

# Razvoj podpornih sistemov za avtomatsko spremljanje eksperimentov na fizičnem simulatorju dežja

Emina-Ferzana Uzunović<sup>1</sup> in Blaž Ardaljon Mataln Smehov<sup>1</sup>

Mentorji: Mateja Klun<sup>2</sup>, Klaudija Lebar<sup>2</sup> in Andrej Zdešar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>2</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova c. 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

[mateja.klun@fgg.uni-lj.si](mailto:mateja.klun@fgg.uni-lj.si), [klaudija.lebar@fgg.uni-lj.si](mailto:klaudija.lebar@fgg.uni-lj.si), [andrej.zdesar@fe.uni-lj.si](mailto:andrej.zdesar@fe.uni-lj.si),  
[emina.uzunovic@gmail.com](mailto:emina.uzunovic@gmail.com), [bm1532@student.uni-lj.si](mailto:bm1532@student.uni-lj.si)

## Development of support systems for automatic monitoring of experiments on a physical rain simulator.

The article presents a support system consisting of multiple actuators and sensors that allow for real-time monitoring of a newly developed physical rain simulator. The system was developed with the purpose of enabling advanced research in the field of erosion and rain interception, as well as more accurate and reliable monitoring of the portable rain simulator's operation. With the presented support system, it is possible to adjust and continuously measure the most important influential variables, such as flow rate, pressure, and precipitation quantity. The measurement of precipitation quantity on the TR-525M rain gauge was digitized using an ESP32 Dev Module microcontroller and a server created on a Raspberry Pi, which additionally offers the experimenter an interactive graphical interface. The graphical interface is a web application that allows the user to not only monitor and control the measurements in real time but also to keep a log of the experiment, display the measurements graphically, and export data for further analysis.

### *Kratek pregled prispevka*

V članku je predstavljen podporni sistem, sestavljen iz več aktuatorjev in merilnikov, ki omogočajo sprotno spremljanje delovanja novo razvitega fizičnega simulatorja dežja. Sistem je bil razvit z namenom omogočanja naprednejših raziskav na področju erozije in prestrezanja padavin ter bolj natančnega in zanesljivega spremljanja delovanja prenosnega simulatorja dežja. S predstavljenim podpornim sistemom je mogoče nastavljanje ter sproti odčitavati najpomembnejše vplivne veličine, kot so pretok, tlak in količina padavin. Merjenje količine padavin na dežemeru TR-525M je bilo digitalizirano s pomočjo mikrokontroler ESP32 Dev Module in strežnika, ustvarjenega na Raspberry Pi, ki izvajalcu eksperimenta dodatno ponuja interaktivni grafični vmesnik. Grafični vmesnik je spletna aplikacija, ki uporabniku poleg sprotne spremljanja in nadziranja meritev omogoča tudi vodenje dnevnika eksperimenta, grafičen prikaz meritev ter izvoz podatkov za nadaljnjo analizo.

## 1 Uvod

V okviru študentskega projekta za trajnostni razvoj in sodelovanja med Fakulteto za elektrotehniko in Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani je bila sestavljena interdisciplinarna skupina študentov, ki je pod vodstvom mentorjev z obeh fakultet razvila prvi fizični simulator dežja v Sloveniji. Pri razvoju takega sistema se je skupina soočila s številnimi izzivi, med drugim s programiranjem vgradnih sistemov, z montažo hidravličnih gradnikov, z izvedbo brezžične komunikacije med porazdeljenimi sistemi, z obdelavo in filtriranjem senzorskih meritev, s podatkovnimi bazami in s spletnimi tehnologijami.

