажман на колегата Сеад Абазии кој ме подржуваше во секојдневните предизвици. Благодарност и до колегите од Катедрата за метални конструкции за поддршката при изработка на физичкиот модел.

Особена благодарност до тимот на Националниот институт за градежништво на Словенија ZAG предводен од доц. д-р Станислав Ленарт кои ми овозможија престој и истражувачка работа на нивниот институт каде се изработени дел од испитувањата.

Би сакал да му се заблагодарам на тимот на GeoWILD MAK од Скопје, предводен од д-р Александар Постоловски за несебичниот придонес и професионален пристап при мерењата на физичкиот модел.

Без поддршката од семејството, овој процес на студирање и истражување не може да заврши успешно за што неизмерно сум им благодарен, особено на мојата сопруга Фросина и мојата ќерка Лана.

Скопје, 28.5.2021 год.

Бојан Сусинов

АПСТРАКТ

Интензивните врнежи како резултат на атмосферските влијанија, климатските варијации и промени сè почесто се гледаат како причина за појава на нестабилност, свлекување или значителна ерозија кај природните и вештачките косини. Преку инфилтрацијата на атмосферската вода, се влијае на природната влажност на материјалот што ја намалува почетната сукција и крајно ја редуцира јакоста на смолкнување кај незаситената почва. Повеќе трудови од оваа област укажуваат дека оваа редукција на јакоста, најчесто изразена преку коефициентот на сигурност, може значајно да се намали правејќи стабилните косини да бидат условно стабилни или нестабилни.

Оттука, се препорачува дека во анализата на стабилност кај косините потребно е да се вклучи влијанието на врнежите, а во литературата овој феномен се опишува како интеракција на почвата и атмосферските влијанија. Затоа, оваа докторска дисертација ќе презентира еден напреден концепт за анализа на стабилност кај косините со кој се зема предвид механичкото, хидрауличкото и термалното однесување на почвите како мултифазен систем во зависност од времето. За негова примена, покрај вообичаените механички, потребно е да се утврдат и хидраулички карактеристики на почвата, товарите од врнежи кои во оваа студија се добиени преку статистичка обработка на измерени податоци, како и соодветна мерна опрема со која ќе се утврди промената на клучните параметри кои имаат влијание врз локалната и глобалната стабилност на косините.

Основна цел на оваа докторска дисертација е да даде свој придонес во разбирањето на хидромеханичкото однесување на незаситени песокливи почви и нивното влијание врз стабилноста на косини предизвикана од интензивни врнежи преку еден холистички пристап кој комбинира теоретски, лабораториски, експериментални и нумерички истражувања.

Како референтен материјал во ова истражување се користи материјалот од хидројаловишната брана Тополница која е дел од рудникот Бучим во Радовиш. Стандардните испитувања покажуваат дека се работи за прилично униформен материјал карактеризиран како прашинест песок. Механичките и хидрауличните карактеристики се утврдени лабораториски преку соодветни испитувања кои се сметаат за клучни во изборот на хидрауличниот и конститутивниот модел со кои се симулира заедничкото хидромеханичкото однесување на незаситената почва.

Определувањето на меродавниот интензитет на врнежи и неговото времетраење е добиено преку статистичка анализа на измерените врнежи за разгледуваното подрачје која дефинира одредена веројатност на појава на максималните врнежи и нивни карактеристични времетраења.

За дефинирање на хидромеханичкото однесување на незаситената почва спроведено е експериментално истражување на физички модел на идеална косина во голем размер која е изложена на интензивни врнежи. Моделот е инструментиран со сензори за мерење на промените на влажноста, сукцијата, порниот и тоталниот земјен притисок и деформациите. Резултатите од ова испитување помогнаа подобро да се разбере влијанието на инфилтрираната вода врз сукцијата и развојот на порниот притисок. После скоро 10 часовни врнежи со интензитет од 35 mm/h косината целосно се заситува што доведува до нејзин целосен колапс. Меѓутоа најзначајните сознанија кои се добија од испитувањето се во насока на дефинирање на механизмот и влијанијата кои водат кон

терминалната состојба, а од него се заклучи дека и филтрацијата на водата и суфозијата, покрај сукцијата и порниот притисок, влијаат врз дестабилизирањето и појавата на лом во косината.

Согласно согледувањата добиени од испитувањето на физичкиот модел, во следниот чекор е извршено нумеричко моделирање на косината со примена на МКЕ. Основна задача на ова испитување беше да се изврши калибрација на теоретскиот модел преку претходно утврдените вредности и резултати. За таа цел спроведена е заедничка пресметка на деформациите и филтрацијата (fully coupled flow-deformation analysis) со временски дефинирани гранични услови и врнежи. Предноста на нумеричкото моделирање е искористена за да се формира целосна слика за развојот на хидромеханичките променливи и во воспоставување на нивната врска согласно теоријата на Бишоп во дефинирањето на ефективниот притисок која ја вклучува сукцијата и степенот на заситеност на почвата. За механичко моделирање користен е наједноставниот Мор-Кулонов закон, а акцентот е ставен на дефиницијата на хидрауличкиот модел преку примена на кривата на задржување на почвена влажност (SWRC) и функцијата на хидрауличната спроводливост како зависност на сукцијата и коефициентот на водопропусност. Анализата на стабилност извршена преку редукација на јакостните параметри на почвата покажуваат фактор на сигурност близок до граничната состојба на рамнотежа на косината, со фактор на сигурност од 1.037.

Конечно, резултатите од физичкиот и нумеричкиот модел се споредени помеѓу себе и истите успешно со голема точност го прикажуваат однесувањето на материјалот и дефинираат степенот на сигурност на косината. Резултатите од нумеричката анализа во целост ги потврдија оние од физичкиот модел со минимални отстапувања на основните параметри како што се развојот на деформациите, порниот притисок, сукција и влажноста во тек на време. Споредбената анализа дава клучен придонес за подобрување на постоечките конститутивни модели за заедничката анализа на деформации и течење.

На крајот, сите претходно утврдени сознанија од моделските испитувања на идеалната косина се искористени за да се анализира стабилноста на хидројаловишната брана Тополница. Добиените резултати иако се задоволителни во смисла на глобалната стабилност укажуваат на значајното влијание на инфилтрираната вода која предизвикува релативно брзо заситување на површинскиот материјал и дефинира потенцијало нестабилни зони што е видно и преку околу 15 % редукација на коефициентот на сигурносот за дадената геометрија.

Како генерален заклучок треба да се истакне дека добиени се основани резултати кои ја потврдуваат првично поставената теза дека врнежите може да имаат значајно влијание врз дестабилизацијата на приповршинските слоеви кај косините на кои почетно се јавува ерозија, што преминува во развој на локални нестабилности кои конечно завршуваат со глобален лом и свлекување на теренот. Од истражувањето може да се заклучи дека времетраењето на врнежите и почетниот степен на заситеност на материјалот има значајно влијание, па доколку истите се променат и доведат до целосно заситување на површинските слоеви на косината ќе предизвикаат течење на неинфилтрираната вода по косината и формирање на локални јаружења, како што во минатото се забележани на самата брана по интензивни врнежи. Добиените резултати укажуваат дека глобалниот степен на сигурност кај косините после еден критичен настан дефиниран со меродавен интензитет и времетраење на врнежи може да доведе до негово намалување за 10% до 30% во зависност од геометријата и материјалот на косината.

Исто така, покрај заклучоците се презентираат и одредни препораки кои преку вклучување на ефектите од атмосферските влијанија имаат за цел да го подигнат нивото на проектирање на инженерските косини во иднина што генерално ќе допринесе за постабилни и побезбедни косини кај инфраструктурните објекти.

Основниот придонес на оваа докторска дисертација се гледа во оценката на влијанието на инфилтрираната вода врз влажноста, сукцијата и евапотранспирацијата кои, како што беше согледано, имаат значајно влијание врз стабилноста на косините кога се изложени на интензивни врнежи.

Клучни зборови: Врнежи; косина; незаситени почви; стабилност; ерозија; физички модел; нумерички модел.

ABSTRACT

Intense rainfalls, as a result of an atmospheric impact, climate variations, and changes, are often seen as a cause for instability, landslides, or significant erosion of natural and engineering slopes. Through the infiltration of atmospheric water, the natural moisture of the material is affected, which reduces the initial suction and finally reduces the unsaturated soil shear strength. Several papers in this area indicate that this reduction in strength, most commonly expressed through the safety factor, can be significantly reduced by making stable slopes conditionally stable or unstable.

Hence, it is recommended that it is necessary to include the impact of precipitation in the slope stability analysis. In the literature, this phenomenon is described as soil-atmosphere interaction. Therefore, this dissertation will present an advanced concept for slope stability analysis that takes into account the time-dependent mechanical, hydraulic, and thermal behavior of soils as a multiphase system. For its application, in addition to the usual mechanical, it is necessary to determine the hydraulic characteristics of the soil, precipitation loads, here obtained through statistical processing of measured data, as well as appropriate measuring equipment that will determine the change of key parameters that have an impact on local and global slope stability.

The main goal of this doctoral dissertation is to contribute to the understanding of the hydromechanical behavior of unsaturated sandy soils and their impact on rainfall-induced slope instability through a holistic approach that combines theoretical, laboratory, experimental and numerical research.

The reference material in this research is one from the tailings dam Topolnica which is part of the mine Buchim in Radovish. Standard tests show that this is a uniform material characterized as silty sand. The mechanical and hydraulic characteristics are determined in the laboratory through appropriate tests that are considered crucial in the selection of the hydraulic and constitutive models that simulate the coupled hydromechanical behavior of unsaturated soil.

The determination of the relevant rainfall intensity and its duration is obtained through statistical analysis of the measured rainfall for the area for a certain probability of occurrence of maximum rainfall and its characteristic durations.

To define the hydromechanical behavior of unsaturated soil, an experimental study of a large-scale physical model of an ideal slope exposed to intense rainfall was conducted. The model was instrumented with sensors to measure changes in moisture, suction, pore, and total soil pressure and deformation. The results of this study lead to a better understanding of the impact of infiltrated water on suction and the development of pore pressure. After almost 10 hours of precipitation with an intensity of 35 mm / h, the slope is completely saturated, which leads to its complete collapse. However, the most important findings from the study define the mechanism and the impacts that lead to the terminal state. It can be concluded that water filtration and suffosion, in addition to suction and pore pressure, lead to destabilization and slope failure.

According to the observations obtained from the physical model, in the next step, numerical modeling of the slope was performed by using FEM. The main task of this test was to calibrate the theoretical model through previously determined values and results. For that purpose, a fully coupled flow-deformation analysis with time-dependent boundary conditions and precipitation

was conducted. The advantage of numerical modeling is used to form a complete view of the development of hydromechanical variables and to establish their relationship according to Bishop's theory in defining the effective stress which involves the suction and the degree of saturation. The simplest Mohr-Coulomb law is used for mechanical modeling, and the emphasis is on the definition of the hydraulic model by applying the soil retention curve (SWRC) and the function of hydraulic conductivity as a function of suction and water permeability coefficient. Stability analysis performed by reducing the soil strength parameters shows a safety factor close to the slope equilibrium limit state, with a safety factor of 1.037.

Finally, the results of the physical and numerical models are compared with each other and they successfully show the behavior of the material with great accuracy and define the degree of reliability of the slope. The results of the numerical analysis fully confirmed those of the physical model with minimal deviations from the basic parameters such as the development of deformations, pore pressure, suction, and moisture content over time. The comparative analysis makes a key contribution to improving the existing constitutive models for coupled flow-deformation analysis.

All previously established findings from the model research of the ideal slope are used to analyze the stability of the Topolnica tailings dam. The results obtained, although satisfactory in terms of global stability, indicate the significant impact of infiltrated water which causes relatively rapid saturation of the material and defines potentially unstable zones which is visible through about 15% reduction of the safety factor for a given geometry.

As a general conclusion, it should be noted that the obtained results confirm the initially set thesis that the role of precipitation can have a significant impact on destabilization of the surface layers at slopes where initial erosion occurs, leading to local instability which eventually ends in global fracture and landslides. It can also be concluded that the duration of precipitation and the initial degree of saturation have a significant impact, so if they change and lead to complete saturation of the surface layers of the slope, they will cause runoff water down the slope and formation of local gullies, as it was observed on the dam after heavy rainfall in the past. The results indicate that the global degree of slope safety after a critical event defined by the relevant intensity and duration of precipitation can lead to a reduction of 10% to 30% depending on the geometry and the material of the slope.

In addition to the conclusions, certain recommendations are presented which, by including the effects of atmospheric influences, aim to raise the level of design of engineering slopes in the future, which will generally contribute to more stable and safer infrastructure slopes.

The main contribution of this doctoral dissertation is seen in the assessment of the impact of infiltrated water on moisture, suction, and evapotranspiration which, as it was seen, have a significant impact on the slope stability exposed to heavy rainfall.

Keywords: Rainfall; slope; unsaturated soils; stability; erosion; physical model, numerical model.

ЛИСТА НА СИМБОЛИ

θ	волуметриска влажност
ψ	сукција
S	степен на заситеност
S_{eff}	ефективен степен на заситеност
S_{res}	резидуален степен на заситеност
S_{sat}	заситен степен на заситеност
H	воден столб (притисок)
z	длабочина
i	капацитет на инфилтрација на почвата
I	инфилтрација
q	интензитет на врнежи (проток)
k	коефициент на водопропусност на почвата
t	време
G	гравитациона константа
H_R	релативна влажност
R	универзална гасна константа
T	температура
M	маса
V	волумен
L	должина
ρ	густина
ω	гравиметриска влажност
u	порен притисок
G	гравитациона константа
g	земјено забрзување
τ	јакост на смолкнување (тангенцијално напрегање)
σ	тотално (вкупно) напрегање
σ'	ефективно напрегање
c	кохезија
ϕ	агол на внатрешно триење
ε	дилатација

D_r	релативната збиеност
p	притисок
p_{active}	активен порен притисок
p_{steady}	порен притисок во мирување
p_{water}	водени порен притисок
p_{excess}	порен надпритисок
χ	коефициент на ефективно напрегање
γ	волуменска тежина
C_c	индекс на компресија
e	коефициент на порозност
ν	Поасонов коефициент
K_r	релативна хидраулична спроводливост
R_{inter}	Коефициент на интеракција

ЛИСТА НА СЛИКИ

Слика 1. Пред и потоа. Свлекување на низводната косина на браната во 2019 година	1
Слика 2. Лом на низводната косина на хидројаловишна брана бр. 4 во рудникот Саса Македонска Каменица (Сусинов, септември 2020 година)	1
Слика 3. Свлекување на косина на автопат Миладиновци – Штип, ориентација северозапад (Сусинов, мај 2019 година)	2
Слика 4. Изразена ерозија на косини од автопатот Миладиновци – Штип, ориентација североисток (Сусинов, октомври 2020 и март 2021 година)	2
Слика 5. Свлекување на косини од експресен пат Штип – Радовиш (Сусинов, јуни 2020 година)	2
Слика 6. Карта на свлечишта на Македонија (Peshevski, et al., 2015)	3
Слика 7. Карта на подрачја подложни на појава на свлечишта во Македонија (Milevski & Dragicevic, 2018).....	3
Слика 8. Состав на незаситена почва (трофазен систем).....	6
Слика 9. Фази на почвен медиум при инфилтрација на вода како дел од хидролошкиот процес.....	7
Слика 10. Ефект на атмосферските влијанија врз однесувањето на незаситените почви .	8
Слика 11. Интензитет на врнежи и капацитет на инфилтрација на почвата	9
Слика 12. Илустрација на моделот на (Green & Ampt, 1911)	9
Слика 13. Попречен пресек на почва (Meter Group, 2020).....	13
Слика 14. Зависност на вкупната сукција и H_r според изразот на Келвин.....	14
Слика 15. Зависност на протокот и хидрауличниот градиент кај незаситени почви.....	15
Слика 16. Техники и инструменти за мерење на сукција и нивен опсег на мерење	17
Слика 17. TEROS-32 тензиометар (Meter Group, 2020)	18
Слика 18. Мерење на вкупна сукција со WP4C и HYPROP (Meter Group, 2020).....	19
Слика 19. Инфилтrometer за мерење на незаситена хидраулична спроводливост (Meter Group, 2020).....	20
Слика 20. Фази на заситеност и форма на SWRC.....	21
Слика 21. Криви на задржување на почвена влажност за три различни типови почва ...	22
Слика 22. Типични SWRC добиени при сушење и при влажнење за ист материјал (Bharat, 2017)	23
Слика 23. Дијаграм за проценка на феномен	25
Слика 25. Мор-Кулонов критериум за незаситени почви според пристапот на Bishop ..	26
Слика 25. Визуелизација на состојбата на напрегања во точка за незаситени и заситени почви (Fredlund, 2016)	27
Слика 26. Проширен М-С критериум (Fredlund, et al., 1978)	28
Слика 27. Симулација на свлекување предизвикано од врнежи на модели во мали размери.....	30
Слика 28. Илустрација на условот за континуитет (Galavi, 2010)	37
Слика 24. Геометрија и сили кои делуваат на една ламела од масата која лизга.....	40
Слика 30. Шема на бесконечна косина со стационарно течење паралелно на површината и рамнина на лизгање над нивото на подземна вода (Zhang, et al., 2018).....	41
Слика 31. Шема на бесконечна косина со рамнина на лизгање под нивото на подземна вода (Zhang, et al., 2018)	42
Слика 32. Зависност на јакост на смолкнување од сукција (Zhang, et al., 2018)	42
Слика 33. Крива на гранулометриски состав (Susinov & Josifovski, 2018)	44
Слика 34. Подготовка на примерокот и опрема	46

Слика 35. Измерени вредности на сукцијата во зависност од влажноста (Susinov & Josifovski, 2018).....	47
Слика 36. Споредба на криви на задржување на почвена влажност според различни модели.....	52
Слика 37. Мерење на хидрауличните карактеристики со Нургор	53
Слика 38. Мерење на хидрауличните карактеристики со Нургор	53
Слика 39. Измерени вредности на сукцијата во зависност од влажноста со Нургор и WP4c	54
Слика 40. Споредба на криви на задржување на почвена влажност добиени со Нургор-Fit според различни модели	54
Слика 41. Измерени вредности на коефициентот на водопропусност на незаситена почва k_w со Нургор во функција од сукцијата	56
Слика 42. Измерени вредности на коефициентот на водопропусност на незаситена почва k_w со Нургор во функција од волуметриската влажност	56
Слика 43. Испитување на незаситената хидраулична спроводливост со инфилтrometer	57
Слика 44. Кумулативна инфилтрација во функција од времето (sqrt)	57
Слика 45. Незаситена хидраулична спроводливост (K) за различни сукции	59
Слика 46. Кумулативна инфилтрација во функција од времето (sqrt) за различни сукции	59
Слика 47. Едометар развиен во лабораторијата за геотехника при ГФ – УКИМ Скопје	60
Слика 48. Зависност коефициент на порозност - вертикален притисок и модул на стисливост - вертикален притисок.....	61
Слика 49. Зависност коефициент на порозност – вертикален притисок за услови на физички модел	62
Слика 50. Попречен пресек на хидројаловишната брана Тополница. (1) иницијална брана; (2) подолжна дренажа во основата; (3) конструкција на брана во прва фаза со низводен метод; (4) втора и (5) трета фаза на конструкција на брана со спротиводен метод	64
Слика 51. Приказ на мерна станица (PCE-instruments, 2019).....	64
Слика 52. Ситуација на хидројаловиштето со местоположба на мерната станица (google.com/maps, 2019)	65
Слика 53. Хидрограм на 10-минутни врнежи во периодот од 01 јануари 2016 год. до 31 декември 2018 год.....	66
Слика 54. Максимални едночасовни врнежи во тек на месец (2016-2018)	68
Слика 55. Максимални дневни врнежи во тек на месец (2016-2018).....	68
Слика 56. Дистрибуција на веројатноста на појава на максималните месечни врнежи..	72
Слика 57. Пресметковен модел на челичен сад за испитување	74
Слика 58. 3Д модел на косина (димензии во cm)	75
Слика 59. Фази на изведба на моделот	75
Слика 60. Шема на моделот и мерни инструменти.....	76
Слика 61. Распоред на прскалки за симулација на дожд и зона на влијание	76
Слика 62. Калибрационен дијаграм на прскалка за константен притисок	77
Слика 63. Систем за мерење на влажност и сукција.....	78
Слика 64. Споредба на сукцијата мерена со различни инструменти (Saha, et al., 2020) .	78
Слика 65. Систем за мерење на порен и нормален притисок.....	79
Слика 66. Распоред на сензори во пресек и основа.....	79
Слика 67. Изглед на моделот	80
Слика 68. Промени во волуметриската влажност за вкупниот период на набљудување	81
Слика 69. Промени во волуметриската влажност за времетраење на врнежите.....	82

Слика 70. Промени во сукцијата за вкупниот период на набљудување.....	84
Слика 71. Промени на сукцијата за времетраење на тестот (врнежи).....	85
Слика 72. Промена на сукција по длабочина за време на тест.....	87
Слика 73. Споредба на кривите на задржување почвена влажност добиени со експериментот и лабораториските мерења	88
Слика 74. Промени на порниот притисок за времетраење на тестот (врнежи)	89
Слика 75. Промени на порниот притисок за времетраење на тестот (врнежи) за сензортите M1, M2 и M4	90
Слика 76. Промени на порниот притисок по длабочина	91
Слика 77. Промени на тотален почвен притисок за времетраење на тестот (врнежи)	92
Слика 78. Промени на тотален почвен притисок за времетраење на тестот (врнежи)	92
Слика 79. 3D приказ на косината пред и по испитувањето (поглед од горе и странично)	93
Слика 80. Страничен поглед на косината пред (горе) и по испитувањето (долу).....	94
Слика 81. Издвоени профили и точки за анализа на деформации	94
Слика 82. Деформации во у-z рамнината во трите анализирани профили	95
Слика 83. Развој на деформации на круната на косината (приказ од скенер над косината)	97
Слика 84. Местоположба на челна пукнатина	98
Слика 85. Суфозија и прогресивен лом на косина (серија 16, 18 и 19)	98
Слика 86. Состојба на косина по лом	99
Слика 87. Местоположба на челото (ивицата) на косината (горе) и најголемата пукнатина во х-у рамнината (долу) во тек на време	99
Слика 88. Прираст на вертикалните поместувања за две карактеристични точки во трите анализирани профили.....	101
Слика 89. Длабочина на влажен фронт во тек на време за константен интензитет на врнежи.....	102
Слика 90. Зависност помеѓу брзината на инфилтрација и времето	102
Слика 91. Зависност на инфилтрацијата во тек на време од различни почетни збиености	103
Слика 92. Зависност на брзината на инфилтрација во тек на време од различни почетни збиености	103
Слика 93. Зависност на инфилтрацијата во тек на време за три пресеци	104
Слика 94. Зависност брзината на инфилтрација во тек на време за три пресеци.....	105
Слика 95. Појава на пукнатини по 55 минути.....	106
Слика 96. Состојба на пукнатината по 155 минути.....	106
Слика 97. Состојба на косината по 270 минути	106
Слика 98. Состојба на ножицата на косината по 400 мин. и состојба на косината по 440 мин.....	107
Слика 99. Состојба во ножицата на косината по 490 и 505 минути	107
Слика 100. Состојба на ножицата на косината по 528 и 540 минути	107
Слика 101. Состојба на моделот после лом.....	108
Слика 102. Геометрија на нумеричкиот модел	110
Слика 103. Усвоени функции за моделирање на хидрауличкото однесување на незаситениот растресит песок во PLAXIS	111
Слика 104. Дискретизација на моделот со конечни елементи	112
Слика 105. Промена на сукцијата во тек на време	113
Слика 106. Промена на степен на заситеност S_r во тек на време.....	114
Слика 107. Промена на порниот воден притисок во тек на време.....	115
Слика 108. Промена на вишок порен притисок во тек на време.....	116

Слика 109. Развој на вкупни деформации во тек на време.....	117
Слика 110. Појава на пластични точки и точки на затегање во карактеристични временски интервали.....	118
Слика 111. Историја на појава на пластични точки и точки на затегање	118
Слика 112. Девијатор на вкупни дилатации и деформации на косината	119
Слика 113. Дијаграм на ефективните напрегања σ'_{xx} во иницијална фаза и за време на врнежи.....	120
Слика 114. Дијаграм на ефективните напрегања σ'_{yy} во иницијална фаза и за време на врнежи.....	120
Слика 115. Дијаграм на ефективните напрегања σ'_{zz} во иницијална фаза и за време на врнежи.....	121
Слика 116. Дијаграм на напрегања на смолкнување σ_{xy} во иницијална фаза и за време на врнежи.....	121
Слика 117. Пластични точки, точки на затегање и деформации при анализа на стабилност	122
Слика 118. Споредба на степенот на заситеност S_r во функција од времето во карактеристични точки од физичкиот и нумеричкиот модел	123
Слика 119. Промена на притисоци во тек на време во карактеристична точка M1.....	124
Слика 120. Промена на притисоци во тек на време во карактеристична точка M2.....	125
Слика 121. Промена на притисоци во тек на време во карактеристична точка M3.....	126
Слика 122. Промена на притисоци во тек на време во карактеристична точка M4.....	127
Слика 123. Промена на притисоци во тек на време во карактеристична точка M5.....	128
Слика 124. Геометрија на нумеричкиот модел на браната Тополница.....	129
Слика 125. Дискретизација на нумеричкиот модел со триаголни конечни елементи...	129
Слика 126. Хидраулични гранични услови и почетна распределба на порни притисоци	130
Слика 126. Пресметани деформации после интензивни врнежи: вкупни (горе), хоризонтални (средина) и вертикални (долу).....	131
Слика 128. Пластични точки по интензивни врнежи.....	132
Слика 129. Состојба на заситеност по интензивни врнежи.....	132
Слика 130. Состојба на сукцијата по интензивни врнежи.....	133
Слика 131. Критични зони на свлекување при анализа на стабилност.....	133

ЛИСТА НА ТАБЕЛИ

Табела 1. Физичко – механички карактеристики на истражуваната почва	44
Табела 2. Проценети почетни параметри според моделот на (Brooks & Corey, 1964)	48
Табела 3. Проценети почетни параметри според моделот на (Van Genuchten, 1980).....	48
Табела 4. Проценети почетни параметри според моделот на (Kosugi, 1996)	49
Табела 5. Проценети почетни параметри според бимодален модел на Durner	50
Табела 6. Проценети почетни параметри според бимодален модел на Seki.....	51
Табела 7. Проценети почетни параметри според моделот на (Fredlund & Xing, 1994) ...	52
Табела 8. Проценети параметри на кривата според моделот на (Brooks & Corey, 1964)	55
Табела 9. Проценети параметри на кривата според моделот на (Fredlund & Xing, 1994)	55
Табела 10. Проценети почетни параметри според моделот на (Kosugi, 1996)	55
Табела 11. Проценети почетни параметри според моделот на (Van Genuchten, 1980).....	55
Табела 12. Незаситена хидраулична спроводливост (K) за различни сукции	58
Табела 13. Селектирани податоци за измерени интензивни врнежи (uhmr.gov.mk, 2016-2020) и (Susinov, et al., 2019).....	63
Табела 14. Плувиограм за 24-часовен период.....	66
Табела 15. Максимални месечни врнежи за карактеристични временски интервали	67
Табела 16. Емпириска распределба на месечни врнежи за тригодишен период.....	69
Табела 17. Статистички параметри на низи на максимални месечни врнежи за карактеристични временски интервали.....	70
Табела 18. Веројатност на појава на максималните врнежи $p(z)$ [%] за различно времетраење.....	71
Табела 19. Максимални месечни врнежи [mm] за карактеристични вредности на веројатности на појава.....	72
Табела 20. Местоположба на сензори, мерен опсег и прецизност.....	79
Табела 21. Табеларен приказ на резултатите од мерењето на влажноста.....	82
Табела 22. Табеларен приказ на резултатите од мерењето на сукцијата	85
Табела 23. Табеларен приказ на вертикалните поместувања	96
Табела 24. Механички карактеристики на материјалите.....	110
Табела 25. Хидраулички карактеристики на материјалите	111
Табела 26. Механички и хидраулички карактеристики на материјалите.....	130

СОДРЖИНА

1. Вовед	1
1.1. Мотивација	1
1.2. Предмет и цел на истражувањето	4
1.3. Организација на докторската работа	5
2. Преглед на литература	6
2.1. Незаситени почви и интеракција со атмосферата	6
2.1.1. Инфилтрација	8
2.1.2. Хидраулички карактеристики	11
2.1.3. Техники и инструменти за мерење на хидрауличните карактеристики на незаситените почви	16
2.2. Крива на задржување на почвена влажност (SWRC)	21
2.3. Моделирање на незаситени почви	25
2.3.1. Конститутивни модели за проценка на материјалното однесување	25
2.3.2. Обединета хидромеханичка анализа за незаситена почвена косина	29
2.3.3. Физичко моделирање на незаситени почвени косини при интензивни врнежи 30	
2.3.4. Нумеричко моделирање на стабилност на косини базирана на целосно споено моделирање	32
2.4. Анализа на стабилност на косини	39
2.4.1. Методот на гранична рамнотежа	39
2.4.2. Методот на бесконечна косина со едnodимензионална инфилтрација	41
3. Материјални карактеристики и прогнозираните врнежи	44
3.1. Механички карактеристики во заситени услови	44
3.2. Хидраулички карактеристики во незаситени услови	45
3.3. Анализа на врнежи	63
4. Студија за стабилност на идеална косина	73
4.1. Физичко моделирање на идеална косина	74
4.1.1. Опрема, параметри на моделот и постапка на испитување	74
4.1.2. Мерење на влажноста	81
4.1.3. Мерење на сукција	84
4.1.4. Мерење на порен притисок	89
4.1.5. Мерење на тотален почвен притисок	91
4.1.6. Мерење на деформациите	93
4.1.7. Мерење на инфилтрација	101
4.1.8. Визуелно набљудување	105

4.2. Нумеричко моделирање	109
4.2.1. Геометрија, параметри на моделот и фази на анализа	109
4.2.2. Резултати од нумеричката анализа	112
4.2.3. Споредба на резултати	122
5. Студија на случај – хидројаловишна брана Тополница.....	129
6. Заклучоци и препораки	135
Литература.....	139

1. Вовед

1.1. Мотивација

Нестабилноста на косини предизвикана од интензивни врнежи и инфилтрација на вода е актуелен проблем насекаде низ светот. Бројни се природните хазарди од свлекување кои предизвикуваат материјални штети и човечки жртви.

Еден од последните примери кои го привлекоа светското внимание е рушењето низводната косина на хидројаловишната брана во рудник за железо во близина на градот Брумадињо во Бразил при што загинаа над 300 луѓе, види слика 1.



Слика 1. Пред и потоа. Свлекување на низводната косина на браната во 2019 година

Слична катастрофа од помал размер, за среќа само од еколошки аспект, се случи во септември 2020 година во рудникот за олово и цинк Саса, Македонска Каменица кога при лом на низводната косина на хидројаловиштето бр. 4 се излеаа над 3000 m³ јаловишен материјал во водите на Каменичка Река, види слика 2.



Слика 2. Лом на низводната косина на хидројаловишна брана бр. 4 во рудникот Саса Македонска Каменица (Сусинов, септември 2020 година)

Интензивните врнежи предизвикуваат дестабилизација (слика 3) или предизвикуваат значителна ерозија на природните и вештачките косини. Актуелни се проблемите на

новоизградените автопати ширум нашата држава при што стабилно проектираните косини, за релативно краток период се рушат.



Слика 3. Свлекување на косина на автопат Миладиновци – Штип, ориентација северозапад (Сусинов, мај 2019 година)

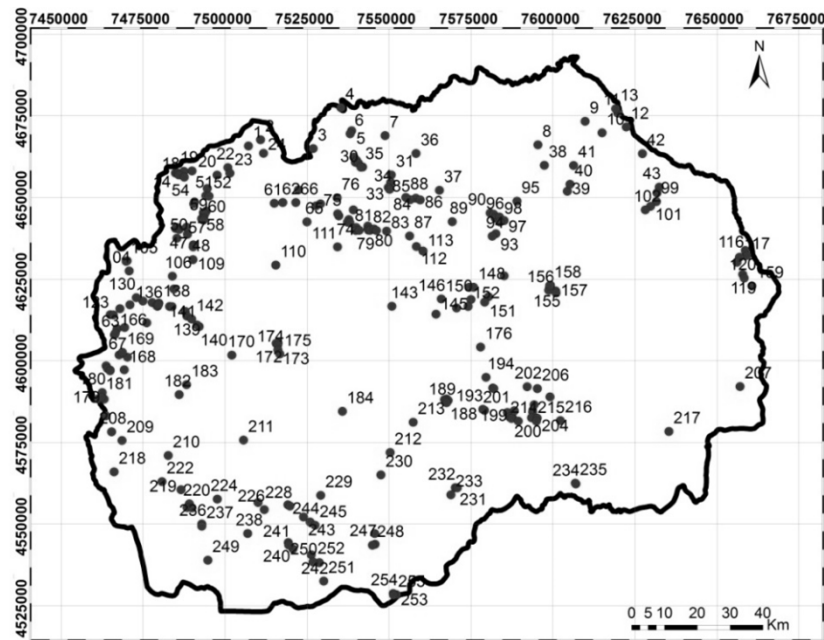


Слика 4. Изразена ерозија на косини од автопатот Миладиновци – Штип, ориентација североисток (Сусинов, октомври 2020 и март 2021 година)



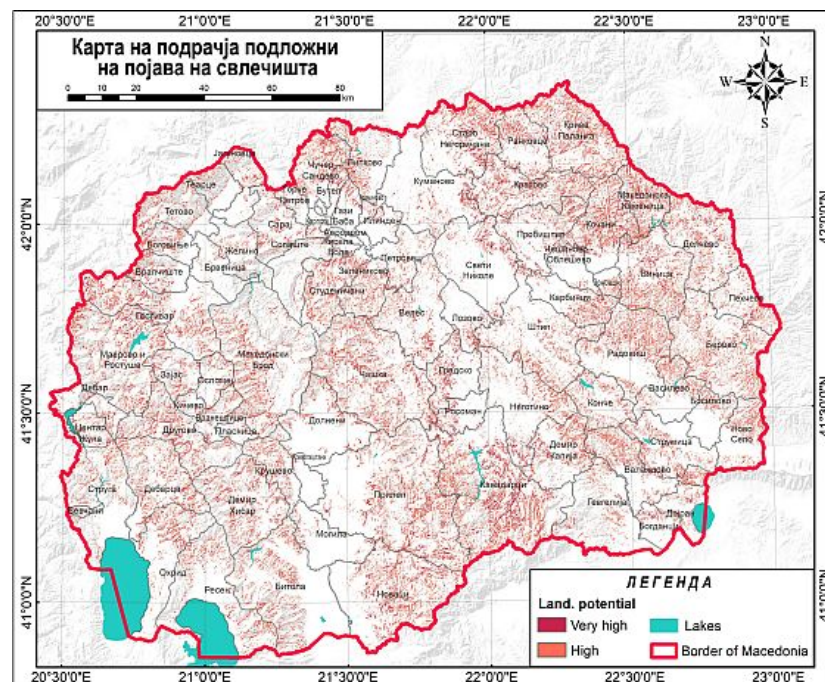
Слика 5. Свлекување на косини од експресен пат Штип – Радовиш (Сусинов, јуни 2020 година)

(Peshevski, et al., 2015) изработиле карта на свлечишта на Македонија базирана на собрани детални податоци од над 250 свлечишта ширум земјата, види слика 6. Од картата може да се види дека постојат подрачја со изразен потенцијал за нестабилности, свлекување, одрони и ерозија и дава насоки каде треба да се анализира ризикот од овие хазарди.



Слика 6. Карта на свлечишта на Македонија (Peshevski, et al., 2015)

(Milevski & Dragicevic, 2018) го изработиле првиот дигитално-растерски модел на подрачјата подложни на појава на свлечишта со посебна софистицирана постапка на ГИС-базирано преклопување на повеќе дигитално-квантифицирани фактори од значење за појава на свлечишта. Меѓу нив, посебна важност е дадена на геолошкиот (литолошкиот) состав, наклоните на релјефот, типот на косини, видот на вегетацијата, оддалеченоста од водотеците и од патишта, метеоролошки услови и др. Резултатите покажале дека 18% од територијата или околу 4500 km² се терени погодни и многу погодни за појава на свлечишта.



Слика 7. Карта на подрачја подложни на појава на свлечишта во Македонија (Milevski & Dragicevic, 2018)

Во последно време инженерската практика налага косините при изградба на автопатишта, железници, канали, цевководи, брани и хидројаловишта да се анализираат на атмосферски влијанија имајќи ги предвид ризиците кои можат да настанат од ваквите хазарди. Ова може да се објасни со фактот дека последните истражувања укажуваат дека количината на вода во порите на почвата значајно влијаат врз нивната стабилност. На тој начин, повеќе аспекти од класичната механика на почви потребно е да се прошират за да се објасни однесувањето на незаситените почви, особено при промена на влажност.

Свлечиштата што се движат бавно најчесто се предизвикани од акумулација на вода од подолготрајни врнежи, а оние кои се движат брзо најчесто се активирани од интензивни врнежи. Во двата случаи промените во порниот притисок на незаситените почви го предизвикуваат движењето.

Стабилноста на косините се анализира со познатите методи на: гранична рамнотежа, анализа на сензитивност, пробабилистички пристап и анализа со нумерички методи. Влијанието на врнежите во анализите традиционално се зема предвид преку покачување на нивото на подземна вода или промена на патеките на движење на водата, иако често се нема доволно податоци за подигање на нивото на подземна вода при плитски свлекувања. Нестабилноста кај косините при интензивни врнежи се случува поради инфилтрацијата на вода при што се намалува јакоста на почвата поради намалувањето на сукцијата во незаситената почва (Fredlund & Rahardjo, 1993). Оттука, стабилноста на косините не треба да се анализира само со традиционалните пристапи.

При интензивни врнежи најчесто се јавуваат плитски површини на лизгање кои се паралелни со површината на косината. Оттука, при анализата на стабилност може да се користи и методот на бесконечна косина. Постојат методи кои можат да се модифицираат за да ја вклучат промената во порниот притисок која е добиена од мерења или аналитичка и/или нумеричка анализа на инфилтрација. Освен овој метод на анализа на стабилност по методот на бесконечна косина, се користи и методот на гранична рамнотежа т.е. методот на ламели. За успешна примена на овие методи, потребно е познавање на параметрите на јакоста на смолкнување на почвата, хидрауличните параметри и карактеристиките на врнежите (Zhang, et al., 2018).

Овие стандардни методи (steady-state uncoupled) кај незаситените почви често имаат потешкотии да ја отсликаат реалната состојба поради занемарувањето на интеракцијата на флуидот кој се движи низ порите од почвата. Затоа пореални резултати даваат методите/моделите кои ја вклучуваат интеракцијата помеѓу цврстата, течната и гасовитата компонента од почвениот волумен (transient coupled methods), а посебно за проблеми поврзани со инфилтрацијата.

1.2. Предмет и цел на истражувањето

Методите на анализа на стабилност на косини базирани на гранична рамнотежа се широко користени во инженерската практика поради едноставноста на пресметка преку аналитички изрази за различни типови на лом кои резултираат со фактор на сигурност. Нумеричките методи се користат за симулација на однесувањето на почвите при различни состојби како што е механичко однесување при иницијални услови или услови на нестабилност. Во поново време се развиени софтвери со кои преку нумерички анализи може да се анализира споено механичкото, хидрауличкото и термалното однесување на почвите како мултифазен систем, познато во теоријата како „coupled thermo-hydro-mechanical analysis”.

Предмет на ова истражување е преку лабораториски, експериментални и нумерички анализи за хидромеханичкото однесување на незаситените почви да се изврши моделирање на повеќе аспекти на стабилноста кај инженерските косини изградени од незаситени почви, изложени на интензивни врнежи, односно влијанието на интеракцијата помеѓу почвата и атмосферата врз стабилноста на косините.

Освен резултатите од стандардните испитувања на почвата за определување на механичките карактеристики, ќе бидат презентирани и резултати од испитувања на хидраулички карактеристики на незаситените почви. Ќе биде направена и анализа на врнежи за конкретно подрачје (студија на случај) кои се користат како влезен параметар при експерименталното истражување на физички и нумерички модел.

Целта на истражувањето е да се докаже дека стабилноста на косините кај незаситените почви е зависна од интеракцијата помеѓу почвата и атмосферата. Конкретно, да се утврди влијанието на врнежите преку инфилтрацијата врз локалната и глобалната стабилност, да се утврди ефектот на евапотранспирацијата и вегетацијата, да се провери влијанието на сукцијата, да се симулираат критичните товарни сценарија и да се даде предлог за конститутивен модел и параметри кои најдобро го опишуваат хидромеханичкото однесување на незаситената почва која е предмет на истражување.

1.3. Организација на докторската работа

Истражувањето во докторскиот труд е организирано во 6 глави.

Во Глава 1 е даден вовед, опишан е предметот на истражување и се поставени целите на истражувањето.

Глава 2 ги обработува досегашните референтни истражувања на кои се базира темата на предметното истражување. Имено, се сумираат основните концепти за незаситените почви, интеракцијата на почвата со атмосферските влијанија како врнежите, инфилтрацијата и техниките за мерење на сукција. Се дава краток преглед на методите за анализа на стабилност на косини и конститутивните равенки за моделирање на хидромеханичкото однесување на незаситени почви изложени на интензивни врнежи, како и се референцираат значајни концепти за физичко и нумеричко моделирање на косини.

Во Глава 3 се поместени резултатите од лабораториските испитувања за дефинирање на карактеристиките на заситена почва, како и незаситена почва, вклучително и хидрауличките карактеристики, модели за дефинирање на функцијата на зависноста сукција - влажност, значајни за дефинирање на хидромеханичкото однесување. Исто така се презентирани и резултатите од статистичката обработка на мерењата на врнежите од каде е добиен максималниот меродавен дожд за анализа на стабилност.

Глава 4 ја презентира студијата за стабилност на идеална косина преку испитување на физички модел и негова нумеричка интерпретација со нумеричко моделирање во PLAXIS 2D. Овде се презентирани резултати од мерењата на физичкиот модел, а се однесуваат на мерење на сукција, влажност, порен притисок, тотален притисок и деформации со помош на ласерски скенери.

Глава 5 ги презентира резултатите од студијата на случај – хидројаловишна брана Тополница која нумерички е моделирана согласно резултатите од претходните анализи.

Во глава 6 се поместени заклучоците кои произлегуваат од предметното истражување, а и препораките за понатамошни истражувања.

2. Преглед на литература

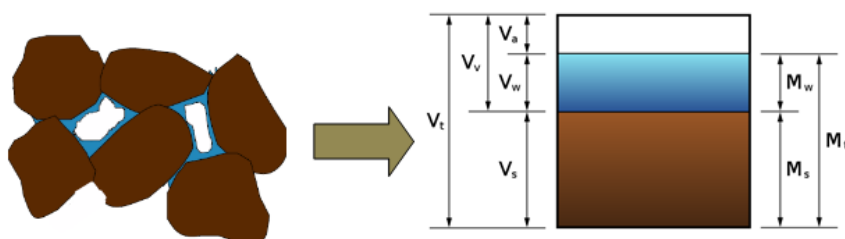
Оваа глава ги обработува основните концепти на кои се базира темата на предметното истражување. Имено, се сумираат досегашните истражувања за незаситените почви, интеракцијата на почвата со атмосферските влијанија како врнежите, инфилтрацијата и техниките за мерење на сукција. Конечно, се дава краток преглед на методите за анализа на стабилност на косини и конститутивните равенки за моделирање на хидромеханичкото однесување на незаситени почви изложени на интензивни врнежи.

2.1. Незаситени почви и интеракција со атмосферата

Механиката на незаситени почви како научна дисциплина од областа на геотехничкото инженерство го опфаќа делот на однесувањето на почвите во услови на нецелосна или делумна заситеност. Досегашните истражувања во оваа област покажуваат дека посебно внимание треба да се посвети на овој проблем затоа што промената на влажноста кај почвите, значајно влијае врз нивните јакостни и деформабилни карактеристики.

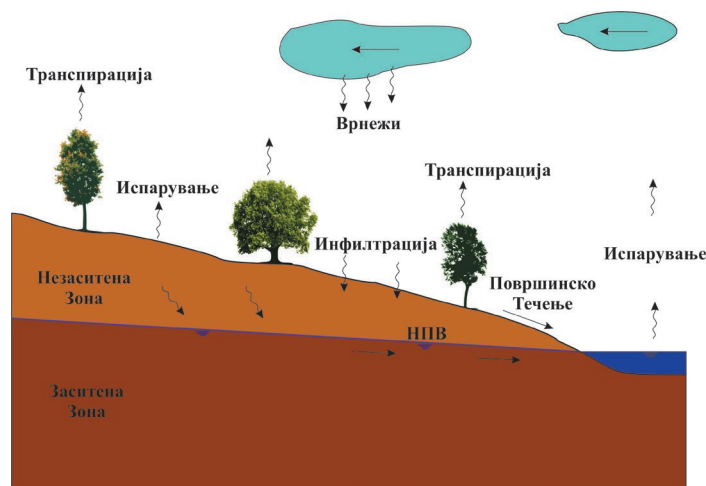
Класичната механика на почви го проучува инженерското однесување на почвите при идеализирана состојба со претпоставка на двофазен систем (цврсти честички и вода). Почвите во природата и во инженерските геотехнички конструкции го менуваат составот на порите во зависност од повеќе фактори и влијанијата од животната средина. Значајни се промените во влажноста како резултат на климатските промени. Последните истражувања покажуваат дека промената на содржината на вода во порите значително го менува однесувањето на почвите во степен до кој, класичната теорија на механиката на почви не е повеќе соодветна. Затоа, таа се проширува до ниво да може да се разбере однесувањето на делумно заситените почви преку воведување на дополнителни параметри и зависимости.

Во дефиницијата на незаситените почви, порите од почвениот волумен се делумно исполнети со вода и воздух (трофазен систем) (Bharat, 2017). Квантитативна илустрација на масата (M) и волуменот (V) на цврсти честички (s), вода (w) и воздух (a) е прикажана на слика 8.



Слика 8. Состав на незаситена почва (трофазен систем)

Во природата содржината на овие фази се менува во функција од условите, длабочината и сезоните. Генерално, во површинските зони најчесто се среќаваат незаситени почви со мал степен на заситеност, додека во подлабоките слоеви, вообичаено тој е поголем, а под нивото на подземна вода, степенот изнесува 1.0. Вообичаено, над нивото на подземна вода се наоѓа слој (капиларната зона), над кој се наоѓа делумно заситен дел, чија моќност може да варира и до неколку стотина метри. Многу инженерски активности се реализираат во оваа незаситена зона (unsaturated/vadose zone) прикажана на следната слика.



Слика 9. Фази на почвен медиум при инфилтрација на вода како дел од хидролошкиот процес

Незаситените почви играат значајна улога врз хидролошкиот процес прикажан на следната слика, бидејќи тие се дел од кружниот циклус на движењето на водата од атмосферата до заситената зона во почвата, а преку процесите на инфилтрација, испарување и транспирација. Токму затоа во науката оваа проблематика се означува како интеракција помеѓу атмосферата и почвата.

За да се објасни ова сложено однесување, се применува механиката на незаситените почви (unsaturated soil mechanics) која ги користи основните закони на механиката проширена со состојби, зависности и параметри од хидрауликата, контактната физика и физичко - хемиската рамнотежа.

Вообичаено во практиката, механиката и хидрауличната стабилност кај почвите се разгледуваат одделно. При анализите на стабилност со вклучување на интеракцијата помеѓу атмосферата и почвата, овие два проблема мора да се разгледуваат заеднички – споено/обединето. Таквиот заеднички пристап, може да ги објасни феномените кои се случуваат како резултат на процесите кои се одвиваат во незаситените почви, како што се филтрацијата и промената во физичко - механичките параметри, а особено степенот на влажност. Овие интегрирани принципи се применуваат за анализа и на други значајни проблеми поврзани со механиката на незаситени почви.

Многу често брзата филтрација и количина на вода која што се инфилтрира низ незаситената зона од почвите може да предизвика хазарди од свлекување на природните или инженерските и природните косини. Современите геолошки процеси како што се свлечиштата, често се предизвикани или се случуваат после интензивни врнежи.

Долготрајните сушни периоди поттикнуваат сушење на почвата и формирање на тензиони пукнатини како резултат на интензивното испарување од површината на косината при што се зголемува хидрауличната спроводливост на површинските слоеви. Од друга страна, порниот притисок станува негативен и допринесува кон зголемување на јакоста на смолкнување на почвата. Отворените пукнатини со голема водопропусност придонесуваат кон побрза инфилтрација на дождовната вода во косината. Негативниот порен притисок или матричната сукција на незаситената почва која ја одржува стабилна косината опаѓа со заситувањето за време на влажните периоди. Како резултат на тоа, доаѓа до зголемување на степенот на заситеност, јакоста на смолкнување на почвата опаѓа како и стабилноста на косината до вредност која предизвикува нестабилност.

Хидростатичката рамнотежа при стационарно течење кај незаситените почви отстапува од онаа кај заситените почви во зависност дали водата се движи нагоре (испарување) или надолу кон нивото на подземна вода (инфилтрација). Патеките на течење во вакви услови се илустрирани на слика 10.



Слика 10. Ефект на атмосферските влијанија врз однесувањето на незаситените почви

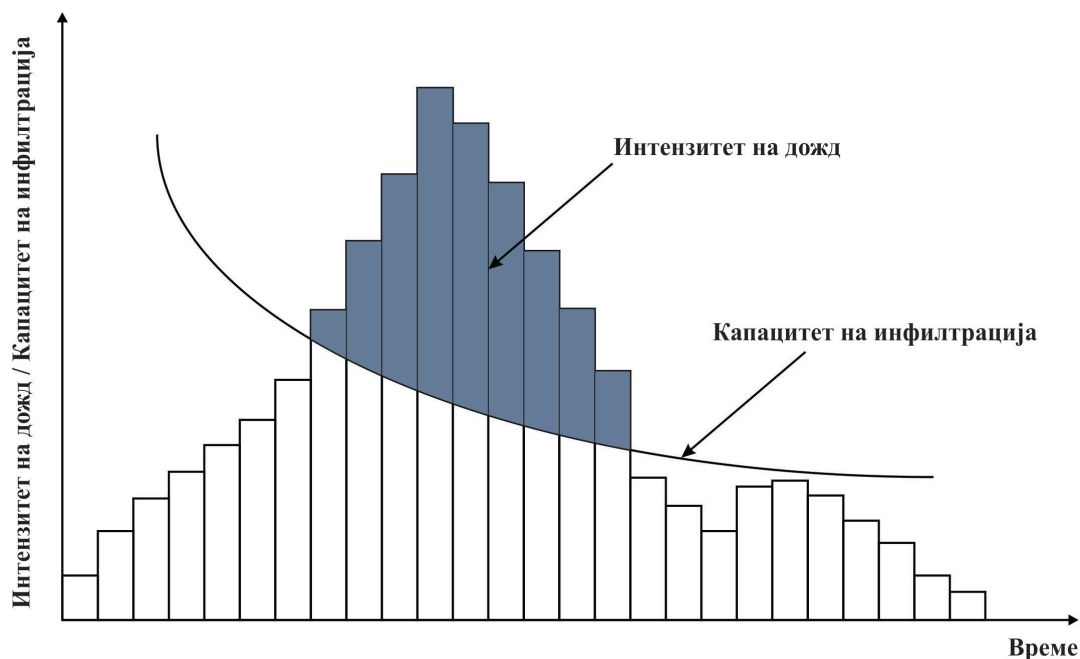
Порниот воден притисок кај повеќето од ситнозрните почви со многу мали пори е негативен во случај кога влажноста е помала од целосната заситеност (во незаситената зона). Во случај на целосно заситени почви тој е позитивен поради отсуството на воздухот во порите, а со тоа и на површинската контактна затегнатост.

2.1.1. Инфилтрација

Инфилтрацијата, пред сè од врнежите, е значаен фактор кој ја менува состојбата во почвениот медиум и придонесува кон намалување на стабилноста. Традиционално, ефектот од инфилтрација и движење на вода во почвите врз стабилноста се изразува преку фактор на сигурност или критична длабочина за косина оптоварена со течење низ почвата паралелно со површината на косината. Многу често, при анализата, најнеповолното сценарио се симулира со изедначување на линијата на подземна вода со површината на косината, со што почвата е заситена, а понатамошната инфилтрација нема улога во стабилноста. Но, за косини со незаситена зона, инфилтрацијата од врнежи има влијание врз промената на порниот притисок, а при тоа јакоста на смолкнување и стабилноста се намалуваат (Zhang, et al., 2018).

Во теренски услови, интензитетот на врнежи не е ист со брзината на инфилтрација на вода во почвата и зависи од капацитетот на инфилтрација на почвата. Во случај кога интензитетот на врнежи е поголем од капацитетот на инфилтрација на почвата настанува заезерување или движење на вода по површината на почвата која предивидува ерозија. Но тоа не се случува ведаш по започнувањето на врнежите, затоа што во тој почетен период капацитетот на инфилтрација на почвата е многу голем, па целата вода се

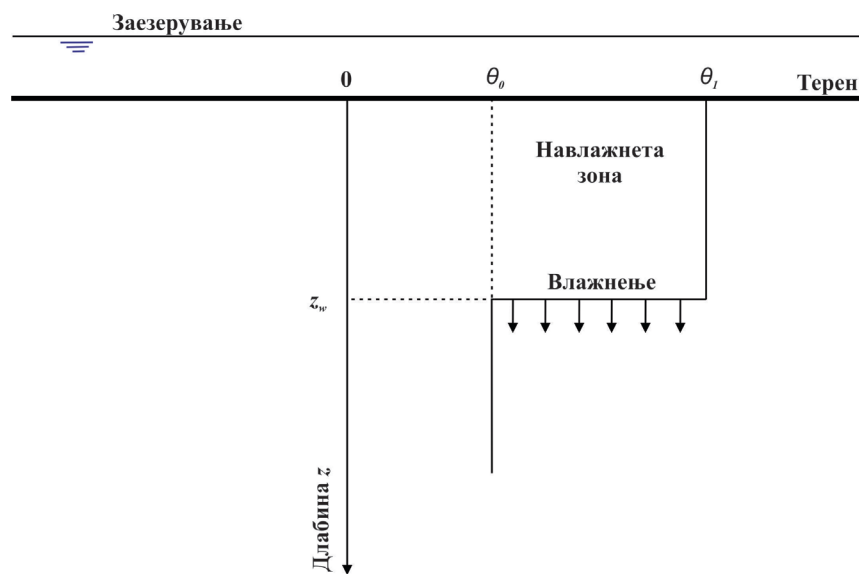
инфилтрира. Потоа следи фаза во која почвата се навлажнува, а капацитетот значително опаѓа, види слика 11.



Слика 11. Интензитет на врнежи и капацитет на инфилтрација на почвата

Капацитетот на инфилтрација е поврзан, но не и еднаков со заситената водопропусност на почвата и зависи од состојбата на површината, дали има пукнатини кои ќе ја зголемат инфилтрацијата и сл.

Во литературата се познати многу теоретски и емпириски модели за процесот на инфилтрација, а еден од најчесто користените е моделот на (Green & Ampt, 1911) кој се заснова на законот на Дарси (Darcy) со физички мерливи параметри. Овој модел за инфилтрација на хоризонтална површина претпоставува јасна разлика помеѓу сувата и влажната почва како на следната слика.



Слика 12. Илустрација на моделот на (Green & Ampt, 1911)

Ако θ_0 е почетна влажност пред започнувањето на дождот, θ_1 е влажност на почвата во заситената зона, длабочината на заезерување е занемарлива (притисокот е нула на површината), тогаш разликата помеѓу притисокот на површината и притисокот на длабочина на влажнење z_w може да се пресмета како:

$$\Delta H = z_w + s_f \quad (1)$$

каде H е разлика во притисокот (вкупен притисок) и s_f е сукција на длабочина z_w (позитивна за сукција што одговара на θ_0). Врз основа на принципот на континуитет и законот на Дарси (Darcy), капацитетот на инфилтрација на почвата i под притисок од заезерување е еднаков со брзината на течење во почвата:

$$i = k_w \cdot \frac{\Delta H}{\Delta z} = k_w \cdot \frac{z_w + s_f}{z_w} \quad (2)$$

каде k_w е коефициент на водопропусност на почвата во заситениот дел. Длабочината на влажнење z_w може да се поврзе со кумулативната инфилтрација I :

$$z_w = \frac{I}{\theta_1 - \theta_0} \quad (3)$$

Со замена се добива:

$$i = k_w \cdot \left[1 + \frac{s_f \cdot (\theta_1 - \theta_0)}{I} \right] \quad (4)$$

Ако се земе предвид дека заезерувањето на површината се појавува кога капацитетот на инфилтрација е еднаков со интензитетот на врнежите q [m/s], со замена на i со q , за кумулативната инфилтрација во моментот на појава на заезерување I_p се добива:

$$I_p = \frac{s_f \cdot k_w \cdot (\theta_1 - \theta_0)}{q - k_w} \quad (q > k_w) \quad (5)$$

Оттука, може да се пресмета и времето потребно за појава на заезерување на површината t_p :

$$t_p = \frac{I_p}{q} = \frac{s_f \cdot k_w \cdot (\theta_1 - \theta_0)}{q \cdot (q - k_w)} \quad (q > k_w) \quad (6)$$

За проблеми на инфилтрација на косини, потребно е проширување на овој модел. (Chen & Young, 2006) го предлагаат следниот израз за пресметка на интензитетот на инфилтрација i по започнување на заезерување:

$$i = k_w \cdot \left[\cos \alpha_s + \frac{s_f \cdot (\theta_1 - \theta_0)}{I} \right] \quad (7)$$

каде α_s е аголот на косината. Претпоставка е дека само врнежи нормални на површината на косината предизвикуваат инфилтрација; компонентата паралелна со косината и гравитацијата предизвикуваат течење, но не ја менуваат влажноста долж нормалниот правец на рамна косина. Врнежите нормални на косината ќе бидат $q \cdot \cos \alpha_s$. Длабочината на влажнење z_w може да се поврзе со кумулативната инфилтрација I :

$$z_w = \frac{I}{(\theta_1 - \theta_0) \cdot \cos \alpha_s} \quad (8)$$

по што може да се пресмета кумулативната инфилтрација (длабочина) во моментот на појава на заезерување I_p како:

$$I_p = \frac{s_f \cdot k_w \cdot (\theta_1 - \theta_0)}{(q - k_w) \cdot \cos \alpha_s} \quad (q > k_w) \quad (9)$$

и времето потребно за појава на заезерување на површината t_p :

$$t_p = \frac{I_p}{q \cdot \cos \alpha_s} = \frac{s_f \cdot k_w \cdot (\theta_1 - \theta_0)}{q \cdot (q - k_w) \cdot \cos^2 \alpha_s} \quad (q > k_w) \quad (10)$$

Ако

$$i = \frac{dI}{dt} \quad (11)$$

може да се запише

$$\frac{dt}{dI} = \frac{1}{k_w \cdot \left[\cos \alpha_s + \left(\frac{s_f \cdot (\theta_1 - \theta_0)}{I} \right) \right]} \quad (12)$$

Ако се реши оваа равенка со почетните услови $t=t_p$ и $I=I_p$, времето потребно да се постигне одредена кумулативна инфилтрација I по заезерување е:

$$t = t_p + \frac{I - I_p}{k_{w2}} - \frac{\xi}{k_{w2}} \cdot \ln \left(\frac{I + \xi}{I_p + \xi} \right) \quad (t > t_p) \quad (13)$$

каде се:

$$k_{w2} = k_w \cdot \cos \alpha_s \quad (14)$$

$$\xi = \frac{s_f \cdot (\theta_1 - \theta_0)}{\cos \alpha_s} \quad (15)$$

Инфилтрацијата може да предизвика бројни несакани ефекти и проблеми кај незаситените почви, како на пример: промена на волумен кај колапсивни и експанзивни почви, намалување на јакоста на смолкнување и носивоста, почвени загуби поради крајбрежна ерозија или нестабилност на косини и појава на свлечишта предизвикани од интензивни врнежи.

Волуменот на почвите може да се зголеми (кај експанзивните) или намалува (кај колапсивните) при влажнење под постојано нормално напрегање. Кај експанзивните (активни) глини при влажнење се јавува бабрење како резултат на нивниот минеролошки состав, односно на хемиската промена на водата во кристалната решетка на минералите. Постојаното бабрење може да предизвика оштетувања на објектите изградени врз нив.

2.1.2. Хидраулички карактеристики

За да се согледа однесувањето на незаситените почви, неопходно е да се објаснат поимите за сукција, влажност и хидраулична спроводливост кај почвите.

За сукцијата постојат повеќе називи и дефиниции. Се нарекува уште и воден потенцијал и се дефинира како потенцијална енергија (работа) на чистата вода во однос на некоја референца (Galavi, 2010). (Meter Group, 2020) ја дефинира како енергија, по количество на вода, потребно за транспорт на бесконечно мала количина на вода од почвениот примерок до референтен сад со чиста „слободна“ вода. За да се сфати ова, треба само да се спореди водата во почвен примерок со вода во чаша за пиење. Водата во чашата е релативно слободна и достапна, без растворливи супстанции, додека водата во почвата е врзана за површини разредени со раствори и под притисок или затегнување. Всушност, постојат сили помеѓу водата и зрната од почвата кои предизвикуваат затегнување на површината и менискус. Слободната вода е достапна без употреба на енергија, додека за совладување на тие сили е потребна енергија. Водениот потенцијал во природата речиси секогаш е помал од нула во однос на референтната вредност („слободната“ вода) затоа

што е потребно да се употреби енергија за екстракција на водата, односно нејзино движење низ почвата.

Водениот потенцијал (water potential) најчесто се нарекува затегнување на вода (water tension), почвена сукција (soil suction), воден порен притисок на почва (soil pore water pressure) или капиларен притисок ($u_a - u_w$, каде u_a е порен воздушен притисок, а u_w е порен воден притисок). Мерната единица за енергија по единица маса е J/kg. За енергија по единица волумен е J/m³, или N/m или Pa. Еден J/kg нумерички речиси е еднаков на еден kPa. За да се опише водениот потенцијал, најчесто се користат MPa, kPa, bar, mH₂O, cmH₂O или mmH₂O.

Движењето на водата во природата е реално физички проблем и за да се разбере, потребно е да се направи разлика помеѓу интензивни и екстензивни променливи. Екстензивните (квантитативни) променливи го опишуваат обемот или количеството на материјата или енергијата. Интензивните (квалитативни) променливи го опишуваат интензитетот или квалитетот на материјата или енергијата. На пример, топлинската состојба на супстанцијата може да се опише и како содржина на топлина и како температура.

Двете променливи се поврзани, но не и исти. Содржината на топлина зависи од масата, специфичната топлина и температурата. Не може да се каже дека со мерењето на содржината на топлина дали топлината ќе се префрли на друг предмет ако два предмета се допираат еден со друг. Исто така не се знае дали предметот е топол или ладен или дале е безбедно да се допре.

Овие прашања лесно ќе се одговорат ако се знае интензивната променлива – температурата. Иако е важно да се мерат двете променливи, често интензивната променлива дава покорисни информации. Во поглед на водата, екстензивна променлива е содржината на водата и ја покажува количината на вода во почвата. Интензивната променлива е водениот потенцијал и го покажува интензитетот или квалитетот на водата во почвата. Со мерењето на водениот потенцијал, многу прашања поврзани со достапноста и движењето на водата стануваат јасни.

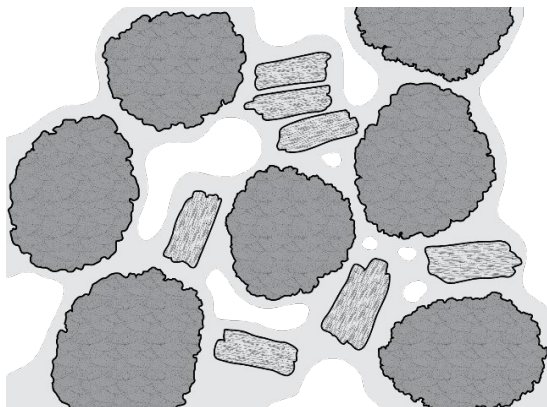
- Движење на водата – водата секогаш се движи од поголем кон помал потенцијал. Ова е вториот закон во термодинамиката – енергијата се движи по градиентот на интензивната променлива.
- Достапност на водата за растенијата – водата од почвата доаѓа до корените и преку нив и ксилемот до лисјата и евентуално испарува преку нив. Силата која ја движи водата е градиентот на водениот потенцијал. Така, за водата да се движи по тој пат, потребно е водениот потенцијал на лисјата да биде помал од водениот потенцијал на почвата.

Вкупната сукција е збир од повеќе компоненти: матрична, осмотска, гравитациона сукција и сукција на притисок.

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_o + \Psi_g + \Psi_p \quad (16)$$

Матричната сукција се јавува поради тоа што водата се привлекува (врзува) на повеќето површини преку водородно сврзување и van der Waals-ови сили, односно произлегува од комбинирани ефекти на капиларноста и адсорпцијата. Почвата е составена од мали честички и создава големи површини кои ја врзуваат водата, слика 13. Ова врзување е зависно од типот на почвата. На пример, пескливата почва има големи

зрна кои овозможуваат помали површини за врзување, додека прашината или глината има помали зрна и поголеми површини за врзување.



Слика 13. Попречен пресек на почва (Meter Group, 2020)

Бидејќи почвата впира вода, таа формира слој кој се прилепува за честичките. Всушност матричната сукција е таа што го ја создава таа водена обвивка. Матричната сукција е секогаш негативна или нула и е најзначајна компонента на водниот потенцијал во незаситени услови.

