

ZASNOVA IN IZDELAVA FIZIČNEGA SIMULATORJA DEŽJA: INTERDISCIPLINARNI ŠTUDENTSKI PROJEKT

Mateja Klun¹, Klaudija Lebar², Katarina Zabret³, Andrej Zdešar⁴

Povzetek

V prispevku so predstavljene aktivnosti interdisciplinarnega študentskega projekta za trajnostni razvoj, v katerem smo sodelovali mentorji in študenti s Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, Fakultete za elektrotehniko in Inštituta za vode Republike Slovenije. Izdelali smo fizični simulator dežja, ki omogoča raziskave padavin, erozije tal in prestrezanja padavin. Rezultat projekta je delujoč prenosni simulator dežja, ki bo uporabljen v raziskovalne in pedagoške namene, saj študentom omogoča pomemben vpogled v hidrometeorološke procese in boljše razumevanje njihovih morebitnih posledic, ki se v naravi lahko odrazijo v obliki ujm (npr. poplave in zemeljski plazovi). V prispevku so na kratko predstavljeni glavni cilji projekta in izvedene projektne aktivnosti, ki so bile potrebne za izdelavo fizičnega simulatorja dežja.

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A PHYSICAL RAINFALL SIMULATOR: AN INTERDISCIPLINARY STUDENT PROJECT

Abstract

This paper presents the activities of an interdisciplinary student project for sustainable development, which involved mentors and students from the Faculty of Civil and Geodetic Engineering and Geodesy, the Faculty of Electrical Engineering, and the Institute for Water of the Republic of Slovenia. We designed and assembled a physical rainfall simulator, which enables research into rainfall, soil erosion, and rainfall interception. The project has resulted in a working portable rainfall simulator which can be used for both research and teaching purposes, as it provides students with valuable insights into hydro-meteorological processes and a better understanding of their potential consequences, which in nature can be reflected in the form of hazards (e.g. floods and landslides). This paper briefly outlines the main objectives of the project and the project activities carried out to produce the physical rainfall simulator.

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova c. 2, Ljubljana, mateja.klun@fgg.uni-lj.si

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova c. 2, Ljubljana, klaudija.lebar@fgg.uni-lj.si

³ Inštitut za vode Republike Slovenije, Einspielerjeva ul. 6, Ljubljana, katarina.zabret@izvrs.si

⁴ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška c. 25, Ljubljana, andrej.zdesar@fe.uni-lj.si

UVOD

V okviru razvojnega stebra financiranja Univerze v Ljubljani (UL) je bil leta 2022 objavljen razpis za študentske projekte za trajnostni razvoj v okviru ukrepa »Vključevanje lokalnih, regionalnih in globalnih izzivov trajnostnega razvoja, interdisciplinarnosti in STEAM pristopov v študijski proces« (UL, 2022). Z razpisom je bila dana pobuda za pripravo projektov, s katerimi bi spodbudili sodelovanje in povezovanje Univerze v Ljubljani z okoljem (gospodarskimi in negospodarskimi subjekti) na področju trajnostnega razvoja za doseg ciljev Agende za trajnostni razvoj do leta 2030 (UN, 2015). S projektom naj bi obravnavali kompleksne praktične izzive z interdisciplinarnim pristopom (sodelovanje študentov različnih fakultet in študijev), študenti pa bi s sodelovanjem pri projektu pridobili nova znanja in kompetence ter praktične

izkušnje z uporabo inovativnega, problemskega in skupinskega razvoja (UL, 2022).

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Fakulteta za elektrotehniko (članici UL) in Inštitut za vode Republike Slovenije (IzVRS) so bili uspešni s kandidaturo projektne predloga z naslovom »Zasnova in izdelava fizičnega simulatorja dežja«. Padavine so eden najpomembnejših členov vodne bilance, saj s količino vplivajo na razpoložljivost ali pomanjkanje vode. Poleg količine padavin pa je za oceno vplivov na številne posredno in neposredno odvisne ekosistemске storitve (npr. varstvo pred naravnimi nesrečami, kmetijstvo, oskrba s pitno vodo) ključno poznavanje tudi drugih lastnosti padavin, kot so intenziteta, trajanje in velikost, hitrost ter število dežnih kapljic. Ker je zagotavljanje zelenih raziskovalnih pogojev dežja v naravi nemogoče, se v praksi za tovrstne študije

uporabljajo fizični simulatorji padavin, ki omogočajo nadzorovane pogoje eksperimenta (kje, kdaj in koliko) (Rončević in sod., 2022).

POMEN SIMULATORJA DEŽJA

Zgodovina razvoja in uporabe fizičnih simulatorjev dežja sega v konec 19. stoletja in začetek 20. stoletja, zaradi strateškega pomena vode in tal pa ostaja raziskovalno področje aktivno še danes. V dobrih 120 letih razvoja in raziskav je bilo izdelanih in preskušanih veliko fizičnih simulatorjev dežja. Glavni razlogi za številčnost in prizadevanja za razvoj novih simulatorjev so v neustreznem posnemanju lastnosti naravnih padavin. Pri simulatorjih, ki delujejo na principu izkoriščanja sile teže (angl. *gravity-driven rainfall simulators*), sta po navadi zaradi navzgor omejene višine namakanja hitrost padanja in kinetična energija dežnih kapljic prenizki, poleg tega pa so ustvarjene kapljice prevelike v primerjavi z naravnim dežjem, pri katerem premer kapljic navadno dosega vrednosti med 0,5 in 6 mm (Mhaske in sod., 2019). Simulatorji, pri katerih je v proces delovanja vključena tudi črpalka (angl. *pressure-driven rainfall simulators*), sicer ne zahtevajo velikih višin za vnos dežja na raziskovalno ploskev, so pa njihove pomanjkljivosti ravno obratne kot pri prej opisanih simulatorjih: hitrosti padanja in intenzitete so velike, generirane kapljice pa majhne glede na dež v naravi (Fernández-Raga in sod., 2022). Pri takih simulatorjih dežja so vodne kapljice ustvarjene s pomočjo pršilnih šob, ki se med seboj ločijo po velikosti odprtine, šobe pa so lahko v sistem nameščene fiksno ali na nihalu (Kavka in Neumann, 2021). Sistem povezanih komponent simulatorjev je precej odvisen tudi od vrste rabe, predvsem ali gre za laboratorijske ali terenske raziskave.

