

Analýza kvapôčkových zavlažovacích systémov na princípe fuzzy inferenčného mechanizmu

Analysis of Drip Irrigation Systems Based on the Principle of a Fuzzy Inference Mechanism

Slávka Jalčová¹, Jozef Koyš¹, Miroslav Hudec¹

Abstrakt

V dnešnej dobe evidujeme narastajúcu potrebu efektívneho využívania prírodných zdrojov, vrátane vody. Táto práca skúma štúdie, ktoré využívajú inovatívne riešenia pre optimalizáciu zavlažovania v poľnohospodárstve založené na fuzzy odvodzovaní a IoT pre kvapôčkovú závlahu. Výsledky skúmania ukazujú, že fuzzy zavlažovacie systémy môžu výrazne zlepšiť poľnohospodársku produktivitu a šetrenie vody. Fuzzy inferenčný mechanizmus je vysvetliteľný, transparentný a adaptovateľný pre používateľa. V práci sme následne navrhli systém, ktorý je prispôsobiteľný špecifickým potrebám konkrétnych pestovateľov. Tento systém predstavuje cenovo dostupný návrh zavlažovacieho systému využívajúceho mikrokontrolerovú dosku Arduino Nano, rôzne typy senzorov a fuzzy pravidlá. Na základe vstupných hodnôt, výsledku odvodzovania a defuzzifikácie sa vypočíta impulz pre intenzitu zavlažovania.

Kľúčové slová

Fuzzy logika, zavlažovanie, optimalizácia, báza fuzzy pravidiel

Abstract

Nowadays, we observe an increasing need for the efficient use of natural resources, including water. This work examines studies that use innovative solutions for optimizing irrigation in agriculture based on fuzzy inference and IoT for drip irrigation. The results of the research show that fuzzy irrigation systems can significantly improve agricultural productivity and water conservation. The fuzzy inference mechanism is explainable, transparent, and adaptable for the user. In the work, we subsequently designed a system that is adaptable to the specific needs of individual growers. This system represents a cost-effective design of an irrigation system using the Arduino Nano microcontroller board, various types of sensors, and fuzzy rules. On the basis of the input values, the result of inference, and defuzzification, an impulse for irrigation intensity is calculated.

Key words

Fuzzy logic, irrigation, optimization, fuzzy rule base

JEL classification

Q550, C630, Q130

¹ Ekonomická univerzita v Bratislave, Fakulta hospodárskej informatiky, Katedra aplikovanej informatiky, Dolnozemska cesta 1, 852 35 Bratislava, sjalcova1@student.euba.sk, jkoys1@student.euba.sk, miroslav.hudec@euba.sk.

1 Úvod

V súčasnosti sa bežne stretávame s nedostatkom prírodných zdrojov. Je potrebné, aby sme sa naučili využívať zdroje, ktoré máme k dispozícii a zbytočne nimi neplytvat'. Demografický rast, hospodárska činnosť a zmena klímy zvyšujú sezónny aj pretrvávajúci nedostatok vody na celom svete. Veľká časť odberu všetkej vody sa používa v poľnohospodárstve a to najmä na zavlažovanie (Salayová, 2023).

Voda je podstatnou zložkou biosféry a popri pôde má prvoradý význam pre zabezpečenie výživy ľudstva. Pre rastliny je dôležité nielen jej množstvo za rok, ale aj jej výskyt vo vegetačnom období. Nedostatok vody ohrozuje globálnu stabilitu a potravinovú bezpečnosť (consilium.europa.eu, n. d.).

Poľnohospodárstvo značným spôsobom zabezpečuje ekonomickú prosperitu a sociálnu stabilitu krajiny. Striedanie hustých dažďov a období sucha môže výrazne prispievať k rozvoju alebo úpadku poľnohospodárskej produkcie štátu (Mohammed et al., 2021). Účelná a správna distribúcia zavlažovacej vody vedie k výraznému zlepšeniu v poľnohospodárskej produktivite a spotrebe vody z hľadiska jej šetrenia (Grow Market, 2022; Salayová, 2023).

Aby sme prehodnotili postavenie vody v jednotlivých ekonomikách, je potrebná účasť všetkých zainteresovaných strán od miestnej až po globálnu úroveň, na dosiahnutie misií, ktoré riešia najdôležitejšie výzvy globálnej vodnej krízy (Knoteková, 2024). Medzi **kritické misie na riešenie** mnohostranných **výziev vodnej krízy** patrí:

- Revolučne zmeniť potravinové systémy zlepšením zavlažovania a znížením závislosti od škodlivých hnojív.
- Zachovať a obnoviť prírodné biotopy na ochranu kľúčových zdrojov vody.
- Vytvoriť cirkulárnu vodnú ekonomiku na maximalizáciu obnovy zdrojov a zníženie odpadu.
- Zabezpečiť prístup k bezpečnej vode na prevenciu detskej úmrtnosti spôsobenej chorobami súvisiacimi s vodou do roku 2030 (ECA EUROPA, 2021; Opatrenia EÚ, 2017).

V našej práci sa zameriame na prvý bod, zlepšenie zavlažovania, čím sa poskytne podpora rastlinám vo vývoji a tým sa môže redukovat' pridávanie umelých hnojív.

