



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI

B-dul. București nr. 39, 100680 Ploiești - România
www.upg-ploiesti.ro
Telefon +40 244 573 171 Fax +40 244 575 847



INSTITUȚIA ORGANIZATOARE DE STUDII UNIVERSITARE DE
DOCTORAT UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI

DOMENIUL FUNDAMENTAL – ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL DE DOCTORAT – INGINERIA SISTEMELOR

Rezumatul tezei de doctorat

„ Contribuții la automatizarea sistemelor acvaponice ”

Conducător științific,

Prof.habil.dr.ing. Valentina E. BĂLAȘ

Autor,

Ing. Daniel ALEXUȚĂ

Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești, 2025

CUPRINS

Nr. crt.	Titlul capitolului / secțiunii	Pagina
1	Lista abrevierilor	5
2	Lista figurilor	8
3	INTRODUCERE	10
3.1	Contextul	10
3.2	Motivația cercetării	11
3.3	Contribuție practică și aplicabilitate	12
3.4	Obiectiv general	12
3.5	Obiective specifice ale tezei	12
3.6	Structura și contribuțiile lucrării de doctorat	13
3.7	Structura și contribuțiile lucrării de doctorat	14
3.8	Lista articolelor publicate în jurnale și proceedings-uri ale conferințelor	16
4	CAPITOLUL 1 – Agricultură urbană	18
4.1	Introducere în agricultura urbană și conceptul de acvaponie	18
4.2	Soluții constructive pentru acoperirea serelor și optimizarea luminii	20
4.3	Arhitecturi de monitorizare adaptabile sistemelor acvaponice	23
4.4	Rețele de senzori fără fir (WSN)	24
4.5	Bucula de control în acvaponie	24
4.6	Acvaponia în România	24
4.7	Evoluția domeniului – sinteză Web of Science	26
4.8	Concluziile și contribuțiile Capitolului 1	29

Nr. crt.	Titlul capitolului / secțiunii	Pagina
5	CAPITOLUL 2 – Calitatea apei și parametri în acvacultură/acvaponie	31
5.1	Apa	31
5.2	Nitrificare	32
5.3	Amoniacul (TAN)	34
5.4	pH-ul	34
5.5	Temperatura apei	35
5.6	Nivelul apei	35
5.7	Oxygen dizolvat (DO)	36
5.8	Electroconductivitate (EC)	36
5.9	Solide totale dizolvate (TDS)	36
5.10	Salinitate (SL)	36
5.11	Duritatea apei	37
5.12	Alcalinitatea	37
5.13	Debitul de apă recirculat	37
5.14	Mediu (aer)	38
5.15	Temperatura aerului	38
5.16	Umiditatea relativă (RH)	38
5.17	Dioxidul de carbon (CO₂)	38
5.18	Umiditatea mediului (substrat)	39
5.19	Intensitatea luminii / PAR	39
5.20	Parametri, intervale și efecte în acvaponie (2004–2025)	39

Nr. crt.	Titlul capitolului / secțiunii	Pagina
5.21	Concluziile și contribuțiile Capitolului 2	42
6	CAPITOLUL 3 – Configurația acvaponică cu trei rezervoare	43
6.1	Configurația acvaponică	43
6.2	Modelul matematic al sistemului	45
6.3	Concluziile și contribuțiile Capitolului 3	49
7	CAPITOLUL 4 – Conducerea automată a sistemelor acvaponice	50
7.1	Conducerea automată	50
7.2	Reglarea fuzzy-PID adaptivă	53
7.3	Concluziile și contribuțiile Capitolului 4	54
8	CAPITOLUL 5 – Studiu de caz. Instalație pentru colectarea datelor	56
8.1	Descrierea instalației	56
8.2	Aparatura utilizată	59
8.3	Setul de date colectat	63
8.4	Concluziile și contribuțiile Capitolului 5	67
9	CAPITOLUL 6 – Arhitectura sistemului fuzzy	69
9.1	Introducere	69
9.2	Parametri de evaluare	69
9.2.1	Importanța parametrilor selectați	69
9.3	Arhitectura sistemului fuzzy	70
9.3.1	Sisteme cu Inferență Fuzzy (FIS)	70
9.3.2	Fuzzyficarea	71

Nr. crt. Titlul capitolului / secțiunii	Pagina
9.3.3 Baza de Cunoștințe	71
9.3.4 Mecanismul de Inferență	71
9.3.5 Operatori fuzzy	72
9.3.6 Defuzzyficare	72
9.4 Model fuzzy pentru evaluarea calității apei	73
9.5 Discuții	84
9.6 Concluziile și contribuțiile Capitolului 6	85
10 CAPITOLUL 7 – Studiu de caz ML pentru productivitate piscicolă	86
10.1 Obiectivul studiului	86
10.2 Descrierea bazei de date	89
10.3 Abordare de tip ingineria sistemelor	90
10.4 Metodologia cercetării	92
10.4.1 Definirea modelului conceptual	92
10.4.2 Preprocesarea datelor	93
10.4.3 Implementarea modelelor	93
10.4.4 Evaluarea performanței	94
10.4.5 Compararea modelelor	95
10.5 Rezultate	96
10.5.1 Boosting Regression	97
10.5.2 Decision Tree Regression	101
10.5.3 K-Nearest Neighbors Regression	104

Nr. crt. Titlul capitolului / secțiunii	Pagina
10.5.4 Neural Network Regression	107
10.5.5 Random Forest Regression	113
10.5.6 Support Vector Machine Regression	116
10.5.7 Metrice comparative	130
10.6 Concluzii	133
10.7 Concluziile și contribuțiile Capitolului 7	135
11 CAPITOLUL 8 – CONCLUZII	137
12 ANEXA 1 – Studiu sistematic despre acvaponie	141
13 ANEXA 2 – Script comprimare bază reguli	162
14 BIBLIOGRAFIE	165

Rezumatul tezei de doctorat

Motivația cercetării

- Presiunea crescută asupra resurselor naturale impune dezvoltarea unor soluții sustenabile pentru producția alimentară în mediul urban.
- Sistemele acvaponice automatizate pot conduce la reduceri semnificative ale consumului de apă (raportate în literatură până la ~90%), optimizarea utilizării nutrienților și stabilizarea proceselor biologice..
- Integrarea sistemelor acvaponice cu surse de energie regenerabilă (fotovoltaice, sisteme de stocare cu baterii sau aer comprimat) poate contribui la creșterea independenței energetice.
- Automatizarea și digitalizarea proceselor reprezintă o direcție strategică pentru securitatea alimentară și dezvoltarea agriculturii urbane sustenabile.

Provocări actuale

- Lipsa unor modele teoretice riguroase și a algoritmilor de control avansați limitează eficiența, stabilitatea și scalabilitatea sistemelor acvaponice.

- Controlul parametrilor este realizat frecvent prin metode empirice, fără integrarea unor soluții predictive și adaptive.

Contribuție practică

- Dezvoltarea unor modele funcționale utilizând mediul Matlab–Simulink.
- Testarea și evaluarea algoritmilor de control fuzzy–interpolativi autoadaptivi.
- Implementarea unei platforme digitale pentru achiziția, stocarea și vizualizarea datelor în timp real, specifică instalației studiate.

Relevanță interdisciplinară

- Cercetarea se situează la intersecția dintre inginerie, tehnologia informației, energiile regenerabile, agricultura urbană și sustenabilitate.
- Rezultatele pot contribui la dezvoltarea conceptului de orașe verzi și economie circulară.

Impact social și științific

- Reducerea consumului de apă și a emisiilor de carbon asociate producției alimentare.
- Integrarea tehnologiilor IoT pentru monitorizarea și controlul în timp real al sistemelor.
- Deschiderea unor noi direcții de cercetare, dezvoltarea de prototipuri educaționale și potențialul pentru inițiative de tip start-up

Obiectiv general

- Crearea unui cadru teoretic și aplicativ pentru modelarea, simularea și optimizarea sistemelor acvaponice, în vederea creșterii eficienței energetice, reducerii amprente de carbon și susținerii dezvoltării durabile.

Obiective specifice

1. Elaborarea unor modele matematice pentru descrierea dinamicii apei.
2. Dezvoltarea unei arhitecturi fuzzy pentru evaluarea calității apei.
3. Realizarea de simulări în Matlab–Simulink pentru validarea modelelor propuse.
4. Predicția greutateii peștilor utilizând tehnici de Machine Learning și seturi de date publice.
5. Integrarea sistemelor în arhitecturi IoT dedicate orașelor inteligente.
6. Consolidarea unei abordări interdisciplinare în domeniul acvaponiei automatizate.

Contribuții originale

1. Studiu de sinteză privind sistemele acvaponice, cu aplicabilitate în contextul României.
2. Dezvoltarea unui sistem minim de monitorizare (pH, oxigen dizolvat, temperatură).