Raziskave procesov, povezanih s padavinami, so lahko zelo dolgotrajne in ne prinesejo želenih rezultatov, saj na naravno dinamiko padavin ne moremo vplivati. S simulatorjem padavin pa lahko izvedemo raziskave, ki so ponovljive, izvedene v želenih razmerah in časovnih okvirih ter pod določenimi pogoji. To pomeni, da lahko na primer tudi v sušnih razmerah poustvarimo zelo močan in intenziven naliv s povratno dobo nekaj deset let in to tudi večkrat ponovimo.

Eksperimenti z različno zasnovanimi fizičnimi simulatorji dežja so pogosto uporabljeni za razumevanje razvoja naravnih nesreč in posledično za načrtovanje ustreznih ukrepov zmanjševanja tveganj za naravne nesreče ter za načrtovanje ukrepanja sil za zaščito

in reševanje. Tako na globalni ravni kot v Sloveniji med naravnimi nesrečami največjo škodo povzročajo poplave (npr. Komac, 2021; Zorn in Hrvatin, 2015), ki so lahko posledica različnih vzrokov. Med slednjimi so tudi padavine, ki padejo na snežno odejo in povzročijo taljenje snega ter tako bistveno povečajo odtok vode, kakršen bi bil ob samostojnem taljenju snega ali dežnih padavin (Merz in Blöschl, 2003; Sezen in sod., 2020). Tako so Juras in sodelavci (2012) izdelali simulator, s katerim so z različnimi lastnostmi pršenja dežja na vzorce snežne odeje ugotavljali časovne zamike začetka taljenja od začetka padavin in čas do konice odtoka. To je zanimivo tudi za slovenske razmere, kjer je po pesimističnem scenariju RCP8.5 v prihodnje glede na obdobje 1981–2010 pričakovati povečanje padavin v zimskih mesecih za do 40 %, vendar ne nujno v obliki snega (Lokošek in Kozjek Mihelc, 2022).

Urbanizacija in ekstremni padavinski dogodki, ki bodo glede na napovedi podnebnih sprememb postali še pogostejši, so glavni vzroki za tako imenovane pluvialne poplave. Zaradi zmanjševanja ogroženosti pred poplavami na urbanih območjih so Isidoro in sodelavci (2022) uporabili simulator dežja za določitev poplavnih valov (odtekanje vode z neprepustne površine) ob različnih intenzitetah dežja. Kot učinkovite rešitve izboljšanja odvajanja padavinskih voda z urbanih območij in s tem zmanjševanja ogroženosti pred pluvialnimi poplavami postajajo vse bolj priljubljene tako imenovane sonaravne, trajnostne in zelene ali modro-zelene rešitve (npr. Radinja in sod., 2017). Nielsen in sodelavci (2019) so s prenosnim avtomatiziranim simulatorjem dežja določali padavinski odtok in infiltracijo na urbanih zelenih (travnatih) površinah. Ugotovili so, da je tak simulator dežja lahko uporaben tudi pri načrtovanju ukrepov odvodnjavanja padavinskih voda v mestih. Coleri in sodelavci (2013) pa so simulator uporabili za preizkušanje zamašitve por poroznih tlakov, ki se uporabljajo kot eden izmed pristopov modro-zelenih rešitev, saj omogočajo infiltracijo padavinske vode. Za ustvarjanje in spremljanje površinskega odtoka se dežni simulator uporablja tudi v naravnem okolju. Na Sardiniji so dinamiko odtoka s simuliranimi padavinami spremljali Corona in sodelavci (2013), medtem ko so ga v Alpah za analize vpliva rabe tal na površinski odtok uporabili Mayerhofer in sodelavci (2017).

Simulatorji dežja so pogosto uporabljeni tudi v raziskavah vpliva dežja na tla oziroma zemljino. Tako so Khalifa in sodelavci (2023) uporabili simulator padavin pri ocenjevanju stopnje erozivnosti na opuščenih

rudarskih območjih, Sanchez Macedo in sodelavci (2021) pri ugotavljanju vpliva različnih padavinskih dogodkov na erodiranje zemljine na območju regije Seropédica v Braziliji, Mhaske in sodelavci (2019) pa so vpliv dežja na erozijo zemljine s simulatorjem proučevali v laboratoriju. Različne padavinske vzorce so zaradi spremljanja izpiranja zemljine in hranil s simulatorjem poustvarjali Sales Alves in sodelavci (2023), za oceno najboljših praks za zmanjševanje izgube zemljine in sedimentov po izvedeni poseki gozda pa sta ga uporabila Wallbrink in Croke (2002). V povezavi s tem je bila opravljena tudi vrsta raziskav, povezanih z zemeljskimi plazovi. Lora in sodelavci (2016) so simulator dežja z več pršilniki uporabili na umetnem pobočju, kjer so analizirali sprožilne mehanizme plazu pod vplivom visokih intenzitet dežja. Podobno so Morawaki in sodelavci (2004) spremljali razvoj plazenja pod vplivom visokointenzivnih padavin (100 mm/h). Z uporabo dodatne opreme in opazovanj, kot so kamere s hitrim zajemom slik in piezometri, pa so dobili tudi vpogled v časovno dinamiko sprememb tlakov vode pod površino.