K Slovensku, krajine s obmedzenými nerastnými zdrojmi, patrí najväčšie bohatstvo v podobe vody a pôdy. Nedostatok, ale aj nadbytok vody negatívne vplyva na pórovitosť a štruktúru úrodnej ornej zeme (Bloomling, n.d.). Optimálne množstvo vody v pôde je definované poľnou vodnou kapacitou PVK, ktorou sa rozumie schopnosť pôdy udržať v sebe určité množstvo vody (ECA EUROPA, 2021).

Pri zavlažovaní sa zohľadňujú rôzne merateľné faktory, ako sú intenzita slnečného svitu, vlhkosť a ďalšie. Zavlažovanie by malo byť vykonávané v správnom čase (ráno alebo večer), aby sa minimalizovalo odparovanie vody. Rovnomerné zavlažovanie je kľúčové, aby sa predišlo suchým alebo premočeným miestam. Pravidlá zavlažovania zahŕňajú aj správnu hĺbku zavlažovania, aby sa podporoval silný koreňový systém. Merania nie sú vždy presné a preto sú vhodnejšie flexibilne pravidlá. Ak sú merania intervalové, potom pravidlá zavlažovania by klasickým prístupom museli byť reprezentované pomocou pomerne komplikovanej reálnej funkcie. Ak sú merania diskretizáciou výrazne redukované na presné hodnoty, potom je regulácia zavlažovania skokovitá. Fuzzy pravidlové systémy poskytujú flexibilitu a adaptovateľnosť na podmienky pri menšom počte pravidiel. Tieto systémy využívajú fuzzy logiku, ktorá umožňuje pracovať s neurčitou a nepresnou v údajoch, čím zvyšuje efektivitu a presnosť zavlažovania (Karakuzu, 2000).

V našej práci sme preto najprv analyzovali štúdie zaoberajúce sa IoT zariadeniami pre kvapôčkovú závlahu, ktoré využívajú fuzzy inferenčný mechanizmus. Na základe tejto analýzy sme navrhli model a preskúmali jeho adaptovateľnosť a nákladovosť.

2 Úvodné informácie o zavlažovaní a fuzzy logike

V nasledujúcej časti sa zameriame na konkrétne metódy optimálneho zavlažovania, ktoré prispievajú k šetreniu vodných zdrojov a vysvetlíme základné princípy fuzzy logiky.

2.1 Optimálne zavlažovanie ako spôsob šetrenia vodných zdrojov

Zavlažovanie je nahradenie alebo doplnenie dažďových zrážok vodou z iného zdroja za účelom pestovania plodín alebo rastlín. Základným činiteľom pri stanovení správneho výberu závlahy je znalosť jej účelu. Zdroj (Wexbo.com, n.d.) uvádza, že závlahy delíme podľa toho, aký cieľ chceme závlahou dosiahnuť (doplnenie vody, prihnojenie, ochrana proti mrazu, atď.) do nasledujúcich skupín:

- doplnková závlaha,
- hnojivá závlaha,
- špeciálna závlaha.

Zavlažovanie je kľúčovým aspektom poľnohospodárskej výroby. Moderné technológie umožnili prechod od tradičných metód, ako sú záplavy a zavlažovanie brázd, k úspornejším režimom, ako je kvapková, postrekovacia a priesaková závlaha. Tieto metódy teraz možno riadiť aj prostredníctvom mobilných zariadení so systémom Android/iOS, čo znižuje potrebu manuálnych zásahov.

Inteligentné zavlažovacie systémy v poľnohospodárstve využívajú senzory, automatické riadenie, výpočtovú techniku a bezdrôtové siete na zber a spracovanie údajov o stave prostredia (Wexbo.com, n.d.; Blooming, n.d.; Grow Market, 2022; Bwambale et al., 2022; Mendes et al., 2019). Tieto systémy vykonávajú aj riadenie zavlažovania, správu údajov a generovanie automatických výstrah. Práve súbor týchto funkcií umožňuje efektívnejšie rozhodovanie a zvyšuje mieru automatizácie, čím sa podporuje prechod k technologicky náročnejšiemu a presnejšiemu poľnohospodárstvu (Wexbo.com, n.d.).

Zaujímalo nás, na čo sa práce zaoberajúce sa témou inteligentného kvapôčkového zavlažovania zameriavali, aké princípy meraní zvolili, aké zistenia práce priniesli a aké je ponaučenie.

2.2 Základné princípy fuzzy logiky a odvodzovania

Fuzzy logika pracuje s nepresnými a nejednoznačnými informáciami. Môže byť nápomocná najmä ak nemáme presne namerané hodnoty, alebo expert nevie stanoviť presné hranice. Pri fuzzy logike operujeme s lingvistickými výrazmi.

V *modus ponens* odvodzovacom systéme na základe premís, vieme odôvodniť záver: „Ak sú P a Q výroky a pritom je P pravdou, tak je pravdou aj Q.“ (Enderton, 2001) Na tomto princípe funguje *generalizovaný modus ponens*, kde je rozdiel v intenzitách príslušností do pozorovania a flexibilita pravidiel (Gorzałczany, 2002). Odvodzovanie je komplexnejšie, ale lepšie zachytí realitu pri menšom počte pravidiel.