3. Proiectarea unei structuri de bază a unei ferme acvaponice cu trei rezervoare (pești, plante, rezervor tampon).
4. Implementarea unui model matematic în mediul Matlab/Simulink.
5. Testarea comparativă a mai multor algoritmi de conducere și recomandarea unui regulator PID fuzzy–interpolativ adaptiv.
6. Propunerea unei arhitecturi edge–cloud (ESP32, Node-RED) pentru vizualizarea și monitorizarea în timp real.
7. Predicția greutateii peștilor pe baza parametrilor de calitate a apei utilizând tehnici de Machine Learning.

Capitol 1 – Agricultura urbană

Capitolul 1 – Agricultura urbană

Agricultura urbană (Urban Agriculture – UA) contribuie la creșterea securității alimentare și la reducerea costurilor logistice și a poluării asociate transportului alimentelor. Totuși, limitarea spațiilor disponibile în mediul urban impune adoptarea unor soluții alternative, precum agricultura integrată în clădiri (Building Integrated Agriculture – BIA) și grădinile pe acoperiș (Rooftop Gardens – RTG).

Hidroponia permite obținerea unor culturi eficiente din punct de vedere al utilizării resurselor, însă necesită un control riguros al parametrilor de mediu. Acvaponia combină creșterea peștilor cu producția vegetală într-un sistem circular, stabil din punct de vedere biologic și cu un consum redus de apă.

Grădinile pe acoperiș (RTG) pot oferi autonomie alimentară parțială, suprafețe verzi și beneficii energetice pentru clădiri. Viabilitatea acestora depinde însă de structura clădirii, microclimatul local și resursele disponibile.

Materialele de acoperire ale serelor și controlul iluminării, atât naturale cât și artificiale (în special utilizarea LED-urilor horticole), sunt factori critici pentru productivitatea sistemelor de cultură protejată.

Monitorizarea mediului evoluează către soluții bazate pe Internet of Things (IoT), cloud computing și rețele de senzori fără fir (Wireless Sensor Networks – WSN), esențiale pentru controlul parametrilor cheie precum pH-ul, oxigenul dizolvat, temperatura și concentrațiile de nitrați.

Algoritmii de control fuzzy și adaptivi reprezintă soluții promițătoare pentru optimizarea proceselor acvaponice și reducerea consumului de resurse. În România, cercetările în domeniul acvaponiei sunt încă la început, fiind desfășurate în principal în cadrul unor institute și universități precum INMA București, centre universitare din Iași și USAMVB Timișoara.

Analizele bazelor de date Web of Science indică o creștere semnificativă a interesului la nivel global pentru acvaponie și automatizare, evidențiind caracterul interdisciplinar al acestui domeniu.

Capitol 2 – Calitatea apei

Apa reprezintă factorul critic în sistemele acvaponice, având un dublu rol: mediu de viață pentru pești și vector de transport al nutrienților pentru plante. Din acest motiv, este necesară monitorizarea simultană a parametrilor precum pH-ul, temperatura, oxigenul dizolvat (DO), salinitatea și compușii azotați.

Procesul de nitrificare constituie pivotul funcționării sistemului acvaponic. Amoniacul total (Total Ammonia Nitrogen – TAN, $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$), rezultat în principal din metabolizarea furajelor, este transformat de bacteriile nitrificatoare AOB (Ammonia Oxidizing Bacteria) și NOB (Nitrite Oxidizing Bacteria) în nitriți (NO_2^-) și nitrați (NO_3^-), forme asimilabile de către plante. Stabilitatea sistemului depinde de echilibrul dintre pești, plante și comunitățile bacteriene.

Fracția toxică a amoniacului (NH_3) crește odată cu pH-ul și temperatura apei. În acvacultură, concentrația TAN este recomandată a fi menținută sub 2–3 mg/L.

pH-ul influențează atât absorbția nutrienților de către plante, cât și eficiența procesului de nitrificare. Intervalul optim pentru acvaponie este cuprins între 6,8 și 7,2, valorile optime pentru hidroponie fiind în jurul valorii de 6, iar pentru nitrificare între 7 și 9. Corecțiile de pH se realizează utilizând baze pe bază de potasiu sau calciu, evitând variațiile bruște.

Temperatura apei influențează metabolismul organismelor, solubilitatea oxigenului și activitatea bacteriană. Intervalul general recomandat este 20–28 °C, cu variații specifice în funcție de specie (specii tropicale: 22–32 °C; specii de apă rece: 10–18 °C).

Oxigenul dizolvat este esențial pentru pești (>5 mg/L), bacterii nitrificatoare (4–8 mg/L) și plante (>3 mg/L la nivelul rădăcinilor). Deficitul de oxigen poate conduce la hipoxie și acumularea de amoniac și nitriți.

Nivelul apei și debitul de recirculare influențează densitatea de populare și eficiența sistemului. Valorile uzuale sunt de aproximativ 20 kg pește/1000 L apă; pentru sistemele NFT debitele tipice sunt de 1–2 L/min/canal, pentru DWC timpul de reînnoire este de 1–4 ore, iar pentru sistemele cu substrat (media beds) se recomandă recircularea unui volum echivalent cu cel al bazinului pe oră.

Conductivitatea electrică (EC) și totalul solidelor dizolvate (TDS) sunt indicatori ai concentrației de săruri, valorile uzuale fiind 300–2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pentru EC și sub 1000 mg/L pentru

TDS, cu un prag maxim de aproximativ 2500 mg/L. Depășirea acestor valori poate induce stres osmotic și toxicitate.

Salinitatea, duritatea și alcalinitatea influențează osmoreglarea organismelor, stabilitatea pH-ului și eficiența nitrificării. Valorile recomandate sunt: salinitate 0–2 ‰ și duritate/alcalinitate 50–150 mg/L CaCO₃.

Parametrii de mediu ai aerului, precum temperatura (18–30 °C), umiditatea relativă (50–80%), concentrația de CO₂ (optim 800–1000 ppm) și iluminarea (14–18 h/zi, PPFD 600–900 μmol·m⁻²·s⁻¹), au un impact direct asupra productivității plantelor. Controlul luminii și ecranarea sunt necesare pentru a evita supraîncălzirea apei și dezvoltarea algelor.

Sistemele hidroponice integrate în acvaponie includ NFT (eficiente energetic, dar sensibile la defecțiuni), DWC (stabile, dar dependente de aerare continuă) și sistemele cu substrat (versatile, dar cu necesități de întreținere periodică).

Capitolul 3 – Configurația acvaponică cu trei rezervoare

Sistemul acvaponic propus este structurat în trei rezervoare distincte:

- **F – Fish tank**, destinat acvaculturii;
- **P – Plant tank**, rezervor hidroponic pentru culturile vegetale;
- **B – Buffer tank**, rezervor tampon utilizat pentru operații tehnologice precum aportul de apă proaspătă, evacuarea și condiționarea apei.

Configurația cu trei rezervoare permite separarea proceselor piscicole de cele horticole, reducând conflictele operaționale și contribuind la creșterea eficienței și stabilității sistemului. Rezervoarele sunt interconectate prin legături bidirecționale (F↔P, F↔B, P↔B), debitele și temporizările fiind controlate automat.

În configurația standard, rezervoarele sunt amplasate la același nivel, însă pot fi dispuse și la înălțimi diferite pentru a permite transferul gravitațional al apei. Această soluție reduce consumul energetic prin eliminarea pompelor, însă performanța transferului depinde de nivelul apei din rezervorul superior.

Parametrii cheie ai sistemului sunt:

- **HF, HP, HB** – înălțimile de amplasare ale rezervoarelor Fish, Plant și Buffer, raportate la o cotă de referință;
- **hF, hP, hB** – nivelurile apei din cele trei rezervoare.

Comportamentul instalației este descris printr-un model matematic structural bazat pe ecuații diferențiale, implementat în mediul Matlab–Simulink. Modelul permite analiza și dimensionarea sistemului, incluzând debitele de intrare și ieșire, nivelurile apei, temperaturile și concentrațiile de nutrienți din fiecare rezervor.

Transferul apei poate fi realizat fie gravitațional, caracterizat printr-un comportament neliniar și o dinamică lentă la finalul golirii, fie prin intermediul pompelor și ventilelor cu debit reglabil. Din punct de vedere termic, fiecare rezervor este influențat de schimburile de energie cu mediul înconjurător și de utilizarea surselor regenerabile, precum energia solară sau geotermală.

Rezervorul tampon are un rol esențial în funcționarea sistemului, permițând efectuarea operațiilor auxiliare fără a perturba procesele biologice din bazinul de pești și din rezervorul hidroponic. Modelarea matematică sprijină optimizarea instalației și dezvoltarea algoritmilor de conducere automată, necesari pentru asigurarea stabilității și eficienței proceselor acvaponice.

Capitolul 4 – Conducerea automată a sistemelor acvaponice cu trei rezervoare

Conducerea automată a sistemelor acvaponice este un proces interdisciplinar, acvaponia îmbinând acvacultura, hidroponia, tehnologia serelor și biotehnologiile. Strategiile de control trebuie să gestioneze simultan procese biologice, chimice și climatice.