Осмотската сукција го опишува разредувањето и врзувањето на водата со раствори кои се раствораат во порната вода. И овој потенцијал е секогаш негативен или нула и е значителен кај растенијата и некои почви богати со соли. Влијае само на системот ако постои полупропустлива бариера која го оневозможува протокот на растворливи материи. Ова е всушност многу честа појава во природата. На пример, корењата на растенијата ја пропуштаат водата, но ги задржуваат растворливите материи. Клеточната мембрана исто така формира полупропустлива бариера. Помалку забележителен пример е контактот на водата со воздухот, каде што водата може да помине во воздухот како пареа, но солите остануваат. Доколку се знае концентрацијата на растворливи материи во водата, осмотскиот потенцијал може да се пресмета како:

$$\Psi_0 = C\Phi VRT \quad (17)$$

Каде C е концентрацијата на раствори (mol/kg), Φ е осмотски коефициент (-0.9 до 1.0 за повеќето раствори), V е бројот на јони по mol ($\text{NaCl}=2$, $\text{CaCl}_2=3$, $\text{сахароза}=1$), R е гасна константа и T е Келвин-ова температура.

Гравитацискиот потенцијал настанува поради локацијата на водата во гравитациското поле. Тој може да биде позитивен или негативен, во зависност од тоа каде се наоѓаме во однос на наведената референца за чиста, слободна вода на површината на почвата. Гравитацискиот потенцијал тогаш е:

$$\Psi_G = GH \quad (18)$$

Каде G е гравитациона константа (9.8 m/s^2) и H е вертикално растојание од референтната висина до површината на почвата (специфицираната висина).

Потенцијалот на притисок е хидростатски или пневматски притисок кој се аплицира на водата. Тој е повеќе макроскопски ефект кој делува низ поголем регион од системот. Како пример може да се посочи позитивниот притисок под било која површина на подземна вода. Овој притисок се чувствува при пливање во езеро или базен. Слично, водениот столб или позитивен потенцијал на притисок се развива при движење под

нивото на водата. Крвниот притисок е исто така пример за позитивен потенцијал на притисок. Овој потенцијал може да се пресмета како

$$\Psi_p = \frac{P}{\rho_w} \quad (19)$$

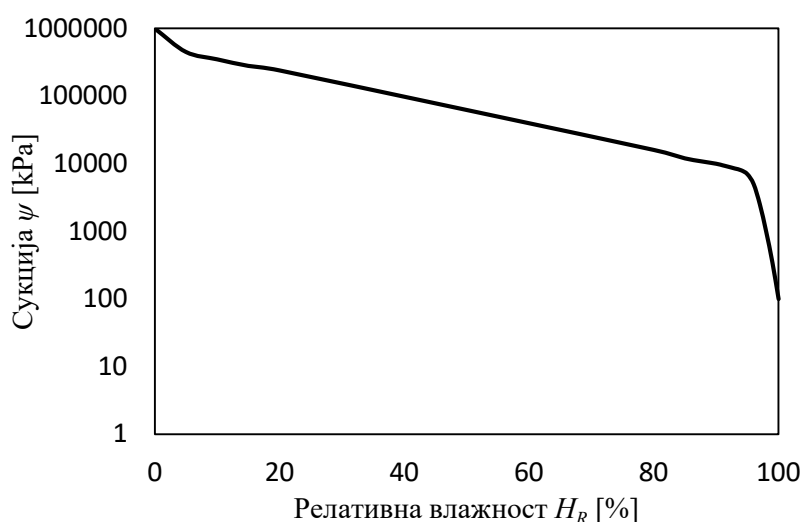
Каде P е притисок (P_a) и ρ_w е густина на водата.

Иако потенцијалот на притисок е обично позитивен, постојат случаи во кои не е. Еден постои кај растенијата, кога негативниот потенцијал овозможува црпење на водата преку корењата до лисјата.

Сукцијата и релативната влажност се поврзани со изразот на Келвин. Ако е позната температурата и влажноста, тогаш сукцијата е

$$\Psi = \frac{RT}{M_w} \ln(H_R) \quad (20)$$

каде Ψ е сукција (MPa), H_R е релативна влажност (/), R е универзална гасна константа ($8.3143 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), M_w е маса на вода (18.016 g/mol) и T е Келвин-ова температура. Следната слика ја дава промената на вкупната сукција со релативната влажност на $T=293.16 \text{ K}$ со користење на Келвиновиот израз. Вкупната сукција е нула кога $H_R=100\%$ и се зголемува кога H_R се намалува, види слика 14.



Слика 14. Зависност на вкупната сукција и H_R според изразот на Келвин

Содржината (количината) на вода во почвата може да се опише на база на маса или волумен. Во лабораторија обично се користи содржината определена на база на маса (гравиметриска) која ја претставува масата на изгубена вода од почвен примерок сушен на 105°C во однос на масата на сува почва. На терен или при моделски мерења поадекватно е да истата се прикажува како волумен на вода во однос на волумен на почва. Врската помеѓу двете влажности може да се опише како

$$\theta = \frac{w\rho_b}{\rho_w} \quad (21)$$

каде ρ_b сува густина на почва и ρ_w е густина на вода (kg/m^3), w е влажност изразена преку маса (%) – гравиметриска, θ е влажност изразена преку волумен на вода во порите (m^3/m^3) – волуметриска. Оттука, може да се заклучи дека влажноста изразена преку волумен има поголема вредност од влажноста изразена преку маса.

Движењето на водата во почвите е зависно од гравитациониот, матричниот и осмотскиот потенцијал, додека воздухот како флуид во порите останува како атмосферски. Во отсуство на гравитациониот потенцијал, движењето е хоризонтално. Ефектот на осмотската сукција е минорен во споредба со ефектот на матричната сукција. Движењето на водата не е предизвикано од сукцијата, туку од хидростатичкиот притисок (или вкупен притисок) H кој е збир од гравитациониот притисок z и порниот притисок h (Zhang, et al., 2018):

$$H = z + h = z + \frac{u_w}{\rho_w \cdot g} \quad (22)$$

Каде ρ_w е густина на вода, u_w е порен воден притисок и g е земјено забрзување.

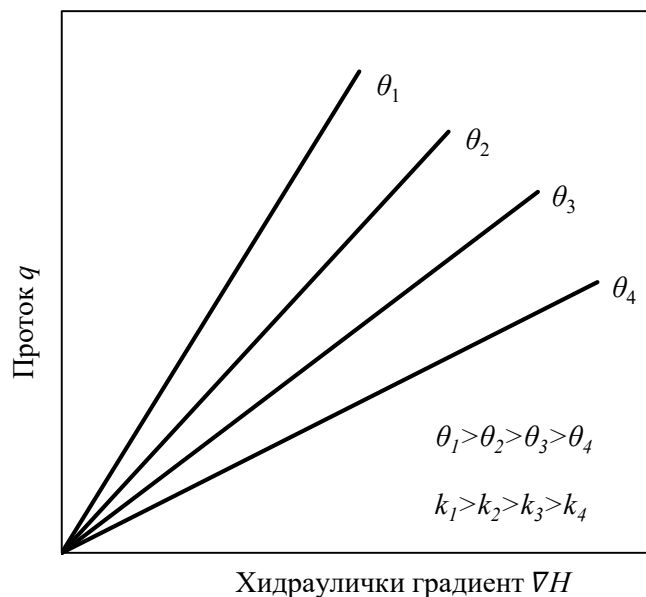
Движењето на водата може да биде стационарно (steady state) и нестационарно (transient), во зависност од видот на почвата и граничните услови. Стационарното е временски независно и може да се случи кај незаситените почви во случај на константна сукција или константна влажност помала од заситената, при што водата се движи во рамките на порите. Нестационарното е временски зависно и може да биде резултат на промената на граничните услови, како на пример инфилтрација или евапорација.

Движењето на водата во заситените почви е објаснета со законот на Дарси (Darcy). Кога станува збор за незаситени почви, овој закон може да се запише во следната модифицирана форма:

$$q = K(\theta) \cdot \nabla H \quad (23)$$

каде q е проток, $K(\theta)$ е функција на хидрауличната спроводливост зависна од геометријата на порите, густината и вискозноста на флуидот, а ∇H е висина на воден столб (хидраулички градиент).

Оттука, зависноста на протокот и хидрауличниот градиент во незаситени услови е нелинеарна. За илустрација даден е дијаграм за различни вредности на волуметриски влажности, каде наклонот на секоја права ја претставува соодветната хидраулична спроводливост k (слика 15).



Слика 15. Зависност на протокот и хидрауличниот градиент кај незаситени почви

Оттука, може да се заклучи дека генерално хидрауличната спроводливост не е константна, туку зависи од волуметриската влажност. Како што се намалува влажноста во иницијално заситена почва, поради навлегувањето на воздухот во порите, хидрауличната спроводливост се намалува.

2.1.3. Техники и инструменти за мерење на хидрауличните карактеристики на незаситените почви

За мерење на хидрауличните карактеристики на незаситените почви: сукција, влажност и хидраулична спроводливост, се користат различни техники и опрема во зависност од материјалот, точноста и чинењето. Расположивите техники можат да се поделат на теренски и лабораториски методи. Податоците од мерењата можат да се користат при дефинирање на хидромеханичкото однесување на незаситените почви, како и во земјоделството за оптимизација на наводнувањето.

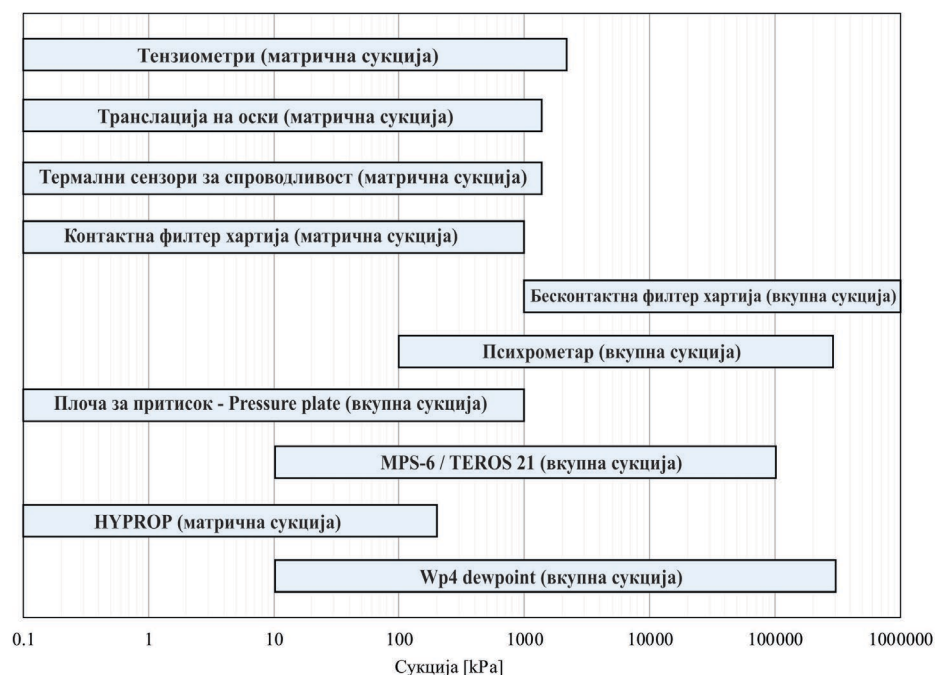
Edgar Buckingham (1902) прв започнал да го разгледува и проблемот на движење на водата во незаситените почви и сфатил дека влажноста не е таа која ја движи водата, туку некои други сили. Го искористил Омовиот и Фуриер-овиот закон за да го опише течењето предизвикано од електричните и топлинските сили чии градиенти предизвикуваат т.н. „капиларна спроводливост”.

Мерењето на влажноста може да се врши директно во лабораториски услови при што се добива гравиметриска влажност на пореметени и непореметени проби. Кога станува збор за мерења на терен или континуирани мерења при експериментални истражувања, се користи индиректна метода преку формирање зависности помеѓу некои карактеристики на почвата кои можат да се добијат преку мерење на електричен отпор.

Најчесто се користат инструменти кои се засноваат на рефлектрометрија TDR (Time Domain Reflectometry) кои се доста прецизни за различни видови почви, а не е потребна калибрација со почвата. Други техники за мерење на почвената влажност со помала точност се FDT (Frequency Domain Technique), неутронска проба или метод со воздушен притисок.

Мерењето на сукцијата е од суштинско значење за проучувањето на однесувањето на незаситените почви. Истото може да биде попречено од кавитацијата во слободната вода кога притисокот ќе достигне 1 atm. Кавитацијата е процес на создавање на пара во течноста кога апсолутниот притисок паѓа под притисокот на водена пара. Ова е главен недостаток на тензиометрите како еден од најчестите начини на директно мерење на сукцијата.

Гледано историски, за мерење на сукцијата се развиени различни методи со различни принципи на мерење. На слика 16 се прикажани различните техники и инструменти за мерење на сукцијата, како и нивниот опсег на мерење.



Слика 16. Техники и инструменти за мерење на сукција и нивен опсег на мерење

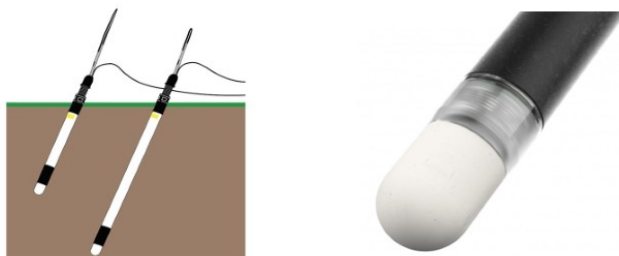
Постојат група на директни методи кои ја мерат матричната компонента преку раздвојување на водата и воздухот во порите и група на индиректни методи кои ја мерат вкупната сукција преку корелирање на сукцијата со релативната влажност, електричен отпор, термичка спроводливост, диелектрична константа и др. Овде ќе бидат објаснети само некои од следните техники и инструменти за мерење на матричната сукција:

- Тензиометри;
- Техниката со транслација на оски (Axis Translation Technique);
- Осмотска техника (Osmotic technique);
- Сензори за електрична/топлинска спроводливост (Electrical/Thermal Conductivity Sensors) и
- Техника со контактна филтер хартија.

Тензиометрите се користат за директно мерење на негативниот порен воден притисок со воспоставување на директна врска помеѓу порната вода и мерниот инструмент. Техниката со транслација на оски се заснова на контрола на разликата меѓу порниот воздушен притисок и порниот воден притисок и мерење на соодветната содржина на вода во почвата која е во рамнотежа со аплицираната матрична сукција. Од друга страна, сензорите за електрична/топлинска спроводливост се индиректни методи кои прават корелација на матричната сукција со електричната или термалната спроводливост на порозниот медиум во масата на незаситената почва. Спротивно на ова, техниката со филтерска хартија ја мери влажноста во рамнотежа на мала филтер хартија во директен контакт со незаситениот примерок. По постигнатата рамнотежа, се мери влажноста на филтер хартијата гравиметриски, а влажноста се поврзува со матричната сукција знаејќи ја калибрационата крива на хартијата која се користи. Истата е многу едноставна, евтина и разумно прецизна за практична примена, пропишана и со стандардот ASTM D5298.

Во ова истражување се користени тензиометри со низок капацитет како дел од лабораториски апарат за дефинирање на зависноста на сукцијата од волуметриската влажност. Тој се состои од цевка исполнета со вода која на едниот крај има керамичка

капа со микроскопски пори и со висок притисок на влез на воздух, а на другата сензор за негативен воден притисок, види слика 17. Разликата во притисоките на керамичкиот диск се пресметува со равенката на Young-Laplace. Негативниот притисок се пренесува низ заситените пори на керамичкиот диск со извлекување од тензиометарот сè додека водениот притисок во цевката е ист со матричниот потенцијал на водата во почвата. Времето на реакција на тензиометрите е од 1 до 10 минути, а максималниот опсег на мерење достигнува само 1.5 МПа.



Слика 17. TEROС-32 тензиометар (Meter Group, 2020)

Како најкористени техники за мерење на вкупната сукција можат да се издвојат:

- Термички психрометри (Thermocouple Psychrometers);
- Хигрометри со ладно огледало (Chilled-Mirror Hygrometers);
- Полимерни сензори за мерење на отпор/капацитет (Polymer Resistance/Capacitance Sensors);
- Техника со бесконтактна филтер хартија (Non-contact Filter Paper Technique) и др.

Овде ќе бидат објаснети само некои од техниките и инструментите кои се применети во ова истражување.

Овие техники работат на принципот на мерење на физички карактеристики на примерокот кои се зависни од влажноста. Како основа на овие техники е првиот инструмент со кој е измерена капиларната спроводливост, односно плочата за притисок (Pressure plate) направена од L.A. Richards во 1930-тите. Истата не го мери водниот потенцијал, туку го доведува примерокот до специфичен воден потенцијал. Многу истражувачи нотирале грешки при мерењата особено при ниски потенцијали како зачепување на керамичката плоча, ограничувањето на протокот во примерокот, губењето на хидрауличниот контакт помеѓу примерокот и плочата поради собирање на почвата и повторното впивање на водата кога притисокот се ослободува/намалува. При ниски потенцијали, малата хидраулична спроводливост може да предизвика рамнотежа по неколку недели, па и месеци. (Baker & Frydman, 2009) теоретски утврдиле дека матрицата/скелетот на почвата дренира различно под позитивен притисок и под сукција, па оттука рамнотежните содржини на вода при сукција ќе бидат различни со оние под природни услови.

Деценија после воведувањето на „Pressure plate“, L.A. Richards во САД и John Monteith во Британија објавиле реферати како термичките психрометри може да се користат за мерење на воден потенцијал на почва преку доведување во рамнотежа на примерокот со параа во затворен сад, мерејќи ја релативната влажност на параата. При рамнотежа, релативната влажност на параата е директно поврзана со водниот потенцијал на примерокот.

Decagon, денес (Meter Group, 2020) го претставил својот прв комерцијален термосензор – психрометар (SC-10 Thermocouple Psychrometer Sample Changer, подоцна TruPsi) во

1983 година. Во доцните деведесетти години на минатиот век, Decagon започнал со производство на WP4C Dew Point Potentiometer, подобрен метод за мерење на водниот потенцијал користејќи притисок на водена пара. Како и психрометарот (psychrometer), го мери притисокот на водена пара над примерокот затворен во сад. Двата метода ги користат принципите на термодинамиката.

За разлика од психрометарот, мерачот на потенцијал на база на точка на кондензација користи сензор за точка на кондензација на ладно огледало (Chilled-Mirror Hygrometers). Мало огледало во садот се лади сè додека не почне да се формира роса – кондензира (температура за која водената пара би кондензирала во вода). На точката на кондензација регистрирана од фотоелектрична ќелија, WP4C ги мери температурите на огледалото и примерокот со точност од 0.001°C за да ја определи релативната влажност на пареата над примерокот (слика 18). Водниот потенцијал на примерокот е линеарно зависен од разликата на температурата на примерокот и точката на кондензација.



Слика 18. Мерење на вкупна сукуција со WP4C и HYPROP (Meter Group, 2020)

Мерачот на потенцијал на база на точка на кондензација има повеќе предности. Дава брзи и прецизни резултати и во случаи кога операторот е не доволно искусен. Има точност од $\pm 1\%$ од -5 до -300 МПа. Исто, сензорот за точка на кондензација на ладно огледало не бара дополнителна вода и на тој начин не ја зголемува влажноста на пареата над примерокот. Ова мерење има предност во мерењето на водниот потенцијал затоа што се заснова, пред сè, на принципите на термодинамиката, наместо на калибрации. Најновите верзии на овие сензори мерат температура и до илјадити дел од степенот, што го прави возможно мерењето на примероци повлажни и од -0.5 МПа со одлична точност. Опсегот на мерење му е -0.1 до -300 МПа, па над -0.1 МПа мора да се користат тензиометри.

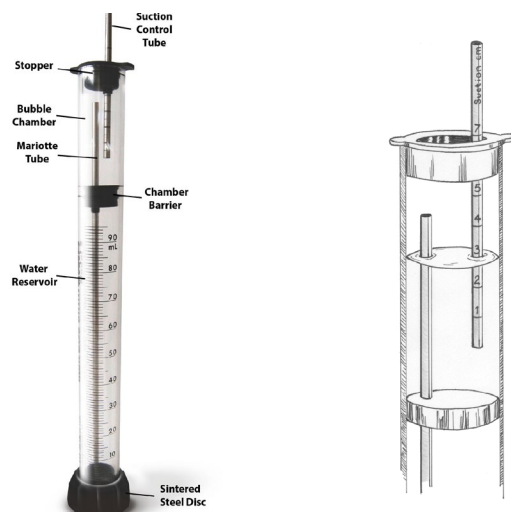
Единствениот лабораториски инструмент кој го користи методот на Wind/Schindler за мерење на сукуцијата и влажноста, односно определување на нивната зависност како крива во доменот на тензиометрите е HYPROP. Користи два прецизни мини тензиометри за мерење на водениот потенцијал за различни нивоа на заситеност на примерокот од 250 cm^3 кој лежи на лабораториска вага за време на мерењето (слика 18). Со тек на време примерокот се суши и инструментот ја мери промената на водениот потенцијал и тежината истовремено. Со тоа, може да се исцрта зависноста на водениот потенцијал од влажноста, при сушење или заситување, а согласно избран модел како, на пр., Van Genuchten/Mualem, бимодален Van Genuchten/Mualem или Brooks and Corey итн. Опитот трае 3-5 дена, но без надзор. Опсегот на мерење е диктиран од опсегот на тензиометрите иако мини тензиометрите се користат за мерење над -0.25 МПа поради нивната функција за ретардација од затоплување. Под -0.25 МПа тензиометрите

кавитираат. Искусните корисници имаат можност да додадат последна точка на кривата на air-entry точката за керамичката капа на тензиометарот (-0.88 MPa).

За мерење на хидрауличната спроводливост на почви се користат лабораториски и теренски методи кои комерцијално се класифицирани како директни (метод со константен притисок, метод со константен проток и метод со центрифуга) и индиректни методи (метод на хоризонтална инфилтрација, одлив во повеќе чекори, моментален профил и повратна анализа).

Методот со константен притисок во геотехничкото инженерство се користи за мерење на заситената хидраулична спроводливост. Овој метод е модифициран за мерење на незаситената хидраулична спроводливост преку контролирање на матричната сукција (Lu & Likos, 2004). Другите директни методи користат слична, а се дополнети и со дополнителна опрема како пумпа за проток на вода или центрифуга.

Во ова истражување, освен HYPROP, користен е и инструмент т.н. инфилтрометар со мал диск за теренско (и лабораториско) испитување на незаситена хидраулична спроводливост со контролирана сукција, но во релативно низок и мал опсег од 0-6 kPa (слика 19).

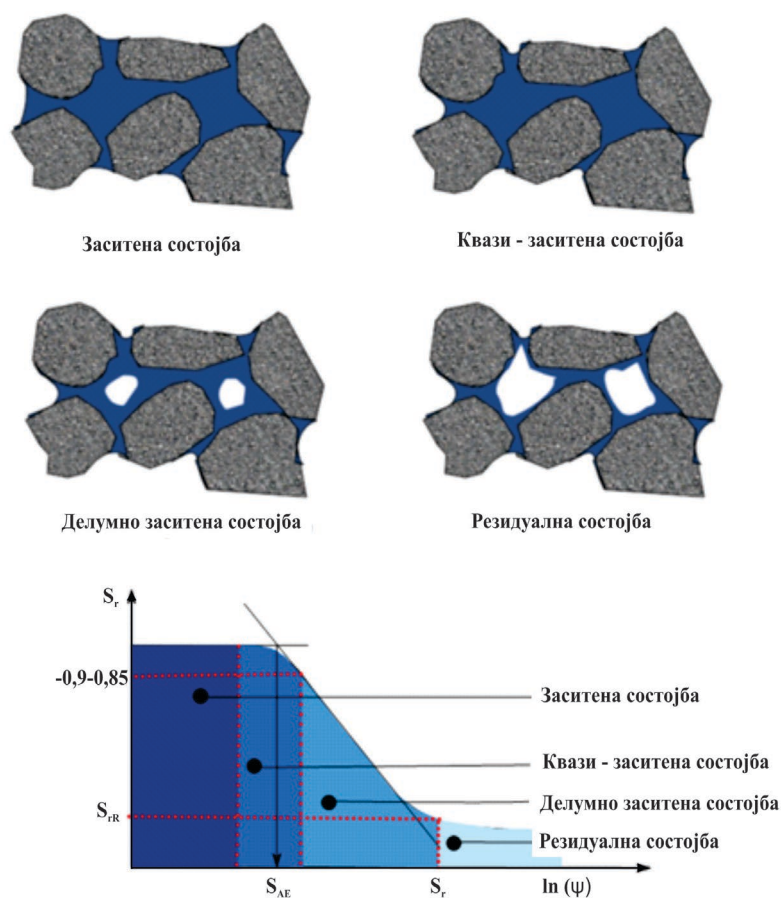


Слика 19. Инфилтрометар за мерење на незаситена хидраулична спроводливост (Meter Group, 2020)

Овој апарат има два сада исполнети со вода: еден за контрола на сукцијата и еден за складирање на вода. Инфилтрометарот завршува со мал порозен диск од некородиращки челик преку кој се овозможува интеракција со почвениот примерок.

2.2. Крива на задржување на почвена влажност (SWRC)

Кривата на задржување на почвена влажност (Soil Water Retention Curve – SWRC), во литературата се среќава и како карактеристична крива на почвена влажност (Soil Water Characteristic Curve – SWCC), детално ја опишува конститутивна зависност помеѓу матричната сукција и содржината на вода во почвата (влажноста), преку кои може да се процени хидрауличната спроводливост и вкупната достапност на вода. Нејзината форма е зависна од материјалните карактеристики на почвата како што се дистрибуцијата на големината на порите, гранулометрискиот состав, збиеноста, содржината на органски материји, содржината на глинени честички и влијанието на минеролошкиот состав врз задржувањето на влажност (Lu & Likos, 2004). Општа форма на овие криви е дадена на следната слика 20.

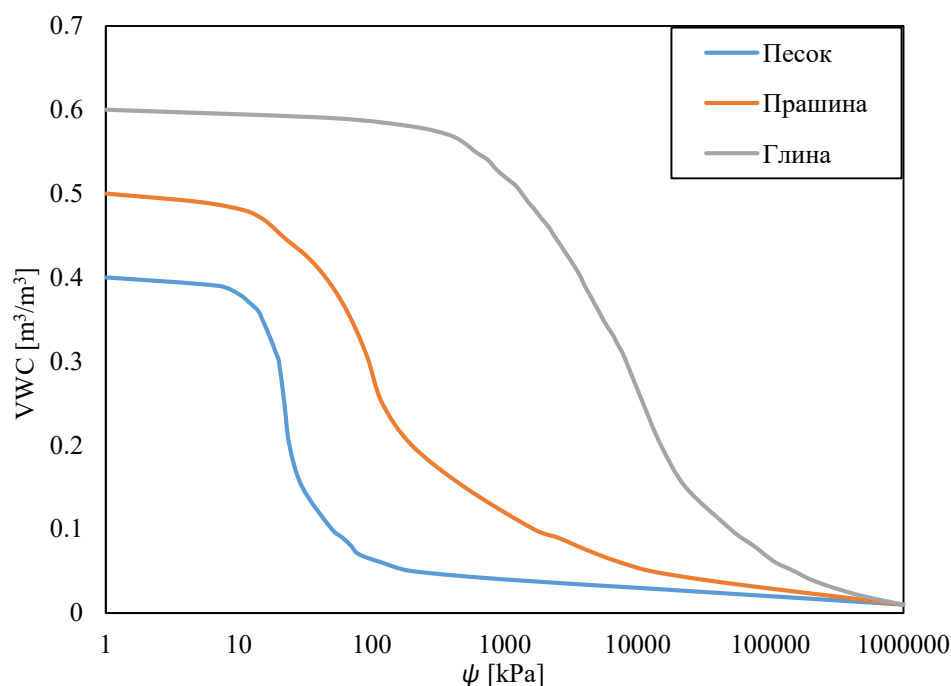


Слика 20. Фази на заситеност и форма на SWRC

Овие криви најчесто се исцртуваат на полулогаритамска зависност на сукцијата со влажноста која може да биде изразена и како степен на заситеност. Кривата може да се подели на три сегменти со различни наклони со степен на заситеност од 0 до 1.0. Овие сегменти илустрираат четири различни фази на заситеност (влажност) со зголемување на вредноста на матричната сукција од нула при целосна заситеност. Во првата фаза, почвата е целосно заситена и загубата на влажност е поради закривувањето на менискусот. Во следната фаза на квази-заситување, воздухот навлегува во најголемите пори и сукцијата расте. Кога ќе се постигне т.н. притисок при влез на воздух - Air-entry pressure (AEP), кривата преминува во следна фаза каде доминираат капиларните ефекти, а сукцијата продолжува да се зголемува. Во последната резидуална фаза почвата содржи мала количина на вода зависна од контактната површина со цврстите честички, како и

од нивната големина и форма. Водата е во облик на тенки слоеви околу зрната задржувајќи се со помош на електростатичките сили помеѓу зрната. Оттука, и формата на овие криви е различна за различни материјали.

На слика 21 се презентирани криви на задржување на почвена влажност за три различни видови почва, демонстрирајќи го ефектот на површината на честичките.



Слика 21. Криви на задржување на почвена влажност за три различни типови почва

Песокливите почви побрзо се дренираат после вредноста на АЕР. Од друга страна, глините имаат поголем капацитет на задржување на влажност, поради поголемата површина на зрната.

Равенката која ги опишува овие криви е

$$\psi_m = \psi_c \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b} \quad (24)$$

Каде ψ_m е матрична сукулзија, ψ_c е сукулзија при влез на воздух (кога почвата почнува да се дренира – десатуира), θ е волуметриска влажност, θ_s е влажност при заситена состојба и b е константа. Многу често сукулзијата при влез на воздух (air-entry potential) и влажноста при заситена состојба се комбинираат во една константа a

$$a = \psi_c \theta_s^b \quad (25)$$

по што се добива

$$\psi_m = a \theta^{-b} \quad (26)$$

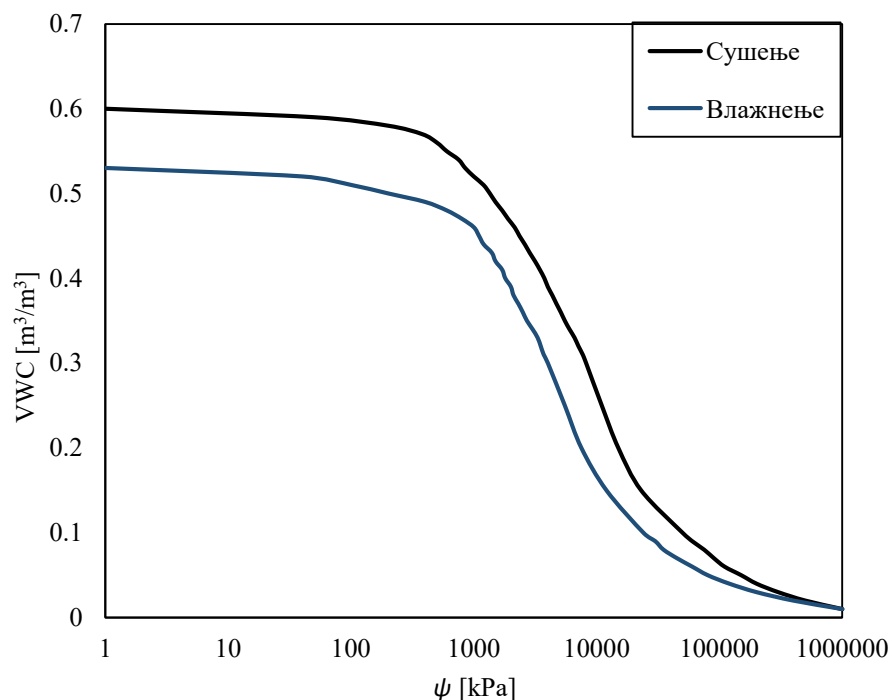
Сукулзијата при влез на воздух ψ_c и вредноста на b зависат од текстурата и структурата на почвата. Текстурата на почвата може да се изрази преку класата на текстура, како фракција на песок, прашина или глина, преку номиналниот дијаметар на зрна или преку стандардната девијација на дијаметри на зрна што е најважно за добивање на хидрауличките карактеристики. Структурата на почвата може да се изрази преку сувата волуменска тежина или вкупниот простор со пори (порозноста).

Не постои еден инструмент кој може да ја креира кривата во цел домен, па и оние кои мерат само во определен домен имаат недостатоци кои имаат влијание врз финалните резултати. Мерењето на сукцијата во влажниот домен со HYPROP и во сувиот домен со WP4 бара внимателност и вештина, но сепак со комбинирање може да се добие комплетна крива со висока резолуција. Истото ќе зависи од други фактори:

- Вкупната сукција (ψ_i) во почвите е збир на четири различни компоненти: матрична сукција (ψ_m), осмотска сукција (ψ_o), гравитациона сукција (ψ_g) и сукција (потенцијал) од притисок (ψ_p). Во кривата на заситеност активни се само првите две. HYPROP го мери само матричниот потенцијал, додека WP4 го мери матричниот и осмотскиот потенцијал (збир од двете). Во почвите со висока концентрација на соли, осмотскиот потенцијал треба да се утврди и да се одземе од читањата на WP4. Сепак, повеќето почви немаат значителна концентрација на соли, па нема потреба од вакво прилагодување на резултатите.
- Хистерезис. Можно е за една влажност на почвата да постојат два различни вредности за сукцијата. Детали за овој феномен се прикажани подолу.

За успешно комбинирање на двете методи, се препорачува нивна последователна примена. Откако ќе заврши мерењето со HYPROP, односно вториот тензиометар покажува сукција при влез на воздух (air entry), се земаат шест примероци од истиот HYPROP примерок за тестирање во WP4.

Прогресот на кривата на задржување на почвена влажност зависи од тоа дали мерењето се базира на сув примерок кој се заситува (крива при заситување) или на водозаситен примерок кој се суши (крива при сушење). За иста содржина на вода, сукцијата на кривата при сушење ќе биде секогаш поголема од таа при заситување, односно кривата добиена при сушење лежи над кривата добиена при влажнење, види слика 22.



Слика 22. Типични SWRC добиени при сушење и при влажнење за ист материјал (Bharat, 2017)

На тој начин, повеќе вода се задржува во почвата при сушењето отколку при влажнењето споредено за исти вредности на сукцијата. Ефектот на хистерезис е поизразен во областа на заситување во споредба со областа во близина на резидуалната содржина на вода.

Една од причините за овој феномен е хетерогеноста на порите. Поголемите пори се дренираат побрзо од помалите, но помалите се полнат (заситуваат) побрзо од покрупните. Друг фактор е тоа што воздухот е заробен различно во зависност од методот и брзината на заситување на порите. Затоа е потребно да се усогласи/избере методот по кој ќе се конструира кривата: апсорпционен или десорпционен (Hartge & Horn, 2016). HYPROP методот се изведува само преку природна евапорација на заситена проба, додека WP4 може да се изведува и по двата метода. Бидејќи се јавува на мал дел од кривата, ефектот на хистерезис за многу од практичните случаи може да се занемари.

2.3. Моделирање на незаситени почви

За проценка на одреден феномен во природата, потребно е да се познава неговото физичко/математичко значење и зависностите помеѓу променливите коишто се дефинираат преку некој физички закон (на пр. втор закон на термодинамиката, Максвелова равенка, конверзација на маса или енергија итн.). На слика 23 е прикажан дијаграм кој ја дефинира постапката за проценка на материјалното однесување на незаситените почви.



Слика 23. Дијаграм за проценка на феномен

2.3.1. Конститутивни модели за проценка на материјалното однесување

За дефинирање на материјалното однесување на почвите потребна е примена на конститутивни закони кои даваат зависимости помеѓу повеќе променливи (напрегања, дилатации и сл.), како и на параметрите од конститутивните равенки кои се нарекуваат материјални константи.

Како променливи на состојбата на напрегањето (stress state variables) кои се независни од материјалните карактеристики и се користат за опис на условите за рамнотежа на сили или напрегања, најчесто се јавуваат вкупните и ефективните напрегања, порниот притисок и напрегањата на смолкнување. Кај стисливоста такви променливи се дилатациите и порозноста (коефициент на порозност), додека кај проблемите со филтрација степенот на заситеност, влажноста и водениот притисок.

Конститутивните зависимости се равенки кои ги изразуваат врските помеѓу главните променливи и се корисни за предвидување на физички феномен кога постои квалитативно објаснување за главните променливи, односно ги вклучува физичките карактеристики за да се симулира некаков процес.

За илустрација, кај Мор-Кулоновиот (Mohr-Coulomb - M-C) критериум за лом со кој може да се дефинира стабилноста на природните и инженерските косини, нормалните напрегања и напрегањата на смолкнување се променливи на состојбата на напрегањата,

а кохезијата и аголот на внатрешно триење се материјални константи. Анвелопата на лом претставува конститутивна зависност.

Значењето на анвелопата на лом кај незаситените почви е покомплексна поради присуството на третата главна променлива: „матрична сукција“ која влијае врз јакоста на почвата. Понатаму, матричната сукција е зависна од друга променлива, а тоа е влажноста на почвата.

Незаситените почви се анализираат како мулти фазен систем составен од цврста, течна и гасовите фаза. Во воздушната фаза може да постои и вода во вид на пареа и обратно, во течната фаза може да постои воздух во растворена состојба при дадени атмосферски услови. За да се разбере движењето на воздухот и пареата низ незаситените почви, мора да се знаат некои главни променливи како густината на воздухот, густината на водата, релативната влажност како и неколку материјални константи како вискозноста на воздухот и водата.

(Bishop, 1959) прв дава две независни врски помеѓу напрегања како нормален притисок и матрична сукција. Тој предложил израз за јакост на смолкнување во смисла на овие две независни променливи и материјална константа χ_f во затворен облик. Оваа константа претставува параметар на ефективното напрегање, односно нелинеарна функција на степенот на заситеност на почвата и може да има вредност од 0 до 1. Поради неможноста за дефинирање на овој параметар, Bishop предлага индиректна процедура за добивање на истиот со користење на класичниот М-С критериум:

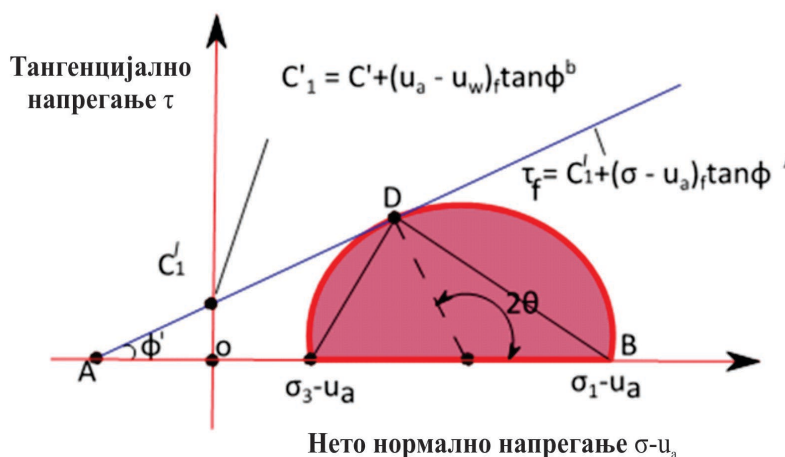
$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a)_f + \chi_f(u_a - u_w)_f] \tan \varphi' \quad (27)$$

каде τ_f е јакост на смолкнување на незаситената почва, σ е тотално (вкупно) напрегање на површината на лизгање, u_w е порен притисок на вода, u_a е порен притисок на воздух, а c' и φ' се ефективни кохезија и агол на внатрешно триење за целосна заситеност. $(\sigma - u_a)$ претставува нето нормално напрегање на површината на лизгање.

До денес повеќе автори даваат слични равенки, а степенот на заситеност S станува сè почесто користен параметар наместо χ_f . Во тој случај, ефективното напрегање σ' за незаситени почви е:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + S \cdot (u_a - u_w) \quad (28)$$

На слика 25 се дава графички приказ на М-С критериумот според предложената теорија на Bishop.



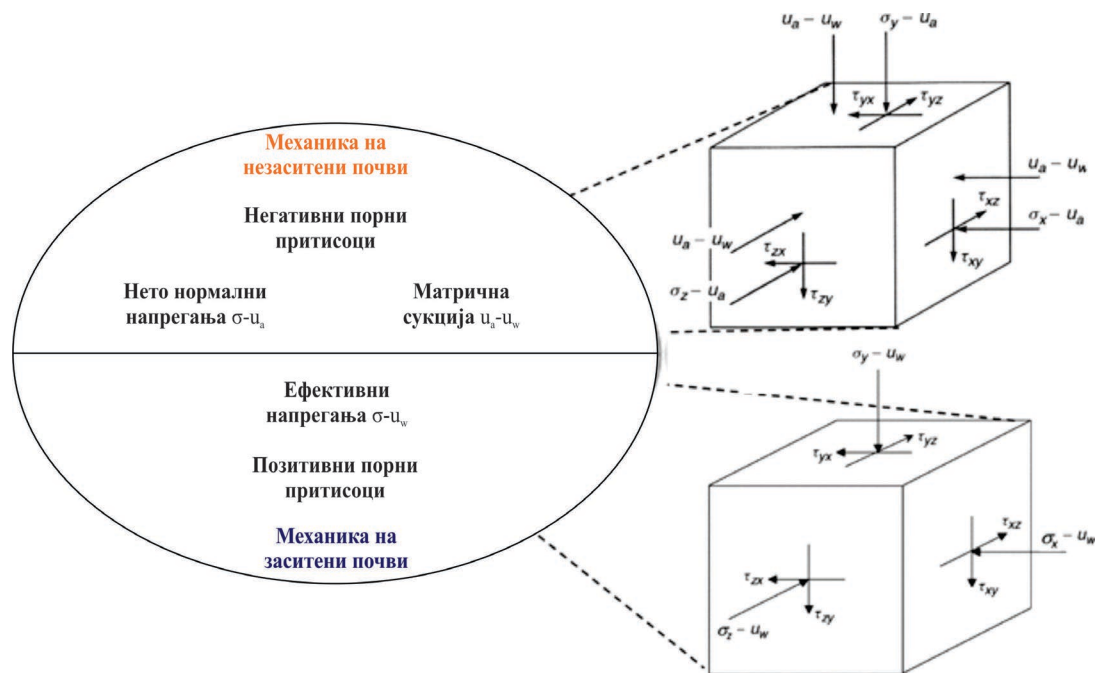
Слика 24. Мор-Кулонов критериум за незаситени почви според пристапот на Bishop

Повеќе други научници како (Fredlund & Morgenstern, 1977) и (Fredlund & Rahardjo, 1993) го анализираат проширениот Mohr-Coulomb критериум преку т.н. „нулти тестови“ (Null tests) – мерења базирани на различни комбинации на главните променливи. Преку модифицирани триаксијални и тестови на директно смолкнување со контролирана сукција и нормално напрегање преку порниот воздушен, порниот воден и страничниот притисок при тестирањето.

Во самите тестови променливите на состојбата на напрегањето се варијани според:

$$\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = \Delta\sigma_z = \Delta u_w = \Delta u_a \quad (29)$$

Каде Δ означува промена во нормалните напрегања σ во x , y и z правец, и порниот притисок на вода и воздух, што значи дека вредностите на променливите на состојбата на напрегање $(\sigma - u_a)$, $(\sigma - u_w)$ и $(u_a - u_w)$ се одржуваат константни, а нема промена ни во вкупниот волумен и степенот на заситеност на пробата. Било кои две променливи од наведените можат да се искористат за да се опише состојбата на напрегање на незаситената почва. Доколку се промени една или повеќе од овие променливи, рамнотежата на системот е нарушена (Fredlund, 2016). Графичка презентација на предложениот концепт е дадена на слика 25.



Слика 25. Визуелизација на состојбата на напрегања во точка за незаситени и заситени почви (Fredlund, 2016)

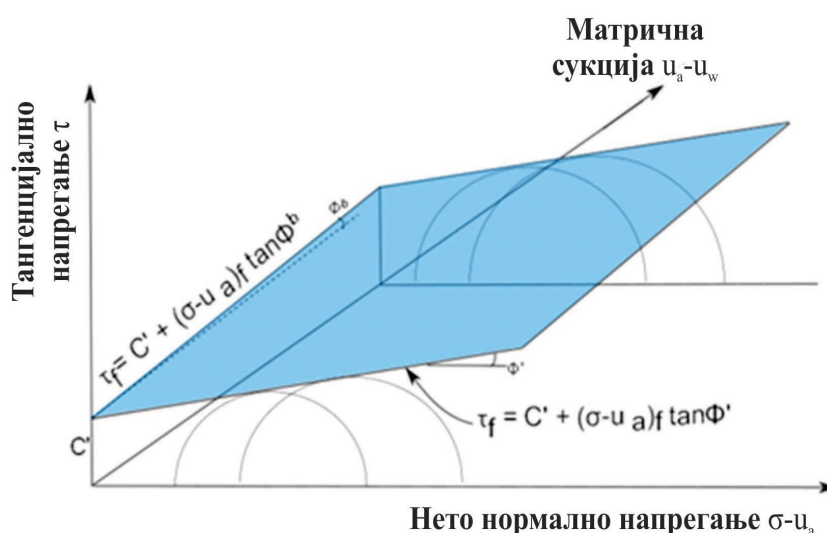
Оваа слика го илустрира преминот во описот на состојбата на напрегања на заситена и незаситена почва и обратно. Преминот се случува на нивото на подземна вода или во точката каде порниот воден притисок преминува од позитивен во негативен. Постои и зона непосредно над нивото на подземна вода наречена капиларна зона која генерално е заситена. Кога незаситена почва се заситува, порниот воден притисок го достигнува порниот воздушен притисок, па и матричната сукција е еднаква на нула.

(Fredlund, et al., 1978) предлагаат едноставен М-С критериум за зголемувањето на јакоста на смолкнување со десатурацијата базиран на независни променливи на напрегањето. Јакоста на смолкнување може да се формулира во смисла на две променливи на состојбата на напрегање: нето нормалното напрегање $(\sigma - u_a)$ и сукцијата преку

ововедување на нова променлива – агол на внатрешно триење φ^b кој го покажува зголемувањето на јакоста на смолкнување поврзано со матричната сукција. Проширениот М-С критериум може да се запише како:

$$\tau_f = c'_{\psi_m=0} + (\sigma - u_a)_f \cdot \tan \varphi' + (u_a - u_w) \cdot \tan \varphi^b \quad (30)$$

Каде $c'_{\psi_m=0}$ е кохезија на пресекот на заситениот систем и за нула нето нормално напрегање $(\sigma - u_a)$ т.е. ефективна кохезија во заситени услови. Овој критериум е претставен на слика 26 како површина со проширена оска за матричната сукција.



Слика 26. Проширен М-С критериум (Fredlund, et al., 1978)

Анвелопата на лом е рамна површина исцртана со променливите на состојбата на напрегања τ , $(\sigma - u_a)$ и $(u_a - u_w)$. Аголот на внатрешно триење од десната страна на равенката го покажува прирастот на јакоста на смолкнување поврзан со матричната сукција во рамнината претставена со τ и $(u_a - u_w)$. Двата други термини го означуваат М-С критериум. Очигледно е дека φ^b е помал, а во некои случаи и еднаков на φ' .

(Vanapalli, et al., 1996) предлагаат нелинеарна зависност на јакоста на смолкнување што потекнува од нелинеарноста на SWRC кривата

$$\tan \varphi^b = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \cdot \tan \varphi' \quad (31)$$

каде θ_s е влажност при целосна заситеност и θ_r е резидуалната влажност.

Индириктно, преку напрегањата, хидрауличките карактеристики на материјалот влијаат врз деформациите и деформабилните карактеристики на материјалот како што е стисливоста на почвата која е зависна од напрегањето, но и од времето, особено кај ситнозрните почви. Овде се применуваат конститутивни зависимости за да се поврзат напрегањата (ефективните напрегања), дилатациите (слегањата) и времето потребно да се постигне консолидација под одредено напрегање, од каде се добиваат материјалните (стисливи) карактеристики како коефициент на стисливост (C_c), коефициент на консолидација (C_v) итн. Истите се добиваат од зависностите: време-слегање и напрегање-коефициент на порозност, од каде може да се определи и главната променлива – товар на преко консолидација. Од овие зависимости може да се заклучи дека со зголемувањето на ефективното напрегање, коефициентот на порозност се намалува, а се намалува и хидрауличната спроводливост.

Главните променливи на деформациите кај незаситените почви мора да задоволат континуитет, компатибилност и конзервација на маса (Fredlund, et al., 2012). Треба да се земат предвид и дисторзијата и промените во волуменот. Врз основа на механиката на континуумот, тензорот на дилатации може да се изрази како:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (32)$$

Каде ε е тензорот на дилатации, ε_x , ε_y и ε_z се компонентите на нормалните дилатации во x , y и z правец, соодветно, γ_{xy} , γ_{yx} , γ_{yz} , γ_{zy} , γ_{xz} и γ_{zx} се компонентите на дилатациите од смолкнување. Ако u , v и w се компонентите на поместувањата во x , y и z правец, соодветно, и под претпоставка дека дилатациите се мали, тогаш компонентите на дилатациите можат да се изразат како:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad \gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{array} \right\} \quad (33)$$

Волуметриската дилатација ε_v е изразена како:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (34)$$

Освен со порниот притисок, однесувањето на почвата од косина изложена на врнежи зависи и од состојбата на напрегања за време на инфилтрацијата, а со тоа се менува и деформацијата на почвата и процесот на течење. Затоа е потребно да се најде равенка која ќе го изрази заедничкото влијание на деформацијата и течењето кај незаситени почви и ќе ја опише рамнотежата на структурата и промената на задржувањето на водената фаза. Поради комплексноста на равенката и нелинеарното однесување на почвата, за моделирање на хидромеханичкото однесување на незаситените почви кај косини изложени на врнежи, најчесто се користат нумерички методи. Равенките можат да бидат базирани на еластични и еластопластични конститутивни формулации.

Формулациите базирани на еластични конститутивни модели можат да се засноваат на пристапот на ефективни напрегања и пристапот на две променливи на состојбата на напрегањата (нето нормалното напрегање и матричната сукција кои влијаат врз промената на волуменот на почвата).

2.3.2. Обединета хидромеханичка анализа за незаситена почвена косина

Целосно споена анализа на деформации и течење се врши кога е потребно да се анализира истовремено развојот на деформации и порен притисок во заситени и делумно заситени почви како резултат на временски зависните промени на хидрауличните гранични услови. Примери за вакви анализи се нагло спуштање на нивото на вода кај брани, насипни брани изложени на бранови од плима, делумно дрениран ископ и одводнување на градежна јама и сл. Спротивно на консолидациона анализа која првенствено влијае врз порниот надпритисок, целосно споената анализа на деформации и течење директно влијае врз вкупниот порен притисок т.е. збирот од притисокот при стационарно течење и порниот надпритисок. Сепак, за да се усогласи со останатите

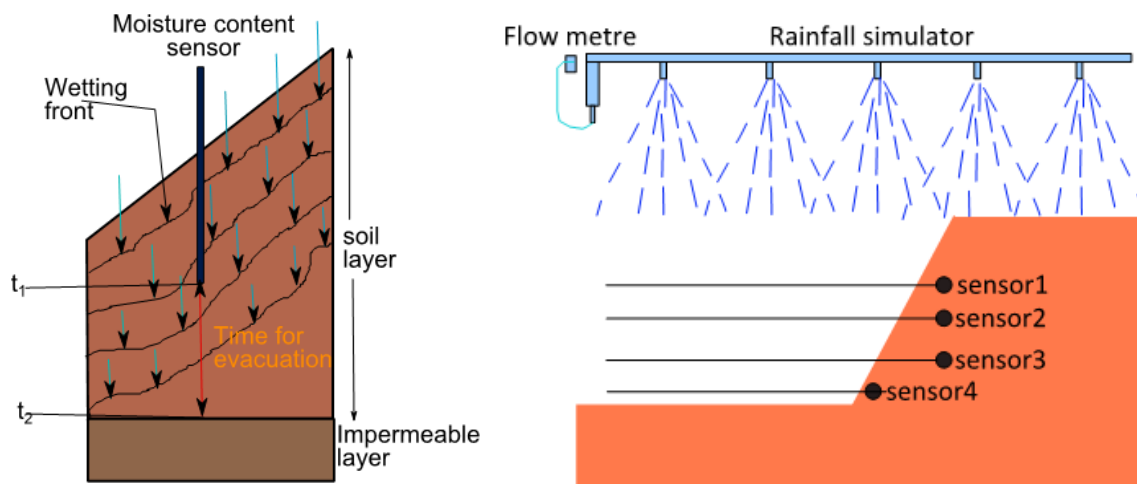
видови на пресметки, порниот притисок при стационарно течење се пресметува врз основа на хидрауличките услови на крајот на пресметката, што овозможува повратна пресметка на порниот надпритисок од вкупниот порен притисок.

Целосно споената анализа на деформации и течење го зема предвид однесувањето на незаситената почва и сукцијата во незаситената зона над нивото на подземна вода. Ова е најнапреден и најреален вид на анализа која ја зема предвид намалената водопропусност и степен на заситеност во незаситената зона. Од таа причина, можноста да се исклучи сукцијата не е достапна при ваквата анализа. Сепак, позитивните порни притисоци во незаситената зона можат да ограничени со користење на опцијата за исклучување на сукцијата. Кога целосно споената анализа на деформации и течење ќе се искombинира со температурна пресметка, се добива целосно обединета термо-хидро-механичка анализа.

2.3.3. Физичко моделирање на незаситени почвени косини при интензивни врнежи

За осознавање на реалното почвено однесување за различни инженерски проблеми, се користат физички модели кои се изведуваат во размер или прототипи, на терен или во лабораторија.

За моделирање на хидромеханичкото однесување на незаситени почви, потребни се податоци добиени од мерења на главните големини при промена на влажноста. За таа цел, се изработуваат модели на едноставни косини во лабораториски услови кои се лесни за анализа и моделирање. Истите се инструментираат најчесто со сензори за мерење на дистрибуцијата на влажност и сукција, а врнежите се симулираат со систем од прскалки – спринклери како на следната слика.



Слика 27. Симулација на свлекување предизвикано од врнежи на модели во мали размери

Овие симулации се корисни за почетни истражувања, односно за осознавање на основните механизми на лом за косини кои во понапредно истражување можат да бидат изработени во поголеми или реални размери. Со нив може да се утврди како промената на влажноста, како резултат на испарување или инфилтрација на вода од врнежи, влијае врз состојбата на напрегања и деформации во почвите и да даде профил на вредности на матричната сукција. Ваквите симулации, исто така се корисни за развојот на системи за рано предупредување во реално време.

Постои значителен ефект на размер помеѓу лабораториските физички модели и природните косини. Тој ефект се јавува примарно поради различната состојба на напрегања помеѓу моделот на косина и природната косина. Што е поголем моделот, толку е помала разликата во состојбата на напрегања. Граничните услови, материјалните карактеристики и иницијалната состојба на напрегања се строго контролирани. Моделите во големи размери или во размер 1:1 се доста скапи, но се корисни за верификација на почвеното однесување (избраниот конститутивен модел), механизмот на лом и валидација на нумеричките модели (Jia, et al., 2009).

1g моделите имаат предности во однос на моделите во центрифуга: врнежите можат да се симулираат полесно и попрецизно, негативните и позитивните порни притисоци, како и поместувањата можат да се измерат прецизно (Chueasamat, et al., 2018).

(Askarinejad, et al., 2012) ги истражувале механизмите на активирање на свлечишта предизвикани од врнежи во контролирани услови на модели во мали размери при зголемени забрзувања со помош на центрифуга. Со помош на тродимензионална фотограметриска техника ги следеле поместувањата и волуменските деформации на почвата во текот на циклуси на влажнење и сушење. Освен тоа, следени се и промените во порниот притисок за да се добијат релевантни информации во врска со механизмот кој предизвикува свлекување од влијанието на инфилтрацијата на вода од врнежи и ограничувањето на филтрацијата од страна на плитко симулираната основна карпа.

(Montoya-Domínguez, et al., 2016) го истражувале однесувањето на лабораториски модели во мали димензии од прешинест песок со различна почетна влажност на влијание на вештачки дожд со променлив интензитет од 25-50 mm/h и времетраење од 19-152 минути. Во текот на опитот ги следат промените на волуменетската влажност и поместувањата на косината. Резултатите покажуваат дека времето потребно за појава на лом – нестабилност е зависно од почетната влажност: што поголема влажност, толку пократко време за инфилтрација и појава на нестабилност. Врнежите со помал интензитет, иако значително подгототрајни, не предизвикуваат нестабилност, за разлика од поинтензивните, пократкотрајни врнежи кои предизвикуваат нестабилност за пократко време.

(Spolverino, et al., 2019) испитувале механизми на свлекување во некохерентни почви (вулканска пепел) на модели во голем размер преку мерење на повеќе физички големини како: поместувања, порен притисок, сукција и влажност за време на инфилтрација и испарување. Во првиот експеримент на хоризонтална поставеност на почвата изложена на инфилтрација од дожд со интензитет од 220 mm/h, се јавува лом во вид на течење предизвикан главно од намалувањето на привидната кохезија – сукција до нула и намалувањето на волуменот како ефект на самозбивање при влажнење и тоа во дренирани услови. Во фазата на испарување (14 дена на 20°C) се забележани релативно мало зголемување на сукцијата и опаѓање на влажноста, особено во подлабоките слоеви.

Кога сукцијата достигнува речиси константна вредност (3-5 kPa) косината е постепено подигната до агол од 38° што предизвикува редистрибуција на сукцијата и волуменетската влажност уште во првиот час. Трендот на релативно мали промени на сукцијата и влажноста продолжува и во следните 8 дена.

Повторната изложеност на инфилтрација предизвикува позначителни промени во мерените големини за разлика од претходниот тест, а се забележува и разлика во промените во зависност од местоположбата на сензорите, оние во долниот дел на косината покажуваат побрза реакција за разлика од оние во горниот дел, поради ефектот на гравитациона филтрација.

Класичен лом не е забележан, туку прогресивна ерозија кон ножицата на косината поради намалувањето на сукцијата и под нула течењето предизвикано и зголемената влажност која пак ја предизвикува на движење и самата почва.

(Chueasamat, et al., 2018) го истражувале ефектот на збиеноста на површинскиот песоклив слој и интензитетот на врнежи врз стабилноста на косини. Забележале два типа на лом: површински и прогресивен лом како резултат на намалувањето на ефективните напрегања и зголемување на влажноста. Интензитетот на врнежите го варираше од 0/25/50/100 mm/h, а збиеноста изразена преку релативната збиеност D_r , од 0/25/50%.

(Jia, et al., 2009) го истражувале однесување на 4.0 m висока косина со наклон од 1:1 од песокливо прашинеста почва на флукуација на водата во големи размери. Регистрираат промена во порен притисок, тотален земјан притисок и деформации. При полнење на моделот со вода, забележани се слегнувања од 150 - 300 mm на врвот на косината, што изразено во волуметриска дилатација изнесува 2.5 - 5.8 %, како резултат на релативно растреситата состојба на вградениот материјал, како и парцијално рушење на косината како резултат на влажнењето што резултира до намалена јакост на смолкнување поврзано, пак, со намалувањето на матричната сукција до нула (заситени услови). Порниот притисок расте, но со закаснување поради заробениот воздух во порите околу пиезометрите (сензорите). Вертикалниот притисок расте до достигнувањето на водата до самите сензори, по што почнува да опаѓа до некоја константна вредност. Ова зголемување се должи дел на заробениот воздух во порите, дел на реализираните слегања. При нагло спуштање на нивото на вода (после поплава или во акумулации), порниот притисок во внатрешноста на косината опаѓа релативно бавно, со што и тоталниот притисок се намалува. Забележале и дренаирање на вода од косината, односно брзината на снижување на нивото на вода во косината е помала од онаа надвор од косината, па препорачуваат користење на хоризонтални дренажи. Механизмот на лом е регресивен и ротационен со откинување и ротација на неколку слични блокови.

2.3.4. Нумеричко моделирање на стабилност на косини базирана на целосно споено моделирање

За да се анализира механичкото однесување на заситените или делумно заситените почви со нумеричките методи, како, на пример, методот на конечни елементи на правилен начин, неопходно е да се земат предвид деформациите и течењето на подземната вода (Galavi, 2010). За временски зависно однесување, ова доведува до мешани равенки за поместувања и порен притисок, наречен споен/обединет хидромеханички пристап кои треба да се решат истовремено. За апликации кои вклучуваат хоризонтална површина на подземна вода, равенките можат да се поедностават со одвојување на вкупниот порен притисок во постојана компонента (порен притисок во мирување или при стационарно течење) и временски зависна компонента (порен надпритисок). Но во практични случаи, дистрибуцијата на стационарниот порен притисок е непозната на почетокот на пресметката (недренирани ископи со одводнување или симулација на товар од бранови во off-shore услови). Затоа е потребна поопширна формулација според теоријата за консолидација на Биот (Biot, 1941) која овозможува истовремена пресметка на деформацијата и течењето на подземната вода со временски зависни гранични услови. Главниот предизвик во овој случај е потребата да се користи теоријата на консолидација за незаситени почви, најмалку поради потребата да се симулира нивото на подземна вода. Поради еластопластичното однесување на почвениот скелет и зависноста на сукцијата од степенот на заситеност и релативната водопропусност, сите коефициенти на глобалната

матрица на крутост во формулациите со конечни елементи на теоријата на Biot се нелинеарни. Овој случај е целосно различен од равенките за незаситени почви каде само еластопластичната матрица на крутост е нелинеарна. Затоа се потребни ефикасни нумерички методи како што се имплементирани во програмскиот пакет PLAXIS. Точноста и ефикасноста на пресметката зависат од методот со кој се бираат временските инкременти. PLAXIS 2Д и 3Д користат целосно имплицитна шема која што е безусловно стабилна (Booker & Small, 1975).

Друго суштинско прашање за моделирање на механичкото однесување на незаситените почви е конститутивниот модел кој се користи при споената анализа на деформации и течење. Еден од нив е добро познатиот Barcelona Basic Model (BBM) чија основа е модифицираниот Cam Clay модел за заситени почви проширен со ефектите на сукција кај незаситените почви (Alonso, et al., 1990). Со овој еластопластичен модел може да се симулира нелинеарното, временски зависно и анизотропно однесување на почвите во незаситени услови преку 18 параметри, за чие дефинирање се потребни повеќе испитувања, што го прави неговото користење отежнато. Концептуално сличен модел на него е развиен од (Gonzalez & Gens, 2008) и имплементиран во PLAXIS преку опцијата за дефинирање на модел од страна на корисникот. Главни карактеристики на имплементираниот модел е тоа што тој го користи напрегањето според Бишоп (Bishop & Blight, 1963) и сукцијата како главни променливи (Sheng, et al., 2003); (Gallipoli, et al., 2003) наместо нето напрегањето ($\sigma - u_a$) и сукцијата како што се користат во оригиналниот BBM. Во прилог на имплицитната шема на интеграција на Ојлеровиот (Euler) алгоритам, се користи шема предложена од (Pérez-Foguet, et al., 2001) за интегрирање на зависноста напрегање – дилатација. Влезните променливи на конститутивниот модел се инкрементот на вкупна дилатација и инкрементот на сукција.

Постојат два пристапи за вклучување на промената на порниот притисок при инфилтрација при напонска анализа: поедноставен пристап со вклучување на веќе усвоена дистрибуција на порниот притисок во анализата, и целосно заеднички пристап со вклучување на рамнотежата на почвената структура и конзервацијата на маси на порниот флуид и земање предвид на матричната сукција / порниот притисок во конститутивниот модел.

Со првиот пристап се користат еластопластични модели за заситени почви. Профилот се дели на ламели на кои им се задава константен инкремент на порен притисок, а се намалува ефективното напрегање.

Аналитичкото решение за заедничко хидро-механичко моделирање е ограничено. Затоа најчесто за вакви целосно заеднички анализи се користат нумерички модели, а како параметри се користат зависноста на сукцијата и влажноста (SWRC) и функцијата на водопропусност. (Lloret & Alonso, 1980), (Olivella, et al., 1996) и (Alonso, et al., 2003) развиле серија од заеднички хидро-механички модели со зголемување на комплексноста на конститутивните зависимости за да решат проблеми на течење и механичка интеракција поврзана со промените во сукцијата во заситени и незаситени почви. Развиени се компјутерски кодови NOSAT за заедничка анализа на течење-деформации во незаситени услови и CODE_BRIGHT (Olivella, et al., 1996) за обединета термо-хидро-механичка анализа кај незаситени почви. Со нив можат да се решаваат проблеми како што се: трансфер на влажност и деформации при различни временски услови (Alonso, et al., 2002), деформации и стабилност на косини во преконсолидирани глини при врнежи (Alonso, et al., 2003) и деформации и дренирање кај незаситени експанзивни почви при инфилтрација од вештачки врнежи (Zhan, 2003).

Во поново време за решавање на слични проблеми се користи и напредната нумеричка техника Material Point Method (MPM). (Bandara & Soga, 2015) предлагаат целосно заедничка MPM формулација со мешан теоретски базиран пристап за моделирање на прогресивен лом кај заштитни насипи со кој се добиваат податоци за лом и развој на деформации во тек на време.

Еден од најчесто користените софтвери во геотехничката практика PLAXIS ја разгледува почвата како двофазен материјал. Класичниот начин е со примена на дефиницијата на Терцаги за (Terzaghi) за ефективни напрегања, едноставно со одземање на порниот од тоталниот притисок. Нивото на подземната вода ја разделува заситената почва од незаситената (или „сува“) над неа. Во класичниот пристап, ниту сукцијата, ниту степенот на заситеност не се земаат предвид во незаситената зона. Овој класичен пристап може да се користи во PLAXIS со избирање на „Ignore suction“, што е селектирано по дефиниција во сите видови пресметки (освен во целосно споената анализа на течење и деформации – fully coupled flow-deformation analysis).