Všeobecne, fuzzy logický kontrolný systém je vytvorený zo štyroch blokov (Obrázok 1). Prvý je fuzzifikáčny, ktorý konvertuje vstupné premenné na fuzzy premenné a priradzuje im stupne príslušnosti nameraných hodnôt. Potom, druhý blok je inferenčný mechanizmus, ktorý vyvodzuje fuzzy výsledok z fuzzifikovaného vstupu a báze if-then pravidiel (Gorzałczany, 2002). Štvrtý blok je defuzzifikácia, ktorý konvertuje výsledok na presnú hodnotu potrebnú na reakciu na dané vstupy.

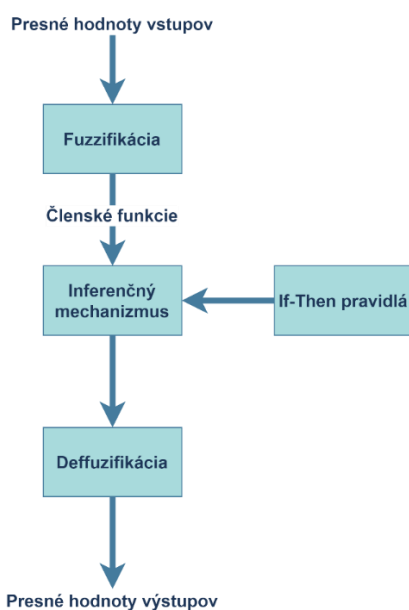
Tento princíp vieme aplikovať aj na princíp zavlažovania. Ak nemáme presné pozorovania, len vyjadrenia ako „prší“, „pôda je vlhká“ a vtedy môžeme použiť fuzzy

inferenčný mechanizmus: „Ak trochu prší, pôda bude jemne vlhká.“ Z toho vieme vyvodit' vety: „Prší,“ a „Pôda je vlhká, pretože prší“.

V nami analyzovaných prácach (Singh et al., 2022; Neugebauer et al., 2023; Hoque et al., 2023) vidíme rôzne prístupy k tvorbe fuzzy bázy pravidiel, pretože každá štúdia obsahuje rôzne vstupné a výstupné premenné. Vo všeobecnosti však vieme povedať, že sú vstupné premenné, ktoré sú v nepriamej úmere s výstupnou premennou a potom také, ktoré sú v priamej úmere s výstupnou premennou. Naplnenie fuzzy bázy pravidlami zabezpečí ďalšie pokračovanie v modelovaní rôznych stavov pôdy. Tento systém je univerzálny, pretože každý majiteľ zavlažovacieho systému si môže podmienky pre vlhkosť a zavlažovanie pôdy nastaviť podľa konkrétnej pestovanej plodiny, rastliny. Regulácia je založená na defuzzifikácii, ktorú je vhodné realizovať ťažiskovou metódou pre vyššiu presnosť a odolnosť (Klir & Yuan, 1995).

Na ďalšiu funkcionálnu sú potrebné funkcie príslušnosti vstupných a výstupných premenných. Fuzzy množiny podporujú neostre hranice a umožňujú intenzity príslušností. Vo všeobecnosti sa používajú trojuholníkové, lichobežníkové a singleton fuzzy množiny, pretože umožňujú zachytiť lingvistický výraz *Nízka*, *Približne...*, *Stredná*, *Vysoká* a podobne. Ako príklad uvádzame lichobežníkovú fuzzy množinu, pretože trojuholníková je v podstate to isté ako lichobežníková, iba má koncentrované jadro do jedného prvku s intenzitou príslušnosti rovnou jednej.

Obrázok 1: Diagram kontrolného systému využívajúceho fuzzy logiku

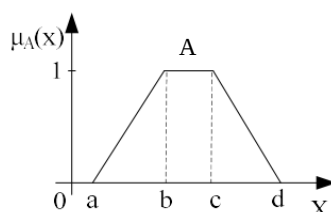


Zdroj: Vlastné spracovanie podľa (Singh et al., 2022).

Lichobežníková fuzzy množina (Obrázok 2) sa využíva na modelovanie neurčitosti. Na výstupe je možné použiť aj nelineárnu funkciu, pričom fuzzy množiny by mali približne spĺňať požiadavku Ruspini partície, t. j. aby súčet hodnôt príslušnosti pre každý bod bol približne rovný 1. Lichobežníková fuzzy množina je definovaná dolným (a) a horným (d) ohraničením nosiča a dolnou (b) a hornou (c) hranicou jadra takto:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \vee x \geq d \\ \frac{x-a}{b-a}, & x \in (a, b) \\ 1, & x \in (b, c) \\ \frac{d-x}{d-c}, & x \in (c, d) \end{cases} \quad (1)$$

Obrázok 2: Lichobežníková fuzzy množina



Zdroj: Spracovanie upravené podľa (Klir & Yuan, 1995)