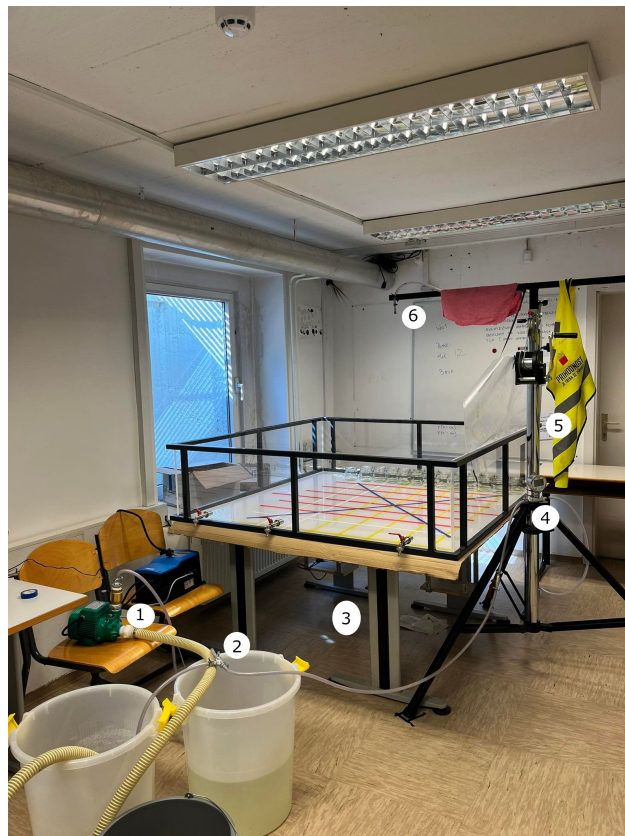
Področje hidrologije obsega proučevanje pojavov povezanih z gibanjem in lastnostmi vode v hidrosferi. Pojav padavin in nato tvorba površinskega odtoka pa je kompleksen proces, v katerem se prepletajo številne spremenljivke, kot na primer čas in intenziteta padavin, lastnosti dežnih kapljic, vegetacija, tip tal, vlažnost tal, itd. Posledično je študij odtoka pod vplivom naravnega dežja prav tako kompleksen proces. Uporaba simulatorjev dežja omogoča poglobljeno analizo tvorbe padavinskega odtoka za znane parametre padavin in sistematično obravnavo stohastičnega pojava. V literaturi je moč zaslediti različne izvedbe simulatorjev dežja za različne namene, primeri so predstavljeni v [1], [2], [3] in [4].

V tem prispevku predstavljamo razvoj in izgradnjo simulatorja dežja, v poglavju 2 predstavimo osnovno zgradbo, v poglavju 3 sledi opis podporne sistema in njegovega razvoja. V poglavju 4 smo predstavili rezultate testiranja simulatorja. V zaključnem poglavju smo se osredotočili na sklepe ugotovitve ter morebitne nadgradnje sistema v prihodnosti.

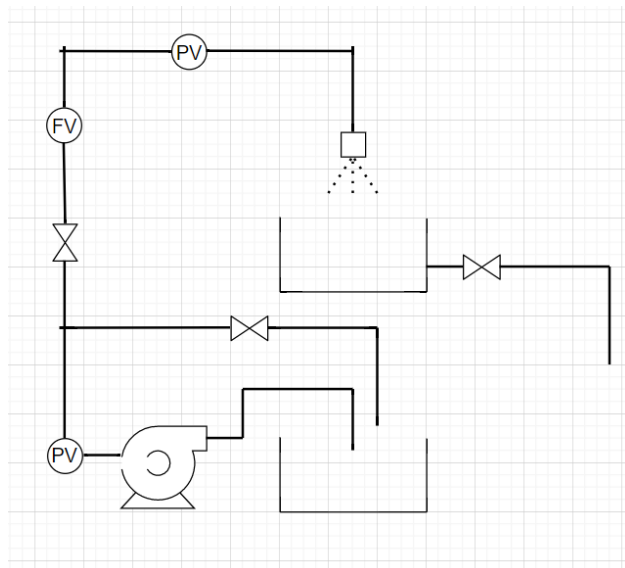
## 2 Pregled celotnega sistema

Na sliki 2 je prikazana slika zgrajenega fizičnega simulatorja dežja. Simulator je postavljen na mizi (3) višine 0,7 m in površine 1,5 m × 1,5 m. Trenutno je namenjen uporabi v zaprtih prostorih. Osnovno shemo simulatorja sestavljajo črpalka (1), ventil (2), merilnik tlaka (4), stojalo za nastavljanje višine šobe (5), cevi in šoba (6). Tehnična

risba tega sistema je prikazana na sliki 2 in jo je mogoče razširiti glede na potrebe eksperimentov.