METODE

Zasnova in izdelava fizičnega simulatorja dežja sta potekali pod mentorstvom treh pedagoških mentorjev s področij vodarstva in okoljskega inženirstva (UL FGG) in elektrotehnike (UL FE) ter enega delovnega mentorja (IzVRS). Glavnino dela je opravilo šest študentov študijskih smeri vodarstva in okoljskega inženirstva ter elektrotehnike. Čas za doseg cilja je bil kratek (tri mesece), zato je bilo načrtovanje projektnih dejavnosti ključno za uspešno izvedbo, pri čemer je treba poudariti, da so študenti projektne dejavnosti izvajali ob rednih študijskih obveznostih, kar je bilo precej zahtevno pri usklajevanju časovnic posameznih sodelujočih pri projektu. Izvedbo projekta lahko razdelimo v štiri faze:

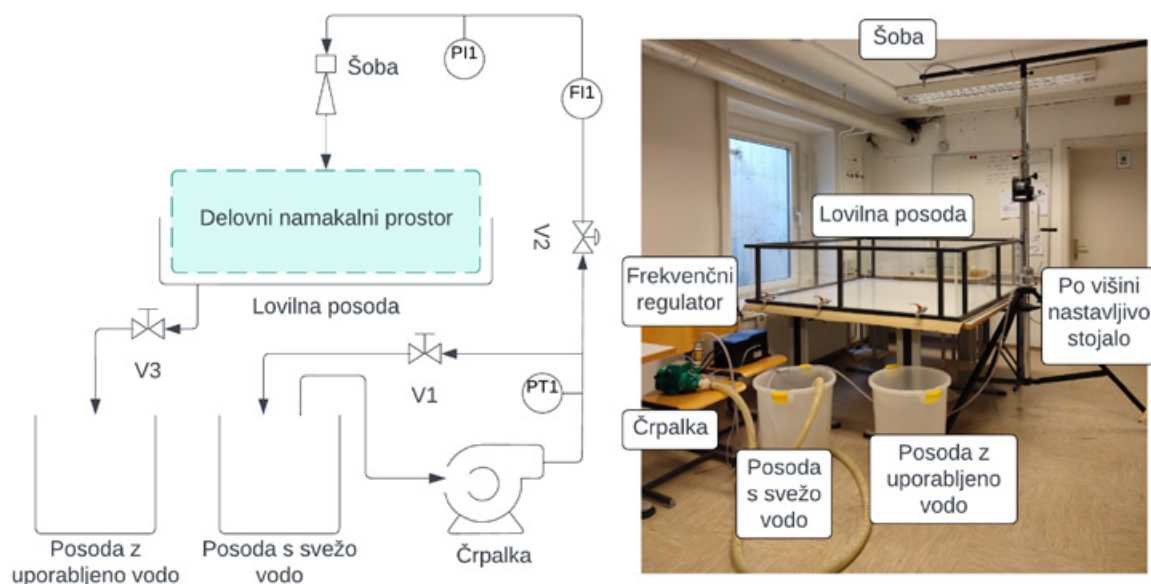
- pregled literature s poudarkom na prednostih in pomanjkljivostih sedanjih fizičnih simulatorjev dežja in popis potrebnih komponent celotnega sistema in informacij o lastnostih simuliranega dežja (npr. velikost kapljic, intenziteta dežja, kinetična energija dežja, površina namakanja),
- zasnova fizičnega simulatorja dežja ob upoštevanju pregledane literature, popis potrebnih komponent sistema,
- postavitve fizičnega simulatorja dežja, sestavljanje posameznih komponent, delno testiranje in prilagajanje prvotno določenih komponent,
- testiranje fizičnega simulatorja dežja.

V naslednjih poglavjih so podrobneje predstavljene zadnje tri točke.

S sodelovanjem pri projektu so študenti pridobili nove kompetence, tako specifične poklicne kot splošne kompetence. Specifične poklicne kompetence so se razlikovale glede na vlogo, ki so jo študenti imeli v okviru projektnih dejavnosti, celotna skupina pa je pridobila nova znanja in poglobila razumevanje vpliva podnebnih sprememb na vodni krog. Študenti UL FGG so pridobili tudi kompetence, kot so razumevanje vplivov namakanja na okolje, priprava in izvedba eksperimentov, razumevanje vpliva padavin na proces erozije tal in mehanizmov erozije ter seznanitev s procesom razvoja merilne opreme. Študenti UL FE pa kompetence, kot so načrtovanje arhitekture sistemov (strojna in programska oprema), znanje o industrijskih gradnikih sistemov vodenja (senzorji, aktuatorji in krmilniki), načrtovanje krmilnih in regulacijskih sistemov za vodenje in nadzor, delo z vgradnimi sistemi in uporaba programskih orodij za računalniško podprto inženirstvo. Glavne splošne kompetence, ki so jih razvijali s sodelovanjem pri projektu, so delo v interdisciplinarni skupini in sodelovalno učenje, ki sta obsegala izmenjavo znanj posameznih področij ter skupinsko reševanje problemov, eksperimentalno delo v laboratoriju, sistematični pristop in členitev dela, interpretacija rezultatov eksperimenta in prenos rezultatov simulacij v naravo ter priprava tehnične dokumentacije. Sodelovanje pri projektu je bilo študentom tudi priznано kot obštudijska dejavnost v obsegu štirih kreditnih točk.