Sistemul de conducere este compus din senzori și actuatori care reglează parametri critici, precum pH-ul, temperatura și umiditatea aerului, temperatura apei, nivelurile apei și iluminarea, utilizând senzori specifici (E-201-C, DHT11, DS18B20 etc.).

Funcțiile principale ce necesită control includ:

1. Calitatea apei, prin monitorizarea temperaturii, oxigenului dizolvat, pH-ului, conductivității electrice și compușilor azotați.
2. Acvacultura, prin reglarea nivelului apei, hrănirea peștilor, estimarea biomasei și conversia nutrienților.
3. Hidroponia, prin controlul nivelului apei, absorbției nutrienților, pH-ului soluției și ratei de irigare.
4. Mediul de seră, prin controlul temperaturii aerului, umidității relative, concentrației de CO₂ și iluminării.

În literatura de specialitate sunt utilizate diverse metode de control automat, fiecare cu avantaje și limitări, de la control secvențial și PID, până la logică fuzzy, sisteme expert, MPC, metode de Machine Learning, învățare prin întărire, soluții IoT și concepte de tip Digital Twin.

Funcțiile de conducere pot fi clasificate în:

- funcții tratabile secvențial, implementabile pe PLC-uri;
- funcții de estimare a parametrilor nemăsurabili direct, precum biomasa;
- funcții de reglare în buclă închisă pentru parametrii esențiali.

Pentru fermele acvaponice de dimensiuni mici și medii, regulatoarele PID și fuzzy-PID interpolative adaptive sunt considerate cele mai potrivite soluții. Deși ambele oferă performanțe satisfăcătoare, fuzzy-PID prezintă avantajul flexibilității și portabilității, fiind ușor de implementat prin tabele de căutare. Reglarea nivelurilor apei este eficientă în condițiile în care rezervorul tampon asigură constant volumul necesar funcționării sistemului.

Capitolul 5 – Studiu de caz: Instalație acvaponică pentru colectarea datelor din sistemul acvaponic

Scopul și conceptul instalației

Scopul acestui studiu de caz este realizarea și evaluarea unei instalații acvaponice fizice capabile să măsoare, transmită și controleze în timp real parametri esențiali ai apei, utilizând tehnologii IoT și servicii cloud accesibile prin intermediul unei aplicații mobile. Sistemul permite atât monitorizarea continuă, cât și intervenția automată sau manuală asupra proceselor critice, în vederea menținerii unui mediu optim pentru organismele acvatice și vegetale.

Arhitectura generală a sistemului

Instalația acvaponică este compusă dintr-un bazin pentru pești, care reprezintă sursa principală de nutrienți, și un sistem vertical destinat culturilor vegetale. Achiziția și procesarea locală a datelor sunt realizate cu ajutorul unui microcontroler Arduino, asistat de un modul ESP8266 pentru conectivitate Wi-Fi.

Acționarea proceselor este realizată prin intermediul mai multor elemente: două corpuri de iluminat LED pentru creșterea plantelor, un sistem de încălzire și răcire bazat pe celulă Peltier, două pompe de recirculare a apei, o pompă de aerare, precum și relee mecanice și relee statice (SSR), utilizate în funcție de sarcina controlată.

Senzori și instrumentație

Sistemul integrează un set extins de senzori pentru monitorizarea parametrilor fizico-chimici ai apei. Temperatura apei este măsurată cu senzorul DS18B20, iar alți senzori sunt utilizați pentru lumină, pH și debit.

Pentru măsurători multi-parametru este utilizat modulul pH-W218/W2218, capabil să furnizeze valori pentru pH, potențial redox (ORP), conductivitate electrică (EC), factor de conversie (CF), solide totale dizolvate (TDS), salinitate, densitate relativă (S.G.) și temperatură, cu compensare termică automată. Concentrația oxigenului dizolvat este monitorizată cu ajutorul unui dispozitiv BLE-9100 DO meter, care oferă valori în mg/L și procente, include funcții de calibrare automată și permite stocarea datelor în cloud prin conexiune Bluetooth.

Funcționalități și control

Sistemul permite control automat bazat pe praguri prestabilite pentru procesele de încălzire/răcire, aerare, recirculare și iluminare. În paralel, utilizatorul poate accesa datele de la distanță prin intermediul aplicației mobile, având posibilitatea de a vizualiza valorile în timp real, de a modifica setările și de a exporta datele pentru analiză ulterioară (de exemplu, în format Excel).

Deși această abordare oferă un avantaj operațional semnificativ, ea introduce și potențiale vulnerabilități de securitate, legate de dependența de infrastructura de rețea și de serviciile cloud.

Rolul iluminării LED și utilitatea experimentală

Iluminarea cu LED-uri de creștere este configurată pentru a furniza un spectru optim procesului de fotosinteză și este programată în funcție de fazele de dezvoltare ale plantelor, contribuind la menținerea productivității într-un mediu controlat.

Instalația constituie o bază experimentală pentru validarea reglajelor de aerare, recirculare și temperatură, precum și pentru realizarea de analize de corelație între parametri (de exemplu pH–ORP–EC–TDS). De asemenea, datele colectate pot fi utilizate pentru antrenarea unor modele predictive sau de tip machine learning.

Rezultate și valoare aplicativă

Rezultatele obținute demonstrează funcționarea unui lanț complet de procesare și control, de la senzori la controller, aplicație cloud și acționare fizică, cu feedback în timp real. Sistemul este scalabil și permite testarea diferitelor strategii de control, inclusiv ajustarea pragurilor, implementarea unor algoritmi de tip reguli, PID sau fuzzy, precum și integrarea facilă a unor senzori suplimentari.

Instalația reprezintă totodată o platformă educațională și de cercetare, adecvată pentru prototipare rapidă în domeniul acvaponiei inteligente.

Lecții practice

Experimentele evidențiază importanța compensării cu temperatura pentru măsurătorile de pH și oxigen dizolvat, precum și necesitatea calibrării periodice a senzorilor. Separarea clară a sarcinilor între achiziția locală robustă și vizualizarea sau arhivarea în cloud contribuie la creșterea fiabilității sistemului. De asemenea, managementul energetic al componentelor cu consum ridicat (LED-uri, celula Peltier, pompe) și introducerea redundanțelor pentru aerare și recirculare sunt esențiale pentru funcționarea sigură a instalației.

Capitolul 6 – Arhitectura sistemului cu logică fuzzy pentru determinarea calității apei

Scop și abordare

Acest capitol prezintă utilizarea logicii fuzzy pentru evaluarea calității apei, cu scopul de a emula procesul decizional uman și de a permite exprimarea unor stări intermediare între decizii binare de tip „adecvat” sau „neadecvat”.

Sistemul de inferență fuzzy

Sistemul de inferență fuzzy (FIS) este implementat utilizând metoda Mamdani, aleasă pentru caracterul său intuitiv și explicabil. Procesul include etapele clasice de fuzzificare a intrărilor, evaluare a regulilor, agregare a rezultatelor și defuzzificare.

Fuzzificarea și baza de reguli

Valorile măsurate sunt transformate în mulțimi fuzzy cu grade de apartenență cuprinse între 0 și 1, utilizând funcții de apartenență de tip triunghiular, trapezoidal și gaussian. Baza de cunoștințe este alcătuită din reguli IF–THEN derivate din expertiza domeniului, care pot fi compactate pentru eficiență computațională.

Inferență și defuzzificare

Operatorii logici utilizați sunt $OR = \max$, $AND = \min$ și $NOT = 1 - \mu$. Ieșirile tuturor regulilor sunt agregate într-o singură mulțime fuzzy, iar conversia într-o valoare scalară se realizează prin metoda centrului de greutate (centroid).

Modelul fuzzy propus

Modelul fuzzy pentru variabila „Calitatea apei” utilizează cinci intrări: temperatura, pH-ul, oxigenul dizolvat (DO), solidele totale dizolvate (TDS) și azotul amoniacal total (TAN). Fiecare intrare este descrisă prin cinci termeni lingvistici (Foarte mic, Mic, Mediu, Mare, Foarte mare), cu suprapuneri controlate pentru a asigura o interpolare lină.

Ieșirea este un indice scalar normalizat în intervalul $[0,1]$, mapat în clasele „Normal”, „Acceptabil” și „Nesatisfăcător”.

Reguli, suprafețe de răspuns și validare

Deși numărul teoretic de combinații este de 3125, utilizarea unui script de comprimare a permis reducerea la 1117 reguli relevante. Suprafețele de răspuns bidimensionale evidențiază sensibilitatea sistemului la variațiile parametrilor și delimitarea clară a frontierelor decizionale.

Comportamentul sistemului a fost validat calitativ prin comparație cu bunele practici din acvacultură, iar explicabilitatea este asigurată prin posibilitatea urmăririi fiecărei decizii în Rule Viewer.

Recomandări operaționale

Pentru fiecare clasă de calitate sunt formulate recomandări clare, de la exploatare normală și monitorizare continuă, până la acțiuni imediate precum intensificarea aerării, corecții de pH, schimburi parțiale de apă sau reducerea densității de populare.