Но, PLAXIS може да се користи за решавање на многу проблеми од механиката на незаситени почви. За таа цел, опцијата „Ignore suction“ треба да се деактивира. Тогаш, PLAXIS ја зема предвид дефиницијата на Бишоп (Bishop) за ефективни напрегања и ја вклучува во пресметката сукцијата (негативен порен притисок) и степенот на заситеност. Притоа, од суштинско значење е изборот на соодветен хидраулички модел за врската помеѓу сукцијата и влажноста, како и врската помеѓу сукцијата и релативната водопропусност. Од аспект на течењето на подземната вода, можна е анализа со стационарно течење и транзиентна (временски зависна) анализа на течење на подземната вода. Пред да се дефинираат можностите и ограничувањата на двете опции, дадена е дефиниција за различни напрегања.

Вкупните напрегања се поделени на ефективни напрегања и порни притисоци. Порните притисоци се составени од порен притисок во мирување и порен надпритисок. Со децении PLAXIS 2D го користи терминот „активен порен притисок“ за да го означи придонесот на порните во вкупните напрегања. Во контекст на однесувањето на незаситените почви, активниот порен притисок се дефинира како:

Активен порен притисок: $p_{active} = S_{eff} (p_{steady} + p_{excess}) = S_{eff} p_{water}$

Воден порен притисок: $p_{water} = p_{steady} + p_{excess}$

За целосно заситена почва „активниот порен притисок“ p_{active} е еднаков на „водениот порен притисок“ p_{water} , но кај незаситените почви постои јасна разлика.

Порен притисок во мирување: p_{steady}

Порен надпритисок: p_{excess}

Во случај на целосно споена анализа на деформации и течење, p_{steady} се пресметува од прелиминарната пресметка на стационарно течење на подземната вода со користење на хидраулични гранични услови на крајот на фазата на пресметка. Ова овозможува пресметување и резултати на p_{excess} за целосно споена анализа во сите фази: $p_{excess} = p_{water} - p_{steady}$

Постои врска помеѓу (ефективниот) степен на заситеност (S или S_{eff}) и сукцијата во незаситената зона, што зависи од избраната крива на задржување на почвена влажност на материјалот.

Степен на заситеност: S

Ефективен степен на заситеност: $S_{eff} = (S - S_{res}) / (S_{sat} - S_{res})$

Резидуален степен на заситеност: S_{res}

Заситен степен на заситеност: S_{sat} (вообичаено 1.0)

Терминот „сукција” се користи за означување на било која позитивна вредност на разликата помеѓу порниот воздушен и воден притисок: $p_a - p_{water}$.

Во PLAXIS, се претпоставува широко прифатена хипотеза на константен атмосферски воздушен притисок. Воздушниот притисок се зема нула бидејќи атмосферскиот притисок може да се земе како референтна вредност.

Сукцијата е компонентата на затегање од p_{water} : $Suction = Max(p_{water}, 0)$

Атмосферски притисок: p_a (100 kPa, но во PLAXIS 2D е земен како почетно референтно ниво)

Ефективна сукција: $Suction_{eff} = S_{eff} Suction$

- Ако се помножи со тангенсот на аголот на внатрешно триење, се добива еден вид на „вештачка (привидна) кохезија” во почвата.

Ефективно напрегање: σ' (напрегање во почвениот скелет)

Вкупно напрегање: $\sigma = \sigma' + p_{active}$

Ефективно напрегање според Terzaghi: $\sigma' = \sigma - p_{active}$

- Дефиницијата на Terzaghi за ефективни напрегања се користи за заситени почви

Напрегање според Bishop: $\sigma' = \sigma - p_a + \chi (p_a - p_{water})$

Коефициент на ефективно напрегање: χ

Во PLAXIS 2D, χ се претпоставува да биде еднакво со S_{eff} , па напрегањето според Bishop во PLAXIS 2D е:

$$\sigma' = \sigma - S_{eff} \cdot (p_{steady} + p_{excess}) = \sigma - p_{active}$$

Кога почвата достигнува целосна заситеност ($S_{eff} = 1$), напрегањето според Bishop се совпаѓа со ефективното напрегање според Terzaghi.

Со користењето на ефективното напрегање според Bishop како основа за сите пресметки, сепак може да се направи разлика помеѓу конвенционалните пресметки (целосно заситени или суви материјали) и пресметките во кои се зема предвид однесувањето на незаситените почви. Гореспоменатата разлика може да се направи со занемарување или земање предвид на сукцијата.

За да се спроведе нумеричко моделирање на стабилност на косина од влијание на врнежи во незаситени почви, потребни се резултати од течење и инфилтрација и нивна интерпретација. Ваквата анализа вклучува податоци поврзани со карактеристиките на почвата, геометријата на косината, иницијалните услови, условите на подземната вода и карактеристиките на врнежите.

Во PLAXIS се имплементирани два вида на пресметки за заситени и незаситени почви: анализа со стационарно течење и транзиентна (временски зависна) анализа на течење на подземната вода. Исто така, имплементирани се пет вида на хидраулички модели: моделот на van Genuchten, модел на Mualem (поедноставен модел на van Genuchten кој се нарекува

van Genuchten во PLAXIS Flow развиен од GeoDelft), линеаризиран, сплиниран и целосно заситен.

Стационарната состојба е дефинирана како анализа во која хидрауличниот воден столб и коефициентот на водопропусност во било која точка од почвената маса остануваат постојани во текот на времето што може да се смета како ситуација на течење на подземната вода кога времето тежи кон бесконечност. Спротивно, при транзиентна анализа, хидрауличниот воден столб (а може и коефициентот на водопропусност) се менуваат во тек на време. Промените обично се во однос на промена на граничните услови во текот на времето. За транзиентна анализа со занемарување на поместувањето на цврстите честички (упростување според Boussinesq), се предлага следниот израз:

$$-n \cdot \left(\frac{S}{K_w} - \frac{\partial S}{\partial p_w} \right) \cdot \frac{\partial p_w}{\partial t} + \nabla^T \cdot \left[\frac{k_{rel}}{\rho_w \cdot g} \cdot \underline{k}^{sat} \cdot (\nabla p_w + \rho_w \cdot \underline{g}) \right] = 0 \quad (35)$$

Оваа равенка е форма на добро познатата равенка на Ричард (Richard) која го опишува течењето на подземната вода во заситени/незаситени почви. Равенката ја има следната форма, на пр. (Dogan & Motz, 2005).

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[K_x(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left[K_y(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[K_z(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right] \right\} = [C(h) + S \cdot S_s] \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (36)$$

каде K_x , K_y and K_z се коефициенти на водопропусност во x , y и z правец, соодветно. $C(h) = (\partial \theta / \partial h)$ е специфичен капацитет на влажност (L^{-1}) и S_s е специфично складирање (L^{-1}). Специфичното складирање S_s е материјална карактеристика и може да се изрази во функција од порозноста n :

$$S_s = \rho_w \cdot g \cdot \left(\frac{1-n}{K_s} + \frac{n}{K_w} \right) \quad (37)$$

Стисливоста на почвените честички може да се занемари, па така:

$$S_s = \frac{n \cdot \rho_w \cdot g}{K_w} \quad (38)$$

Терминот $C(h)$ во равенката на Richards може да се прошири како:

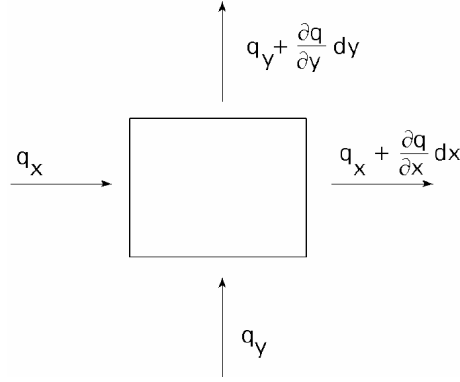
$$C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h} = \frac{\partial}{\partial h} (n \cdot S) = n \cdot \frac{\partial S}{\partial h} \quad (39)$$

Со замена на равенките (38) и (39) во равенката на Richards (36) и со замена од равенка базирана на воден столб во равенка базирана на порен притисок се добива равенката (35).

За стационарно движење на подземна вода при што промената на порниот притисок во функција од времето е нула, се применува условот за континуитет:

$$\nabla^T \cdot \left[\frac{k_{rel}}{\rho_w \cdot g} \cdot \underline{k}^{sat} \cdot (\nabla p_w + \rho_w \cdot \underline{g}) \right] = 0 \quad (40)$$

Оваа равенка покажува дека не постои нето прилив (инфилтрација) и одлив (испарување) во елементарно мала површина како што е илустрирано на следната слика.



Слика 28. Илустрација на условот за континуитет (Galavi, 2010)

За да се опишат деформациите, земен е репрезентативен елементарен волумен на почвата. Линеарната рамнотежа е дадена со:

$$L^T \cdot (\underline{\sigma}' + S_e \cdot p_w \cdot \underline{m}) + \rho \cdot \underline{g} = \underline{0} \quad (41)$$

каде:

$$\rho = (1 - n) \cdot \rho_s + n \cdot S \cdot \rho_w \quad (42)$$

е густината на повеќефазниот медиум, $\underline{g}$ е вектор кој го содржи земјеното забрзување $\underline{g}^T = (0, -g, 0)^T$ во 3D просторот и L^T е транспонентот на диференцијалниот оператор L .

Претпоставувајќи ја теоријата на бесконечно мали дилатации, врската помеѓу дилатацијата и поместувањата може да се формулира како:

$$d\underline{\varepsilon} = L \cdot d\underline{u} \quad (43)$$

Во методот на конечни елементи, поместување во елемент u резултира од нодални вредности на поместувањата v користејќи интерполациони функции (на облик) собрани во матрицата N :

$$\underline{u} = N \cdot \underline{v} \quad (44)$$

Промените на степенот на заситеност ΔS се вклучуваат во инкрементите на силите.

За да се опише проблемот на течење се користи пристапот на Галеркин (Galerkin) со исти функции на облик за порен притисок и поместувања. Со користење на теоремата на Грин (Green) диференцијалниот ред на равенката се намалува и се добива дискретизирана равенка на конверација на маса.

Формулацијата на равенката на Биот (Biot) содржи обединето однесување кое е претставено со двете равенки за рамнотежа и равенката за континуитет на мешавината вода-почва. Поместувањето на цврстата фаза и порниот воден притисок се избрани за главни променливи на проблемот. Просторната дискретизација го дава следниот систем на равенки кој е несиметричен:

$$\begin{bmatrix} \underline{K} & \underline{Q} \\ 0 & -\underline{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{v} \\ \underline{p}_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \underline{C} & -\underline{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\underline{v}}{dt} \\ \frac{d\underline{p}_w}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{f}_u \\ \underline{G} + \underline{q}_p \end{bmatrix} \quad (45)$$

Каде се:

$\underline{K}$ – матрица на крутост која е најчесто зависна од напрегањата

$\underline{Q}, \underline{C}$ – матрици на заедничко однесување зависни од сукцијата

$\underline{f}_u$ – вектор на оптоварување

p_w – порен притисок

$\underline{H}$ – матрица на водопропусност во која водопропусноста е зависна од притисокот, бидејќи сукцијата е зависна од релативната водопропусност k_{rel}

$\underline{S}$ – матрица на стисливост зависна од сукцијата и заситувањето

$\underline{q}_p$ – течење на границите

$\underline{G}$ – вектор со кој се вклучува ефектот на гравитацијата врз течењето, дел од внатрешното течење

Симетријата на овој систем може да се врати со диференцирање по времето:

$$\begin{bmatrix} \underline{K} & \underline{Q} \\ \underline{C} & -\underline{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dv}{dt} \\ \frac{dp_w}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \underline{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{v} \\ \underline{p_w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{df_u}{dt} \\ \underline{G} + \underline{q}_p \end{bmatrix} \quad (46)$$

Во PLAXIS можат да се користат следните гранични услови (boundary conditions – BC):

- Затворен (Closed BC) кој предвидува нула течење (според Darcy) по границата;
- Течење (според Darcy) кон внатре (Inflow) различно од нула со помош на задавање на пропишана вредност. Векторот на течењето $-|q|$ има спротивна насока од векторот на границата;
- Течење (според Darcy) кон надвор (Outflow) различно од нула со помош на задавање на пропишана вредност. Векторот на течењето $|q|$ има иста насока со векторот на границата;
- Воден притисок (столб – Head) може да се зададе како пропишана вредност ϕ ;
- Инфилтрација/испарување (Infiltration/Evaporation) е мешан тип на граница. Вредноста на течењето кон внатре (inflow) може да зависи од времето и во природата истото е ограничено со капацитетот на почвата да го прима – инфилтрира. Доколку количината на врнежи го надмине капацитетот, се случува заезерување на длабочина ϕ_{max} при што граничниот услов преоѓа од течење во воден столб. Штом капацитетот на почвата ќе ја прифати инфилтрацијата, состојбата се враќа назад. За негативна вредност на $|q|$, оваа граница симулира испарување. Течење кон надвор се случува кога водениот столб од подземна вода е поголем од минималниот воден столб даден од корисникот ϕ_{min} ;
- Течење (Seepage) се задава за случај на слободно ниво на вода на границата како во случај кај насипна брана, кога филтрационата линија ќе излезе на низводната косина. Ваквите граници овозможуваат течење кон надвор на подземната вода при атмосферски притисок.

Еден од најчесто користените модели за да се опише хидрауличкото однесување на незаситените почви е моделот на (Van Genuchten, 1980) кој е погенерализиран случај на функцијата на (Mualem, 1976). Функцијата на van Genuchten е трипараметарска равенка која дава зависност помеѓу заситувањето и сукцијата како воден столб ϕ_p , а во PLAXIS се користи со следната форма и ознаки:

$$S(\phi_p) = S_{res} + (S_{sat} - S_{res}) \cdot [1 + (g_a \cdot |\phi_p|)^{g_n}]^{g_c} \quad (47)$$

каде се:

$$\Phi_p = -\frac{p_w}{\rho_w \cdot g} \quad (48)$$

S_{res} – резидуална заситеност која го опишува делот на вода која останува во почвата и при висока сукција;

S_{sat} – заситеност при која порите се исполнети со вода. Генерално, порите при заситена состојба не се исполнети целосно со вода, односно постојат воздушни меурчиња, па оваа заситеност може да биде помала од 1.0;

g_a , g_n и g_c – емпириски параметри. Параметарот е поврзан со сукцијата при влез на воздух (air entry value – AEV) и ја менува формата. Параметарот е функција од брзината на екстракција на водата кога е надмината вредноста на AEV на почвата. Параметарот е функција од резидуалната влажност поврзан со закривеноста на кривата при високи вредности на сукцијата.

Во PLAXIS може да се користи двопараметарската функција на (Mualem, 1976):

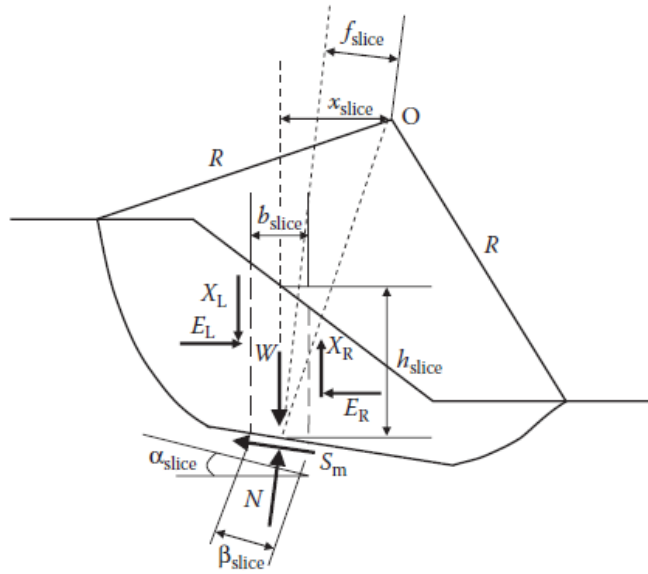
$$g_c = \frac{1 - g_n}{g_n} \quad (49)$$

2.4. Анализа на стабилност на косини

Постојат многу методи за анализа на стабилноста на косините, најчесто именувани по авторите кои ги предложиле кои се користат во инженерската практика, но само некои од нив ја земаат предвид промената на порниот притисок или влажноста предизвикана од инфилтрација на вода. Овде ќе бидат опишани неколку методи кои се применети во ова истражување.

2.4.1. Методот на гранична рамнотежа

При анализа на стабилност на косина со методот на гранична рамнотежа, распределбата на порниот воден притисок може да се земе предвид како влезен параметар на три начини: пресметан порен воден притисок со нумеричка анализа на течење; претпоставка на распределбата базирана на концептот на заситување (влажнење) и податоци од теренски мерења. За пресметка на факторот на сигурност (F_s) за стабилноста на незаситената косина се користат повеќе методи на ламели како на пример: модифициран метод на Bishop за кружни рамнини на лизгање (Rahardjo, et al., 2007), метод на Morgenstern и Price (Cascini, et al., 2010), најчесто користениот проширен критериум на лом на Mohr-Coulomb (Fredlund, et al., 1978) и др. Овде е даден изразот на генералниот метод на гранична рамнотежа (General Limit Equilibrium – GLE) предложен од (Fredlund & Krahn, 1977) кој ја зема предвид јакоста на смолкнување со проширениот критериум на лом на Mohr-Coulomb и ги задоволува двете рамнотежи, на сили и на моменти (Fredlund, et al., 2012). Почвената маса над претпоставената рамнина на лизгање е поделена на вертикални ламели. Силите кои дејствуваат на ламелата се прикажани на следната слика:



Слика 29. Геометрија и сили кои делуваат на една ламела од масата која лизга

каде W е вкупната тежина на ламелата, N е вкупната нормална сила на основата на ламелата, S_m е сила на смолкнување на основата на секоја ламела, E_L и E_R се хоризонтални меѓуламеларни нормални сили од лева и десна страна, соодветно, X_L и X_R се вертикални меѓуламеларни сили на смолкнување од лева и десна страна, соодветно, R е радиус на кружна рамнина на лизгање, f_{slice} е нормално растојание на нормалната сила од центарот на моменти O , x_{slice} е хоризонтално растојание од централната линија – оската на ламелата до центарот на моменти O , h_{slice} е вертикално растојание од центарот на базата на ламелата до горниот пресек на осовината на ламелата со косината (висина на ламелата), b_{slice} е ширина на ламелата, α_{slice} е закосеност на основата на ламелата и β_{slice} е должина на основата на ламелата.

Мобилизираната сила на смолкнување на основата на ламелата може да се изрази како:

$$S_m = \frac{\beta_{slice}}{F_s} \cdot \{c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \varphi' + (u_a - u_w) \cdot \tan \varphi^b\} \quad (50)$$

Вкупната нормална сила на основата N на ламелата според (Fredlund, et al., 2012) е:

$$N = \frac{W - (X_R - X_L) + [-c' + u_a \cdot \tan \varphi' - (u_a - u_w) \cdot \tan \varphi^b] \cdot \frac{\beta_{slice} \cdot \sin \alpha_{slice}}{F_s}}{m_\alpha} \quad (51)$$

каде

$$m_\alpha = \cos \alpha_{slice} + \frac{\sin \alpha_{slice} \cdot \tan \varphi'}{F_s} \quad (52)$$

Вертикалната меѓуламеларна сила на смолкнување X е дефинирана од (Morgenstern & Price, 1965) како:

$$X = \lambda \cdot f_{IS}(x_{slice}) \cdot E \quad (53)$$

каде $F_{IS}(x)$ е меѓуламеларна функција која ја опишува промената на односот X/E долж рамнината на лизгање, λ е константа на размер која го опишува процентот на меѓуламеларната функција за пресметка на равенките за факторот на сигурност.

Така, меѓуламеларните нормални сили се пресметуваат со суперпозиција на хоризонталните сили за секоја ламела почнувајќи од челото кон ножицата.

Факторот на сигурност во однос на рамнотежата на сили $(F_s)_f$ и рамнотежата на моменти $(F_s)_m$, може да се пресмета со изразите дадени од (Fredlund, et al., 2012):

$$(F_s)_f = \sum \frac{\left\{ c' \cdot \beta_{slice} \cdot \cos \alpha + \left[N - u_a \cdot \beta_{slice} + (u_a - u_w) \cdot \frac{\tan \varphi^b}{\tan \varphi'} \right] \cdot \tan \varphi' \cdot \cos \alpha_{slice} \right\}}{\sum N \cdot \sin \alpha_{slice}} \quad (54)$$

$$(F_s)_m = \sum \frac{\left\{ c' \cdot \beta_{slice} \cdot R + \left[N - u_a \cdot \beta_{slice} + (u_a - u_w) \cdot \beta_{slice} \cdot \frac{\tan \varphi^b}{\tan \varphi'} \right] \cdot R \cdot \tan \varphi' \right\}}{(\sum W x_{slice} - \sum N f_{slice})} \quad (55)$$

2.4.2. Методот на бесконечна косина со еднодимензионална инфилтрација

За бесконечна косина во незаситени услови, факторот на сигурност за рамнина на лизгање на длабочина D , може да се пресмета ако се искористи изразот за определување на јакоста на смолкнување кој го предложил (Fredlund, et al., 1978), а е предложен од (Cho & Lee, 2001):

$$F_s = \frac{c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \varphi' + (u_a - u_w) \cdot \tan \varphi^b}{\gamma_t \cdot D \cdot \sin \alpha_s \cdot \cos \alpha_s} \quad (56)$$

каде γ_t е волуменска тежина на почвата, а α_s е агол на косината. Доколку нормалното напрегање на површината на лизгање може да се пресмета во функција од волуменската тежина на почвата како:

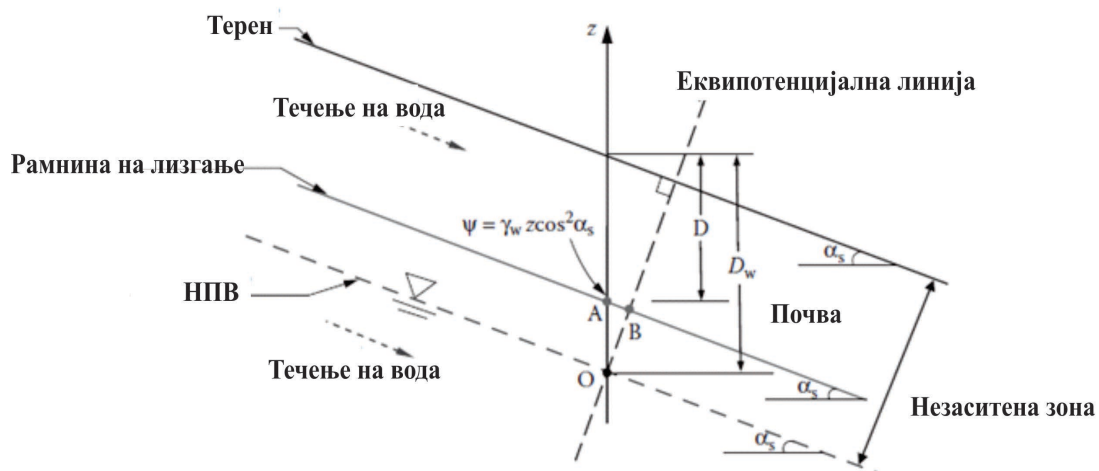
$$(\sigma - u_a) = \gamma_t \cdot D \cdot \cos^2 \alpha_s \quad (57)$$

тогаш за факторот на сигурност F_s се добива:

$$F_s = \frac{c'}{\gamma_t \cdot D \cdot \sin \alpha_s \cdot \cos \alpha_s} + \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha_s} + \frac{(u_a - u_w) \cdot \tan \varphi^b}{\gamma_t \cdot D \cdot \sin \alpha_s \cdot \cos \alpha_s} \quad (58)$$

Многу истражувачи овој израз го модифицираат и даваат во различна форма.

За стационарни услови на течење, водата се движи паралелно со линијата на подземна вода. На тој начин, хидрауличниот градиент во правец нормален на линијата на подземна вода е нула, односно нема движење на вода во тој правец.



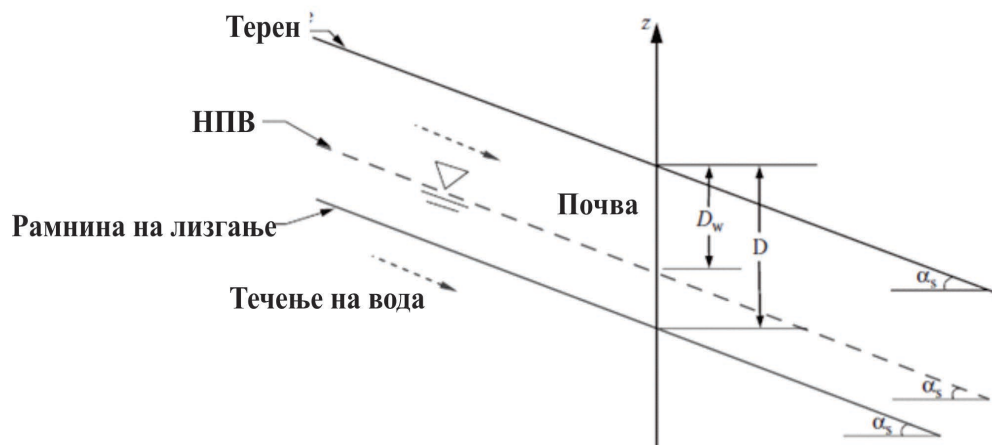
Слика 30. Шема на бесконечна косина со стационарно течење паралелно на површината и рамнина на лизгање над нивото на подземна вода (Zhang, et al., 2018)

Матричната сукција по површината на лизгање на длабочина D според (Fredlund, et al., 2012) е:

$$\psi = \gamma_w \cdot z \cdot \cos^2 \alpha_s = \gamma_w \cdot (D_w - D) \cdot \cos^2 \alpha_s \quad (59)$$

каде γ_w е волуменска тежина на водата, z е вертикална координата до нивото на подземна вода, а D_w е вертикална длабочина на подземната вода. На тој начин, факторот на сигурност изнесува:

$$F_s = \frac{c'}{\gamma_t \cdot D \cdot \sin \alpha_s \cdot \cos \alpha_s} + \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha_s} + \left(\frac{D_w}{D} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_t} \right) \cdot \frac{\tan \varphi^b}{\tan \alpha_s} \quad (60)$$

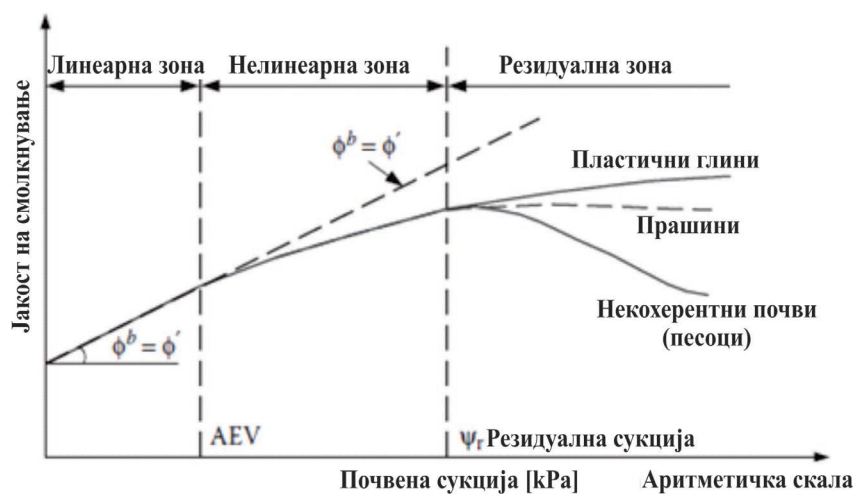


Слика 31. Шема на бесконечна косина со рамнина на лизгање под нивото на подземна вода (Zhang, et al., 2018)

За површина на лизгање под нивото на подземна вода, (Duncan, et al., 2014) го предлагаат следниот израз за пресметување на факторот на сигурност:

$$F_s = \frac{c'}{\gamma_t \cdot D \cdot \sin \alpha_s \cdot \cos \alpha_s} + \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha_s} - \frac{(D - D_w) \cdot \gamma_w \cdot \tan \varphi'}{\gamma_t \cdot D \cdot \tan \alpha_s} \quad (61)$$

Јакоста на смолкнување на незаситени почви има нелинеарна форма за поширокиот дијапазон на вредности за матричната сукција.



Слика 32. Зависност на јакост на смолкнување од сукција (Zhang, et al., 2018)

Анвелопата на јакоста на смолкнување за матрична сукција помала од вредноста на влезот на воздух (AEV) е иста како и кај заситените почви ($\varphi^b = \varphi'$), по што започнува нелинеарен дел. Кај повеќето почви незаситената јакост на смолкнување се зголемува со зголемувањето на сукцијата, но кај песокливи почви, може да се забележи и намалување на јакоста со зголемувањето на сукцијата по достигнувањето на резидуалната влажност.

За да се процени врската на SWRC со незаситената јакост на смолкнување, предложени се повеќе равенки. Некои од нив ја користат само AEV вредноста од кривата. Краток преглед на овие равенки е даден подолу:

- (Fredlund, et al., 1996) предлагаат равенка во која е инкорпорирана SWRC кривата во смисла на бездимензионалната влажност Θ_d :

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \varphi' + (u_a - u_w) \cdot \Theta_d^{k_f} \cdot \tan \varphi' \quad (62)$$

каде k_f е параметар за усогласување на SWRC кривата за кој (Vanapalli, et al., 1996) даваат зависност од индексот на пластичност I_p [%] на почвата:

$$k_f = -0.0016 \cdot I_p^2 + 0.0975 \cdot I_p + 1 \quad (63)$$

додека

$$\Theta_d = \frac{\theta}{\theta_s} \quad (64)$$

каде θ е волуметриска влажност и θ_s е волуметриска влажност при целосна заситеност.

- (Vanapalli, et al., 1996) предлагаат равенка за проценка на незаситената јакост на смолкнување преку нормализирање на SWRC кривата помеѓу заситената и резидуалната состојба:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \varphi' + (u_a - u_w) \cdot \left[(\tan \varphi') \cdot \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right] \quad (65)$$

каде θ_r е резидуалната влажност (на „сувата“ страна, односно содржината на вода која останува во порите и при големи вредности на сукцијата и многу често може да биде 0).

Со земање предвид на нелинеарноста на незаситената јакост на смолкнување, факторот на сигурност F_s за бесконечна косина со незаситена зона ќе биде:

$$F_s = \frac{c'}{\gamma_t \cdot H \cdot \sin \alpha_s \cdot \cos \alpha_s} + \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha_s} + \frac{c(u_a - u_w)}{\gamma_t \cdot H \cdot \sin \alpha_s \cdot \cos \alpha_s} \quad (66)$$

каде $c(u_a - u_w)$ е функција на привидната кохезија од сукцијата на почвата која одговара на различните модели за незаситената јакост на смолкнување.

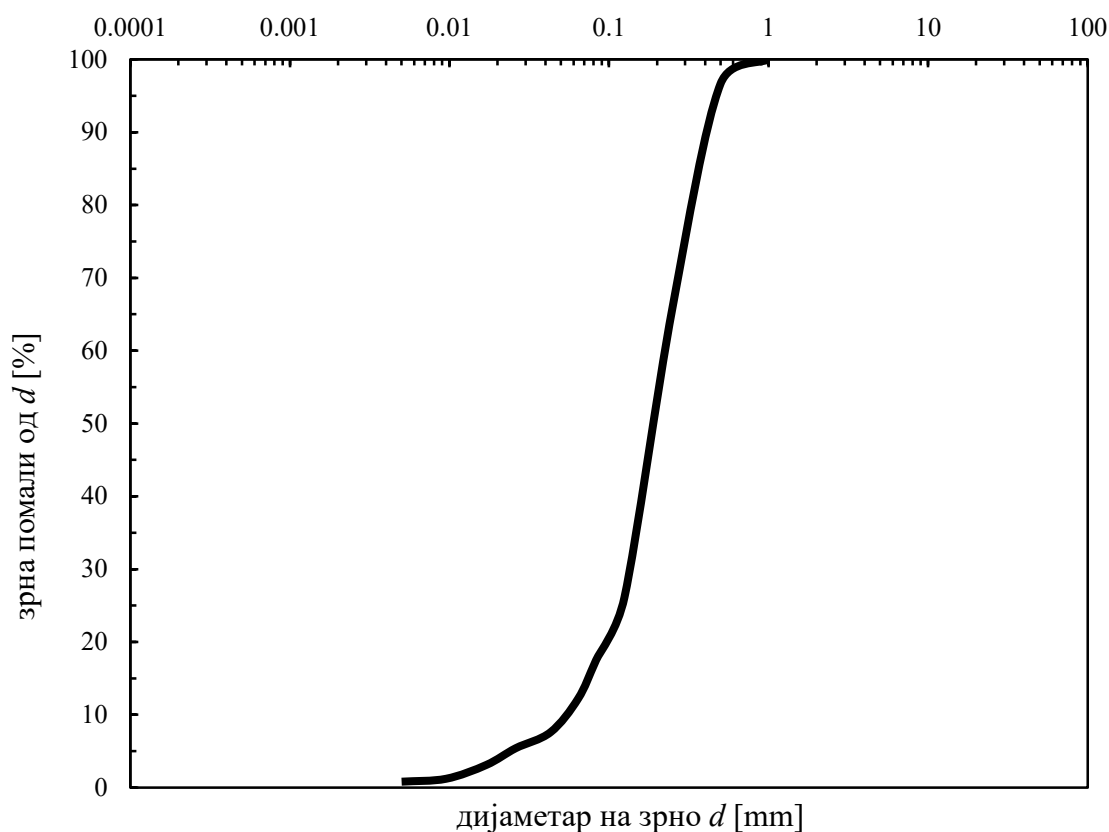
3. Материјални карактеристики и прогнозирани врнежи

3.1. Механички карактеристики во заситени услови

Почвата која е користена во ова истражување е прашиест песок од кој е изградена хидројаловишната брана Тополница во склоп на рудникот за бакар и злато Бучим – Радовиш. Материјалот е флотациска јаловина – нус производ од процесот на издвојување на рудата од основната карпа.

Стандардните испитувања на материјалот се извршени во лабораториски услови на релативно голем број примероци, над 120 од различни локации и длабини од телото на браната, и опфаќаат испитување на гранулометрискиот состав, специфична тежина, оптимални услови на збивање, јакостни параметри добиени од триаксијален опит и опит на директно смолкнување, како и стисливите карактеристики преку едометарскиот опит.

Кривата на гранулометриски состав е прикажана на следната слика.



Слика 33. Крива на гранулометриски состав (Susinov & Josifovski, 2018)

Табела 1. Физичко – механички карактеристики на истражуваната почва

Карактеристика	Мерна единица	Вредност
Содржина на песок	[%]	82.5
Содржина на прашина	[%]	17.5
C_u	[/]	4.29
C_c	[/]	1.51
Специфична тежина G_s	[/]	2.72
USCS класификација	[/]	Зона 1C (SM)
AASHTO класификација	[/]	A-2-4

Поради обликот на зрната и гранулометрискиот состав, почвата има многу мала пластичност која не може да се определи прецизно со стандардната постапка за определување на Атерберговите граници. Слично на ова, од изведените серија на Прокторови опити може да се заклучи дека примерокот ја достигнува максималната збиеност при целосна заситеност ($\gamma_{d,max}=15.5 \text{ kN/m}^3$; $\omega_{opt}=20.0 \%$).

Аголот на внатрешно триење добиен со опитот на директно смолкнување во заситени услови изнесува $\varphi=32.5^\circ$, а кохезијата $c=9.0 \text{ kPa}$. Модулот на стисливост за различни нормални напрегања во заситени услови изнесува $Mv_{25-800 \text{ kPa}}=1459.3-16814.7 \text{ kPa}$.

Коефициент на водопропусност е испитуван на 20 примероци во цилиндар со дијаметар $D=103,6 \text{ mm}$ и височина $H=118.8 \text{ mm}$ со различна збиеност во заситени услови со метод со константен притисок. Резултатите покажуваат вредности во граници од $2.0 \times 10^{-5} \div 1.02 \times 10^{-3} \text{ m/s}$. Сепак, ниските вредности се ретки, заради што просечниот износ на коефициентот на водопропусност е $3.2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

3.2. Хидраулички карактеристики во незаситени услови

Кривата на задржување на почвена влажност (SWRC) се користи како база за проценка на другите параметри на незаситените почви, како што се водопропусноста, јакоста на смолкнување, па од исклучително значење е истата да се карактеризира прецизно (Fredlund & Xing, 1994).

Движењето на водата низ незаситените или делумно заситените почви традиционално се опишува со нелинеарната парцијална диференцијална равенка (Richards, 1931):

$$C \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(K \cdot \frac{\partial h}{\partial z} - K \right) \quad (67)$$

каде h е висина на воден столб (со димензија на должина L), Ψ е (негативна) матрична сукција, t е време (T), z е длабочина на почва или просторна променлива (L), K е незаситената хидраулична спроводливост (LT^{-1}), C е капацитет на вода во почва (L^{-1}) која како функција ја опишува брзината на заситувањето во однос на сукцијата и се добива од наклонот ($C=d\theta/dh$) на кривата на задржување на почвена влажност $\theta(h)$, каде θ е волуметриска влажност (L^3/L^3). Со замена за C се добива:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(K \cdot \frac{\partial h}{\partial z} - K \right) \quad (68)$$

Нумеричкото решение на равенката на Richards бара дефинирање на две хидраулични функции: кривата на заситеност (θ vs. h) и функцијата на хидрауличната спроводливост (K vs. h).

Врската на помеѓу сукцијата и влажноста е нелинеарна, па потребен е хидраулички модел со кој ќе се дефинира движењето на водата во почвата. Постојат повеќе модели со кои може на различни начини да се опише овој феномен преку конструирање т.е. „подесување” на кривата на задржување на почвена влажност: Brooks and Corey, van Genuchten, модел на Fredlund and Xing, модел на Kosugi за лог-нормална дистрибуција на големината на порите, модел на Durner за бимодална дистрибуција на големината на порите и модел на Seki за бимодална лог-нормална дистрибуција на големината на порите. Повеќето од овие функции имаат емпириска природа, но можат да вклучат параметри кои имаат физичко значење.

(Seki, 2007) го развил „SWRC Fit” програмот за конструирање на кривата на задржување на почвена влажност според наведените модели со можност за избор на податоци за 420

готови криви преземени од UNSODA базата на податоци (Nemes, et al., 1999). Со споредбата на стандардното отстапување за унимодалните модели (за хомогена структура на порите), моделите на van Genuchten и Kosugi се подобри од моделот на Brooks and Corey, додека бимодалните модели на Durner и Seki даваат слични резултати. Предноста на овој софтвер е тоа што нема потреба да се внесуваат проценети вредности на почетните параметри, како што предвидуваат некои други софтвери. Важно е да се нагласи дека софтверот при пресметка на одредени параметри зема веќе пресметани параметри од други модели согласно познати алгоритми, па може да се заклучи дека некои решенија добиени за различните модели се поврзани и зависни едни од други.

Повеќето модели, како и овие, ја користат функцијата на ефективната (нормализирана) заситеност (редуцирана влажност) S_e од сукцијата h :

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (69)$$

каде θ_s е влажност при целосна заситеност и θ_r е резидуалната влажност. Од овде може да се изрази θ :

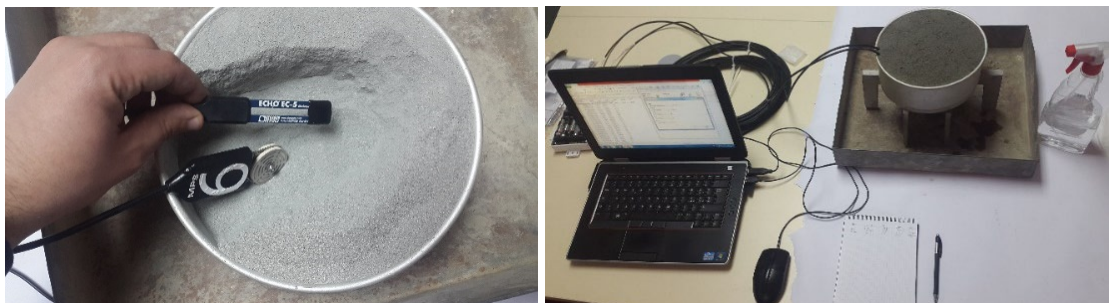
$$\theta = \theta_r + S_e \cdot (\theta_s - \theta_r) \quad (70)$$

Вредноста на S_e се движи од $0 \leq S_e \leq 1$, односно $S_e=0$ кога $\theta=\theta_r$ и $S_e=1$ кога $\theta=\theta_s$.

Во оваа истражување, мерењето на сукцијата и влажноста е направено со комерцијални сензори и апарати развиени од компанијата METER Group. Со првиот начин на мерење е добиена кривата на заситеност при влажнење (wetting curve), додека со вториот кривата на заситеност при сушење (drying curve).

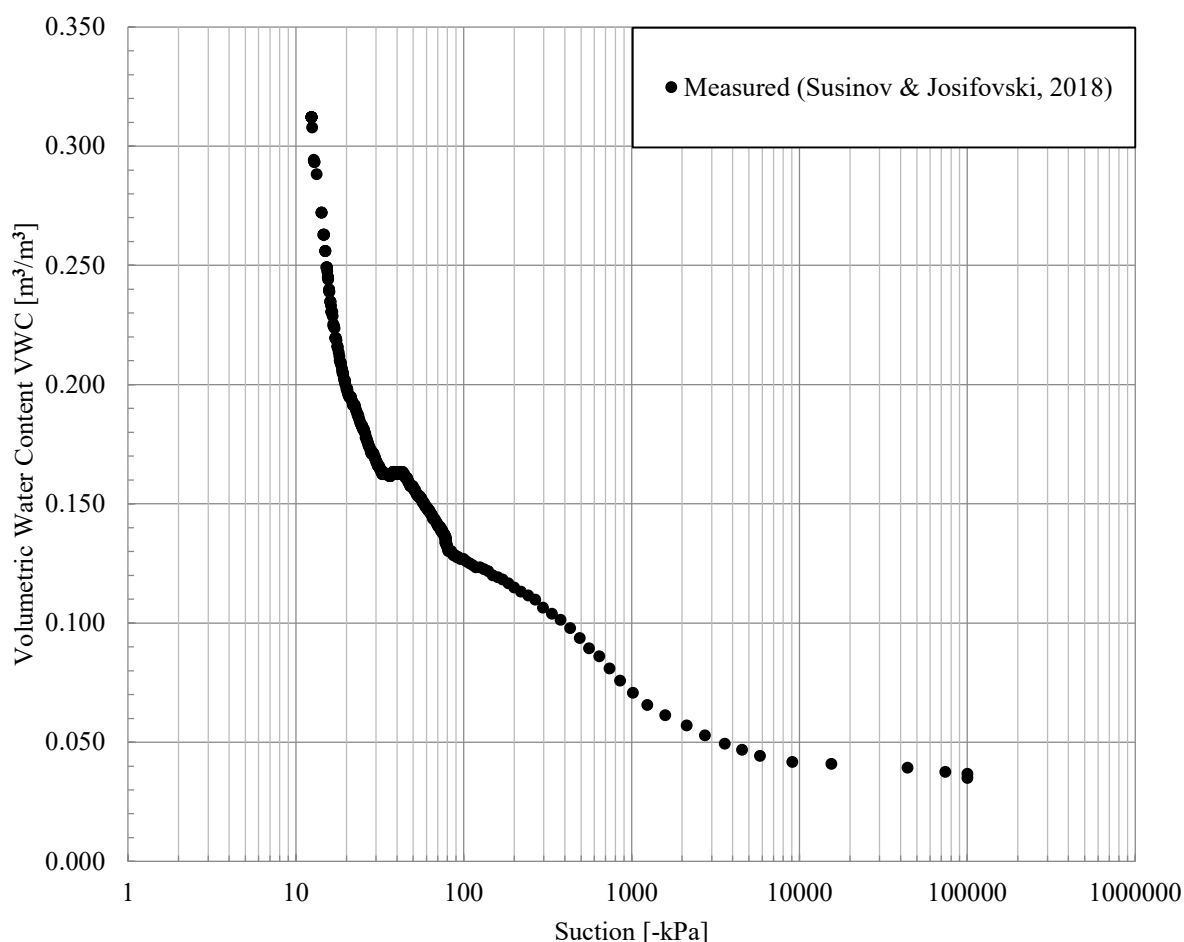
Методологијата на мерење при влажнење се состои од директно мерење во услови на континуирано зголемување на влажноста на материјалот, следејќи го начинот на користење на сензорите кои се наменети за мерење при експериментални истражувања и теренски услови (Susinov & Josifovski, 2018).

Почвениот примерок е подготвен во цилиндричен сад со дијаметар $D=20$ cm и висина $H=7.3$ cm со сува волуменска тежина $\gamma_d=15.7$ kN/m³. Сензорите за мерење на сукцијата и волуметриската влажност се поставени во средината на примерокот како што е прикажано на следната слика.



Слика 34. Подготовка на примерокот и опрема

Читањата се вршени автоматски на интервал од 1 минута додека континуирано продолжува процесот на влажнење на материјалот. Врз основа на директно измерените вредности за апсорпциона зависност на сукцијата и влажноста прикажана на следната слика (Susinov & Josifovski, 2018), конструирана е кривата на задржување на почвена влажност според споменатите модели.



Слика 35. Измерени вредности на сукцијата во зависност од влажноста (Susinov & Josifovski, 2018)

Се забележува дека првичната реакција на сензорот за мерење на сукција е кога волуметриската влажност има вредност релативно мала вредност од $0.038 \text{ m}^3/\text{m}^3$, што укажува на претпоставката дека при намалена влажност до почетната $0.025 \text{ m}^3/\text{m}^3$ сукцијата има вредност повисока од $100\,000 \text{ kPa}$ што е горна граница на опсегот на мерење на сензорот. Поради ограничувањето на долната граница на сензорот не се опфатени вредностите на сукцијата под 10 kPa , односно не е опфатен делот на сукцијата при влез на воздух (air-entry value) кој се очекува да биде близу до θ_s .

Една од најпознатите функции за емпериско опишување на кривата е онаа предложена од (Brooks & Corey, 1964) која за $h > h_b$ е:

$$S_e = \left(\frac{h}{h_b} \right)^{-\lambda} \quad (71)$$

додека за $h \leq h_b$

$$S_e = 1 \quad (72)$$

каде h_b е АЕР, а λ е карактеристична бездимензионална константа која ја карактеризира дистрибуцијата на големината на порите. Теоретски, тежи кон бесконечност за униформна дистрибуција, а кон нула за почви со широк опсег на дистрибуција на големината на порите (обично има вредности од 0.3 до 10.0). Влажноста во функција од сукцијата може да се изрази како:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left(\frac{h}{h_b}\right)^{-\lambda} \quad (73)$$

На тој начин, со помош на софтверот „SWRC Fit” се проценети почетните параметри прикажани во следната табела, каде е даден и коефициентот на детерминираност на кривата R^2 . Параметрите се проценети преку наклонот на логаритамското поврзување на две точки од кривата.

Табела 2. Проценети почетни параметри според моделот на (Brooks & Corey, 1964)

Параметар	Проценета вредност
θ_s [m ³ /m ³]	0.3292
θ_r [m ³ /m ³]	0.07398
h_b [kPa]	8.7559
λ [/]	0.72191
R^2 [/]	0.9285

(Van Genuchten, 1980) предложил емпириска зависност на ефективната заситеност:

$$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot h)^n} \right]^m \quad (74)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

$$(\alpha > 0; n > 1; 0 < m < 1)$$

каде вредноста на сукцијата h е позитивна, а останатите параметри m , n и α се емпириски константи зависни од формата на кривата. За да се добие решението во затворена форма, $m=1-1/n$ според моделот на Mualem за определување на незаситената хидраулична спроводливост (Mualem, 1976). Многу често се усвојува и $m=1$. Параметарот n (>1.0) има поголема вредност за почви со униформна дистрибуција на големината на порите и помал за почви со широк дијапазон на дистрибуција на големината на порите. α е параметар за скалирање на матричната сукција ($\alpha>0$). Оттука, влажноста во функција од сукцијата може да се изрази како:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot h)^n} \right]^m \quad (75)$$

На тој начин, со помош на софтверот „SWRC Fit” се проценети почетните параметри прикажани во следната табела, каде е прикажан и коефициентот на детерминираност на кривата R^2 . Параметрите се иницијално проценети со помош на параметрите на (Brooks & Corey, 1964) со користење на $n=\lambda+1$.

Табела 3. Проценети почетни параметри според моделот на (Van Genuchten, 1980)

Параметар	Проценета вредност
θ_s [m ³ /m ³]	0.2968
θ_r [m ³ /m ³]	0.019849
α [1/m]	0.080641
n [/]	1.4802
R^2 [/]	0.85413

(Kosugi, 1996) предложил модел кој произлегува од теорија со претпоставка дека лог-нормална дистрибуција на големината на порите, при што ја дефинира ефективната заситеност како функција:

$$S_e = Q(x) = Q \left[\frac{\ln \left(\frac{h}{h_m} \right)}{\sigma} \right] \quad (76)$$

каде Q е комплементарна функција на кумулативна нормална дистрибуција дефинирана како $Q(x) = 1 - \Phi(x)$ каде што $\Phi(x)$ е нормализирана форма на кумулативната нормална дистрибуција. $Q(x)$ е различно од функција на грешка; σ е стандардно отстапување кое го опишува степенот на варијабилност на дистрибуцијата на големината на порите, а со тоа и формата на кривата. За крупнозрни почви каде има мала варијација на големината на порите има помала вредност и обратно, за поголема варијација на големината на порите, функцијата станува сигмоидна; h_m ја означува средната сукција, односно онаа која кореспондира со $S_e = 0.5$ и се зголемува со намалувањето на зрната на почвата.

Влажноста во функција од сукцијата може да се изрази како:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left[1 - \left(\frac{\ln \left(\frac{h}{h_m} \right)}{\sigma} \right) \right] \quad (77)$$

На тој начин, со помош на софтверот „SWRC Fit” се проценети почетните параметри прикажани во следната табела, каде е прикажан и коефициентот на детерминираност на кривата R^2 . Параметрите се иницијално проценети со помош на параметрите на van Genuchten со користење на зависноста $\sigma = 1.2(n-1)^{-0.8}$.

Табела 4. Проценети почетни параметри според моделот на (Kosugi, 1996)

Параметар	Проценета вредност
θ_s [m ³ /m ³]	0.4455
θ_r [m ³ /m ³]	0.053957
h_m [kPa]	12.401
σ [/]	2.2053
R^2 [/]	0.87143

Ако се споредат параметрите за овие три унимодални модели, може да се заклучи дека моделите на van Genuchten и Kosugi даваат приближни резултати кои најдобро ги отсликуваат мерените вредности за разлика од моделот на (Brooks & Corey, 1964) кој се препорачува да се користи за почви кај кои има остра промена кај сукцијата при влез на воздух (блиску до заситување), односно S-форма на кривата. Моделот на (Van Genuchten, 1980) не користи притисок при влез на воздух, туку точка на инфлексција, па одговара за криви со J-форма. Истиот е најчесто користен меѓу истражувачите поради поголемиот број на публикувани резултати, иако кога е во прашање дистрибуцијата на големината на порите, моделот на (Kosugi, 1996) е поприфатлив.

Во случај на хетерогена структура, односно дистрибуција на големината на порите, за репрезентација на зависноста на сукцијата и влажноста се развиени повеќе мултимодални модели како што е моделот на (Durner, 1994) и моделот на (Seki, 2007).

(Durner, 1994) развил мултимодална функција конструирана со линеарна суперпозиција на субкриви за хомогена структура на порите од моделот на van Genuchten за кој важат истите услови. Ефективната заситеност е дефинирана како:

$$S_e = \sum_{i=1}^k w_i \left[\frac{1}{1 + (\alpha_i \cdot h)^{n_i}} \right]^{m_i} \quad (78)$$

$$(0 < w_i < 1; \sum w_i = 1)$$

каде k е бројот на „субсистеми“ кои ја формираат дистрибуција на големината на порите и w_i е тежински фактор на субсистемите. Кога $k=2$ тогаш тој модел се нарекува бимодален, а кога $k=3$, тримодален модел на (Durner, 1994).

Влажноста во функција од сукцијата може да се изрази како:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \sum_{i=1}^k w_i \left[\frac{1}{1 + (\alpha_i \cdot h)^{n_i}} \right]^{m_i} \quad (79)$$

На тој начин, со помош на софтверот „SWRC Fit“ се проценети почетните параметри за бимодален модел на Durner прикажани во следната табела, каде е прикажан и коефициентот на детерминираност на кривата R^2 , а според следната релација:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left\{ w_1 \left[\frac{1}{1 + (\alpha_1 \cdot h)^{n_1}} \right]^{m_1} + (1 - w_1) \left[\frac{1}{1 + (\alpha_2 \cdot h)^{n_2}} \right]^{m_2} \right\} \quad (80)$$

Табела 5. Проценети почетни параметри според бимодален модел на Durner

Параметар	Проценета вредност
θ_s [m ³ /m ³]	0.41329
θ_r [m ³ /m ³]	0.020797
w_1 [/]	0.53496
α_1 [1/m]	0.079328
n_1 [/]	5.9354
α_2 [1/m]	0.042253
n_2 [/]	1.3307
R^2 [/]	0.99594

(Seki, 2007) ги комбинирал идеите на Durner и Kosugi и развил мултимодален модел на дистрибуција на големината на порите. Функцијата на дистрибуција на големината на порите од моделот на Kosugi е проширена со мултимодална лог-нормална функција на дистрибуција на големината на порите со линеарна суперпозиција. Ефективната заситеност како функција е:

$$S_e = \sum_{i=1}^k w_i \cdot Q \left[\frac{\ln \left(\frac{h}{h_{mi}} \right)}{\sigma_i} \right] \quad (81)$$

$$(0 < w_i < 1; \sum w_i = 1)$$

каде w_i е тежински фактор на субсистемите. Кога $k=2$ тогаш тој модел е познат како бимодален модел на лог-нормална дистрибуција на големината на порите (Seki, 2007).

Влажноста во функција од сукцијата може да се изрази како:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \sum_{i=1}^k w_i \cdot Q \left[\frac{\ln \left(\frac{h}{h_{mi}} \right)}{\sigma_i} \right] \quad (82)$$

На тој начин, со помош на софтверот „SWRC Fit“ се проценети почетните параметри за бимодален модел на Seki прикажани во следната табела, каде е прикажан и коефициентот на детерминираност на кривата R^2 , а според следната релација:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left\{ w_1 \cdot Q \left[\frac{\ln \left(\frac{h}{h_{m1}} \right)}{\sigma_1} \right] + (1 - w_1) \cdot Q \left[\frac{\ln \left(\frac{h}{h_{m2}} \right)}{\sigma_2} \right] \right\} \quad (83)$$

Табела 6. Проценети почетни параметри според бимодален модел на *Seki*

Параметар	Проценета вредност
θ_s [m ³ /m ³]	0.63645
θ_r [m ³ /m ³]	0.032143
w_1 [/]	0.51942
h_{m1} [kPa]	10.804
σ_1 [/]	0.37702
h_{m2} [kPa]	23.855
σ_2 [/]	3.4634
R^2 [/]	0.99607

(Fredlund & Xing, 1994) даваат математичка равенка за карактеризација на кривата на задржување на почвена влажност во целиот опсег на вредности на сукцијата, од 0 до 10⁶ kPa. Ефективната (нормализирана) влажност е:

$$S_e = \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{h}{a} \right)^n \right]} \right]^m \quad (84)$$

каде h е сукција, а останатите параметри a , n , и m се параметри зависни од формата на кривата. Параметарот a за фиксирани вредности на m и n , е врзан со вредноста на притисокот при влез на воздух, особено при мали вредности на m , а генерално може да се усвои дека има поголема вредност од притисокот при влез на воздух. Параметарот n го контролира наклонот на кривата. Овие параметри можат да се определат графички од кривата, ако се воочи точката на инфлексција на кривата (h_i , θ_i) низ која се повлекува тангентата. Наклонот на тангентата е дефиниран со вредноста на h_i и h_p каде h_p е отсечокот на апцисата (за h):

$$s = \frac{\theta_i}{h_p - h_i} \quad (85)$$

$$a = h_i \quad (86)$$

$$m = 3.67 \cdot \ln \frac{\theta_s}{\theta_i} \quad (87)$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m \cdot \theta_s} \cdot 3.72 \cdot s \cdot h_i \quad (88)$$

Како за илустрација, мала вредност на m резултира со умерена (блага) крива во делот на големи вредности на сукцијата и висока вредност на n дава изразен агол во близина на притисокот на влез на воздух.

Влажноста во функција од сукцијата може да се изрази како:

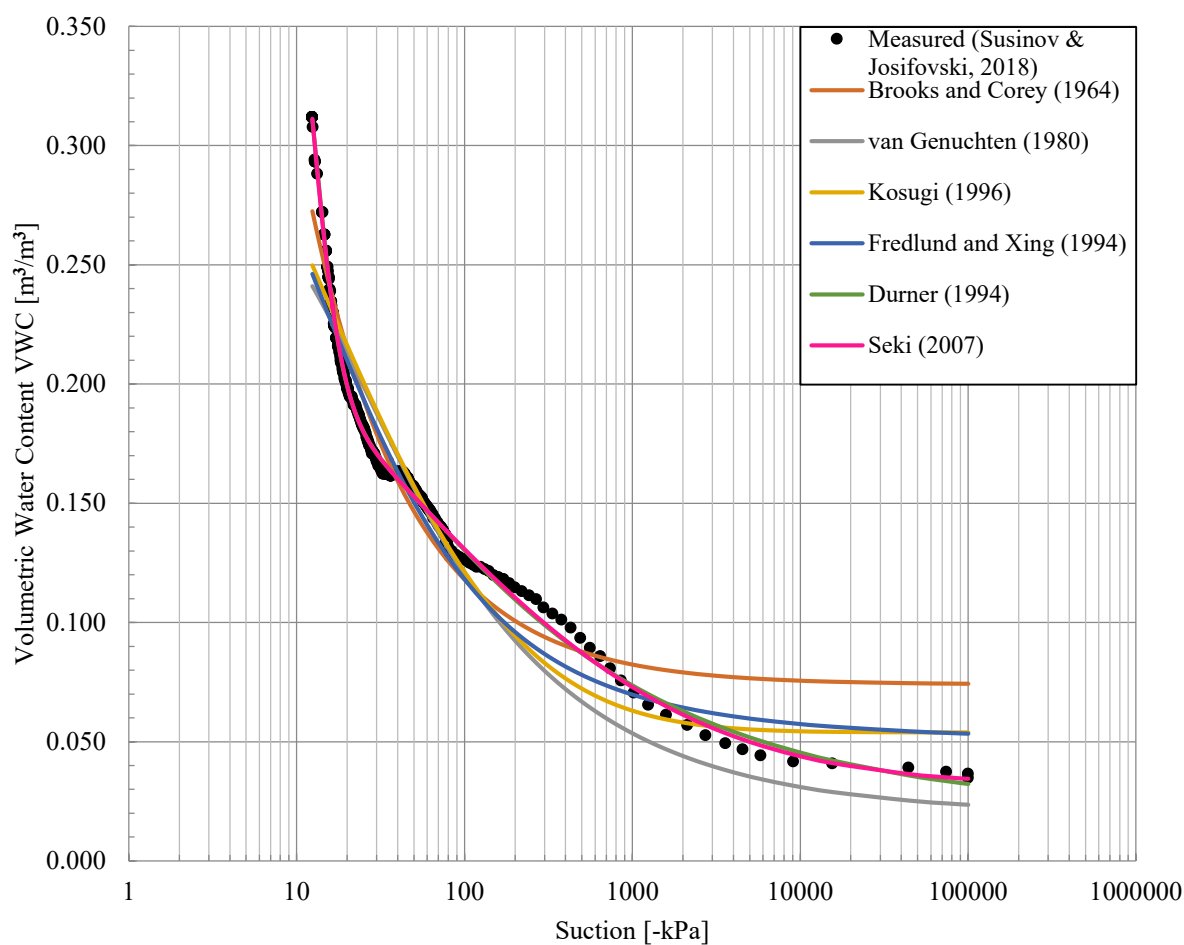
$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{h}{a} \right)^n \right]} \right]^m \quad (89)$$

На тој начин, со помош на софтверот „SWRC Fit” се проценети почетните параметри прикажани во следната табела, каде е прикажан и коефициентот на детерминираност на кривата R^2 .

Табела 7. Проценети почетни параметри според моделот на (Fredlund & Xing, 1994)

Параметар	Проценета вредност
θ_s [m ³ /m ³]	0.46767
θ_r [m ³ /m ³]	0.049315
a [kPa]	9.6782
m [/]	2.4223
n [/]	0.73013
R^2 [/]	0.89079

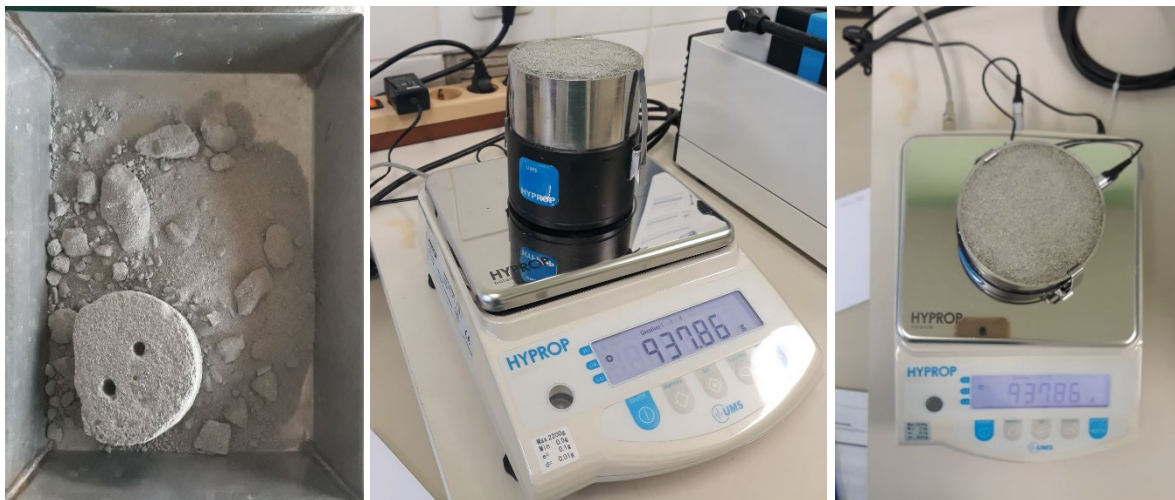
Знаејќи ги вредностите на овие параметри за сите модели, може да се исцрта кривата на задржување на почвена влажност.



Слика 36. Споредба на криви на задржување на почвена влажност според различни модели

Од примената на овие модели на мерените податоци може да се заклучи дека бимодалните модели на (Durner, 1994) и (Seki, 2007) најприближно ја отсекуваат врската помеѓу сукуцијата и волуметриската влажност на почвата, по што следуваат моделите на (Van Genuchten, 1980) и (Fredlund & Xing, 1994). Моделите на (Kosugi, 1996) и (Brooks & Corey, 1964) покажуваат поголемо отстапување за поголеми сукуции, односно за помала влажност.

Методологијата на мерење при сушење е опишана во упатството за користење на специјално дизајнираната опрема Нургор за мерење на сукцијата и влажноста во лабораториски услови. Испитувањата се направени во Институтот за градежништво ЗАГ во Словенија. Накратко, постапката опфаќа вградување на почвен примерок во стандарден престен, негово заситување и мерење на сукцијата со два мини тензиометри поставени на две висини на примерокот и мерење на влажноста преку мерење на тежината на примерокот во тек на време, односно сушење. Постапката на мерење обично трае околу 7 дена.



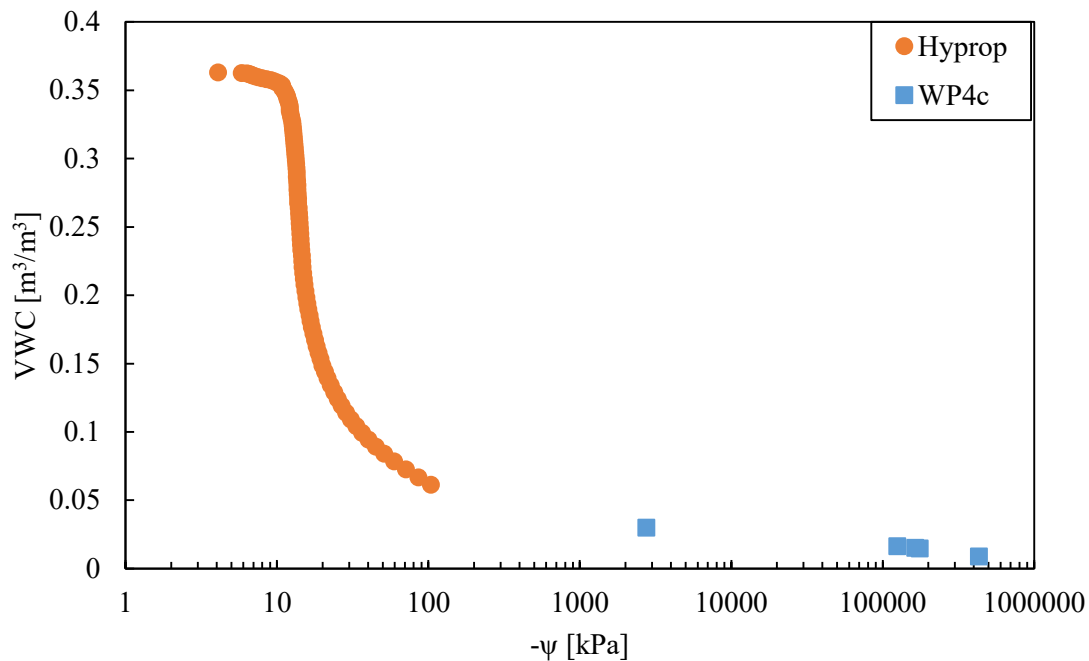
Слика 37. Мерење на хидрауличните карактеристики со Нурпор

Мерењата на матричната сукција со Нурпор се вршат со најголема точност во дијапазон од 0 до 100 kPa, Овие мерења можат да се прошират со мерењата од и WP4с кој мери вкупна сукција во поголем дијапазон од 10 до 300 000 kPa. Бидејќи осмотската сукција е значително мала близу резидуалната содржина на вода, резултатите од овие две мерења можат да се комбинираат, а притоа со голема точност да се добие кривата на заситеност.