3 Analýza existujúcich riešení pre zavlažovanie

Výskumníci z Indie (Singh et al., 2022) sa v navrhnutom riešení zamerali na tvorbu kontrolného systému s fuzzy logikou. V práci použili autori fuzzy inferenčný systém vyvinutý v prostredí Matlab, ktorý využíva Mamdani prístup fuzzy inferencie (Gorzałczany, 2002; Hudec, 2016). Vo výsledku je AND operátor realizovaný vypočítaním **minima**, pričom OR operátor vypočítaním **maxima**. Štyri vstupné premenné sú *Vlhkosť Pôdy* (Soil Moisture), *Slnčné Žiarenie* (Solar Irradiance), *Teplota Vzduchu* (Air Temperature) a *Vlhkosť Vzduchu* (Air Humidity). Výstupnou premennou, *Napätie Čerpadla* (Pump Voltage), je kontrolovaná báza fuzzy pravidiel definovaná v Matlab-e. Autori práce zvolili premennú *Napätie Čerpadla*, pretože množstvo vody potrebnej v pôde sa môže regulovať elektrickým napätím čerpadla. Otázka je ako regulovať napätie tak, aby zavlažovanie bolo efektívne.

Pri Mamdaniho inferenčnom systéme pre jednoduchý prípad dvoch vstupov sú premennými *Vlhkosť Pôdy* (Soil Moisture) a *Teplota Vzduchu* (Air Temperature), výstupom je intenzita zavlažovania. Takýto fuzzy systém následne na základe pravidiel vyhodnocuje aktuálny stav prostredia a určuje, aká intenzita zavlažovania je v danom momente vhodná. Typické fuzzy pravidlo môže mať tvar – „ak je vlhkosť pôdy nízka a teplota vzduchu vysoká, potom intenzita zavlažovania je vysoká“. Pravdivosť takéhoto pravidla sa vyhodnotí ako minimum príslušností aktuálnych vstupov k daným jazykovým hodnotám. Výsledkom je úroveň, ktorou sa uplatní výstupná hodnota v rámci fuzzy množiny „vysoká intenzita zavlažovania“.

Zavlažovací systém (Singh et al., 2022) nechali v prostredí pracovať na fuzzy báze pravidiel v rôznych časoch počas dňa, od východu slnka až po západ slnka, v rôznych dňoch, aby získali vstupné hodnoty z rôznych senzorov na sledovanie zmien výstupného napätia a prietoku vody z čerpadla. Cieľom tohto merania bolo overiť, či navrhnutý fuzzy systém reaguje na meniace sa environmentálne podmienky v súlade s očakávaným správaním, teda či výstupné napätie čerpadla (ako výsledok odvodzovania) odráža logiku nastavených pravidiel. Overenie funkčnosti systému prebehlo najmä na úrovni reakcie výstupu na vstupy. Skutočný prínos pre poľnohospodársku prax však môže vyžadovať samostatné hodnotenie od odborníkov z terénu alebo koncových používateľov.

Podľa nameraných hodnôt sa dá interpretovať, že vstupné napätie čerpadla vody sa mení v závislosti od environmentálnych hodnôt meraných rôznymi senzormi. Výsledky overili správnosť ich predpokladov, napríklad: „Ak je vlhkosť pôdy vysoká a zároveň slnečné žiarenie je tlmené, zatiaľ čo teplota vzduchu je studená a vlhkosť zas vysoká, vtedy je nutnosť zavedenia vody do pôdy minimálna“. Permutáciou všetkých vstupných premenných v tomto poradí by sa potreba vody mala zvyšovať, keďže potreba vody pre tento konkrétny prvý príklad je ten najnižší (Singh et al., 2022).

Príkladom formulácie pravidla touto logikou by mohlo byť: „Ak vlhkosť pôdy je vysoká a zároveň teplota vzduchu je nízka, tak potom je napätie čerpadla veľmi nízke.“

Výsledky uvedenej práce ukázali, že Indii by navrhovaný fuzzy zavlažovací kvapôčkový systém umožnil efektívne korigovať mieru napätia čerpadla a následne ovplyvňovať množstvo vody využitej na zavlažovanie. Tento model je vysvetliteľný pre farmára. Keďže India je krajina s veľkým množstvom obyvateľov a pestujú sa v nej rôzne plodiny (ryža, bavlna, cukrová trstina, idnigo, atď.) (Bloomling, n.d.).

Autori práce (Hoque et al., 2023) sa nezamerali na konkrétnu krajinu, či podnebné pásmo. Ich vstupné premenné boli *Faktor prahovej hodnoty vlhkosti pôdy*, *Faktor prahovej hodnoty slnečného žiarenia*, *Faktor prahovej hodnoty vlhkosti*, *Faktor prahovej hodnoty teploty* a výstupnou premennou bol *Faktor prahovej hodnoty dĺžky zavlažovania*. V práci bol využitý rovnaký spôsob fuzzy odvodzovania a realizovaný elektrický obvod zavlažovacieho systému. Výsledky potvrdzujú, že ovplyvnením času zavlažovania na základe vstupov nameraných senzormi a fuzzy odvodzovania sa optimalizoval proces zavlažovania.

Práca (Neugebauer et al., 2023) vznikla spoluprácou vedcov z Poľského Olsztyna a Tureckého Izmiru. Táto práca mala premenné *Čas dňa*, *Vlhkosť pôdy*, *Teplota* a výstupnú premennú *Intenzita zavlažovania*. Boli použité takisto trojuholníkové a lichobežníkové tvary fuzzy množín, len pri výstupnej premennej sa objavil tvar singleton (bol použitý pri vyjadrení minimálnej a maximálnej intenzity zavlažovania, teda 0 a 100).