Capitolul 7 – Modelare predictivă a productivității piscicole într-un sistem acvaponic inteligent

Obiectivul principal al acestui capitol îl constituie dezvoltarea și compararea mai multor modele de regresie, atât statistice, cât și bazate pe tehnici de învățare automată, în vederea predicției greutateii peștilor dintr-un sistem acvaponic. Predicția se realizează pe baza parametrilor fizico-chimici ai apei și a unor caracteristici biologice și operaționale, cu scopul de a sprijini managementul preventiv al sistemului și luarea deciziilor informate.

Sistemul analizat este formulat ca un sistem MISO (Multiple Input – Single Output), în care variabilele de intrare includ temperatura apei, turbiditatea, oxigenul dizolvat, pH-ul, concentrațiile de amoniac și nitrați, precum și populația de pești, iar variabila de ieșire este reprezentată de greutatea medie a peștilor. Relațiile dintre variabile sunt neliniare, dinamice și interdependente, ceea ce justifică utilizarea unor modele predictive avansate capabile să surprindă aceste comportamente complexe.

În cadrul studiului au fost evaluate mai multe tipuri de algoritmi de regresie, incluzând regresia liniară multiplă și variantele regularizate (Ridge și Lasso), arbori de decizie, metode ensemble (Gradient Boosting și Random Forest), rețele neuronale artificiale, k-nearest neighbors și suport vector regression. Performanța modelelor a fost evaluată utilizând indicatori standard precum eroarea medie pătratică, rădăcina erorii medii pătratice, eroarea medie absolută, eroarea procentuală medie absolută și coeficientul de determinare R^2 , iar robustețea rezultatelor a fost verificată prin validare încrucișată de tip k-fold.

Setul de date utilizat cuprinde 620 de observații temporale colectate prin intermediul senzorilor IoT ai instalației acvaponice. Variabilele de intrare includ temperatura, turbiditatea exprimată în unități NTU, oxigenul dizolvat, pH-ul, concentrațiile de amoniac și nitrați, precum și populația de pești. Variabila „Length” a fost inițial considerată, dar ulterior exclusă din analiză din cauza multicolarității ridicate cu greutatea, identificată prin analiza corelațiilor.

Etapă de preprocesare a datelor a inclus eliminarea valorilor aberante, în special a măsurătorilor neplauzibile din punct de vedere fizic, standardizarea variabilelor prin metoda z-

score și analiza colinearității. Datele au fost împărțite în seturi de antrenare, validare și testare, utilizând o proporție de 65%–15%–20%. Metodologia adoptată urmează pașii clasici ai ingineriei sistemelor: definirea modelului conceptual MISO, preprocesarea datelor, antrenarea mai multor modele, validarea acestora, compararea performanțelor pe baza metricilor de evaluare, analiza importanței variabilelor și selecția modelului optim.

Rezultatele obținute arată că modelele de tip Gradient Boosting au înregistrat cele mai mici valori ale erorilor absolute și pătratice pe setul de testare, în timp ce rețelele neuronale artificiale au obținut cele mai bune performanțe în termeni de eroare relativă. Cu toate acestea, valorile coeficientului R^2 au fost scăzute pentru toate modelele analizate, indicând o capacitate explicativă limitată și sugerând existența unor factori latenți neincluși în model, precum regimul de hrănire, debitul de recirculare a apei sau fotoperioada.

Analiza importanței variabilelor a evidențiat rolul dominant al concentrațiilor de nitrați și al turbidității în predicția greutatea, în timp ce parametri considerați tradițional critici, precum pH-ul sau oxigenul dizolvat, au avut o influență mai redusă în cadrul setului de date analizat. Modelele bazate pe arbori s-au dovedit utile din perspectiva interpretabilității, în timp ce modelele neuronale, deși mai performante în anumite metrici, prezintă un grad mai ridicat de opacitate și necesită volume mai mari de date pentru optimizare.

Din punct de vedere operațional, rezultatele sugerează că Gradient Boosting reprezintă o soluție practică pentru minimizarea erorilor absolute, în timp ce rețelele neuronale sunt mai adecvate atunci când se urmărește reducerea erorii relative. Toate modelele analizate ar beneficia semnificativ de extinderea setului de date, de includerea unor caracteristici suplimentare relevante și de aplicarea unor tehnici avansate de inginerie a caracteristicilor și de optimizare a hiperparametrilor.

În concluzie, ipotezele formulate sunt parțial confirmate. Parametrii de apă și populație contribuie la predicția greutatea, însă puterea explicativă rămâne limitată, iar metodele de învățare automată nu depășesc semnificativ regresiiile clasice în absența unor variabile suplimentare relevante. Validarea încrucișată confirmă robustețea metodologică a abordării, chiar dacă acuratețea absolută a predicțiilor este constrânsă de natura și dimensiunea setului de date.

Capitolul 8 – Concluzii

Acvaponia ca soluție integrată de agricultură durabilă

Acvaponia reprezintă o abordare unică, integrată și sustenabilă a agriculturii, combinând acvacultura cu cultivarea hidroponică a plantelor. Această integrare valorifică ciclul nutrienților, minimizează consumul de apă, reduce scurgerile și emisiile de carbon și asigură o producție alimentară stabilă, adaptabilă atât în medii urbane, cât și rurale. Sistemele acvaponice permit o producție diversificată, care poate contribui la securitatea alimentară și la reducerea presiunii asupra resurselor naturale.

Progres științific și interes global

Literatura de specialitate și inițiativele recente, inclusiv cele din România, arată o creștere semnificativă a interesului pentru acvaponie. Cercetările actuale vizează îmbunătățirea proiectării sistemelor, managementul calității apei, selecția culturilor și a speciilor de pești, precum și sănătatea ecosistemului. Tehnologiile emergente, precum IoT, inteligența artificială și automatizarea, susțin monitorizarea în timp real, optimizarea proceselor și trecerea către ferme inteligente cu control predictiv și suport decizional avansat.

Beneficii pentru sustenabilitate și economie circulară

Sistemele acvaponice contribuie la:

- eficiența resurselor (apă, nutrienți, energie);
- siguranța alimentară prin producția de alimente diversificate și stabile;
- oportunități economice, prin cultivarea de plante cu valoare ridicată și specii piscicole speciale;
- aplicarea principiilor economiei circulare și revitalizarea spațiilor urbane;
- educație și implicare comunitară, prin platforme demonstrative și prototipuri experimentale.

Provocări și limitări

Implementarea acvaponiei se confruntă cu provocări semnificative:

- managementul complex al sistemului (echilibrarea pH-ului, DO, temperaturii și nutrienților, densitatea peștilor, hrănirea);
- selectarea și potrivirea speciilor de plante și pești;
- scalarea comercială, implicând costuri, infrastructură și cerere de piață;
- lipsa de standardizare și protocoale unitare, care necesită ghiduri și bune practici;
- limitări experimentale, inclusiv lipsa finanțării pentru prototipuri complete în cadrul studiilor.

Contribuțiile originale ale tezei

Această teză aduce contribuții relevante în domeniul acvaponiei prin:

1. definirea și fundamentarea configurației cu trei rezervoare;
2. modelarea matematică structurală și implementarea în Matlab/Simulink;
3. adaptarea și testarea algoritmilor de reglare automată;
4. estimarea calității apei prin metode fuzzy și simulări;
5. aplicarea machine learning pentru predicția greutateii peștilor în studii de caz.

Direcții viitoare și recomandări

Pentru dezvoltarea și optimizarea sistemelor acvaponice se recomandă:

- extinderea seturilor de date și includerea factorilor latentți (rație de hrană, debit recirculare, fotoperioadă, densitate stocare, specie/vârstă);
- optimizarea designului și operării sistemelor pentru eficiență sporită;
- dezvoltarea de standarde și protocoale de operare uniformă;

- integrarea tehnologiilor IoT și a controlului predictiv;
- modele techno-economice pentru scalarea comercială;
- dezvoltarea de modele hibride și algoritmi avansați pentru reglarea automată și managementul predictiv.

Sinteză și impact

Acvaponia se conturează ca o alternativă credibilă la agricultura convențională, oferind un cadru durabil, eficient energetic și urban-compatibil. Cu cercetare continuă, standarde aplicabile și implementări susținute, inclusiv prin prototipuri experimentale finanțate, acvaponia poate deveni piatra de temelie a unui sistem alimentar rezilient, diversificat și auto-susținut, contribuind la securitatea alimentară și la durabilitatea ecosistemelor.