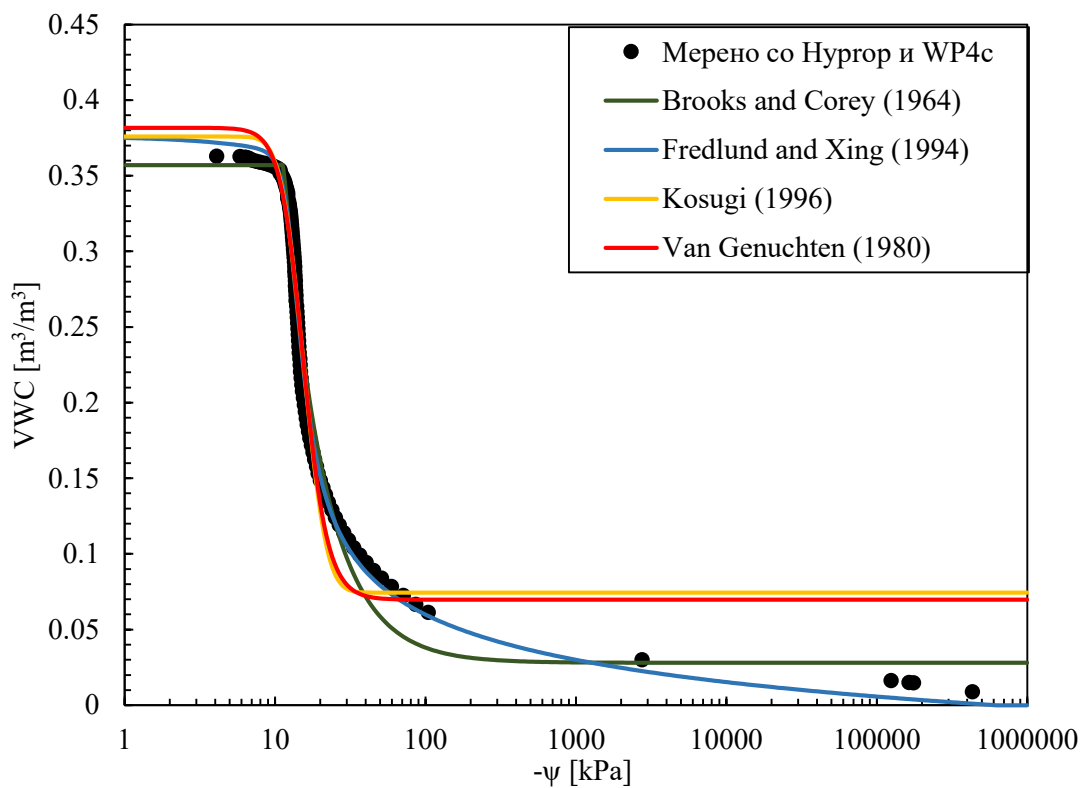
Слика 38. Мерење на хидрауличните карактеристики со Нурпор

Резултатите се обработени во програмот Нурпор-Fit кој освен приказ на мерењата, може да врши комбинирање на резултатите од Нурпор и WP4с, како и обработка на зависноста на сукцијата и влажноста по повеќе методи споменати погоре. На следната слика се прикажани измерените резултати во вид на зависност на сукцијата и волуметриската влажност.



Слика 39. Измерени вредности на сукулјата во зависност од влажноста со *Hypor* и *WP4c*

Оваа крива е коригирана со функциите за емпериско опишување според моделите Brooks и Corey (Brooks & Corey, 1964), (Fredlund & Xing, 1994), (Kosugi, 1996) и (Van Genuchten, 1980).



Слика 40. Споредба на криви на задржување на почвена влажност добиени со *Hypor-Fit* според различни модели

Од примената на овие модели на мерените податоци може да се заклучи дека моделите на (Brooks & Corey, 1964) и (Fredlund & Xing, 1994) најприближно ја отсликуваат врската помеѓу сукцијата и волуметриската влажност на почвата, додека моделите на (Van Genuchten, 1980) и (Kosugi, 1996) покажуваат поголемо отстапување за поголеми сукции, односно за помала влажност.

Параметрите на функциите се проценети за секоја крива, а се дадени во следните табели:

Табела 8. Проценети параметри на кривата според моделот на (Brooks & Corey, 1964)

Параметар	Проценета вредност
θ_s [m ³ /m ³]	0.357
θ_r [m ³ /m ³]	0.028
α [1/cm]	0.00877
λ [/]	1.608

Табела 9. Проценети параметри на кривата според моделот на (Fredlund & Xing, 1994)

Параметар	Проценета вредност
θ_s [m ³ /m ³]	0.376
θ_r [m ³ /m ³]	0.079
α [1/cm]	0.008
m [/]	0.556
n [/]	10
h_r [cm]	347.916

Табела 10. Проценети почетни параметри според моделот на (Kosugi, 1996)

Параметар	Проценета вредност
θ_s [m ³ /m ³]	0.376
θ_r [m ³ /m ³]	0.074
h_m [/]	155
σ [/]	0.276

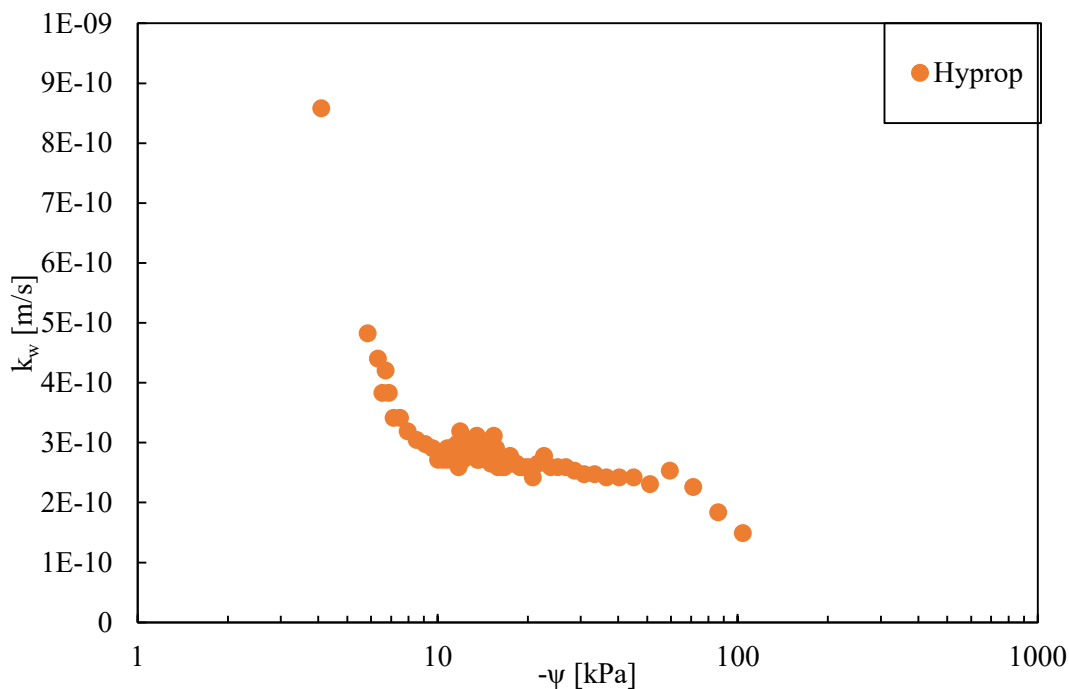
Табела 11. Проценети почетни параметри според моделот на (Van Genuchten, 1980)

Параметар	Проценета вредност
θ_s [m ³ /m ³]	0.382
θ_r [m ³ /m ³]	0.07
α [1/cm]	0.00677
n [/]	5.852

Како поважни параметри кои можат да се издвојат од кривата се резидуалната влажност θ_r која се движи околу 0.04 m³/m³, влажноста при целосна заситеност θ_s која се движи околу 0.35 m³/m³ и сукцијата при заситување влез на воздух која изнесува околу 10 kPa.

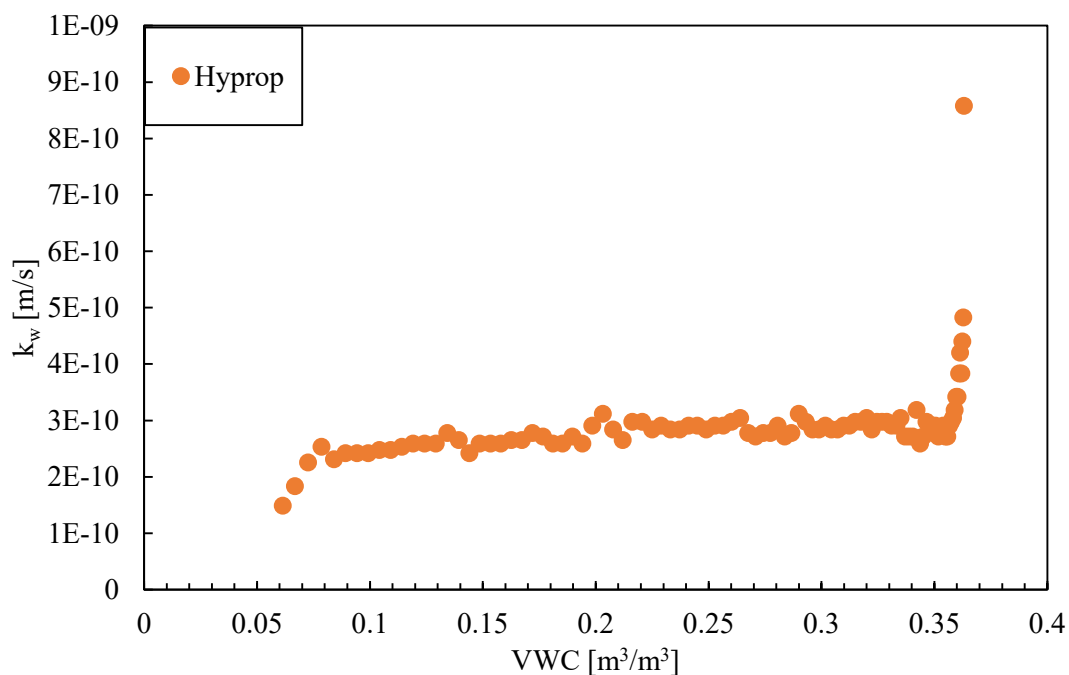
Освен што ја опишуваат врската на помеѓу сукцијата и влажноста, овие модели можат да ја проценат и незаситената хидраулична спроводливост k или водопропусност на почвата. Главно се поделени во три групи: емпириски како на пример моделот на (Richards, 1931), макроскопски како оној на (Brooks & Corey, 1964) и статистички модели како моделот на (Mualem, 1976). Првите два користат мерени вредности, додека третиот користи сознанија од SWRC кривите. Генерално, коефициентот на водопропусност на незаситена почва k_w над вредноста при влез на воздух е еднаква на коефициентот на водопропусност на заситена почва k_s . Зависноста на незаситената хидраулична

спроводливост k_w и сукцијата ψ е дефинирана со мерењата на Нурпор. Истата е прикажана на следниот дијаграм.



Слика 41. Измерени вредности на коефициентот на водопропусност на незаситена почва k_w со Нурпор во функција од сукцијата

Зависноста на незаситената хидраулична спроводливост k_w и волуметриската влажност θ е дадена со дијаграмот во продолжение.



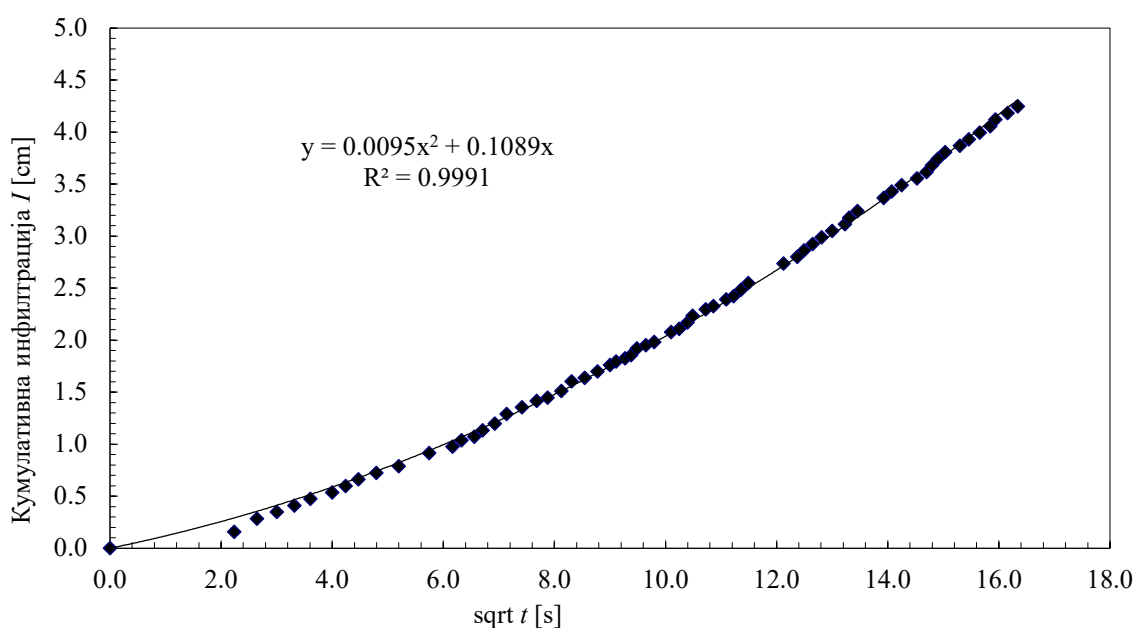
Слика 42. Измерени вредности на коефициентот на водопропусност на незаситена почва k_w со Нурпор во функција од волуметриската влажност

Освен оваа мерење, направено е и мерење на незаситената хидраулична спроводливост со методата со инфилтрометар. Почвениот примерок прикажан на следната слика е подготвен во цилиндар кој се користи за CBR опит со приближно нула волуметриска влажност и сува волуменска тежина $\gamma_d=16.89 \text{ kN/m}^3$.



Слика 43. Испитување на незаситената хидраулична спроводливост со инфилтрометар

Откако ќе се постави инфилтрометарот на примерокот, се мери волуменот на инфилтрираната вода за одредено време. Податоците се внесуваат во образец чиј резултат е прикажан на следниот дијаграм:



Слика 44. Кумулативна инфилтрација во функција од времето (sqrt t)

Незаситената хидраулична спроводливост е пресметана по методот на Zhang за суви почви (Zhang, 1997) кој ја предложил следната функција:

$$I = C_1 + C_2 \cdot \sqrt{t} \quad (90)$$

каде C_1 [ms^{-1}] параметар поврзан со хидрауличната спроводливост и C_2 [$\text{ms}^{-1/2}$] е капиларна абсорпција. Хидрауличната спроводливост на почвата (K) се пресметува како:

$$K = \frac{C_1}{A} \quad (91)$$

каде C_1 [ms^{-1}] е наклонот на кривата прикажана на претходната слика, а A е параметар поврзан со параметри од методот на van Genuchten за даден тип на почва, сукулција и радиус на дискот на инфилтrometerот:

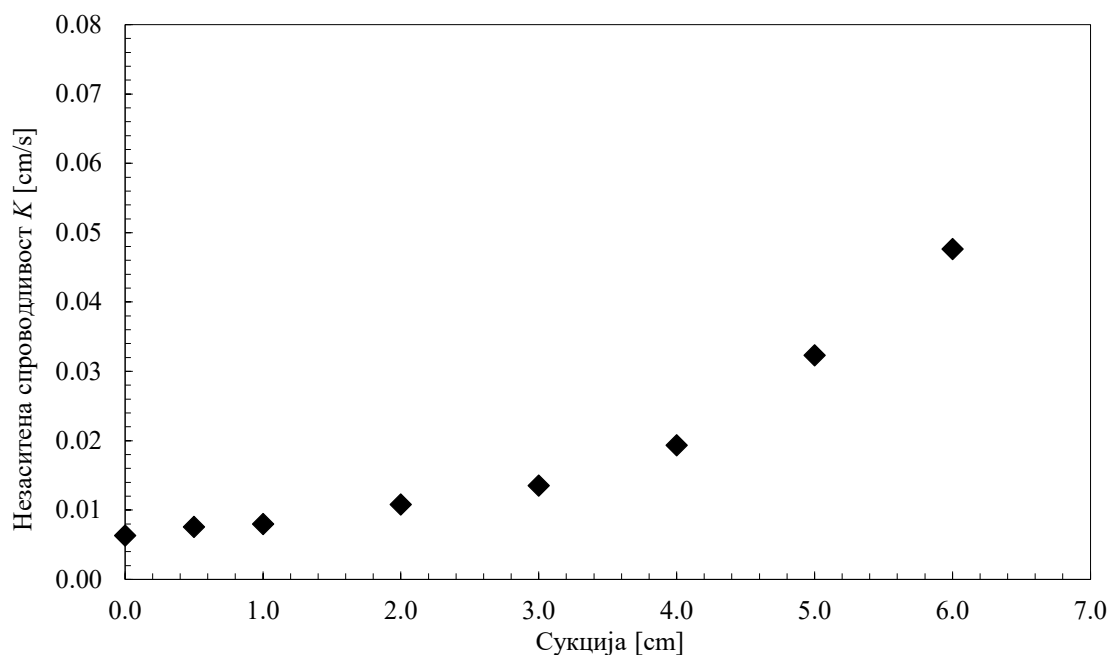
$$A = \frac{11.65 \cdot (n^{0.1} - 1) \cdot \exp[2.92 \cdot (n - 1.9) \cdot \alpha \cdot h_0]}{(\alpha \cdot r_0)^{0.91}} \quad (92)$$

каде n (2.68 за песоци) и α (0.145 за песоци) се параметри на почвата според методот на van Genuchten определени според (Carsel & Parrish, 1988), $r_0=2.25$ е радиусот на дискот, $h_0=-6.0$ cm е вкупната сукулција на површината на дискот која е препорачана за песоци. На тој начин пресметан е параметарот $A=0.4611$, $C_1=0.00954719$ [cm/s]. Конечно хидрауличната спроводливост на почвата (при сукулција од 6 cm) изнесува $K=0.0207$ [cm/s] или 2.07×10^{-4} [m/s].

За да се согледа влијанието на сукулцијата врз незаситената хидраулична спроводливост, направен е тест за различни вредности на сукулцијата од 0-6 cm, на почвен примерок со приближно нула волуметриска влажност и волуменска тежина $\gamma_d=16.73$ kN/m^3 . Во следната табела се прикажани добиените резултати, а во продолжение и дијаграмски.

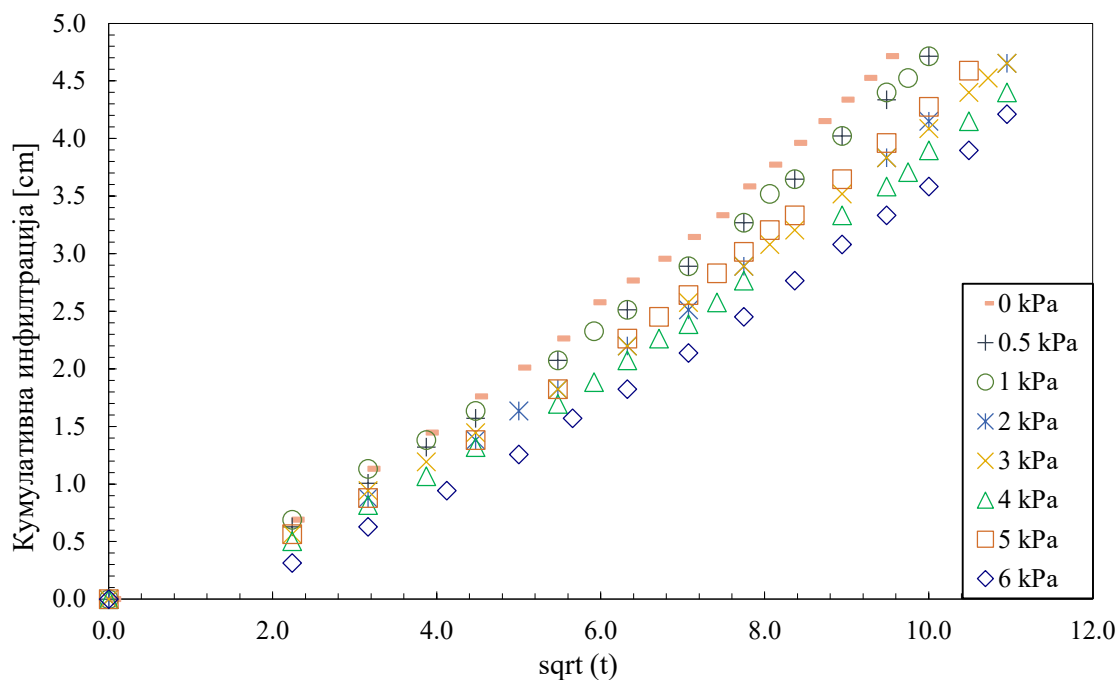
Табела 12. Незаситена хидраулична спроводливост (K) за различни сукулции

Сукулција h	K	K		C_1	A
[cm]	[cm/s]	[m/s]		[cm/s]	[l]
0.0	0.006313549	0.000063135	6.31×10^{-5}	0.0211	3.3448
0.5	0.007554787	0.000075548	7.55×10^{-5}	0.0214	2.8357
1.0	0.007976934	0.000079769	7.97×10^{-5}	0.0192	2.4041
2.0	0.010789019	0.000107890	1.08×10^{-4}	0.0186	1.7279
3.0	0.013510227	0.000135102	1.35×10^{-4}	0.0168	1.2419
4.0	0.019351170	0.000193512	1.94×10^{-4}	0.0173	0.8926
5.0	0.032315784	0.000323158	3.23×10^{-4}	0.0207	0.6416
6.0	0.047653316	0.000476533	4.77×10^{-4}	0.0220	0.4611



Слика 45. Незаситена хидраулична спроводливост (K) за различни сукции

Резултатите покажуваат дека незаситената хидраулична спроводливост се зголемува со зголемувањето на сукцијата, главно во функција од параметарот A кој се намалува. За ниските вредности на сукцијата од 0 до 3 cm прирастот е приближно линеарен, но за поголемите вредности на сукцијата до 6 cm прирастот е експоненцијален, но во рангот на 10^{-5} до 10^{-4} [m/s]. Треба да се нагласи дека овие вредности на сукцијата се многу мали, близу до резидуалната влажност, а се очекува водопрпусноста да биде приближно константна до вредноста на притисокот на влез на воздух, по што треба да опаѓа.



Слика 46. Кумулативна инфилтрација во функција од времето ($\sqrt{t}$) за различни сукции

Кумулативната инфилтрација во функција од времето за сите тестови е прикажана на следниот дијаграм. Се забележува дека наклонот на кривата C_I не се менува значително со промената на сукцијата. Хидрауличната спроводливост зависи од волуметриската влажност на незаситената почва.

За испитување на параметрите на зависноста товар – деформации за ситнозрни почви се користи стандардниот едометар со димензии $D/H=76/19\text{mm}$. Сепак, овие димензии не ги задоволуваат барањата на некои крупнозрни почви или материјали од депонии, насипни или хидројаловишни брани. Од тие причини, развиен е апарат во големи размери со кој може да се добијат деформабилните карактеристики на овие материјали за различни односи D/H . Апаратот е составен од едометарска ќелија со димензии $D/H=50/24.5\text{ cm}=2.04$, хидраулична преса со капацитет од 50 t и пумпа со манометар за нанесување на товар, рам за обезбедување контратовар, како и дигитални мерачи на деформации.



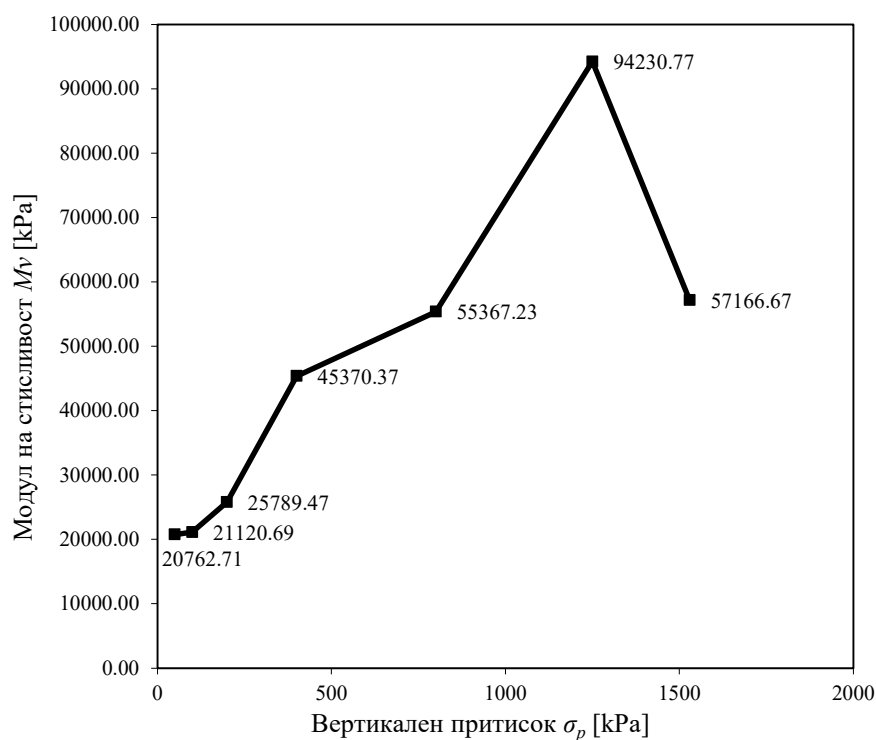
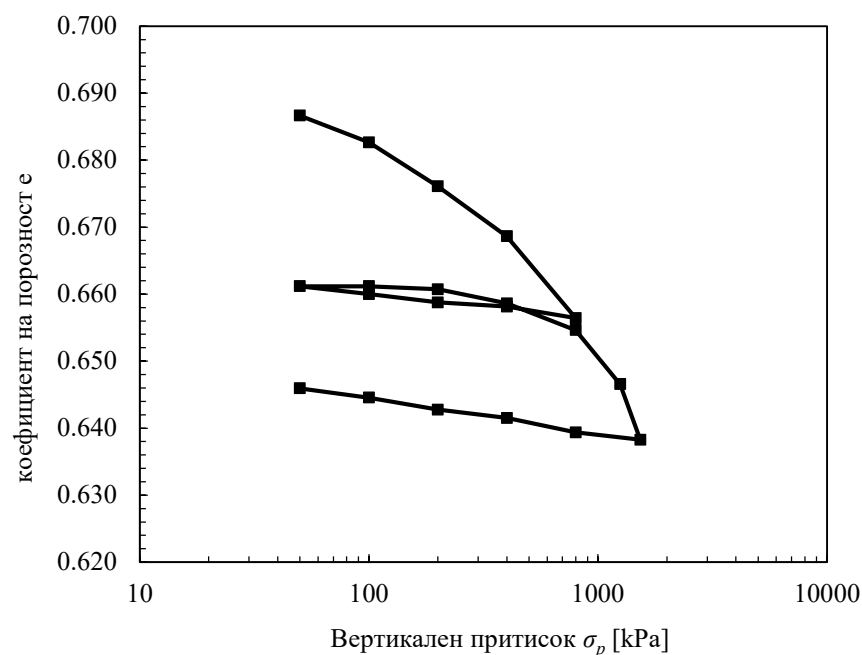
Слика 47. Едометар развиен во лабораторијата за геотехника при ГФ – УКИМ Скопје

Вака конструиранiot апарат ги задоволува следните услови:

- Димензиите на ќелијата се доволно големи за да го симулираат однесувањето на примероците како на терен;
- Дебелината на сидовите на ќелијата е доволна за да обезбеди странични ограничувања на деформациите на примерокот при оптоварувањата, со што се обезбедуваат услови за едnodимензионална консолидација;
- Внатрешните страни на ќелијата се глатки и обезбедуваат минимално триење со примерокот.

Ќелијата на долната плоча има отвор за овозможување дренирање во текот на консолидацијата, но со оглед на испитувањето во незаситени услови, истиснатата порна вода може да се дренира низ неа. Почвениот примерок е обложен со филтер хартија на двете страни. Подготвен е со позната влажност од 15.0 % (близу до оптималната) и волуменска тежина од 18.0 kN/m^3 . Аплицирани се товари во чекори од 50, 100, 200, 400 и 800 kPa по што следи растоварување 400, 200, 100 и 50 kPa, повторно товарење 50, 100, 200, 400, 800, 1250 и 1530 kPa и растоварување до 0. Со тоа се симулирани услови и оптоварувања кои може да се очекуваат на терен (хидројаловишна брана) во незаситени услови (над филтрационата линија) во фаза на експлоатација, но и во фаза на изградба.

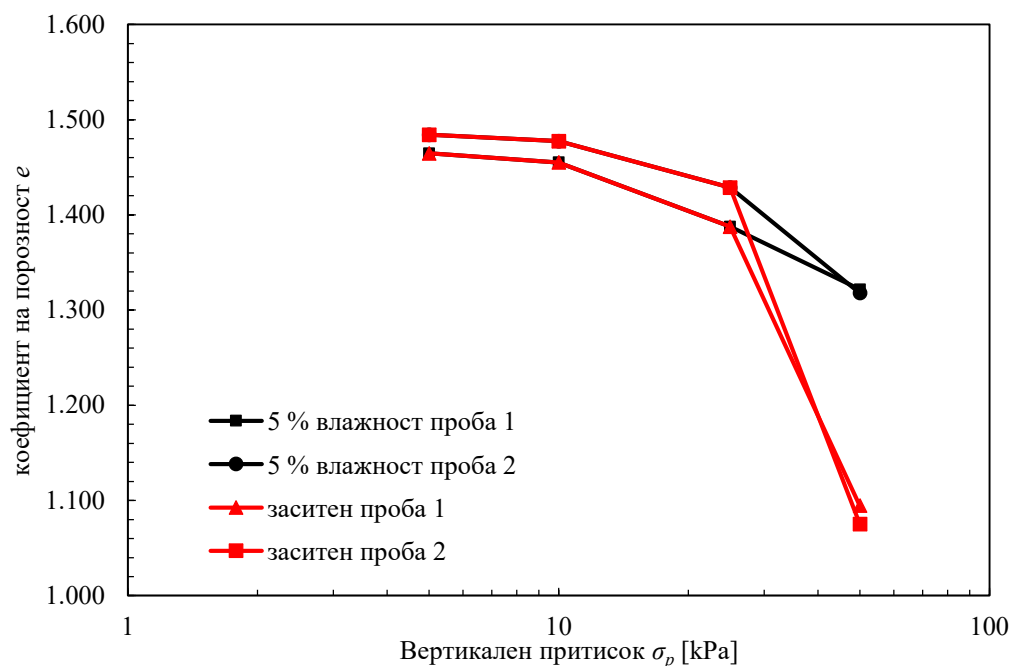
Резултатите од испитувањето се прикажани на следниот дијаграми на зависност коефициент на порозност - вертикален притисок ($e - \sigma_p$) и модул на стисливост - вертикален притисок ($M_v - \sigma_p$).



Слика 48. Зависност коефициент на порозност - вертикален притисок и модул на стисливост - вертикален притисок

Индексот на компресија за различни оптоварувања изнесува $C_{c,50-100}=0.013$, $C_{c,100-200}=0.021$, $C_{c,200-400}=0.024$, $C_{c,400-800}=0.040$, $C_{c,800-1250}=0.041$ и $C_{c,1250-1530}=0.094$.

Во рамките на ова истражување е реализирано и испитување на физички и нумерички модел, па оттаму се направени и едометарски опити за условите на моделот за почетната влажност и за заситена состојба. Примероците се подготвени со почетна влажност од 5.0 % и волуменска тежина од 11.5 kN/m^3 (растресита состојба). Аплицирани се товари во чекори од 5, 10, 25 и 50 kPa.



Слика 49. Зависност коефициент на порозност – вертикален притисок за услови на физически модел

Резултатите покажуваат дека коефициентот на порозност не се менува со промената на влажноста при оптоварувања помали од 25 kPa, додека за товари од 50 kPa коефициентот на порозност се намалува со заситувањето што значи дека заситувањето помага во збивањето на пробата.

Индексот на компресија за различни оптоварувања изнесува $C_{c,5-10}=0.027$, $C_{c,10-25}=0.146$ и $C_{c,25-50}=0.293$ во незаситени услови и $C_{c,5-10}=0.022$, $C_{c,10-25}=0.072$ и $C_{c,25-50}=0.598$ во заситени услови.

3.3. Анализа на врнежи

За детално истражување на феноменот на стабилност на косини при интензивни врнежи т.е. при инфилтрација на вода, потребно е да се располага со релевантни податоци за висината, интензитетот и веројатноста на појава на врнежите за конкретно подрачје. Интензивните и краткотрајни врнежи е едно од подрачјата од хидрометеорологијата што е релативно ретко проучувано на нашите подрачја. Врнежите како стохастички процес се проучуваат со методите на статистика и теоријата на веројатност, а истите се потребни за решавање на различни технички и научни проблеми од областа на хидрологијата, хидротехниката, водостопанството, комуналиите, сообраќајот и сл. (Shkoklevski & Todorovski, 1993). Неколку истражувачи досега ги истражувале интензивните врнежи како метеоролошки појави. К. Милосављевиќ во 1952 година ги проучувала краткотрајните и врнежи со веројатност на појава еднаш годишно до еднаш на 5 години за метеоролошка станица Прилеп. (Lazarevski, 1967) ги анализираше интензивните врнежи во стандардни временски интервали од 5, 10, 15, 20, 45, 60, 80, 100 и 120 минути и тоа за 7 метеоролошки станици: Скопје, Битола, Охрид, Прилеп, Крива Паланка, Демир Капија и Струга. Во студијата се прикажани прегледи на омбрографски мерења, криви на појави на интензивни врнежи како и други споредбени граfiци за наведените станици. (Shkoklevski & Todorovski, 1993), врз основа на мерењата со плувиографи и оформената база на податоци, ги дефинираат интензивните екстремни врнежи со траење од 5 минути до 1440 минути (24 часа), преку формирање низи на интензивни врнежи за метеоролошките станици.

Една од поголемите поплави во поново време е онаа од 2016 година која го зафати Скопскиот регион и предизвика голема штета, а, за жал, однесе и човечки животи. Истите беа предизвикани од краткотрајни, но интензивни врнежи од над 100 l/m^2 за 4 часа или максимални 46 l/m^2 за само еден час. Освен овој карактеристичен настан, во последните 4 години се следени сите врнежи во Р.С. Македонија преку развиената мрежа на Управата за хидрометеоролошки работи (УХМР) достапни на веб страната (uhmr.gov.mk, 2016-2020) од каде се издвоени позначајни настани (интензивни врнежи) прикажани во следната табела.

Табела 13. Селектирани податоци за измерени интензивни врнежи (uhmr.gov.mk, 2016-2020) и (Susinov, et al., 2019)

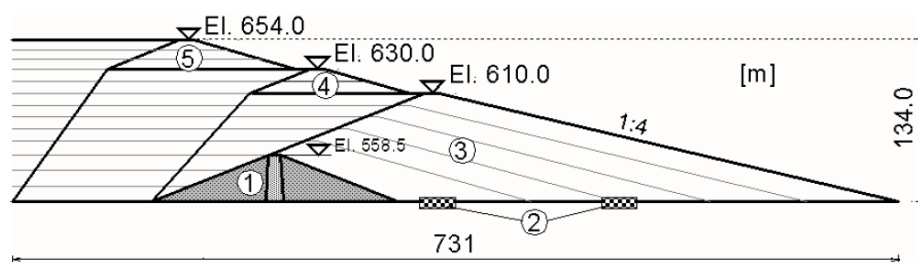
Мерна станица	Датум	Час	Интензитет	Еквивалентен интензитет
Скопје/Зајчев Рид	06.8.2016	19:00	46.0 [mm/h]	
Тополница	01.9.2016	16:00	34.6 [mm/h]	
Тополница	23.5.2017	18:20	32.0 [mm/h]	
Тополница	23.5.2017	18:00	29.6 [mm/40min]	44.4 [mm/h]
Штип	23.5.2017		87.0 [mm/24h]	
Скопје/Зајчев Рид	23.5.2017	17:30	32.0 [mm/h]	
Струмица	25.5.2017		71.0 [mm/24h]	
Маврово	01.12.2017		130.0 [mm/24h]	
Битола	19.6.2018	19:00	38.6 [mm/h]	
Битола	25.6.2018	18:00	27.4 [mm/h]	
Скопје/Зајчев Рид	31.7.2018	16:00	19.4 [mm/25min]	46.5 [mm/h]
Скопје/Карпош	31.7.2018	16:00	21.5 [mm/25min]	51.6 [mm/h]
Иловица	31.7.2018	19:00	19.2 [mm/h]	
Костурино/Струмица	31.7.2018	18:00	21.7 [mm/h]	
Пожаране/Гостивар	02.8.2018	17:00	22.4 [mm/h]	
Штип	14.8.2018	21:00	22.2 [mm/h]	
Водоча/Струмица	20.6.2019	14:00	28.7 [mm/h]	

Валандово	20.6.2019	15:00	25.6 [mm/h]	
Радовиш	24.6.2019	15:00	30.5 [mm/h]	
Радовиш/пожар	10.6.2020	19:00	25.9 [mm/h]	
Битола	04.7.2020	19:00	36.0 [mm/15min]	
Радовиш/Коцалија	13.10.2020	05:00	22.0 [mm/h]	

Освен кај нас, слични интензивни врнежи се забележуваат секаде низ светот, дел како стандардни, очекувани појави, но дел како резултат на климатските варијации. Истите имаат негативно влијание врз инженерските и природните косини. Како пример за интензивни врнежи од Европа е издвоен рекорден интензитет во Швајцарија на 11.6.2018 година кога за само 10 минути во Лозана паднале 41 mm (Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, 2020). На 28.8.1997 година во Локарно-Монти паднале 91.2 mm/h.

Целта на ова истражување е да се изврши обработка на мерењата од метеоролошката станица на хидројаловишната брана Тополница и преку нивна анализа да се даде солидна основа за анализа на стабилноста на браната и влијанието од интензивните врнежи.

Обработени се податоците од мерењата на врнежите со плувиограф на хидројаловишната брана Тополница во релативно краток временски период од три години (2016-2019). Хидројаловишната брана Тополница е изградена во склоп на рудникот за бакар Бучим кој се наоѓа помеѓу градовите Штип и Радовиш. Висока е 134.0 m (кота на круна 654 mнв) и претставува една од највисоките хидројаловишни брани во Европа. Браната е градена со методот на хидроциклонирање од иницијалната брана во ножицата. Карактеристичен попречен пресек на браната е прикажан на следната слика.



Слика 50. Попречен пресек на хидројаловишната брана Тополница. (1) иницијална брана; (2) подолжна дренажа во основата; (3) конструкција на брана во прва фаза со низводен метод; (4) втора и (5) трета фаза на конструкција на брана со спротиводен метод

Метеоролошката станица е поставена на десната страна од круната на браната на кота 654 mнв и местоположба со географски координати ширина $X=41.668927^\circ$ и должина $Y=22.370122^\circ$.



Слика 51. Приказ на мерна станица (PCE-instruments, 2019)



Слика 52. Ситуација на хидројаловиштето со местоположба на мерната станица (google.com/maps, 2019)

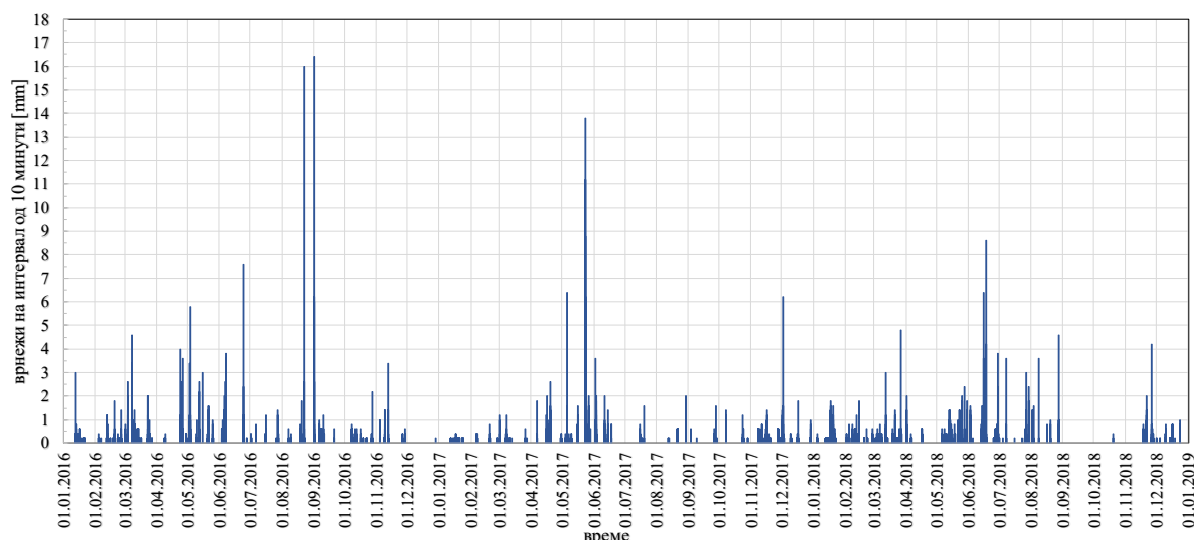
Врнежите на предметната локација се мерат со метеоролошка станица тип PCE-FWS 20 со можност за мерење на температура, влажност, атмосферски притисок, ветер и врнежи. Опремена е и со даталогер за складирање на податоци и софтвер за детален приказ и анализа на резултатите во реално време. Најкраткиот временски интервал за кој постојат записи е 10 минути.

Начинот на обработка на плувиограмите од кои се пресметува интензитетот на врнежите со назначено траење опфаќа (Shkoklevski & Todorovski, 1993):

- прелиминарен избор на плувиограми за назначен период за кој се регистрирани поголеми врнежливи епизоди или интензивни врнежи. Од така избрани плувиограми се определуваат најголемите висини на врнежи h_i за назначени времетраења t_i (10, 20, 40, 60, 90, 120, 180, 300, 720 и 1440 минути);
- читање на плувиограмите и формирање табела со основни податоци за обработка. Откако ќе се формира плувиограмот на кој 24 часовните сегменти се поделени на десетминутни интервали, се отчитуваат записи на карактеристичните превојни точки со точност од 10 минути. Во колоната 1 од табелата се внесува точното време, во колоната 2 се запишува должината на временскиот интервал во min, а во колоната 3 висината на врнежите забележана помеѓу две временски точки t_i и t_{i+1} изврзена во mm. Во колоната 4 се пресметува интензитетот на врнежите i во интервалот од t_i до t_{i+1} изврзена во mm/min;
- формирање на табела (низа) на месечни (годишни или дневни) максимални висини на врнежи. Врз основа на резултатите од прелиминарно избраните плувиограми, се формира серија на месечни максимални висини на врнежите h_i [mm] за назначените времетраења $t=10, 20, \dots, 1440$ min. Во рамките на било која анализирана година или месец, максималната висина на врнежите со назначено времетраење, мора да биде поголема од максималната висина на врнежите чие назначено времетраење е помало.
- формирање низа на емпириска веројатност на месечни врнежи (емпириска распределба на месечни врнежи) од која се дефинираат статистичките параметри на низата. Веројатноста на појава на максималните интензивни врнежи се

пресметува со помош на функции за густината на веројатноста, а најчесто применувана во нашата хидролошка практика е функцијата на дистрибуција на Гумбеловата распределба.

Во рамките на ова истражување и анализираните податоци е формиран хидрограм на врнежи за назначениот тригодишен период во интервали од 10 минути.



Слика 53. Хидрограм на 10-минутни врнежи во периодот од 01 јануари 2016 год. до 31 декември 2018 год.

Од презентираниот дијаграм, избран е и обработен плувиограм за 24 часовен период за кој се забележани максимални дневни врнежи (23.5.2017, 17:10 h. – 24.5.2017, 17:10 h.). Резултатите се прикажани во следната табела.

Табела 14. Плувиограм за 24-часовен период

Време	Временски интервал Δt	Висина на врнежи h_i	Интензитет на врнежи i
[h:min]	[min]	[mm]	[mm/min]
1	2	3	4
19:10-19:20	10	13.8	1.38
19:10-19:30	20	15.4	0.77
17:20-18:00	40	29.6	0.74
17:20-18:20	60	32.0	0.53
17:20-18:50	90	32.0	0.36
17:20-19:20	120	46.4	0.39
17:20-20:20	180	52.4	0.29
17:20-22:20	300	57.0	0.19
17:20-06:20	720	57.6	0.08
17:10-17:10	1440	59.0	0.04

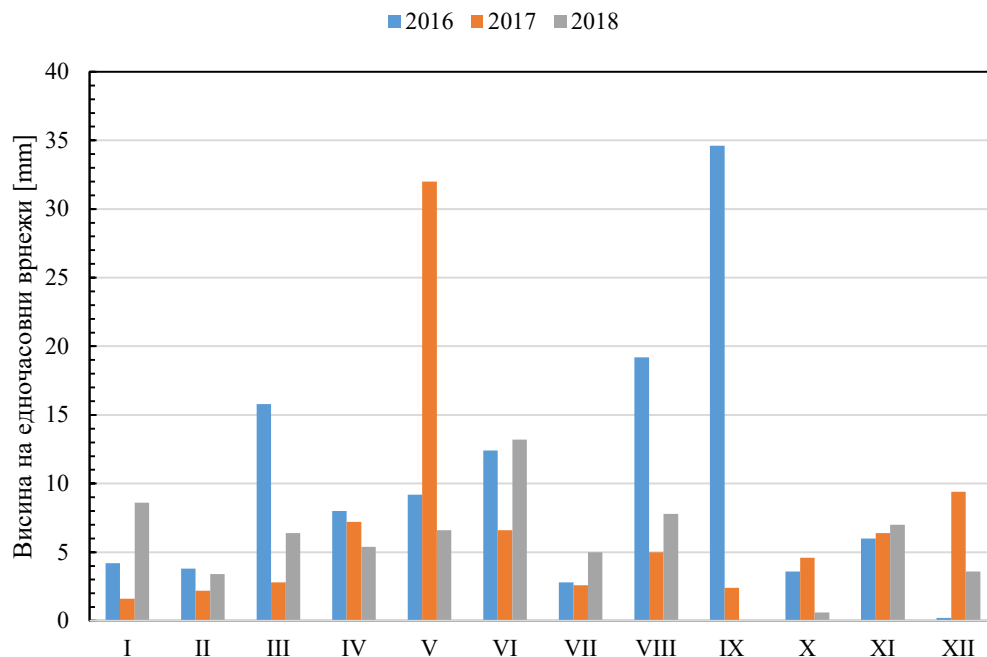
Максималниот интензитет на врнежи за разгледуваниот плувиограм е забележан за 10 минути и изнесува 1.38 mm/min. Максималните едночасовни интензивни врнежи за овој плувиограм од 32.0 mm се регистрирани во друг временски интервал.

Со анализа на податоците од плувиограмите, оформени се низи на максимални месечни врнежи прикажани во следната табела.

Табела 15. Максимални месечни врнежи за карактеристични временски интервали

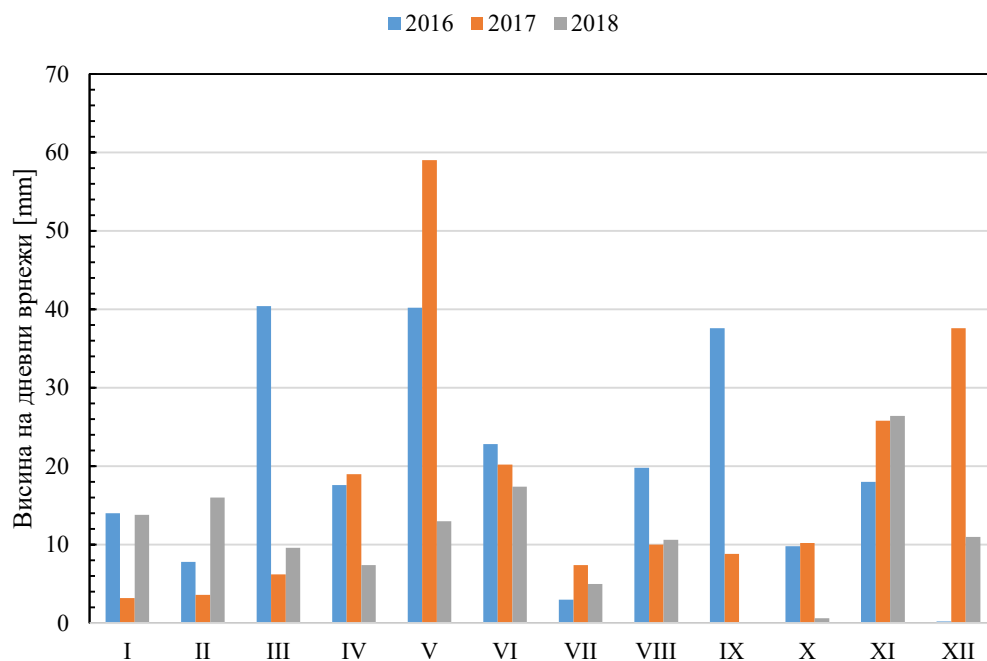
Година	Месец	10'	20'	40'	60'	90'	120'	180'	300'	720'	1440'
2016	I	3.0	3.0	3.4	4.2	5.0	5.6	5.8	7.6	13.0	14.0
	II	1.8	2.4	3.4	3.8	4.2	4.4	5.2	5.4	5.4	7.8
	III	4.6	8.0	12.4	15.8	20.8	22.8	23.6	23.6	25.8	40.4
	IV	4.0	4.8	6.4	8.0	10.0	10.2	10.8	11.8	17.0	17.6
	V	5.8	7.0	7.8	9.2	11.2	13.6	16.4	20.8	34.2	40.2
	VI	7.6	8.4	10.4	12.4	12.6	13.8	18.2	22.8	22.8	22.8
	VII	1.4	2.6	2.8	2.8	2.8	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	VIII	16.0	18.6	19.2	19.2	19.2	19.2	19.4	19.8	19.8	19.8
	IX	16.4	22.6	31.2	34.6	35.6	35.6	36.4	37.6	37.6	37.6
	X	2.2	2.6	3.2	3.6	4.2	4.6	6.6	8.6	9.4	9.8
	XI	3.4	4.8	5.4	6.0	7.0	7.8	8.0	8.2	15.4	18.0
	XII	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
2017	I	0.4	0.8	1.2	1.6	1.8	2.0	2.4	2.6	3.0	3.2
	II	0.8	1.2	1.6	2.2	2.4	2.4	2.4	3.0	3.6	3.6
	III	1.2	1.2	2.2	2.8	3.2	3.2	3.8	4.2	5.2	6.2
	IV	2.6	4.0	6.0	7.2	9.0	11.6	13.4	16.8	16.8	19.0
	V	13.8	15.4	29.6	32.0	32.0	46.4	52.4	57.0	57.6	59.0
	VI	3.6	4.6	4.8	6.6	8.4	8.4	10.4	10.4	10.4	20.2
	VII	1.6	1.8	1.8	2.6	3.6	4.4	5.0	5.0	6.4	7.4
	VIII	2.0	3.0	4.2	5.0	6.6	7.0	7.2	9.4	10.0	10.0
	IX	1.6	1.6	1.6	2.4	3.4	4.6	6.0	6.6	8.2	8.8
	X	1.4	2.2	4.0	4.6	5.2	6.0	6.8	8.0	10.2	10.2
	XI	1.4	2.6	4.6	6.4	8.6	9.4	9.6	10.6	17.4	25.8
	XII	6.2	6.2	7.6	9.4	11.0	12.8	14.0	17.6	22.4	37.6
2018	I	1.8	3.2	6.2	8.6	11.8	13.2	13.6	13.6	13.8	13.8
	II	1.8	2.2	2.4	3.4	4.2	5.2	6.6	8.8	11.6	16.0
	III	4.8	5.4	6.2	6.4	6.8	7.0	7.0	8.6	9.0	9.6
	IV	2.0	3.4	4.6	5.4	6.6	6.6	6.6	6.8	7.4	7.4
	V	2.4	3.8	6.2	6.6	9.4	9.8	10.0	11.4	13.0	13.0
	VI	8.6	12.8	13.2	13.2	13.4	13.6	13.8	14.2	14.2	17.4
	VII	3.6	4.4	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	VIII	4.6	5.6	7.4	7.8	8.0	8.0	8.0	10.2	10.6	10.6
	IX	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	X	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	XI	4.2	5.0	6.4	7.0	8.6	11.0	15.6	18.6	22.4	26.4
	XII	1.0	1.8	3.0	3.6	4.4	5.4	7.8	8.6	9.4	11.0

Значајни вредности на интензивни врнежи при анализа на стабилноста на хидројаловишната брана Тополница, како и за предлог решенија за стабилизација или заштита од ерозија се максималните паднати врнежи во еден час прикажани на следниот дијаграм.



Слика 54. Максимални едночасовни врнежи во тек на месец (2016-2018)

Од анализираниот тригодишен период, забележани се максимални 34.6 mm едночасовни интензивни врнежи во месец септември 2016 година. Сличен интензивен дожд е забележан и во мај 2017 година кога за еден час паднале 32.0 mm, но и 46.4 mm за 2 часа. Истиот ден се измерени и максималните 24 часовни врнежи од 59.0 mm. Во 2018 година, максималниот едночасовен интензивен дожд е значително помал и изнесува 13.2 mm, а се појавува и месец без врнежи.



Слика 55. Максимални дневни врнежи во тек на месец (2016-2018)

Комплетираниите низи на максималните врнежи за одредено времетраење се анализирани со познатите методи на математичка статистика и теорија на веројатност со цел да се дефинираат функциите на дистрибуцијата на веројатноста за секоја од низите на максимални месечни врнежи. За проценка на параметрите на дистрибуција е користен методот на моменти (Method of Moments MOM). Можат да се користат следните дистрибуции: Гаусова (Gaussian) или N дистрибуција, Лог-нормална (Log-Normal), Пирсонова (Pearson) Тип 3, Лог-Пирсонова (Log-Pearson) Тип 3, експоненцијална, Гумбелова (Gumbel), генерализирана на екстремни вредности, Вејбулова (Weibull), генерализирана Паретова (Pareto) и др. Дистрибуцијата на екстремни вредности, позната како Гумбелова дистрибуција, е најчесто користена дистрибуција на веројатност која најдобро ги отсликува максималните врнежи или поплави (Alam, et al., 2018).

За дефинирање на статистичките параметри, најпрво е формирана низа на емпириска веројатност на месечни врнежи (емпириска распределба на месечни врнежи) прикажана во табела 16.

Табела 16. Емпириска распределба на месечни врнежи за тригодишен период

Р. бр.	10'	20'	40'	60'	90'	120'	180'	300'	720'	1440'
1	16.4	22.6	31.2	34.6	35.6	46.4	52.4	57.0	57.6	59.0
2	16.0	18.6	29.6	32.0	32.0	35.6	36.4	37.6	37.6	40.4
3	13.8	15.4	19.2	19.2	20.8	22.8	23.6	23.6	34.2	40.2
4	8.6	12.8	13.2	15.8	19.2	19.2	19.4	22.8	25.8	37.6
5	7.6	8.4	12.4	13.2	13.4	13.8	18.2	20.8	22.8	37.6
6	6.2	8.0	10.4	12.4	12.6	13.6	16.4	19.8	22.4	26.4
7	5.8	7.0	7.8	9.4	11.8	13.6	15.6	18.6	22.4	25.8
8	4.8	6.2	7.6	9.2	11.2	13.2	14.0	17.6	19.8	22.8
9	4.6	5.6	7.4	8.6	11.0	12.8	13.8	16.8	17.4	20.2
10	4.6	5.4	6.4	8.0	10.0	11.6	13.6	14.2	17.0	19.8
11	4.2	5.0	6.4	7.8	9.4	11.0	13.4	13.6	16.8	19.0
12	4.0	4.8	6.2	7.2	9.0	10.2	10.8	11.8	15.4	18.0
13	3.6	4.8	6.2	7.0	8.6	9.8	10.4	11.4	14.2	17.6
14	3.6	4.6	6.2	6.6	8.6	9.4	10.0	10.6	13.8	17.4
15	3.4	4.4	6.0	6.6	8.4	8.4	9.6	10.4	13.0	16.0
16	3.0	4.0	5.4	6.4	8.0	8.0	8.0	10.2	13.0	14.0
17	2.6	3.8	5.0	6.4	7.0	7.8	8.0	9.4	11.6	13.8
18	2.4	3.4	4.8	6.0	6.8	7.0	7.8	8.8	10.6	13.0
19	2.2	3.2	4.6	5.4	6.6	7.0	7.2	8.6	10.4	11.0
20	2.0	3.0	4.6	5.0	6.6	6.6	7.0	8.6	10.2	10.6
21	2.0	3.0	4.2	5.0	5.2	6.0	6.8	8.6	10.0	10.2
22	1.8	2.6	4.0	4.6	5.0	5.6	6.6	8.2	9.4	10.0
23	1.8	2.6	3.4	4.2	5.0	5.4	6.6	8.0	9.4	9.8
24	1.8	2.6	3.4	3.8	4.4	5.2	6.6	7.6	9.0	9.6
25	1.6	2.4	3.2	3.6	4.2	5.0	6.0	6.8	8.2	8.8
26	1.6	2.2	3.0	3.6	4.2	4.6	5.8	6.6	7.4	7.8
27	1.4	2.2	2.8	3.4	4.2	4.6	5.2	5.4	6.4	7.4
28	1.4	1.8	2.4	2.8	3.6	4.4	5.0	5.0	5.4	7.4
29	1.4	1.8	2.2	2.8	3.4	4.4	5.0	5.0	5.2	6.2
30	1.2	1.6	1.8	2.6	3.2	3.2	3.8	4.2	5.0	5.0
31	1.0	1.2	1.6	2.4	2.8	3.0	3.0	3.0	3.6	3.6
32	0.8	1.2	1.6	2.2	2.4	2.4	2.4	3.0	3.0	3.2
33	0.4	0.8	1.2	1.6	1.8	2.0	2.4	2.6	3.0	3.0
34	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
35	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

За секоја дефинирана низа на интензивни максимални месечни врнежи x_i со број на членови n , дефинирани се:

- Средна аритметичка вредност (математичко очекување)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{n-1} + x_n}{n} \quad (93)$$

- Модулен коефициент

$$k_i = \frac{x_i}{\bar{x}} \quad (94)$$

- Средно квадратно отстапување (за низи со $n \geq 30$)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (95)$$

- Коефициент на варијација (за низи со $n < 60$)

$$c_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^2}{n - 1}} \quad (96)$$

- Коефициент на асиметрија

$$c_s = \frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3}{n \cdot c_v^3} \quad (97)$$

Добиените статистички параметри се презентирани во следната табела:

Табела 17. Статистички параметри на низи на максимални месечни врнежи за карактеристични временски интервали

Параметар	10'	20'	40'	60'	90'	120'	150'	300'	720'	1440'
$\bar{x}$	3.84	4.94	6.56	7.51	8.52	9.57	10.60	11.86	13.66	15.92
σ	4.03	4.98	6.94	7.50	7.71	9.21	10.03	10.81	11.42	13.12
C_v	1.06	1.02	1.07	1.01	0.92	0.98	0.96	0.92	0.85	0.84
C_s	1.87	1.96	2.23	2.20	1.91	2.27	2.32	2.21	1.75	1.28
α	0.32	0.26	0.18	0.17	0.17	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10
β	3.36	4.48	6.08	7.05	8.11	9.13	10.17	11.45	13.28	15.54

Во следниот чекор е пресметана веројатноста на појава на максималните интензивни врнежи со помош на Гумбеловата распределба (функција) за дистрибуција на веројатноста (the extreme value type 1 distribution). Оваа распределба е најпогодна за анализа на екстремни вредности. Функција на дистрибуција на распределба и функцијата на веројатност на распределба се изразуваат како:

- Функција на дистрибуција на распределба (Cumulative distribution function CDF)

$$f(z) = e^{-e^{-z}} \quad (98)$$

- Функција на веројатност на распределба (Probability density function PDF)

$$p(z) = e^{-z-e^{-z}} \quad (99)$$

каде што параметрите на низата се:

- Нормализирана променлива

$$z = \alpha \cdot (x - \beta) \quad (100)$$

- Параметар на размер зависен од стандардното отстапување

$$\alpha = \frac{1.282}{\sigma} \quad (101)$$

- Локациски параметар зависен од средната вредност на стандардното отстапување

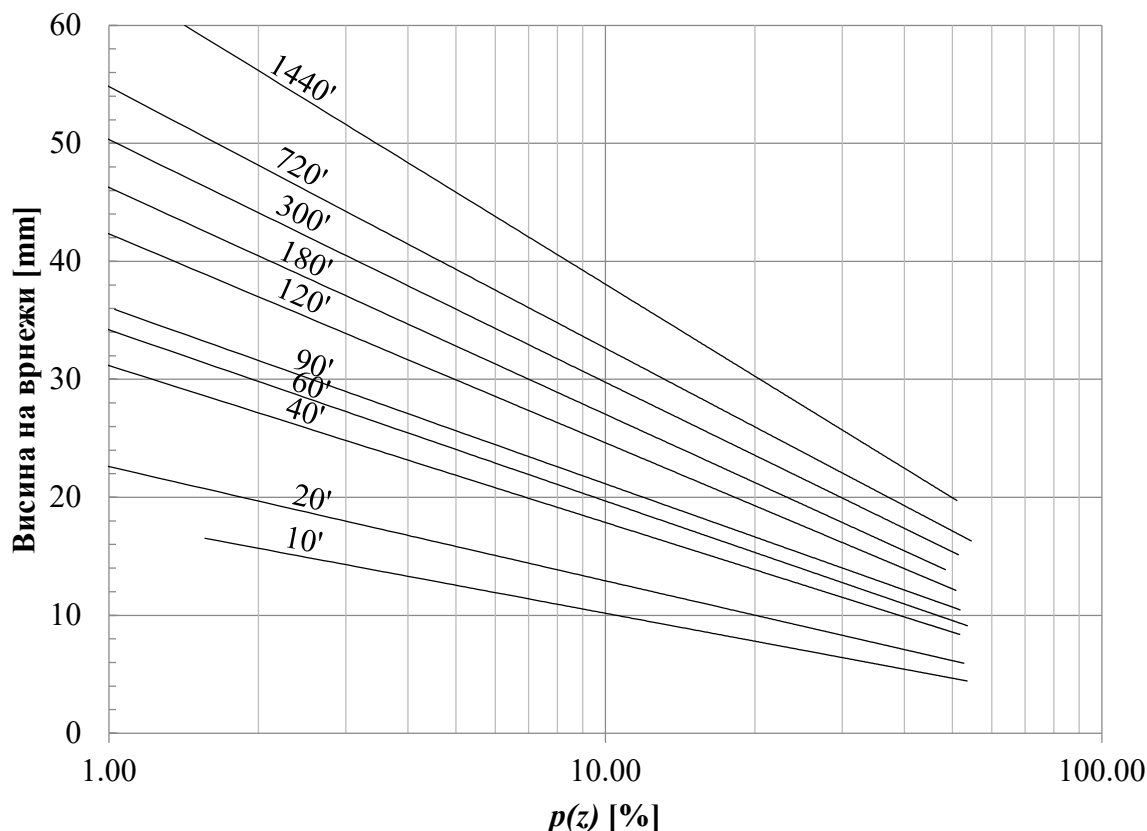
$$\beta = \bar{x} - 0.45 \cdot \sigma \quad (102)$$

Резултатите за веројатноста на појава на максималните интензивни врнежи пресметана со помош на Гумбеловата распределба за дистрибуција на веројатноста се прикажани во следната табела:

Табела 18. Веројатност на појава на максималните врнежи $p(z)$ [%] за различно времетраење

Р. бр.	10'	20'	40'	60'	90'	120'	180'	300'	720'	1440'
1	1.56	0.94	0.96	0.90	1.03	0.56	0.45	0.45	0.69	1.42
2	1.77	2.60	1.29	1.39	1.86	2.48	3.43	4.40	6.32	8.44
3	3.54	5.83	8.48	11.77	11.40	13.85	16.43	21.07	9.11	8.59
4	17.19	11.08	23.55	20.06	14.62	21.81	26.45	22.90	21.75	10.94
5	22.84	30.54	26.74	29.48	33.95	40.65	30.10	28.09	29.07	10.94
6	33.29	33.23	36.25	33.00	37.73	41.52	36.29	31.01	30.18	29.25
7	36.86	40.70	51.70	48.78	41.79	41.52	39.31	34.82	30.18	30.72
8	46.86	47.38	53.00	49.96	45.01	43.29	45.81	38.24	38.19	38.86
9	49.03	52.73	54.32	53.56	46.11	45.10	46.66	41.13	46.73	46.97
10	49.03	54.56	61.03	57.26	51.82	50.77	47.52	51.39	48.25	48.29
11	53.48	58.29	61.03	58.50	55.37	53.72	48.39	53.91	49.01	50.99
12	55.77	60.17	62.38	62.27	57.78	57.74	60.24	61.66	54.53	54.45
13	60.41	60.17	62.38	63.52	60.21	59.77	62.12	63.41	59.42	55.86
14	60.41	62.06	62.38	66.04	60.21	61.82	64.00	66.89	61.06	56.56
15	62.75	63.96	63.74	66.04	61.44	66.93	65.88	67.76	64.37	61.56
16	67.42	67.73	67.81	67.29	63.88	68.96	73.27	68.62	64.37	68.73
17	72.02	69.61	70.49	67.29	69.96	69.97	73.27	72.04	70.10	69.44
18	74.27	73.29	71.81	69.78	71.16	73.94	74.17	74.55	74.10	72.24
19	76.47	75.09	73.12	73.45	72.35	73.94	76.81	75.37	74.88	78.95
20	78.60	76.85	73.12	75.82	72.35	75.87	77.67	75.37	75.66	80.22
21	78.60	76.85	75.70	75.82	80.26	78.68	78.53	75.37	76.42	81.46
22	80.67	80.25	76.96	78.14	81.32	80.49	79.36	76.99	78.68	82.06
23	80.67	80.25	80.60	80.37	81.32	81.37	79.36	77.79	78.68	82.66
24	80.67	80.25	80.60	82.51	84.33	82.23	79.36	79.36	80.14	83.25
25	82.65	81.87	81.76	83.53	85.29	83.08	81.80	82.36	82.94	85.52
26	82.65	83.44	82.89	83.53	85.29	84.71	82.59	83.08	85.55	88.12
27	84.53	83.44	83.99	84.54	85.29	84.71	84.85	87.10	88.52	89.09
28	84.53	86.37	86.09	87.36	87.97	85.50	85.58	88.33	91.12	89.09
29	84.53	86.37	87.08	87.36	88.80	85.50	85.58	88.33	91.59	91.72
30	86.32	87.73	88.96	88.24	89.60	89.80	89.54	90.57	92.05	93.92
31	88.00	90.23	89.83	89.08	91.10	90.43	91.80	93.43	94.84	95.97
32	89.56	90.23	89.83	89.89	92.46	92.20	93.28	93.43	95.80	96.45
33	92.32	92.41	91.47	92.11	94.26	93.26	93.28	94.24	95.80	96.68
34	92.32	93.38	93.61	95.09	96.94	96.23	96.66	97.32	98.42	98.65
35	93.51	95.07	94.82	96.03	97.60	96.87	97.20	97.75	98.70	98.86
36	94.58	95.79	95.37	96.45	97.88	97.17	97.45	97.95	98.82	98.96

Врз основа на добиените резултати, преку т.н. статистички пристап е изработен дијаграм за отчитување на висината на врнежите за одредена веројатност на појава за разгледуваното подрачје. Дијаграмот ја презентира веројатноста на појава на максималните врнежи (probable maximum precipitation PMP) (De Paola, et al., 2014) во функција од вредностите на висината на врнежите и карактеристични времетраења на врнежите:



Слика 56. Дистрибуција на веројатноста на појава на максималните месечни врнежи

Во случај кога ќе се јави потреба од вредности на висината на врнежи за веројатност на појава различни од презентираниите, се препорачува бараната вредност да се добие со линеарна интерполација. На таков начин се добиени врнежите за карактеристични веројатности на појава дадени во следната табела од 50, 20, 10, 4, 2 и 1 % кои одговараат на повратен период T од 2, 5, 10, 25, 50 и 100 месеци, соодветно.