Slika 1: Simulator z označenimi komponentami

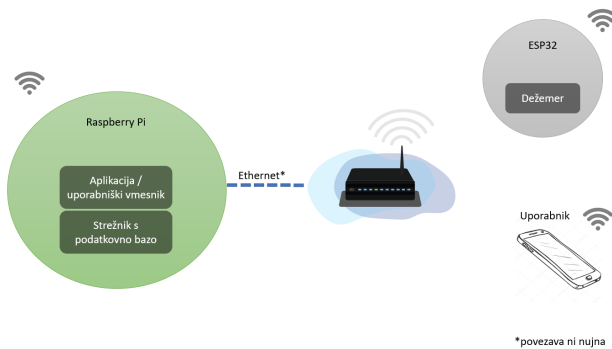


Slika 2: Tehnična shema simulatorja

### 3 Razvoj podpornega sistema

#### 3.1 Gradniki za avtomatizacijo simulatorja

Na sliki 3 so prikazani dodatni gradniki, ki smo jih dodali fizičnemu simulatorju dežja (poglavje 2) za namen avtomatiziranega spremljanja delovanja fizičnega simulatorja. Gre za porazdeljen sistem več elektronskih komponent, ki med seboj komunicirajo po brezžični povezavi WiFi, ki jo zagotavlja brezžični usmerjevalnik. Pomemben del podpornega sistema za nadzor simulatorja je strežnik, ki teče na vgradnem sistemu Raspberry Pi in komunicira z ostalimi napravami ter zbira in shranjuje podatke s senzorjev. Strežnik zagotavlja tudi interaktiven grafični vmesnik v obliki spletne aplikacije, ki jo izvajalec/ka eksperimenta lahko uporabi na telefonu ali računalniku. Dežemer, ki je analogni instrument, je bil digitaliziran z uporabo modula ESP32, ki je povezan z brezžičnim omrežjem in periodično pošilja svoje meritve na strežnik. Postopek integracije dežemera TR-525M v sistem je podrobno opisan v poglavju 3.2. Na enak način bi lahko dodali tudi druge senzorje, kot so merilnik tlaka, pretoka in podobno.



Slika 3: Komunikacijska shema

#### 3.2 Avtomatizacija merjenja količine padavin

Meritve količine padavin z uporabo dežemera so osnovni hidrološki parameter za umerjanje delovanja simulatorja. Z dežemerom merimo intenziteto padavin pod dežno šobo, ki naj posnema intenzitete padavin dežja, značilnega za območje Slovenije. Računa se na podlagi enačbe (1), kjer  $P$  predstavlja količino padavin in  $t$  predstavlja čas.

$$I = \frac{P}{\Delta t} \quad (1)$$

Količina padavin je merilo količine vode, ki pade na določeno območje v obliki dežja, snega, ledu ali druge oblike padavin. Merimo jo v milimetrih [mm], in eden najpogostejših načinov je uporaba dežemera. Dežemer je sestavljen iz zbirne posode znane prostornine s prekucnim sistemom in pomnilnika, ki beleži število prekucev in čas prekuca. Meritve se shranjujejo lokalno s pomočjo prenosnega spomina (*HOBO logger*), za pregled podatkov pa se je potrebno ročno povezati na spominsko enoto in prenesti podatke.