BIBLIOGRAFIE

1. [Abba2022] R. Abbasi, P. Martinez, and R. Ahmad. „An ontology model to represent aquaponics 4.0 system's knowledge.” *Information Processing in Agriculture*, vol. 9, no. 4, pp. 514–532, 2022.
2. [Acho2021] Achour D., „Modeling and Building Three Tank System”, *Advances in Communication Technology, Computing and Engineering*, RGN Publications, pp. 889 – 900, 2021.
3. [Age1999] S. O. Agele, G. O. Iremiren, and S. O. Ojeniyi. „Effects of plant density and mulching on the performance of late-season tomato (*Lycopersicon esculentum*) in southern Nigeria.” *The Journal of Agricultural Science*, vol. 133, no. 4, pp. 397–402, 1999.
4. [Alar2010] B. Alarcon, A. Aguado, R. Manga, and A. Josa, „A value function for assessing sustainability: Application to industrial buildings”, *Sustainability*, vol. 3, no. 1, pp. 35–50, 2010.
5. [Alex2021] **D. Alexuță**, „Stadiul actual al cercetărilor privind acvaponia si serele”, Referat 1 pentru doctorat. Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești, Școala Doctorală, 2021.
6. [Alex2022a] **D. Alexuță**, „Cercetare privind automatizarea sistemelor acvaponice” Referat 2 pentru doctorat. Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești, Școala Doctorală, 2022.
7. [Alex2022b] **D. Alexuță**, „Urban green areas using sustainable aquaponics”, *Scientific Papers. Series B. Horticulture*, vol. 66, no. 2, pp. 349-356, 2022.
8. [Alex2022c] **Alexuță, D.**, Balas, V. E., & Balas, M. M., „Recuperarea energiei electrice consumate într-un sistem acvaponic, cu ajutorul principiului de flotabilitate”, The 8th edition of International Symposium “Brainstorming in Agora Students’ Scientific Circle“ BACStud 2022, Universitatea Agora, Oradea, Băile Felix, Băile 1 Mai.
9. [Alex2023a] **D. Alexuță**, „Contribuții la automatizarea sistemelor acvaponice”, Referat 3 pentru doctorat. Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești, Școala Doctorală, 2023.

10. [Alex2023b] **Daniel Alexuță**, Marius M. Bălaș, „*The Study of Water Parameters in an Aquaponic System*”, XIII International Conference on Industrial Engineering and Environmental Protection IIZS 2023, Technical Faculty “Mihajlo Pupin” Zrenjanin, pag. 468-474, October 05-06, 2023, Zrenjanin, Serbia.
11. [Alex2023c] **Alexuță, D.**, Balas, V. E., & Balas, M. M., „*Aquaponics, pH, and other Parameters in Aquaponics: A Comprehensive Exploration*”, The 9th edition of International Symposium “Brainstorming in Agora Students’ Scientific Circle“ BACStud 2023, Universitatea Agora, Oradea, Băile Felix, Băile 1 Mai.
12. [Alex2024a] **Alexuță, D.**, Balas, V. E., Balas, M. M. „*A Systematic Review of Aquaponics: Advances in Automation and Sustainable Agriculture*”, Volume 14 Number 25, pp. 27-44, 2nd International Conference on Computer Science, Information Technology & AI (CSITAI 2024), December 28 ~ 29, 2024, Dubai, UAE.
13. [Alex2024b] **Daniel Alexuță**, Marius M. Bălaș, „*Aquaponics as an innovative technology for sustainability and environmental protection: challenges and industrial solutions*”, XIV International Conference on Industrial Engineering and Environmental Protection IIZS 2024, Technical Faculty “Mihajlo Pupin” Zrenjanin, October 03 – 04, 2024, pag. 468-412, Zrenjanin, Serbia.
14. [Alex2024c] **Alexuță, D.**, Balas, V. E., & Balas, M. M., „*Modelarea Matematică a Parametrilor dintr-o Seră Acvaponică*”, The 10th edition of International Symposium “Brainstorming in Agora Students’ Scientific Circle“ BACStud 2024, Universitatea Agora, Oradea, Băile Felix, Băile 1 Mai.
15. [Alex2025] **Daniel Alexuță**; Valentina E. Bălaș; Marius M. Bălaș, aprilie 2025, „*On the Three-Tank Aquaponic Configuration*”, International Journal of Computers Communications & Control (IJCCC), Vol. 20, Nr. 2, articol 7032.
16. [Amun2012] S. K. Amundson, „*Cultural techniques to improve yield and cost efficiency of greenhouse grown tomatoes*”, 2012.
17. [Anit2010] Bhatnagar, Anita. „*Culture fisheries in village ponds: a multi-location study in Haryana, India.*” Agriculture and Biology Journal of North America, 2010.
18. [Anit2013] A. B. Anita Bhatnagar and P. D. Pooja Devi „*Water quality guidelines for the management of pond fish culture*”, 2013.
19. [Anth1976] A. C. Anthonisen, R. C. Loehr, T. B. S. Prakasam and E. G. Srinath, „*Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid*”, Journal Water Pollution Control Federation, pp. 835–852, 1976.
20. [Azaz2016] M. Azaza, C. Tanougast, E. Fabrizio and A. Mami. „*Smart greenhouse fuzzy logic based control system enhanced with wireless data monitoring*”, Vol. 61, pp. 297–307, 2016.
21. [Bakk1991] J. C. Bakker, „*Analysis of humidity effects on growth and production of glasshouse fruit vegetables*”, Wageningen University and Research, 1991.
22. [Bala2009] Balas, Marius M. „*The Fuzzy-Interpolative Methodology*”, In Soft Computing Based Modeling in Intelligent Systems, pp. 145-167. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
23. [Bala2010] Balas M.M., Musca C. and Musca S., „*The Passive Greenhouses. Chapter 5 in Paths to Sustainable Energy*”, edited by J. Nathwani and A. Ng, InTech Open, pp. 75-92, 2010.

24. [Bala2018] Marius M. Bălaș, Mihaela Popa, Emanuela V. Muller, **Daniel Alexuță**, „*Intelligent Roof-Top Greenhouse Building*”, International Workshop on Soft Computing Applications, September 13–15, 2018, Arad, Romania, Springer, [Advances in Intelligent Systems and Computing](#) (AISC, volume 1222).
25. [Bala2021] Balas, Marius Mircea, Mihaela Popa, Emanuela Valentina Muller, Daniel Alexuta, and Luana Muresan. „*Intelligent roof-top greenhouse buildings*.” In International Workshop Soft Computing Applications, pp. 65-75. Cham: Springer International Publishing, 2018.
26. [Bala2023] A.-I. Balaur and A. I. Calin. „*Innovations in aquaponic systems for sustainable agriculture: a transnational review*”, Research Journal of Agricultural Science, vol. 55, no. 2, 2023.
27. [Baud2013] Baudoin, W., Nono-Womdim, R., Lutaladio, N., Hodder, A., Castilla, N., Leonardi, C., De Pascale, S., Qaryouti, M. and Duffy, R., „*Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: Principles for mediterranean climate areas*”, no. 217, 2013.
28. [Bjor2016] R. Bjornsdottir, G. V. Oddsson, R. I. Thorarinsdottir, and R. Unnthorsson. „*Taxonomy of means and ends in aquaculture production—Part 1: The functions*”, Water, vol. 8, no. 8, pp. 319, 2016.
29. [Blie2020] A. Bliedung, T. Dockhorn, J. Germer, C. Mayerl, and M. Mohr, „*Experiences of running a hydroponic system in a pilot scale for resource-efficient water reuse*”, Journal of Water Reuse and Desalination, vol. 10, no. 4, pp. 347–362, 2020.
30. [Bost2022] K. B. Bostancı and S. Ülger, „*Comparison of spinach cultivation in floating hydroponic system and soil in glasshouse and open field conditions*”, Mediterranean Agricultural Sciences, vol. 35, no. 1, pp. 7–14, 2022.
31. [Bsan2017] S. B Santhosh and S. N.P, „*Guidelines for water quality management for fish culture in Tripura*”, Publication No. 27. Santhosh, B. and Singh, N.P. 2007.ICAR Research Complex for NEH Region, Tripura Centre, Lembucherra, West Tripura, 799210, India. 10pp. 2017.
32. [Cabr2009] F. J. Cabrera, A. Baille, J. C. López, M. M. González-Real, and J. Pérez-Parra, „*Effects of cover diffusive properties on the components of greenhouse solar radiation*”, Biosystems Engineering, vol. 103, no. 3, pp. 344–356, 2009.
33. [Chal2012] Chalupa P., Novák J., Bobál V., „*Comprehensive Model of DTS200 Three Tank System in Simulink*,” International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, vol. 6, no. 2, pp. 358-365, 2012.
34. [Chan2024] P. Chandramenon, A. Aggoun, and F. Tchuénbou-Magaia, „*Smart approaches to Aquaponics 4.0 with focus on water quality- Comprehensive review*”, Computers and Electronics in Agriculture, vol. 225, pp. 109256, 2024.
35. [Chau2019] G. Chaudhary, S. Kaur, B. Mehta, and R. Tewani, „*Observer based fuzzy and PID controlled smart greenhouse*”, Journal of Statistics and Management Systems, vol. 22, no. 2, pp. 393–401, 2019.
36. [Chuy2023] T. D. Chuyen, D. D. Nguyen, N. C. Cuong, and V. V. Thong, „*Design and manufacture control system for water quality based on IoT technology for aquaculture in the Vietnam*”, Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, vol. 12, no. 4, pp. 1893–1900, 2023.
37. [Cock1992] K. E. Cockshull, C. J. Graves, and C. R. J. Cave, „*The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes*”, Journal of Horticultural Science, vol. 67, no.1, pp. 11–24, 1992.