Табела 19. Максимални месечни врнежи [mm] за карактеристични вредности на веројатности на појава

$p(z)$ [%]	T [mes.]	10'	20'	40'	60'	90'	120'	180'	300'	720'	1440'
50	2	4.51	5.91	8.09	9.19	10.32	11.76	13.05	14.55	16.55	19.29
20	5	8.10	10.78	14.61	15.83	17.58	20.02	22.10	24.50	26.97	32.06
10	10	11.34	13.33	18.60	21.38	22.45	27.13	29.94	32.89	33.61	38.64
4	25	13.62	17.22	25.68	28.78	29.49	33.89	35.84	39.55	45.83	52.16
2	50	15.72	20.05	28.58	31.25	31.84	38.28	44.09	49.38	52.94	57.47
1	100		22.45	30.02	34.05		43.90	49.45	54.29	56.49	

4. Студија за стабилност на идеална косина

За да се истражи однесувањето на косина на интензивни врнежи, а со тоа и свлечишта иницирани од такви настани, можат да се направат тестови на терен со системи за мониторинг или физички модели во лабораторија во соодветен размер кои ги реплицираат карактеристиките на косината и граничните услови.

(Spolverino, et al., 2019) испитувале механизми на свлекување во некохерентни почви (вулканска пепел) на модели во голем размер преку мерење на повеќе физички големини како: поместувања, порен притисок, сукција и влажност за време на инфилтрација и испарување. Во првиот експеримент на хоризонтална поставеност на почвата изложена на инфилтрација од дожд со интензитет од 220 mm/h, се јавува лом во вид на течење предизвикан главно од намалувањето на привидната кохезија – сукција до нула и намалувањето на волуменот како ефект на самозбивање при влажнење и тоа во дренирани услови. Во фазата на испарување (14 дена на 20°C) се забележани релативно мало зголемување на сукцијата и опаѓање на влажноста, особено во подлабоките слоеви.

Кога сукцијата достигнува речиси константна вредност (3-5 kPa), косината е постепено подигната до агол од 38° што предизвикува редистрибуција на сукцијата и волуметриската влажност уште во првиот час. Трендот на релативно мали промени на сукцијата и влажноста продолжува и во следните 8 дена.

Повторната изложеност на инфилтрација предизвикува позначителни промени во мерените големини за разлика од претходниот тест, а се забележува и разлика во промените во зависност од местоположбата на сензорите, оние во долниот дел на косината покажуваат побрза реакција за разлика од оние во горниот дел, поради ефектот на гравитациона филтрација.

Класичен лом не е забележан, туку прогресивна ерозија кон ножицата на косината поради намалувањето на сукцијата, течењето предизвикано од зголемената влажност која пак ја предизвикува на движење и самата почва.

(Chueasamat, et al., 2018) го истражувале ефектот на збиеноста на површинскиот песокив слој и интензитетот на врнежи врз стабилноста на косини. Забележале два типа на лом: површински и прогресивен лом како резултат на намалувањето на ефективните напрегања и зголемување на влажноста. Интензитетот на врнежите го варираше од 0/25/50/100 mm/h, а збиеноста изразена преку релативната збиеност D_r , од 0/25/50%.

(Jia, et al., 2009) го истражувале однесување на 4.0 m висока косина со наклон од 1:1 од песокиво - прашиеста почва при флукуација на водата во големи размери. Регистрираат промена во порен притисок, тотален земјан притисок и деформации. При полнење на моделот со вода, забележани се слегнувања од 150 - 300 mm на врвот на косината, што изразено во волуметриска дилатација изнесува 2.5 - 5.8 %, како резултат на релативно растреситата состојба на вградениот материјал, како и парцијално рушење на косината како резултат на влажнењето што резултира со намалена јакост на смолкнување поврзано, пак, со намалувањето на матричната сукција до нула (заситени услови). Порниот притисок расте, но со задоцнување поради заробениот воздух во порите околу пиезометрите (сензорите). Вертикалниот притисок расте до достигнувањето на водата до самите сензори, по што почнува да опаѓа до некоја константна вредност. Ова зголемување се должи дел на заробениот воздух во порите, дел на реализираните слегања.

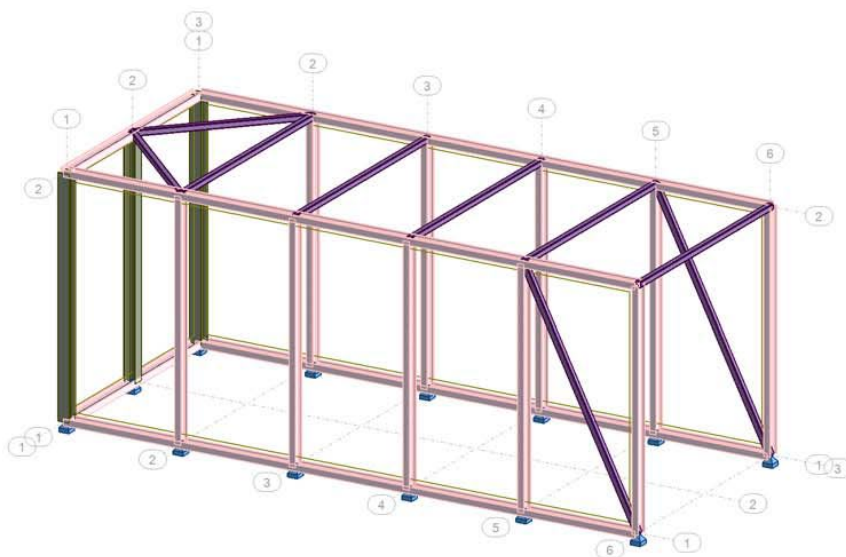
При нагло спуштање на нивото на вода (после поплава или во акумулации), порниот притисок во внатрешноста на косината опаѓа релативно бавно, со што и тоталниот притисок се намалува. Забележале и дренирање на вода од косината, односно брзината на снижување на нивото на вода во косината е помала од онаа надвор од косината, па препорачуваат користење на хоризонтални дренови. Механизмот на лом е регресивен и ротационен со откинување и ротација на неколку слични блокови.

4.1. Физичко моделирање на идеална косина

За потребите на актуелното истражување направен е 1g експериментален модел на идеална косина од песок во голем размер. Целта е да се процени хидромеханичкото однесување на незаситена почва и стабилноста на косината за оптоварувања од интензивни врнежи преку мерење на промените во влажноста, сукцијата, порниот и нормалниот притисок и деформациите.

4.1.1. Опрема, параметри на моделот и постапка на испитување

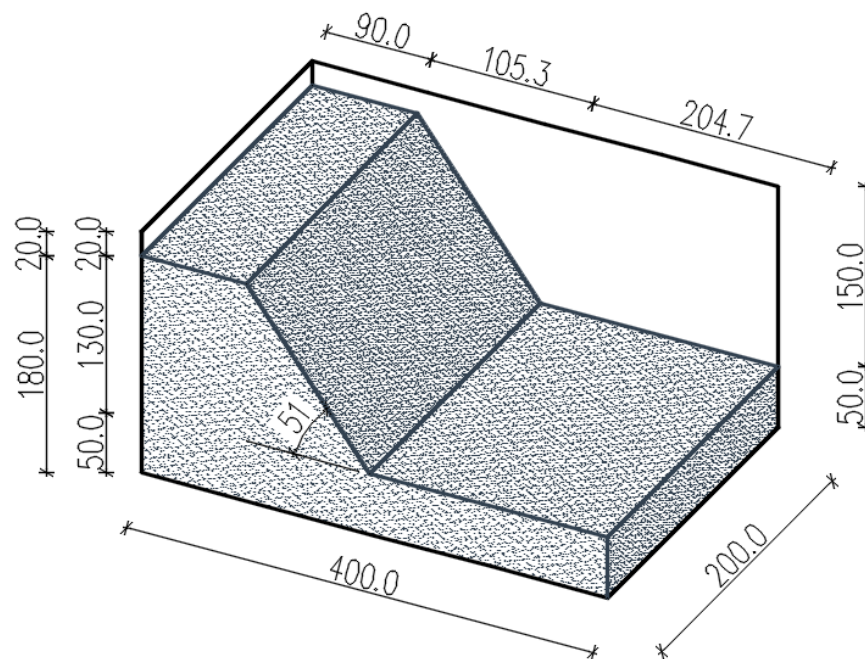
Косината е моделирана во челична правоаголна рамка со димензии $B/L/H=2.0/5.0/2.0$ m чиј пресметковен модел е прикажан на следната слика.



Слика 57. Пресметковен модел на челичен сад за испитување

Рамката е затворена од долната, двете подолги и едната пократка страна, со што се симулирани граничните услови – спречени деформации и истекување на вода. Користена е водонепропусна иверка со глатка површина на едната подолга и пократката страна со цел намалување на триењето со почвените честички, а едната подолга страна е затворена со транспарентен плексиглас со цел визуелно набљудување на промените во тек на испитувањето. Рамката е отворена од едната пократка страна од каде е внесуван почвениот материјал, а и од горната страна за да се овозможи нанесување на оптоварувањето од интензивни врнежи.

Тродимензионалниот модел на косината е прикажан на следната слика. Косината има висина од 130 cm и агол со хоризонталата од 51° . Круната има ширина од 0.9 m, додека на долниот дел моделот има висина 50 cm.



Слика 58. 3Д модел на косина (димензии во см)

Материјалот е вградуван во две фази:

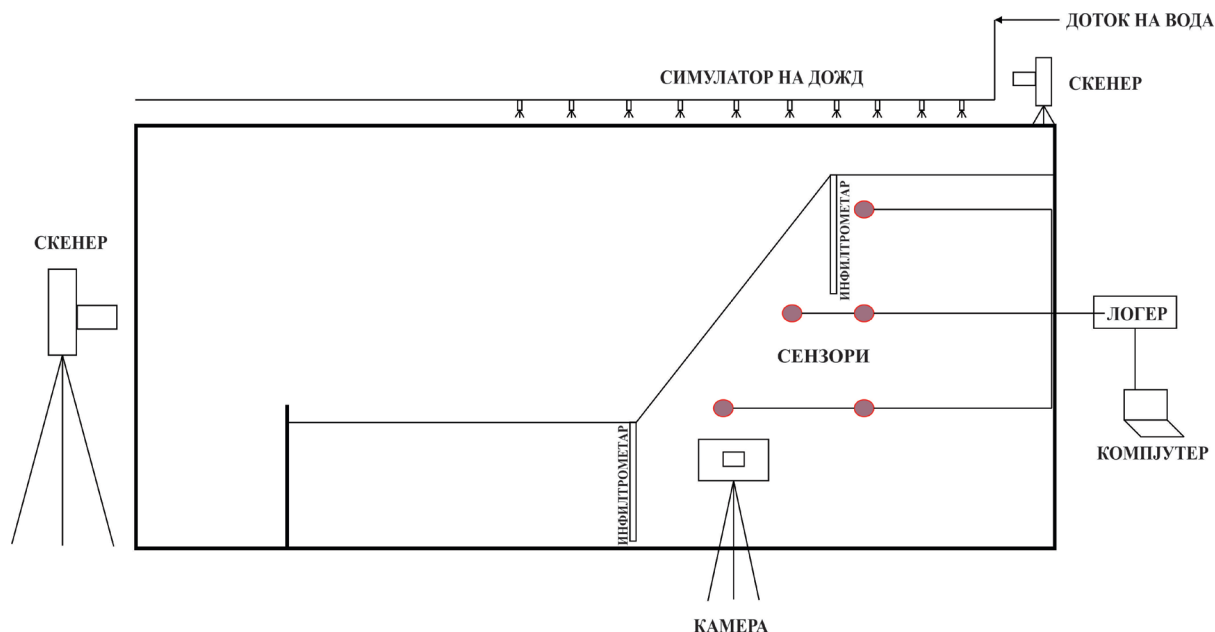
- Вградување на растресит материјал до 50 см висина по целата површина на моделот по што е извршено негово заситување и
- Насипување на растресит материјал без збивање за оформување на косина.



Слика 59. Фази на изведба на моделот

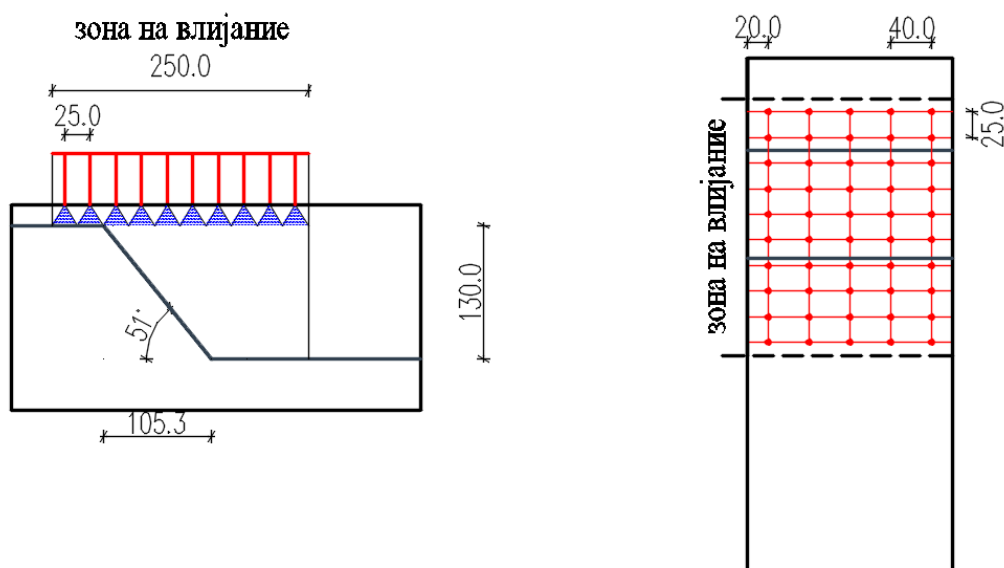
Параметрите на физичкиот модел се:

- Висина на косина 130 см
- Агол на косина со хоризонтала 51°
- Услови на материјал: дренирани
- Почетна влажност $\omega=5\%$
- Почетна волуменска тежина $\gamma=11.5 \text{ kN/m}^3$
- Интензитет на врнежи: 34.6 mm/h
- Времетраење на врнежи: до состојба на целосна заситеност или лом



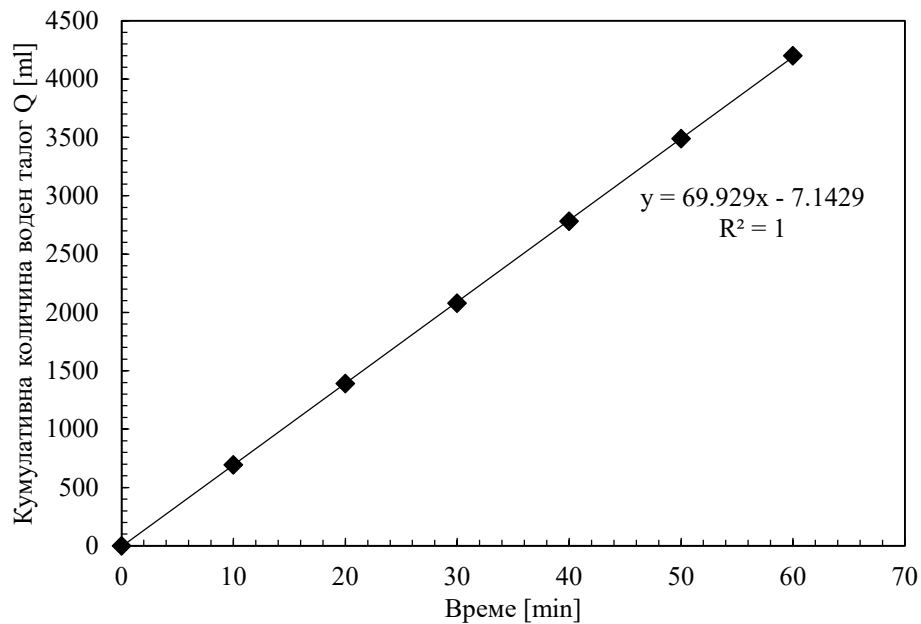
Слика 60. Шема на моделот и мерни инструменти

Системот за симулација на врнежи се состои од 50 прскалки (спринклери) кои се распоредени во 10 реда по 5 прскалки. Поврзани се во единствен систем за контрола и регулација на притисокот, а водата се добива директно од водоснабдителниот систем. Распоредот на прскалките прикажан на следната слика е оптимизиран со цел да даде униформна распределба на врнежите и да ја минимизира површинската ерозија.



Слика 61. Распоред на прскалки за симулација на дожд и зона на влијание

Проектираниот меродавен дожд се аплицира зависно од количината на вода и површината врз која паѓа. За таа цел, согласно усвоениот број и распоред на прскалки, направена е калибрација на една прскалка за време на работа на системот (тестот). Притисокот во системот се одржува константен на 1.5 bar, а за време од 60 минути во интервали од по 10 минути се мери кумулативната количина на воден талог од една прскалка. Калибрациониот дијаграм е даден на следната слика.



Слика 62. Калибрационен дијаграм на прскалка за константен притисок

Оттука, со линеарна регресија пресметан е интензитетот на врнежите кој изнесува 34.6 mm/h или 0.576 mm/min на соодветна аплицирана површина на моделот. За време на тестот, беше спроведена истата постапка со што се добиени идентични резултати, односно валидиран интензитетот на врнежи.

За време на инфилтрацијата од интензивните врнежи поставен е систем од сензори за мерење промената на влажност, сукција и температура, порен притисок и нормален (тотален) притисок. Системот се состои од по 5 сензори за мерење на секоја од овие големини, поврзан во единствен систем за регистрација и снимање на податоците.

За мерење на промените во влажноста користен е EC-5 сензор кој индиректно ја дава волуметриска влажност θ [m³/m³] преку мерење на релативната диелектрична константа на почвата – способност на задржување на електричен полнеж (Time-Domain Reflectometry – TDR). Сензорот е придружен со даталогер кој поврзан со софтвер во реално време ја прикажува пресметаната влажност (слика 63). Овој сензор има опсег на мерење од 0 % (суво) до 60 % (чиста вода) и висока точност.

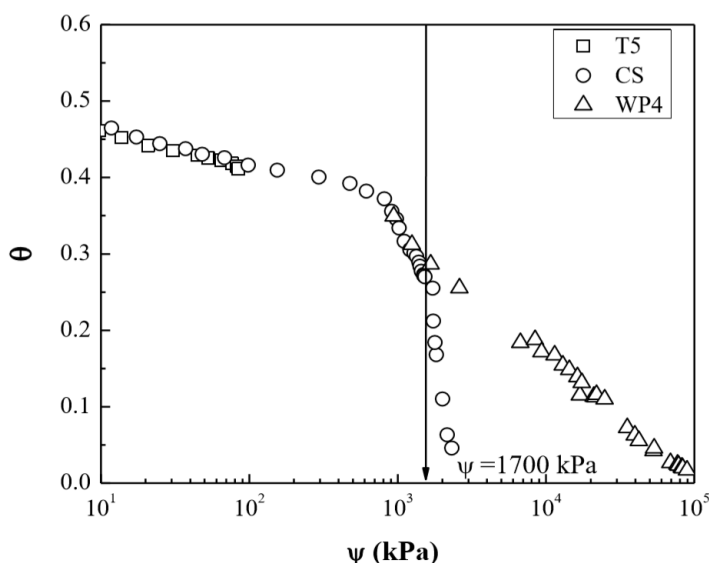
За мерење на сукцијата ψ [kPa] е користен MPS-6 (TEROS 21) калибриран сензор за матрична сукција и температура, отпорен на соли кој користи мерење на диелектричната константа на порозен диск кој е во рамнотежа со почвата, а електричното коло е поставено помеѓу два порозни диска до дијаметар 32 mm обложени со перфорирани челични плочки до дебелина од 0.3 mm (слика 63). Тој има широк опсег на мерење од -9 до -100000 kPa.

За регистрација и снимање на податоци од овој тип на сензори користен е даталогер Em-50 и соодветен софтвер за следење на мерењата во реално време.



Слика 63. Систем за мерење на влажност и сукулција

Бидејќи е една од најновите техники за мерење на матричната сукулција, во литературата нема многу студии за нивното користење при мерење на сукулција во толкав широк опсег. За таа цел (Saha, et al., 2020) направиле калибрација (споредба) на мерењата со MPS-6 (CS) сензорот со T5 тензиометар (до 100 kPa) и WP-4 за останатиот опсег до 100000 kPa. Заклучиле дека за испитуваната прашинеста глина, мерењата со овој сензор се многу блиски со споредените за опсег од 0 до 1700 kPa, во кој што се очекува да бидат и резултатите од актуелните истражувања.

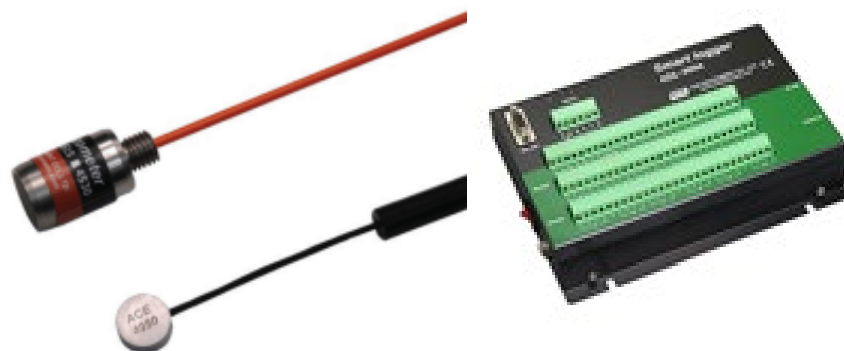


Слика 64. Споредба на сукулцијата мерена со различни инструменти (Saha, et al., 2020)

За мерење на промените во порниот притисок u [kPa] е користен FSG Piezometer сензор, модел 4530, произведен од корејската компанија Ace Instruments. Сензорите се заситени пред да бидат инсталирани, а имаат порозна плочка за да ја заштитат мембраната од почвените зрна (лика 65). Калибрацијата на овие сензори е извршена во цевка исполнета со вода во која се поставуваат сензорите и го мерат хидростатичкиот притисок. Користени се сензори со различен капацитет и тоа 100, 200 и 400 kPa.

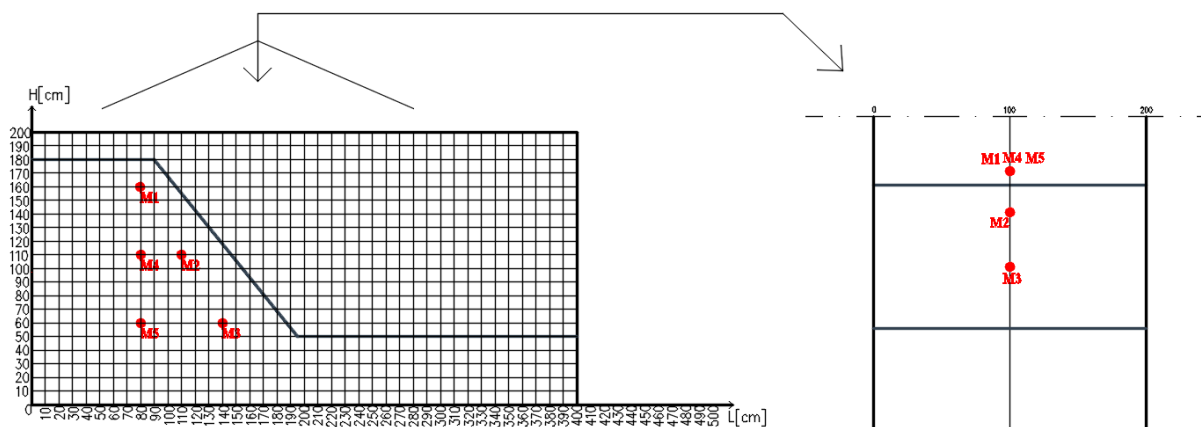
За мерење на промените во нормалниот притисок σ [kPa] е користен FSG Earth Pressure Cell сензор, модел 4950, произведен од корејската компанија Ace Instruments (слика 65). Користени се сензори со различен капацитет: 100, 200 и 400 kPa.

За регистрација и снимање на податоци од овој тип на сензори користен е даталогер ADL-200A верзија од 2019 година и соодветен софтвер за следење на мерењата во реално време.



Слика 65. Систем за мерење на порен и нормален притисок

Распоредот и точната местоположба на сензорите е прикажана на слика 66 и табела 20.



Слика 66. Распоред на сензори во пресек и основа

Табела 20. Местоположба на сензори, мерен опсег и прецизност

Мерно место	Координати ($x=L, y=H$)	Координати ($z=B$)	Опсег на мерење			
			Влажност (прецизност ± 0.03)	Сукција (прецизност $\pm 10\% + 2\text{kPa}$)	Порен притисок (прецизност $\pm 0.5\% \text{ FSR}$)	Нормален притисок (прецизност $\pm 0.5\% \text{ FSR}$)
M_i	[cm]	[cm]	[m^3/m^3]	[-kPa]	[kPa]	[kPa]
M_1	(80,160)	100	0.0-0.6	9-100000	0-100	0-100
M_2	(110,110)	100	0.0-0.6	9-100000	0-100	0-100
M_3	(140,60)	100	0.0-0.6	9-100000	0-200	0-200
M_4	(80,110)	100	0.0-0.6	9-100000	0-200	0-200
M_5	(80,60)	100	0.0-0.6	9-100000	0-400	0-400

Забелешка: FSR – Force Sensitive Resistor

На секоја мерна позиција M_i се поставени по еден од секој тип на сензор.

За мерење на деформациите беа користени ласерски скенери.

Дополнително, тестот беше снимен со дигитална камера, а во одредени временски интервали моделот беше фотографиран.

Во првата фаза беше вграден слојот со дебелина од 50 cm по целата површина без збивање и заситен со вода. За време на вградувањето беа земени проби за испитување и контрола на гравиметриската влажност при вградување. За дефинирање на волуменската тежина пред и по тестот беа користени челични прстени со познат волумен.

По вградувањето на материјалот во растресита состојба и оформувањето на косината, беше овозможена консолидација под дејство на сопствената тежина за период од 5 дена пред започнување со испитувањето.

За време на опитот вградените сензори ги мереа соодветните параметри во интервал од 10 минути, додека деформациите беа регистрирани во интервал од 30 минути.

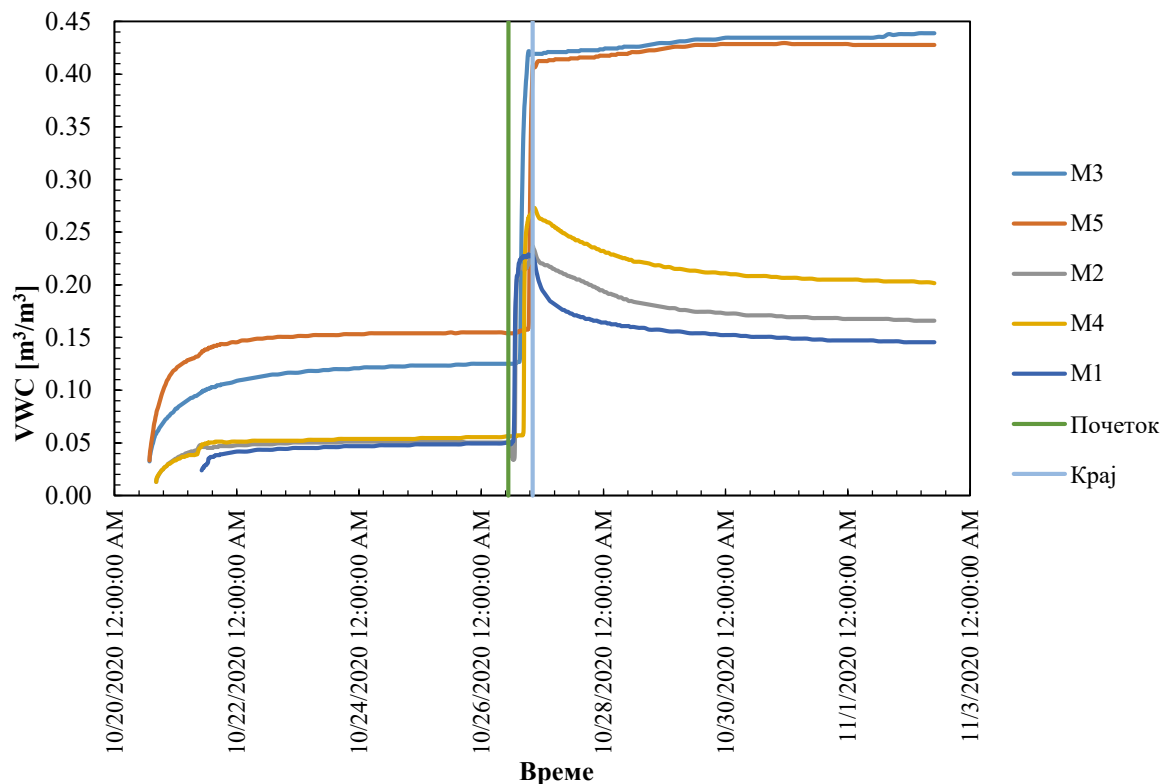
По завршувањето на испитувањето (дождот), се продолжи со мерење уште 7 дена на амбиентална температура од 15°C за да се утврди испарувањето (евапорација).



Слика 67. Изглед на моделот

4.1.2. Мерење на влажноста

На следниот дијаграм (слика 68) е дадена промената во волуметриската влажност за периодот од вградување на сензорите до крајот на мерењата со што е опфатен период од 12 дена. Почетокот и крајот на врнежите се обележани со зелена и сина линија, соодветно.

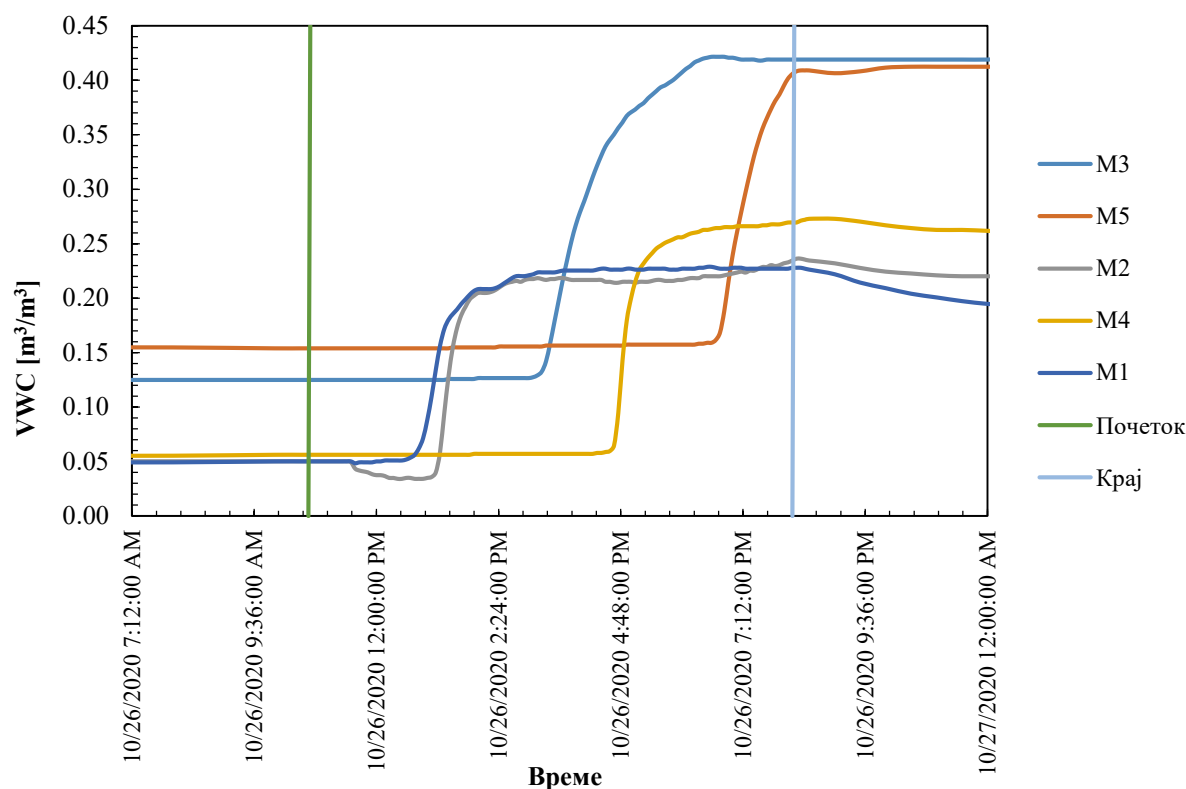


Слика 68. Промени во волуметриската влажност за вкупниот период на набљудување

Сензорите M1, M2 и M4 покажуваат воедначена влажност од $0.050\text{--}0.056\text{ m}^3/\text{m}^3$ пред испитувањето. Волуметриската влажност пред испитување кај сензорите M3 и M5 поставени во дното на косината блиску до нивото на заситеност покажуваат повисока вредност од $0.125\text{ m}^3/\text{m}^3$ и $0.155\text{ m}^3/\text{m}^3$, соодветно, поради близината и влијанието на заситениот слој, но се далеку од вредностите при целосна заситеност.

По завршувањето на тестот, влажноста во косината (M1, M2 и M4) бележи благ пад поради дренажањето на водата, но со тек на време истата се стабилизира. Спротивно, влажноста во ножицата на косината незначително се зголемува поради задржувањето на водата во овој дел и достигнува целосна заситеност.

За да се согледаат промените во влажноста за време на тестот, на следниот дијаграм (слика 69) се презентирани само резултатите од настанот (интензивните врнежи).



Слика 69. Промени во волуметриската влажност за времетраење на врнежите

Табела 21. Табеларен приказ на резултатите од мерењето на влажноста

Мерно место	Почетна влажност θ	Време на реакција t_1	Максимален прираст за време од:		Достигната максимална вредност за време од:	
			$\Delta\theta$	Δt	θ	t_2
M_i	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$	$[\text{min}]$	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$	$[\text{min}]$	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$	$[\text{min}]$
M_1	0.052	115	0.156	85	0.228	575
M_2	0.050	50	0.171	65	0.236	575
M_3	0.125	260	0.297	215	0.422	475
M_4	0.057	335	0.199	100	0.270	575
M_5	0.154	475	0.254	100	0.408	575

Инфилтрацијата на вода започнува уште на почетокот на тестот, а се квантифицира со времето на првичната реакција на сензорот за влажност. Најпрво е забележана промена во волуметриската влажност кај сензорот M1 кој е поставен на длабочина од 10 cm под круната на косината, односно промените започнуваат за време од 115 min од почетокот на тестот. Следи најголем прираст на влажноста од $0.052 \text{ m}^3/\text{m}^3$ до $0.208 \text{ m}^3/\text{m}^3$ за време од 85 min или разлика од $0.156 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Потоа влажноста незначително се зголемува во тек на време со прираст од $0.020 \text{ m}^3/\text{m}^3$ за време од 375 min, односно максимална вредност на крајот на тестот (575 min) од $0.228 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Оваа влажност е пониска од влажноста при целосна заситеност на материјалот, што укажува дека за цело времетраење на тестот, инфилтрираната вода во оваа зона се дренира во подолните слоеви, односно нема задржување.

Промена во волуметриската влажност кај сензорот M2 кој е поставен на површинскиот дел на средината на косината започнува за време од 50 min од почетокот на тестот кога влажноста незначително се намалува од $0.050 \text{ m}^3/\text{m}^3$ до $0.034 \text{ m}^3/\text{m}^3$ за време од 85 min поради навлегувањето на воздух низ веќеформираниите пукнатини во тој дел. Следи

прираст на влажноста од $0.034 \text{ m}^3/\text{m}^3$ до $0.205 \text{ m}^3/\text{m}^3$ за време од 65 min или разлика од $0.171 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Потоа влажноста незначително се зголемува во тек на време со прираст од $0.031 \text{ m}^3/\text{m}^3$ за време од 375 min, односно максимална вредност на крајот на тестот (575 min) од $0.236 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Оваа влажност е далеку помала од влажноста при целосна заситеност на материјалот, што укажува дека за цело времетраење на тестот, инфилтрираната вода во оваа зона се дренира во подолните слоеви, односно нема нејзино задржување.

Волуметриската влажност кај сензорот M4 кој е поставен на ист хоризонт со M2, а на иста вертикала со M1 има слична почетна вредност со соседните сензори. Промената во влажноста започнува за време од 335 min од почетокот на тестот кога влажноста значително расте од $0.057 \text{ m}^3/\text{m}^3$ до $0.256 \text{ m}^3/\text{m}^3$ за време од 100 min или разлика од $0.199 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Потоа влажноста незначително се зголемува во тек на време со прираст од $0.014 \text{ m}^3/\text{m}^3$ за време од 140 min, односно максимална вредност на крајот на тестот (575 min) од $0.270 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Оваа влажност е помала од влажноста при целосна заситеност на материјалот, што укажува дека за цело времетраење на тестот, инфилтрираната вода во оваа зона се дренира во подолните слоеви, односно нема нејзино задржување.

Почетната волуметриска влажност на сензорот M3 е повисока од почетните влажности на сензорите поставени во телото на косината поради близината на заситената зона под косината и изнесува $0.125 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Промената започнува за време од 260 min од почетокот на тестот кога влажноста бележи прираст до $0.422 \text{ m}^3/\text{m}^3$ за време од 215 min или разлика од $0.297 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Во следните 100 min до крајот на тестот влажноста останува константна, поради тоа што е достигната максималната влажност при заситена состојба.

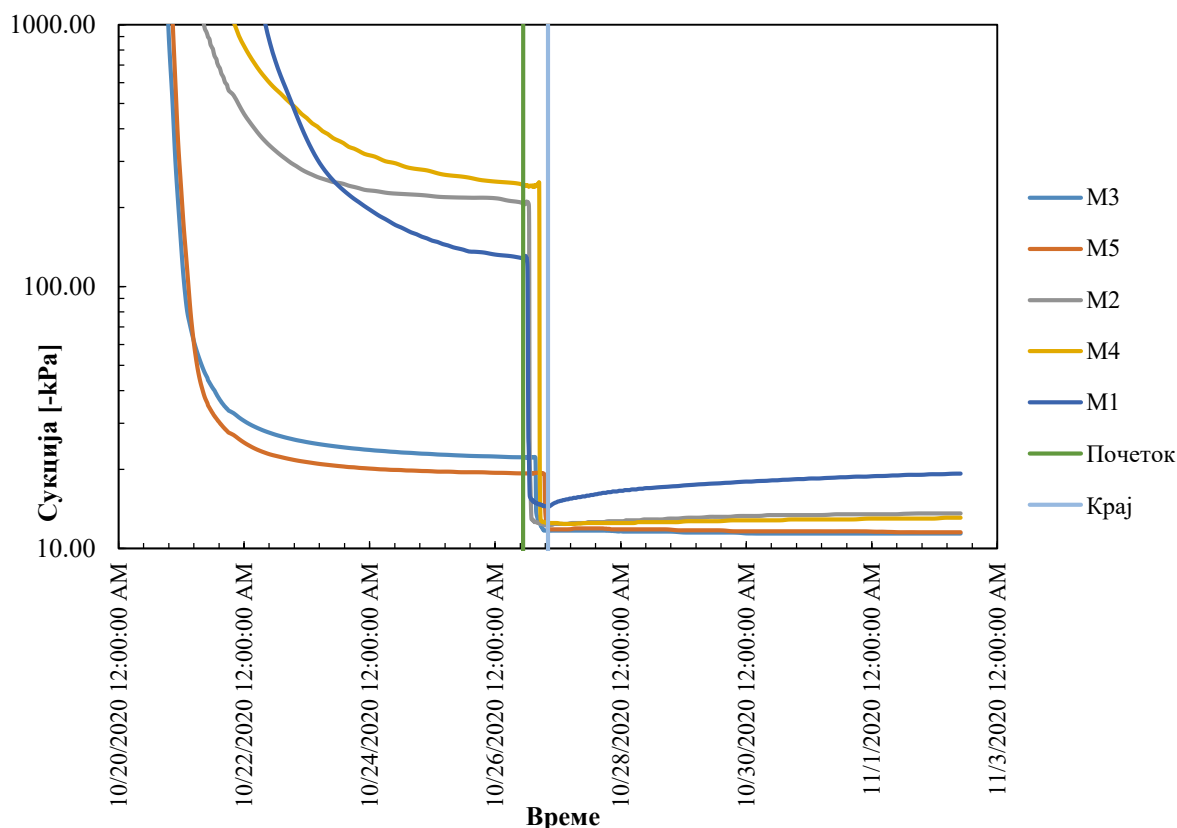
Слично како кај сензорот M3, почетната влажност измерена со сензорот M5 поставен на истиот хоризонт изнесува $0.154 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Промената започнува за време од 475 min од почетокот на тестот кога влажноста се зголемува до $0.408 \text{ m}^3/\text{m}^3$ за време од 100 min или разлика од $0.254 \text{ m}^3/\text{m}^3$ до крајот на тестот, по што влажноста останува константна.

Најмалата регистрирана почетна влажност изнесува $0.050 \text{ m}^3/\text{m}^3$, додека најголемата $0.422 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Од погоре изнесеното може да се заклучи дека материјалот во средниот и горниот дел на косината не ја задржува инфилтрираната вода, додека во ножицата ја задржува и се заситува побрзо поради почетно заситениот материјал под него.

4.1.3. Мерење на сукција

На следниот дијаграм е дадена промената на сукцијата за периодот од вградување на сензорите до крајот на мерењата со што е опфатен период од 12 дена. Сензорот на почетокот регистрира сукција на воздух од 100 МРа, додека по вградувањето во почва истата постепено се намалува.

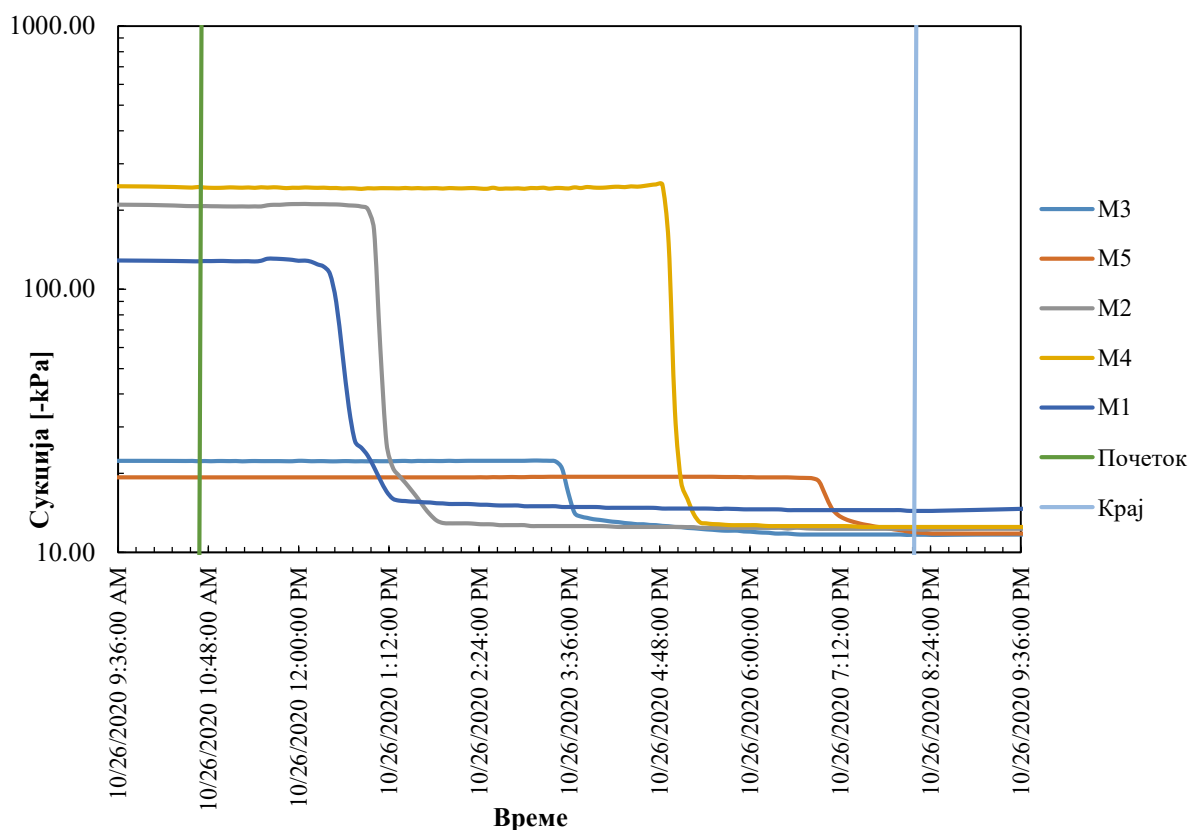


Слика 70. Промени во сукцијата за вкупниот период на набљудување

Сензорите М1, М2 и М4 покажуваат сличен пад на сукцијата по вградувањето поради сличната влажност. Пред да се започне со тестирањето сукцијата се стабилизира до вредност од 127.9 kPa кај сензорот М1, 207.0 kPa кај сензорот М2 и 243.5 kPa кај сензорот М4. Сукцијата пред испитување кај сензорите М3 и М5 поставени во дното на косината блиску до нивото на заситеност покажуваат значително помало ниво на сукција од 22.2 kPa кај сензорот М3 и 19.3 kPa кај сензорот М5, што е очекувано поради близината и влијанието на заситениот слој и се блиску до долната граница на мерниот опсег на сензорот (9 kPa).

По завршувањето на тестот, сукцијата во косината (М1, М2 и М4) бележи благ пораст поради загубата на влажност (дренирањето и испарувањето на водата по пукнатините). Ова е најизразено кај сензорот М1. Сукцијата во ножицата на косината останува константна поради задржувањето на водата во овој дел и достигната целосна заситеност.

За да се согледаат промените во сукцијата за време на тестот, на следниот дијаграм се презентирани само резултатите од настанот (интензивните врнежи).



Слика 71. Промени на сукуцијата за времетраење на тестот (врнежи)

Табела 22. Табеларен приказ на резултатите од мерењето на сукуцијата

Мерно место	Почетна сукуција s	Време на реакција t_1	Максимален прираст за време од:		Достигната минимална вредност за време од:	
			Δs	Δt	s	t_2
M_i	[-kPa]	[min]	[-kPa]	[min]	[-kPa]	[min]
M_1	127.9	95	108.9	75	14.6	575
M_2	207.0	115	196.5	80	14.4	405
M_3	22.2	285	9.6	80	11.7	575
M_4	243.5	370	236.8	30	14.9	550
M_5	19.3	475	7.4	100	11.9	575

Почетната вредност на сукуцијата зависи од степенот на заситеност на почвата пред тестот. Највисока почетна сукуција покажуваат сензорите поставени во горната половина на косината (M_1 , M_2 и M_4). Значителна промена – пад во сукуцијата се забележува при инфилтрацијата на водата од врнежите до местоположбата на сензорите што може да биде начин на квантификација на ефектот од инфилтрација. Најпрво е забележана промена во сукуцијата кај сензорот M_1 кој е поставен на длабочина од 10 cm под круната на косината, односно промените започнуваат за време од 95 min од почетокот на тестот. Следи најголем пад на сукуцијата од 124.5 kPa до 15.6 kPa за време од 75 min.

Промена на сукуцијата кај сензорот M_2 кој е поставен на површинскиот дел на средината на косината започнува за време од 115 min од почетокот на тестот кога сукуцијата се намалува од 209.4 kPa на 12.9 за време од 80 min.

Сукуцијата кај сензорот M_4 кој е поставен на ист хоризонт со M_2 , а на иста вертикала со M_1 има слична почетна вредност со соседните сензори, а највисока од сите. Промената

во сукцијата започнува за време од 370 min од почетокот на тестот кога сукцијата изнесува 249.8 kPa и за само 30 min опаѓа до 13.0 kPa или разлика од 236.8 kPa.

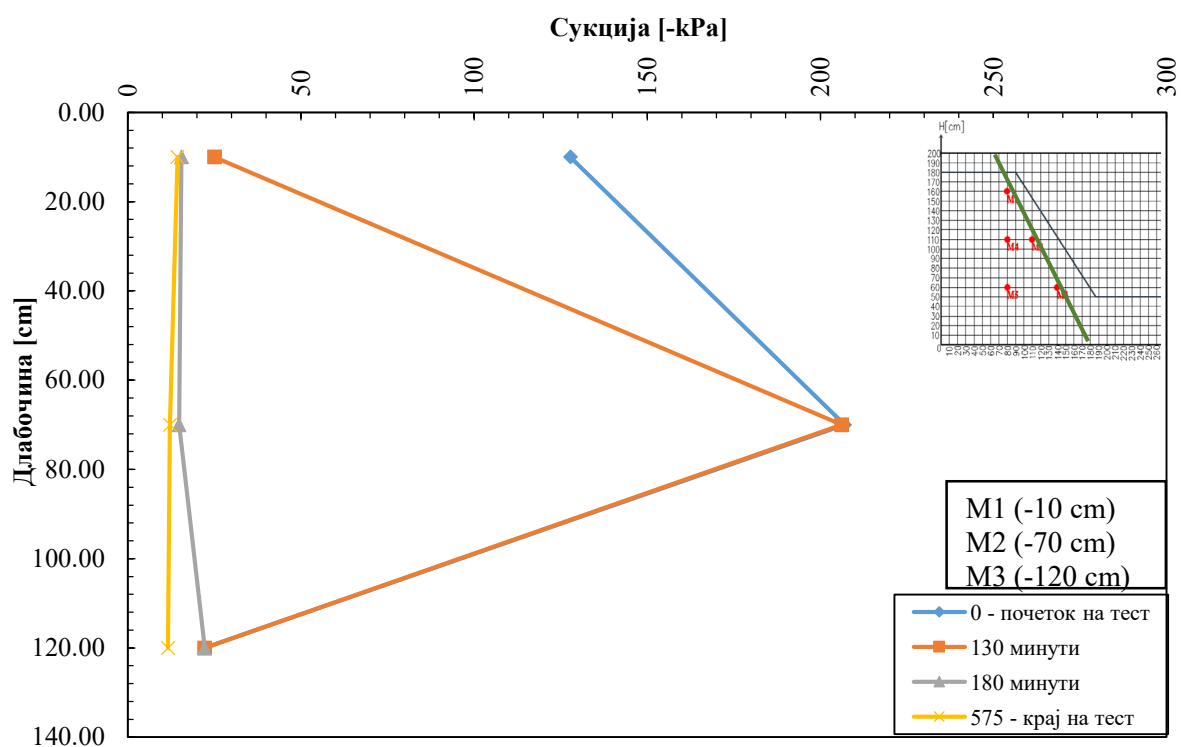
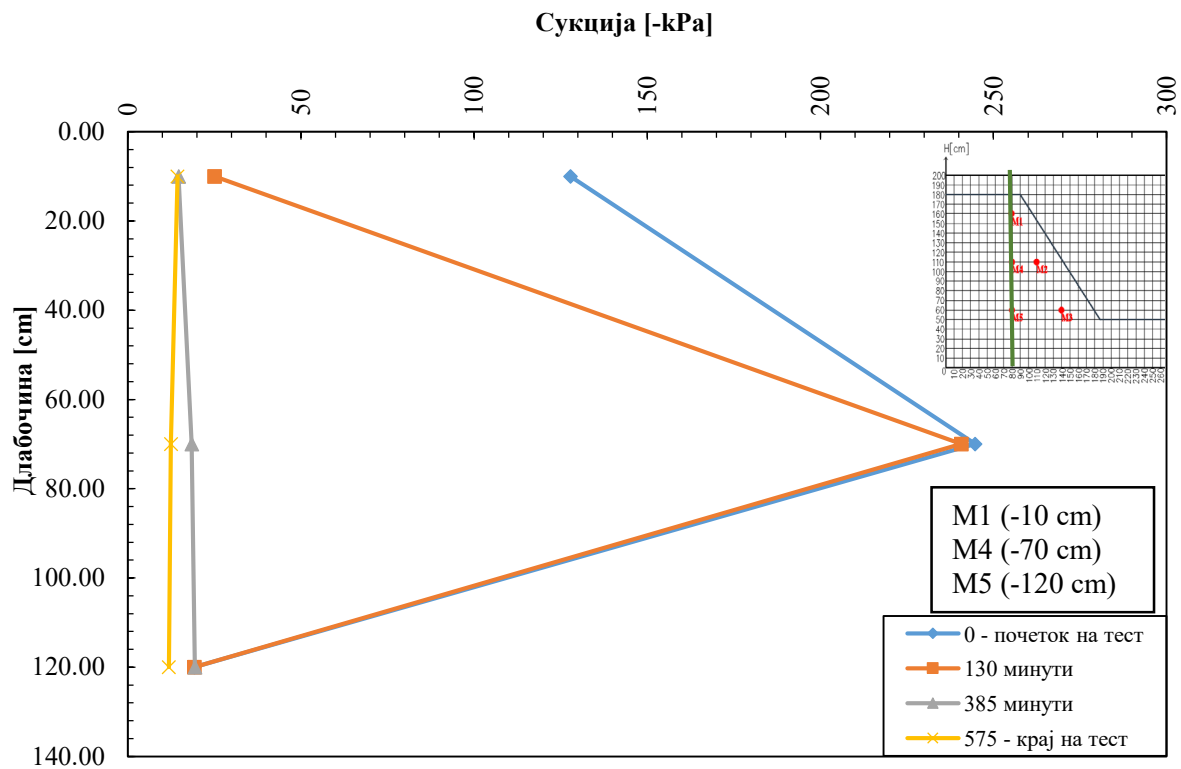
Почетната сукција на сензорот M3 е пониска од почетните сукции на сензорите поставени во телото на косината поради близината на заситената зона под косината и изнесува 22.2 kPa. Промената започнува за време од 285 min од почетокот на тестот кога сукцијата започнува да опаѓа и за време од 80 min достигнува вредност од 12.6 kPa. До крајот на тестот сукцијата опаѓа до константна вредност од 11.7 kPa.

Слично како кај сензорот M3, почетната сукција измерена со сензорот M5 поставен на истиот хоризонт изнесува 19.3 kPa. Промената започнува за време од 475 min од почетокот на тестот кога до крајот на тестот, односно за време од 100 min достигнува минимална вредност од 11.9 kPa, по што останува константна.

На таков начин, може да се согледа дека најголемата регистрирана почетна сукција изнесува 244.7 kPa, најмалата 11.7 kPa.

Од погоре изнесеното може да се заклучи дека материјалот при заситувањето релативно брзо ја губи сукцијата.

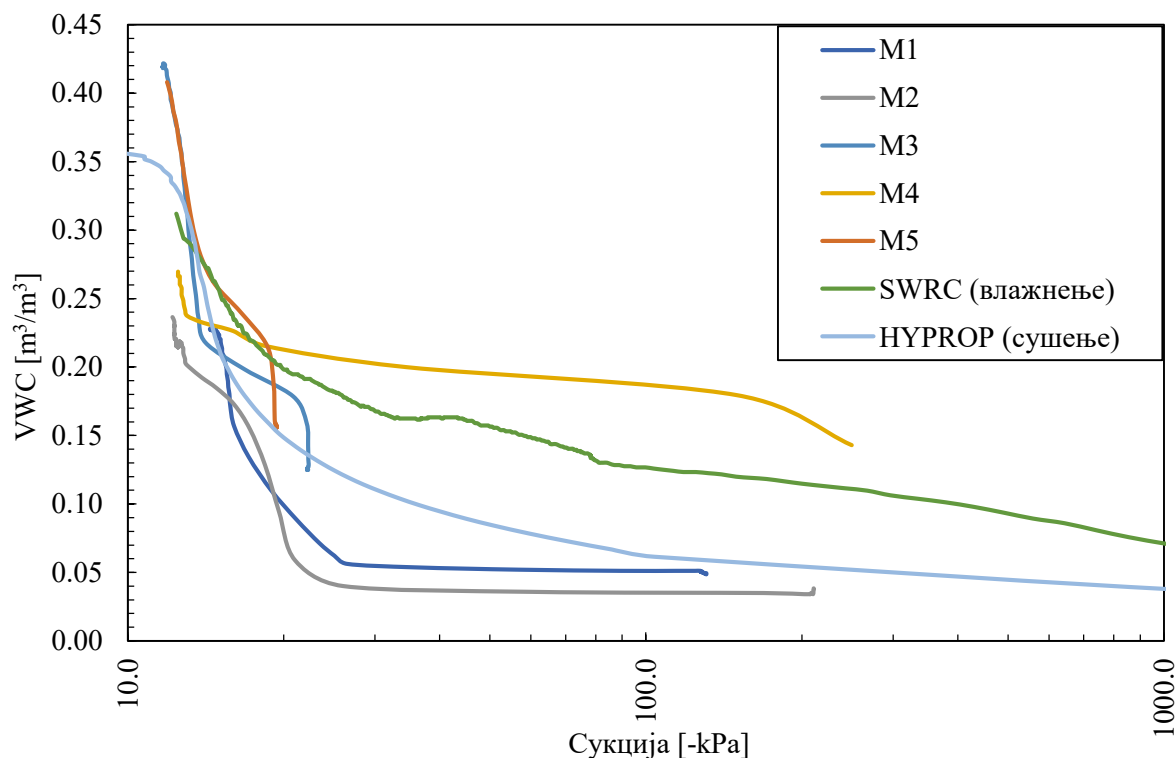
На следниот дијаграм е прикажана промена на сукцијата по длабочина на моделот на два различни профили: M1-M4-M5 и M1-M2-M3. Кривите се формирани за различно време од почетокот на тестот.



Слика 72. Промена на сукција по длабочина за време на тест

Може да се заклучи дека сукцијата има најголема вредност на средината од косината сè додека инфилтрираната вода не го засити материјалот во тој дел. На крајот од тестот сукцијата има приближно иста вредност независно од длабочината.

Во продолжение е направена споредба на кривите на задржување почвена влажност добиени на 5 локации во експерименталниот модел за време на тестот, кривата добиена во лабораториски услови со истите сензори (сите добиени при влажнење) и кривата добиена со Нургор и WP4с (при сушење).

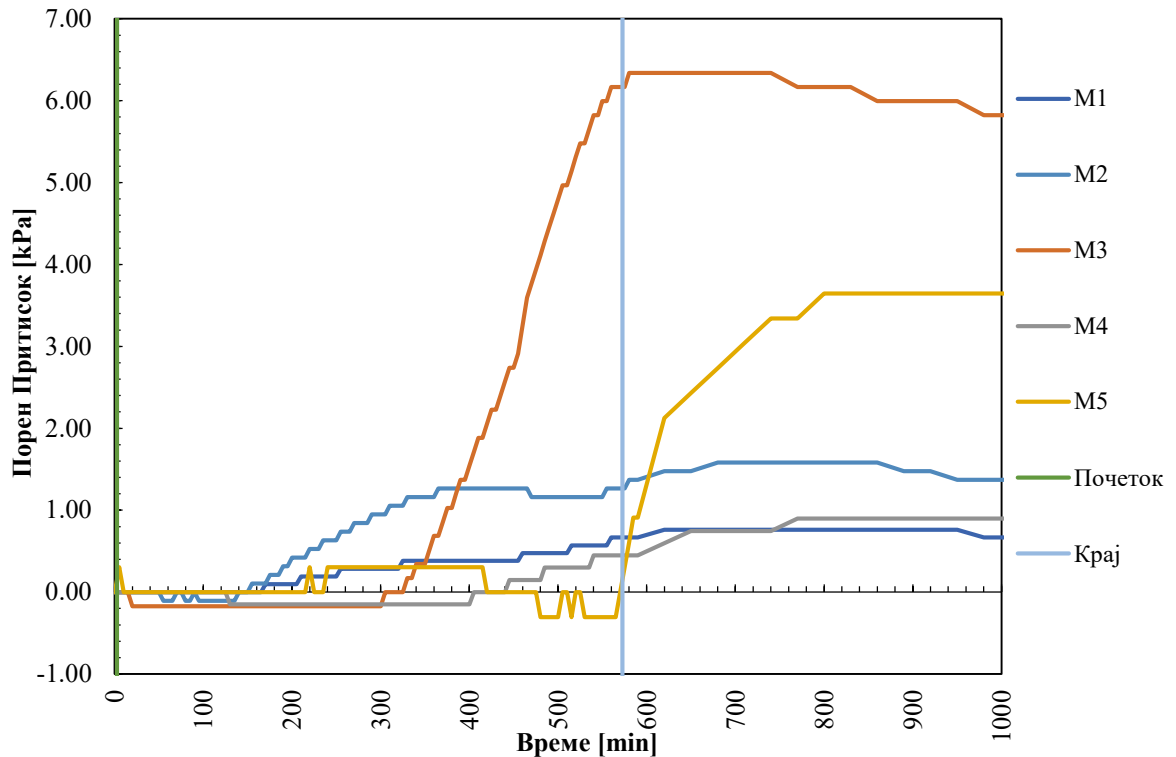


Слика 73. Споредба на кривите на задржување почвена влажност добиени со експериментот и лабораториските мерења

Од дијаграмот може да се констатира дека кривите кои се резултат на мерењата на сензорите M1 и M2 даваат слични резултати, додека кривата од M4, кој исто така се наоѓа на косината, отстапува од останатите. Кривите од сензорите M3 и M5 достигнуваат наголема влажност бидејќи истите се многу блиску до заситената зона, односно вградени во зоната на влијание на капиларно качување на подземната вода уште пред започнување на врнежите и затоа кај нив почетната сукција е помала од другите. Генерално, за влажност поголема од 20%, сите криви даваат слична зависност на сукцијата и влажноста. Само мерењето со Нургор прецизно ја дефинира сукцијата при влез на воздух, поради ограничувањата на сензорите за сукција под 10 kPa.