Za namen avtomatizacije tega postopka smo odstranili originalni pomnilnik dežemera TR-525M in dodali mikrokrmilnik ESP32, ki beleži količino zbranih padavin ter pošilja podatke centralnemu strežniku vsakih 30 s. Štetje prekucev je narejeno preko prekinitvene rutine (ISR, angl. *Interrupt Service Routine*), medtem ko je pošiljanje podatkov omogočeno z omrežno povezavo in HTTP zahtevami. Znotraj prekinitvene rutine je uvedena dodatna kontrola izvedbe prekuca, ki ga zaznavata dve magnetni stikali. Zaradi magnetnega mehanizma prekucnega sistema sta bila dodana 2,2 k $\Omega$  povlečna upora, ki zagotavljata dobro definirane logične nivoje.

Tabela 1: Logični nivoji pri enem prekuču

Pozicija	Bit A	Bit B
0	0	0
1	1	0
2	1	1
3	0	1
4	0	0

Tabela 1 prikazuje potek logičnih nivojev pri enem polnem prekuču, ki ga zaznata stikali znotraj dežemera. Zato smo definirali tabelo prehodov stanja (angl. *state transition table*), preko katere v prekinitveni rutini lahko ugotovimo, ali je prišlo do prekuca in v katero smer se je prekuc zgodil.

```

const unsigned char stateTransitionTable[7][4] = {
// R_START
{R_START, R_CW_BEGIN, R_CCW_BEGIN, R_START},
// R_CW_FINAL
{R_CW_NEXT, R_START, R_CW_FINAL, R_START | DIR_CW},
// R_CW_BEGIN
{R_CW_NEXT, R_CW_BEGIN, R_START, R_START},
// R_CW_NEXT
{R_CW_NEXT, R_CW_BEGIN, R_CW_FINAL, R_START},
// R_CCW_BEGIN
{R_CCW_NEXT, R_START, R_CCW_BEGIN, R_START},
// R_CCW_FINAL
{R_CCW_NEXT, R_CCW_FINAL, R_START, R_START | DIR_CCW},
// R_CCW_NEXT
{R_CCW_NEXT, R_CCW_FINAL, R_CCW_BEGIN, R_START},
};

```

Slika 4: Tabela prehajanja stanj

### 3.3 Vzpostavitev strežnika in aplikacije

Kot lokalni strežnik je v projektu uporabljen Raspberry Pi. Programska koda strežniškega dela je napisana v jeziku Python, ta omogoča enostavne in učinkovite možnosti oblikovanja spletne aplikacije. V Pythonu so namreč na voljo knjižnice, namenjene razvoju strežniškega sloja (angl. *backend*) aplikacije. Primer take knjižnice je Flask. Flask omogoča enostaven način vzpostavitve strežnika in povezovanje kode v Pythonu z ostalimi jeziki, namenjenimi razvoju uporabniškega sloja aplikacije, dotično v tem projektu sta to jezika HTML in CSS.

V Pythonu so na voljo tudi knjižnice za vzpostavitev in delovanje baz. V našem primeru je bila uporabljena knjižnica sqlite3. Baza v naši aplikaciji shranjuje meritve in konfiguracije eksperimentov. Pri konfiguraciji eksperimentov se v bazo shranijo informacije o izvajalcu meritve, čas začetka in konca meritev, višina stojala, pretok in tlak, lokacija šobe. Strežnik podane informacije o konfiguraciji prikaže v tabeli. V Pythonu je zapisan tudi del programa, ki omogoča izris grafa meritev med časom začetka in konca meritev, oziroma med začetkom in tekočo meritvijo, če so je eksperiment še v teku. Uporabnik lahko podatke o eksperimentu in meritve izvozi tudi v formatu CSV (angl. *Comma Separated Values*).