Práca (Mohammed et al., 2021) je zameraná na oblasť Maroka. Zavlažovací systém je podobný ostatným analyzovaným prácam. Vstupné premenné sú *Vlhkosť pôdy*, *Teplota* a *Slnečné žiarenie*. Merania pomocou navrhovaného zavlažovacieho systému boli vykonané v lete a na jeseň. Práca je charakterom a postupom podobná ostatným analyzovaným prácam s rozdielom, že zber údajov z testovacieho systému prebieha v 60 minútových intervaloch.

Preštudovali sme aj prácu (Sujono & Nainggolan, 2024), aby sme zistili, či môžeme navrhnúť elektrický obvod kvapôčkového zavlažovacieho systému, ktorý by využíval fuzzy logiku a zároveň bol kompatibilný so zariadeniami Internetu vecí. Z práce môžeme konštatovať nasledujúci záver: Z celkového testu vyplýva, že automatický systém kvapkovej závlahy môže byť založený na úrovni vlhkosti pôdy a teploty rastlín. Systém môže byť založený na fuzzy Mamdaniho metóde, kde touto metódou možno monitorovať parametre snímačov a následne regulovať ventily.

Všetky nami skúmané práce využili Mamdani prístup fuzzy inferencie a všetky dokázali, že je možné nastaviť intenzitu zavlažovania konkrétnych plodín/rastlín na základe vstupných údajov získaných z externých zariadení a vytvorených fuzzy pravidiel.

4 Náš návrh cenovo dostupného riešenia

Na základe skúmania prác v predošlej časti sme zhotovovali návrh technického zariadenia. Na nastavenie zariadenia je potrebné určiť logiku a pravidlá zavlažovania plodiny. Zvolili sme kapustu obyčajnú, ktorá je univerzálna plodina pre pestovanie na celom území Slovenska.

Zvolili sme vstupné premenné *Pôda: Vlhkosť, Ovzdušie: Vlhkosť, Ovzdušie: Teplota* a *Časť dňa*. Premennú *Časť dňa* uvažujeme pre zvyky a tradície slovenských pestovateľov, ktorí sa riadia pravidlom, že cez obed sa nikdy nezavlažuje. Závlaha na pravé poludnie a v nasledujúcich hodinách spáli kvety, listy a najmä korene rastliny.

Výstupnou premennou je *Napätie čerpadla*. Najprv sme vyslovili základné pravidlo, kedy sa má zavlažovať najvyššou intenzitou:

„Ak je časť dňa ráno, alebo večer a noc a zároveň je vlhkosť pôdy nízka, a zároveň je teplota vzduchu nízka, pričom je vlhkosť vzduchu nízka, nech je napätie čerpadla veľmi vysoké.“

Z tohto najnižšieho príkladu, kedy sú všetky vstupné premenné nízke a výstupná premenná má najvyššiu hodnotu, vieme opačným spôsobom definovať, kedy sa kapusta zavlažovať nemá, a to: „Ak je časť dňa obed a zároveň je vlhkosť pôdy vysoká, a zároveň je teplota vzduchu vysoká, pričom je vlhkosť vzduchu vysoká, nech je napätie čerpadla veľmi nízke.“

Všetky stavy medzi týmto najnižším a najvyšším extrémom môžu byť dosiahnuté permutáciou hodnôt vstupných údajov.

Na modelovanie sme použili lichobežníkové fuzzy množiny a údaje o hodnotách premenných fuzzy pravidiel sú v *Tabuľka 1: Parametre modelu*. V grafickej časti tabuľky uvádzame fuzzy rozklady pravidiel, pričom parametre premenných sú označené písmenami. Tieto rozklady boli vytvorené tak, aby splnili požiadavky na fuzzy partície (Ruspini, 1969, pp. 22-32) a indikátory kvality jazykovej premennej (Alonso et al, 2021).

V praktickom prípade kapusty obyčajnej, by to mohlo napríklad byť: Vstupná premenná *Pôda: Vlhkosť*, je jednoznačne nízka v hodnotách od 0 do $a_{vp} = 25\%$, jednoznačne priemerná v hodnotách $b_{vp} = 37,5\%$ až $c_{vp} = 62,5\%$ a jednoznačne vysoká v hodnotách $d_{vp} = 75\%$ a viac, v tomto prípade 100 %. Medzi hodnotami $a_{vp} = 25\%$ a $b_{vp} = 37,5\%$ je plynulý prechod medzi nízkou a strednou vlhkosťou. Podobne, medzi hodnotami $c_{vp} = 62,5\%$ a $d_{vp} = 75\%$ je plynulý prechod medzi strednou a vysokou vlhkosťou. Postup by bol obdobný aj pri ostatných premenných. Parametre si môže vhodne nastaviť farmár pre každú pestovanú plodinu individuálne, podľa odporúčania, skúseností či vlastného uváženia.

Usúdili sme, že potrebujeme zostaviť spoľahlivý, ale jednoducho ovládateľný systém, ktorý by vykonával logiku podľa nami stanovených pravidiel. Zvolili sme zariadenie Arduino.