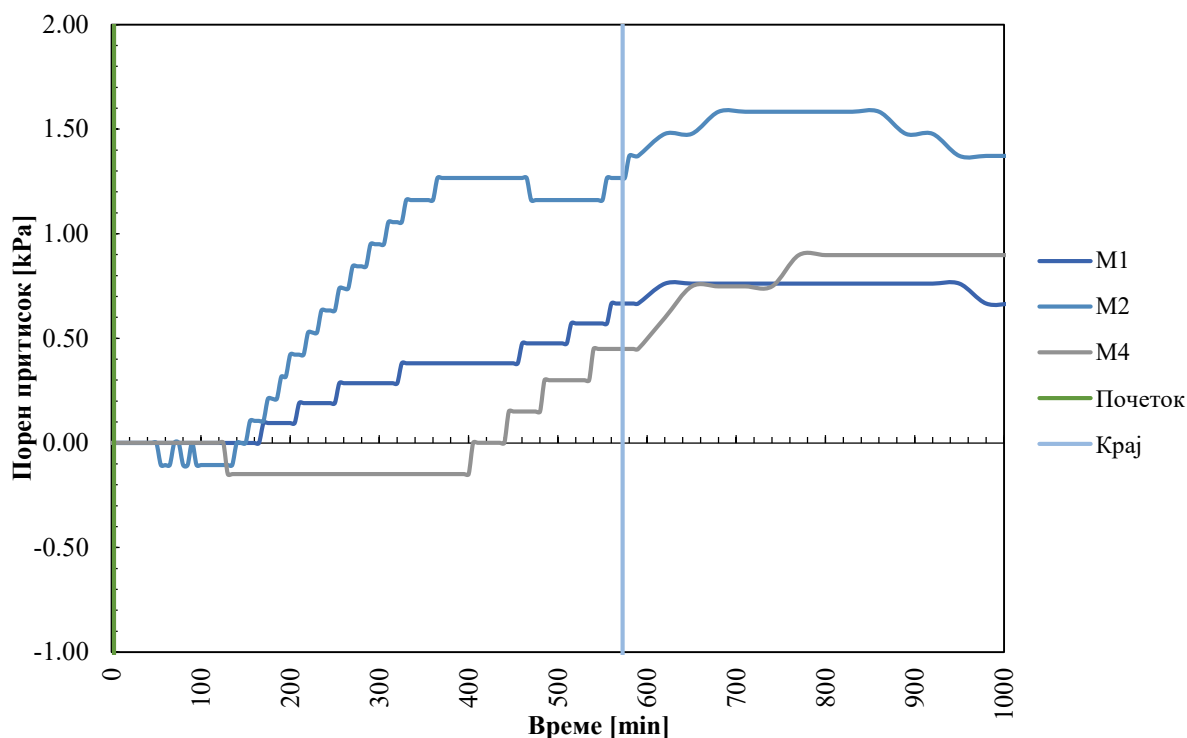
4.1.4. Мерење на порен притисок

Промената на порниот притисок на различни длабини за време на тестот е прикажана на следниот дијаграм. Треба да се нагласи дека мерените вредности непосредно пред почетокот на тестот се земени како почетни, а мерењата се со точност од 0.1 kPa.



Слика 74. Промени на порниот притисок за времетраење на тестот (врнежи)

За подобар приказ на развојот на порниот притисок кај сензорите M1, M2 и M4, поставени во телото на косината, на следниот дијаграм се изоставени мерењата кај сензорите M3 и M5.



Слика 75. Промени на порниот притисок за времетраење на тестот (врнежи) за сензорите M1, M2 и M4

Порниот притисок бавно расте со времето во зависност од промените предизвикани од инфилтрацијата на аплицираната вода.

Промена на порниот притисок кај сензорот M1 е забележана за време од 170 min од почетокот на тестот, што е за 55 минути подоцна од почетните промени на волуметриската влажност на истото место. Ова доцнење може да се објасни со фактот дека сензорот може да има заробен воздух во него, а и релативно малата длабочина од 10 cm на која е поставен. Станува збор за екстремно мали промени во порниот притисок кои на крајот на тестот достигнуваат 0.7 kPa.

Промена на порниот притисок кај сензорот M2 е забележана за време од 155 min од почетокот на тестот, односно 20 минути подоцна од почетните промени на волуметриската влажност на истото место. Прирастот во порниот притисок е поизразен во споредба со сензорот M1 поради поголемиот надслој и на крајот на тестот достигнуваат 1.3 kPa.

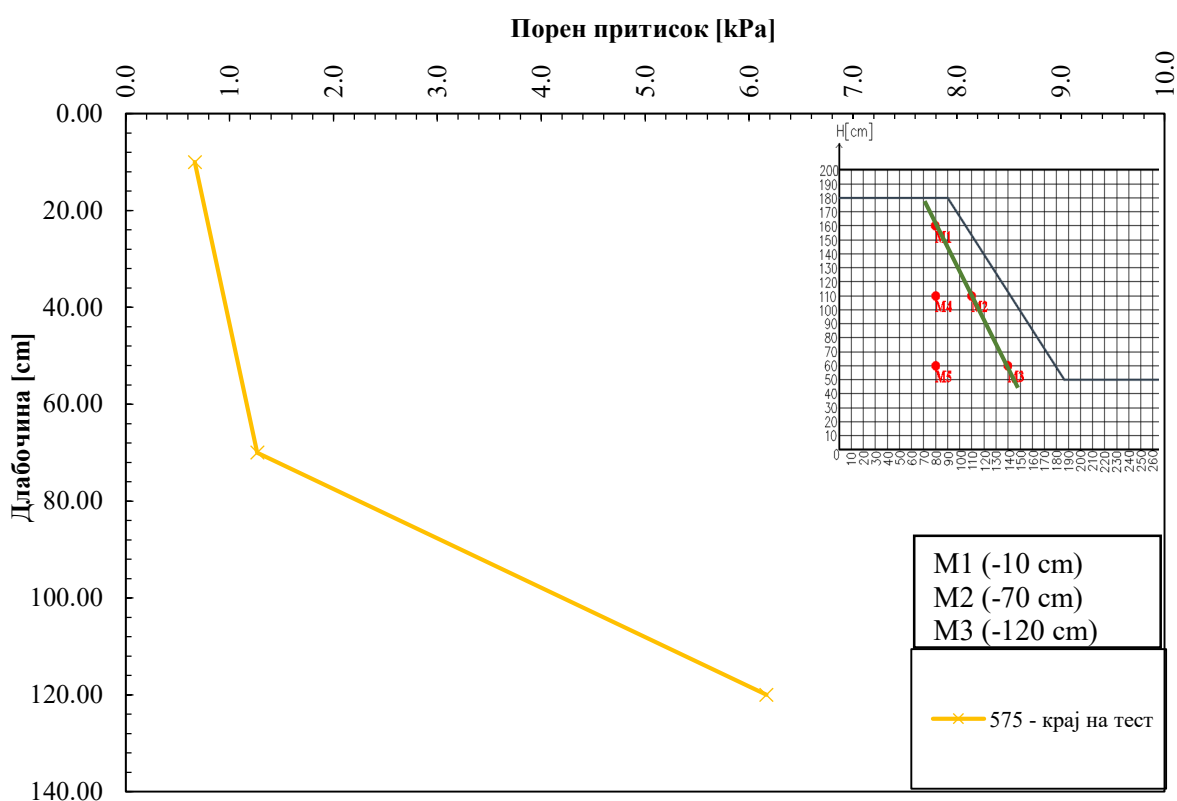
Сензорот M4 е поставен подлабоко во телото на косината, па водата дотаму се инфилтрира за релативно подолго време. Оттука и промената на порниот притисок е забележана за време од 405 min од почетокот на тестот, што е 70 минути подоцна од почетните промени на волуметриската влажност на истото место. Максималните промени во порниот притисок до крајот на тестот достигнуваат 0.4 kPa, а продолжуваат непосредно по завршувањето на настанот и достигнуваат 0.9 kPa.

Најголемата промена на порниот притисок е забележана кај сензорот M3 поставен во ножицата на косината. Првата промена е 330 min од почетокот на тестот, што е 70 минути подоцна од почетните промени на волуметриската влажност на истото место. Максималните промени во порниот притисок до крајот на тестот достигнуваат 6.2 kPa, а почнуваат да се намалуваат непосредно по завршувањето на тестот.

Сензорот M5 покажува најмали промени во порниот притисок за време на тестот затоа што е поставен најдлабоко во моделот каде инфилтрираната вода стигнува за време од 475 min. Притоа, промената во порниот притисок е забележана на самиот крај од тестот за време од 575 min, а непосредно по завршувањето на тестот (врнежите) порниот притисок достигнува максимална промена од 3.6 kPa за време од 225 min.

Промената на порниот притисок во ножицата на косината (M3) е најголема и најзначителен показател за дестабилизацијата на косината. Во овој дел е забележано и најголемото заситување на материјалот ($0.422 \text{ m}^3/\text{m}^3$), па оттука и првите позначителни визуелно забележливи деформации во вид на течење и свлекување на материјалот.

На следниот дијаграм е прикажана промена на порниот притисок по длабочина на профилот M1-M2-M3 каде е забележана првичната рамнина на лизгање. Кривата се однесува на крајот на тестот и ја дава промената на порниот притисок во однос на почетокот на тестот.

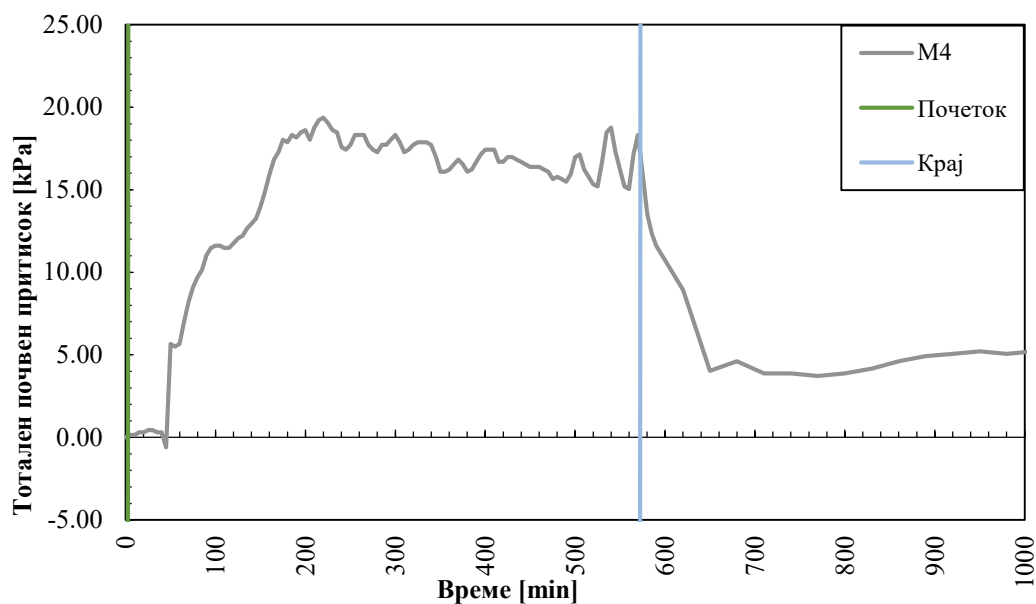


Слика 76. Промени на порниот притисок по длабочина

Оттука, евидентно е дека промената на порниот притисок е со прираст на длабочината, односно максималната промена е измерена во ножицата на косината што е местоположбата каде е иницирано свлекување (лигање) и ломот на косината.

4.1.5. Мерење на тотален почвен притисок

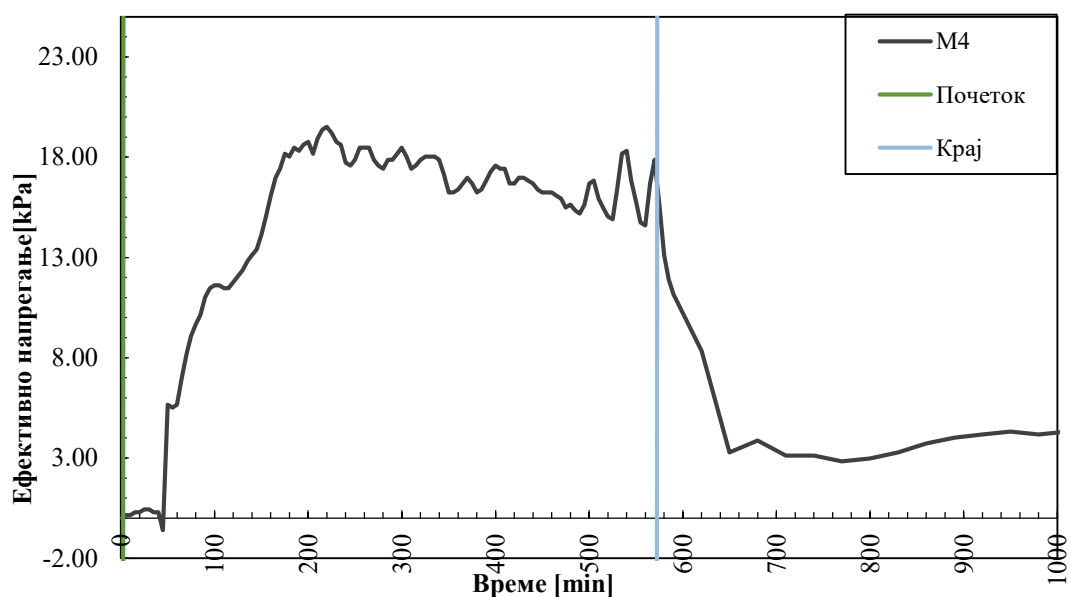
Промените во тоталниот почвен притисок беа набљудувани на повеќе локации, но задоволителни мерења беа добиени само од мерното место M4. Кај останатите мерни места беа добиени осцилации во мерењата како резултат на релативно плитката поставеност на сензорите и грубата (ниска) сензитивност. Резултатите во функција од времето се прикажани на следниот дијаграм.



Слика 77. Промени на тотален почвен притисок за времетраење на тестот (врнежи)

Позначајна промена на тоталниот почвен притисок е забележана за време од 50 min од почетокот на тестот, по што следува зголемување на притисокот како резултат на оптоварувањето од врнежите и збивањето на материјалот во тој дел од косината поради сопствена тежина. Максималната разлика во притисокот изнесува 19.4 kPa за време од 220 min од почетокот на тестот, односно прираст од 6.85 kPa/h. По завршувањето на тестот, притисокот започнува да опаѓа поради дренарањето на водата во тој дел и по некое време се задржува константно околу 5 kPa.

Ако се направи директна колерација со вредностите измерени за тотален и порен притисок, може да се определи ефективниот притисок. На следниот дијаграм е дадена распределбата на ефективниот притисок по време за M4.

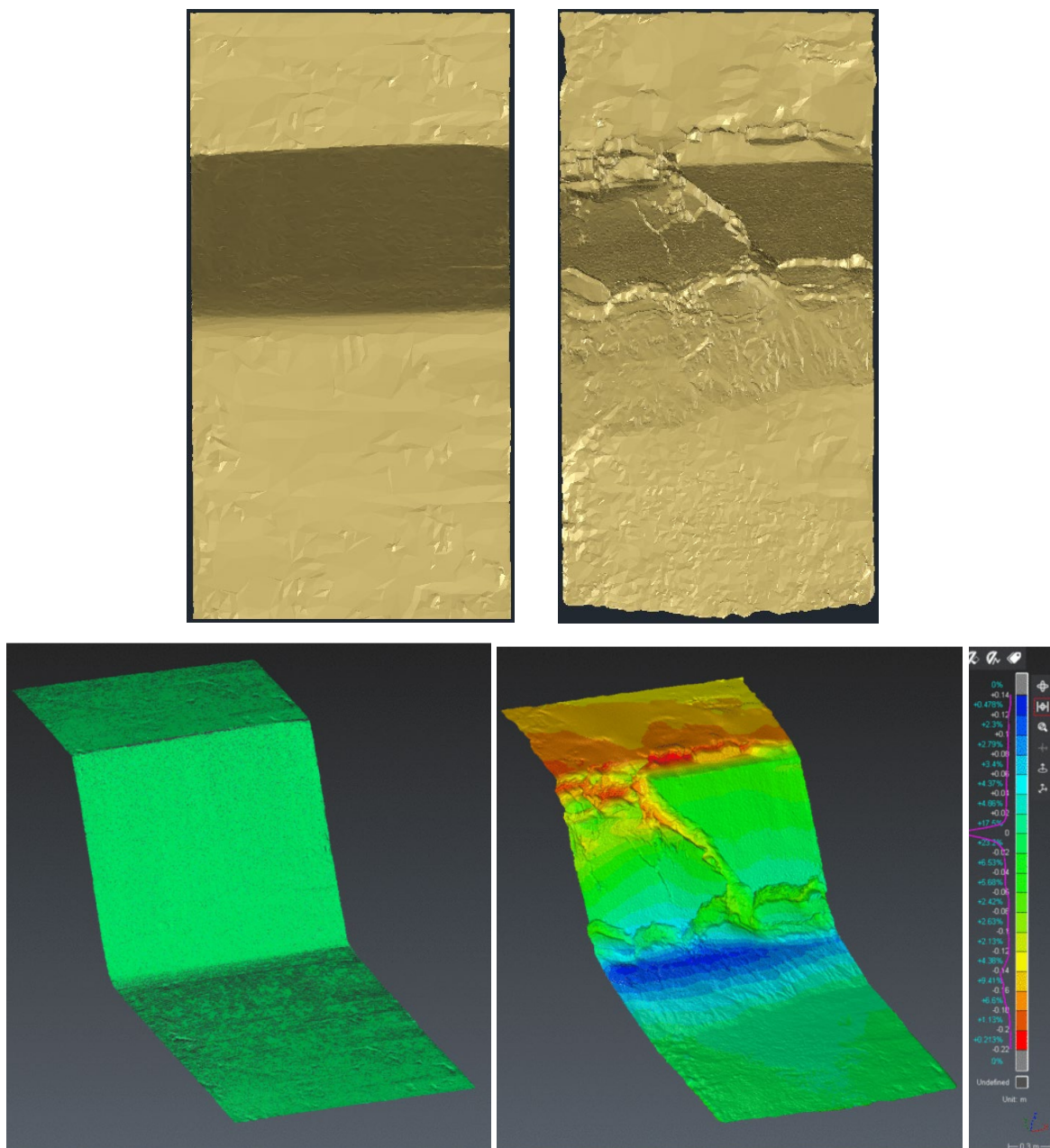


Слика 78. Промени на тотален почвен притисок за времетраење на тестот (врнежи)

Промените на ефективниот ги следат промените на тоталниот и порниот притисок.

4.1.6. Мерење на деформациите

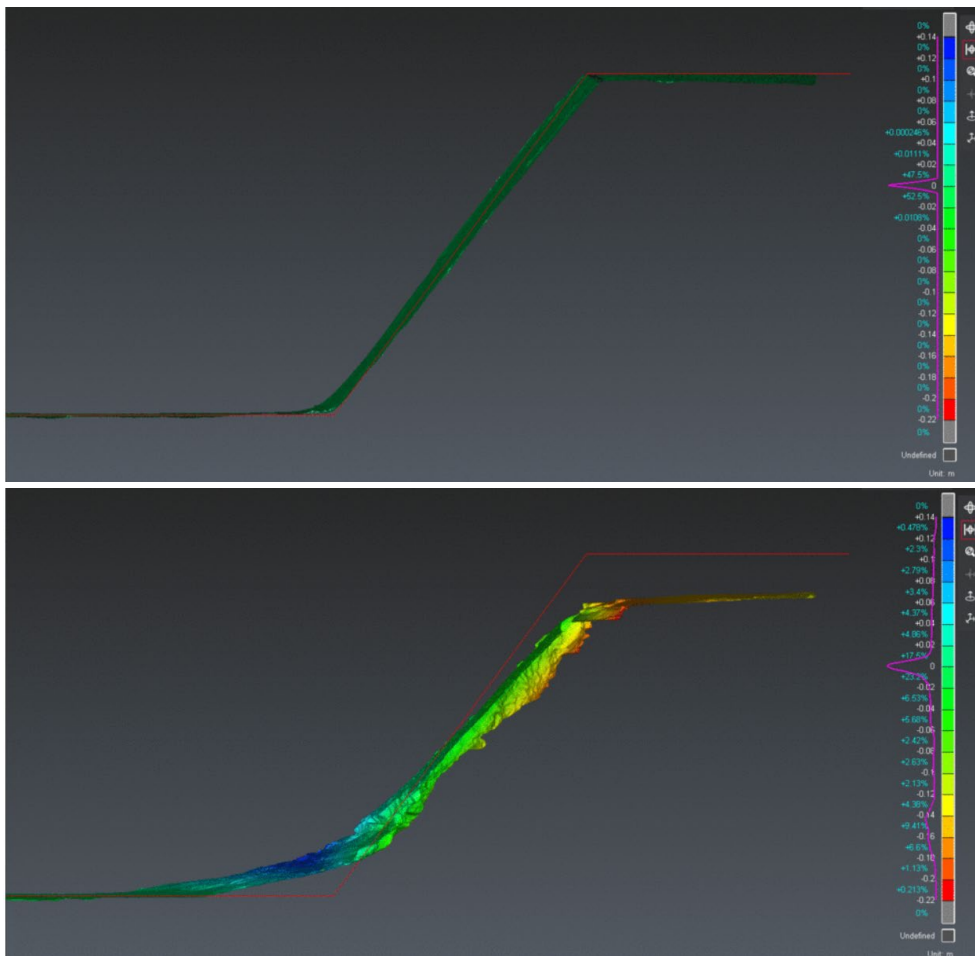
Поместувањата односно деформациите на косината беа набљудувани површински со помош на два ласерски скенера (Leica ScanStation) во 20 серии мерења за време на тестот, вклучувајќи ја и почетната. Како резултат се добива 3D слика составена од облак од точки. Резултатите се презентираат визуелно и дијаграмски. На следните фотографии е прикажана состојбата на косината пред (нулта серија) и по тестот (серија 20).



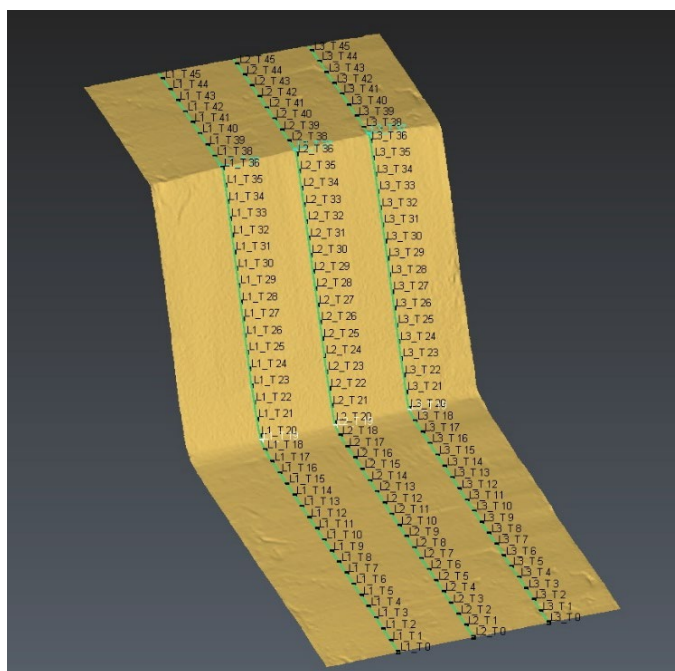
Слика 79. 3D приказ на косината пред и по испитувањето (поглед од горе и странично)

Се забележува дека максималните деформации се јавуваат на круната во горниот дел на косината (чело) во вид на челна и тензиона пукнатина и поместувања, во најголем дел вертикални (слегања по z оска), додека во ножицата е забележано таложење на материјалот, мал дел еродиран од косината и поголем дел како резултат на внатрешно измивање преку пукнатини.

На следните слики е прикажан страничен поглед (пресек) на моделот со приказ на геометријата пред и по врнежите.



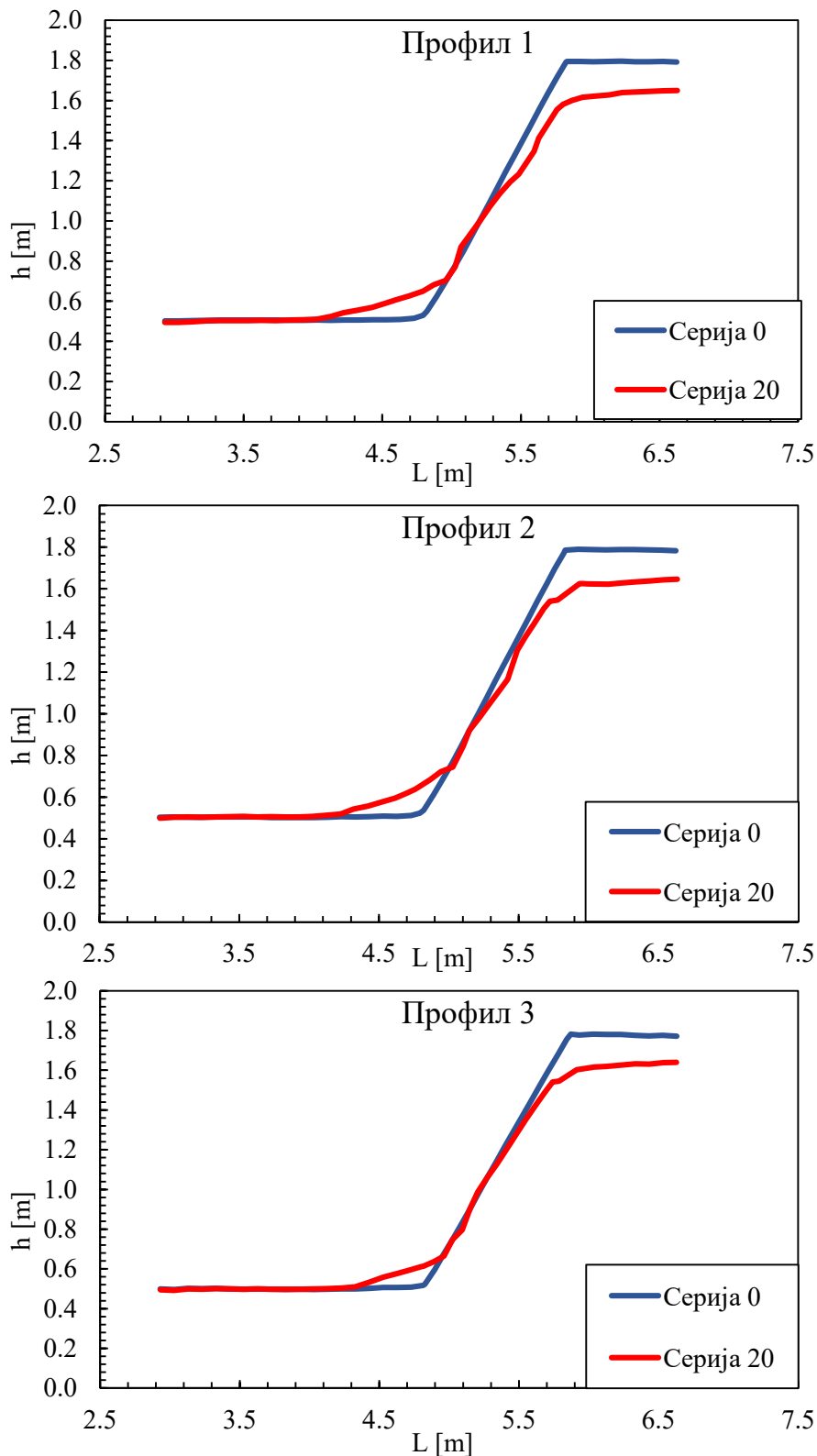
Слика 80. Страничен поглед на косината пред (горе) и по испитувањето (долу)



Слика 81. Издвоени профили и точки за анализа на деформации

За дијаграмски приказ на деформациите, дефинирани се карактеристични пресеци и точки за анализа. Во овој случај издвоени се три попречни профили (L1, L2 и L3) на меѓусебно растојание од 0.5 m со по 46 точки (T0 - T45) прикажани на слика 81.

Резултатите можат да се прикажат во вид на профил во координатен систем у-z како разлика помеѓу почетната и крајната состојба.



Слика 82. Деформации во у-z рамнината во трите анализирани профили

Следната табела ги дава максималните вертикални поместувања, регистрирани со последната серија, опишани како слегање во челото и таложeње во ножицата на косината.

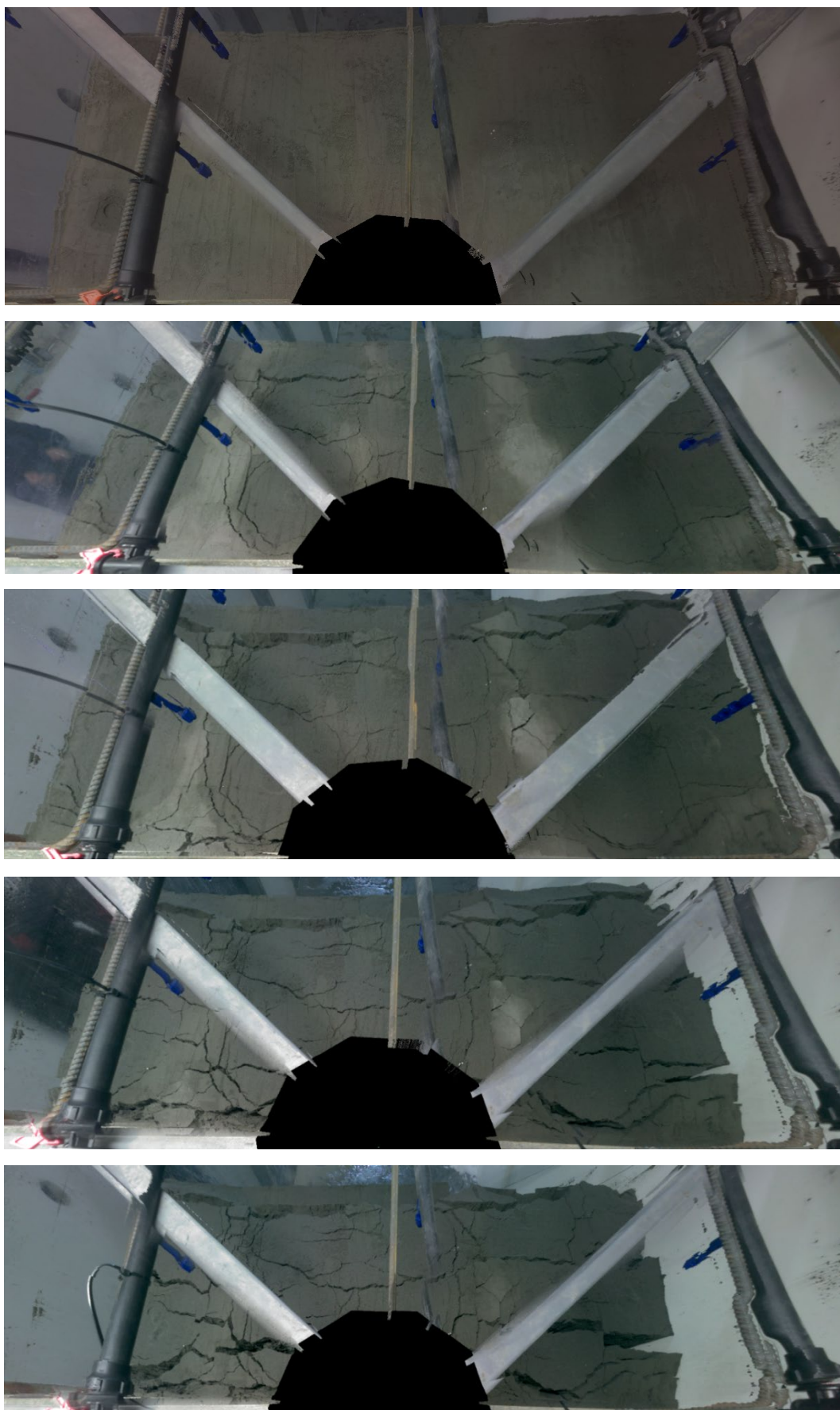
Табела 23. Табеларен приказ на вертикалните поместувања

Профил	Слегање во челото	Таложeње во ножицата
	[cm]	[cm]
1	19.27	11.26
2	16.51	11.38
3	17.81	9.35

Максималното слегање на челото на косината од 19.27 cm се јавува кај профил 1, додека максималното наталожување на материјал во ножицата во износ од 11.38 cm се јавува кај профил 2.

Деформациите беа набљудувани со еден скенер поставен фронтално, другиот над косината. Оној над косината (од правец на аплицирање на дождот) има можност да снима фотографии за време на снимањето, овде искористени за визуелно набљудување на развојот на пукнатини на круната на косината. На следната слика се прикажани неколку фотографии снимени со скенерот над косината во различни временски периоди за време на тестот (0, 75, 190, 375 и 575 минути од почетокот на тестот).

Појавата на пукнатини се случува уште во првиот час од испитувањето. Мрежата од пукнатини формирана на круната се должи на директното влијание од прскалките при што материјалот каде паѓа водата ја зголемува својата влажност и почнува да слегнува.



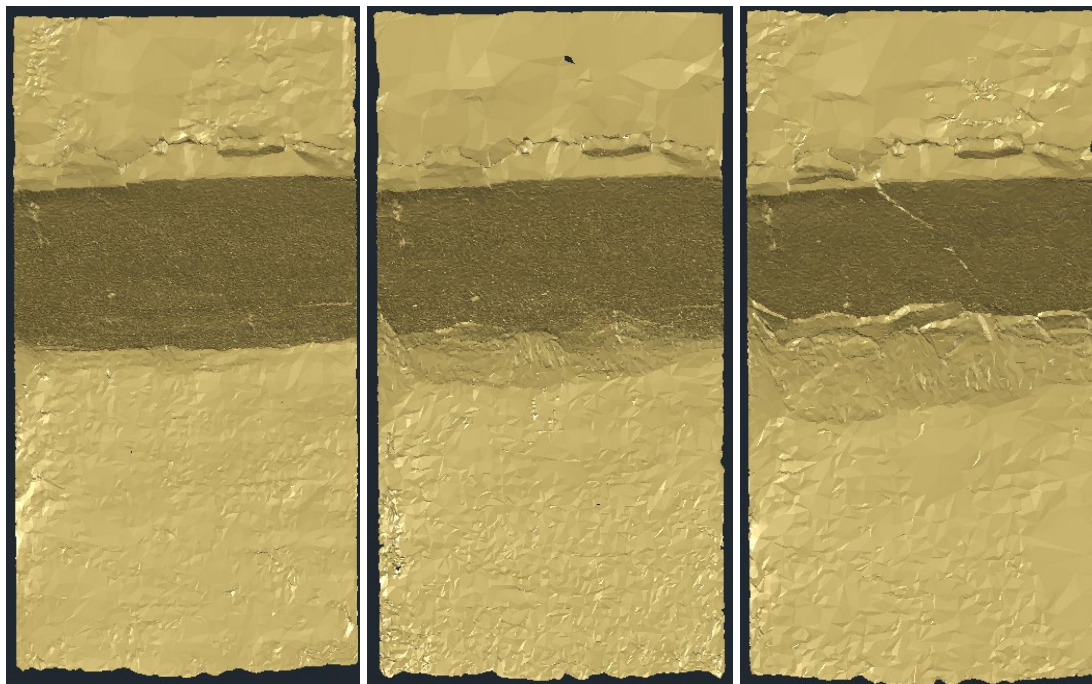
Слика 83. Развој на деформации на круната на косината (приказ од скенер над косината)

Значителна пукнатина се забележува по 75 минути од почетокот на тестот на 10-25 cm од круната на косината, по целата нејзина ширина. Ова може да се смета како иницијална и челна пукнатина која го дефинира почетокот на формирањето на рамнина на лизгање.



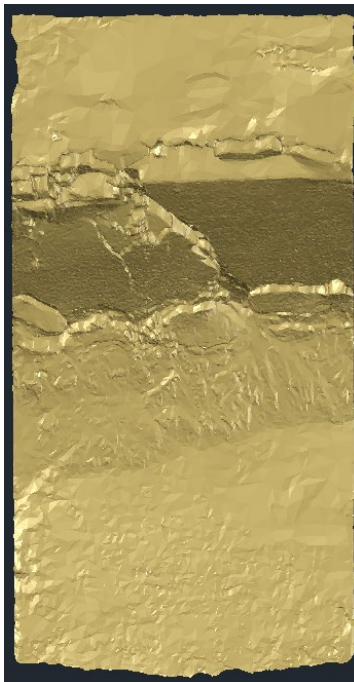
Слика 84. Местоположба на челна пукнатина

За време од 410 минути (серија 16) од почетокот на тестот, во ножицата на косината се јавува проток на вода од внатрешноста на косината што за време од 95 минути (серија 18) предизвика значителна суфозија на материјалот и негово наталожување во ножицата, што продолжи до крајот на тестот. Освен тоа, податоците од серија 18 покажуваат почеток и развој на тензиони пукнатини во ножицата и прогресивен лом на косината. На следната слика е даден визуелен приказ на тие ефекти (серија 16, 18 и 19) чија разлика во времетраење на врнежите е 130 минути.



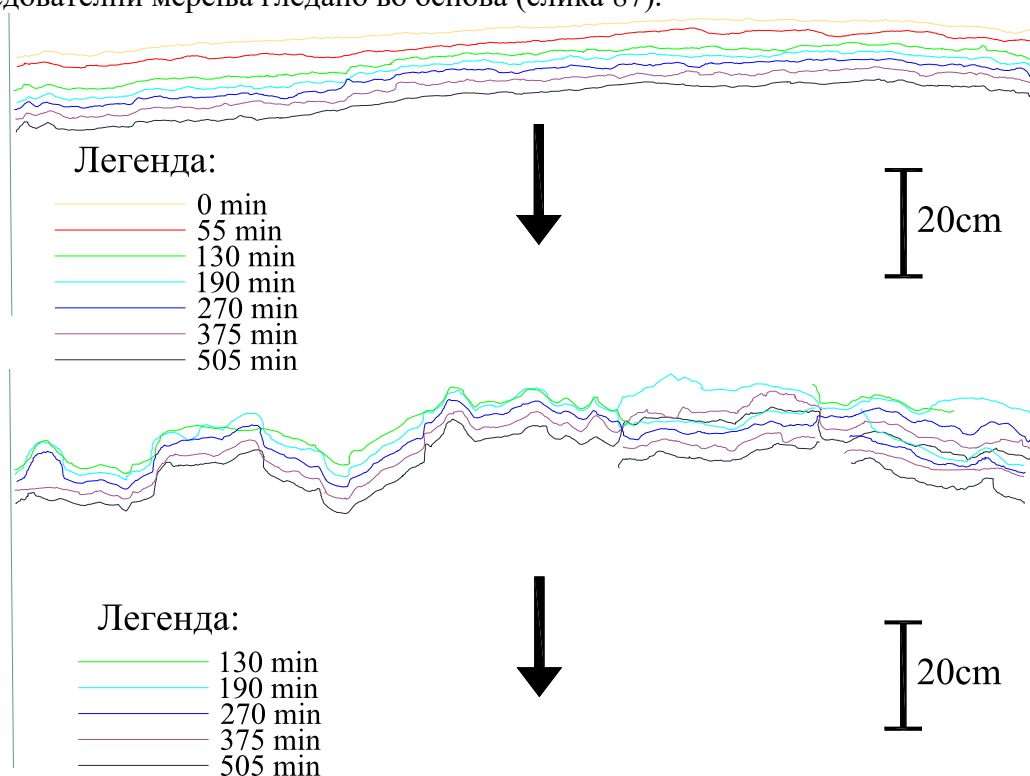
Слика 85. Суфозија и прогресивен лом на косина (серија 16, 18 и 19)

На последната снимка е прикажана состојбата на косината по лом кој беше инициран од врнежите и појавата на пукнатини, формирањето филтрација и појава на суфозија што повлекува пукнатини и настанување на прогресивниот лом на косината.



Слика 86. Состојба на косина по лом

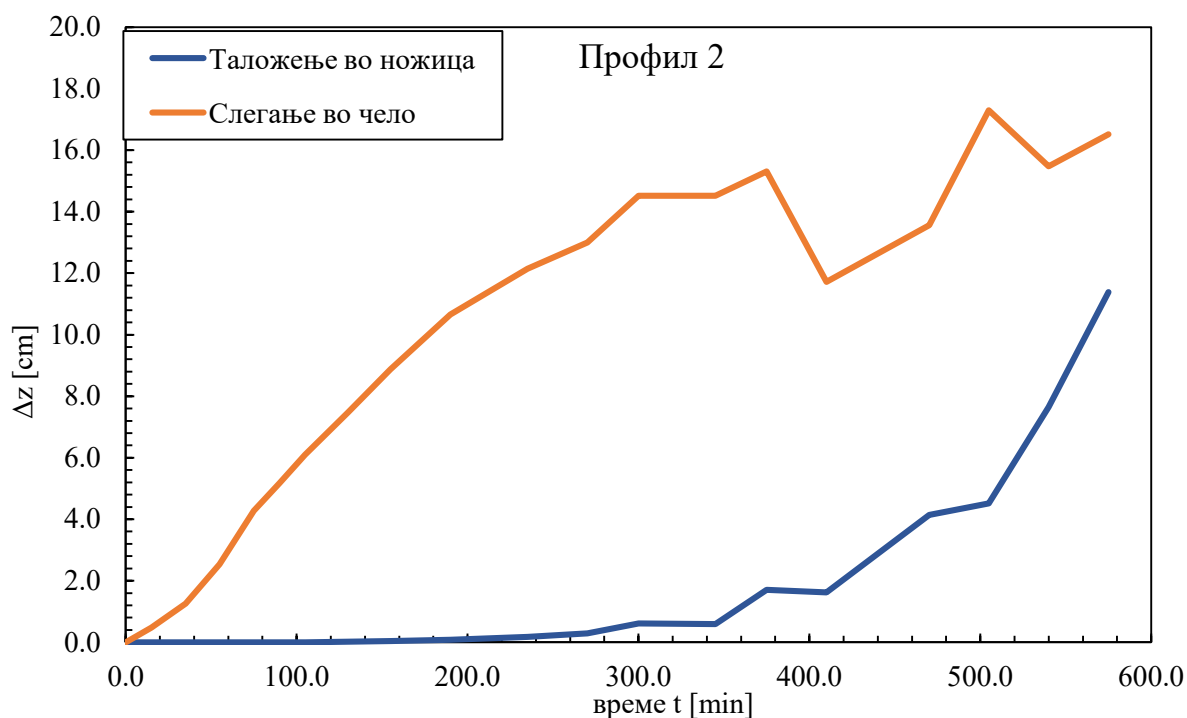
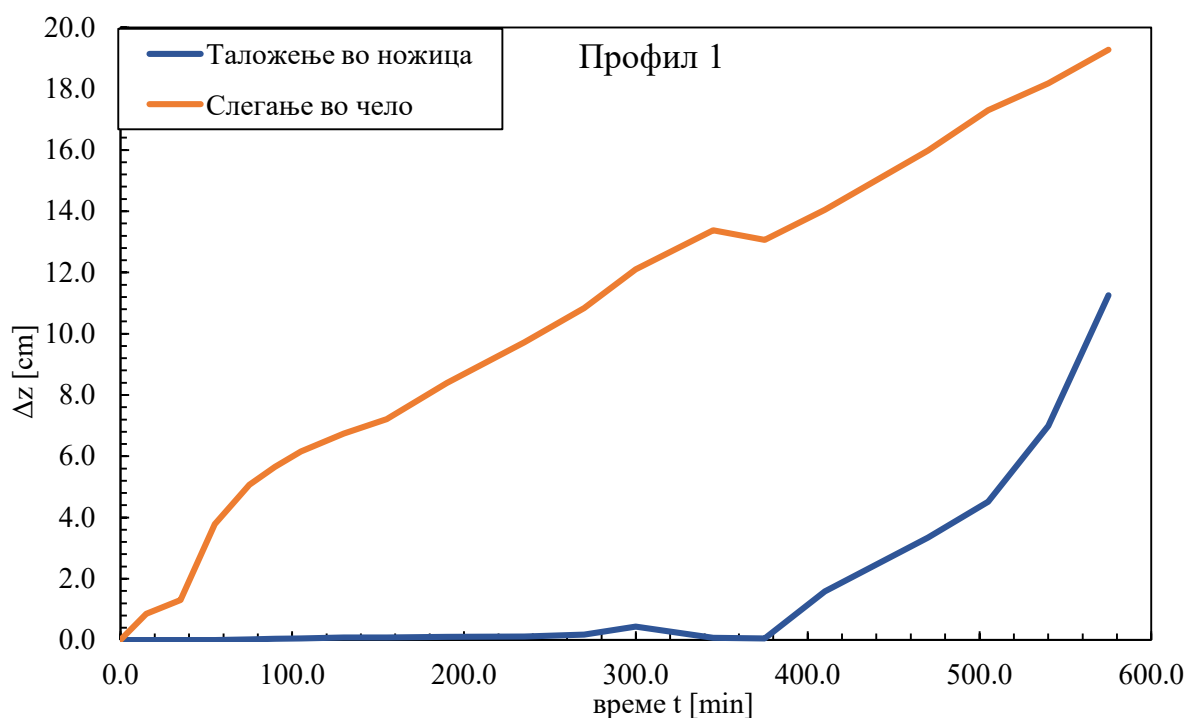
Развојот на деформациите во тек на време е значаен параметар и показател за механизмот на дестабилизацијата на косината како резултат на интензивните врнежи. За таа цел, направена е анализа на податоците во смисла на разлика во деформации помеѓу неколку последователни мерења гледано во основа (слика 87).

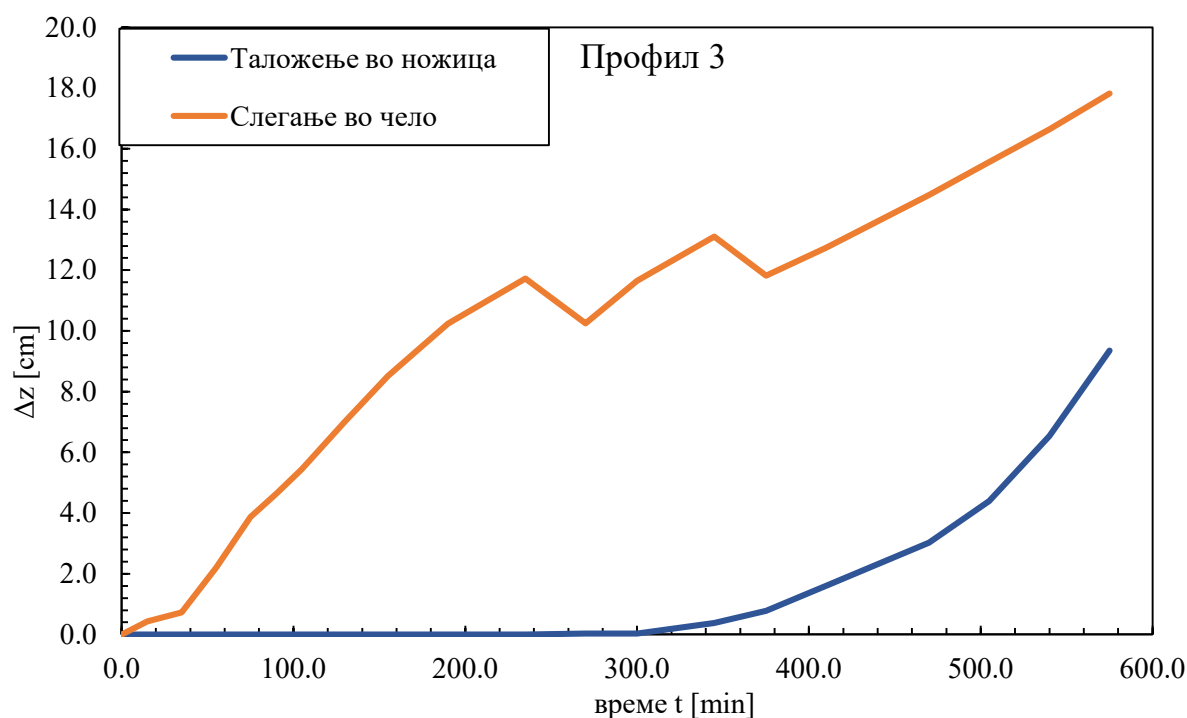


Слика 87. Местоположба на челото (ивицата) на косината (горе) и најголемата пукнатина во x-y рамнината (долу) во тек на време

Во првите 60 минути поместувањето на косината по у оска изнесува околу 2.8 cm, потоа дополнителни 2.3 cm за 70 минути, па 1.7 cm за следните 60 минути; во следниот час 1.5 cm; 2.2 cm во следните 105 минути и 2.5 cm во следните 130 минути. Вкупните поместувања во оваа насока изнесуваат од 12 до 15 cm, во зависност од локацијата, за време од 505 минути, односно пред да се случи ломот.

Прирастот на вертикалните поместувања во карактеристични точки во челото и ножицата на косината за трите разгледувани профили е прикажан дијаграмски во продолжение.





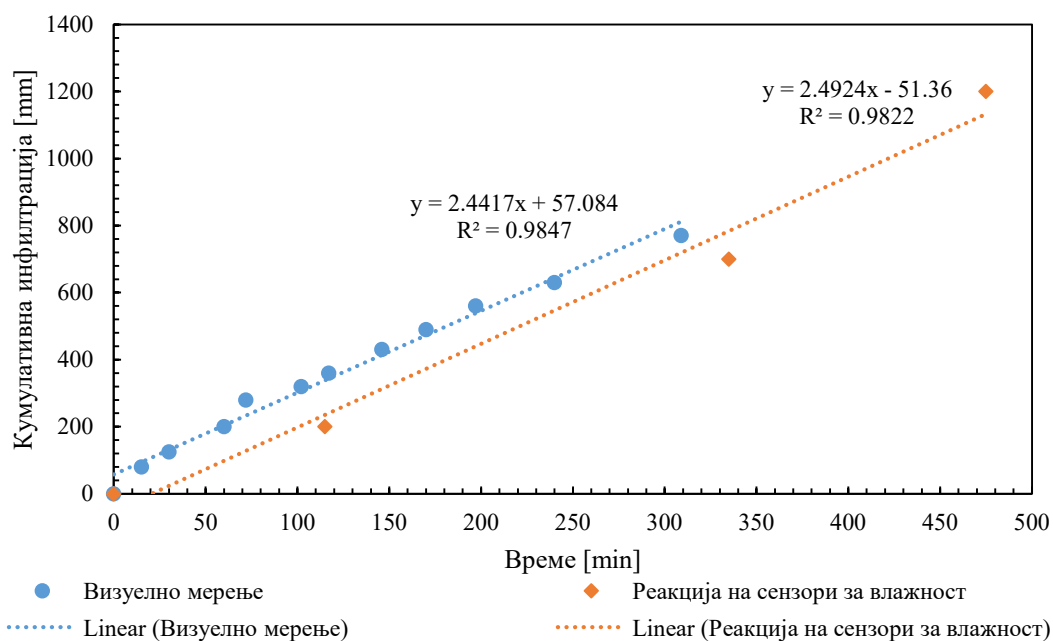
Слика 88. Прираст на вертикалните поместувања за две карактеристични точки во трите анализирани профили

Се забележува дека во првите 300 минути слегањето во челото на косината е со приближно константен прираст, по што кај профилите 2 и 3 следува одредена стабилизација поради хоризонталните деформации, повремено издигање на некои делови од косината поради појавата на секундарни пукнатини (ова особено во средината на моделот – профил 2), за да до крајот на тестот истите продолжат со константен, но намален прираст.

Протокот на вода од внатрешноста на косината предизвика значителна суфозија на материјалот и негово наталожување во ножицата, особено изразено по 400 минути од почетокот, а чиј прираст експоненцијално расте до крајот на тестот.

4.1.7. Мерење на инфилтрација

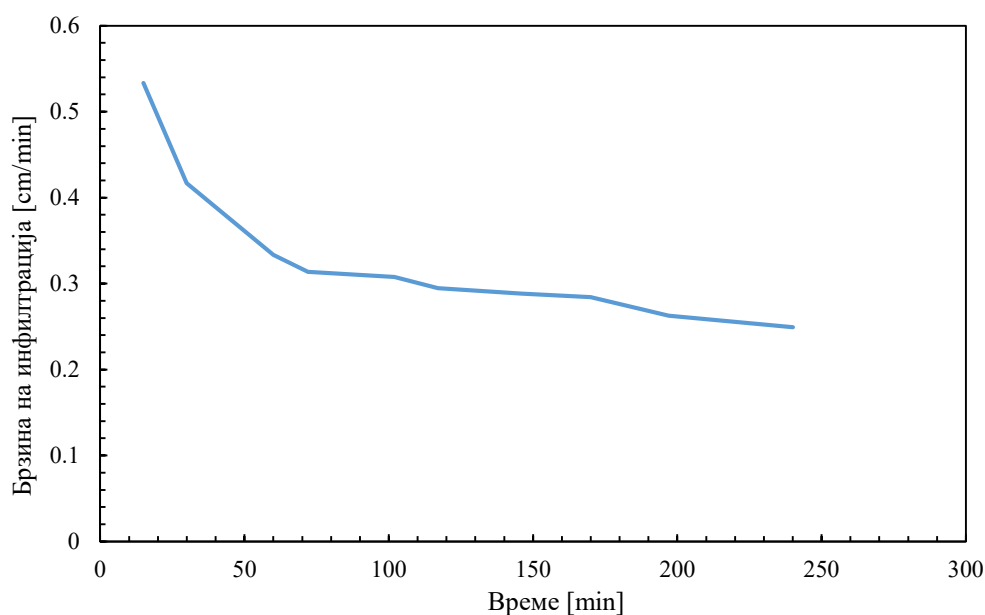
Инфилтрацијата на вода од константните врнежи беше мерена на два начина: на врвот на косината, преку транспарентната страна на моделот, и индиректно, преку времето на реакција на сензорите за мерење на влажноста кои се поставени на позната длабочина во средината на моделот. Резултатите се прикажани на следната слика како зависност на кумулативната инфилтрација (длабочина на влажен фронт) од времето на врнежи.



Слика 89. Длабочина на влажен фронт во тек на време за константен интензитет на врнежи

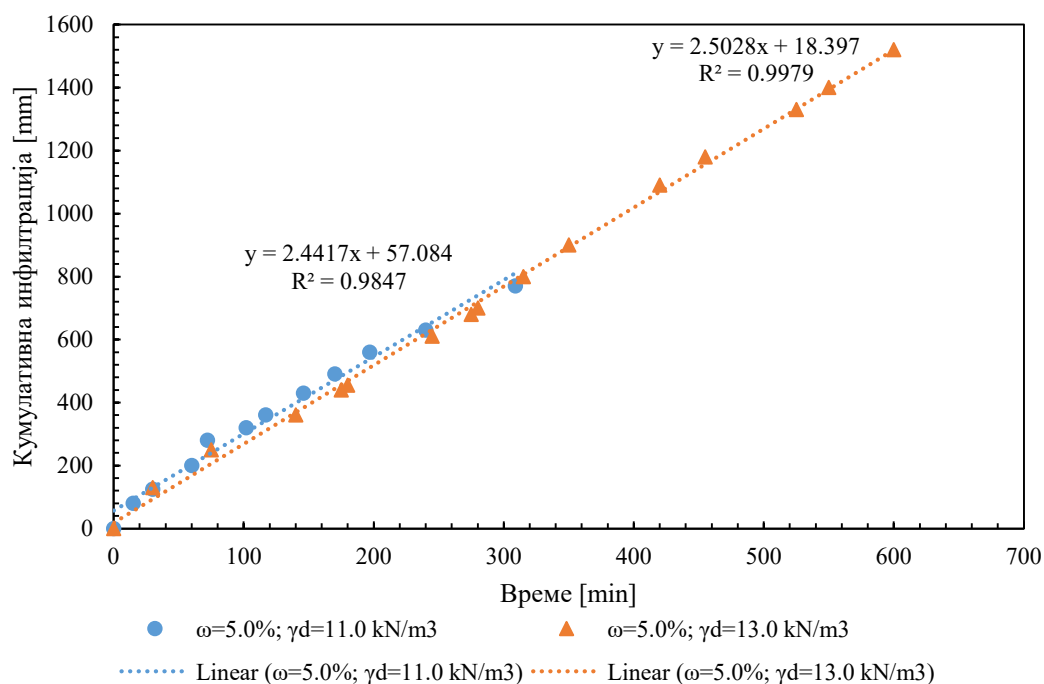
Резултатите од двете мерења покажуваат дека инфилтрацијата на вода со висока точност може да се изрази со линеарна интерполација. Прирастот е релативно сличен во двата случаја со таа разлика што со визуелното мерење на границата на моделот е забележана поголема инфилтрација поради лизгањето на водата по глатката површина на сидот од плексиглас.

На следната слика е дадена зависноста на брзината на инфилтрација во тек на тестот. Резултатите покажуваат дека брзината на инфилтрација е најголема на почетокот. Во првите 70 минути опаѓа, по што до крајот на тестот намалувањето е незначително.



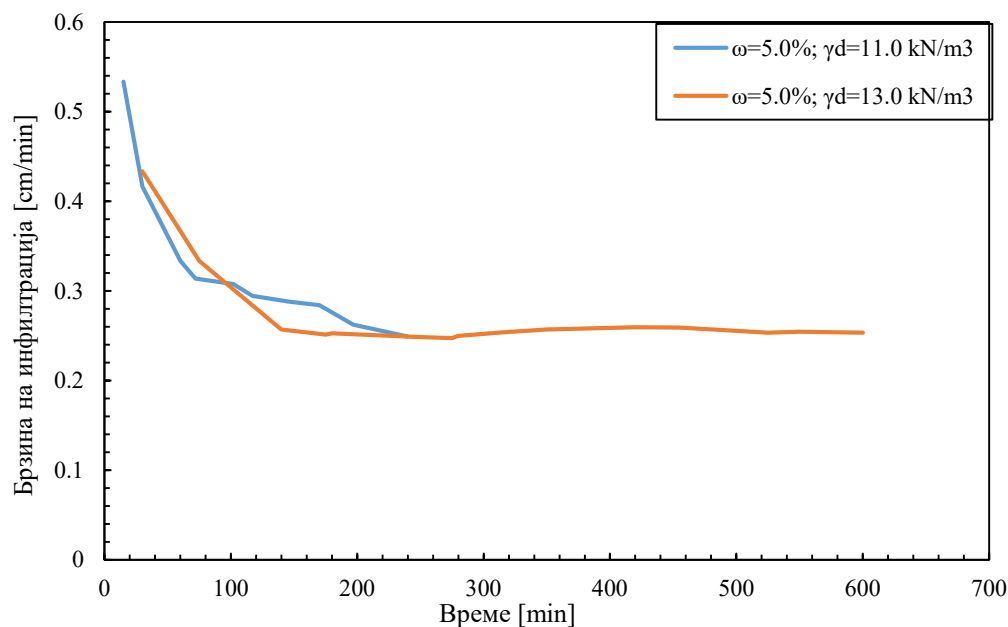
Слика 90. Зависност помеѓу брзината на инфилтрација и времето

Ефектот на инфилтрацијата од збиеноста на материјалот е согледан со споредба на резултатите од два теста на физички модели со различна почетна збиеност, а иста почетна влажност од 5.0 % кои беа направени во рамките на ова истражување.



Слика 91. Зависност на инфилтрацијата во тек на време од различни почетни збиености

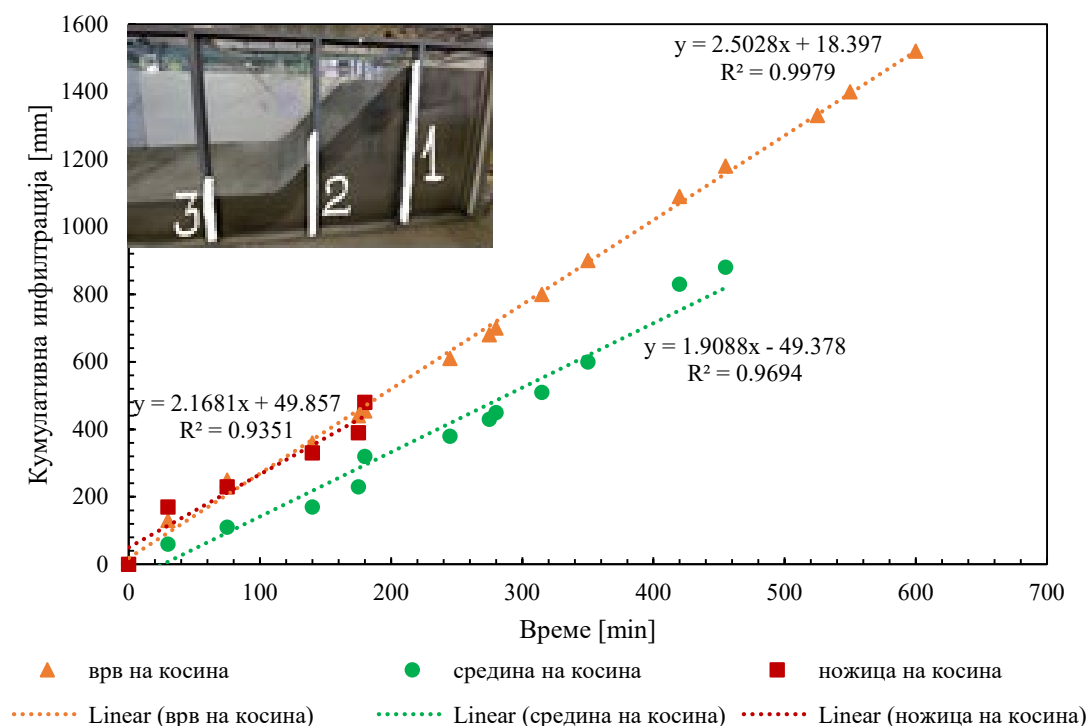
Резултатите покажуваат дека ефектот од збиеноста на материјалот врз кумулативната инфилтрација на врвот на косината изразен со линеарна интерполација е незначителен.



Слика 92. Зависност на брзината на инфилтрација во тек на време од различни почетни збиености

Слични резултати се добиени и за зависноста на брзината на инфилтрација во тек на време кога брзината незначитено се менува за различна збиеност на материјалот.

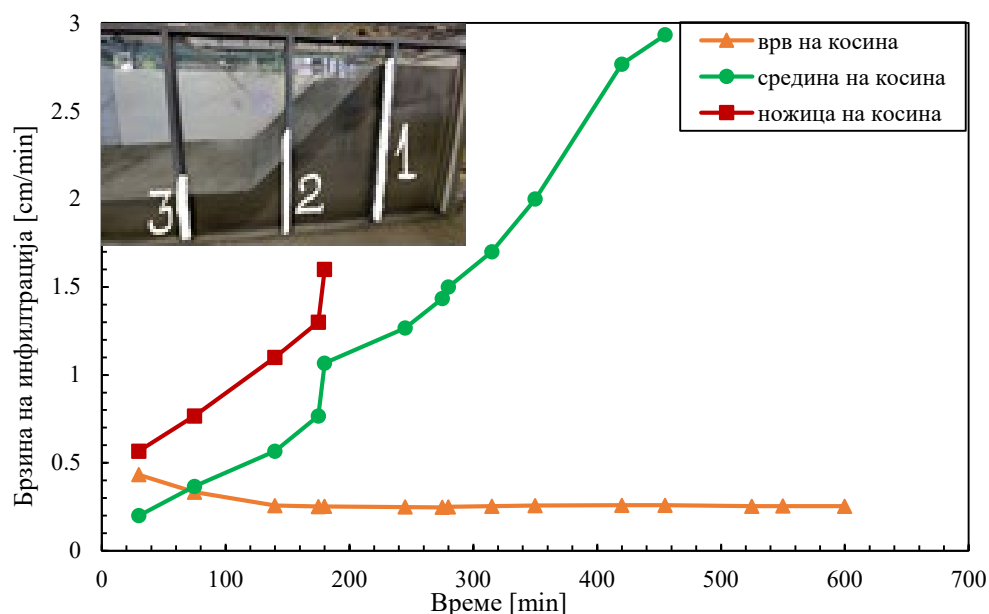
Ефектот на инфилтрација на косина е согледан преку споредба на мерењата на инфилтрацијата на неколку карактеристични профили: хоризонтална површина на врвот на косината, средина на косината и нејзината ножица.



Слика 93. Зависност на инфилтрацијата во тек на време за три пресеци

Од презентираната зависност може да се заклучи дека инфилтрацијата е иста за хоризонталните површини на врвот на косината и во ножицата, додека инфилтрацијата на самата косина е помала. Овој ефект може да се објасни со фактот дека само врнежите нормални на површината предизвикуваат инфилтрација. Вертикалната компонента на товарот од врнежи и гравитацијата предизвикуваат течење, а не го менуваат профилот на влажење по нормалниот правец на косината.

Зависноста на брзината на инфилтрација во тек на време за разгледуваните профили е прикажана на следниот дијаграм.



Слика 94. Зависност брзината на инфилтрација во тек на време за три пресеци

За разлика од хоризонталната површина на врвот на косината, брзината на инфилтрација на профилот на средината на косината значително се зголемува во текот на тестот поради дополнителното течење на водата од влијанието на гравитационите сили над профилот. Слични резултати се добиени и кај профилот 3 во близина на ножицата на косината каде имаме и влијание од инфилтрацијата по косината.

Кај сензорите поставени на иста вертикална оска (M1, M4 и M5) инфилтрацијата изнесува 1.74 mm/min кај сензорот M1, 2.09 mm/min кај сензорот M4 и 2.52 mm/min кај сензорот M5, мерено од почетокот на тестот до моментот на инфилтрација на позицијата на сензорот. Иако се очекува намалување на брзината на инфилтрација по длабочина поради збивањето на материјалот, истата се зголемува бидејќи косината слегнува, па дождот се аплицира на пониска кота во споредба со почетната у-координата на сензорот, а се зголемува и вертикалниот притисок од заситениот дел.

4.1.8. Визуелно набљудување

Однесувањето на косината за време на тестот е визуелно набљудувана, процесите се снимени и фотографирани.

По 55 минути од започнувањето на тестот, забележана е појава на пукнатина по целата ширина на моделот, видлива и во попречен пресек.



Слика 95. Појава на пукнатини по 55 минути

Делот од косината низводно од пукнатината продолжува да се движи и да слегнува со поголем интензитет, па се забележува проширување на пукнатината. На следната слика е прикажана состојбата 155 минути од почетокот на тестот.