### 3.4 Spletna aplikacija z uporabniškega vidika

Spletna aplikacija je razvita tako, da je uporabniku enostavna za uporabo. Uporabniški del aplikacije je bil razvit v HTML-ju in CSS-u. Na

prvi strani aplikacije je podana možnost ogleda vseh do sedaj zapisanih meritev v grafični in tabelarni obliki ter možnost odprtja glavne strani, na kateri so prikazani vsi shranjeni eksperimenti. Eksperimente lahko uporabnik po želji dodaja ali briše. Ko uporabnik izbere določeni eksperiment, ima možnost vpisa informacij o konfiguraciji — to so vse spremenljivke sistema, ki jih simulator dežja ne meri. Na strani podanega eksperimenta je na voljo tudi grafični prikaz meritev med časom začetka in konca meritve, ki ju izbere uporabnik s klikom na gumb. Na strani eksperimenta ima uporabnik tudi možnost prenosa informacij o konfiguraciji in meritvah v obliki CSV-datoteke.



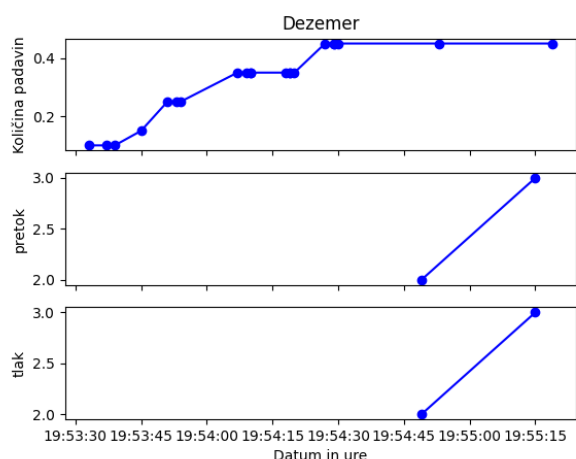
Slika 5: Izgled spletne strani

### 3.5 Praktično delovanje

Eksperiment uporabnik začne z vklopom črpalke in nastavitvijo zelenega tlaka. V grafičnem vmesniku uporabnik ustvari nov eksperiment in pred začetkom meritve vpiše konfiguracijo sistema, podatke o tlaku in pretoku je moč odčitati s samega senzorja na simulatorju. Nato uporabnik zažene meritve. Sprotno meritve se kažejo na strani v obliki grafa, ki prikazuje tudi informaciji o tlaku in pretoku v sistemu.

## 4 Test delovanja simulatorja

Testiranje sistema je bilo izjemno pomembno pri odkrivanju pomanjkljivosti v sistemu, ki še dopuščajo možnosti za nadaljnje izboljšave in nadgradnje. Slika 8 prikazuje vzorec prostorske porazdelitve padavin, pridobljen z meritvami s tehtanjem. Prvi testi, ki smo jih izvedli s simulatorjem so bili namreč preprosti testi, kjer smo v zvezdastem vzorcu na razdalji 15 cm razporedili merilne



Slika 6: Graf količine padavin, pretoka in tlaka

#### Dnevnik

Izvajalec	timestamp	visina	pretok	tlak	tip lokacije	vrednost lokacije
blaz	2023-03-14 12:58:58	3	3.0	3.0	C	3

#### Konfiguracija

Prosim vpišite spremeniļivke, ki so značilne za meritev.

Višina stojala [cm]

Pretok [l/s oz. dm<sup>3</sup>/s]

Tlak [Pa]

Lokacija deņemera

Vrednost lokacije

Izvajalec/ka meritev [ime in priimek]

Komentar [neobvezno, do 60 znakov]

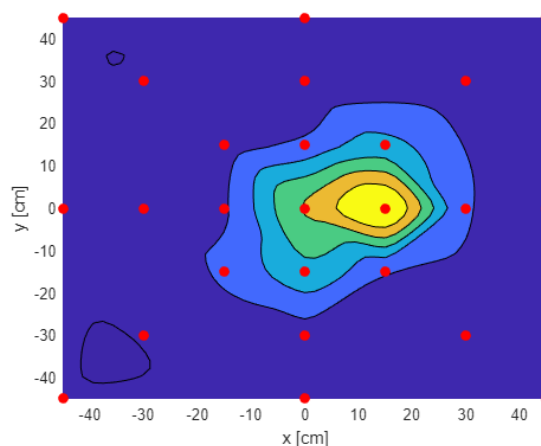
Eksperiment je v teku. Začel se je ob 2023-03-14 12:52:58.