Mikrokontrolérová doska Arduino Nano je napájaná cez zbernicu s USB portom napätím 5 V, ktorej úlohou je aj odosielanie príkazov z Modelu do zariadenia Arduino Nano na základe externých vstupov. Zbernica okrem napájania slúži pre komunikáciu s vyhodnocovacou aplikáciou (napr. Simulink). Na Arduino Nano sú taktiež pripojené potrebné senzory, ktoré merajú okolité podmienky. Potrebnými senzormi pre meranie okolitých podmienok sú senzor teploty a vlhkosti ovzdušia (DHT11), senzor vlhkosti pôdy a senzor slnečného žiarenia. Na základe údajov zachytených pomocou senzorov dokáže mikrokontrolér zopnúť magnetické relé, ktoré následne spustí pumpu s jednosmerným prúdom (ďalej len DC) potrebnú pre zavlažovanie. DC pumpa sa skladá z DC motorčeka napájaného 3 až 7 V napätím a vodnej pumpy. Napájanie DC motorčeka je realizované zo striedavej siete cez adaptér na zníženie a usmernenie napäťovej úrovne z 220 V striedavého prúdu (ďalej len AC) na 12 V DC. Model je zobrazený na Obrázku 3.

Následne je hodnota napätia znížená cez step-down menič na hodnotu napätia, ktorá je požadovaná pre chod DC pumpy. LED pripojený na zariadenie slúži ako ad hoc kontrola pre rýchle zobrazenie potrebných údajov, ktoré môžu byť pre pestovateľa užitočné (napr. vonkajšia teplota).

Tabuľka 1: Parametre modelu

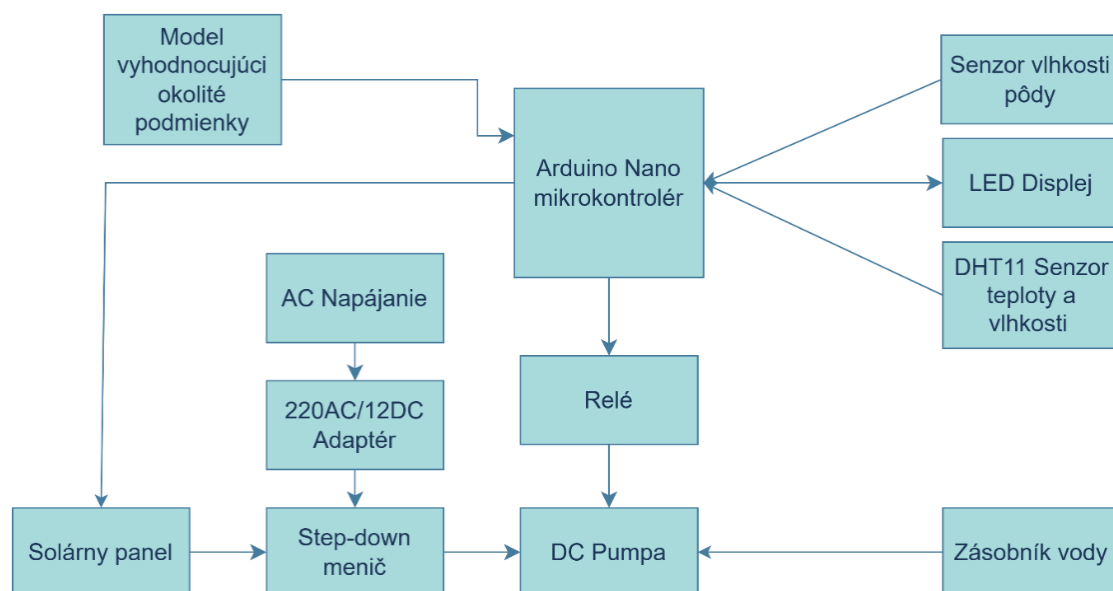
Premenná	Merná jednotka	Jazyková premenná	Graf
Pôda: Vlhkosť	%	Nízka	
		Priemerná	
		Vysoká	
Ovzdušie: Vlhkosť	%	Nízka	
		Priemerná	
		Vysoká	
Ovzdušie: Teplota	°C	Nízka	
		Stredná	
		Vysoká	
Časť dňa	Hodiny	Ráno	
		Obed	
		Večer	
Napätie čerpadla	V	Noc	
		Veľmi nízke	
		Nízke	
		Stredné	
		Vysoké	
		Veľmi vysoké	

Zdroj: Vlastné spracovanie

Na vytvorenie fuzzy regulátora a návrh pravidiel bol použitý Matlab a jeho nadstavba Simulink, pričom počas vývoja bol mikrokontrolér Arduino Nano pripojený k počítaču. V tejto fáze slúžil počítač nielen na napájanie dosky, ale aj ako rozhranie pre odosielanie príkazov a zber údajov.