ZASNOVA FIZIČNEGA SIMULATORJA DEŽJA

Osnovni sestavni del fizičnega simulatorja dežja je hidravlični sistem, ki z ustvarjanjem ustreznega tlaka na šobi zagotavlja primerno pršenje vode oziroma simulacijo dežja nad namakalnim prostorom (slika 1). Namakalni prostor je sestavljen iz odprte prozorne posode, ki lovi padavine in omogoča iztok vode. V lovilni posodi, ki predstavlja delovni prostor za izvajanje eksperimentov, je mogoče pripraviti ustrezno podlago oziroma okolje, ki ga želimo proučevati pod vplivom padavin. Lahko gre za pripravljeno večplastno strukturo zemljine, pri čemer lahko opazujemo pronicanje padavin ali erozijo podlage. Podlaga je lahko ravna ali reliefna, lahko vsebuje (pomanjšane) fizične modele stavb in/ali naselij. V posodo lahko vstavimo tudi rastline za proučevanje vpliva padavin na omočenost podlage. Zasnova fizičnega simulatorja torej



Slika 1: Shema zasnovanega sistema (levo) in izdelani fizični simulator dežja z označenimi komponentami (desno)

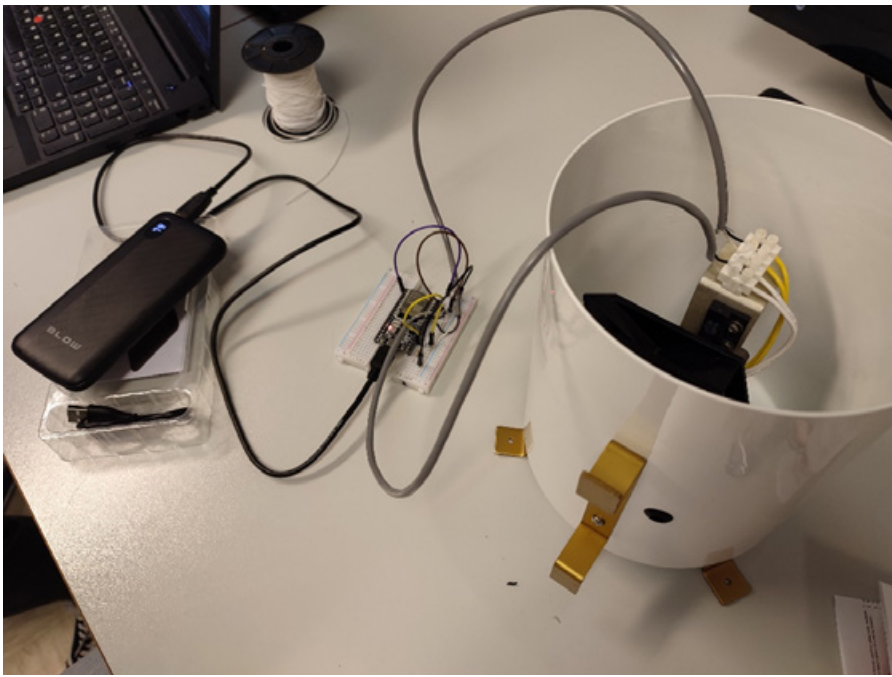
Figure 1: Diagram of the designed system (left) and the constructed physical rainfall simulator with labelled components (right)

omogoča izvedbo različnih eksperimentov v kontroliranih laboratorijskih pogojih. Gre za precej majhno laboratorijsko napravo, ki je uporabna predvsem za manjše situacijske študije in eksperimentalno preverjanje hipotez. Namen izdelave sistema je bil predvsem študija umetnih padavin, ki jih lahko ustvarimo s fizičnim simulatorjem dežja. Sistem smo zasnovali modularno, tako da bi ga lahko v prihodnosti brez težav nadgradili in povečali tudi za izvedbo na večjih območjih. Želeli smo tudi, da je sistem prenosljiv in ga je mogoče uporabiti tudi na terenu v naravnem okolju.

Osrednji del simulatorja dežja je škropilni sistem (slika 1). Centrifugalna radialna črpalka črpa vodo iz rezervoarja (posoda s svežo vodo) in jo po cevi pretaka skozi šobo, ki je nad namakalnim prostorom (lovilno posodo). Sistem vsebuje še nekaj dodatnih ročnih ventilov, ki omogočajo preusmeritev pretoka vode s šobe nazaj v posodo na vtoku (posoda s svežo vodo) oziroma iztoku (posoda z uporabljen vodo), kar je uporabno predvsem pri zagonu in testiranju sistema. Pred pršilno šobo sta nameščena še senzorja tlaka in pretoka. Črpalka je regulirana s frekvenčnim pretvornikom, ki skrbi za regulacijo tlaka v sistemu. Regulacijski sistem vsebuje zaščitne mehanizme pred mrtvim tekom in preobremenitvijo in tako omogoča, da nastavimo zelen konstantni tlak na šobi, ki določa pretok vode. Na sistem lahko namestimo različne pršilne šobe, glede na to, kakšne padavine želimo ustvariti. Pršilna šoba je nameščena na vrh stojala, ki je nastavljen po višini. Poleg višine lahko nastavljamo tudi njeno orientacijo, ki je normalno obrnjena

direktno navzdol. Sistem ima tako kar nekaj nastavljenih parametrov, ki vplivajo na lastnosti ustvarjenih padavin. Delovanje sistema je trenutno v fazi preizkušanja dobljenih simuliranih padavin glede na vplivne parametre. S testiranjem želimo preveriti, za katere eksperimentalne scenarije je simulator primeren. Če bo treba, bomo simulator nadgradili z več enakimi oziroma različnimi šobami, ki so vse odprte hkrati ali pa so posamezne šobe odprte le določen časovni interval. Z več šobami lahko dosežemo predvsem večje delovno območje, različne lastnosti padavin ali bolj heterogene kapljice.