38. [Cruz2022] J. A. Cruz-Anchiraico, L. N. Mantari-Ramos, J. D. A. Cangalaya, and D. Huamanchahua, „*Design of an automated system of PH and water level for an aquaponic module*”, IEEE, 2022.
39. [Dale2009] Dale, S., Dragomir, T.L., „*Interpolative-Type Control Solutions*”, In: Studies in Computational Intelligence - Soft Computing Based Modelling in Intelligent Systems. Springer, vol. 196, pp. 169-203, 2009.
40. [Desp2011a] D. Despommier, „*The vertical farm: Controlled environment agriculture carried out in tall buildings would create greater food safety and security for large urban populations*”, Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, vol. 6, no.2, pp. 233–236, 2011.
41. [Dull2023] H. Dullah, A. N. Ahmed, P. Kumar, and A. Elshafie, „*Integrated nonlinear autoregressive neural network and Holt winters exponential smoothing for river streaming flow forecasting at Aswan High*”, Earth Science Informatics, vol. 16, no. 1, pp. 773–786, 2023.
42. [Dumi2013] A. Dumitraşcu, D. Ştefănoiu, and J. Culiţă, „*Remote Monitoring and Control System for Environment Applications*” Springer Berlin Heidelberg, 2013.
43. [Ebel2006] J. M. Ebeling, M. B. Timmons, and J. J. Bisogni, „*Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems*”, Aquaculture, vol. 257, no. 1-4, pp. 346–358, 2006.
44. [Ehre1997] J. Ehrenfeld and N. Gertler, „*Industrial Ecology in Practice: The Evolution of Interdependence at Kalundborg*”, Journal of Industrial Ecology, vol. 1, no. 1, pp. 67–79, 1997.
45. [Elai1983] F. El-Aidy, S. Moustafa, and M. El-Afry, „*Influence of shade on growth and yield of tomatoes cultivated in summer season in [Egypt]*” Tanta University Journal of Agricultural Research (Egypt), vol. 9, no. 1, 1983.
46. [Elgi1992] El-Gizawy, A. M., M. M. F. Abdallah, H. M. Gomaa, and S. S. Mohamed, „*Effect of different shading levels on tomato plants*”, 2. Yield and fruit quality. In Symposium on Soil and Soilless Media under Protected Cultivation in Mild Winter Climates, vol. 323, pp. 349-354. 1992.
47. [Elsb2025] A. M. Elsbaay, N. K. Ismail, M. Y. Karawya, A. M. Ragab, and M. M. Kassem, „*Performance analysis of aquaponics system for longifolia lettuce production in different growth media*”, Scientific Reports, vol. 15, no.1, pp. 14155, 2025.
48. [Eneh2023] Eneh, A. H., Udanor, C. N., Ossai, N. I., Aneke, S. O., Ugwoke, P. O., Obayi, A. A., ... & Okereke, G. E., „*Towards an improved internet of things sensors data quality for a smart aquaponics system yield prediction*”, MethodsX, 11, 102436, 2023.
49. [Fuen2016] A. D. L. Fuente, J. Armengou, O. Pons, and A. Aguado, „*Multi-criteria decision-making model for assessing the sustainability index of wind-turbine support systems: Application to a new precast concrete alternative*”, Journal of Civil Engineering and Management, vol. 23, no. 2, pp. 194–203, 2016.
50. [Fuka2011] T. Fukatsu, T. Kiura, and M. Hirafuji, „*A web-based sensor network system with distributed data processing approach via web application*”, Computer Standards & Interfaces, vol. 33, no. 6, pp. 565–573, 2011.
51. [Gadd2014] A. Gaddam, M. Al-Hrooby, and W. F. Esmael, „*Designing a Wireless Sensors Network for Monitoring and Predicting Droughts*”, International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, vol. 7, no. 5, pp. 1–6, 2014.

52. [Garg1996] S. K. Garg and A. Bhatnagar, „*Effect of varying closes of organic and inorganic fertilizers on plankton production and fish biomass in brackish water fish ponds*”, Aquaculture Research, vol. 27, no. 3, pp. 157–166, 1996.
53. [Godd2019] S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, and G. M. Burnell, „*Aquaponics food production systems: Combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future*”, Springer Nature, 2019.
54. [Gonz2022] J. P. González, D. Sanchez-Londoño, and G. Barbieri, „*A monitoring digital twin for services of controlled environment agriculture*”, IFAC-papersonline, vol. 55, no. 19, pp. 85–90, 2022.
55. [Hary2019] Haryanto, M. Ulum, A. F. Ibadillah, R. Alfita, K. Aji, and R. Rizkyandi, „*Smart aquaponic system based Internet of Things (IoT)*”, IOP Publishing, 2019.
56. [Huzh2015] H. Z. Hu Zhen, L. J. Lee JaeWoo, K. Chandran, K. S. Kim SungPyo, A. C. Brotto, and S. K. Khanal, „*Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics*”, 2015.
57. [Ilic2012] Z. S. Ilić, L. Milenković, L. Stanojević, D. Cvetković, and E. Falik, „*Effects of the modification of light intensity by color shade nets on yield and quality of tomato fruits*”, Scientia Horticulturae, vol. 139, pp. 90–95, 2012.
58. [Jaco2017] Jacob, N.K., „*IoT powered portable aquaponics system*” In Proceedings of the Second International Conference on Internet of things, Data and Cloud Computing, pp. 1-5, 2017.
59. [Janj2011] S. Janjai, P. Intawee, J. Kaewkiew, C. Sritus, and V. Khamvongsa, „*A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People’s Democratic Republic*”, Renewable Energy, vol. 36, no. 3, pp. 1053–1062, 2011.
60. [Jiyu2016] J. Y. Ji YuHan, J. Y. Jiang YiQiong, L. T. Li Ting, Z. M. Zhang Man, S. S. Sha Sha, and L. M. Li MinZan, „*An improved method for prediction of tomato photosynthetic rate based on WSN in greenhouse*”, 2016.
61. [Jose2025] Jose J.A.C., „*An automated small-scale aquaponics system design using a closed loop control*”, Environmental Changes 19, 101127, 2025.
62. [Kalo2012] A. Kaloxylou, R. Eigenmann, F. Teye, Z. Politopoulou, S. Wolfert, C. Shrank, M. Dillinger, I. Lampropoulou, E. Antoniou, and L. Pesonen, „*Farm management systems and the Future Internet era*”, Computers and electronics in agriculture, vol. 89, pp. 130–144, 2012.
63. [Kalo2014] A. Kaloxylou, A. Groumas, V. Sarris, L. Katsikas, P. Magdalinos, E. Antoniou, Z. Politopoulou, S. Wolfert, C. Brewster, and R. Eigenmann, „*A cloud-based Farm Management System: Architecture and implementation*”, Computers and electronics in agriculture, vol. 100, pp. 168–179, 2014.
64. [Kari2019] D. Karimanzira and T. Rauschenbach, „*Enhancing aquaponics management with IoT-based Predictive Analytics for efficient information utilization*”, Information Processing in Agriculture, vol. 6, no. 3, pp. 375–385, 2019.
65. [Kagg2022] <https://www.kaggle.com/datasets/ogbuokiriblessing/sensor-based-aquaponics-fish-pond-datasets> accesat in 2022/2023
66. [Khao2021] T. Khaoula, R. Ait Abdelouahid, I. Ezzahoui, and A. Marzak, „*Architecture design of monitoring and controlling of IoT-based aquaponics system powered by solar energy*”, Procedia Computer Science, vol. 191, pp. 493–498, 2021.