V aktuálnej konfigurácii je Arduino závislé od počítača počas zavlažovania, čo je z hľadiska terénneho nasadenia menej praktické. Preto do budúcnosti plánujeme systém vylepšiť tak, aby fuzzy inferenčný mechanizmus bežal priamo na zariadení bez potreby trvalého pripojenia k počítaču. Keďže klasické Arduino Nano má veľmi obmedzené výpočtové možnosti, spustenie kompletného fuzzy regulátora priamo na tejto doske nie je realistické. Jednou z vhodných alternatív by mohlo byť nasadenie platformy Raspberry Pi, ktorá umožňuje bežať fuzzy logiku v jazyku Python priamo na zariadení, spolu s riadením vstupno-výstupných signálov. Táto možnosť by v budúcnosti mohla výrazne znížiť závislosť od externého počítača a zjednodušiť použiteľnosť systému v teréne.

Obrázok 3: Schéma modelu



Zdroj: Vlastné spracovanie

Približný návrh ceny zariadenia pre vybrané komponenty je v *Tabuľke 2*. V návrhu ceny nie je zahrnutá cena za prácu, kabeláž, cín a náradie potrebné pri konštruovaní zariadenia. Komponenty môžu byť od rôznych výrobcov s odlišnými parametrami.

Týmto modelom a približnými cenami jednotlivých komponentov, by sme chceli poukázať na to, že zostavenie zariadenia nie je až tak finančne náročné, aké je v konečnom dôsledku užitočné ako pre spoločnosť, tak pre malého farmára, či samostatnú domácnosť.

Tabuľka 2: Komponenty pre nami navrhovaný zavlažovací systém.

Názov komponentu	Cena (€ s DPH)
Arduino Nano	13,53
DC pumpa RS-360SH 3-12V	4,80
Senzor teploty a vlhkosti DHT11	7,51
Senzor vlhkosti pôdy	6,18
AC Adaptér	32,31
Step-down menič LM2596	1,60
Relé	4,09
Solárny panel	37,80
LED displej	3,80
Spolu	111,62

Zdroje elektronických obchodov: Mouser a Techfun.sk.

5 Diskusia

Síce sa Slovensko nachádza v miernom podnebnom pásme, ale v zavlažovaní na princípe fuzzy logiky vidíme budúcnosť i na našom území. V roku 2023 tvorilo poľnohospodárstvo 2 % podiel na Slovenskom HDP, 11,06 % na HDP Maroka, 16 % na HDP Indie a 2,75 % na HDP Poľska, preto sme skúmali, ako sa v týchto štátoch skúma problém zavlažovania. (Our World in Data, n.d.)

Výskumníci z týchto krajín v prácach (Singh et al., 2022; Neugebauer et al., 2023; Hoque et al., 2023) zdôrazňovali výrazný vplyv poľnohospodárstva na budúci vývoj ich ekonomiky a preto sa i my domnievame, že so zvyšujúcimi sa teplotami v posledných rokoch, sa ani Slovensko nevyhne rozhodnutiam ohľadne zavádzania inteligentného zavlažovania do praxe.

V našej práci sme sa snažili prísť s návrhom modelu fuzzy zavlažovacieho kvapôčkového systému. Uznávame, že návrh by sa dal zdokonaľiť. Jedno zo zlepšení by predstavovalo využitie solárneho panelu nielen na zaznamenávanie intenzity slnečného žiarenia, ale aj na napájanie zavlažovacieho systému. Pridanie Wi-Fi modulu do zariadenia pre umožnenie bezdrôtovej komunikácie by sme takisto považovali za užitočnú funkcionálnu.

Uvažujeme, že kvapôčkový zavlažovací systém sa môže využiť nielen na distribúciu vody, ale aj na distribúciu hnojiva a pesticídov, za predpokladu, že nami navrhovaný model by majiteľ upravil podľa svojich konkrétnych potrieb a potrieb vegetácie. Samozrejme, bolo by potrebné ošetriť aj nebezpečenstvo, že v prípade výpadku prúdu by sa náš model automaticky sám nespustil a preto pestovateľ, ktorý by sa na náš model chcel spoliehať počas jeho neprítomnosti, by mal zvážiť modifikáciu obvodu záložným zdrojom.

6 Záver

Slovensko nepatrí medzi krajiny, ktorých poľnohospodárstvo tvorí väčšinu HDP, ale efektívne využitie vody aj vďaka fuzzy zavlažovacím systémom by mohlo napomôcť k zvýšeniu potravinovej sebestačnosti.

V práci sme na základe analýz existujúcich riešení navrhli model, ktorý pracuje na princípe Mamdani modelu fuzzy odvodzovania. Táto flexibilita umožňuje nastavenie pravidiel výrazmi prirodzeného jazyka a prispôsobenie parametrov fuzzy množín cieľovej plodiny.

Zariadenie na reguláciu závlahy predstavuje atraktívne riešenie pre poľnohospodárov, ktorí pestujú rastliny komerčne. Vďaka svojej cenovej dostupnosti však môže nájsť uplatnenie aj medzi drobnými pestovateľmi.