Pršilni sistem lahko uporabimo skupaj z lovilno posodo v laboratorijskem okolju, lahko pa ga postavimo tudi samostojno na terenu (brez lovilne posode), saj je zasnovan modularno. Trenutna izvedba ima le eno šobo, tako da je območje uporabe precej omejeno, mogoče pa so poznejše razširitve. Namen trenutne izvedbe je v prvi fazi študija padavin, ki jih lahko s sistemom simuliramo. Poleg merilnikov tlaka in pretoka skozi cev, ki dovaja vodo skozi šobo, pri proučevanju padavin spremljamo še lastnosti padavin z različnimi zunanjimi merilniki. Eden izmed takih merilnikov je tudi prekucni dežemer, ki omogoča spremljanje količine padavin skozi čas. V študentskem projektu smo za dežemer zasnovali avtomatski merilni sistem, ki omogoča sprotno spremljanje in beleženje podatkov s senzorja. Avtomatsko merjenje podatkov s senzorjev omogoča preprosto izvedbo poskusov pri različnih pogojih, izmerjene vrednosti pa lahko opazujemo sproti med izvajanjem poskusa ali pa jih podrobneje analiziramo pozneje. Sistem



Slika 2: Razvojnna faza povezovanja dežemera (na desni) v internet stvari z mikrokrmilnikom ESP-32 (v sredini) (Foto: M. Klun)

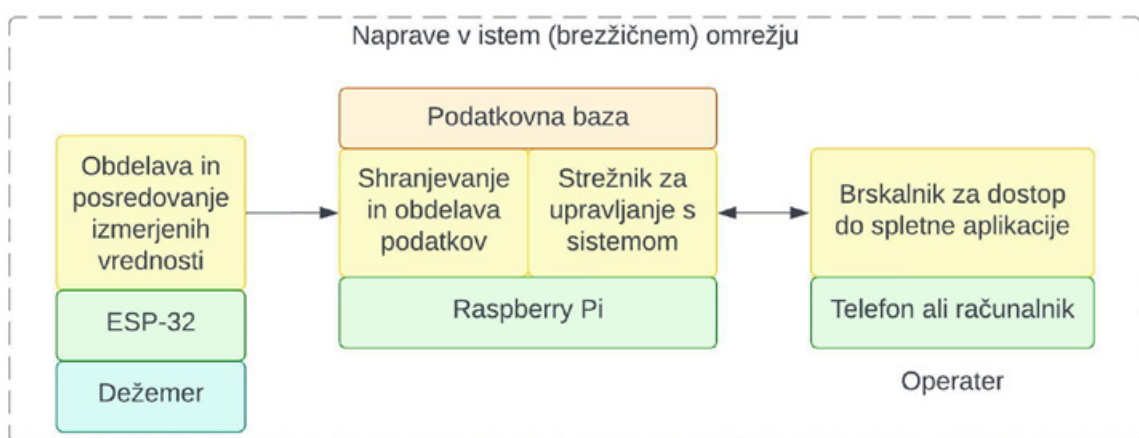
Figure 2: Development phase of connecting the rain gauge (on the right) to the internet of things with the ESP-32 microcontroller (in the centre) (Photo: M. Klun)

za spremljanje izvajanja eksperimentov na fizičnem simulatorju je zasnovan tako, da bomo v prihodnje lahko vključili tudi avtomatske meritve drugih senzorjev, ne le dežemera.

Navadno je dežemer izveden s prekucnikom, ki omogoča zelo preprosto volumetrično meritev padavin. Dežemer zbira padavine na znani površini, ki se izmenično stekajo v eno izmed dveh posodic z znanim volumnom na prekucniku. Ko se posodica napolni, se zaradi lastne teže prekucne in izprazni. Količino padavin merimo tako, da štejemo prekuce. Trenutek prekuca zaznamo z magnetnim stikalom. Izhod senzora pripeljemo na digitalni vhod mikrokrmilnika, ki skrbi za odčitavanje vrednosti meritev. V našem primeru smo uporabili mikrokrmilnik ESP-32, ki ima poleg potrebnih digitalnih vhodov tudi brezžični

vmesnik wifi. Gre za precej zmogljiv mikrokrmilnik, ki omogoča sprotno odčitavanje signalov z dežemera (slika 2). Izmerjene vrednosti s senzora lahko nato po brezžičnem omrežju posredujemo drugim napravam v omrežju, ki skrbijo za zbiranje in obdelavo podatkov. Dežemer, ki je zapisoval podatke le lokalno, lahko tako povežemo v internet stvari (angl. internet of things). Dežemer torej oddaja vrednosti izmerjenih veličin, ki jih lahko naprave v bližini spremljajo in zapisujejo. Merilnik padavin je povsem samostojen, zato ga lahko postavimo v lovilno posodo fizičnega simulatorja dežja, lahko pa merilnik postavimo tudi v naravo. Modularna zasnova torej omogoča večnamensko delovanje.

Študenti so izdelali še sistem za sprotno beleženje in hranjenje merjenih veličin (slika 3). Sistem so



Slika 3: Naprave in sistemi za sprotno spremljanje izmerjenih vrednosti veličin z dežemera