67. [Khor2022] W. H. Khor, H.-S. Kang, J.-W. Lim, K. Iwamoto, C. H.-H. Tang, P. S. Goh, L. K. Quen, N. M. R. B. Shaharuddin, and N. Y. G. Lai, „*Microalgae cultivation in offshore floating photobioreactor: State-of-the-art, opportunities and challenges*”, *Aquacultural Engineering*, vol. 98, pp. 102269, 2022.
68. [Kiri2011] J. K. Kiri, F. M. Itulya, and V. N. Mwaja, „*Effects of nitrogen and spacing on fruit yield of tomato*”, *African Journal of Horticultural Science*, vol. 5, pp. 50–60, 2011.
69. [Krei2009] J. F. Kreider, P. S. Curtiss, and A. Rabl, „*Heating and cooling of buildings: Design for efficiency*”, CRC Press., 2009.
70. [Kubo2014] J. Kubota, L. Liyantono, C. A. Sutoyo Sutoyo, T. Ito, S. K. Saptomo, I. W. Budiasa, B. Setiawan, M. Mizoguchi, and H. Kato, „*Performance of quasi-real-time paddy field monitoring systems in Indonesia*”, *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, vol. 37, pp. 10, 2014.
71. [Kuhn2010] D. D. Kuhn, D. D. Drahos, L. Marsh, and G. J. Flick Jr., „*Evaluation of nitrifying bacteria product to improve nitrification efficacy in recirculating aquaculture systems*”, *Aquacultural Engineering*, vol. 43, no. 2, pp. 78–82, 2010.
72. [Kyaw2017] T. Y. Kyaw and A. K. Ng., „*Smart aquaponics system for urban farming*”, *Energy procedia*, vol. 143, pp. 342–347, 2017.
73. [Laub2015] Laubwald E., „*Coupled tanks systems*”, <http://www.control-sys-tems-principles.co.uk/whitepapers/coupled-tanks-systems.pdf>.
74. [Laza2017] E. A. Laza, I. Caba, A. Pop, C. Mircea, A. Anghel, I. Voicea, C. Tudora, and M. Neagoe, „*Studies and researches regarding the optimization of water quality from a recirculating aquaculture system using a water denitrification installation*”, 2017.
75. [Levc2022] A. P. Levchuk, V. I. Maksin, O. V. Zorina, S. A. Shevchuk, and E. M. Matselyuk, „*Adaptive microalgae disinfection system as the basis of a new technological approach to closed water supply installations*”, *Land Reclamation and Water Management*, no. 1, pp. 104–114, 2022.
76. [Li2018] Y. Li, Y. Ding, D. Li, and Z. Miao, „*Automatic carbon dioxide enrichment strategies in the greenhouse: A review*”, *Biosystems engineering*, vol. 171, pp. 101–119, 2018.
77. [Love2015] D. C. Love, M. S. Uhl, and L. Genello, „*Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore*”, *Maryland, United States. Aquacultural engineering*, vol. 68, pp. 19–27, 2015.
78. [Lowe2022] M. Lowe, R. Qin, and X. Mao, „*A review on machine learning, artificial intelligence, and smart technology in water treatment and monitoring*”, *Water*, Vol. 14, no. 9, pp. 1384, 2022.
79. [Mama2017] M. N. Mamatha and S. N. Namratha, „*Design & implementation of indoor farming using automated aquaponics system*”, *IEEE*, 2017.
80. [Mana2018] M. M. Manav Mehra, S. S. Sameer Saxena, S. S. Suresh Sankaranarayanan, R. J. Tom, and M. Veeramanikandan, „*IoT based hydroponics system using Deep Neural Networks*”, 2018.
81. [Mand2018] J. P. Mandap, D. Sze, G. N. Reyes, S. M. Dumlao, R. Reyes, and W. Y. D. Chung, „*Aquaponics pH level, temperature, and dissolved oxygen monitoring and control system using raspberry pi as network backbone*”, *IEEE*, 2018.
82. [Manj2017] M. Manju, V. Karthik, S. Hariharan, and B. Sreekar, „*Real time monitoring of the environmental parameters of an aquaponic system based on Internet of Things*”, *IEEE*, 2017.

83. [Mauc2018] C. Maucieri, C. Nicoletto, R. Junge, Z. Schmautz, P. Sambo, and M. Borin, „*Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review*”, Italian Journal of Agronomy, vol. 13, no. 1, pp. 1012, 2018.
84. [Mitc2014] R. G. Mitchell, H. M. Spliethoff, L. N. Ribaud, D. M. Lopp, H. A. Shayler, L. G. Marquez-Bravo, V. T. Lambert, G. S. Ferenz, J. M. Russell-Anelli, and E. B. Stone, „*Lead (Pb) and other metals in New York City community garden soils: Factors influencing contaminant distributions*”, Environmental Pollution, vol. 187, pp. 162–169, 2014.
85. [Mizo2011] M. Mizoguchi, T. Ito, A. Chusnul, S. Mitsuishi, and M. Akazawa, „*Quasi real-time field network system for monitoring remote agricultural fields*”, IEEE, 2011.
86. [Modu2020b] F. Modu, A. Adam, F. Aliyu, A. Mabu, and M. Musa, „*A survey of smart hydroponic systems*”, Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, vol. 5, no. 1, pp. 233–248, 2020.
87. [Mora2008] R. Morais, M. A. Fernandes, S. G. Matos, C. Serôdio, P. Ferreira, and M. Reis, „*A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture*”, Computers and electronics in agriculture, vol. 62, no. 2, pp. 94–106, 2008.
88. [Mura2017] S. Z. Murad, A. Harun, S. N. Mohyar, R. Sapawi, and S. Y. Ten, „*Design of aquaponics water monitoring system using Arduino microcontroller*”, AIP Publishing LLC., 2017.
89. [Naga2017] A. M. Nagayo, C. Mendoza, E. Vega, R. K. Al Izki, and R. S. Jamisola, „*An automated solar-powered aquaponics system towards agricultural sustainability in the Sultanate of Oman*”, IEEE, 2017.
90. [Nayl2021] Naylor R.L., Hardy R.W., Buschmann A.H., Bush S.R., Cao L., Klinger D.H., Little D.C., Lubchenko J., Shumway S.E., Troell M. A., „*A 20 Year Retrospective Review of Global Aquaculture*”, Nature, vol. 591, pp. 551–563, 2021.
91. [Nelk2007] Nelkin, J., and T. Caplow, „*Sustainable controlled environment agriculture for urban areas*”, In International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys2007 801, pp. 449–456. 2007.
92. [Ng2021] Ng, Andrew Keong, and R. Mahkeswaran, „*Fostering computational thinking and systems thinking through aquaponics capstone projects*”, In 2021 IEEE International Conference on Engineering, Technology & Education (TALE), pp. 1039–1044, IEEE, 2021.
93. [Nise1980] Nisen, A., and S. Coutsse, „*Photometric properties of double wall plastics used as covering for greenhouses*” In Symposium on More Profitable Use of Energy in Protected Cultivation 115, pp. 85–98. 1980.
94. [Nugr2013] A. P. Nugroho, T. Okayasu, E. Inoue, Y. Hirai, și M. Mitsuoka, „*Development of actuation framework for agricultural informatization supporting system*”, IFAC Proceedings, vol. 46, no. 4, pp. 181–186, 2013.
95. [Nugr2016] A. P. Nugroho, T. Okayasu, T. Hoshi, E. Inoue, Y. Hirai, M. Mitsuoka, and L. Sutiarto, „*Development of a remote environmental monitoring and control framework for tropical horticulture and verification of its validity under unstable network connection in rural area*”, Computers and Electronics in Agriculture, vol. 124, pp. 325–339, 2016.
96. [Odem2018] M. Odema, I. Adly, A. Wahba, and H. Ragai, „*Smart Aquaponics System for Industrial Internet of Things (IIoT)*”, Springer International Publishing, 2018.

97. [Okay2010] Okayasu, Takashi, N. Yamabe, Atsushi Marui, T. Miyazaki, Muneshi Mitsuoka, and Eiji Inoue, „*Development of field monitoring and work recording system in agriculture*”, In Proc. 5th Int. Symp. Mach. Mech. Agr. Biosys. Engng.(ISMAB), CD-ROM, 2010.
98. [Petc2025] Petcuț-Lasc A. A., Valentina E. Bălaș, Florin M. Petcuț, R. Rotar, **Daniel Alexuță**, ianuarie 2025, „*Performance Evaluation of a Residential Photovoltaic System in Matlab Simulink*”, 2025 IEEE 23rd World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI), IEEE, pp. 435–440.
99. [Petr2014] Ștefan M. Petrea, „*Cercetări privind optimizarea tehnicilor acvaponice de control a calității apei în sistemele recirculante de acvacultură*”, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, 2014.
100. [Popa2022] Popa, M., **Alexuță, D.**, Balas, V.E. „*Fuzzy-interpolative control of temperatures for the intelligent rooftop greenhouse*”, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 43(2), 2022, pp. 1793-1797.
101. [Popa2025] Mihaela Popa, **Daniel Alexuță**, Marius Mircea Balas, Valentina Emilia Balas, „*Current Trends in Research on Temperature Control in Rooftop Greenhouse*”, 2025, 18th International Conference on Engineering of Modern Systems (EMES), 29-30 May, 2025, Oradea, Romania.
102. [Pope2009] Popescu M.C., Mastorakis N.E., „*Optimal Flow Control of a Three Tank System*”, International Journal of Mathematics and Computers in Simulation, vol. 3, no. 4, pp. 179-186, 2009.
103. [Pons2012] O. Pons și A. Aguado, „*Integrated value model for sustainable assessment applied to technologies used to build schools in Catalonia, Spain*”, Building and Environment, vol. 53, pp. 49–58, 2012.
104. [Raga2021] S. Ragaveena, A. Shirley Edward, și U. Surendran, „*Smart controlled environment agriculture methods: A holistic review*”, Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, vol. 20, no. 4, pp. 887–913, 2021.
105. [Ray2023] S. S. Ray, R. K. Verma, A. Singh, M. Ganesapillai, și Y.-N. Kwon, „*A holistic review on how artificial intelligence has redefined water treatment and seawater desalination processes*”, Desalination, vol. 546, pp. 116221, 2023.
106. [Ren2018b] Q. Ren, L. Zhang, Y. Wei, și D. Li, „*A method for predicting dissolved oxygen in aquaculture water in an aquaponics system*”, Computers and electronics in agriculture, vol. 151, pp. 384–391, 2018.
107. [Reye2020] A. Reyes Yanes, „*Towards Aquaponics 4.0: A Framework for Automation, IoT, and Smart Systems Implementations in Indoor Farming*”, 2020.
108. [Sall2019] R. Sallenave, „*Understanding water quality parameters to better manage your pond*”, College of Agricultural, Consumer and Environmental Sciences, 2019.
109. [Sand2008] S. Sandu, B. Brazil, și E. Hallerman, „*Efficacy of a pilot-scale wastewater treatment plant upon a commercial aquaculture effluent: I. Solids and carbonaceous compounds*”, Aquacultural Engineering, vol. 39, no. 2-3, pp. 78–90, 2008.
110. [Sere2021] Seretransilvania. <https://seretransilvania.ro/ro/> (Accesat 19. 09. 2025).
111. [Sero2001] C. Serodio, J. B. Cunha, R. Morais, C. Couto, și J. Monteiro, „*A networked platform for agricultural management systems. Computers and electronics in agriculture*”, vol. 31, no. 1, pp. 75–90, 2001.