Slika 7: Vmesnik za vpis in izpis konfiguracije

posode, ki so zbirale padlo vodo. Razporeditev merilnih posod je na sliki 8 prikazane z rdečimi točkami. Izvedli smo 9 testov, kjer je bil čas pršenja omejen na trajanja po 3 min, po tem času smo vsak test prekinili in izvedli tehtanje. Nadaljno obdelavo podatkov smo izvedli v programskem okolju Matlab. Rezultate tehtanja smo normalizirali in določili izolinije prostorske porazdelitve padavin.

Lokacija pršenja je v središču zvezde (koordinata 0, 0), kot pa lahko vidimo na sliki 8 je pršenje v simulatorju izmaknjeno iz sredinske lege. Maksimalna vrednost padavin je izmerjena na lokaciji 15 cm po osi X od točke pršenja. Razlog

lahko pripišemo postavitvi šobe, ki ni absolutno normalna glede na ravnino pršenja/zbiranja vode. V naslednjem koraku bomo izvedli mehanske izboljšave simulatorja, za katere menimo, da bodo izboljšali vzorec prostorske porazdelitve pršenja. Ponovno bomo ponovili teste in nato določili vhodne karakteristike simulatorja za izvedbo meritev intezitete padavin z uporabo deņemera. Namreč pri neenakomerni prostorski porazdelitvi padavin bo lokacija deņemera znotraj simulatorja, ključna za pridobitev verodostojnih rezultatov, pričakovati pa je, da ne bomo dosegli povsem simetričnega stanja.



Slika 8: Porazdelitev padavin znotraj simulatorja, računsko določena inteziteta padavin za ta primer znaša v točki maksimalnega pršenja pribl. 470 mm/h. Rdeče točke predstavljajo lokacije merilnih posod.

## 5 Zaključek

Prenosni simulator deņja, ki smo ga predstavili, je osnova, ki ponuja različne možnosti za nadgradnje. Možna je avtomatizacija merilnika tlaka in pretoka, dodatno avtomatsko krmiljenje črpalke, razširitev spletne aplikacije in dodajanje novih senzorjev, kot je npr. kamera za namen analize oblike in hitrosti kapljic. Simulator bo uporabljen tako v raziskovalne kot pedagoške namene, saj lahko omogoči dragocen vpogled in boljše razumevanje naravnih procesov. Postopek razvoja glavnega in podpornega sistema je poudaril pomen dialoga med različnimi strokami. Iz tovrstnega sodelovanja se lahko razvijejo napredne



rešitve za spremljanje in raziskovanje procesov v hidrosferi. Uporaba sodobne merilne tehinke in aplikacij omogoča dodatni razvoj stroke, boljše razumevanje naravnih procesov in boljše ukrepanje v luči zagotavljanja ekosistemskih storitev in prilagajanja na podnebne spremembe.

## Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo za finančno podporo Univerzi v Ljubljani za izvedbo študentskega projekta v okviru razpisa Študentski projekti za trajnostni razvoj (RSF, ukrep C.III.1).

## Literatura

- [1] P. W. Jun Cai, Pingkang Li. An approach to rainfall simulator automation and performance evaluation. *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, zv. 10, str. 3428–3433, 2012.
- [2] S. C. A. G. J. Y. K. K. S. B. I. E. E. Hafzullah Aksoy, N. Erdem Unal. A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume. *Elsevier, Catena*, zv. 98, str. 63–72, 2012.
- [3] S. A. Smith in J. D. Schreiber. Design of a programmable rainfall simulator. *25th Southeastern Symposium on System Theory*, str. 215–217, 1993.
- [4] P. S. A. D. S. R. J. F. R. G. G. D. F. N. M. M. T. D. S. Mendes, T. A. in M. P. D. Luz. Development of a rainfall and runoff simulator for performing hydrological and geotechnical tests. *Sustainability*, str. 3060, 2021.