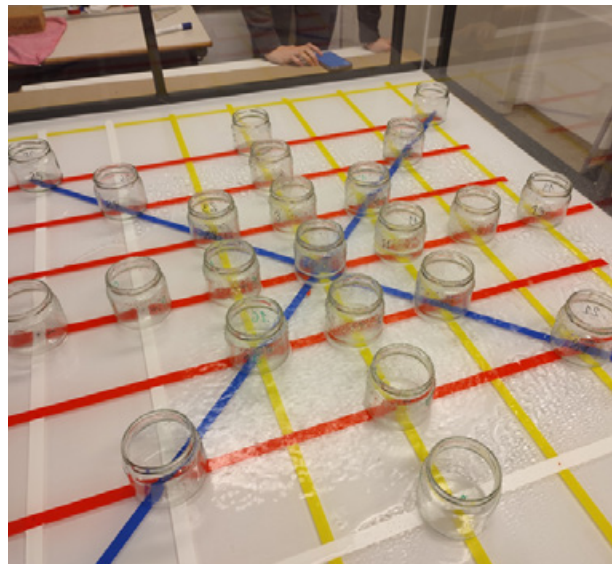
Figure 3: Devices and systems for real-time monitoring of measured values from the rain gauge

izvedli na vgradnem sistemu Raspberry Pi, ki je prek usmerjevalnika povezan v isto omrežje kot senzori (npr. dežemer). Na vgradnem sistemu je strežnik, ki prejete vrednosti merjenih veličin s senzorjev (dežemera) shranjuje v podatkovno bazo. Poleg tega so študenti na vgradnem sistemu vzpostavili še spletno aplikacijo, ki operaterju sistema omogoča dostop do zajetih podatkov in tudi konfiguracijo senzorjev. S spletno aplikacijo lahko operater nastavi, katere senzore želi spremljati v nekem eksperimentu. Nastavi lahko tudi osnovne parametre sistema (npr. položaj senzorjev). Sistem omogoča tudi ročno vnašanje odčitanih vrednosti s senzorjev in drugih podatkov, ki se ne merijo avtomatsko. To je povsem primerno za veličine, pri čemer se vrednosti med eksperimentom ne spreminjajo oziroma se spreminjajo le ob znanih intervencijah operaterja. Te spremembe lahko operater sproti vnaša v sistem, sistem pa vse dogodke beleži v dnevnik s časovnimi žigi, tako da so na enem mestu zbrani vsi podatki eksperimenta. Omogočeno je tudi dodajanje besedilnih komentarjev in slikovnih posnetkov. Spletna aplikacija omogoča sproti spremljanje merjenih veličin, ki se prikazujejo na grafu, in tudi izvoz vseh podatkov za dodatno obdelavo. Spletna aplikacija je bila prilagojena za delovanje na mobilnih telefonih, mogoč pa je tudi oddaljen dostop, če je sistem povezan v medmrežje, kar je lahko koristno za dolgotrajnejše eksperimente na nedostopnih lokacijah. Sistem za spremljanje meritev je podrobneje opisan v Uzunović in Mataln-Smehov (2023).

Glede na eksperimentalne potrebe bomo fizični simulator v prihodnosti dopolnili in nadgradili. Nekateri senzori (npr. senzor pretoka in tlaka) trenutno omogočajo le ročno odčitavanje izmerjenih vrednosti. Namesto ali poleg takih senzorjev načrtujemo, da bomo dodali še senzore, ki vsebujejo komunikacijske vmesnike za avtomatsko odčitavanje. Sistem nameravamo nadgraditi še z elektronsko krmiljenimi ventili, kar bo med drugim omogočilo izvedbo avtomatskega sekvenčnega krmiljenja sistema po vnaprej definiranem scenariju. Sistem nameravamo nadgraditi tudi z neinvazivnimi (optičnimi in akustičnimi) senzori in kamerami ter globinskimi senzori za boljši vpogled v delovanje procesa.

TEST DELOVANJA

Glavni cilj projekta je bil izdelati delujoč fizični simulator dežja. Kljub obsežnemu pregledu literature in številnim prilagajanjem tako števila kot vrste komponent v celotnem sistemu simulatorja nam v



Slika 4: Testiranje enakomernosti pršenja fizičnega simulatorja dežja (Foto: M. Klun)

Figure 4: Testing the uniformity of sprinkling of the physical rainfall simulator (Photo: M. Klun).

tako kratkem času ni uspelo zadostiti vsem vnaprej postavljenim merilom z vidika posnemanja dežja v naravi (npr. velikost kapljic, kar bi lahko spremljali z disdrometri). V okviru preskušanja učinkovitosti delovanja simulatorja smo se zato usmerili predvsem na testiranje enakomernosti pršenja na namakalno površino, kar je prav tako eden izmed pomembnih kazalnikov ustreznosti simulatorja. V literaturi se za enakomernost pršenja po navadi uporablja Christiansenov koeficient enakomernosti (angl. *Christiansen Uniformity Coefficient, CUC*), ki ga izračunamo z enačbo:

$$CUC = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |I_i - \bar{I}|}{n\bar{I}} \right) \times 100 \%$$

V enačbi predstavlja I_i količino dežja na lokaciji i , \bar{I} povprečno količino dežja na vseh lokacijah in n število dežemerov (lokacij merjenja), pri čemer vrednosti, bližje 100 %, kažejo na bolj enakomerno pršenje po namakalni površini. Vrednost CUC, ki je v literaturi sprejeta kot kazalnik enakomernosti porazdelitve dežja, je več kot 84-odstotna (Keller in Bliessner, 1991).

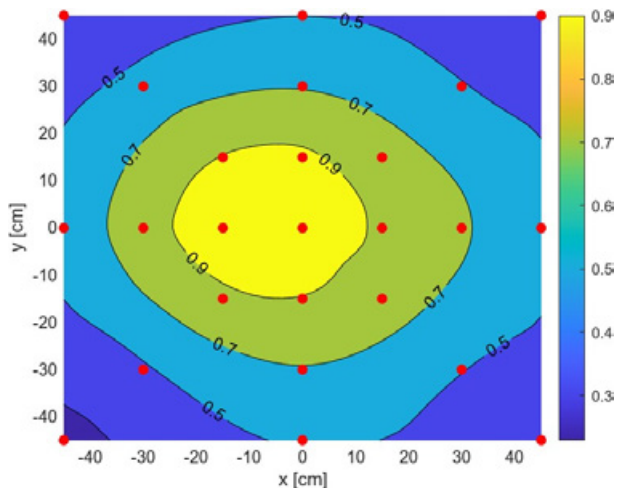
Testiranje enakomernosti in intenzitete simuliranega dežja smo izvedli na vnaprej določeni mreži znotraj lovilne posode, ki se zvezdasto razširja od centra (0,0), določenega s položajem pršilne šobe. Mrežo sestavlja 25 točk. V teh točkah so bili postavljeni oštevilčeni stekleni kozarčki s premerom 8 cm, katerih masa je bila z natančno tehtnico vnaprej izmerjena (slika 4).