112. [Sham2018] R. R. Shamshiri, F. Kalantari, K. C. Ting, K. R. Thorp, I. A. Hameed, C. Weltzien, D. Ahmad, Z. M. Shad, „*Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture*”, International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(1), 1-22, 2018.
113. [Skar2020] I. Skarga-Bandurova, Y. Krytska, A. Velykzhanin, L. Barbaruk, O. Suvorin, și M. Shorokhov, „*Emerging tools for design and implementation of water quality monitoring based on IoT*”, Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly, no. 24, pp. 1–14, 2020.
114. [Simk2020] Simke, A., „*Aquaponics Presents a New Way to Grow Sustainable Fish and Veggies*”, Forbes, Apr. 26, 2020.
115. [Some2014] C. Somerville, M. Cohen, E. Pantanella, A. Stankus, și A. Lovatelli, „*Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming*”, FAO Fisheries and aquaculture technical paper, no. 589, pp. I, 2014.
116. [Sree2018] Sreelekshmi, B., and K. N. Madhusoodanan, „Automated aquaponics system” In Emerging Trends in Engineering, Science and Technology for Society, Energy and Environment, pp. 719-724 CRC Press, 2018.
117. [Ston2004] N Stone, Nathan Mayhew, and Hugh K. Thomforde, „*Understanding your fish pond water analysis report*”, Cooperative Extension Program, University of Arkansas at Pine Bluff, US Department of Agriculture and County Governments Cooperating, 2004.
118. [Suba2020] A. F. Subahi și K. E. Bouazza, “*An intelligent IoT-based system design for controlling and monitoring greenhouse temperature*”, IEEE, vol. 8, pp. 125488–125500, 2020.
119. [Suha2020] H. Suhardiyanto, K. B. Seminar, și R. P. A. Setiawan, „*Development of a control system for lettuce cultivation in floating raft hydroponics*”, IOP Publishing, 2020.
120. [Teo2021] Y. L. Teo și Y. I. Go, „*Techno-economic-environmental analysis of solar/hybrid/storage for vertical farming system: A case study, Malaysia*”, Renewable Energy Focus, vol. 37, pp. 50–67, 2021.
121. [Tidw2012] Tidwell, James H., „*Aquaculture production systems*”, vol. 434. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2012.
122. [Tyso2008] R. V. Tyson, E. H. Simonne, D. D. Treadwell, J. M. White, și A. Simonne, „*Reconciling pH for ammonia biofiltration and cucumber yield in a recirculating aquaponic system with perlite biofilters*”, HortScience, vol. 43, no. 3, pp. 719–724, 2008.
123. [Tyso2011] R. V. Tyson, D. D. Treadwell, și E. H. Simonne, „*Opportunities și challenges to sustainability in aquaponic systems*”, HortTechnology, vol. 21, no. 1, pp. 6–13, 2011.
124. [Udan2022] Udanor, C. N., Ossai, N. I., Nweke, E. O., Ogbuokiri, B. O., Eneh, A. H., Ugwuishiwu, C. H., ... & Christiana, A., „*An internet of things labelled dataset for aquaponics fish pond water quality monitoring system*”, Data in brief, 43, 108400, 2022.
125. [Vali2018] F. L. Valiente, R. G. Garcia, E. J. A. Domingo, S. M. T. Estante, E. J. L. Ochaves, J. C. C. Villanueva, și J. R. Balbin, „*Internet of things (IOT)-based mobile application for monitoring of automated aquaponics system*”, IEEE, 2018.
126. [Vern2017] W. Vernandhes, N. S. Salahuddin, A. Kowanda, și S. P. Sari, „*Smart aquaponic with monitoring and control system based on IoT*”, IEEE, 2017.
127. [Vilb2016a] B. Vilbergsson, G. V. Oddsson, și R. Unnthorsson, „*Taxonomy of means and ends in aquaculture production—Part 2: The technical solutions of controlling solids, dissolved gasses and pH*”, Water, vol. 8, no. 9, pp. 387, 2016.

128. [Vilb2016b] B. Vilbergsson, G. V. Oddsson, și R. Unnthorsson, „*Taxonomy of means and ends in aquaculture production—Part 3: The technical solutions of controlling N compounds, organic matter, P compounds, metals, temperature and preventing disease*”, *Water*, Issue 11, vol. 8, no. 11, pp. 506, 2016.
129. [Vilb2016c] B. Vilbergsson, G. V. Oddsson, și R. Unnthorsson, „*Taxonomy of Means and Ends in Aquaculture Production—Part 4: The Mapping of Technical Solutions onto Multiple Treatment Functions*”, *Water*, vol. 8, no. 11, pp. 487, 2016.
130. [Wada2019] Wada, Teruo, „*Theory and technology to control the nutrient solution of hydroponics*”, In *Plant factory using artificial light*, pp. 5-14, Elsevier, 2019.
131. [Wang2015] Wang, Dan, Jinling Zhao, Linsheng Huang, and Deheng Xu, „*Design of a smart monitoring and control system for aquaponics based on OpenWrt*”, In *5th International Conference on Information Engineering for Mechanics and Materials*, pp. 937-942, Atlantis Press, 2015.
132. [Webe2007] P. K. Weber-Scannell și L. K. Duffy, „*Effects of total dissolved solids on aquatic organisms: A review of literature and recommendation for salmonid species*”, 2007.
133. [Wei2019] Y. Wei, W. Li, D. An, D. Li, Y. Jiao, și Q. Wei, „*Equipment and intelligent control system in aquaponics: A review*”, *IEEE*, vol. 7, pp. 169306–169326, 2019.
134. [Wern1992] Werner, Hal, „*Measuring soil moisture for irrigation water management*”, Cooperative Extension Service, South Dakota State University, US Department of Agriculture, 1992.
135. [Witz2019] O. Witzel, S. Wilm, D. Karimanzira, și D. Baganz, „*Controlling and regulation of integrated aquaponic production systems—An approach for a management execution system (MES)*”, *Information Processing in Agriculture*, vol. 6, no. 3, pp. 326–334, 2019.
136. [Wong2017] S. Wongkiew, Z. Hu, K. Chandran, J. W. Lee, și S. K. Khanal, „*Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review*”, *Aquacultural Engineering*, vol. 76, pp. 9–19, 2017.
137. [Yegu2023] U. Yegül, „*Development of an embedded software and control kit to be used in soilless agriculture production systems*”, *Sensors*, vol. 23, no. 7, pp. 3706, 2023.
138. [Zamo2019] M. A. Zamora-Izquierdo, J. Santa, J. A. Martínez, V. Martínez, și A. F. Skarmeta, „*Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing*”, *Biosystems engineering*, vol. 177, pp. 4–17, 2019.
139. [Zhan2020a] S. Zhang, Y. Guo, H. Zhao, Y. Wang, D. Chow, și Y. Fang, „*Methodologies of control strategies for improving energy efficiency in agricultural greenhouses*”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 274, pp. 122695, 2020.
140. [Zhan2020b] Y. Zhang, Y. Li, Z. Sun, H. Xiong, R. Qin, și C. Li, „*Cost-imbalanced hyper parameter learning framework for quality classification*”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 242, pp. 118481, 2020.
141. [Zhou2007] Zhou, Y., Yang, X., Guo, X., Zhou, M., & Wang, L., „*A design of greenhouse monitoring & control system based on ZigBee wireless sensor network*”, In *2007 International Conference on wireless communications, networking and Mobile computing*, pp. 2563-2567, IEEE, 2007.
142. [Zhou2023] X. Zhou, J. Wang, H. Zhang, și Q. Duan, „*Application of a hybrid improved sparrow search algorithm for the prediction and control of dissolved oxygen in the aquaculture industry*”, *Applied Intelligence*, vol. 53, no. 7, pp. 8482–8502, 2023.