Слика 96. Состојба на пукнатината по 155 минути

За време од 270 минути од почетокот на тестот, со зголемувањето на инфилтрацијата, забележано е проширување на пукнатината во попречниот пресек подлабоко во косината, односно во заситениот дел кој се одвојува од оној сè уште незаситен, што се манифестира со појава на секундарни пукнатини низ кој водата побрзо се движи.



Слика 97. Состојба на косината по 270 минути

Во исто време започнува појава на концентрирана филтрација при што водата продира од ножицата на косината. Со тек на време се забележува прогрес на пукнатината на врвот на косината, но и проширување на онаа 20-30 cm зад неа.

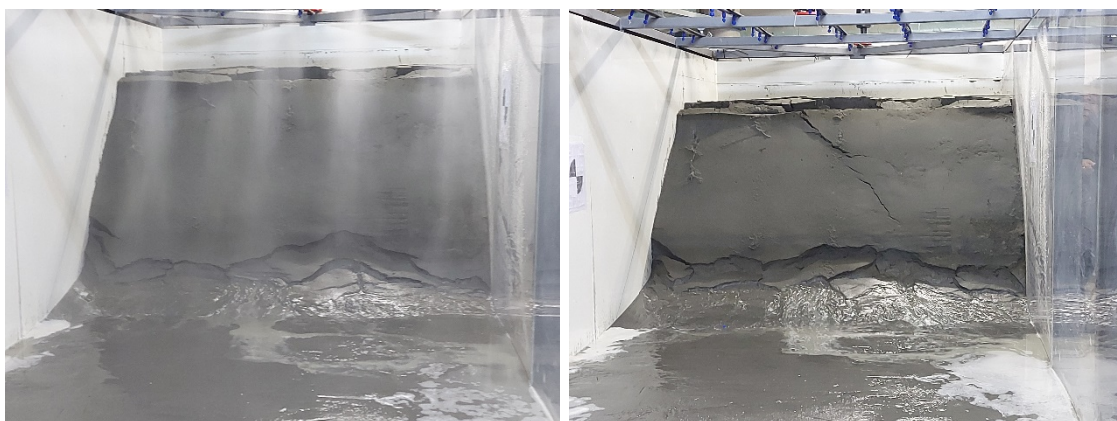


Слика 98. Состојба на ножицата на косината по 400 мин. и состојба на косината по 440 мин.

За време од 490 минути од почетокот на тестот, веќе филтрацијата е зголемена по целата ширина на косината во ножицата и започната е суфозија, наталожување на еродираниот и материјалот од внатрешноста носен од водата. Во оваа зона сукцијата е најмала со што е редуциран ефектот на привидна кохезија. По 15 минути веќе се формирани нови пукнатини кои најавуваат прогресивен лом по висината на косината, а како резултат на намалувањето на ефективниот притисок во ножицата.



Слика 99. Состојба во ножицата на косината по 490 и 505 минути



Слика 100. Состојба на ножицата на косината по 528 и 540 минути

Така ослабената ножица на косината каде се јавува интензивна филтрација, суфозија, раст на порниот притисок, допринесува до рушење и глобален лом на косината за време од 575 минути од почетокот на тестот, а како резултат на намалувањето на јакоста на смолкнување од процесот на заситување. Состојбата после ломот е прикажана на следната слика.



Слика 101. Состојба на моделот после лом

По рушењето на косината, се забележува значителна количина на наталожен водозаситен материјал кој е измиен и „тече“ од формираните пукнатини во ножицата на косината. Оттука, може да се дефинира критичната рамнина на смолкнување.

4.2. Нумеричко моделирање

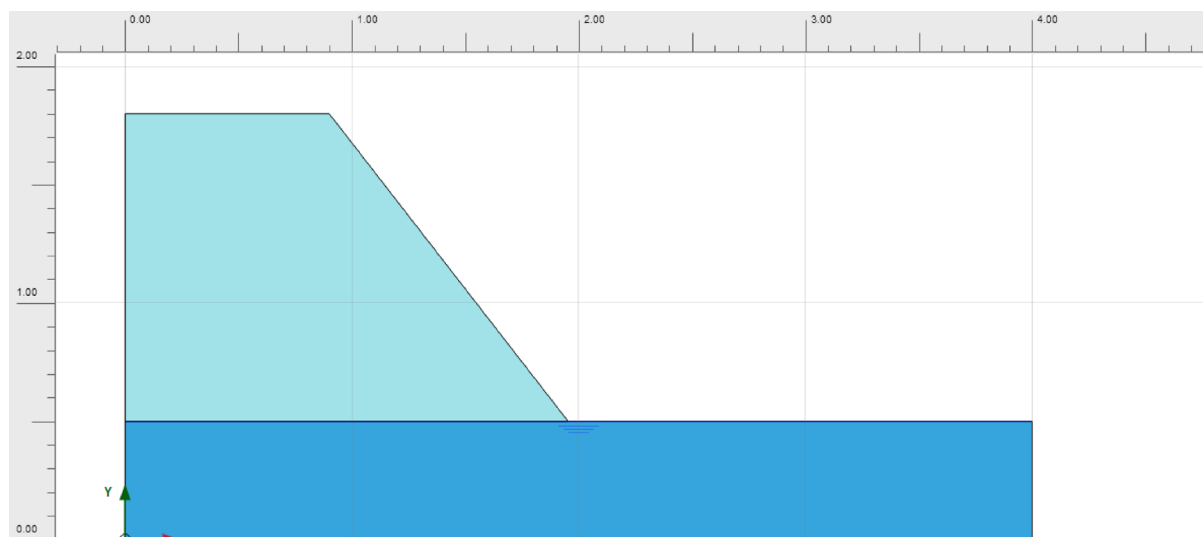
Врз основа на измерените големина при физичкото моделирање и изведениот експеримент, треба да се избере критериум по кој нумерички ќе се симулира однесувањето на незаситената почва при интеракцијата со врнежите. За да се изврши верификација на резултатите, потребно е да се споредат двата модела, а потоа да се избере и потврди конститутивен закон кој го симулира реалното однесување на почвата.

Анализата на стабилност на косини кај незаситените почви бара заедничка пресметка на деформациите и филтрацијата со временски зависни гранични услови (истовремена анализа на течење и деформации – fully coupled flow-deformation analysis) (Schweiger & Hamdhan, 2011). Врз основа на измерените вредности на карактеристиките на незаситените почви и составените зависимости, со помош на различни нумерички методи може да се изврши анализа на стабилност и напонско - деформациона анализа при различни товарни случаи. Јакоста на смолкнување на почвата може да се пресмета со концептот на ефективни напрегања на Bishop со земање предвид на сукцијата. Хидрауличните карактеристики на почвата се вклучуваат преку кривите на заситеност дополнети со параметрите на Van Genuchten. Стабилноста на косините се изразува преку фактори на сигурност со помош на редукција на параметрите на јакоста на смолкнување. Симулацијата на врнежите е можност на повеќе софтвери, како PLAXIS и CodeBright. Инфилтрацијата и развојот на сукцијата во тек на време е зависна од хидрауличките карактеристики на почвата, па за високо водопропусни материјали (песоци и чакали) се очекува значително намалување на стабилноста на косините за време на инфилтрација од врнежи.

Во ова истражување направена е нумеричка симулација на стабилност на косината од експерименталниот модел, со што се очекува да се потврди однесувањето на материјалот, кои сознанија се аплицираат на реален случај.

4.2.1. Геометрија, параметри на моделот и фази на анализа

Косината е моделирана во софтверскиот пакет PLAXIS 2D кој работи на методот на конечни елементи. Се разгледува рамнинска состојба на напрегања и деформации. Геометријата на косината во нумеричкиот модел ја следи геометријата од физичкиот модел. Имено, косината има висина од 130 cm и агол со хоризонталата од 51° . Круната има ширина од 0.9 m, додека на долниот дел моделот има висина 50 cm каде е усвоено и почетно хоризонтално ниво на подземна вода. Хоризонталниот слој под косината со висина 50 cm е збиен водозаситен песок. Косината е изградена од релативно растресит песок со мала почетна влажност, со што се симулирани услови од хидројаловиште. Геометријата е прикажана на следната слика.



Слика 102. Геометрија на нумеричкиот модел

На долната, левата и десната страна се усвоени стандардни гранични услови – спречени деформации (normal/fully fixed BC) и истекување на вода (closed BC), додека на хоризонталниот дел над косината и самата косина infiltration BC, и seepage BC во хоризонталниот дел десно од косината.

Во следната табела се поместени карактеристики на материјалите кои се користени за симулација на механичкото однесување на материјалите.

Табела 24. Механички карактеристики на материјалите

Карактеристика	Мерна единица	Збиен песок	Растресит песок
Материјален модел	[/]	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Услови на дренарање	[/]	Дренирани	Дренирани
Волуменска тежина во природна состојба γ_{unsat}	[kN/m ³]	18.20	11.50
Волуменска тежина во заситена состојба γ_{sat}	[kN/m ³]	18.20	14.95
Почетен коефициент на порозност e_{init}	[/]	0.85	1.50
Едометарски модул на стисливост E_{oed}	[kN/m ²]	2700	900
Поасонов коефициент ν	[/]	0.3	0.3
Кохезија c'	[kN/m ²]	0.05	0.72
Агол на внатрешно триење ϕ'	[°]	30	30
Агол на дилатанција ψ	[°]	0	0
Содржина на материјал помал од 2.0 μm	[%]	10	10
Содржина на материјал помеѓу 2.0 и 50.0 μm	[%]	13	13
Содржина на материјал помеѓу 50.0 μm и 2.0 mm	[%]	77	77

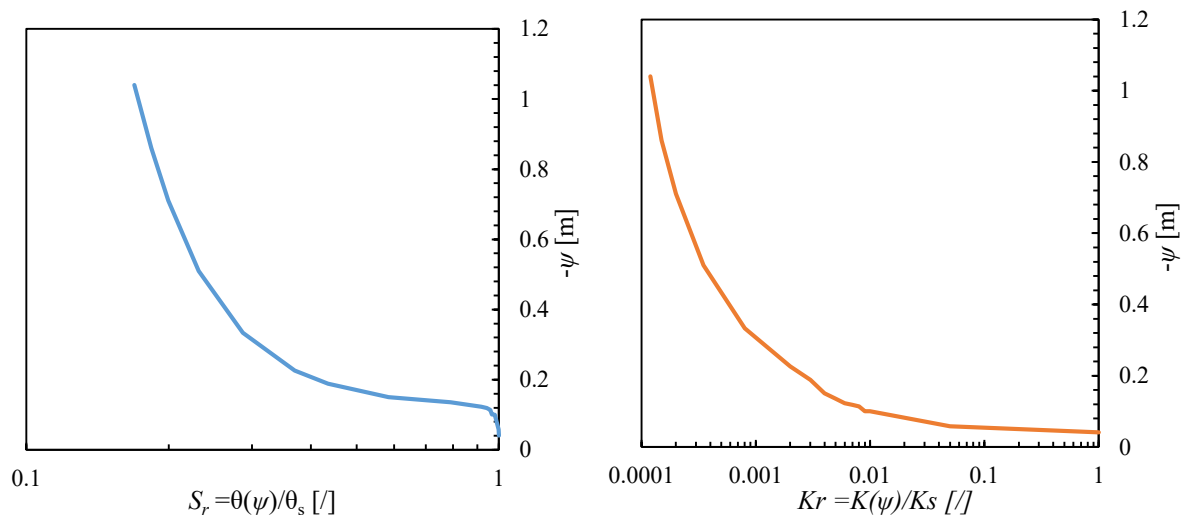
За симулирање на хидрауличкото однесување на материјалите добиени се резултати од претходни испитувања кои се поместени во следната табела.

Табела 25. Хидраулички карактеристики на материјалите

Карактеристика	Мерна единица	Збиен песок	Растресит песок
Хидраулички модел	[/]	User-defined Saturated	User-defined Spline
Коефициент на водопропусност во заситени услови k_{sat}	[m/s]	3.2×10^{-4}	3.2×10^{-4}
Резидуален степен на заситеност S_{res}	[/]	0.024	0.024
Максимален степен на заситеност S_{sat}	[/]	1.0	1.0

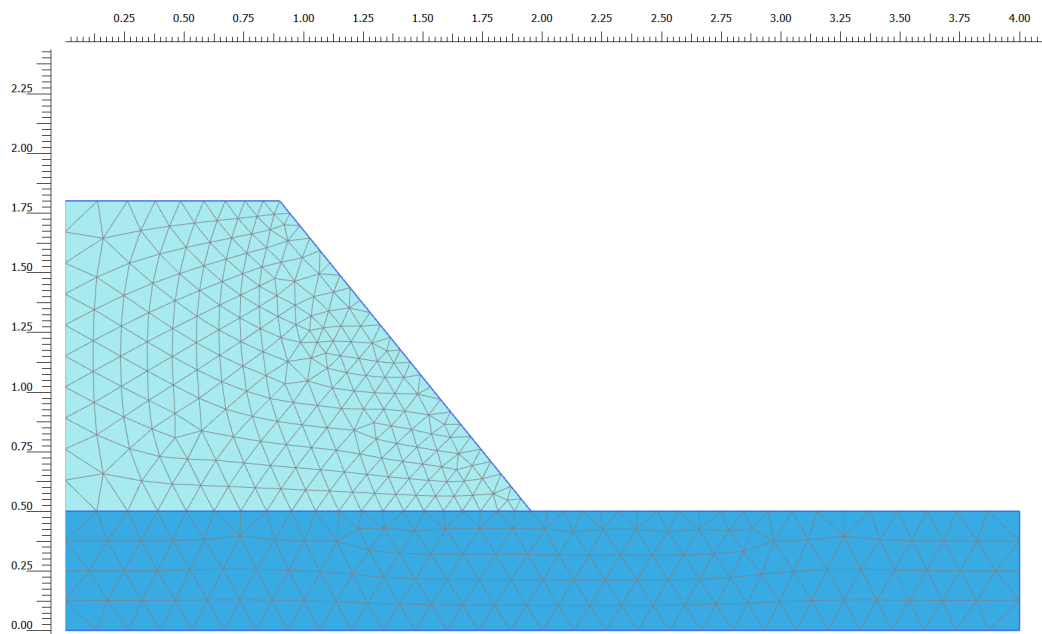
Функциите на незаситените хидраулички карактеристики за растресит песок се зададени преку опцијата user-defined модел со директно внесување на вредности во табела со опцијата Spline, по што Plaxis ја исцртува зависноста на двете главни хидраулични функции: степен на заситеност (S_r) – сукција (ψ) и релативна хидраулична спроводливост (K_r) – сукција (ψ). Нивната зависност е мерена со помош на Huprop и сензорите во физичкиот модел.

Поради тоа што PLAXIS предвидува линеарен развој на почетната сукција по висина, ограничена е можноста за дефинирање на измерената почетна сукција од физичкиот модел. Оттука, симулирањето на сукцијата во нумеричкиот модел е спроведена преку зависноста на сукцијата ψ [m] и степенот на заситеност S_r [/] криви кои се прикажани на слика 103, според која во секој чекор од пресметката се дефинира степенот на заситеност S_r [/] и релативната хидраулична спроводливост K_r [/] во зависност од измерената сукција ψ [m].



Слика 103. Усвоени функции за моделирање на хидрауличкото однесување на незаситениот растресит песок во PLAXIS

На следната слика е прикажана генерираната мрежа на триаголни конечни елементи со кои е дискретизиран моделот.



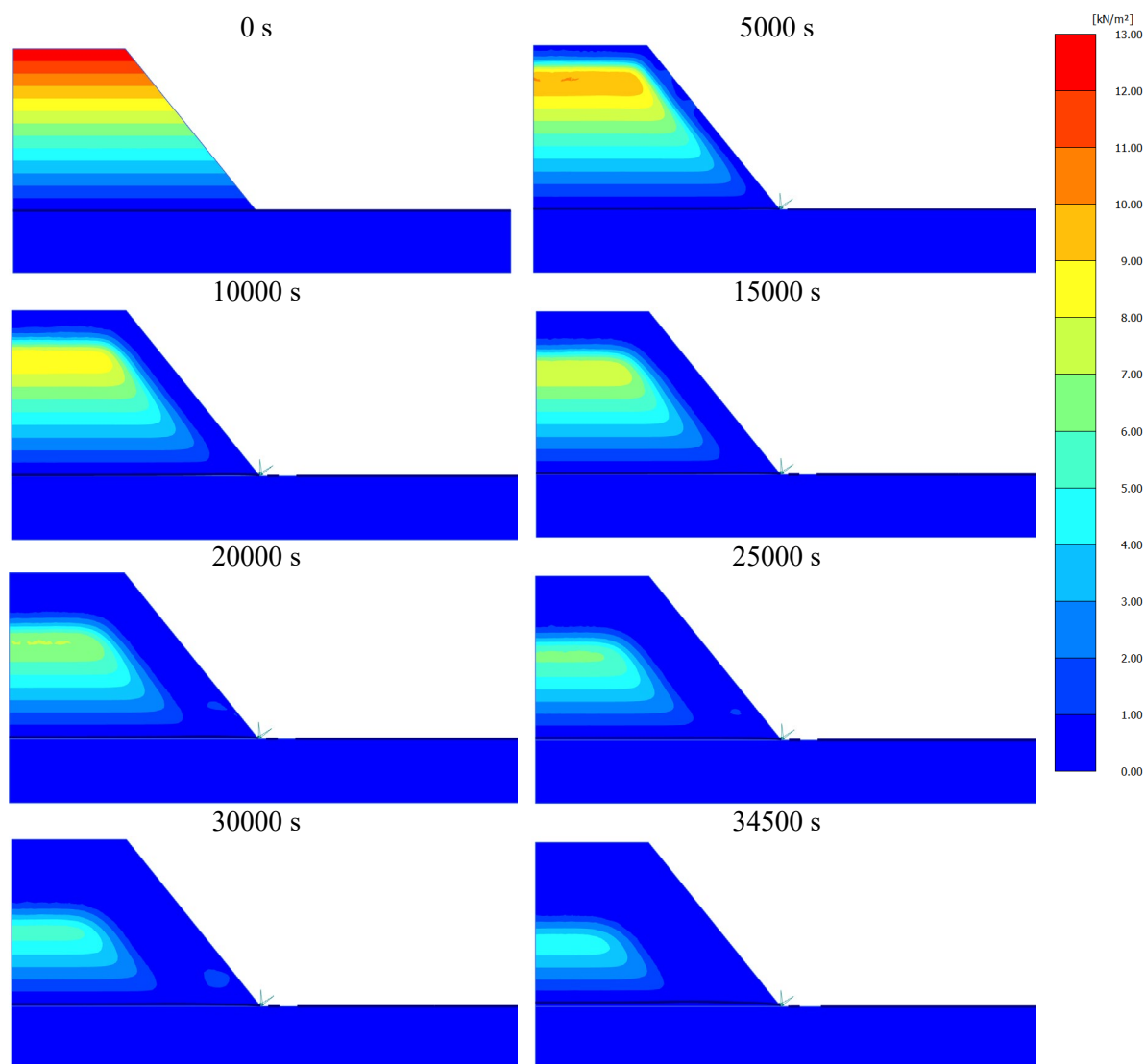
Слика 104. Дискретизација на моделот со конечни елементи

Анализата е извршена во неколку последователни фази и тоа:

- Иницијална фаза (Gravity loading) за симулирање на почетната распределба на напрегања и порни притисоци.
- Заедничка хидромеханичка анализа на течење и деформации во функција од времето (Fully coupled flow-deformation analysis). Оваа анализа вклучува инфилтрација од константни врнежи од 9.6×10^{-6} m/s преку границите на моделот дефинирани со максималната инфилтрација еднаква на интензитетот на врнежите. Аплицирано е времето на траење на врнежите од физичкиот модел од 34 500 секунди.
- Фактор на сигурност (Safety) преку редукција на јакосните параметри на почвата.

4.2.2. Резултати од нумеричката анализа

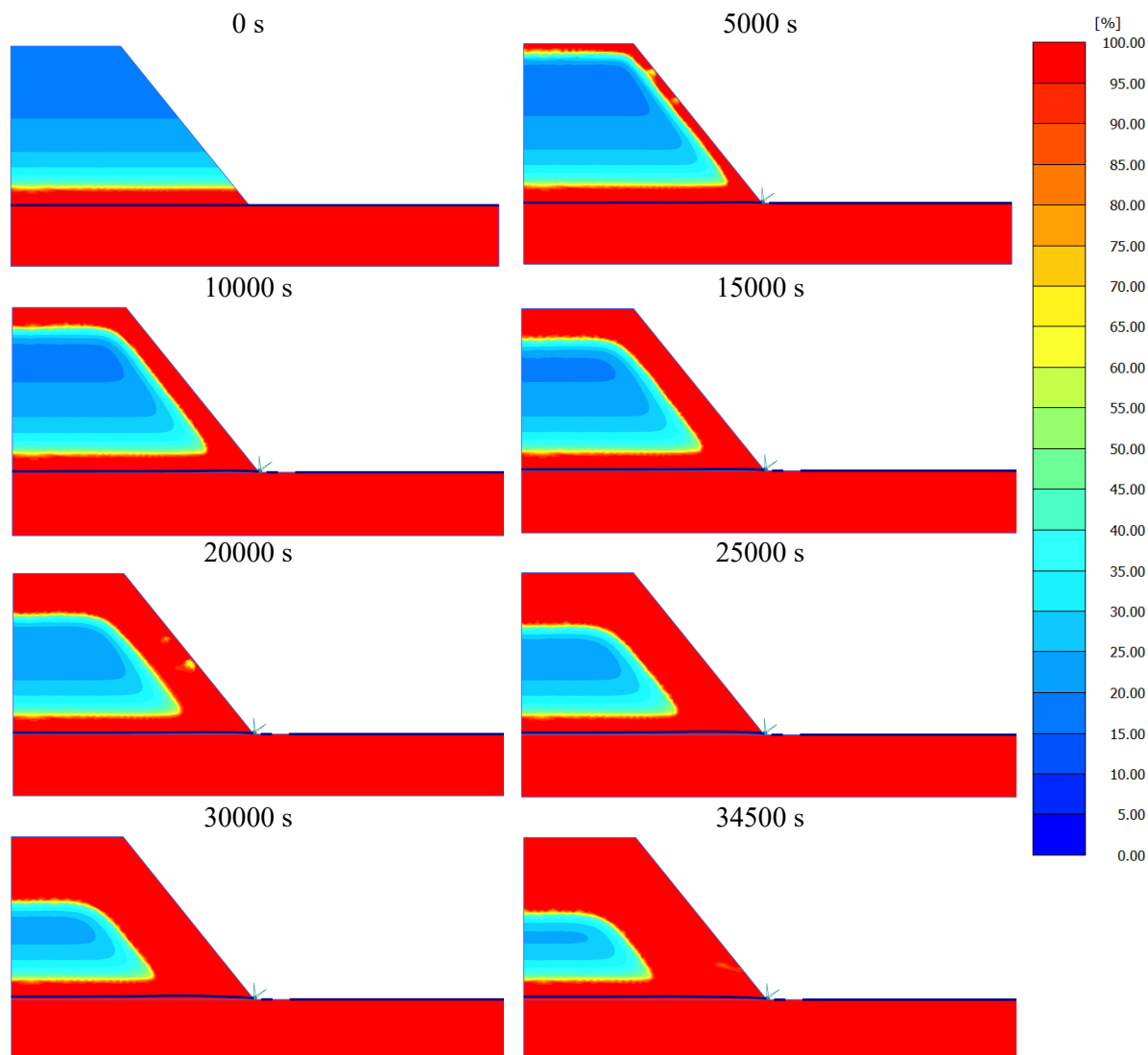
Во продолжение се прикажани резултатите од спроведената анализа во функција од времето. Како поважни параметри при вакви анализи се издвоени: промената на сукцијата, заситеноста, порниот притисок, порниот надпритисок, деформациите, појава на пластични точки и точки на затегнување и вкупен девијатор на дилатации.



Слика 105. Промена на сукцијата во тек на време

Од дијаграмот на сукцијата за различно време на тестот може да се заклучи дека максималната сукција во иницијалната фаза на анализа изнесува 13 kPa и се јавува на врвот на косината, додека за време на врнежите истата се намалува до најмногу 4.64 kPa некаде над подигнатото ниво на подземна вода. Сукцијата е поврзана со степенот на заситеност S_r преку дефинираната функција. Брзината на заситувањето е во функција од интензитетот на врнежите, пропусноста на хидрауличната граница и хидрауличната спроводливост на почвата зависна од сукцијата.

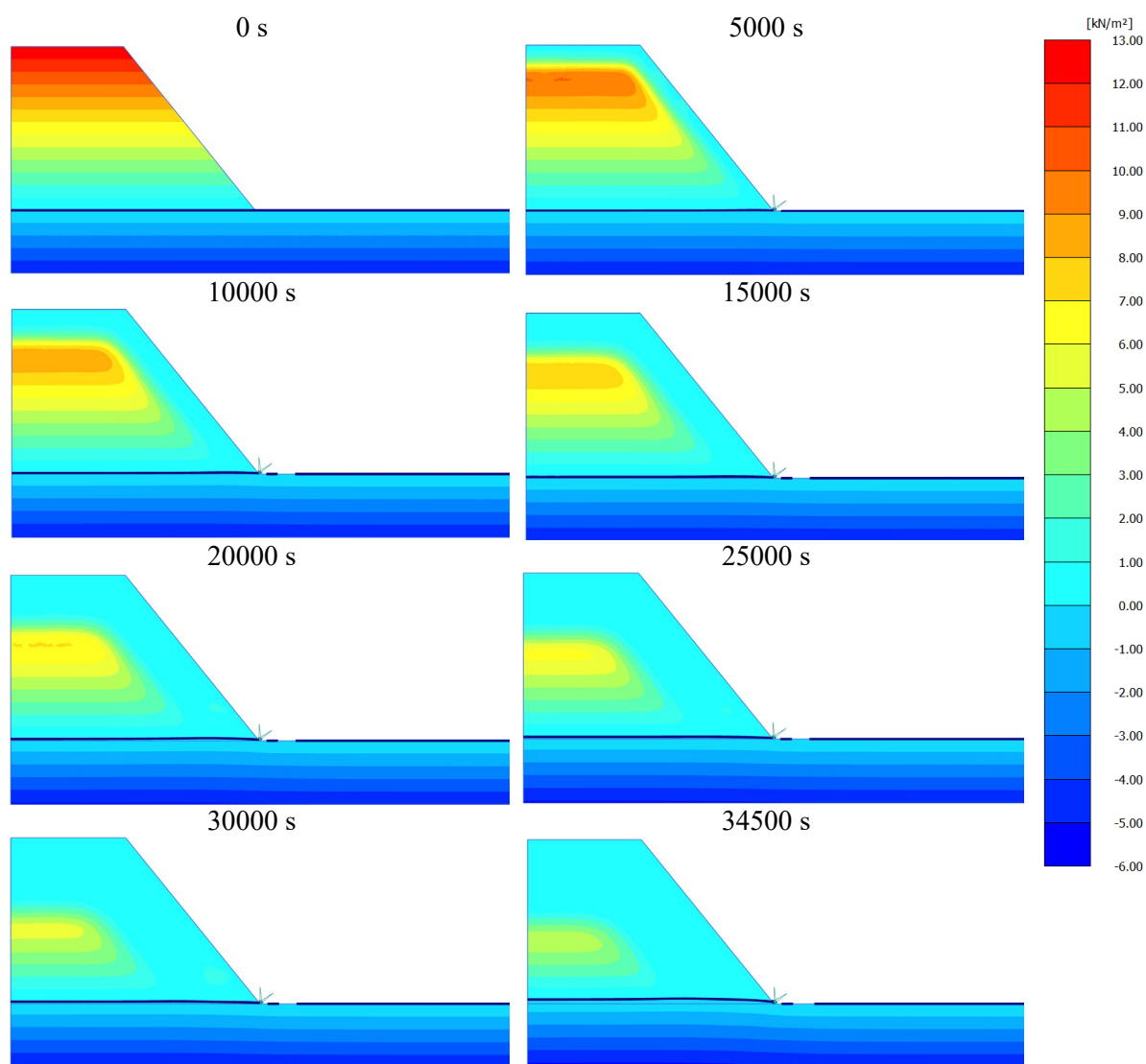
На следната слика е прикажана состојбата на заситеност во нумеричкиот модел на косината во тек на време:



Слика 106. Промена на степен на заситеност S_r во тек на време

Промената на степенот на заситеност започнува веднаш по аплицирањето на врнежите како резултат на инфилтрацијата. Минималниот почетен степен на заситеност на врвот на косината изнесува 16.89 %. Со зголемување на инфилтрацијата, незаситената зона се намалува и одговара на онаа од физичкиот модел. На крајот на тестот, минималниот степен на заситеност во нумеричкиот модел изнесува 24.2 %.

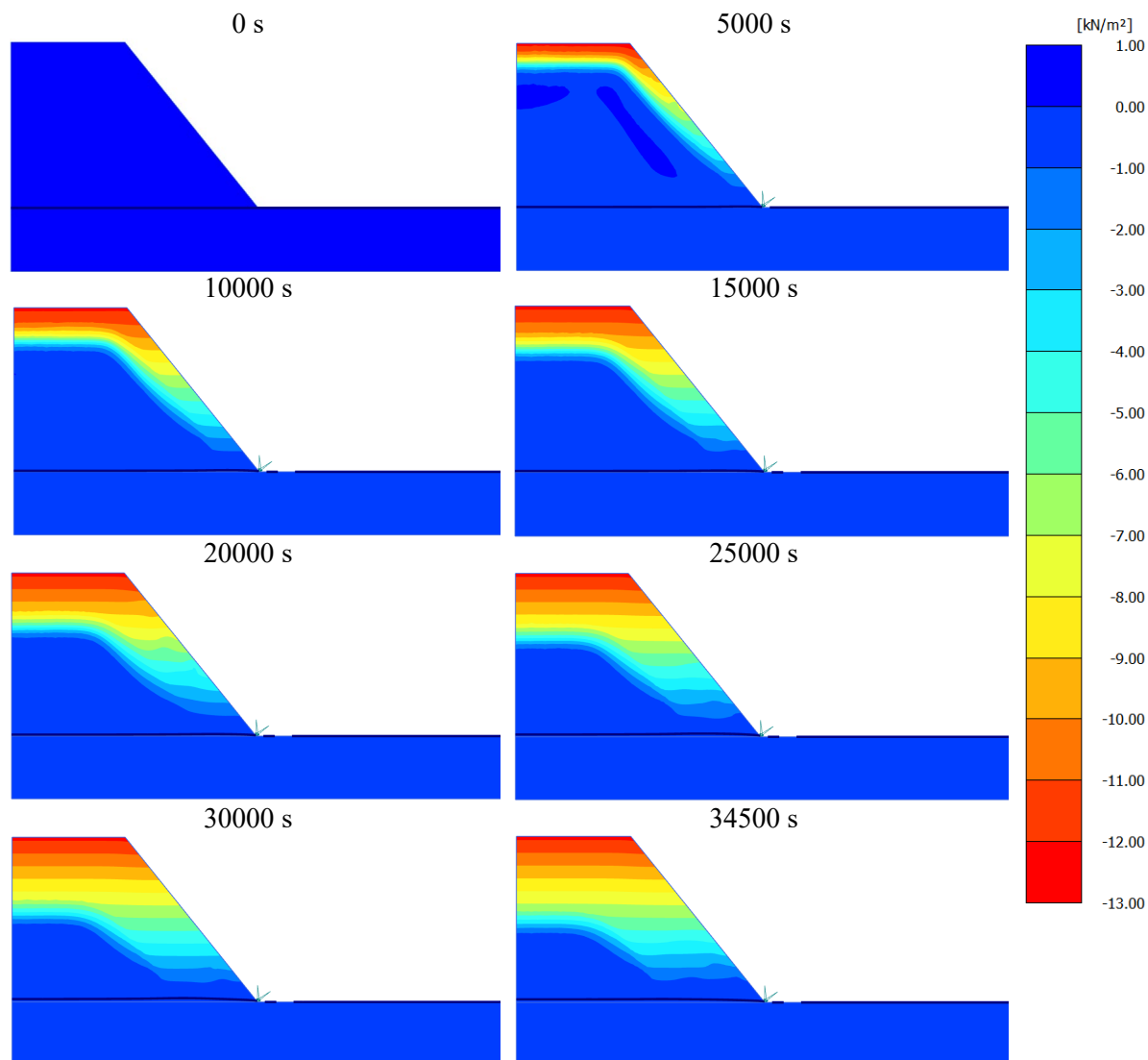
Дистрибуцијата на порниот воден притисок е прикажана на следната слика.



Слика 107. Промена на порниот воден притисок во тек на време

Од дијаграмот на порен притисок за фазите на анализа може да се заклучи дека максималната вредност во иницијалната фаза на анализа изнесува 5.00 kPa, односно 0.5 m воден столб под нивото на подземна вода. Позитивната вредност на врвот на косината од 13 kPa ја означува сукцијата (1.3 m) како линеарен развој над нивото на подземна вода. За време на врнежите порниот воден притисок благо расте на дното на моделот и достигнува максимална вредност од 5.35 kPa. Во косината сукцијата се намалува до најмногу 4.64 kPa, иако поголемиот дел од косината е заситен и со сукција еднаква на нула.

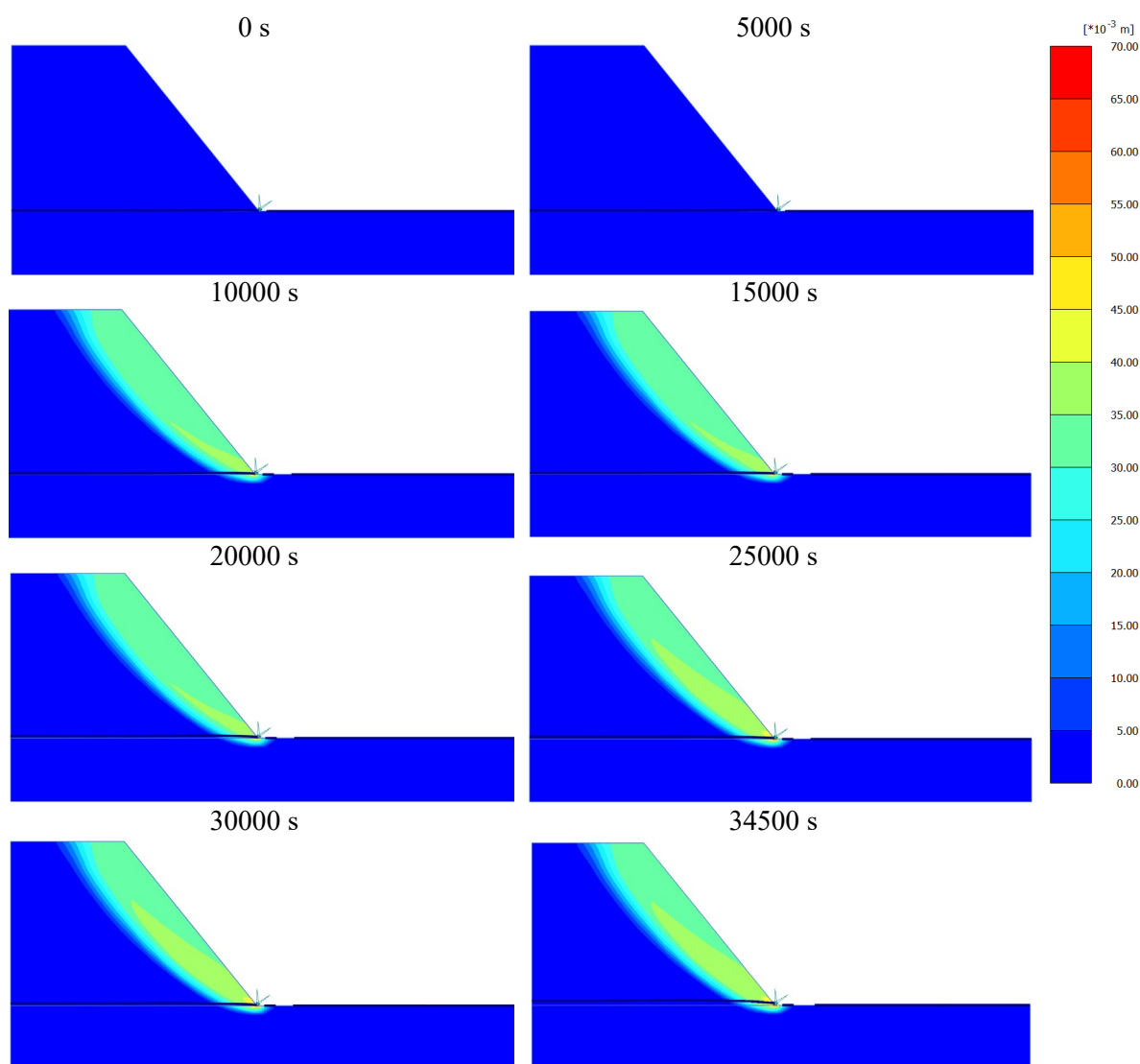
На следната слика е презентирана промената на вишокот порен притисок (Excess pore pressure).



Слика 108. Промена на вишок порен притисок во тек на време

Појавата на порниот надпритисок во тек на време се случува во зоната на заситување и загуба на сукција што резултира со максимална вредност на крајот на тестот од 12.35 kPa.

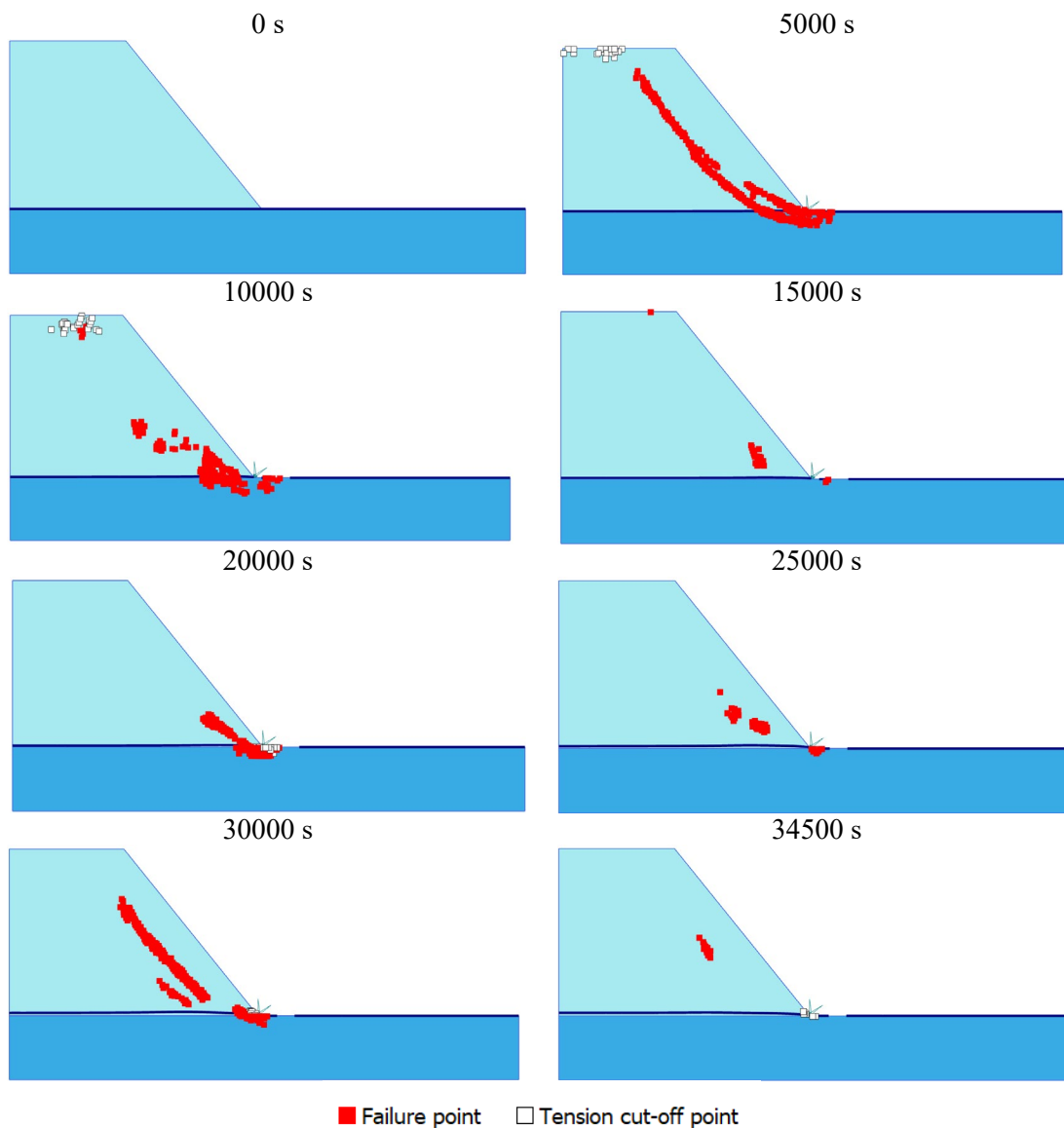
Развојот на деформациите за време на врнежите е прикажан на следната слика.



Слика 109. Развој на вкупни деформации во тек на време

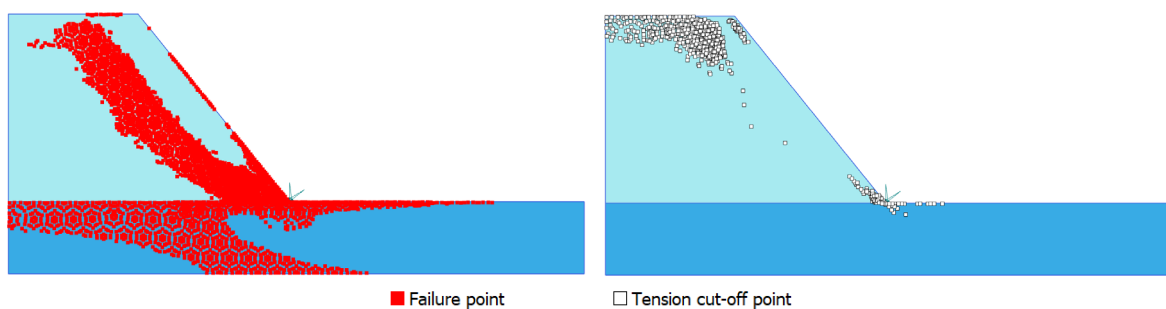
Максимален прираст на деформациите е забележан помеѓу 5 000 и 10 000 секунди од почетокот на врнежите кога вкупните деформации изнесуваат 6.27 cm. До крајот на тестот истите благо растат до максимална вредност од 6.62 cm која се јавува во ножицата на косината. Од овој дијаграм се дефинира и критичната клизна рамнина која се јавува за вакво оптоварување од врнежи.

Појавата на пластични точки и точки на затегање е набљудувана за целото времетраење на тестот во нумеричкиот модел. Нивната појава во одредени временски интервали е презентирана на следната слика.



Слика 110. Појава на пластични точки и точки на затегање во карактеристични временски интервали

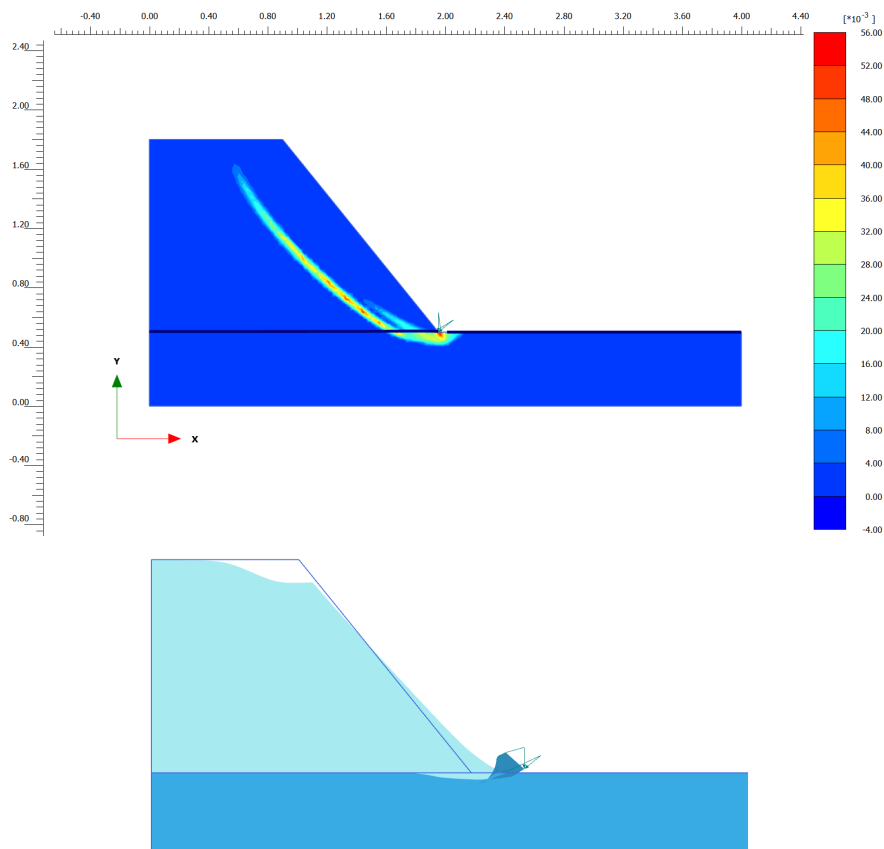
Појавата на пластични точки уште пред 5000 секунди од почетокот на тестот ја најавуваат почетната рамнина на лизгање. Развојот на пластичните точки и точки на затегање се менува често при анализата поради развојот на деформации во тек на време, па оттука приказот за целото времетраење на тестот дава појасна слика за зоните во кои се јавува потенцијал на лизгање. Истиот е даден на следната слика:



Слика 111. Историја на појава на пластични точки и точки на затегање

Најголема густина на појава на пластични точки се јавува во ножицата на косината и долж рамнината на лизгање, додека точки на затегнување се јавуваат во ножицата и врвот на косината.

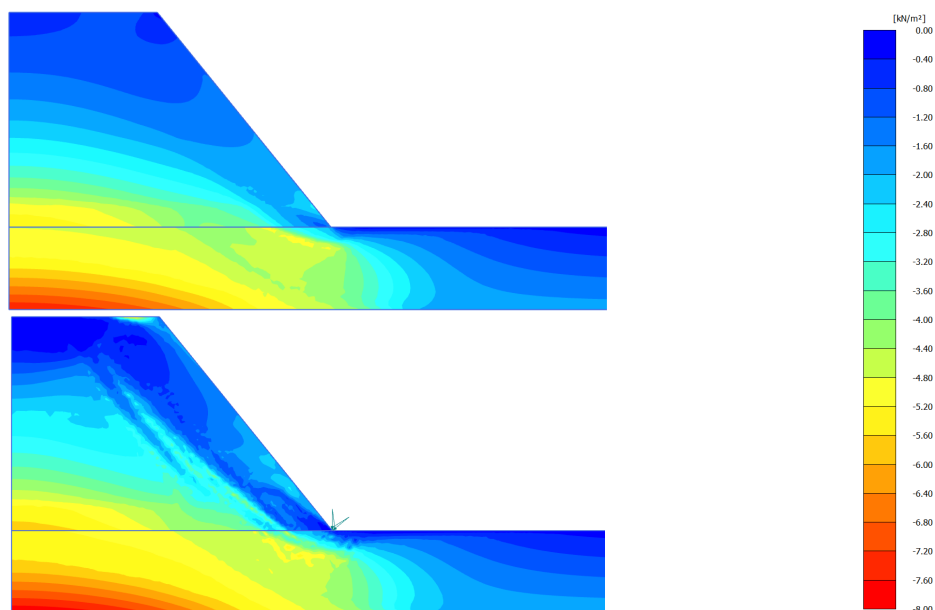
На следната слика е прикажан девијаторот на вкупни дилатации за време од 5000 s, како и деформациите на косината на крајот од тестот.



Слика 112. Девијатор на вкупни дилатации и деформации на косината

Може да се заклучи дека уште во рана фаза на аплицирање на врнежите, започнува да се формира рамнина на лизгање. При понатамошното товарење на косината истите се зголемуваат, но не се менува местоположбата на максимални дилатации.

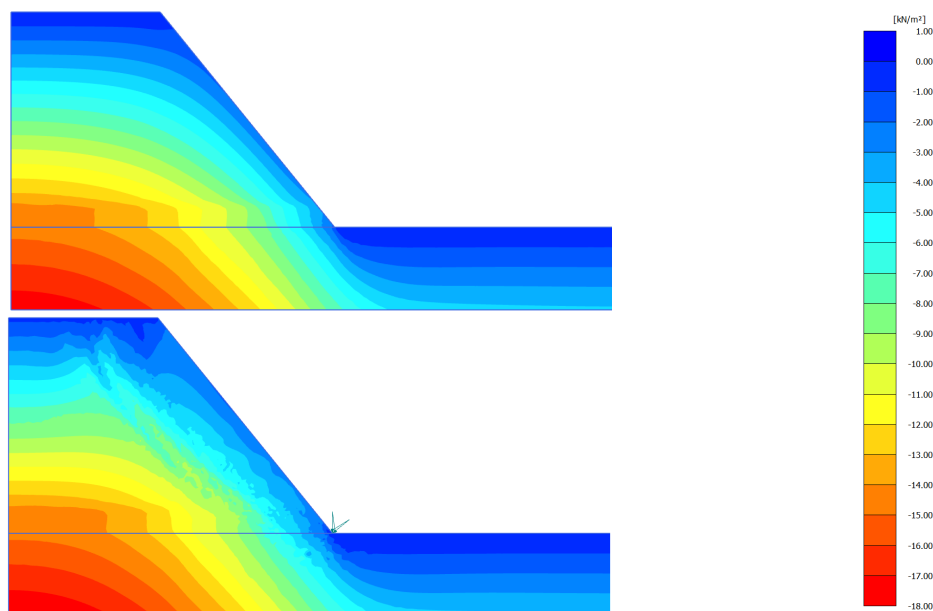
Дистрибуцијата на ефективните напрегања σ'_{xx} во иницијалната фаза и при анализата на стабилност при врнежи е прикажана на слика 113.



Слика 113. Дијаграм на ефективните напрегања σ'_{xx} во иницијална фаза и за време на врнежи

Од дијаграмот на ефективните напрегања σ'_{xx} може да се заклучи дека максималната вредност во иницијалната фаза на анализа изнесува -7.58 kPa и се јавува под косината во заситениот дел, додека за време на врнежите се зголемува до максимална вредност од -7.70 kPa со изразени промени во зоната на максимални деформации.

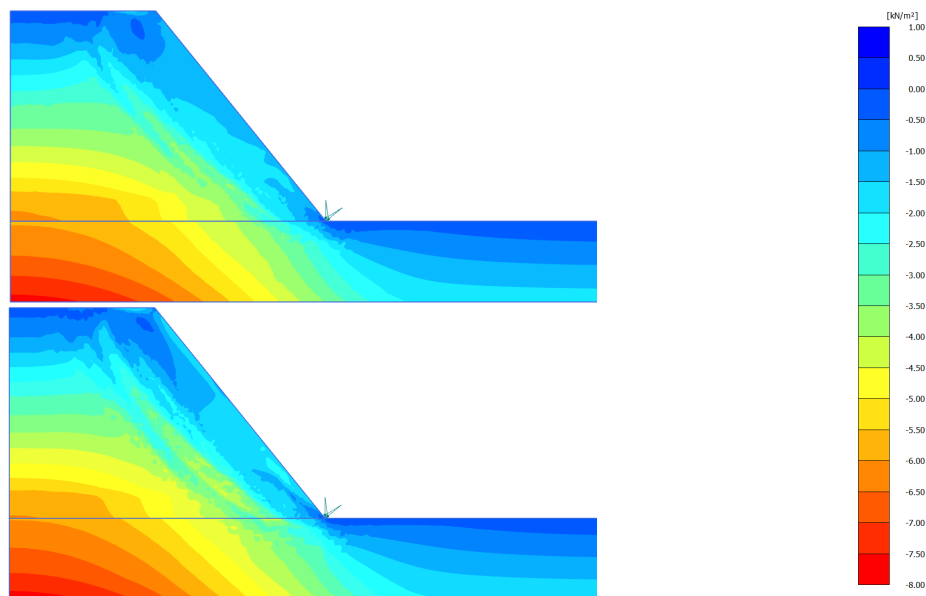
Дистрибуцијата на ефективните напрегања σ'_{yy} за иницијалната фаза и при анализата на стабилност при врнежи е прикажана на следната слика.



Слика 114. Дијаграм на ефективните напрегања σ'_{yy} во иницијална фаза и за време на врнежи

Од дијаграмот на ефективните напрегања σ'_{yy} може да се заклучи дека максималната вредност во иницијалната фаза на анализа изнесува -17.71 kPa и се јавува под косината во заситениот дел, додека за време на врнежите се зголемува до максимална вредност од -17.97 kPa, со изразени промени во зоната на максимални деформации.

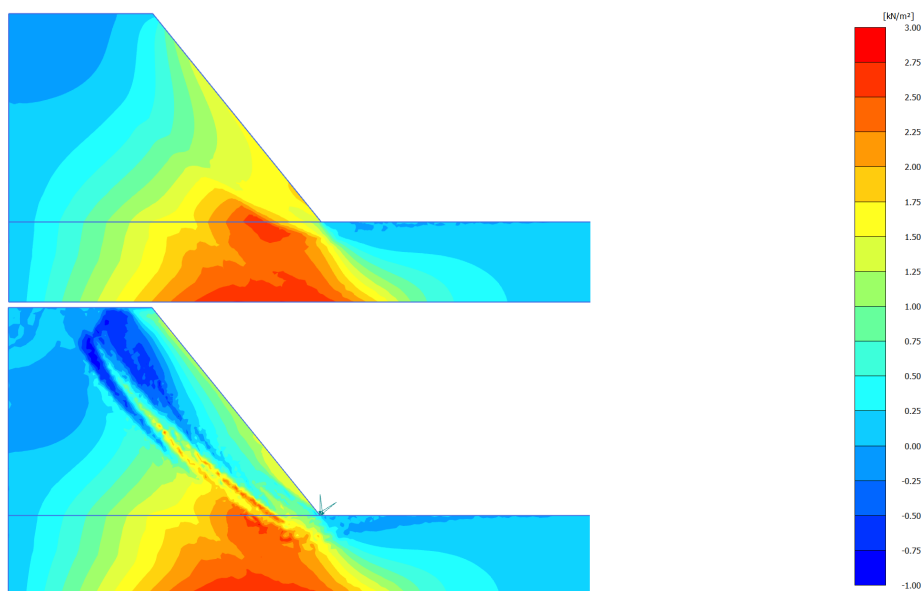
Дистрибуцијата на ефективните напрегања σ'_{zz} во иницијалната фаза и при анализата на стабилност при врнежи е прикажана на следната слика:



Слика 115. Дијаграм на ефективните напрегања σ'_{zz} во иницијална фаза и за време на врнежи

Од дијаграмот на ефективните напрегања σ'_{zz} може да се заклучи дека максималната вредност во иницијалната фаза на анализа изнесува -7.70 kPa и се јавува под косината во заситениот дел каде оптоварувањето е најголемо, додека за време на врнежите незначително се зголемува до максимална вредност од -7.75 kPa.

Дистрибуцијата на напрегањата на смолкнување σ_{xy} за иницијалната фаза и при анализата на стабилност при врнежи е прикажана на следната слика:

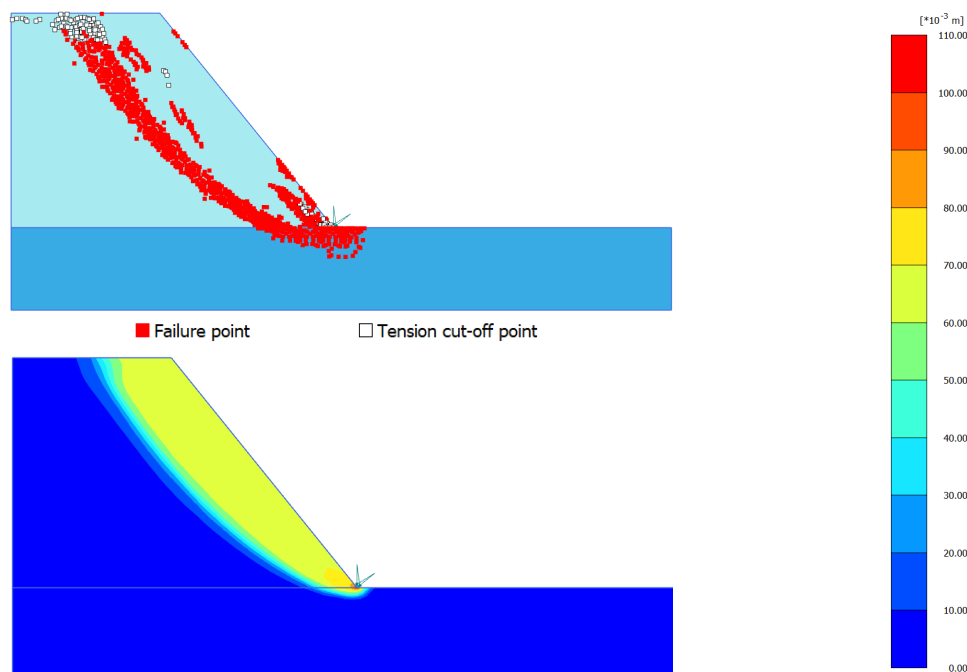


Слика 116. Дијаграм на напрегања на смолкнување σ_{xy} во иницијална фаза и за време на врнежи

Максималната вредност на напрегањата σ_{xy} во иницијалната фаза изнесува 2.76 kPa и се јавува во зоната и под ножицата на косината, додека за време на врнежите незначително

се зголемува до максимална вредност од 2.81 kPa со изразени промени во зоната на максимални деформации.

Во последната фаза е спроведена анализа на стабилност (Safety) преку редукција на јакосните параметри на почвата. Како резултат се добива фактор на сигурност кој во овој случај изнесува 1.037, што е многу блиску до граничната состојба на рамнотежа на косината. За илустрација на критичната рамнина на лизгање, дадена е состојбата на пластични точки и точки на затегување, како и вкупните деформации за оваа состојба.



Слика 117. Пластични точки, точки на затегање и деформации при анализа на стабилност

Може да се заклучи дека со ваквата анализа на стабилност, при граничната состојба доаѓа до проширување на рамнината на лизгање, односно се зголемува волуменот на дестабилизираниот дел од косината.

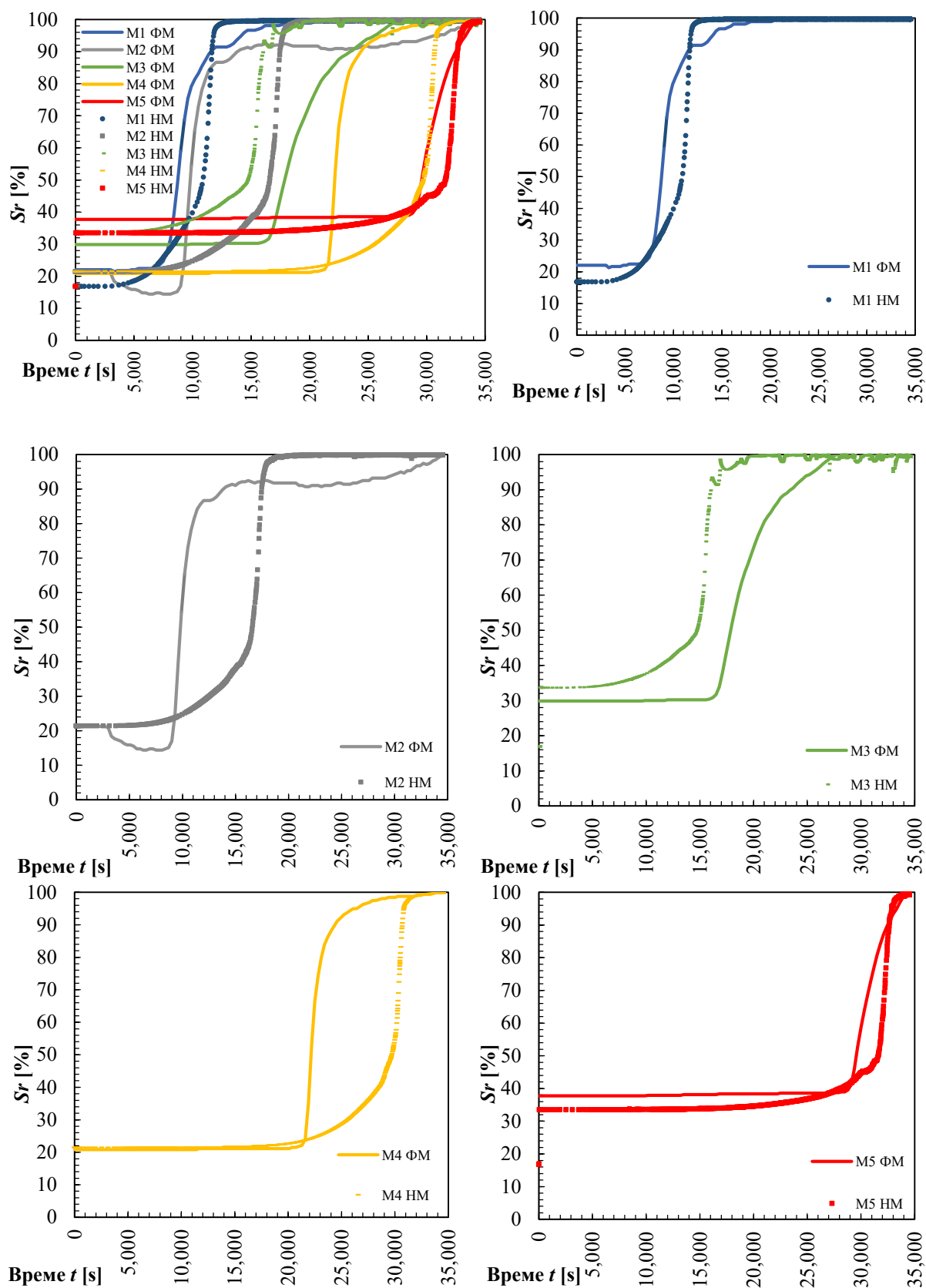
Од спроведената нумеричка анализа на стабилност на косината може да се заклучи дека во почетната фаза на анализа косината е делумно заситена над нивото на подземна вода каде сатурацијата е приближна на онаа во физичкиот модел. Од влијанието на врнежите во обединетата фаза на анализа на хидромеханичкото однесување на косината во тек на време, дистрибуцијата на степенот на заситеност и сукцијата се менува, а максималната сукција се јавува на делот над нивото на подземна вода на средината од моделот што ги потврдува хипотезите. Порниот притисок се зголемува, односно сукцијата се намалува со што се формираат релативно плитки рамнини на лизгање. Со тек на време, максималните деформации се развиваат во ножицата и го најавуваат нејзиното дестабилизирање, слично како кај физичкиот модел.

4.2.3. Споредба на резултати

Во следната фаза е направена споредба на резултатите од физичкиот модел со оние од нумеричката анализа во карактеристичните точки каде се поставени сензорите во физичкиот модел.

Промената во влажноста е прикажана како функција на степенот на заситеност S_r од времето. На првиот дијаграм на следната слика се поместени резултатите од сите

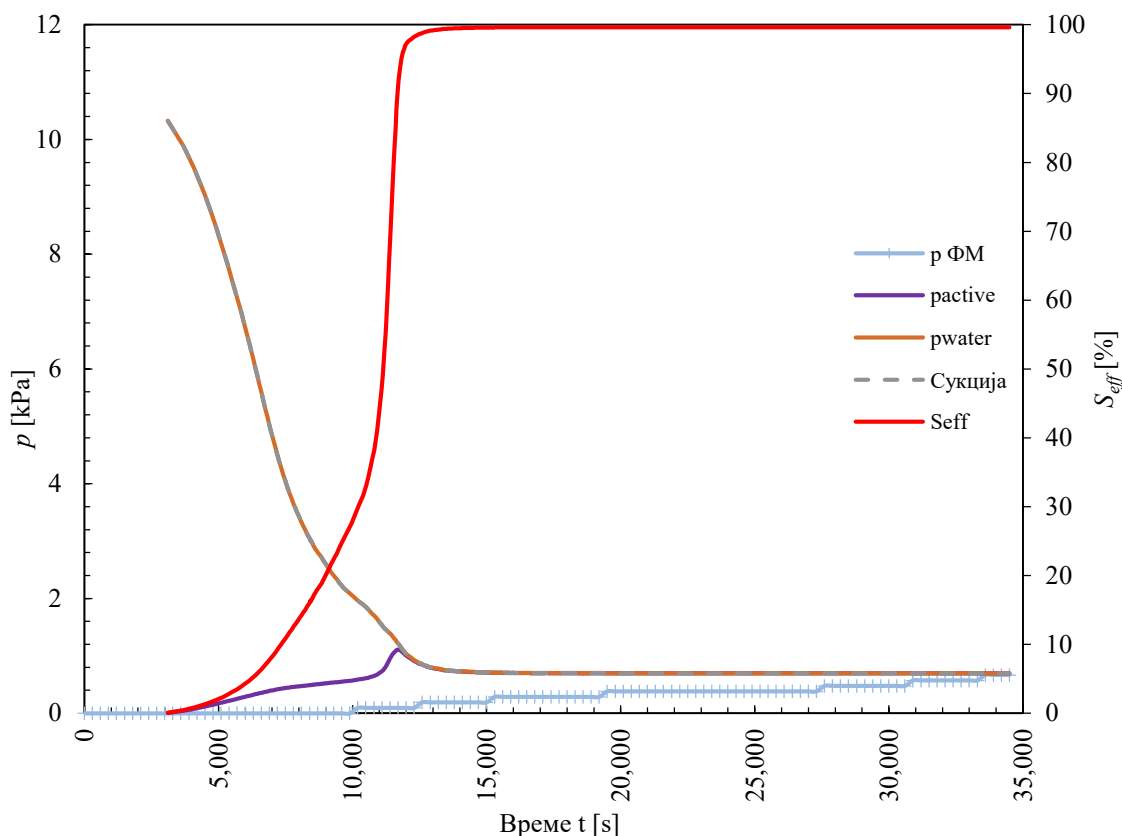
мерни места во физичкиот (ФМ), односно карактеристични точки во нумеричкиот модел (НМ). За појасна споредба се издвоени и на посебни дијаграми.