Po triminutni simulaciji dežja smo vsak kozarec z zunanje strani dobro obrisali in trikrat ponovili tehtanje z vodo napolnjenega kozarčka, da smo zmanjšali napako zaradi tehtanja. Od stehtane mase smo nato odšteli maso kozarca in izračunali povprečno količino ujete vode. V sklopu projekta smo preskusili tri vrste šob s polnim stožcem pršenja (45°, 60° in 90°) pri tlaku treh barov. Za vsako šobo smo test ponovili trikrat. Na sliki 5 je prikazan primer rezultatov enega izmed testiranj z uporabo šobe s kotom pršenja 90°, pri čemer so izmerjene vrednosti predstavljene v normalizirani obliki (od 0 do 1). Iz slike se vidi, da količina padavin proti robovom eksperimentalne površine upada. Treba je upoštevati, da gre za normalizirane vrednosti količine padavin. V konkretnem primeru je koeficient variacije merjenih padavin znašal 10 %. Upadanje količine padavin z radialnim oddaljevanjem od lokacije pršilne šobe je posledica precej nizke višine pršilne šobe nad površino in kota pršenja, ki je lastnost šobe. Podobne vzorce prostorske porazdelitve padavin so ugotovili tudi številni drugi raziskovalci (npr. Lassu in sod., 2015; Kavka in Neumann, 2021). Izris prostorske porazdelitve padavin nam je bil v veliko pomoč tudi za nadaljnje korake izboljšave simulatorja, saj kot se vidi s slike 5, največja količina padavin ni bila izmerjena tik nad pršilno šobo. Ta namreč ni bila nameščena popolnoma pravokotno na površino lovilne posode, ampak rahlo nagnjena v levo, kar je razlog za to anomalijo.

Vse tri šobe so se glede na kriterij enakomernosti pokazale kot ustrezne (CUC med 94 % in 97 %), vendar so bile dosežene intenzitete prevelike in kapljice premajhne (velikost kapljic smo ocenili samo vizualno). V prihodnje bo zato poudarek na optimizaciji nastavitvev (manjši tlaki, večje višine šob, druge vrste šob), ki bodo omogočale ustrežnejšo simulacijo dežja. Pri testiranih nastavitvah visoka vrednost CUC kaže na možnost zvišanja višine šobe in tako povečanja namakalne površine.

SKLEPNE MISLI

V prispevku so predstavljene izvedene dejavnosti trimesečnega študentskega projekta za trajnostni razvoj, ki je naslavljal zasnovo in izdelavo fizičnega simulatorja dežja. V okviru projekta je bil fizični simulator dežja razvit in tako zgrajen, da povezane komponente omogočajo pršenje kapljic razmeroma enakomerno okoli središčne točke (lokacija pršilnika).



Slika 5: Primer prostorskega prikaza porazdelitve simuliranega dežja v normaliziranih vrednostih na površini 1 m² glede na merjene vrednosti v laboratoriju (šoba s kotom pršenja 90°). Rdeče pike predstavljajo lokacije kozarčkov. Koordinata (0,0) predstavlja lokacijo šobe.

Figure 5: Example of spatial representation of the distribution of simulated rain in normalized values on a 1 m² surface based on measured values in the laboratory (nozzle with a 90° spray cone). The red dots represent the locations of the beakers. Coordinate 0,0 represents the nozzle location.

Čeprav smo velik del precej kratkega projekta namenili proučevanju možnosti izogibanju pomanjkljivostim, ki so poročane v literaturi, trenutna zasnova in sistem komponent simulatorja še ne zagotavljata zanesljivih in bistvenih rezultatov pršenja. Leta 2023 je zato predvideno nadaljevanje prav tako študentskega projekta, v okviru katerega bomo sedanji simulator dežja nadgradili in upoštevali ugotovljene pomanjkljivosti in potencialne za izboljšave, preverili bomo možnost avtomatizacije procesa pršenja ter se usmerili v možnosti uporabe fizičnega simulatorja dežja za konkretne raziskave (npr. erozija tal) in pedagoške namene sodelujočih fakultet.

ZAHVALA

Projekt sta financirala Študentski projekt za trajnostni razvoj (RSF, ukrep C.III.1) in Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije v okviru raziskovalnega programa P2-0180 Vodarstvo in geotehnika: orodja in metode za analize in simulacije procesov ter razvoj tehnologij. Zahvaljujemo se študentom UL FGG (Peter Luka Golob, Zala Kač, Gaja Vidic) in UL FE (Jan Perenič, Emina Ferzana Uzunović, Blaž Ardaljon Mataln Smehov), ki so s svojim znanjem, idejami in časom prispevali k zastavljenemu cilju projekta.