Literatúra

1. (Opatrenia EÚ, 2017) Opatrenia EÚ v oblasti energetiky a zmeny klímy. Európsky dvor audítorov – Opatrenia EÚ v oblasti energetiky a zmeny klímy. (n.d.). <https://op.europa.eu/webpub/eca/lr-energy-and-climate/sk/>
2. Alonso, J. M., Castiello, C., Magdalena, L., & Mencar, C. (2021) *Explainable Fuzzy Systems: Paving the way from Interpretable Fuzzy Systems to Explainable AI Systems*. Springer, Cham.
3. Bloomling. (n.d.). *Šetrite Vodu Pomocou Kvapkovej závlahy*. Internetový obchod Bloomling. <https://www.bloomling.sk/info/sprievodca-zahradkarstvom/uspورا-vody-pomocou-kvapkovej-zavlahy>
4. Bwambale, E., Abagale, F. K., & Anornu, G. K. (2022). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260, 107324.
5. ECA EUROPA (2021). *Special report 20/2021: Sustainable water use in EU agriculture*. https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR21_20/SR_CAP-and-water_EN.pdf
6. Enderton, H.B. (2001): *A Mathematical Introduction to Logic*. Academic Press, San Diego
7. From farm to fork - consilium.europa.eu. (n.d.). <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/from-farm-to-fork/>
8. Gorzalczy, M. (2002): *Computational Intelligence Systems and Applications*. Physica-Verlag, Heidelberg
9. Grow Market. (2022, November 22). *Kvapkové Zavlažovanie znamená pohodlné a úsporné Zavlažovanie*. www.growmarket.sk. <https://www.growmarket.sk/a/kapkova-zavlahaznamena-vyhodne-a-hospodarnezalevani?srsId=AfmBOoq9t4nfW6K241CAWOABqUN6sj5huONxwLUUiJI6jDXjfkJugElG>
10. Hoque, M. J., Islam, M. S., & Khaliluzzaman, M. (2023). A Fuzzy Logic-and Internet of Things-Based Smart Irrigation System. *Engineering Proceedings*, 58(1), 93.
11. Hudec, M. (2016) *Fuzziness in Information Systems – How to Deal with Crisp and Fuzzy Data in Selection, Classification, and Summarization*. Springer, Cham.
12. Karakuzu, C. (2000) An experimental comparison of fuzzy, neuro and classical control techniques. *21st IEEE Convention of the Electrical and Electronic Engineers in Israel*, Tel-Aviv, pp. 160-166.
13. Klir, G., & Yuan, B. (1995). *Fuzzy sets and fuzzy logic, theory and applications*. Prentice Hall, New Jersey.
14. Knoteková, D. (2024, October 21). *Expertí Varujú: Globálna Vodná Kríza Ohrozuje 8% Stratu HDP do Roku 2050*. SITA.sk. <https://sita.sk/klima/experti-varuju-globalna-vodna-kriza-ohrozuje-8-stratu-hdp-do-roku-205/>
15. Mendes, W. R., Araújo, F. M. U., Dutta, R., & Heeren, D. M. (2019). Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing. *Expert systems with applications*, 124, 13-24.
16. Mohammed, B., Bekkay, H., Migan-Dubois, A., Adel, M., & Rabhi, A. (2021). An intelligent irrigation system based on fuzzy logic control: A case study for Moroccan oriental climate region. In *2nd international conference on Embedded Systems and Artificial Intelligence (ESAI'21)*.
17. Mouser. (n.d.). <https://www.mouser.com/ProductDetail/PowerFilm/MPT15-150?qs=BjLw7L4Cy78xXZvPjeDZ/w%3D%3D>
18. Neugebauer, M., Akdeniz, C., Demir, V., & Yurdem, H. (2023). Fuzzy logic control for watering system. *Scientific Reports*, 13(1), 18485.

19. Ruspini, E. H. (1969). A new approach to clustering. *Information and control*, 15(1), 22-32.
20. Salayová, V. (2023, March 23). *Zem je na Pokraji Globálnej Vodnej krízy. takmer 3 miliardy ľudí Nemá prístup K čistej vode.* iMeteo.sk. <https://www.imeteo.sk/spravy/zem-je-na-pokraji-globalnej-vodnej-krizy-takmer-3-miliardy-ludi-nema-pristup-k-cistej-vode>
21. *Share of GDP from Agriculture.* Our World in Data. (n.d.). <https://ourworldindata.org/grapher/agriculture-share-gdp?tab=chart&country=SVK~MAR~IND>
22. Singh, A. K., Tariq, T., Ahmer, M. F., Sharma, G., Bokoro, P. N., & Shongwe, T. (2022). Intelligent control of irrigation systems using fuzzy logic controller. *Energies*, 15(19), 7199.
23. Sujono, H. A., & Nainggolan, R. W. (2024). Drip irrigation control system based on Mamdani fuzzy logic and internet of things (IoT). *Prz. Elektrotech*, 1, 65-69.
24. Techfun.sk. (n.d.). Techfun.sk – Naj Arduino shop. https://techfun.sk/produkt/led-display-16x2-modre-podsvietenie-spajkovany-i2c-modul/?currency=EUR&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAzba9BhBhEiwA7glbam2ZNjIVcI_2LU8IK4-BOi2KyEgoo0cS36-PBWtS2rCGHWtIKK7N7RoCSKEQAvD_BwE
25. Wexbo.com. (n.d.). *Čo Je Kvapková Závlaha?*. MAX GARDEN - záhradné centrum pre Vašu záhradu. https://maxgarden.sk/a/co-je-kvapkova-zavlaha-31/?srsltid=AfmBOooJY_X3Ovt_43CN9tsAbIsZsswL61LtUQZKFjABX_b9Xh5buhp