Слика 118. Споредба на степенот на заситеност S_r во функција од времето во карактеристични точки од физичкиот и нумеричкиот модел

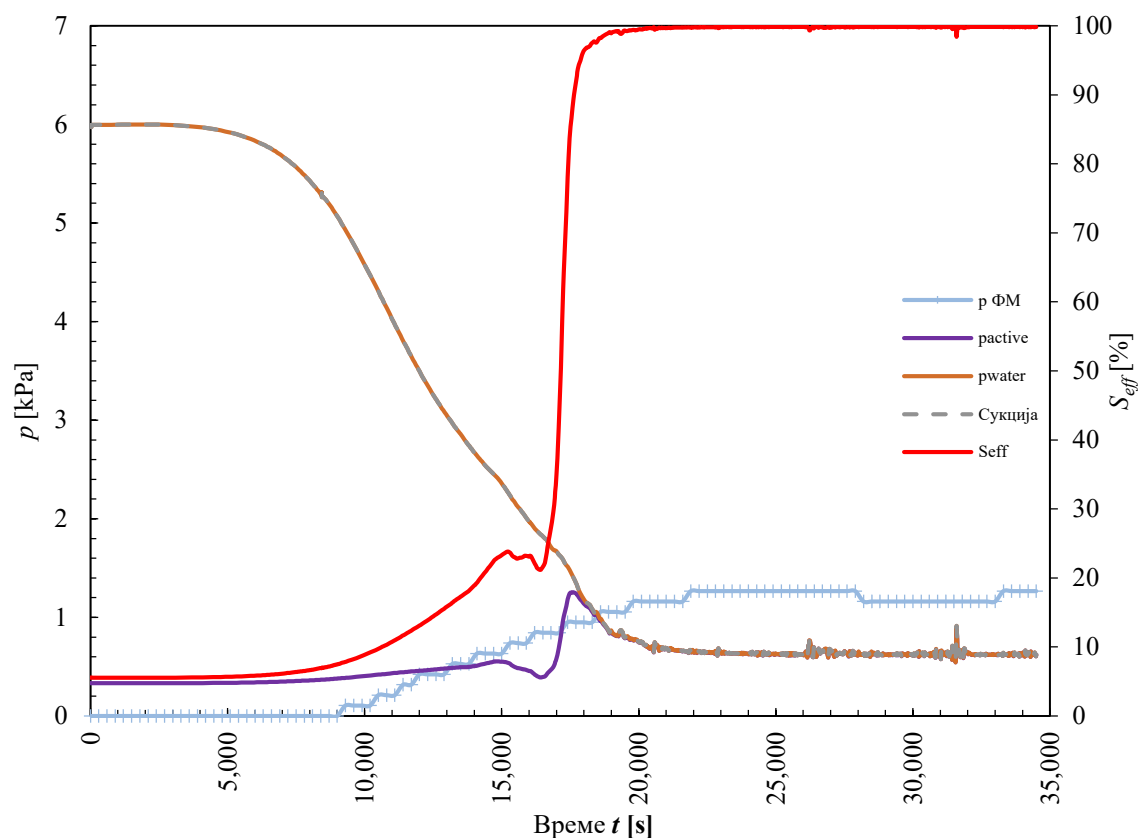
Од споредбата на резултатите може да се заклучи дека хидрауличкото однесување на материјалот во физичкиот модел е слично на она од нумеричкиот модел. Имено, почетниот степен на заситеност во карактеристичните точки M1, M2 и M4 е помал во споредба со оној во M3 и M5 каде постои влијание од подземната вода и најголемото вертикално оптоварување што придонесува до консолидационо дренирање во вертикален правец – капиларен ефект. Споредбено во тек на време, степенот на заситеност во точките M1 и M5 на врвот на косината и во ножицата, соодветно, покажуваат најдобро совпаѓање на резултатите. Во точките M2, M3 и M4 се забележува минимално отстапување во времето кога започнува промената, иако наглата промена е забележана кај двата модела. На крајот од анализата (34500s) сите мерни места се целосно заситени ($S_r=100\%$).

Во продолжение е дадена промената во порните притисоци од нумеричкиот модел, дополнета со сукцијата и ефективниот степен на заситеност во секоја карактеристична точка, со што се добива реална слика за однесувањето на моделот при интензивни врнежи.



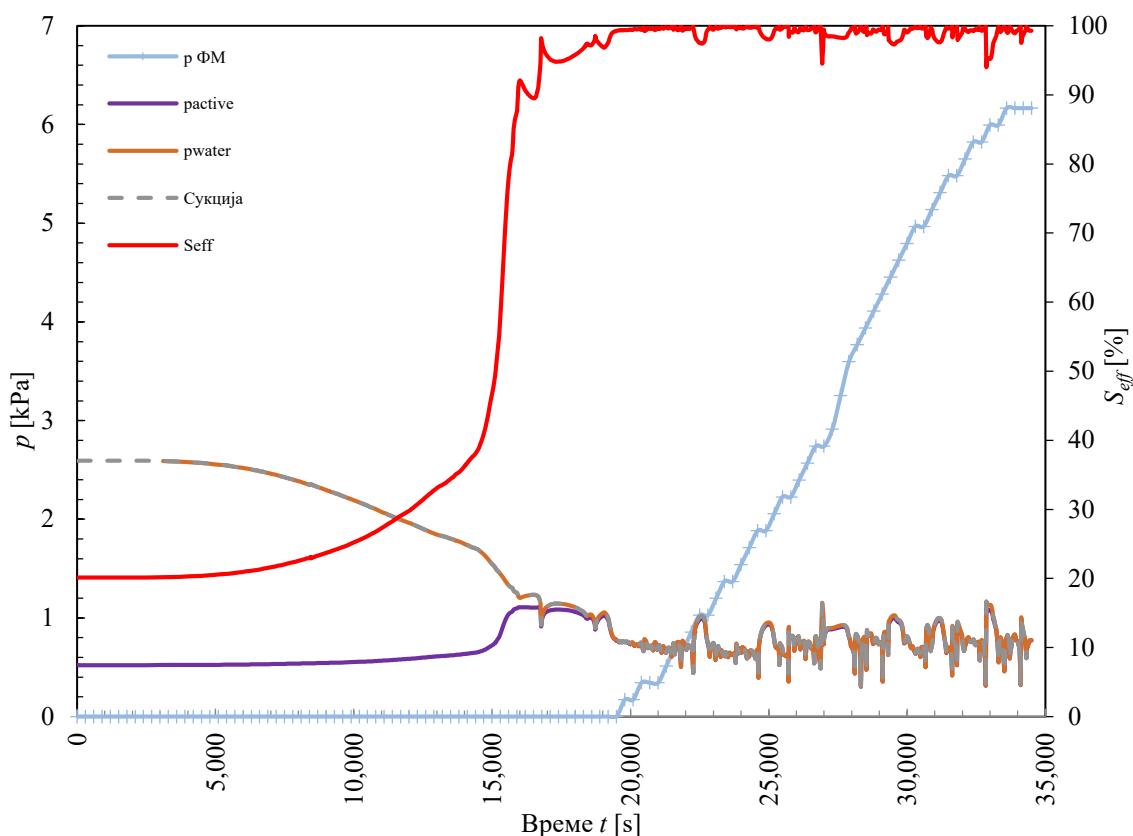
Слика 119. Промена на притисоци во тек на време во карактеристична точка M1

Сукцијата или водениот порен притисок (p_{water}) имаат максимална вредност во точката M1, односно на врвот на косината. Со зголемувањето на ефективниот степен на заситеност во тек на време, сукцијата опаѓа и при целосна заситеност покажува најмала вредност која е приближно константна до крајот на тестот. Во исто време, активниот притисок благо расте до моментот на постигнување на целосна заситеност по што ја следи кривата на сукцијата. Порниот притисок мерен на физичкиот модел ($p_{\text{ФМ}}$) започнува да се зголемува по достигнување на $S_{\text{eff}}=25\%$ и се зголемува до крајот на тестот кога ја достигнува максималната вредност од 0.7 kPa добиена и со нумеричкиот модел.



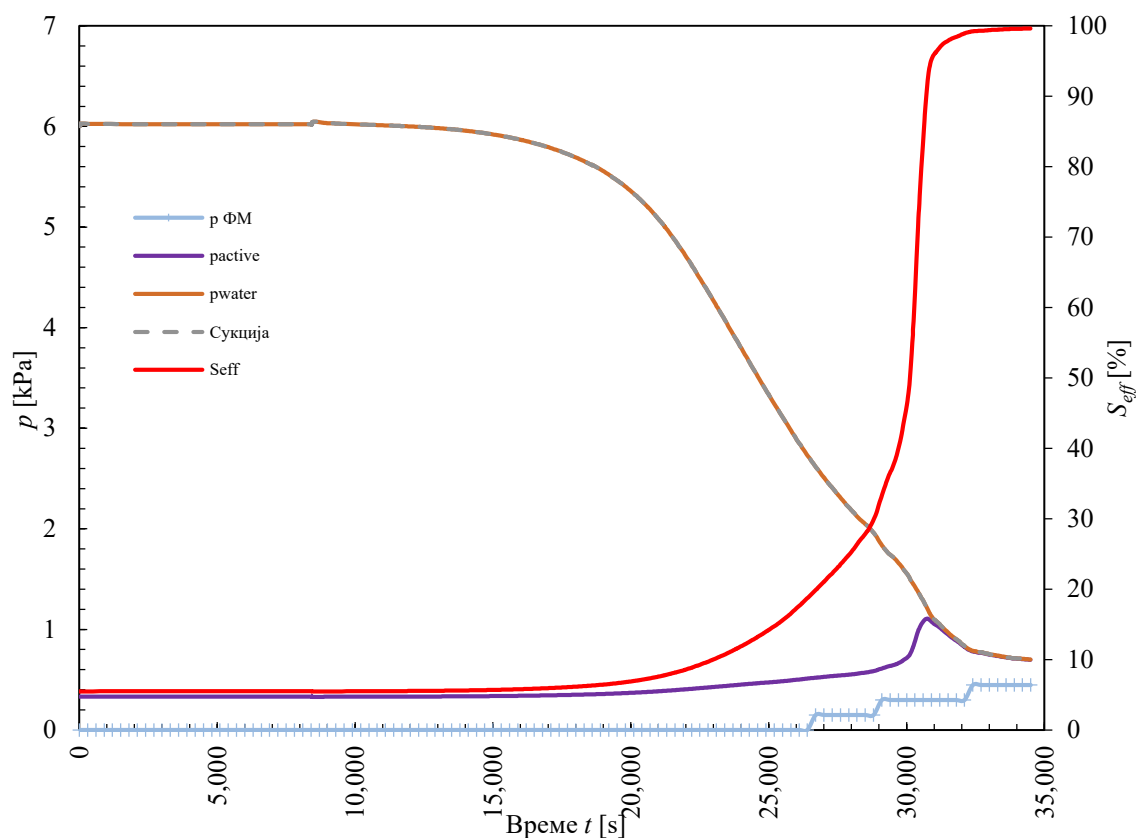
Слика 120. Промена на притисоци во тек на време во карактеристична точка M2

Уште со започнување на промената на ефективниот степен на заситеност во точка M2, сукцијата започнува да опаѓа до минимална вредност во моментот на достигнување на целосна заситеност на материјалот во тој дел од косината, со мали промени до крајот на тестот. Во исто време, активниот притисок благо расте до моментот на постигнување на целосна заситеност по што следи неочекуван пад, зголемување и повторно намалување поради промената во заситеноста како резултат на ефектот од деформациите и дренирањето. До крајот на тестот ја следи промената на сукцијата. Порниот притисок мерен на физичкиот модел расте, по достигнување на $S_{eff}=8\%$ и се зголемува до крајот на тестот кога ја достигнува максималната вредност од 1.3 kPa што е поголема од онаа добиена во нумеричкиот модел од 0.7 kPa.



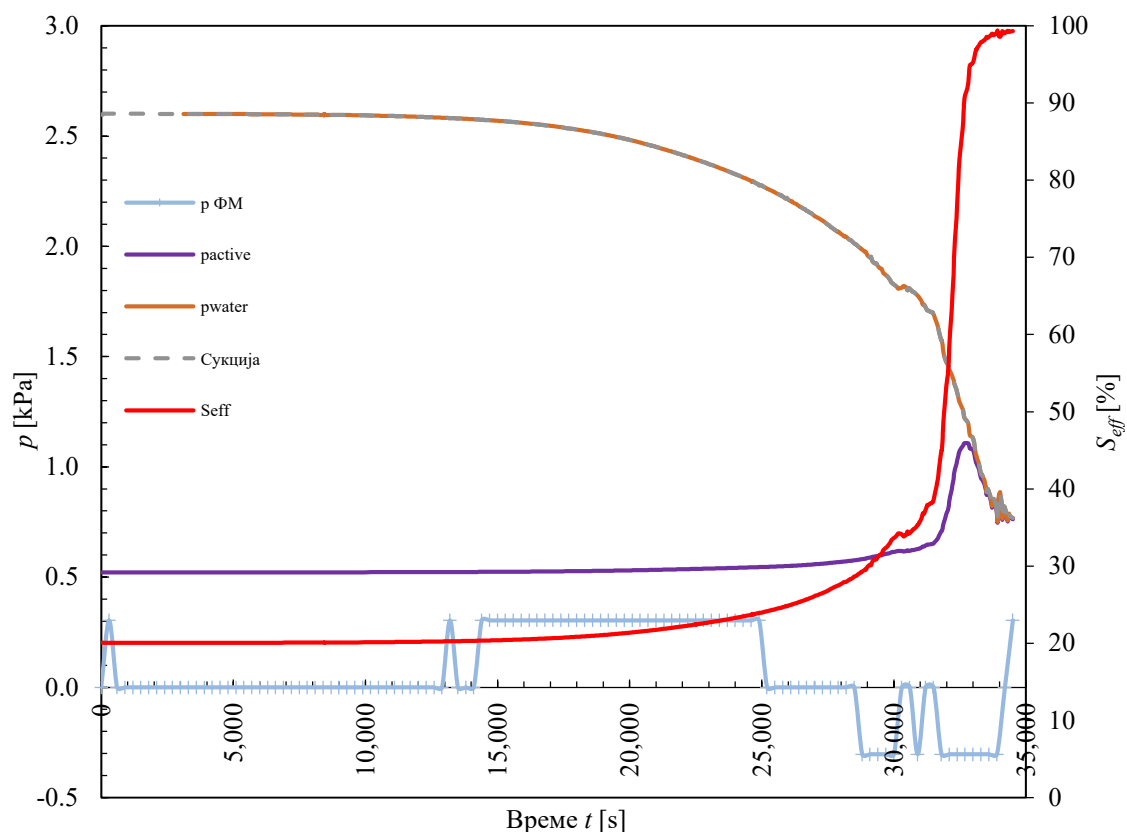
Слика 121. Промена на притисоци во тек на време во карактеристична точка М3

Сукцијата ја следи промената на ефективниот степен на заситеност, а минимална вредност достигнува при целосна заситеност на материјалот во ножицата на косината, со забележливи осцилации до крајот на тестот поради изразената суфозија и дренирање на порната вода, како и значителните деформации. Во исто време, активниот притисок благо расте до моментот на постигнување на целосна заситеност по што следи намалување поради промената на влажноста, суфозијата и течењето. До крајот на тестот ја следи промената на сукцијата. Порниот притисок мерен на физичкиот модел започнува да се зголемува по достигнување на речиси целосна заситеност и значително расте до крајот на тестот кога ја достигнува максималната вредност од 6.2 kPa, што е значително поголема од максималната добиена во нумеричкиот модел од 1.13 kPa. Ова може да се оправда со фактот дека во нумеричкиот модел се добиени помали слегнувања во тој дел, додека во физичкиот модел со реализацијата на слегањата, сензорот ја менува својата положба кон нивото на подземна вода од чие влијание се зголемува порниот притисок во оваа заситена зона. Развојот на вакви порни притисоци во ножицата на косината е очекуван и претставува значаен показател за дестабилизацијата на косината во овој дел.



Слика 122. Промена на притисоци во тек на време во карактеристична точка М4

Намалувањето на сукцијата во точка М4 започнува со зголемувањето на ефективниот степен на заситеност, а минималната вредност ја достигнува на крајот на тестот кога е достигната целосна заситеност. Активниот притисок расте до моментот на постигнување на целосна заситеност, по што следи пад и до крајот на тестот ја следи промената на сукцијата. Порниот притисок мерен на физичкиот модел започнува да се зголемува по достигнување на $S_{eff}=15\%$ и се зголемува до крајот на тестот кога ја достигнува максималната вредност од 0.4 kPa, што е помала од онаа добиена во нумеричкиот модел од 0.7 kPa.



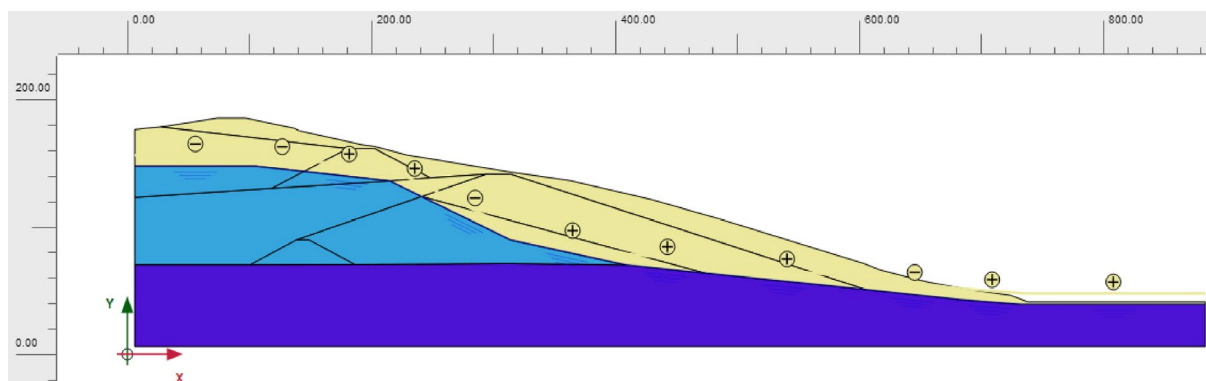
Слика 123. Промена на притисоци во тек на време во карактеристична точка М5

Однесувањето на материјалот во точка М5 е слична со однесувањето во точка М4. Имено, намалувањето на сукцијата започнува со зголемувањето на ефективниот степен на заситеност, а минималната вредност ја достигнува на крајот на тестот кога е достигната целосна заситеност. Активниот порен притисок расте до моментот на постигнување на целосна заситеност по што следи негов пад и изедначување со сукцијата. Порниот притисок мерен на физичкиот модел покажува одредено зголемување при $S_{eff}=20\%$, но осцилира до крајот на тестот. Во оваа зона се добиени најмалите притисоци во нумеричкиот модел, па промената во порниот притисок во физичкиот модел може да се должи на осетливоста на сензорот во нискиот опсег на мерење.

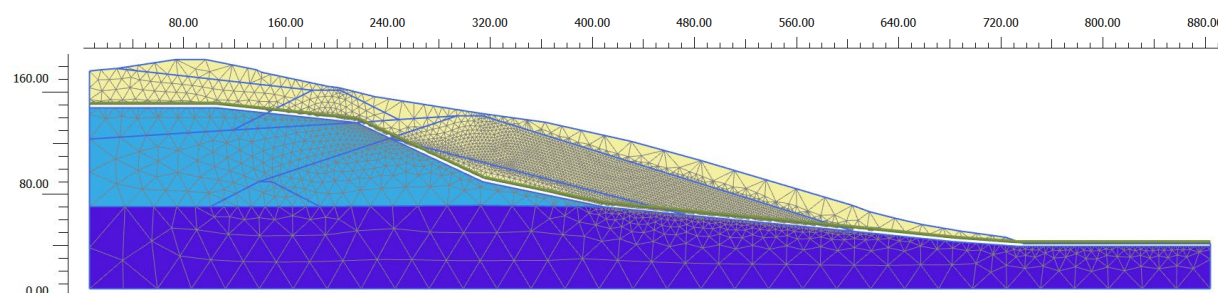
5. Студија на случај – хидројаловишна брана Тополница

Оваа анализа има за цел да ја покаже можноста за примена на моделираното хидромеханичко однесување на јаловишниот песок во практиката. Имено, анализата е извршена на хидројаловишната брана Тополница, изградена во рамки на рудникот за бакар Бучим кај Радовиш. Висока е 134.0 (кота на круна 654 мнв) и претставува една од највисоките хидројаловишни брани во Европа. Браната е градена со методот на хидроциклонирање од иницијалната брана во ножицата. Ова не е најголемата проектирана висина на браната, па оттука овој проблем е важен да се анализира имајќи предвид дека е планирано да се надвишува. Браната располага со напреден систем за мониторинг на поместувања преку инклинометри и ниво на подземна вода преку пиезометри, од каде се добиени почетните сознанија за местоположбата на филтрационата линија.

На следните слики е прикажана геометријата на нумеричкиот модел на браната и дискретизацијата со конечни елементи.



Слика 124. Геометрија на нумеричкиот модел на браната Тополница



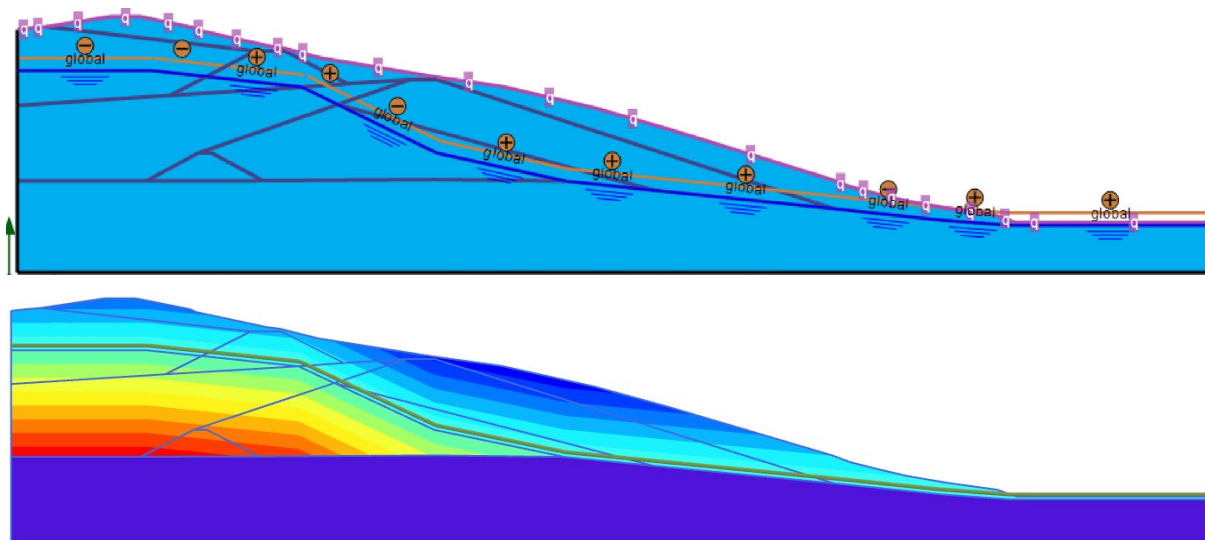
Слика 125. Дискретизација на нумеричкиот модел со триаголни конечни елементи

Во хидраулична смисла, филтрационата линија е усвоена како глобално ниво на подземна вода, каде е и физичката граница помеѓу заситениот и незаситениот материјал. Нивната интеракција е симулирана со споен елемент со коефициент на интеракција $R_{inter}=0.5$. Во следната табела се презентираат усвоените параметри на материјалите добиени од лабораториски испитувања за соодветно ниво на напрегања.

Табела 26. Механички и хидраулички карактеристики на материјалите

Карактеристика	Мерна единица	Заситен песок	Незаситен песок	Основна карпа
Материјален модел	[/]	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Услови на дренирање	[/]	Дренирани	Дренирани	Непорозна
Хидраулички модел	[/]	User-defined Saturated	User-defined Spline	/
Волуменска тежина во природна состојба γ_{unsat}	[kN/m ³]	18.20	15.00	24.00
Волуменска тежина во заситена состојба γ_{sat}	[kN/m ³]	18.20	15.50	24.00
Почетен коефициент на порозност e_{init}	[/]	0.85	0.691	0.5
Едометарски модул на стисливост E_{oed}	[kN/m ²]	94 230	55 000	200 000
Поасонов коефициент ν	[/]	0.3	0.3	0.22
Кохезија c'	[kN/m ²]	1.0	0.72	100
Агол на внатрешно триење ϕ'	[°]	33	30	45
Агол на дилатанција ψ	[°]	3.0	0	15
Коефициент на водопропусност во заситени услови k_{sat}	[m/s]	3.2×10^{-4}	3.2×10^{-4}	0

На следната слика е прикажано нивото на подземна вода, хидрауличките гранични услови, како и почетната распределба на порниот притисок, со максимална вредност во основата на браната од 772.4 kPa и сукцијата со максимална вредност на косината од 566.1 kPa.

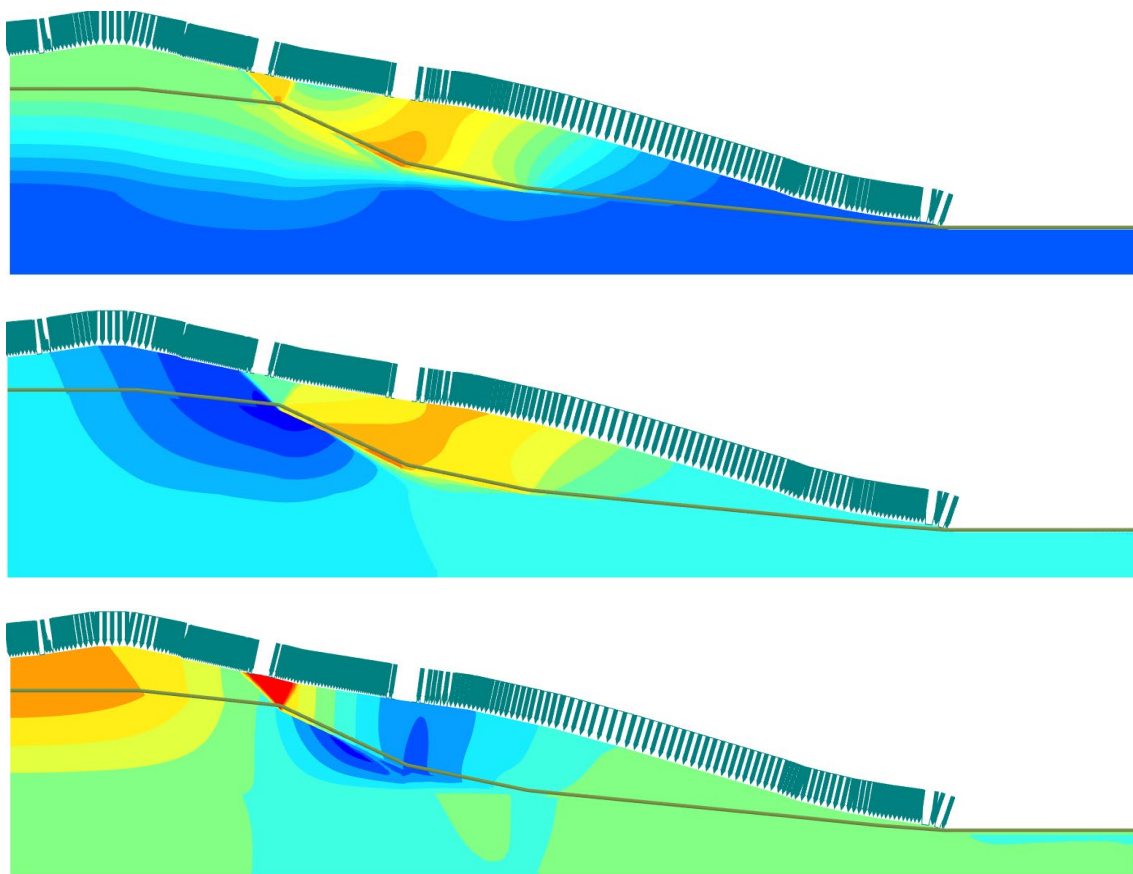


Слика 126. Хидраулични гранични услови и почетна распределба на порни притисоци

По консолидацијата на материјалите во иницијалната фаза (Gravity loading), извршена е анализа на врнежи со заедничка хидро механичка анализа на течење и деформации во функција од времето (Fully coupled flow-deformation analysis). Оваа анализа вклучува инфилтрација од константни врнежи од 9.6×10^{-6} m/s преку границите на моделот

дефинирани со максималната инфилтрација еднаква на интензитетот на врнежите. Аплицирани се врнежи во времетраење од 3 часа. Во завршната фаза е добиен фактор на сигурност (Safety) преку редукција на јакосните параметри на почвата, а дополнително е спореден и со факторот на сигурност добиен пред врнежите.

На следната слика се прикажани редоследно вкупните, хоризонталните и вертикалните деформации кои се јавуваат на косината во фазата на товарење со врнежи.



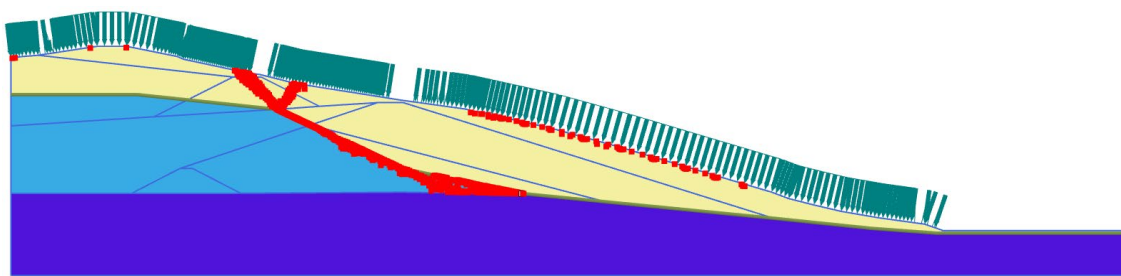
Слика 127. Пресметани деформации после интензивни врнежи: вкупни (горе), хоризонтални (средина) и вертикални (долу)

Вкупните деформации во моделот се наизразени во зоната каде има најмал надслој над подземната вода, односно влијанието од инфилтрацијата е најизразено. Гледано временски, тој дел набрзо се заситува и започнува изразена филтрација со што деформациите се зголемуваат. Тоа предизвикува дефинирање на потенцијална рамнина на лизгање. Максималните деформации изнесуваат 16.48 cm во ножичниот дел на потенцијалната зона на лизгање.

Максималните хоризонтални деформации се јавуваат во истата зона, но со спротивна насока во заситениот и незаситениот дел од косината. Максималната деформација на косината изнесува 16.12 cm, додека кон внатрешноста се јавува хоризонтално поместување од 9.28 cm.

Вертикалните поместувања се најизразени во зоната каде имаме највисоко ниво на подземна вода и најизразена инфилтрација. Максималното слегање изнесува 11.75 cm,

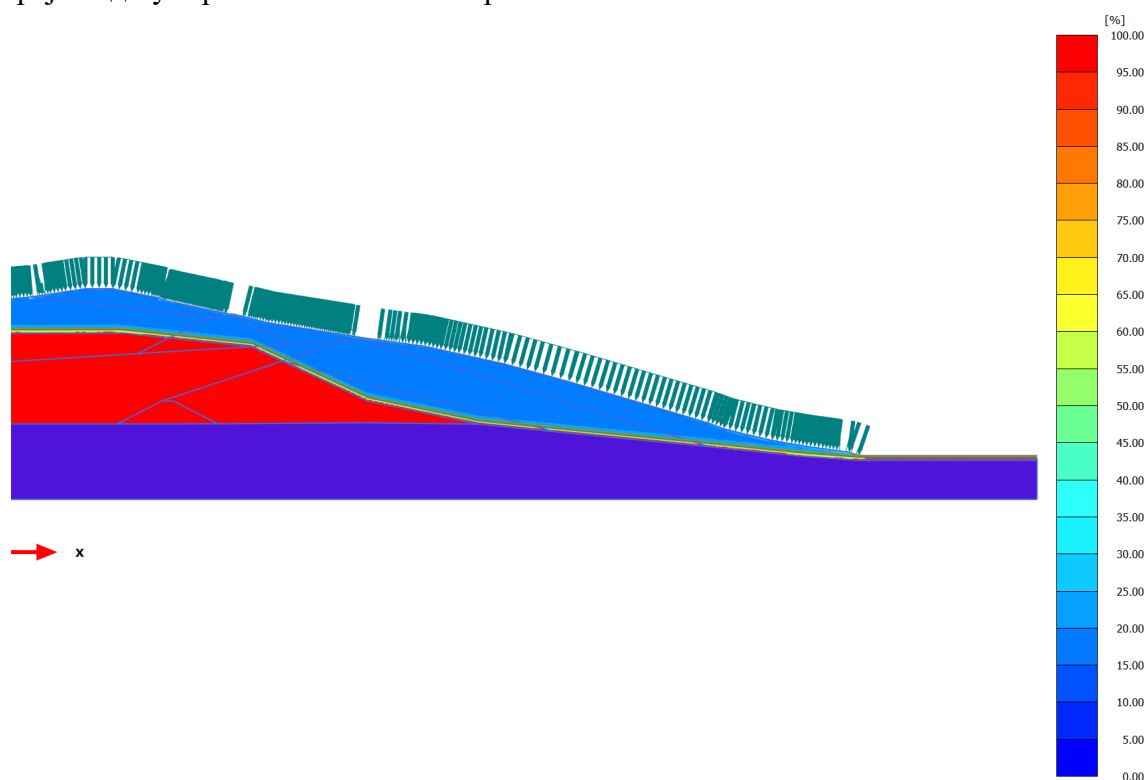
додека под таа зона се формира класична рамнина на лизгање, па деформациите во ножичниот дел се насочени нагоре со максимална вредност од 9.37 cm.



Слика 128. Пластични точки по интензивни врнежи

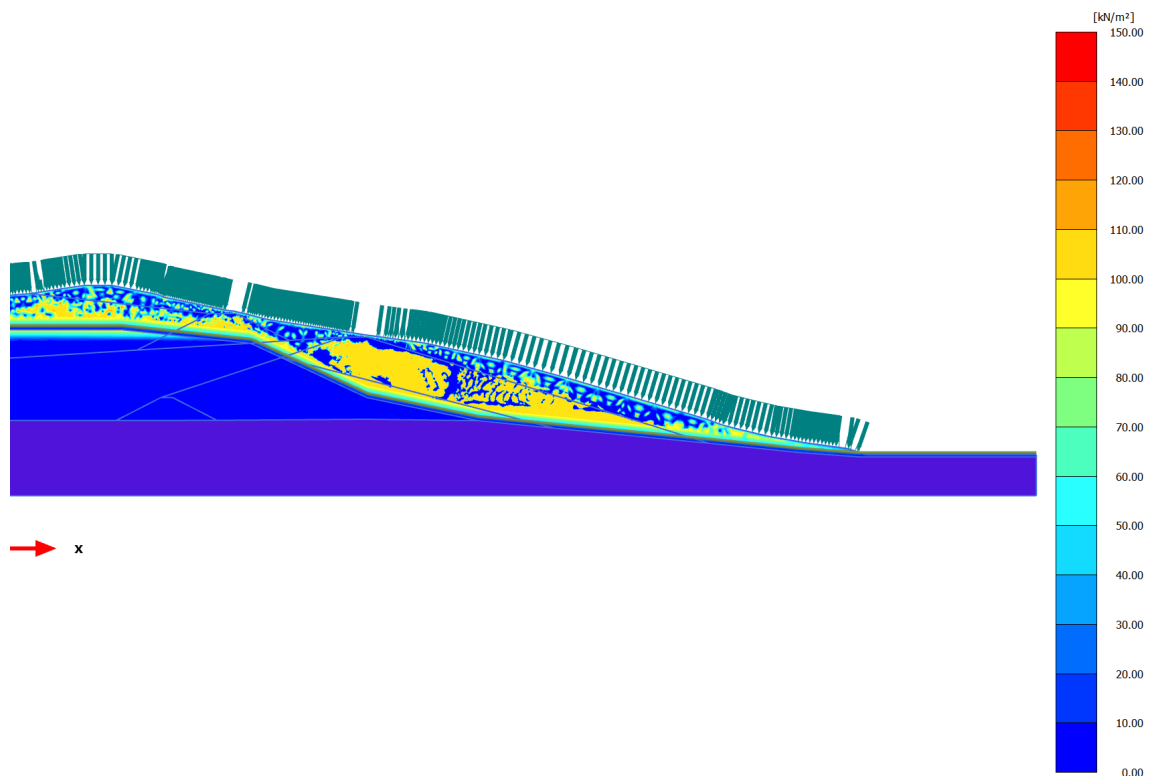
Од развојот на деформациите и пластичните точки, може да се заклучи дека влијанието на интензивните врнежи предизвикува промени во напонско-деформационата состојба на косината во делот каде филтрацијата по инфилтрацијата е најголемо, дополнето со влијанието од подземната вода на контактот на двата материјала.

Во продолжение се дадени состојбата на заситеност во моделот, како и сукцијата на крајот од нумеричката анализа со врнежи.



Слика 129. Состојба на заситеност по интензивни врнежи

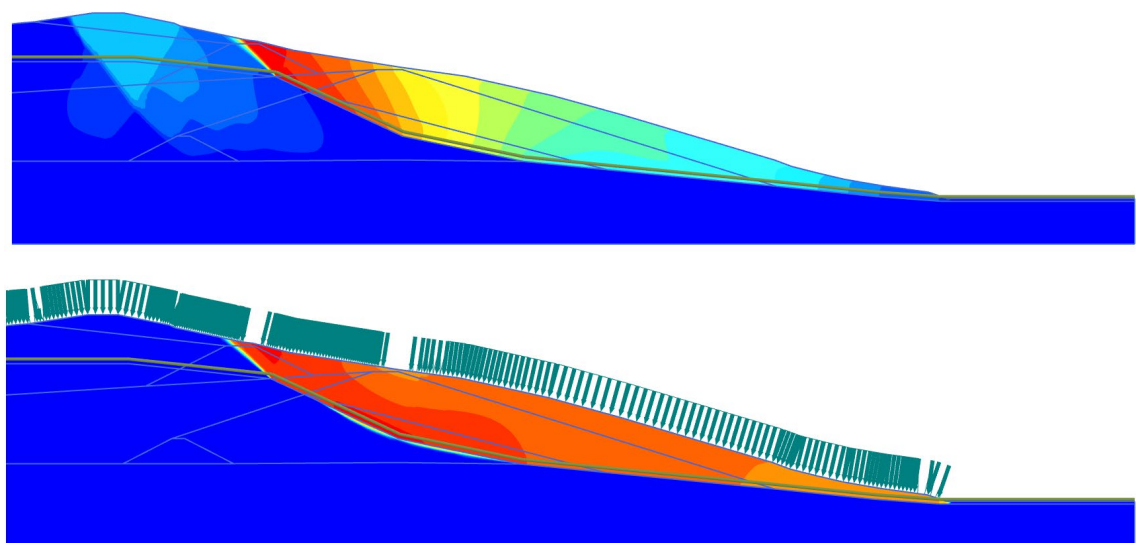
Водозаситениот материјал останува заситен и по аплицираните врнежи, со мало снижување на нивото на подземна вода под круната на браната поради развиена филтрација низводно. Ефектот на нивото на подземна вода може да се дефинира со подигнувањето на зоната на заситување која по целата косина изнесува околу 2.0 m. Степенот на заситеност на косината изнесува 16.51 % кој е зависен од материјалното однесување дефиниран со зависноста сукција – степен на заситеност.



Слика 130. Состојба на сукцијата по интензивни врнежи

Како резултат на интензивните врнежи, сукцијата значително се намалува од максимални 566.1 kPa до 145.4 kPa во повеќе зони во внатрешноста на косината и кај сниженото ниво на подземна вода под круната на браната. Неравномерната распределба на сукцијата се должи на филтрацијата на водата низ незаситената косина до филтрационата линија на браната. Притоа, не доаѓа до целосно заситување на косината.

Ефектот врз стабилноста на низводната косина на браната може да се оцени доколку се споредат факторите на сигурност пред и по врнежите, пресметани со редуција на јакосните параметри на песокот. Освен вредностите, прикажана е споредба на потенцијалните рамнини на лизгање за двата случаја.



Слика 131. Критични зони на свлекување при анализа на стабилност

Факторот на сигурност против дестабилизација на низводната косина по аплицираниот интензитет се редуцира од 1.37 на 1.25, но се зголемува и потенцијалната нестабилна зона.

Од спроведената нумеричка анализа може да се заклучи дека низводната косина на браната е стабилна, но влијанието од интензивните врнежи ја намалува стабилноста изразена преку факторот на сигурност. Во зависност од времетраењето на врнежите и почетниот степен на заситеност на материјалот, може да се очекува целосно заситување на површинските слоеви на косината, течење на неинфилтрираната вода по косината, а со тоа и формирање на локални јаружења, како што се забележани на самата брана по интензивни врнежи.

6. Заклучоци и препораки

Во изминатиот период проблемот на дестабилизација на косини како резултат на интензивни врнежи е сè позначајна тема за истражување поради сè почестата појава на нестабилности како кај природните, така и кај инженерските косини. Климатските промени во одредени региони, како што е западниот Балкан, предизвикаа појава на сè подолготрајни сушни периоди, но истовремено и појава на многу влажни периоди во кои се јавуваат краткотрајни, но интензивни врнежи. Ваквите настани претставуваат дополнително оптоварување на косините кои честопати резултираат со губење на локалната, но во одредени случаи и на глобалната стабилност кај косините. Во литературата овој феномен сè дефинира како интеракција помеѓу почвата и атмосферските влијанија и се повеќе наоѓа примена во дефинирањето на степенот на сигурност. Во основа се работи за веројатносен концепт кој дефинира критичен настан на врнежи со одреден период на повторување од 10 до 50 години кој ќе доведе до дестабилизација на косините. Овој концепт во минатото е успешно користен за проектирање на хидротехнички објекти и во асейзмичкото проектирање, а во поново време сè повеќе се користи и во геотехничкото проектирање на косините.

Интензивните врнежи влијаат негативно врз стабилноста на природните и вештачките косини, бидејќи преку инфилтрираната вода се зголемува природната влажност на материјалот и порниот притисок, со што се намалува сукцијата во незаситената почва и заедно предизвикуваат намалување на јакоста на смолкнување кај почвата. Иако ефектите првично се јавуваат во приповршинските слоеви на косините, за подолготрајни врнежи зоната на интеракција може да се прошири предизвикувајќи не само локални, туку и глобални нестабилности со свое влијание, дури и врз почетното ниво на подземна вода. За да се вклучи влијанието на инфилтрираната вода врз клучните параметри кои ја дефинираат јакоста на смолкнување кај почвите, потребно е да се користи пресметка која истовремено ги интегрира односно спојува/обединува механичкото со хидрауличкото однесување на почвите во мултифазен систем.

Ова истражување има за цел да го дефинира хидромеханичкото однесување на незаситени почви за проблемот на стабилност на косини предизвикана од интензивни врнежи. За таа цел се направени обемни лабораториски, експериментални и нумерички испитувања. Со овој пристап подетално се објаснува механизмот на формирање на свлечишта кај незаситени почви земајќи го предвид и влијанието на инфилтрираната вода врз влажноста, сукцијата и евапотранспирацијата, како параметри кои имаат значајно влијание врз стабилноста на косините изложени на интензивни врнежи.

Како референтен е избран материјалот од кој е изградена хидројаловишната брана Тополница при рудникот Бучим во Радовиш. Класификационите/контролните геомеханички испитувања покажуваат дека се работи за прашинест песок. Хидрауличните карактеристики се дефинирани преку кривата на задржување на почвена влажност (SWRC) како функција на зависноста на сукцијата и влажноста, како и преку функцијата на хидрауличната спроводливост како зависност на сукцијата и коефициентот на водопропусност. Овие параметри се значајни за дефинирање на хидрауличниот и конститутивниот модел со кои се опишува хидромеханичкото однесување на незаситената почва.

За дефинирање на меродавниот интензитет и времетраење на врнежите во оваа студија, претходно беше спроведена статистичка анализа на врнежите за разгледуваното подрачје, врз основа на која е изработен дијаграм за прогнозираната количина на врнежите со соодветна веројатност на појава.

Покрај обемните лабораториските испитувања, во рамки на предметната студија беше спроведено и експериментално истражување на модел на идеална косина во голем размер изложена на интензивни врнежи. За да се утврди развојот на влажноста, сукцијата, порниот, тоталниот притисок и деформациите, истата беше инструментирана со различни сензори за мерење на промените во пет карактеристични точки. Резултатите имаа клучен придонес во потврдувањето на основните тези во оваа докторска дисертација, за подобро разбирање на ефектите во косината кои се јавуваат како резултат на инфилтрацијата. Како позначајни согледувања можат да се издвојат следните:

- Инфилтрацијата на вода започнува уште на почетокот на тестот и истата се зголемува за време на тестот со воочено зголемување на брзината на инфилтрација;
- Забележано е зголемување на влажноста најпрво во незаситениот дел од косината, но истата во текот на тестот останува помала од влажноста при целосна заситеност на материјалот која е регистрирана само во ножицата и зоната непосредно над нивото на подземна вода. Ова укажува дека за цело времетраење на тестот, водата се филтрира низ косината во подолните слоеви, односно не е забележано нејзино задржување во погорните слоеви;
- Пред започнувањето на тестот, сукцијата има највисока вредност на врвот на косината, а најниска на дното на косината, блиску до НПВ. Значителен и брз пад во сукцијата се забележува со заситувањето на материјалот при инфилтрација на вода од врнежите;
- Порниот воден притисок бавно расте во тек на времето. Најголемата промена е забележана во ножицата на косината. Промената започнува за време од 330 min од почетокот на тестот, што е со задоцнување од околу 70 минути од регистрираните промени на волуметриската влажност на истото место, што е резултат на ослободувањето и на заробениот воздух во порите. Од истите причини, порниот притисок во зоната под косината и над НПВ расте по завршувањето на врнежите;
- Појавата на пукнатини се случува уште во првиот час од испитувањето. Значителна пукнатина се забележува по 75 минути од почетокот на тестот на круната на косината, по целата нејзина ширина. Оваа челна пукнатина може да се смета како иницијална која го дефинира почетокот на формирањето на рамнина на лизгање. По 410 минути од почетокот на тестот, во ножицата на косината се јавува проток на вода од внатрешноста на косината која подоцна предизвикува значителна суфозија на материјалот и негово наталожување во ножицата. Освен тоа, забележан е развој на тензиони пукнатини во ножицата кои доведуваат до регресивен механизам на лом на косината;
- Максималните регистрирани деформации се доминантно вертикални и се јавуваат на врвот на косината. Во ножицата е забележано таложје на материјалот, мал дел еродиран од косината и поголем дел како резултат на внатрешно измивање/испирање/суфозија преку пукнатини. Максималното слегање на челото на косината измерено со ласерски скенер изнесува 19.27 cm, додека максималното наталожување на материјал во ножицата 11.38 cm. Сепак, во крајната фаза од испитувањето регистриран е развој на кружно цилиндрична пукнатина со длабочина од 30 cm по која конечно се јавува колапсот на косината.

Во следниот чекор, врз основа на резултатите и сознанијата добиени од физичкиот модел, дефиниран е нумерички модел со примена на МКЕ кој е калибриран

со експерименталниот модел за да го симулира реалното однесување на незаситената почвена косина при интеракцијата со врнежите. Со него е спроведена интегрирана пресметка на деформациите и филтрацијата (fully coupled flow-deformation analysis) со временски зависни гранични услови. Главната предност на нумеричкото моделирање е тоа што со неа се добива целосна слика за развојот на хидромеханичките променливи во текот на време и во воспоставување на нивната врска согласно теоријата на Бишоп во дефинирањето на ефективниот притисок која ја вклучува сукцијата и степенот на заситеност на почвата. За механичко моделирање користен е наједноставниот Мор-Кулонов закон, а акцентот е ставен врз дефиницијата на хидрауличниот модел преку примена на кривата на задржување на почвена влажност (SWRC) и функцијата на хидрауличната спроводливост како зависност на сукцијата и коефициентот на водопропусност. Нумеричкиот модел со голема прецизност го симулира комплексното однесување на незаситената почва, а резултатите покажуваат дека:

- Максимална сукција пред врнежите се јавува на врвот на косината, додека за време на врнежите истата опаѓа, а најголема на крајот на тестот се јавува во делумно заситената зона во внатрешноста на косината над подигнатото ниво на подземна вода;
- Промената на степенот на заситеност започнува веднаш по аплицирањето на врнежите како резултат на инфилтрацијата. Минималниот почетен степен на заситеност на врвот на косината изнесува 16.89 %. Со зголемување на инфилтрацијата незаситената зона се намалува и одговара на онаа од физичкиот модел. На крајот на тестот минималниот степен на заситеност изнесува 24.2 %;
- Порниот воден притисок благо расте до моментот на постигнување на целосна заситеност по што следат промени поради промената во заситеноста како резултат на ефектот од деформациите и дренирањето;
- Максимален прираст на деформациите е забележан помеѓу 5 000 и 10 000 секунди од почетокот на врнежите. До крајот на тестот истите бавно растат и се изразени во ножицата на косината. Појавата на пластични точки и местоположбата на максималните дилатации уште пред 5000 секунди од почетокот на тестот ја најавуваат почетната рамнина на лизгање. Тие се најгусти во ножицата на косината и долж рамнината на лизгање;
- Анализата на стабилност е извршена преку редуција на јакосните параметри на почвата. Факторот на сигурност изнесува 1.037 што е многу блиску до граничната состојба на рамнотежа на косината.

Следно, резултатите од физичкиот и нумеричкиот модел се споредливи со помали отстапувања, но со задоволителна точност помала од 10% кај сукцијата и степенот на заситеност. Оттука, со споредбената анализа се потврдува оправданоста на воспоставениот конститутивен модел за заедничката анализа на деформации и струење/филтрација.

На крајот, сите претходно утврдени сознанија од моделските испитувања на идеалната косина се искористени за да се анализира стабилноста на низводната косина на браната Тополница. Анализата е извршена за проектниот дожд со земање предвид на филтрациона линија добиена од спроведениот мониторинг. Нумеричката симулација покажува дека низводната косина на браната е стабилна, но влијанието од интензивните врнежи ја намалува стабилноста изразена преку факторот на сигурност. Добиените резултати, иако задоволителни во смисла на глобалната стабилност, укажуваат на значајното влијание на инфилтрираната вода која предизвикува релативно брзо заситување на површинскиот материјал и дефинира потенцијално нестабилни зони. Ова

е видливо и преку фактот што е добиено 15 % редукција на коефициентот на сигурност за дадената геометрија. Во зависност од времетраењето на врнежите и почетниот степен на заситеност на материјалот, може да се очекува целосно заситување на површинските слоеви на косината, течење на неинфилтрираната вода по косината, а со тоа и формирање на локални јаружења, како што се забележани на самата брана после интензивни врнежи.

Како генерален заклучок треба да се истакне дека добиени се основани резултати кои ја потврдуваат првично поставената теза дека врнежите може да имаат значајно влијание врз дестабилизацијата на приповршинските слоеви кај косините на кои почетно се јавува ерозија, што преминува во развој на локални нестабилности и кои конечно завршуваат со глобален лом и свлекување на теренот. Од истражувањето може да се заклучи дека времетраењето на врнежите и почетниот степен на заситеност на материјалот имаат значајно влијание, па доколку истите се променат и доведат до целосно заситување на површинските слоеви на косината, ќе предизвикаат течење на неинфилтрираната вода по косината и формирање на локални јаружења, како што, впрочем, во минатото се забележани на самата брана по интензивни врнежи. Добиените резултати укажуваат дека глобалниот степен на сигурност кај косините после еден критичен настан дефиниран со меродавен интензитет и времетраење на врнежи може да доведе до негово намалување за 10% до 30% зависно од геометријата и материјалот на косината.

Исто така, покрај заклучоците се презентираат и одредени препораки кои треба да го подигнат нивото на проектирање на инженерските косини во иднина преку вклучување на ефектите од атмосферските влијанија што ќе придонесе за постабилни и побезбедни косини кај инфраструктурните објекти, и тоа:

- За карактеристични профили да се спроведе анализа на стабилноста на косините која ќе ја земе предвид веројатноста од појава на критични интензивни врнежи и ефектите од нив;
- Да се посвети повеќе внимание на вегетациска заштита на косините што ќе ја намали или спречи површинската инфилтрација на вода од атмосферските влијанија;
- Да се применуваат геосинтетичките заштити во вид на мрежи кои ќе ја спречат ерозијата на материјалот од стрмните косини;
- Да се проектираат соодветни дренажни системи со капацитет да ја одведат целосно површинската вода од косините и истите да се одржуваат.

Основниот придонес на оваа докторска дисертација се гледа во оценката на влијанието на инфилтрираната вода врз влажноста, сукцијата и евапотранспирацијата кои, како што беше согледано, имаат значајно влијание врз стабилноста на косините кога се изложени на интензивни врнежи.

Во понатамошните истражувања за унапредување на пресметковниот модел се препорачува да се моделира и влијанието на ниската и високата вегетација на косините и вклучи влијанието на температурата преку ефектот на евапотранспирација кои се очекува да имаат влијание врз почетната влажност и сукција на материјалот. Одредени унапредување се можни и со примена на пософистицирани материјални конститутивни модели како што е „Basic Barcelona” моделот достапен само во Code Bright софтверот.

Литература

- Alam, M., Emura, K., Farnham, C. & Yuan, J., 2018. Best-fit probability distributions and return periods for maximum monthly rainfall in Bangladesh. *Climate*, 6(1), p. 9.
- Alonso, E. E., 1987. *Special problem soils, General Report*. Rotterdam, the Netherlands, Balkema.
- Alonso, E. E., Canete, A. & Olivella, S., 2002. *Moisture transfer and deformation behaviour of pavements: effect of climate, materials and drainage*. Н.М., 3rd International Conference on Unsaturated Soils.
- Alonso, E. E., Gens, A. & Delahaye, C. H., 2003. Influence of rainfall on the deformation and stability of a slope in overconsolidated clays: a case study. *Hydrogeology journal*, 11(1), pp. 174-192.
- Alonso, E. E., Gens, A. & Josa, A., 1990. A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), pp. 405-430.
- Askarinejad, A. и др., 2012. *Physical modelling of rainfall induced landslides undercontrolled climatic conditions*. Delft, Netherlands, Delft University of Technology and Deltares.
- Azmi, M., Yusoff, S. A., Ramli, M. H. & Hezmi, M. A., 2016. Soil Water Characteristic Curves (SWCCs) of Mining Sand. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Том 21, pp. 6987-6997.
- Baker, R. & Frydman, S., 2009. Unsaturated soil mechanics: Critical review of physical foundations. *Engineering Geology*, 106(1-2), pp. 26-39.
- Bandara, S. & Soga, K., 2015. Coupling of soil deformation and pore fluid flow using material point method. *Computers and geotechnics*, Том 63, pp. 199-214.
- Bharat, T. V., 2017. *nptel.ac.in/courses/105103139/*. [Мрежен]
Available at: <http://nptel.ac.in/courses/105103139/>
[Пристапено на 24 5 2017].
- Biot, M. A., 1941. General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of applied physics*, 12(2), pp. 155-164.
- Bishop, A. W., 1959. The principles of effective stress. *Teknisk Ukeblad*, 106(39), p. 859–863.
- Bishop, A. W. & Blight, G. E., 1963. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. *Geotechnique*, 13(3), pp. 177-197.
- Booker, J. R. & Small, J. C., 1975. An investigation of the stability of numerical solutions of Biot's equations of consolidation. *International Journal of Solids and Structures*, 11(7-8), pp. 907-917.
- Brooks, R. & Corey, T., 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers*, 1(3), pp. 1-27.
- Carsel, R. F. & Parrish, R. S., 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water resources research*, 24(5), pp. 755-769.
- Cascini, L., Cuomo, S., Pastor, M. & Sorbino, G., 2010. Modeling of rainfall-induced shallow landslides of the flow-type. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), pp. 85-98.

Chen, L. & Young, M. H., 2006. Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces. , 42(7).. *Water resources research*, 42(7), pp. 1-9.

Cho, S. E. & Lee, S. R., 2001. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration. *Computers and geotechnics*, 28(3), pp. 185-208.

Chueasamat, A., Hori, T., Saito, H. & Kohgo, Y., 2018. Experimental tests of slope failure due to rainfalls using 1g physical slope models. *Soils and Foundations*, 58(2), pp. 290-305.

De Paola, F., Giugni, M., Topa, M. E. & Bucchignani, E., 2014. Intensity-Duration-Frequency (IDF) rainfall curves, for data series and climate projection in African cities. *SpringerPlus*, 3(1), p. 133.

dhakatribune.com, 2013. *dhakatribune.com*. [Мрежен]
Available at: <https://www.dhakatribune.com/uncategorized/2013/07/20/brahmaputra-gulps-down-300-houses-in-two-days>
[Пристапено на 19 04 2020].

digitalatlas.cose.isu.edu, 2017. *digitalatlas.cose.isu.edu*. [Мрежен]
Available at: <https://digitalatlas.cose.isu.edu/hydr/concepts/gwater/gwtrvw.htm>
[Пристапено на 2017].

Dogan, A. & Motz, L. H., 2005. Saturated-unsaturated 3D groundwater model. I: Development. *Journal of Hydrologic Engineering*, 10(6), pp. 492-504.

Duncan, J. M., Wright, S. G. & Brandon, T. L., 2014. *Soil strength and slope stability*. H.M.: John Wiley & Sons.

Durner, W., 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water resources research*, 30(2), pp. 211-223.

Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, 2020. *www.meteoswiss.admin.ch*. [Мрежен]
Available at: <https://www.meteoswiss.admin.ch/home/climate/the-climate-of-switzerland/rekorde-schweiz.html>
[Пристапено на 11 4 2020].

Fredlund, D. G., 2016. State variables in saturated-unsaturated soil mechanics. *Soils and Rocks*, 39(1), pp. 3-17.

Fredlund, D. G. & Krahn, J., 1977. Comparison of slope stability methods of analysis. *Canadian geotechnical journal*, 14(3), pp. 429-439.

Fredlund, D. G. & Morgenstern, N. R., 1977. Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 103(ASCE 12919), pp. 447-466.

Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. & Widger, R. A., 1978. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian geotechnical journal*, 15(3), pp. 313-321.

Fredlund, D. G. & Rahardjo, H., 1993. *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York: John Wiley & Sons, Inc..

Fredlund, D. G., Rihardjo, H. & Fredlund, M. D., 2012. *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc..

Fredlund, D. G. & Xing, A., 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal*, 31(4), pp. 521-532.

Fredlund, D. G., Xing, A., Fredlund, M. D. & Barbour, S. L., 1996. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), pp. 440-448.

Galavi, V., 2010. *Groundwater flow, fully coupled flow deformation and undrained analyses in PLAXIS 2D and 3D*, н.м.: Plaxis Report.

Gallipoli, D., Gens, A., Sharma, R. & Vaunat, J., 2003. An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour. *Géotechnique*, 53(1), pp. 123-135.

Gonzalez, N. & Gens, A., 2008. *Implementation of unsaturated soil model in Plaxis.*, н.м.: Plaxis Report .

google.com/maps, 2019. google.com/maps. [Мрежен]
Available at: <http://google.com/maps>
[Пристапено на 2019].

Green, W. H. & Ampt, G. A., 1911. Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), pp. 1-24.

Hartge, K. H. & Horn, R., 2016. *Essential Soil Physics: An introduction to soil processes, functions, structure and mechanics*. н.м.:Schweizerbart Sche Vlgsgb..

Jia, G. W., Tony, L. T. Z., Chen, Y. M. & Fredlund, D. G., 2009. Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering. *Engineering Geology*, Том 106, pp. 92-103.

Kosugi, K. I., 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, 32(9), pp. 2697-2703.

Lazarevski, A., 1967. *Intensity of heavy precipitation in Macedonia*. Skopje: Republic Hydro Meteorological Institute.

Lloret, A. & Alonso, E. E., 1980. Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behaviour. *Géotechnique*, 30(4), pp. 449-477.

Lu, N. & Likos, W. J., 2004. *Unsaturated soil mechanics.* н.м.:Wiley.

Meter Group, 2020. Knowledge Base. [Мрежен]
Available at: <https://www.metergroup.com>
[Пристапено на 2020].

Milevski, I. & Dragicevic, S., 2018. *GIS-based landslide susceptibility modelling of the territory of the Republic of Macedonia*. Sozopol, Bulgaria, Bulgarian Cartographic Association.

Montoya-Domínguez, J. D., García-Aristizábal, E. F. & Vega-Posada, C., 2016. Effect of rainfall infiltration on the hydraulic response and failure mechanisms of sandy slope models. *Revista Facultad de Ingeniería*, 25(43), pp. 97-109.

Morgenstern, N. U. & Price, V. E., 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15(1), pp. 79-93.

Mualem, Y. A., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12(3), pp. 513-522.

Nemes, A., Schaap, M. G. & Leij, F. J., 1999. <https://data.nal.usda.gov>. [Мрежен]
Available at: <https://data.nal.usda.gov/dataset/unsoda-20-unsaturated-soil-hydraulic-database->

[database-and-program-indirect-methods-estimating-unsaturated-hydraulic-properties/resource/507c6dee-832a-4bc1-beb7-3aa62bf5d7bd](https://www.pce-instruments.com/database-and-program-indirect-methods-estimating-unsaturated-hydraulic-properties/resource/507c6dee-832a-4bc1-beb7-3aa62bf5d7bd)
[Пристапено на 2020].

Olivella, S., Gens, A., Carrera, J. & Alonso, E. E., 1996. Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. *Engineering Computations*, 13(7), pp. 87-112.

pce-instruments, 2019. *pce-instruments.com*. [Мрежен]
Available at: <https://www.pce-instruments.com>
[Пристапено на 05 05 2019].

Pérez-Foguet, A., Rodríguez-Ferran, A. & Huerta, A., 2001. Consistent tangent matrices for substepping schemes. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 190(35-36), pp. 4627-4647.

Peshevski, I., Jovanovski, M., Papic, J. & Abolmasov, B., 2015. Model for GIS landslide database establishment and operation in Republic of Macedonia. *Geologica Macedonica*, 29(1), pp. 75-86.

Rahardjo, H., Ong, T. H., Rezaur, R. B. & Leong, E. C., 2007. Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(12), pp. 1532-1543.

Rawat, A., 2019. *Couple Hydro-mechanical Behaviour of a Compacted Bentonite-Sand Mixture: Experimental and Numerical Investigations*. Bochum: Ruhr Univeristy Bochum.

Richards, L. A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), pp. 318-333.

Saha, A., Sekharan, S. & Manna, U., 2020. Evaluation of Capacitance Sensor for Suction Measurement in Silty Clay Loam. *Geotechnical and Geological Engineering*, pp. 1-13.

Schweiger, H. & Hamdhan, I. N., 2011. *Slope stability analysis of unsaturated soil with fully coupled-deformation analysis*. Salzburg, IAMG.

Seki, K., 2007. SWRC fit—a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4(1), pp. 407-437.

Sheng, D., Sloan, S. W., Gens, A. & Smith, D. W., 2003. Finite element formulation and algorithms for unsaturated soils. Part I: Theory. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 27(9), pp. 745-765.

Shkoklevski, Z. & Todorovski, B., 1993. *Intensity rainfalls in Republic of Macedonia*. Skopje: Ss. Cyril and Methodius University, Faculty of Civil Engineering.

Spolverino, G., Capparelli, G. & Versace, P., 2019. An Instrumented Flume for Infiltration Process Modeling, Landslide Triggering and Propagation. *Geosciences*, 9(3), p. 108.

Susinov, B. & Josifovski, J., 2018. *Investigation of the hydro-mechanical properties of silty sand material from Topolnica tailings dam*. Skopje, ce/papers, pp. 797-802.

Susinov, B., Josifovski, J. & Naumovski, M., 2019. *Hydrological analysis of high intensity rainfalls over Topolnica tailing dam*. Skopje, Ss. Cyril and Methodius University, Civil Engineering Faculty – Skopje.

uhmr.gov.mk, 2016-2020. uhmr.gov.mk. [Мрежен]
Available at: <https://uhmr.gov.mk/aktuelni-podatoci/>
[Пристапено на 2016-2020].

Van Genuchten, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *1. Soil science society of America journal*, 44(5), pp. 892-898.

Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. & Clifton, A. W., 1996. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian geotechnical journal*, 33(3), pp. 379-392.

Yuan, K. Y. & Ju, J. W., 2013. New strain energy-based coupled elastoplastic damage-healing formulations accounting for effect of matric suction during earth-moving processes. *Journal of Engineering Mechanics*, 139(2), pp. 188-199.

Zhang, L. и др., 2018. *Rainfall-induced soil slope failure: stability analysis and probabilistic assessment*. 1 ур. н.м.:CRC Press.

Zhang, R., 1997. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 61(4), pp. 1024-1030.

Zhan, L., 2003. *Field and laboratory study of an unsaturated expansive soil associated with rain-induced slope instability*, н.м.: Doctoral dissertation.

Јовановски, М., Гапковски, Н., Пешевски, И. & Аболмасов, Б., 2012. *Инженерска геологија*. 1 ур. Скопје: Градежен факултет.