Viri in literatura

- Coleri, E., Kayhanian, M., Harvey, J. T., Yang, K., Boone, J. M., 2013. Clogging evaluation of open graded friction course pavements tested under rainfall and heavy vehicle simulators. *Journal of Environmental Management*, 129, 164–172.
- Corona, R., Wilson, T., D'Adderio, L. P., Porcù, F., Montaldo, N., Albertson, J., 2013. On the Estimation of Surface Runoff through a New Plot Scale Rainfall Simulator in Sardinia, Italy. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 875–884.
- Fernández-Raga, M., Rodríguez, I., Caldevilla, P., Búrdalo, G., Ortiz, A., Martínez-García, R., 2022. Optimization of a Laboratory Rainfall Simulator to Be Representative of Natural Rainfall. *Water (Switzerland)*, Vol. 14 No. 23, pp. 1–11.
- Kavka, P., in Neumann, M., 2021. Technical note swinging-pulse sprinkling head for rain simulators. *Hydrology*, Vol. 8 No. 2, 74.
- Keller, J., in Bliesner, R. D., 1991. Sprinkle and trickle irrigation. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Khalifa, A. M., Bing So, H., Ghadiri, H., Carroll, C., Burger, P., Yu, B., 2023. MINEROSION 4: Using measurements from a tilting flume-rainfall simulator facility to predict erosion rates from post-mining catchments/landscapes in Central Queensland, Australia. *International Soil and Water Conservation Research*, Vol. 11, Issue 3, 415–428.
- Isidoro, J.M.G.P., Silveira, A., Lima, B.O., 2022. Development of a large-scale rainfall simulator for urban hydrology research. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, Vol. 27 No. 1, 169–173.
- Juras, R., Pavlásek, J., Děd, P., Tomášek, V., Máca, P., 2013. A portable simulator for investigating rain-on-snow events. *Zeitschrift Für Geomorphologie, Supplementary Issues*, Vol. 57 No. 1, 73–89.
- Komac, B., 2021. Koliko Slovenijo stanejo naravne nesreče? *Geografski Vestnik*, 93, 63–85.
- Lassu, T., Seeger, M., Peters, P., Keesstra, S.D., 2015. The Wageningen Rainfall Simulator: Set-up and Calibration of an Indoor Nozzle-Type Rainfall Simulator for Soil Erosion Studies. *Land Degradation and Development*, Vol. 26 No. 6, 604–612.
- Lokošek, N., in Kozjek Mihelc, K., 2022. Ocena ekstremnih padavinskih in snežnih razmer v današnjem prihodnjem podnebju na čezmejnem območju Slovenije in Avstrije. *Ujma*, 36, 265–274.
- Lora, M., Camporese, M., Salandin, P., 2016. Design and performance of a nozzle-type rainfall simulator for landslide triggering experiments. *Catena*, Elsevier B.V. 140, 77–89.
- Mayerhofer, C., Meißl, G., Klebinder, K., Kohl, B., Markart, G., 2017. Comparison of the results of a small-plot and a large-plot rainfall simulator – Effects of land use and land cover on surface runoff in Alpine catchments. *CATENA*, 156, 184–196.
- Merz, R., in Blöschl, G., 2003. A process typology of regional floods. *Water Resources Research*, Vol. 39 No. 12, 1–20.
- Mhaske, S. N., Pathak, K., Basak, A., 2019. A comprehensive design of rainfall simulator for the assessment of soil erosion in the laboratory. *CATENA*, 172, 408–420.
- Nielsen, K.T., Moldrup, P., Thorndahl, S., Nielsen, J.E., Duus, L.B., Rasmussen, S.H., Uggerby, M., Rasmussen, M., 2019. Automated rainfall simulator for variable rainfall on urban green areas. *Hydrological Processes*, Vol. 33 No. 26, 3364–3377.
- Radinja, M., Banovec, P., Comas Matas, J., Atanasova, N. 2017. Ukrepi razpršenega zadrževanja in ponikanja padavinske vode (SUDS). *Acta Hydrotechnica*, Vol. 30 No. 52, 51–64.
- Rončević, V., Živanović, N., Ristić, R., Boxel, J. H. va., Kašanin-Grubin, M., 2022. Dripping Rainfall Simulators for Soil Research—Design Review. *Water (Switzerland)*, Vol. 14 No. 20, pp. 17–19.
- Sales Alves, A., Schultz, N., Faria Conforto, B. A. A., Zonta, E., Fonseca de Carvalho, D., 2023. Soil, water and nutrient loss under simulated rainfall patterns in an area fertilised with chicken litter. *Journal of Hydrology*, 620, 129543.
- Sanchez Macedo, P. M., Ferreira Pinto, M., Alves Sobrinho, T., Schultz, N., Rodrigues Coutinho, T. A., Fonseca de Carvalho, D., 2021. A modified portable rainfall simulator for soil erosion assessment under different rainfall patterns. *Journal of Hydrology*, 596, 126052.
- Sezen, C., Šraj, M., Medved, A., Bezak, N., 2020. Investigation of rain-on-snow floods under climate change. *Applied Sciences*, Vol. 10 No. 4. doi: <https://doi.org/10.3390/app10041242>.
- Wallbrink, P. J., in Croke, J., 2002. A combined rainfall simulator and tracer approach to assess the role of Best Management Practices in minimising sediment redistribution and loss in forests after harvesting. *Forest Ecology and Management*, 170, 217–232.
- UL, 2022. Razpis za »Študentski projekti za trajnostni razvoj«. Razpis v okviru ukrepa Vključevanje lokalnih, regionalnih in globalnih izzivov trajnostnega razvoja, interdisciplinarnosti in STEAM pristopov v študijski proces (ukrep C.III.1).
- UN, 2015. Transforming Our World The 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution Adopted by the General Assembly on 25 September 2015, 42809, 1–13.
- Uzunović, E. F., Mataln-Smehov, B. A., 2023. Razvoj podpornih sistemov za avtomatsko spremljanje eksperimentov na fizičnem simulatorju dežja. V: Muškinja, N., Rotovnik, M., Bratina, B. (uredniki). *Zbornik prispevkov konference AIG, Maribor*, 1–6.
- Zorn, M., in Hrvatin, M. 2015., Škoda zaradi naravnih nesreč v Sloveniji med letoma 1991 in 1998. *Ujma*, 29, 135–148.